

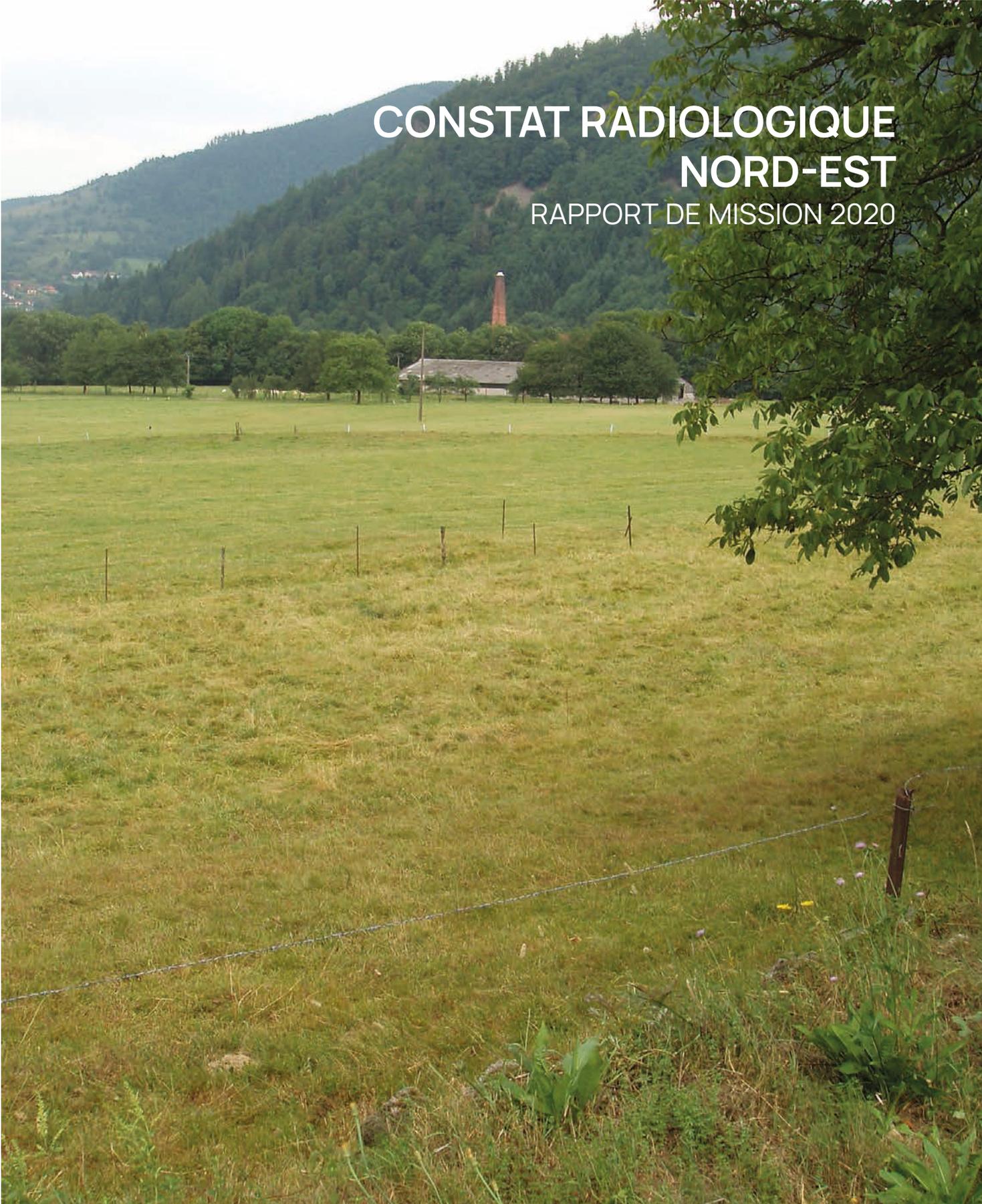


RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

IRSN

INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE



CONSTAT RADIOLOGIQUE NORD-EST

RAPPORT DE MISSION 2020

MEMBRE DE

ETSON

L'EXPERT PUBLIC DES RISQUES NUCLÉAIRES ET RADIOLOGIQUES

Expertiser, rechercher, protéger, anticiper, partager, telles sont les missions de l'IRSN au service des pouvoirs publics et de la population.

La singularité de l'Institut réside dans sa capacité à associer chercheurs et experts pour anticiper les questions à venir sur l'évolution et la maîtrise des risques nucléaires et radiologiques.

Les femmes et les hommes de l'IRSN ont à cœur de faire connaître leurs travaux et de partager leurs savoirs avec la société. Ils contribuent ainsi à améliorer l'accès à l'information et le dialogue avec les parties prenantes.

L'Institut concourt aux politiques publiques de sûreté et sécurité nucléaires, de santé, d'environnement et de gestion de crise.

Établissement Public à caractère Industriel et Commercial (EPIC), sous la tutelle conjointe du ministre chargé de l'Environnement, du ministre de la Défense, et des ministres chargés de l'Énergie, de la Recherche et de la Santé, l'IRSN inscrit pleinement son action dans les politiques de modernisation de l'État avec sa démarche de management des risques et la mise en œuvre d'une politique globale en matière de responsabilité sociétale.

Dans le cadre de ses missions, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) contribue notamment à la veille permanente en radioprotection sur le territoire national. À cet égard, la surveillance radiologique de l'environnement, réalisée par l'IRSN, participe :

- à la vérification du fonctionnement des installations qui rejettent de la radioactivité dans l'environnement ;
- à l'analyse de l'évolution des niveaux de radioactivité – dans le temps et l'espace – et à la détection d'élévations inhabituelles de ces niveaux ;
- à l'évaluation de l'exposition des populations et des écosystèmes aux rayonnements ionisants ;
- à la mise en place de moyens susceptibles d'être mobilisés en situation d'urgence radiologique ou en situation post-accidentelle ;
- à la qualification des modèles de dispersion de la radioactivité dans l'environnement et d'évaluation de ses impacts.

Elle est assortie d'une obligation de transparence qui conduit l'Institut à publier régulièrement ses résultats de mesure et des synthèses sur l'état radiologique des territoires.

L'INSTITUT
COMPTE
ENVIRON
1 700
COLLABORATEURS

parmi lesquels
de nombreux
ingénieurs,
médecins,
agronomes,
vétérinaires,
techniciens,
experts et
chercheurs.

Pour mener à bien
ses missions,
l'IRSN dispose

**D'UN BUDGET
D'ENVIRON**

280 M€

DES RÉSEAUX DE PRÉLÈVEMENT ET DE MESURE CONÇUS POUR UNE SURVEILLANCE RÉGULIÈRE

La surveillance radiologique régulière de l'environnement faite par l'IRSN repose sur des réseaux de balises de télé-détection et de stations de prélèvement des milieux, installés de manière permanente en des points particuliers du territoire, au plus proche des installations nucléaires ou en dehors de l'influence de celles-ci.

Deux réseaux pour surveiller l'air

- **Le réseau Téléray**, constitué de sondes qui mesurent en continu le débit de dose ambiant dans l'air. Elles transmettent en temps réel leurs données à la salle de télé-surveillance de l'IRSN. Dès qu'une augmentation anormale de radioactivité est détectée, une alarme est envoyée à l'IRSN et une investigation est menée.
- **Le réseau OPERA-Air**, qui est constitué de préleveurs d'aérosols fonctionnant en continu. Ils permettent d'obtenir une mesure précise, grâce à une analyse en laboratoire, des radionucléides fixés sur les aérosols présents dans l'air.

Deux réseaux pour surveiller l'eau

- **Le réseau Hydrotéléray** mesure en continu la radioactivité des principaux fleuves français recevant les effluents des centrales nucléaires.
- **Le réseau des hydrocollecteurs** prélève en continu les eaux et les matières en suspension dans les cours d'eaux situés généralement en aval des installations nucléaires.

Un réseau pour surveiller les aliments

Avec l'aide des réseaux de préleveurs et des laboratoires de la direction générale de l'alimentation (DGAL) et de la direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF), l'IRSN organise la collecte périodique et la mesure de denrées alimentaires pour en évaluer la radioactivité.

Et les autres compartiments...

L'IRSN complète cette surveillance régulière par le prélèvement et l'analyse d'autres supports environnementaux de la radioactivité (sol, herbe, sédiment, mousse terrestre, mousse aquatique, algue...). Ils permettent l'établissement de chroniques précieuses dans l'optique d'une analyse temporelle des évolutions.

UNE APPROCHE TERRITORIALISÉE...

En complément de sa surveillance régulière, l'IRSN réalise des études ponctuelles – appelées « constats radiologiques » – dont l'objectif est de dresser la synthèse des connaissances sur les niveaux de radioactivité à l'échelle d'une région, d'un territoire, d'un bassin versant... et, le cas échéant, de réaliser de nouvelles campagnes de prélèvements pour améliorer le niveau des connaissances. Ces campagnes permettent la mesure d'échantillons rarement analysés, de denrées présentant une valeur économique particulière pour le territoire ou de répondre à des attentes ou des questions particulières des parties prenantes (collectivités locales, associations de citoyens, commissions d'information...). Ces constats sont l'occasion pour le citoyen de mieux comprendre et de s'approprier une information par nature complexe et d'agir sur la nature même de la surveillance effectuée.

RÉSUMÉ

La surveillance régulière de la radioactivité dans l'environnement réalisée par l'IRSN fait appel à des indicateurs relativement invariants dans le temps, dans le but de détecter d'éventuelles évolutions, d'éventuels écarts aux niveaux de référence. Pour des raisons de moyens, elle ne peut prétendre être exhaustive quant à la nature des indicateurs ou des radionucléides recherchés.

Pour la compléter, l'IRSN a réalisé ponctuellement des études à l'échelle de régions. Ces études, dénommées « constats radiologiques régionaux », visent à la fois à dresser le bilan des connaissances acquises, à caractériser des zones ne faisant pas l'objet d'un suivi régulier et à accroître la diversité des matrices environnementales analysées, en portant une attention particulière aux denrées alimentaires. Elles appellent des campagnes de prélèvement spécifiques et permettent, le cas échéant, de rechercher des radionucléides non analysés de manière systématique.

Le présent constat radiologique, mené sur l'emprise de treize départements du quart nord-est⁽¹⁾ de la France métropolitaine, vise principalement :

- l'amélioration des connaissances des niveaux de radioactivité artificielle à distance des installations nucléaires⁽²⁾ (caractérisation du bruit de fond radiologique). Comme attendu, ces niveaux sont faibles et s'inscrivent dans les gammes de valeurs régulièrement mesurées dans d'autres régions de France métropolitaine. Ils résultent des retombées des essais nucléaires atmosphériques menés de 1945 à 1980 et de l'accident de Tchernobyl en 1986 ; les traces spécifiques de l'accident de Fukushima n'étant plus décelables aujourd'hui.

Les mesures réalisées dans le cadre de ce constat confirment l'hétérogénéité des niveaux de radioactivité rencontrés sur les zones les plus touchées par ces retombées globales anciennes – elles s'étalent parfois sur plusieurs ordres de grandeur en fonction de la matrice et du radionucléide. Elles confirment également que les marquages encore détectables évoluent très lentement. Dans le cadre de cette étude, les plus fortes activités en ¹³⁷Cs sont observées dans les sols non remaniés et dans les champignons, à des niveaux proches de ceux déjà mesurés dans le cadre du constat radiologique dédié à ces zones de forte rémanence des retombées globales anciennes⁽³⁾ ;

- la définition des zones d'influence des principales installations nucléaires de la région :

– Centres nucléaires de production d'électricité d'EDF (CNPE de Chooz, Cattenom et Fessenheim). Les rejets d'effluents liquides et gazeux des CNPE implantés dans

le Nord-Est de la France induisent un marquage ténu et localisé de l'environnement. En milieu terrestre et à proximité des CNPE, seuls le tritium et le carbone-14 sont parfois mesurés à des niveaux légèrement supérieurs à ceux observés à distance des CNPE. En milieu aquatique, ces deux radionucléides marquent de manière un peu plus nette les matrices biologiques et minérales. Certains produits d'activation (⁵⁴Mn, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co) ou de fission (^{123m}Te, ¹³⁷Cs) sont détectés de temps à autre en aval de ces centrales, à l'état de traces. L'influence spécifique de la centrale de Fessenheim sur le Rhin est parfois difficile à établir, les rejets des centrales suisses introduisant un marquage amont du fleuve ;

- Centre du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) de Valduc. Les activités du centre nucléaire de Valduc induisent un marquage de l'environnement terrestre par le tritium au-delà d'un rayon de quelques dizaines de kilomètres autour du site. Le marquage du milieu aquatique par le tritium s'observe quant à lui sur un périmètre plus restreint. À l'exception de ces marquages nets de l'environnement par le tritium, les niveaux de radioactivité artificielle (¹³⁷Cs, ¹³¹I, ⁹⁰Sr, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, ²⁴¹Am) détectés dans l'environnement du site dans le cadre de ce constat sont proches de ceux généralement observés à distance d'installations nucléaires. Par ailleurs, un marquage en uranium-236 a été détecté ponctuellement dans le milieu aquatique ;

- à obtenir une image des marquages environnementaux résultants des rejets des principaux centres hospitaliers pratiquant le radiodiagnostic et la radiothérapie ;

En aval des stations de traitement d'épuration des eaux, les résultats des mesures d'iode-131 attestent d'un marquage, parfois net (d'un à quelques milliers de Bq/kg) des végétaux aquatiques. Les concentrations les plus élevées sont systématiquement observées dans les petits cours d'eau dont les capacités de dilution sont les plus faibles (ex. Dijon, Nancy, Épinal) ;

- à préciser l'origine des niveaux élevés de tritium régulièrement mesurés à l'amont du Rhône.

Cette étude confirme le marquage du Doubs par le tritium, sous une forme liée à de la matière organique (TOL). L'origine prépondérante de ce marquage, qui se détecte jusqu'à l'aval du Rhône, est l'industrie horlogère (française et suisse) qui a fait usage durant de nombreuses années de peintures au tritium destinées à rendre luminescents cadrans et aiguilles des montres et réveils. Cette pollution s'avère relativement persistante, vraisemblablement du fait de la nature des peintures utilisées⁽⁴⁾.

(1) Ardennes, Côte-d'Or, Doubs, Jura, Haute-Marne, Meurthe-et-Moselle, Meuse, Moselle, Bas-Rhin, Haut-Rhin, Haute-Saône, Vosges et Territoire-de-Belfort.

(2) Et en dehors des zones de rémanence particulières.

(3) Se référer au constat radiologique « Rémanence de la radioactivité d'origine artificielle » publié par l'IRSN en 2016.

(4) Se référer au rapport « Actualisation des connaissances acquises sur le tritium dans l'environnement » publié par l'IRSN en 2017.

PRÉAMBULE

Comme il s'y est engagé dans son Contrat d'Objectif et de Performance (COP), l'IRSN effectue régulièrement des constats radiologiques régionaux. Ceux-ci ont pour objectif d'établir sur un territoire étendu (plusieurs départements), un référentiel actualisé des niveaux de radioactivité dans certains compartiments de l'environnement caractéristiques du territoire concerné. Selon l'emprise du constat et le milieu étudié, l'accent est mis sur les productions agricoles végétales et animales typiques du territoire concerné, les produits de la pêche ou les (bio)indicateurs naturels.

Ce référentiel doit rendre compte, d'une part, du « bruit de fond » radiologique lié à la radioactivité naturelle et à la rémanence des retombées atmosphériques anciennes (essais d'armes nucléaires et accident de Tchernobyl), d'autre part, de l'influence des rejets actuels ou passés des installations nucléaires éventuellement présentes sur ce territoire. En cas de rejet incidentel ou accidentel, ce référentiel servirait de base de comparaison et contribuerait à l'orientation du déploiement d'une surveillance renforcée.

Pour établir cet état de référence, l'IRSN met en œuvre les méthodes de prélèvement, de traitement et de mesurage des échantillons les plus performantes. Pour ce qui concerne le présent constat radiologique, les résultats de mesure exploités proviennent de différentes sources : les prélèvements effectués spécifiquement lors de campagnes dédiées menées dans le cadre de ce constat régional, les échantillons prélevés et analysés par l'IRSN dans le cadre de sa mission de surveillance ou lors d'études particulières, les résultats de mesures réalisées par des exploitants nucléaires dans le cadre des analyses réglementaires auxquelles ils sont soumis ainsi que les résultats acquis par des universitaires dans le cadre de leurs recherches. Sont également utilisés des résultats d'analyse réalisés par l'IRSN à la demande d'exploitants nucléaires (EDF, CEA, ANDRA) dans le cadre de contrats de prestations. Les résultats de mesures acquis par l'IRSN ou par les exploitants lorsqu'il s'agit des mesures réglementaires sont consultables sur le site du Réseau National de Mesure de la radioactivité dans l'environnement (RNM). Du fait de leur caractère non réglementaire, certains résultats peuvent ne pas figurer sur ce site.

L'ensemble des résultats de mesure acquis spécifiquement dans le cadre de cette étude sont reportés dans l'annexe de ce rapport et sont également consultables sur le site du RNM.

SOMMAIRE

1	EMPRISE SPATIALE DU CONSTAT ET RAPPEL DE LA STRATÉGIE GÉNÉRALE	6
1.1.	EMPRISE SPATIALE ET DÉLIMITATION DES ZONES D'INTÉRÊT	6
	Caractérisation du bruit de fond radiologique	7
	Sites industriels présents dans la zone d'étude	7
	Rémanence des rejets de l'industrie horlogère	9
1.2.	RAPPEL DE LA STRATÉGIE GÉNÉRALE	10
	État des données préexistantes	10
	Choix des productions agricoles	10
	Choix des zones de prélèvements de denrées	11
	Choix des autres indicateurs	11
	Prélèvements	13
	Traitements, analyses et enregistrements	13
2	CARACTÉRISATION DU BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE DANS LE NORD-EST	14
2.1.	MILIEU TERRESTRE	14
	Tritium	14
	Carbone-14	15
	Césium-137	16
	Césium-134	22
	Strontium-90	22
	Radionucléides naturels	24
	Transuraniens	25
2.2.	MILIEU AQUATIQUE	26
	Tritium et carbone-14	26
	Césium-137	27
	Uranium et transuraniens	27

3	NIVEAUX DE RADIOACTIVITÉ DANS LES DENRÉES ET LES INDICATEURS BIOLOGIQUES DES ZONES SOUS INFLUENCE DES REJETS RADIOACTIFS	28
3.1.	CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ	28
	Tritium	28
	Carbone-14	29
	Radionucléides émetteurs gamma d'origine artificielle	31
3.2.	CENTRE DU CEA À VALDUC	36
	Tritium	36
	Carbone-14	39
	Strontium-90	40
	Émetteurs gamma artificiels (césiums, iode, cobalt, etc.)	40
	Uranium et radium	40
	Transuraniens	41
3.3.	SERVICES DE MÉDECINE NUCLÉAIRE	42
3.4.	ZONES DE RÉMANENCE DE L'INDUSTRIE HORLOGÈRE	43
4	CONCLUSION	44
5	ANNEXE 1	46
	Annexe - Boîte à moustaches	80
6	ANNEXE 2 PROCÉDURES DE COLLECTE, PRÉPARATION ET ANALYSES	82
6.1.	TECHNIQUES DE PRÉLÈVEMENT DES ÉCHANTILLONS ET CONDITIONNEMENT	82
6.2.	PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS ET CONDITIONNEMENT POUR LES ANALYSES	84
6.3.	ANALYSES EFFECTUÉES	86
6.4.	EXPRESSION DES RÉSULTATS DE MESURES	90
7	RÉFÉRENCES	92

1 EMPRISE SPATIALE DU CONSTAT ET RAPPEL DE LA STRATÉGIE GÉNÉRALE

1 1 EMPRISE SPATIALE ET DÉLIMITATION DES ZONES D'INTÉRÊT

Le constat Nord-Est couvre 13 départements⁽¹⁾, soit près de 7700 communes. Ce territoire est ou a été soumis à différentes sources de radioactivité artificielle, liées à des utilisations diverses de radionucléides. Comme l'ensemble de la France métropolitaine, il a été affecté de 1945 à 1980 par les retombées atmosphériques des essais nucléaires, puis en 1986 par les retombées de l'accident de Tchernobyl; les retombées de l'accident de Fukushima Daiichi, survenu en mars 2011 au Japon, n'ayant affecté que très faiblement

et très brièvement l'environnement français [1]. Quatre sites nucléaires sont par ailleurs implantés dans le périmètre géographique de ce constat: trois centres nucléaires de production d'électricité (CNPE de Chooz dans le département des Ardennes, Cattenom en Moselle et Fessenheim dans le Haut-Rhin) et le centre du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) de Valduc situé dans le département de la Côte-d'Or (Figure 1). On y trouve également des unités hospitalières utilisant des

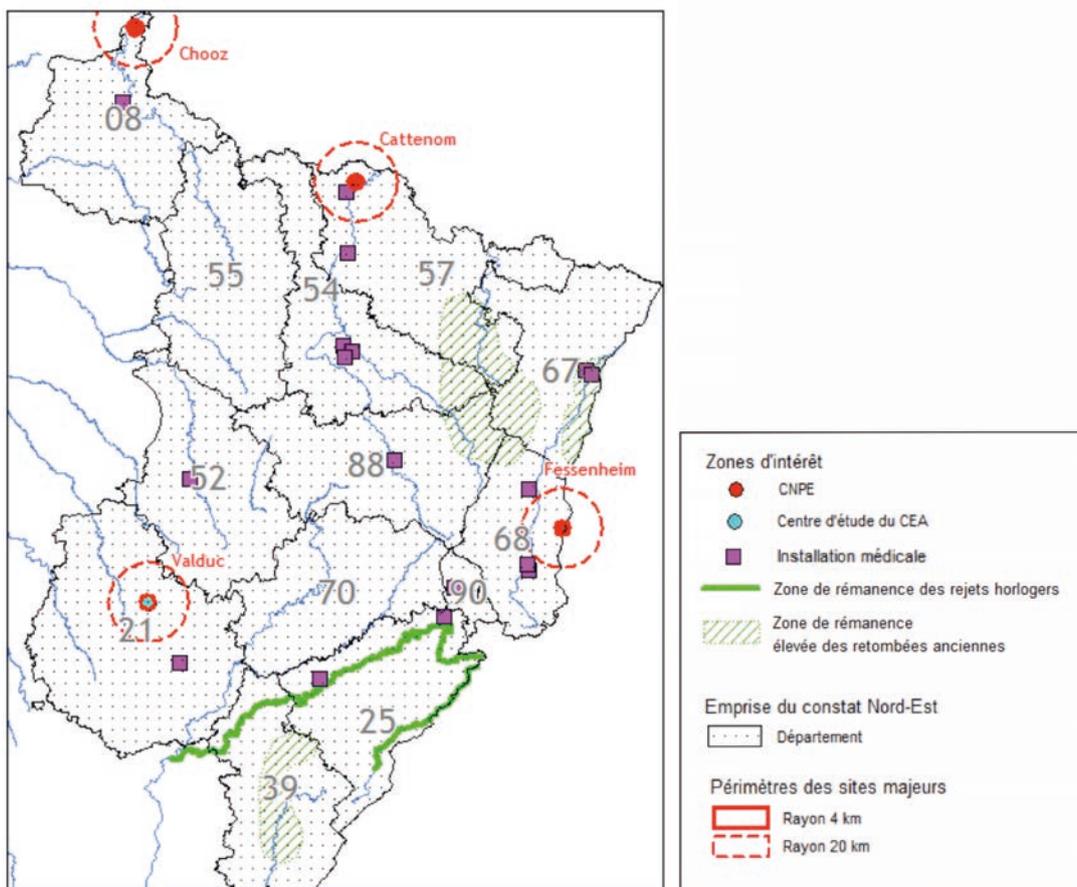


Figure 1. Localisation des zones d'intérêt situées sur l'emprise géographique du constat Nord-Est. Dans la suite du document, les résultats reportés sur les cartes sont issus des données de la littérature et de celles acquises spécifiquement à l'occasion de ce constat, qu'elles se trouvent à proximité des zones d'intérêt (chapitre 3) ou à distance (y compris dans les zones plus marquées par les retombées anciennes).

(1) Ardennes, Côte-d'Or, Doubs, Jura, Haute-Marne, Meurthe-et-Moselle, Meuse, Moselle, Bas-Rhin, Haut-Rhin, Haute-Saône, Vosges et Territoire-de-Belfort.

radionucléides à des fins médicales, ainsi que différents sites concentrant des radionucléides tels que les mines de phosphate. Enfin, l'industrie horlogère, très présente dans le quart nord-est de la France, a utilisé pendant plusieurs décennies des radionucléides artificiels qui marquent encore l'environnement. Ces différentes sources de radioactivité affectent de manière différenciée le territoire étudié et orientent la stratégie d'étude vers une délimitation de zones particulières sur lesquelles des plans de prélèvement et d'analyses spécifiques sont réalisés. Les différentes zones étudiées dans le cadre de ce constat sont présentées sur la figure 1 et les principaux radionucléides susceptibles d'être mesurés dans leur environnement sont inventoriés.

Précisons enfin que si le constat radiologique du Nord-Est de la France s'est intéressé principalement aux radionucléides d'origine artificielle, quelques résultats de mesures de radioactivité naturelle sont présentés car ils permettent de vérifier que les échantillons collectés n'ont pas subi d'altération au cours des différentes étapes de traitement préalables aux analyses radioactives.

- Caractérisation du bruit de fond radiologique —

La méthodologie mise en place dans le cadre des constats régionaux repose sur une comparaison des données acquises dans les zones potentiellement marquées par les radionucléides artificiels issus d'industries ou de sites implantés sur le territoire étudié, avec celles acquises dans les zones situées en dehors de ces influences locales potentielles dites « zones de référence ». Ces zones de référence ne sont cependant pas exemptes de radioactivité d'origine artificielle puisqu'elles ont été affectées, comme l'ensemble du territoire métropolitain, par les retombées atmosphériques globales anciennes citées précédemment.

Les données acquises dans le cadre de ce constat viennent compléter la connaissance du bruit de fond radiologique pour les principaux radionucléides concernés. Il s'agit notamment du césium-137 issu plus particulièrement des retombées de l'accident de Tchernobyl dans cette région, ainsi que du strontium-90 et des isotopes du plutonium provenant des retombées des essais nucléaires.

Les zones les plus touchées par les retombées des essais nucléaires et par celles de l'accident de Tchernobyl ont fait l'objet d'un constat radiologique spécifique qui s'est intéressé à différentes zones géographiques françaises dont les Vosges [2]. Il s'agit notamment des zones où les activités surfaciques de césium-137 étaient (au moment des campagnes de prélèvements) estimées supérieures à 10 000 Bq/m² [3, 4]. Le constat radiologique du quart nord-est de la France s'est également intéressé à ces zones en

ayant une approche complémentaire. Ainsi, l'analyse des données acquises depuis plusieurs années et reportées dans différents rapports a été enrichie par de nouvelles mesures réalisées sur des prélèvements différents des précédents en termes de localisation ou de matrice (denrées par exemple).

- Sites industriels présents dans la zone d'étude —

Trois CNPE d'EDF et un site CEA sont implantés dans la zone d'étude. Le fonctionnement normal de ces sites industriels génère des effluents radioactifs gazeux et liquides dont les rejets sont encadrés par des autorisations délivrées par les pouvoirs publics, destinées notamment à préciser les conditions de rejets et permettant d'assurer que l'exposition des populations environnantes est aussi faible que possible et reste, en tout état de cause, inférieure à 1 mSv/an.

Rappelons, d'une part, que l'on trouve sur cette portion du territoire trois zones de prospections minières, une décharge de déchets industriels spéciaux, des sites stockant des matériaux présentant une « radioactivité naturelle techniquement renforcée ». D'autre part, l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA) exploite trois sites sur cette portion du territoire: le site du projet de centre de stockage réversible profond et les sites de stockage de déchets de Soulaives et de Morvilliers. Tous ces sites sortent de l'emprise de ce constat qui s'est intéressé aux installations en fonctionnement rejetant des quantités significatives de radionucléides susceptibles de contribuer au marquage de l'environnement. Toutefois, des rapports portant sur l'état radiologique de l'environnement autour de ces sites ont été rédigés par l'IRSN au cours des dernières années. Pour le Centre de Meuse/Haute-Marne (ANDRA), les données afférentes figurent dans un ensemble de documents réalisés dans le cadre d'un projet de collaboration entre l'IRSN et l'ANDRA [5-9]. Concernant les sites de stockage de déchets (CSA et Cires), le dernier bilan radiologique de l'environnement édité par l'IRSN [10] fournit une synthèse des données acquises par l'IRSN et l'exploitant autour de ces sites.

Centres Nucléaires de Production d'Électricité d'EDF

Le tritium (^3H) est le radionucléide le plus rejeté⁽²⁾ par voie atmosphérique par les CNPE (d'environ 1 à une dizaine de TBq/an sur la période 2004-2013, pour chacun des CNPE de Chooz, Fessenheim et Cattenom). Ces rejets sont largement supérieurs à ceux du ^{14}C (quelques centaines de GBq/an), des iodes (au plus quelques MBq/an) et des produits d'activation et de fission (< MBq/an) parmi lesquels on retrouve principalement les cobalts-58 et 60, les césiums-134 et 137, l'argent-110m et le manganèse-54.

Dans la voie liquide, les rejets de tritium sont prépondérants (quelques dizaines de TBq/an), suivis, dans une moindre mesure, par le ^{14}C (GBq), les produits de fission et d'activation et enfin les iodes.

Afin de mettre en évidence un éventuel marquage du milieu terrestre par les rejets atmosphériques de ces installations, une zone proche située dans un rayon de 2 km autour de chacune d'elles et sous les vents dominants, a fait l'objet de prélèvements ciblés. Dans la suite du document, ces zones sont identifiées comme zones potentiellement influencées. Afin de se prononcer sur l'éventuelle influence des rejets des différents sites étudiés, des échantillons de nature identique ont été prélevés en zone dite non influencée (soit au-delà d'un rayon de 20 km de l'installation).

De même, pour caractériser l'éventuelle influence des rejets d'effluents liquides des CNPE, des échantillons ont été prélevés en amont et en aval des points de rejets, dans la zone dite de bon mélange.

Notons que le CNPE de Fessenheim est potentiellement soumis à l'influence des rejets d'installations suisses implantées sur le bassin versant amont du Rhin (usines de production électrique à Leibstadt sur le Rhin et à Beznau, Mühleberg et Gosgen sur son affluent, l'Aare), de sorte que les prélèvements réalisés en amont du CNPE peuvent être marqués par les rejets de ces différentes installations. Soulignons également que le bassin versant rhénan a accueilli des ateliers d'horlogerie qui ont introduit du tritium dans l'environnement que l'on retrouve encore aujourd'hui dans le milieu aquatique [36].

À proximité de ces sites, outre les analyses classiques (émetteurs gamma, ^3H et ^{14}C), quelques radionucléides non rejetés en fonctionnement normal mais présents dans les CNPE (uranium, transuraniens, ^{90}Sr , etc.) ont également fait l'objet de mesures afin de disposer de données de référence actualisées.

Centre du CEA de Valduc

L'installation de Valduc dispose d'une autorisation de rejet atmosphérique (tritium, halogènes gazeux et aérosols, émetteurs alpha). De plus, certains radionucléides présents sur le site (tritium, plutonium, uranium, ^{241}Am , ^{226}Ra , ^{131}I , etc.) ont pu être relâchés dans l'environnement terrestre à la suite d'incidents⁽³⁾.

Dans le milieu terrestre, pour compléter les mesures de tritium déjà disponibles dans des eaux, du lait et de l'herbe, de nouvelles analyses ont été réalisées pour les indicateurs les plus pertinents. Ainsi, tous les radionucléides susceptibles d'être à l'origine d'un marquage de l'environnement par le site de Valduc (Pu, isotopes de l'uranium, émetteurs gamma) ont été recherchés sur un échantillon de mousses terricoles prélevé sous les vents dominants des installations, dans la zone potentiellement influencée. D'autre part, une mise à jour des données disponibles a été effectuée pour le tritium (recherché dans des feuilles de chênes) dans l'environnement proche et lointain du site et pour le ^{14}C (recherché dans des feuilles de chênes et du lait). Enfin, de nouveaux résultats d'analyses gamma ont été acquis dans des denrées cultivées à proximité du site.

Au moment des prélèvements réalisés dans le cadre de cette étude, l'installation ne possède plus d'autorisation de rejet liquide⁽⁴⁾ alors que jusqu'en 1994 ces effluents radioactifs étaient rejetés dans un vallon situé au sud du site (Combe du Tilleul). Par ailleurs, les radionucléides rejetés par voie aérienne peuvent également marquer l'environnement aquatique; parmi eux le tritium et les isotopes de l'uranium sont les plus susceptibles d'être détectés. Aussi, des mesures de ces radionucléides dans des bioindicateurs (sédiments, végétaux et poissons) ont été effectuées dans le cadre de cette étude. Les isotopes du plutonium ainsi que le ^{14}C , le ^{90}Sr et les radionucléides émetteurs gamma ont également été recherchés dans des bioindicateurs prélevés en aval immédiat de l'ancien point de rejet des effluents liquides (Combe du Tilleul).

Autres sites

Outre ces installations nucléaires, un intérêt particulier est porté aux cours d'eau, en aval des principaux centres hospitaliers accueillant des services de médecine nucléaire (diagnostic ou thérapie). Parmi les produits radioactifs utilisés, seul l' ^{131}I possède une demi-vie suffisamment longue pour être susceptible d'être mesuré dans des échantillons de l'environnement avec les moyens actuellement disponibles à l'IRSN. C'est donc ce radionucléide qui a été recherché dans des échantillons de phanérogames aquatiques, mesurés à l'état frais.

(2) Exception faite des rejets de gaz rares non considérés dans cette étude du fait qu'ils se dispersent rapidement dans l'air et ne se transfèrent pas vers les autres compartiments.

(3) C'est le cas du tritium qui, jusqu'en 2006, a fait l'objet de plusieurs rejets non contrôlés [11, 12].

(4) Les effluents liquides sont aujourd'hui soit vaporisés, soit entreposés sur le site, soit transférés vers des filières de traitement et/ou de stockage selon les prescriptions de l'arrêté du 5 novembre 2018.

Rémanence des rejets de l'industrie horlogère

L'industrie horlogère française et suisse est à l'origine d'un marquage radiologique très localisé de l'environnement encore décelable aujourd'hui. Outre le radium, c'est surtout le tritium qui a été utilisé entre 1970 et le début des années 2000 dans les ateliers d'horlogerie pour rendre luminescente la peinture appliquée sur les aiguilles et index des montres et réveils. On estime à près de 22 000 TBq la quantité de tritium utilisée par cette industrie durant plus de 30 ans (Figure 2).

Les industries horlogères, françaises et suisses, sont essentiellement implantées sur le bassin versant du Rhône et en particulier, sur sa partie la plus en amont, le Doubs. Trois agglomérations ont accueilli la majorité des ateliers d'horlogerie : Besançon et Morteau en France, La Chaux-de-Fond en Suisse (Figure 3). Bien que ce radionucléide ne soit aujourd'hui plus utilisé dans cette industrie, l'incinération de déchets (biens de consommation) pouvant contenir du tritium peut encore générer un marquage localisé de l'environnement terrestre et aquatique [13].

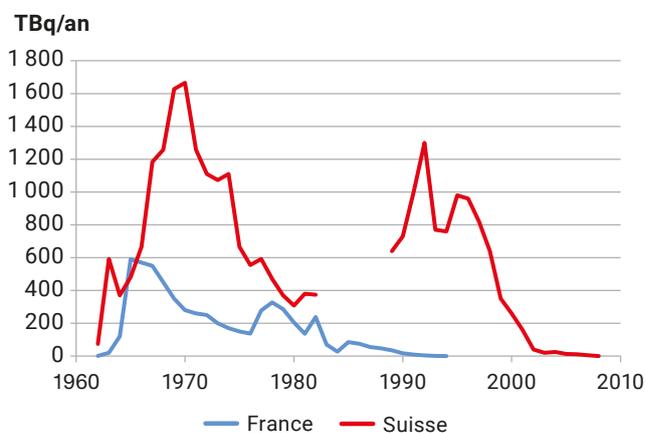


Figure 2. Utilisation du tritium par l'industrie horlogère. Source: [14]

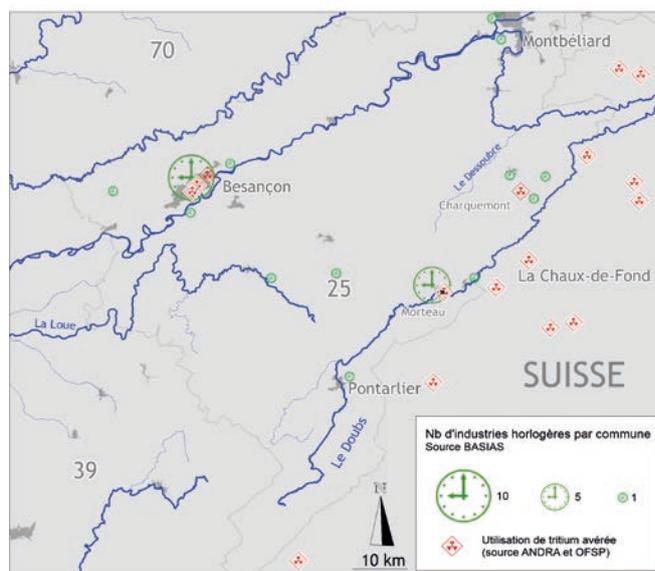


Figure 3. Localisation des ateliers d'horlogerie dans le massif du Jura.

1 2 RAPPEL DE LA STRATÉGIE GÉNÉRALE

Le plan d'échantillonnages et d'analyses (tableaux 1 et 2 présentés en annexe) a été défini selon les spécifications du rapport méthodologique [15].

Un des objectifs initiaux est de disposer d'au moins un résultat de mesure par spectrométrie gamma permettant de mesurer de très faibles niveaux de radioactivité pour chaque denrée retenue, dans chacun des départements dont la production dépasse 10 % du volume de la production française. Pour ce qui concerne l'environnement des sites nucléaires, les analyses menées ont eu pour objectif de mettre en évidence un éventuel marquage de l'environnement par les rejets chroniques liés au fonctionnement de ces installations.

État des données préexistantes

Les données acquises au cours de la décennie précédant l'étude, soit plus de 30 500 données, ont été analysées afin de définir les matrices et résultats de mesure à acquérir et/ou à actualiser dans l'emprise du constat Nord-Est.

Choix des productions agricoles

Le choix des productions agricoles a été effectué après analyse des données de la statistique agricole la plus récente au début de l'étude [16]. Une première étape a consisté à recenser, à l'échelle régionale, les grandes productions destinées directement à l'alimentation humaine et à sélectionner celles qui sont les plus importantes d'un point de vue économique. Pour les 13 départements étudiés, les céréales, les plantes industrielles (oléagineux, tabac, betterave...), le vin, la viande de bœuf et le lait de vache représentent de 12 à 14 % de la valeur de la production métropolitaine (Figure 4). Parmi les céréales qui dépassent 12 % de la valeur de la production métropolitaine, le blé tendre, le maïs et l'orge sont les plus cultivés. Parmi les plantes industrielles, les oléagineux atteignent 18 % et le tabac 12 % de la valeur de la production métropolitaine. Même si la betterave sucrière n'est pas recensée comme étant d'un poids économique important dans le Nord-Est, elle a été intégrée à cette étude car la France est le premier producteur mondial de betterave [17]. Par ailleurs, le chou à choucroute et le houblon d'Alsace, les volailles de Bourgogne, les fromages et miels des Vosges, les mirabelles et les quetsches de Lorraine sont des productions emblématiques du nord-est de la France. À ce titre, elles ont fait l'objet de mesures comme le sanglier des Ardennes.

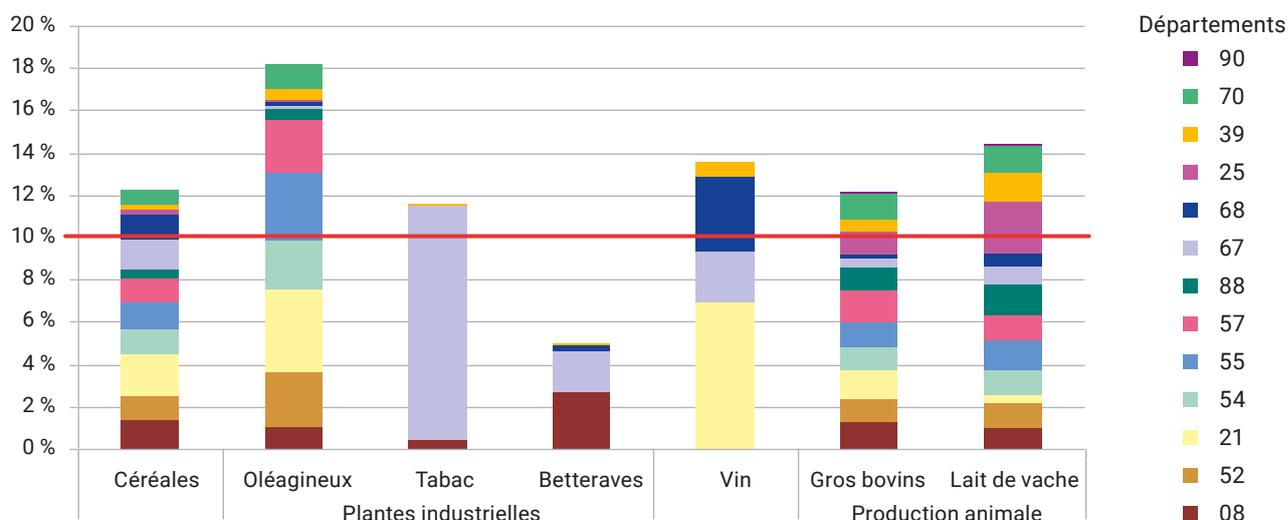


Figure 4. Catégories de productions agricoles dominantes sur le territoire étudié. Source: [16]. Pourcentage de la valeur de la production du quart nord-est de la France dans la production de la France métropolitaine en 2009 (en euros au prix de 2008). Les couleurs représentent les contributions de chacun des départements. Le trait rouge souligne la limite de 10 % retenue pour cette étude.

En milieu aquatique, des zones de pêche régulièrement fréquentées par des pêcheurs à la ligne ont été recherchées en aval immédiat des rejets liquides (actuels ou passés) des installations : aval immédiat des émissaires de rejet des CNPE de Chooz et de Cattenom, rivière Ignon en aval du centre CEA de Valduc.

– Choix des zones de prélèvements de denrées –

Pour choisir les zones de prélèvements de denrées, une analyse préalable⁽⁵⁾ a été effectuée en croisant les données de statistiques agricoles [18, 16], de localisation des zones d'intérêts (zones de référence, installations nucléaires...) et des résultats de mesures déjà disponibles sur le territoire étudié. Les données statistiques Agreste ont été exploitées à l'échelle communale [18] : pour chacune des denrées recherchées, les communes retenues sont celles dont la production (ha, tonne ou nombre de têtes de bétail, etc.), rapportée à la surface agricole utile (SAU), dépasse 75 % des productions communales du quart nord-est de la France. Cette analyse a permis d'orienter la prospection de terrain vers les lieux les plus susceptibles de fournir les types d'échantillons recherchés : pour chaque zone d'intérêt (proximité de sites nucléaires, zone non influencée, zone de rémanence, etc.) une commune par département a été retenue.

– Choix des autres indicateurs –

En plus des denrées, d'autres types d'échantillons ont été prélevés car ils présentent des capacités de rétention des radionucléides à court ou long terme ou une propension à concentrer certains radionucléides. Les différents indicateurs retenus sont présentés ci-après.

Bryophytes terrestres

Les bryophytes terrestres constituent d'excellents indicateurs des apports atmosphériques. En effet, ne disposant pas de racines, leur principale voie d'absorption est aérienne. Des processus actifs de conduction d'eau par capillarité et d'échanges d'ions par voie extracellulaire permettent aux mousses de piéger les éléments nécessaires à leur croissance. En plus de ce mode d'intégration actif, les phénomènes passifs d'accumulation des poussières atmosphériques par piégeage mécanique contribuent à concentrer la radioactivité

du fait de leur forme qui développe une importante surface d'interception. Leur cycle de vie pluriannuel en fait des indicateurs pertinents pour l'observation des apports atmosphériques au-delà d'une année.

Feuilles d'arbres (feuilles caduques)

Les feuilles d'arbres constituent d'excellents témoins de l'incorporation de la vapeur d'eau et du carbone atmosphérique lors de la photosynthèse. Des feuilles d'arbre à feuillage caduc⁽⁶⁾, représentent le niveau moyen de concentration du tritium et du carbone-14 en milieu terrestre, pour une année donnée. Pour ce constat radiologique, ce sont les feuilles de chênes pédonculés (*Quercus robur*) qui ont été prélevées.

Herbe, lait et sol associé

Les sols de prairies naturelles non cultivées, sont privilégiés car ils garantissent le prélèvement d'échantillons non remaniés depuis plusieurs décennies. Les éléments de sols grossiers (> 2 mm) sont écartés de l'aliquote mesurée. Les sols sont des intégrateurs pluriannuels des retombées atmosphériques.

La mesure dans l'herbe donne l'indication de l'activité des radionucléides déposés au cours du cycle végétatif de la prairie échantillonnée (quelques mois).

La mesure du lait de vache est pertinente pour rendre compte de retombées atmosphériques, même très faibles, du fait de la grande surface d'herbe consommée par les vaches pour le produire. Cette matrice permet également de disposer d'échantillons sentinelles en matière de radioprotection car elle est largement consommée, avec relativement peu de transformations et réagit rapidement aux contaminations radioactives.



Prélèvement de prairie naturelle

(5) Ce travail d'analyse préalable a été réalisé à l'aide d'un système d'information géographique (SIG) qui a permis de spatialiser l'ensemble des informations disponibles et nécessaires pour choisir les lieux de prélèvements des denrées.

(6) Arbres renouvelant leurs feuilles chaque année, ce qui permet de considérer que la matière organique des feuilles prélevées représente l'activité spécifique du milieu ambiant qui a prévalu durant la période de leur formation. En revanche, les parties ligneuses, le système racinaire pérenne, et, dans une moindre mesure, les feuilles persistantes, conservent la « signature » des niveaux passés et peuvent témoigner de leur rémanence.

Végétaux cultivés

Les salades, les choux et les blettes représentent la catégorie des légumes à feuilles, denrées parmi les plus sensibles aux contaminations atmosphériques. Seules les parties aériennes sans contact avec le sol ont été échantillonnées.

Sédiments

Les sédiments de surface intègrent les dernières phases de dépôt de particules et sont assez représentatifs des flux solides en transit dans les fleuves et rivières, généralement moyennés sur plusieurs mois. Les prélèvements de sédiments sont réalisés en dehors d'une période de crue afin que les dépôts soient, d'une part, représentatifs d'une période d'intégration significative du régime du cours d'eau, d'autre part, de texture fine. Les sédiments fins fixent en effet préférentiellement la plupart des éléments traces présents dans l'environnement, dont la grande majorité des radionucléides artificiels (isotopes radioactifs du cobalt et du césium, ^{110m}Ag , ^{54}Mn ...). Les mesures ont porté sur la fraction inférieure à 2 millimètres.

Bryophytes aquatiques

Les bryophytes sont des matrices biologiques particulièrement pertinentes pour rendre compte du marquage du milieu aquatique. Les activités mesurées au sein de ces échantillons sont représentatives des radionucléides présents dans les matières en suspension de l'eau car ces végétaux, de par la géométrie de leur système foliaire, piègent les

particules fines. Ces échantillons permettent ainsi d'obtenir des valeurs généralement supérieures aux seuils de décision. Cependant, l'efficacité du nettoyage de ces matrices n'est pas reproductible et entraîne généralement une variabilité importante des résultats de mesure. Des valeurs normalisées (rapport des isotopes du césium et du plutonium, activité du tritium ou ^{14}C , etc.) sont ainsi privilégiées pour rendre compte du marquage de l'environnement. Ces plantes n'ayant pas de racines *stricto sensu*, elles sont prélevées et analysées entières.

Phanérogames aquatiques

Ces végétaux aquatiques piègent peu les matières en suspension et fixent principalement les radionucléides dissous dans l'eau ou assimilables par transfert racinaire. Pour diminuer l'apport de radionucléides via le substratum, les tiges sont coupées au-dessus des racines. Un lavage soigneux permet de diminuer la quantité de matière en suspension retenue à la surface des végétaux. Les résultats de mesure dans ces indicateurs sont représentatifs des niveaux d'activité moyens de l'eau, au cours des dernières semaines précédant le prélèvement.

Poissons

Les poissons sont à la fois des denrées alimentaires et des indicateurs. Les mesures portent sur les muscles qui intègrent les radionucléides assimilables, au cours de la vie de l'animal (en général, une dizaine d'années dans les études réalisées).



Prélèvement de sédiments



Prélèvement de bryophytes aquatiques

Prélèvements

D'avril 2010 à novembre 2013, 13 missions de prélèvements spécifiquement consacrées à ce constat ont été réalisées en plus des missions habituelles de surveillance de l'environnement. Environ 200 prélèvements ont été réalisés (Figure 5).

Pour ce qui concerne les productions agricoles ou aquacoles, la recherche de contacts sur la commune présélectionnée s'est appuyée sur une prospection téléphonique (annuaire « pages jaunes », chambres d'agriculture, syndicats agricoles, grossistes...). Chacun des prélèvements a été précédé d'au moins deux prises de contact téléphonique dans les deux semaines précédentes, afin de fixer un rendez-vous et d'informer les personnes sur les objectifs de l'étude. La mission de surveillance du territoire par l'IRSN n'est pas toujours connue, aussi ce dernier point a parfois demandé de longues explications mais n'a, en général, pas suscité de refus. La plupart des prélèvements ont pu être réalisés sur les communes présélectionnées (ou sur une commune limitrophe) malgré les inévitables écarts entre les données

statistiques agricoles et la réalité du terrain. Au final, près de 90 % des échantillons dont la collecte était planifiée ont pu être prélevés.

Traitements, analyses et enregistrements

Les échantillons ont été traités au fur et à mesure de leur collecte et l'ensemble des données descriptives afférentes et résultats de mesures ont été enregistrés dans la base de données de la surveillance du territoire.

L'ensemble des échantillons étudiés dans ce constat a fait l'objet de mesures à bas niveau, c'est-à-dire avec des limites de détection aussi basses que possible. Les procédures de collecte, de traitement et d'analyse sont détaillées en Annexe 2.

Tous les résultats sont présentés en Annexe. Ils sont par ailleurs disponibles en libre accès sur le site internet du réseau national de mesure (www.mesure-radioactivite.fr). Au final, ce sont près de 3 000 résultats complémentaires qui ont été acquis, représentant un peu moins de 10 % de l'ensemble des données exploitées dans ce constat.

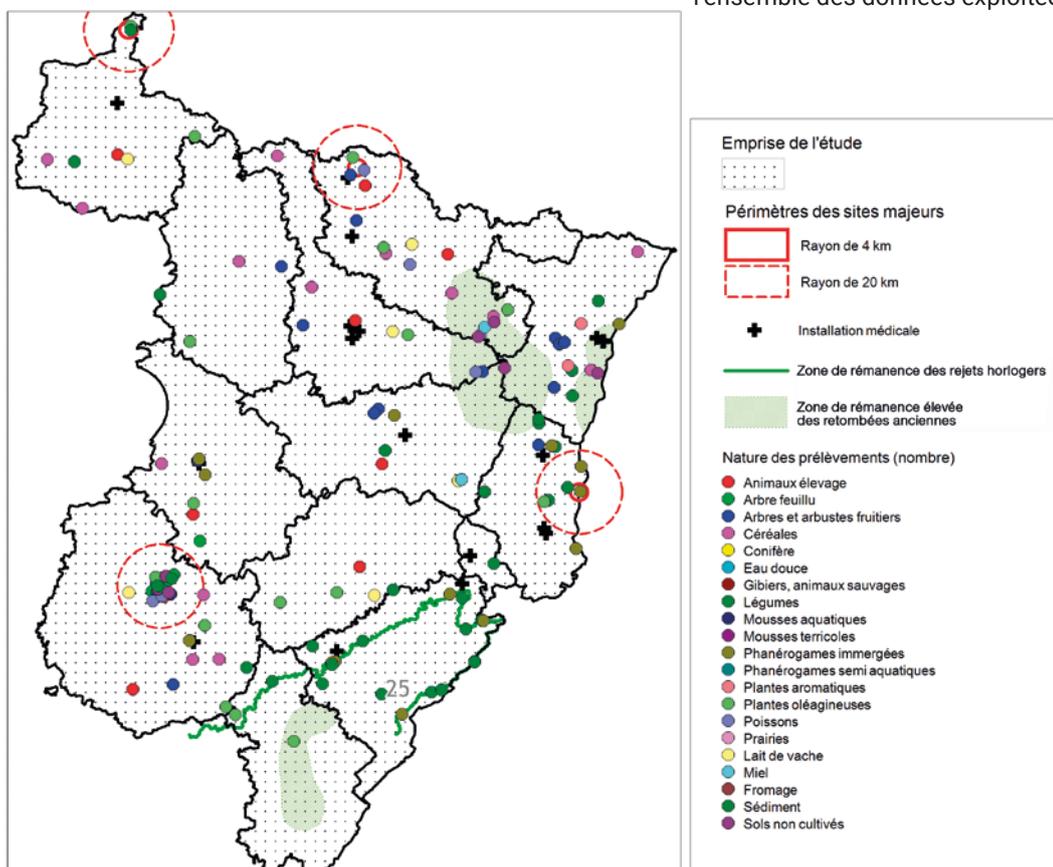


Figure 5. Localisation générale des échantillons prélevés pour ce constat.

2 CARACTÉRISATION DU BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE DANS LE NORD-EST

Les résultats présentés ci-après restituent l'ensemble des données acquises à distance de toute installation nucléaire. Ces données peuvent être considérées comme représentatives des bruits de fond actuellement mesurables dans la région Nord-Est pour les principaux radionucléides recherchés.

2.1 MILIEU TERRESTRE

Tritium

Le tritium est d'origine naturelle et anthropogénique. Il se trouve sous forme d'hydrogène tritié (HT), d'eau tritiée (HTO) ou de molécules organiques tritiées (TOL) [19].

La mesure du tritium organiquement lié (TOL) rend compte de l'activité moyenne du tritium dans l'air durant le temps pendant lequel la matière organique s'est formée. Quant à la mesure du tritium libre (HTO) elle permet d'obtenir l'activité atmosphérique moyenne au cours des heures qui ont précédé le prélèvement [20].

Les activités en tritium libre et organiquement lié⁽⁷⁾ dans les denrées agricoles (lait, blé, viande de bœuf, etc.) prélevées dans les zones de référence du quart nord-est de la France sont groupées entre $0,6 \pm 0,6$ et $2,8 \pm 0,9$ Bq/L (55 mesures, médiane = 1,5 Bq/L; Figure 6, Tableau 3 et [21]). Elles sont toutes faibles et se situent dans la fourchette des valeurs attendues en France en dehors de tout apport industriel local (bruit de fond de l'ordre de $1,4 \pm 1,2$ Bq/L [21, 19, 22, 10, 23]), comme le montre la Figure 7 ci-après.

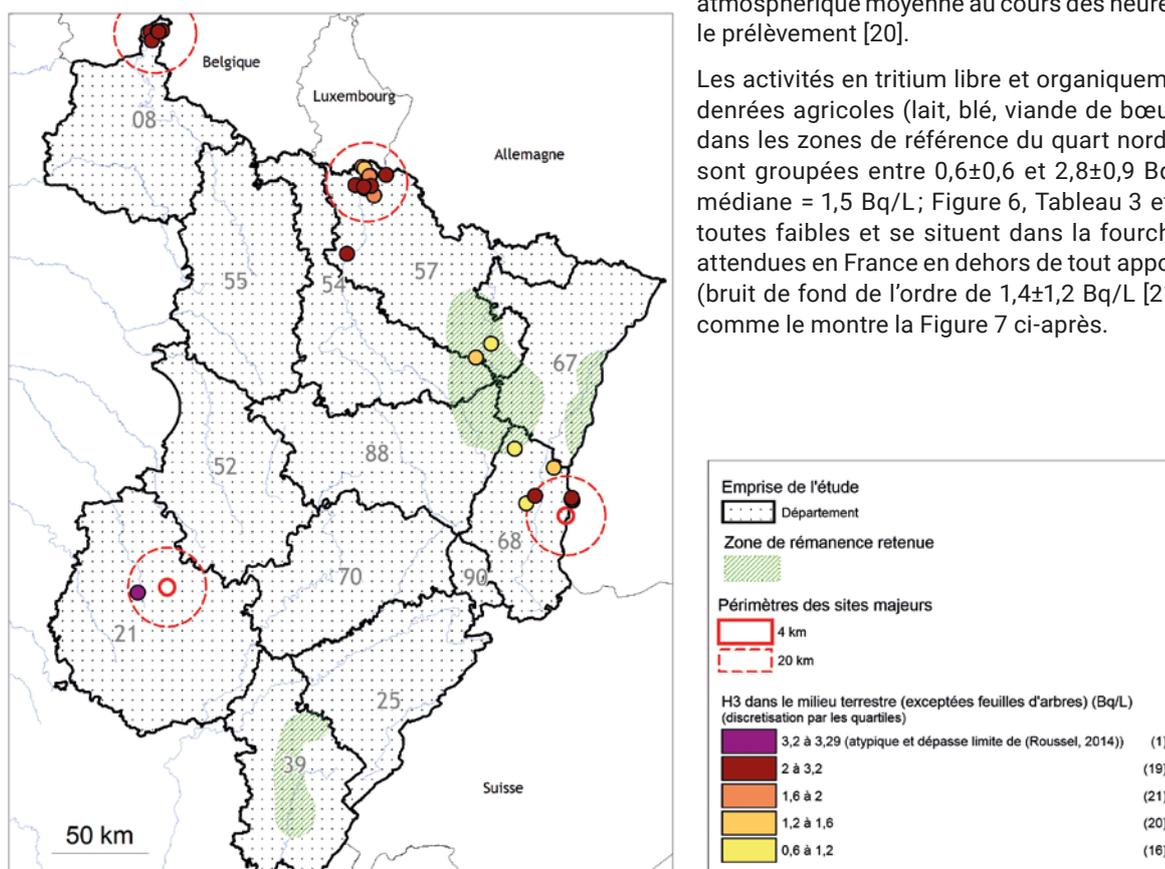


Figure 6. Tritium (HTO et TOL) dans les denrées terrestres (lait, blé, viande de bœuf, etc.) entre 2004 et 2013.

(7) Dans la suite du document, en l'absence d'autre précision, les résultats relatifs au tritium organiquement lié et au tritium libre sont affectés de l'unité Bq/L, étant entendu que le tritium organiquement lié s'exprime en becquerels par litre d'eau de combustion (Bq/L EC) et le tritium libre en becquerels par litre d'eau de dessiccation (Bq/L ED).

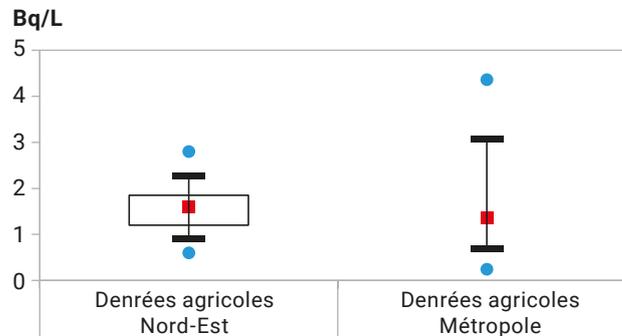


Figure 7. Comparaison des activités en tritium organiquement lié (Bq/L) acquises dans les échantillons de denrées agricoles collectés dans le Nord-Est (gauche) avec celles acquises par l'IRSN sur la période 2009-2017 dans le reste de la France (droite)⁽⁸⁾.

Carbone-14

Comme le tritium, le ^{14}C est d'origine naturelle (environ 226 Bq/kg de carbone⁽⁹⁾) et anthropogénique. Dans l'environnement, il peut se trouver sous forme de carbone inorganique (dioxyde de carbone CO_2 , carbonates, etc.) ou de matières organiques et suit le cycle du carbone stable. Les végétaux incorporent par photosynthèse le ^{14}C présent dans le gaz carbonique de l'air tandis que les animaux l'incorporent par ingestion de matière organique végétale ou animale. Le carbone devient alors partie intégrante de tous les organismes vivants. Ainsi, en milieu terrestre, la teneur en carbone-14 de la matière vivante végétale et animale est en équilibre avec l'air, ce qui se traduit par une même activité de carbone-14 par unité de masse de carbone total. Cette activité par unité de masse de carbone est connue de manière précise; elle constitue un indicateur robuste du niveau de ^{14}C environnemental en milieu terrestre et permet une inter-comparaison directe d'échantillons de natures différentes. Notons enfin que les essais aériens d'armes nucléaires ont entraîné l'augmentation du niveau ambiant de ^{14}C (jusqu'à plus de 400 Bq/kg de C). Depuis l'arrêt des tirs aériens, cette activité ne cesse de décroître du fait des émissions toujours plus importantes de carbone fossile, dépourvues de ^{14}C .

Ainsi, dans les denrées agricoles terrestres (lait de vache, blé, salade, pomme, raisin et viande de bœuf) les activités en ^{14}C observées entre 2004 et 2013, sont comprises entre 244 ± 18 et $232,3 \pm 1,3$ Bq/kg de C (Médiane = 239 Bq/kg de C; 6 résultats de mesures). Ces valeurs s'inscrivent parfaitement dans la gamme des valeurs du bruit de fond de la période en France (243 à 232 Bq/kg de C entre 2004 et 2013 d'après [24]). La figure 8 ci-après représente les résultats acquis dans le Nord-Est sur les denrées agricoles, exprimés en Bq/kg frais, ce qui permet de comparer ces données avec celles acquises sur le reste du territoire.

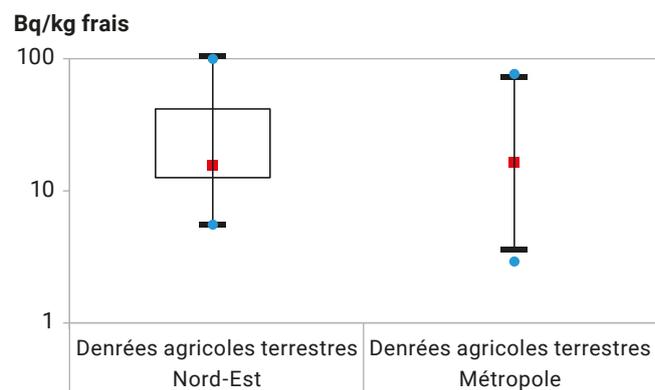


Figure 8. Comparaison des activités en carbone-14 (Bq/kg frais) dans les échantillons de denrées agricoles acquis dans le cadre du constat Nord-Est (gauche) avec ceux acquis par l'IRSN sur la période 2009-2017 en France (droite).

(8) Les grandeurs statistiques représentées en boîte à moustaches sont détaillées dans la partie 5, Annexe – Boîte à moustaches, page 80.

(9) Il est d'usage d'exprimer la concentration du ^{14}C en becquerels de ^{14}C par kilogramme de carbone total (Bq/kg de C).

Césium-137

Parmi la dizaine de radionucléides émetteurs gamma d'origine artificielle qui a été recherchée lors de chaque analyse, le ^{137}Cs est le seul régulièrement mesuré (dans 66 % des analyses) au-dessus des limites de détection. Sa présence dans l'environnement est liée aux retombées atmosphériques des essais aériens d'armes nucléaires et de l'accident de Tchernobyl.

Dans les sols de surface (0-5 cm) non cultivés (prairies ou forêts) prélevés sur les zones les plus touchées par les retombées de cet accident, les activités mesurées en césium-137 se différencient nettement de celles mesurées en dehors de ces zones (médianes respectives de 54,5 Bq/kg sec et 15,5 Bq/kg sec, Figure 9, Tableau 8 et [25, 26, 21]).

Les plus fortes valeurs ($104,2 \pm 3,7$ à 523 ± 38 Bq/kg sec) sont observées, en général et comme attendu, dans la partie centrale des zones les plus touchées (Figure 10).

Dans les deux sols prélevés spécifiquement pour ce constat, dans des zones plus affectées par les retombées atmosphériques anciennes, le comportement du ^{137}Cs est différent : dans le sol de prairie de la crête des Vosges, l'activité en surface est plus élevée (143 ± 12 Bq/kg sec) et décroît avec la profondeur, ce qui conforte les résultats obtenus dans le constat spécifique aux zones de rémanence.

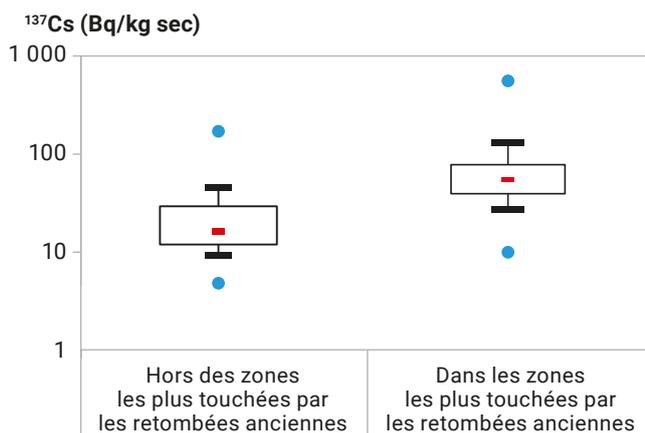


Figure 9. Comparaison des niveaux de césium-137 mesurés sur les sols non cultivés du Nord-Est de la France entre les zones les plus touchées par les retombées anciennes et hors de ces zones.

Quant au sol de prairie de Nordhouse (situé dans le Bas-Rhin, au sud de Strasbourg), il présente une activité moins élevée et homogène sur toute la hauteur du profil échantillonné (de $7,0 \pm 0,6$ à $10,4 \pm 0,9$ Bq/kg sec) qui traduit probablement le résultat du labour réalisé sur cette profondeur (30 cm).

Dans les herbes de prairie des zones les plus touchées par les retombées de l'accident de Tchernobyl, les activités sont comprises entre $0,080 \pm 0,035$ et 60 ± 5 Bq/kg sec⁽¹⁰⁾. 90 % de ces valeurs ($0,080 \pm 0,035$ à $5,3 \pm 0,6$ Bq/kg sec) sont proches de celles mesurées en dehors de ces zones ($0,09 \pm 0,05$ à $3,90 \pm 0,42$ Bq/kg sec, 72 % de détection). Les valeurs les plus élevées sont, comme pour les sols, généralement localisées dans la partie centrale des zones les plus touchées.

Dans le détail, on note que :

- parmi les 29 échantillons de grains de céréales (blé, orge et maïs) collectés de 2004 à 2013, la majorité présente une activité en ^{137}Cs inférieure au seuil de décision ($0,008$ à $0,05$ Bq/kg frais, Figure 11). Pour quatre échantillons, l'activité mesurée est de l'ordre de grandeur des seuils de décision des autres prélèvements ;
- 8 des 17 résultats d'analyses sur les oléagineux (colza et soja) sont inférieurs au seuil de décision ($\leq 0,016$ à $\leq 0,13$ Bq/kg frais). Les valeurs significatives sont groupées, comprises entre $0,036 \pm 0,016$ et $0,083 \pm 0,025$ Bq/kg frais (Figure 12) ;
- dans les prélèvements de vins et de raisins à vin, les 8 échantillons collectés de 2004 à 2013, ont des activités essentiellement inférieures au seuil de décision ($\leq 0,005$ à $\leq 0,025$ Bq/L) (Figure 13). Deux valeurs sont significatives ($0,00073 \pm 0,00041$ Bq/L et $0,0067 \pm 0,0029$ Bq/L) mais ne dépassent pas les valeurs des seuils de décision des autres échantillons. Dans les mirabelles et les quetsches, les activités sont majoritairement inférieures au seuil de décision ($\leq 0,005$ à $\leq 0,023$ Bq/kg frais). Deux valeurs significatives ont été obtenues ($0,011 \pm 0,006$ et $0,014 \pm 0,008$ Bq/kg frais) à des niveaux proches des seuils de décision des autres prélèvements ;

(10) Un seul échantillon présente une valeur non significative ($\leq 0,13$ Bq/kg sec).

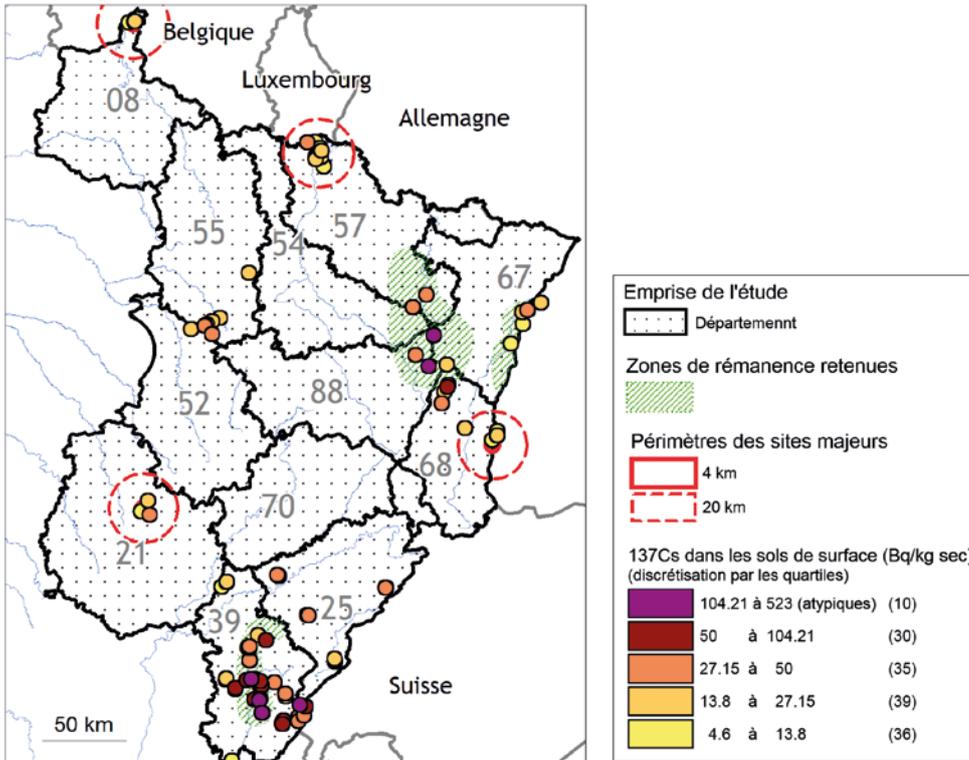


Figure 10. ¹³⁷Cs dans les sols non cultivés de surface entre 2004 et 2013.

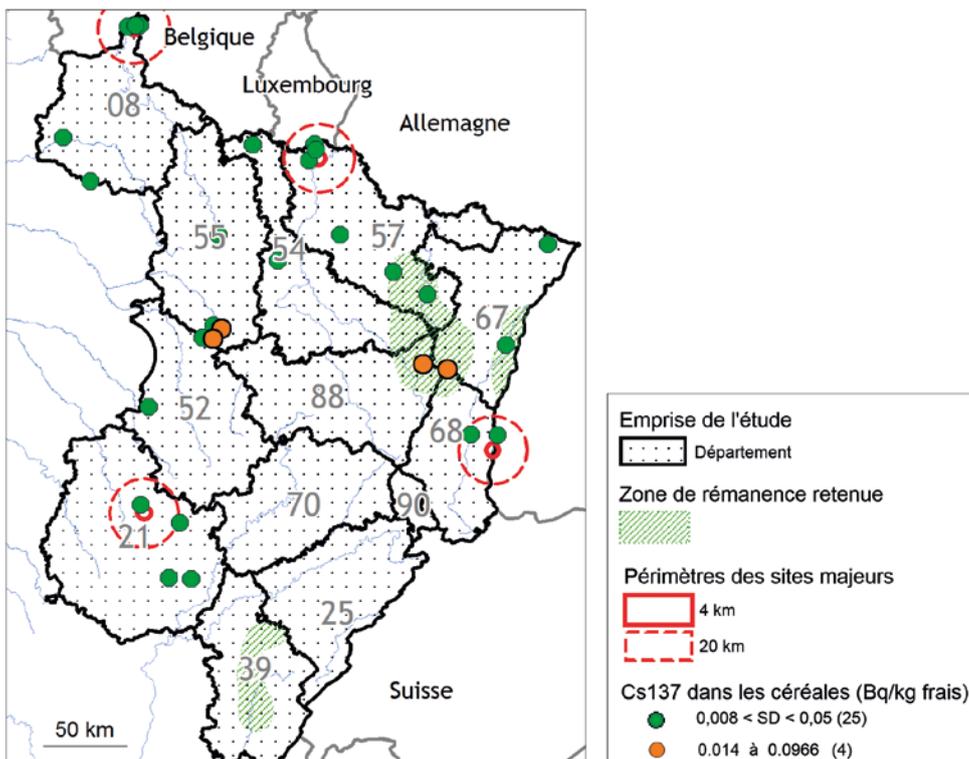


Figure 11. ¹³⁷Cs dans les grains de céréales (blé, maïs et orge) entre 2004 et 2013.

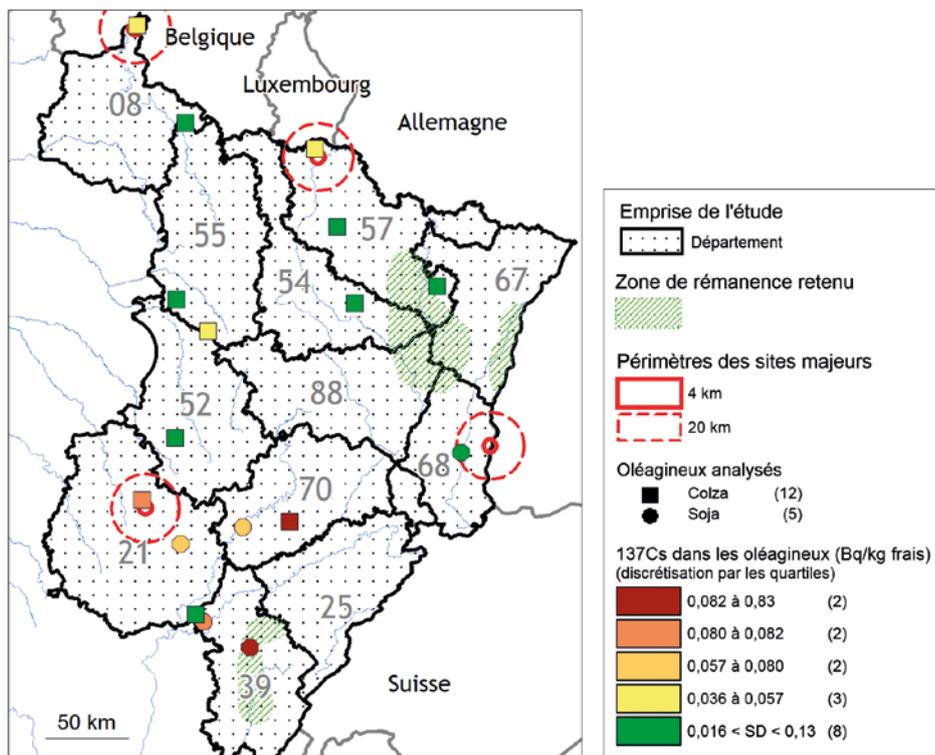


Figure 12. ¹³⁷Cs dans les cultures oléagineuses (colza et soja) entre 2004 et 2013.

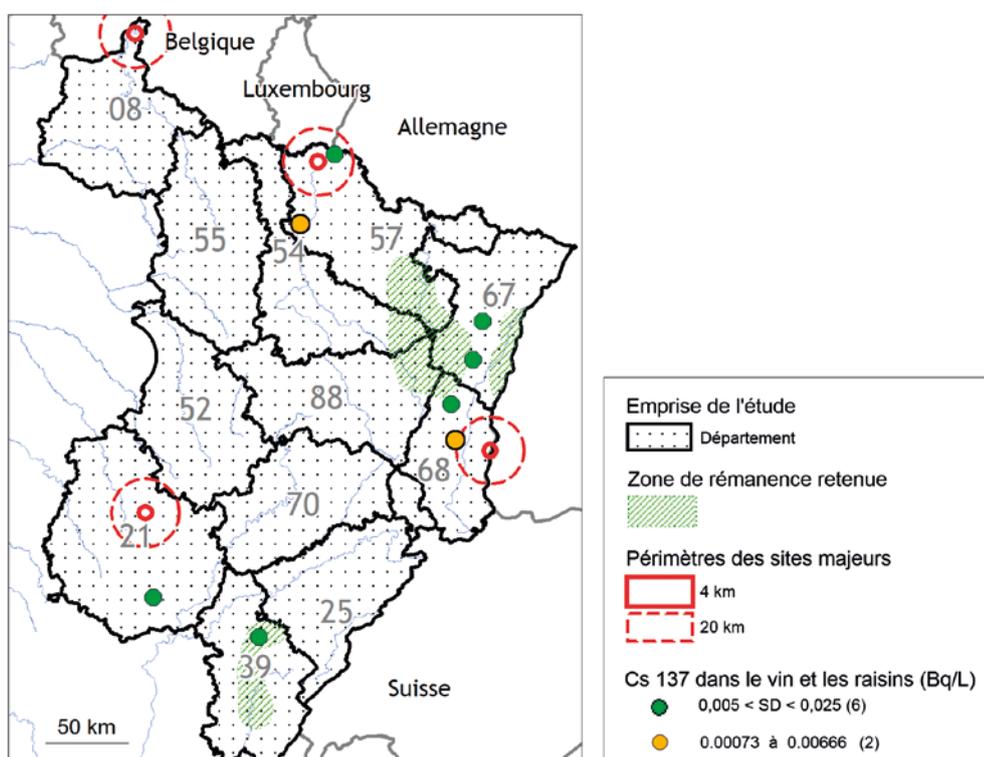


Figure 13. ¹³⁷Cs dans le vin et le raisin entre 2004 et 2013.

- dans la catégorie des légumes feuilles, pour les choux dont les choux à choucroute, emblématiques de l'Alsace, les activités en ¹³⁷Cs sont majoritairement inférieures au seuil de décision ($\leq 0,003$ à $\leq 0,007$ Bq/kg frais). Seules deux détections de ¹³⁷Cs ont été obtenues pour ces espèces ($0,0064 \pm 0,0029$ et $0,0086 \pm 0,0028$ Bq/kg frais). Peu de mesures de légumes feuilles étaient disponibles dans les zones les plus touchées par les retombées de l'accident de Tchernobyl. Les résultats acquis dans le cadre de cette étude sont similaires aux niveaux observés en dehors de ces zones (salade, chou et blette; Figure 14).
- sur les deux analyses de betteraves sucrières menées pour ce constat, une seule a mis en évidence du ¹³⁷Cs ($0,0090 \pm 0,0032$ Bq/kg frais pour un seuil de décision de $0,003$ Bq/kg frais dans l'autre échantillon). Ce résultat s'inscrit dans la gamme des activités mesurées ailleurs en France;
- dans le houblon (cône et liane), aucun résultat n'est supérieur au seuil de décision, tandis que dans le tabac, un des deux échantillons présente une activité en ¹³⁷Cs de $0,46 \pm 0,08$ Bq/kg frais;
- en dehors des zones du Nord-Est les plus touchées par les retombées de l'accident de Tchernobyl, les activités de ¹³⁷Cs dans la viande de bœuf sont comprises entre $0,0200 \pm 0,0035$ et $0,16 \pm 0,09$ Bq/kg frais (Médiane = 0,12 avec 11 détections

sur 12 échantillons mesurés; Figure 15). Ces valeurs s'inscrivent dans la gamme des niveaux habituellement observés en France (0,1 à 1 Bq/kg frais [27]). En revanche, les deux échantillons prélevés dans les zones où les retombées de cet accident ont été les plus importantes, présentent des activités nettement supérieures: $2,09 \pm 0,19$ et $3,5 \pm 0,32$ Bq/kg frais (Figure 15);

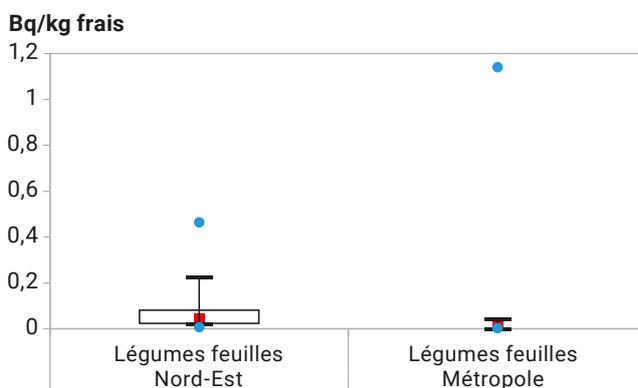


Figure 14. Comparaison des activités en ¹³⁷Cs (Bq/kg frais) acquises dans les légumes feuilles collectés dans le cadre du constat Nord-Est (gauche) avec celles acquises par l'IRSN sur la période 2009-2017 dans le reste de la France (droite).

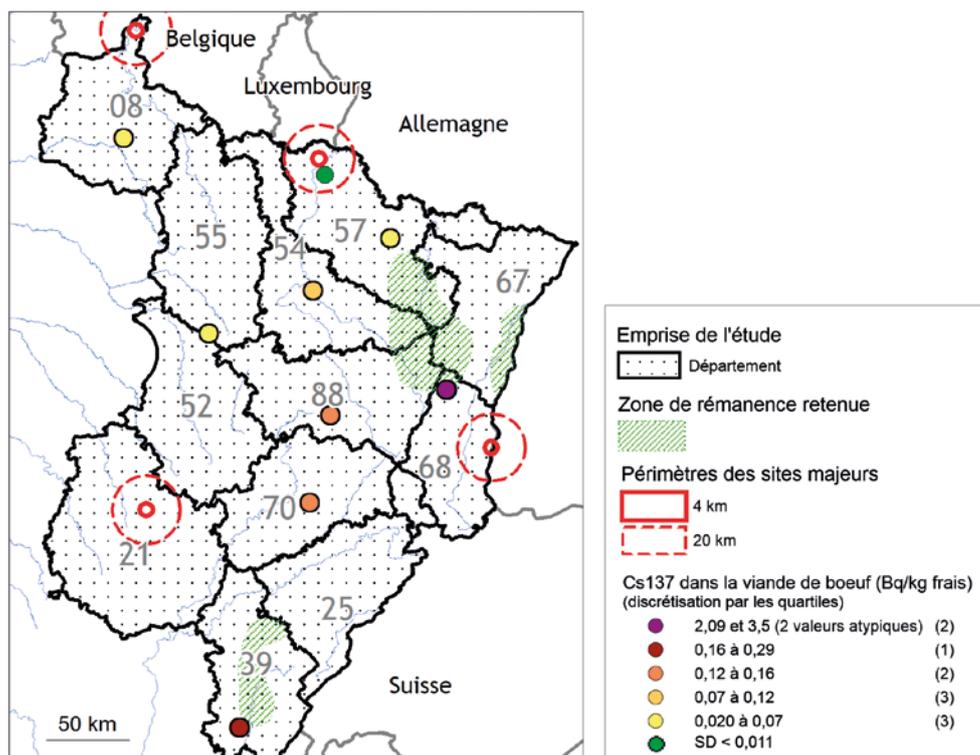


Figure 15. ¹³⁷Cs dans la viande de bœuf entre 2004 et 2013.

- en raison du caractère emblématique des volailles d'Indication Géographique Protégée (IGP, de Bourgogne, du plateau de Langres et de Champagne), la chair de volaille (poulets et canards) a fait l'objet de 3 prélèvements dans les départements de Haute-Marne (52) et Côte-d'Or (21) pour ce constat. Les résultats sont significatifs pour deux d'entre eux ($0,012 \pm 0,007$ et $0,027 \pm 0,006$ Bq/kg frais) mais inférieur au seuil de décision pour le troisième ($< 0,014$ Bq/kg frais; Figure 16). La comparaison des données acquises dans le quart nord-est de la France dans le cadre de cette étude avec celles disponibles ailleurs sur le territoire métropolitain, à distance d'installations nucléaires, montre qu'elles sont du même ordre de grandeur (Figure 17);

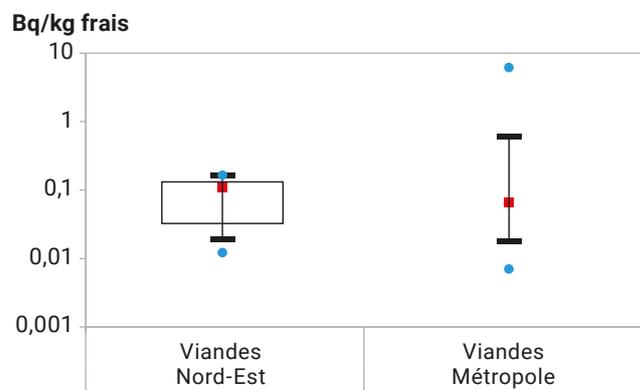


Figure 17. Comparaison des activités en ^{137}Cs (Bq/kg frais) acquises dans les échantillons de viande de volailles et de bœuf collectés dans le cadre du constat Nord-Est (gauche) avec celles acquises par l'IRSN sur la période 2009-2017 dans le reste de la France (droite).

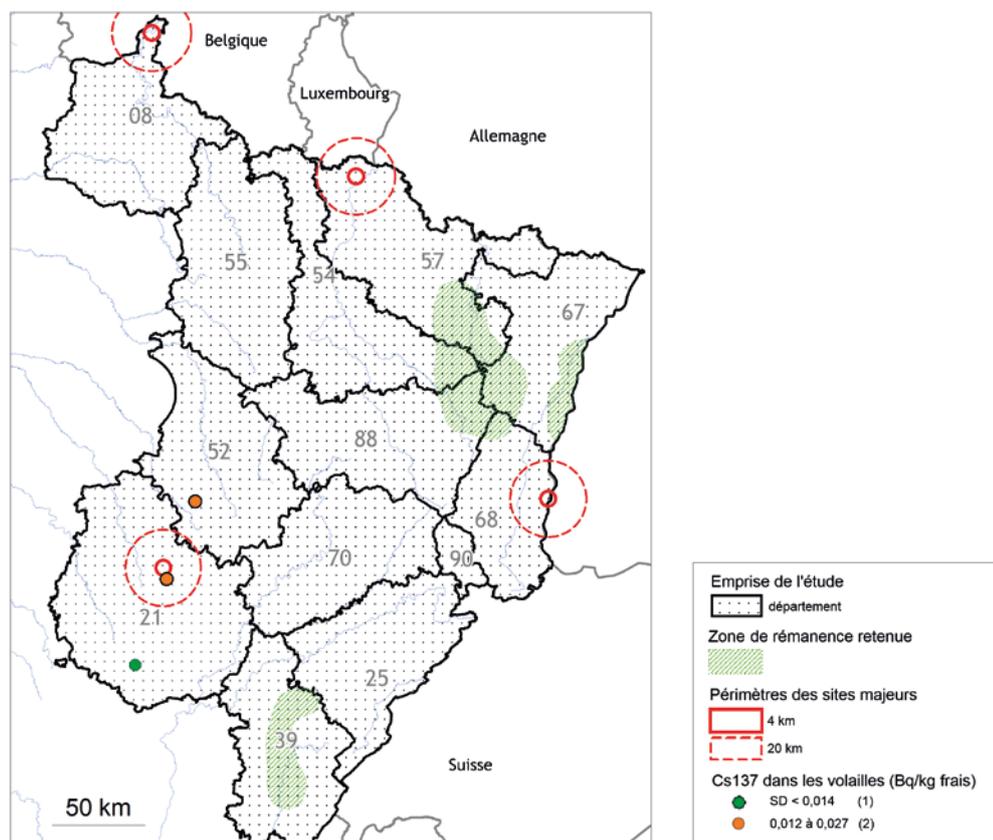


Figure 16. ^{137}Cs dans les volailles entre 2004 et 2013.

• sur les zones les plus touchées par les retombées globales anciennes, 5 % des échantillons de lait mesurés au cours des dernières années dépassent le niveau moyen observé sur le reste du territoire (Figure 18, Tableau 8; [25, 10, 26]). Le lait collecté spécifiquement pour ce constat à Saulxures-sur-Moselotte, en dehors de la zone de rémanence initialement retenue, présente une activité plus élevée qu'attendue ($4,40 \pm 0,47$ Bq/L, Tableau 8) probablement elle aussi due à une plus forte rémanence des retombées atmosphériques globales dans cette zone du département des Vosges. Les autres échantillons de lait présentent des activités en ^{137}Cs dans le lait de vache essentiellement comprises entre $0,0060 \pm 0,0032$ et $0,083 \pm 0,010$ Bq/L (Médiane = 0,023 avec 65 détections/93 échantillons). Ces activités s'inscrivent dans la gamme du bruit de fond acquise ailleurs sur le territoire français (Figure 19). Le ^{137}Cs est aussi presque systématiquement détecté dans les fromages (comté et munster). Les activités vont de $0,015 \pm 0,006$ à $0,085 \pm 0,024$ Bq/kg frais dans le comté (médiane = 0,024 et 15/17 détections) et de $0,019 \pm 0,009$ à $3,40 \pm 0,36$ Bq/kg frais (médiane = 0,080 et 4/4 détections) dans le munster. La variabilité observée dans les échantillons de munster est liée à la localisation des points de prélèvements, soumis de manière hétérogène aux retombées atmo-

sphériques globales. Par ailleurs, les différences d'activité entre les variétés de fromage proviennent de leur mode de fabrication. En effet, le ^{90}Sr se comporte comme son analogue chimique, le calcium, ce qui explique des transferts accentués en ^{90}Sr dans les fromages enrichis en calcium, comme le comté [25].

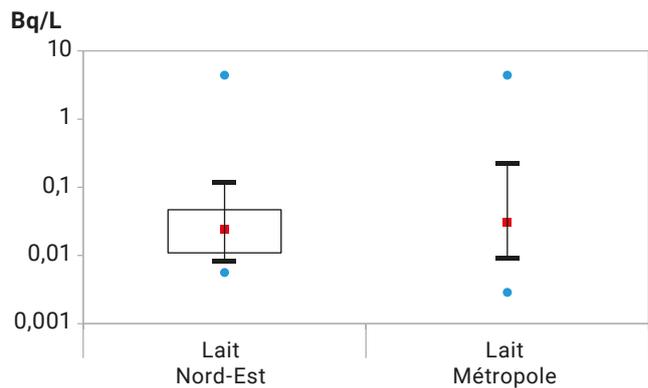


Figure 19. Comparaison des activités en ^{137}Cs (Bq/L) acquises dans les échantillons de lait collectés dans le cadre du constat Nord-Est (gauche) avec celles acquises par l'IRSN sur la période 2009-2017 dans le reste de la France (droite).

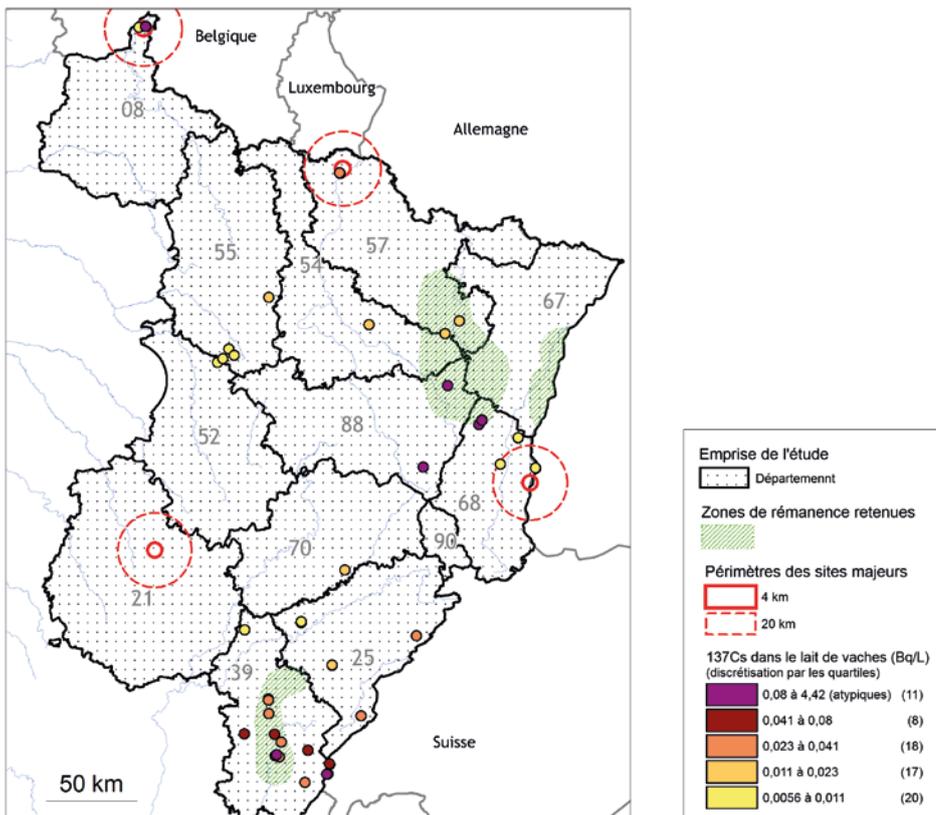


Figure 18. ^{137}Cs dans le lait de vache entre 2004 et 2013.

Enfin les échantillons de denrées naturelles (gibiers et champignons) provenant de zones des Vosges et du Jura les plus touchées par les retombées de l'accident de Tchernobyl, sont en accord avec les données acquises dans le cadre du constat radiologique spécifique à ces zones ($0,05 \pm 0,01$ à 903 ± 82 Bq/kg frais [2]):

- dans le cas du sanglier, les activités sont comprises entre $0,176 \pm 0,021$ et 79 ± 8 Bq/kg frais (6/6 détections) mais 50 % des échantillons sont groupés entre 1,4 et 21 Bq/kg frais (Tableau 8);
- dans les champignons (cèpe de Bordeaux, coprin chevelu, bolet, petit gris, pied de mouton, lactaire, lactaire améthyste, rosé-des-prés), les activités en zone de rémanence sont proches de celles observées lors du constat dédié à ces zones [2];
- les valeurs dans la viande de cerf (2 valeurs) et de chevreuil (4 valeurs) sont respectivement comprises entre $1,98 \pm 0,21$ et $27,2 \pm 2,5$ Bq/kg frais et $0,082 \pm 0,011$ à $1,19 \pm 0,13$ Bq/kg frais. Elles sont conformes aux observations du constat spécifique aux zones de rémanence ($0,20 \pm 0,04$ à $27,0 \pm 2,5$ Bq/kg frais, [2]);
- dans le miel, les rares données disponibles pour le ^{137}Cs étaient inférieures au seuil de décision ($\leq 0,015$ à $\leq 0,05$ Bq/kg frais, 3 mesures). Les analyses menées spécifiquement pour ce constat ont permis de quantifier ce radionucléide ($0,29 \pm 0,06$ et $1,34 \pm 0,15$ Bq/kg frais) pour cette matrice.

- Césium-134 _

Le ^{134}Cs a parfois été mesuré dans des champignons, de la viande de sanglier et des graines de colza entre 2004 et 2011. Les détections les plus anciennes sont liées aux retombées de l'accident de Tchernobyl:

- champignons de 2004 à 2007: $0,022 \pm 0,009$ à $0,55 \pm 0,23$ Bq/kg frais (médiane = $0,16$ Bq/kg frais avec 7 détections sur 30 échantillons mesurés);
- sangliers de 2006 et 2009: $0,032 \pm 0,010$ et $0,033 \pm 0,016$ Bq/kg frais (2 détections/6 échantillons).

Un échantillon de colza prélevé en 2011 présente du ^{134}Cs ($0,19 \pm 0,09$ Bq/kg frais), attribué aux retombées de l'accident de Fukushima Daiichi qui ont marqué de manière fugace l'environnement métropolitain [28]. Ce radionucléide n'a plus été décelé dans les échantillons prélevés dans la région après cette date.

- Strontium-90 _

Les activités en ^{90}Sr dans le lait de vache produit en dehors des zones où la rémanence des essais nucléaires est la plus importante sont comprises entre $0,012 \pm 0,006$ et $0,110 \pm 0,018$ Bq/L (Figure 20). Dans les fromages, les activités de ^{90}Sr sont de $0,049 \pm 0,018$ à $0,071 \pm 0,019$ Bq/kg frais dans le brie de Meaux ; $0,147 \pm 0,020$ à $0,70 \pm 0,14$ Bq/kg frais dans le comté [25]; $0,280 \pm 0,040$ et $2,45 \pm 0,27$ Bq/kg frais dans le munster (Tableau 11) et $2,16 \pm 0,29$ et $2,70 \pm 0,32$ Bq/kg frais dans la tomme au lait de vache [25] (Figure 21). Les différences d'activité entre les variétés de fromage proviennent de leur mode de fabrication [25].

L'activité en ^{90}Sr des salades collectées en zone de référence est de $0,138 \pm 0,020$ Bq/kg frais. Dans les choux à choucroute prélevés spécifiquement pour ce constat, les activités ($0,056 \pm 0,008$ et $0,117 \pm 0,015$ Bq/kg frais, Tableau 11) sont très proches de cette valeur.

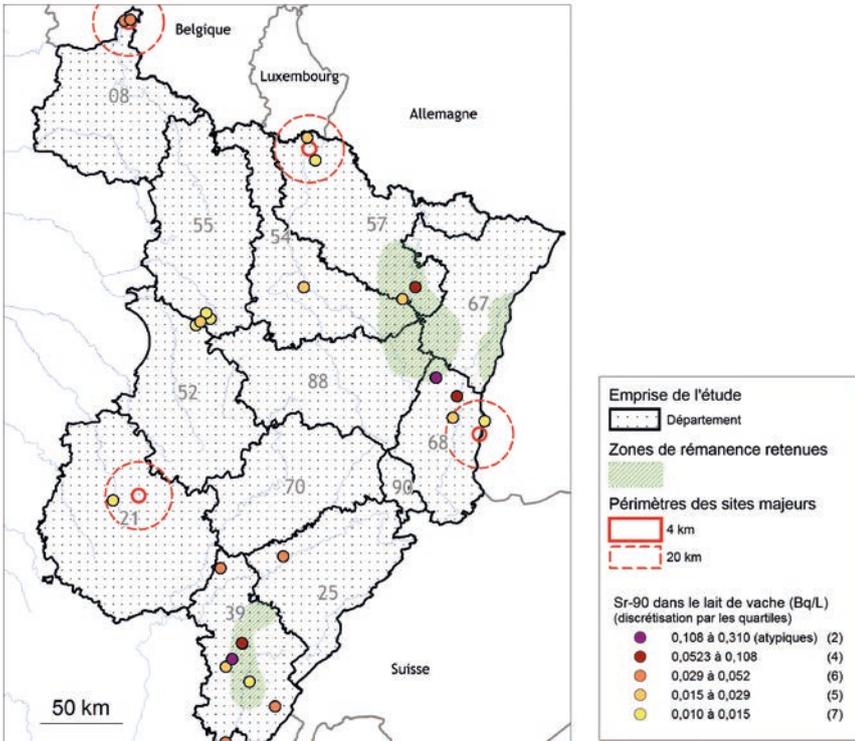


Figure 20. ⁹⁰Sr dans le lait entre 2004 et 2013.

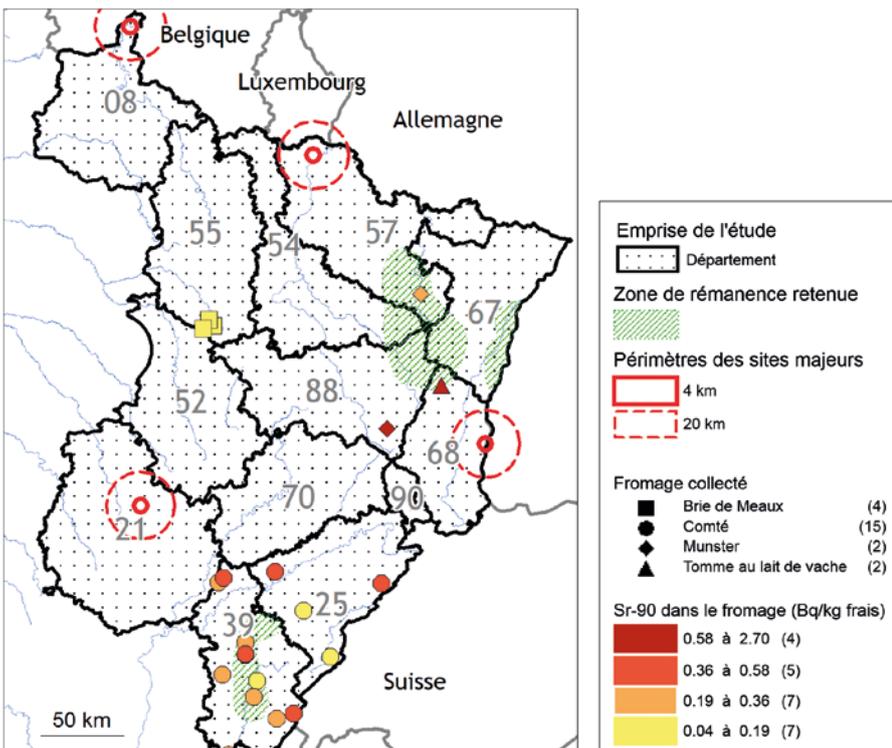


Figure 21. ⁹⁰Sr dans le fromage entre 2004 et 2013.

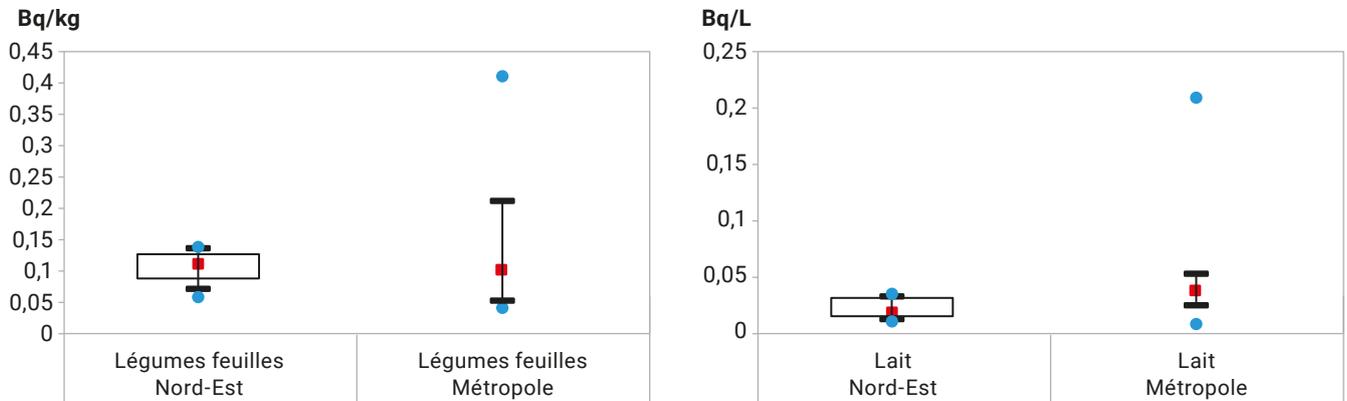


Figure 22. Comparaison des activités en ^{90}Sr acquises dans les échantillons de légumes feuilles (Bq/kg) et de lait (Bq/L) collectés dans le cadre du constat Nord-Est avec celles acquises par l'IRSN sur la période 2009-2017 dans le reste de la France.

Comme le montre la figure 22, ces activités s'inscrivent dans la gamme des bruits de fond obtenus en France dans ces matrices.

Les activités massiques en ^{90}Sr observées dans les prélèvements de sols réalisés en 2010-2011 sur la crête des Vosges ainsi qu'à Nordhouse et précédemment dans le Jura sont comprises dans la gamme des valeurs observées en France loin des installations nucléaires (Tableau 11). Les niveaux d'activités dans l'herbe et dans le lait dans le Nord-Est de la France sont en général proches des niveaux métropolitains (Tableau 11 et [25, 26]), à l'exception de ceux mesurés dans trois prélèvements d'herbe et deux prélèvements de lait qui présentent une activité en ^{90}Sr plus élevée. Ces cinq résultats témoignent de la variabilité des activités en ^{90}Sr parfois observée, résultante d'une hétérogénéité des dépôts initiaux mais également des propriétés physico-chimiques des sols. Ces anomalies sont explicitées plus en détail dans le constat radiologique dédié aux zones de rémanence [2].

Radionucléides naturels

Les résultats d'analyses des radionucléides d'origine naturelle décelés (^{40}K , ^{210}Pb , ^7Be , ^{22}Na , chaînes de l' ^{238}U et du ^{232}Th , isotopes de l'uranium) présentent des niveaux similaires à ceux observés dans l'environnement français à distance des installations.

Les niveaux d'activités des isotopes de l'uranium-234, 235, 236 et 238 analysés dans le cadre de ce constat ne révèlent aucune anomalie par rapport à notre connaissance de l'environnement.

Dans les blés, les activités en uranium-234, 235 et 238 ne sont quantifiables que dans 1 des 3 prélèvements analysés, à respectivement $0,00075 \pm 0,00019$, $0,0000350 \pm 0,000042$ et $0,00075 \pm 0,00009$ Bq/kg frais [29] (soit $1,89 \pm 0,22$ $\mu\text{g}/\text{kg}$ frais). Les concentrations en uranium⁽¹¹⁾, calculées dans les légumes feuilles dans le cadre de ce constat ($0,244 \pm 0,025$ et $1,25 \pm 0,15$ $\mu\text{g}/\text{kg}$ frais) sont plus faibles mais du même ordre de grandeur que les mesures dans les légumes feuilles en Europe ($1,30$ à $5,84$ $\mu\text{g}/\text{kg}$ [30]).

(11) $U \text{ total } (\mu\text{g}\cdot\text{unité}^{-1}) = 234 \cdot 10^5 \times ([^{234}\text{U}]/8,94684673141757 \cdot 10^{-14})/6,02 \cdot 10^{23} + 235 \cdot 10^5 \times ([^{235}\text{U}]/3,11995862579973 \cdot 10^{-17})/6,02 \cdot 10^{23} + 238 \cdot 10^5 \times ([^{238}\text{U}]/4,91595987592438 \cdot 10^{-18})/6,02 \cdot 10^{23}$ avec [234, 235, 238] les activités en uraniums (Bq.unité⁻¹).

Dans le lait de vache, les activités des uraniums ^{234}U , ^{235}U et ^{238}U sont toujours quantifiables (4 analyses), avec des activités respectivement comprises entre $0,80 \pm 0,31$ et $3,4 \pm 0,5$; $0,03750 \pm 0,0040$ et $0,157 \pm 0,0019$ et $0,79 \pm 0,09$ et $3,40 \pm 0,39$ mBq/L. Les concentrations en uranium total, de $0,064 \pm 0,008$ à $0,280 \pm 0,031$ $\mu\text{g/L}$, sont cohérentes avec les concentrations relevées en France ($0,008$ à $0,4$ $\mu\text{g/L}$) ou dans le monde ($0,06$ à $1,38$ $\mu\text{g/L}$) [30]. Des recherches de ^{226}Ra ont été menées dans des laits de vache, spécifiquement pour cette étude afin d'acquérir quelques valeurs de référence. Aucune des analyses n'a permis de quantifier ce radionucléide (≤ 13 à ≤ 21 mBq/L).

Quelle que soit la denrée analysée (blé, chou, lait de vache), l' ^{236}U n'est jamais quantifiable. Les rapports d'activités $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ($0,96 \pm 0,17$ à $1,17 \pm 0,27$) et les rapports de masses $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ ($0,71 \pm 0,11$ à $0,74 \pm 0,12$) sont proches des rapports caractéristiques d'un environnement non marqué (respectivement 1 et 0,72).

Transuraniens

Les activités massiques en ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, et ^{241}Am dans les denrées agricoles sont très faibles, souvent proches des seuils de décision (Tableau 10). Les activités massiques en ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ et ^{241}Am dans le lait de vache sont très souvent non significatives, inférieures au seuil de décision (de $\leq 0,003$ à $\leq 0,010$ mBq/L). Deux prélèvements ont permis de quantifier le $^{239+240}\text{Pu}$ mais avec des activités massiques ($3,0 \pm 0,30$ et $4,0 \pm 4,0$ mBq/L) très proches du seuil de décision.

Une mesure a été réalisée sur du moût de raisin. Dans cet échantillon, les activités massiques en ^{238}Pu et ^{241}Am ne dépassent pas le seuil de décision ($\leq 0,004$ et $\leq 0,005$ mBq/L) et le $^{239+240}\text{Pu}$ a été quantifié à $0,012 \pm 0,010$ mBq/L.

Dans les zones les plus touchées par les retombées anciennes, les transuraniens ont été recherchés dans les sols non cultivés (de prairie et forestiers). Dans la partie superficielle des sols (0-5 cm), les activités en ^{238}Pu sont comprises entre $6,5 \pm 1,6$ et $57,0 \pm 4,0$ mBq/kg sec, celles en $^{239+240}\text{Pu}$ entre 215 ± 11 et $2\,080 \pm 70$ mBq/kg sec et celles en ^{241}Am entre 103 ± 12 et 720 ± 60 mBq/kg sec (Tableau 10 et [25, 26]). Certaines activités sont plus élevées que celles observées dans le reste du territoire (87 ± 6 à 880 ± 32 mBq/kg sec de $^{239+240}\text{Pu}$ dans le Nord-Est, 5 à 440 mBq/kg sec en France [1]). Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que les niveaux observés dans d'autres régions de France où les retombées des essais nucléaires ont aussi été importantes (10 ± 2 à $3\,700 \pm 100$ mBq/kg sec [2]). Notons que, comme attendu, les rapports d'activités $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ et $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ (respectivement de $0,0270 \pm 0,0037$ à $0,03 \pm 0,008$ et de $0,36 \pm 0,06$ à $0,48 \pm 0,06$) sont proches des rapports caractéristiques des retombées des essais aériens d'armes nucléaires (respectivement $0,028 \pm 0,002$ et $0,436 \pm 0,036$ [31, 32]).

2 2 MILIEU AQUATIQUE

- Tritium et carbone-14 -

Les données disponibles dans ce milieu sont moins nombreuses qu'en milieu terrestre, notamment parce que les matrices sont moins diverses et relativement peu consommées pour ce qui relève des denrées aquacoles.

Les résultats de mesures du tritium libre et organiquement lié acquis dans les muscles de poissons dans des zones situées en amont ou à distance des installations nucléaires s'inscrivent dans la gamme du bruit de fond de cette matrice ($0,7 \pm 0,6$ à $1,9 \pm 0,6$ Bq/L, Tableau 3 et Figure 23). Lorsqu'il est mesuré, le tritium organiquement lié des végétaux

aquatiques prélevés en amont des CNPE est également proche du bruit de fond. Enfin, quelques mesures de tritium organiquement lié réalisées dans des sédiments prélevés à distance d'installations nucléaires témoignent d'activités ($2,4 \pm 0,6$ Bq/L) s'inscrivant dans la gamme du bruit de fond du tritium pour cette matrice [33].

Dans les muscles de poissons, en dehors de l'influence des rejets d'installations nucléaires, les activités spécifiques en ^3H , acquises entre 2004 et 2013, sont comprises entre $200,5 \pm 1,7$ et 255 ± 19 Bq/kg de C. Elles s'inscrivent dans la gamme du bruit de fond de ce milieu, déterminée dans l'eau des fleuves et rivières et variant de 100 à 243 Bq/kg de C [33]. Ce bruit de fond est soumis à une variabilité importante du fait des teneurs en carbonates des masses d'eau, elles-mêmes très variables d'un cours d'eau à l'autre, voire d'un secteur à l'autre pour un même fleuve (par exemple, en amont et en aval d'une confluence).

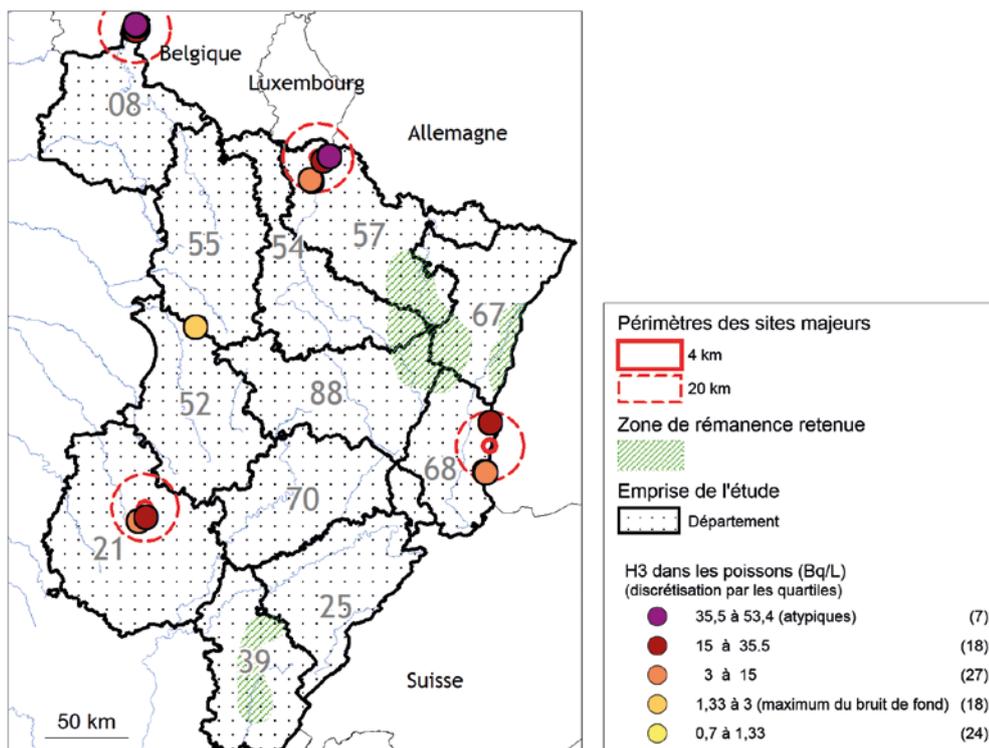


Figure 23. Tritium (HTO et TOL) dans les muscles de poissons entre 2004 et 2013.

Césium-137

La valeur de ^{137}Cs dans la chair de poissons ($1,37 \pm 0,13$ Bq/kg frais) collectés spécifiquement pour ce constat, dans une zone où les retombées atmosphériques globales ont été plus élevées que sur d'autres parties du territoire français, dans le lac de la Roche-Percée dans le massif vosgien, ne se distingue pas des activités mesurées hors zone de rémanence⁽¹²⁾ ($0,0100 \pm 0,0037$ à $1,80 \pm 0,18$ Bq/kg frais [27, 34-36, 29, 10]).

Uranium et transuraniens

Les rares résultats disponibles ont été acquis sur l'observatoire pérenne de l'environnement de l'ANDRA à Bure. Les concentrations en uranium total, acquises dans des sédiments, mousses et végétaux aquatiques et poissons, s'échelonnent de $0,159 \pm 0,018$ à $0,517 \pm 0,059$ $\mu\text{g/kg}$ frais.

Des mesures de transuraniens ont été menées dans les chairs de poissons. Seuls les $^{239+240}\text{Pu}$ ont pu être quantifiés (5/7 détections, de $0,007 \pm 0,009$ à $0,020 \pm 0,009$ mBq/kg frais). Ces valeurs restent proches des seuils de décision ($\leq 0,04$ et $\leq 0,006$ mBq/kg frais) des autres échantillons et s'inscrivent dans les gammes des résultats acquis ailleurs sur le territoire métropolitain.



Prélèvement de végétaux aquatiques.

(12) Une valeur est plus élevée ($8,8 \pm 0,9$ Bq/kg frais), dans les Monts d'Arrée, probablement en raison d'une plus forte rémanence des dépôts des essais aériens d'armes nucléaires.

3

NIVEAUX DE RADIOACTIVITÉ DANS LES DENRÉES ET LES INDICATEURS BIOLOGIQUES DES ZONES SOUS INFLUENCE DES REJETS RADIOACTIFS

3 1

CENTRES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

- Tritium -

Dans les denrées alimentaires et les indicateurs biologiques du **milieu terrestre** (herbe, feuilles d'arbres, salades et lait) prélevés à proximité des CNPE du Nord-Est, les activités en tritium libre et lié acquises au cours de la dernière décennie (essentiellement par l'IRSN et par EDF) sont comprises entre $0,7 \pm 0,7$ et $3,2 \pm 0,7$ Bq/L. Ces activités sont proches du niveau attendu en dehors de tout apport industriel local ($\leq 2,6$ Bq/L de 2007 à 2012 [21, 19, 22]). Ces résultats ne permettent donc pas de déceler la très faible influence des rejets des CNPE implantés dans le quart nord-est de la France; une influence qui a cependant pu être quantifiée globalement autour de l'ensemble des CNPE à partir d'un nombre de mesures beaucoup plus important [10].

Dans les indicateurs du **milieu aquatique** (sédiments, végétaux et poissons), les activités en tritium libre et lié acquises annuellement par l'IRSN varient selon les zones et les matrices étudiées.

En amont des CNPE de Chooz et de Cattenom, les activités mesurées ($\leq 0,6$ à $7,40 \pm 0,37$ Bq/L) sont proches des niveaux attendus en dehors de tout apport anthropique local (1,2 à 3 Bq/L de 2007 à 2012 [33]). En aval de ces deux sites, les activités mesurées dépassent ces niveaux dans 56 % (44/78) des cas ($8,60 \pm 0,40$ à $83,0 \pm 3,6$ Bq/L), mettant ainsi en évidence un marquage régulier des matrices aquatiques par les rejets d'effluents liquides tritiés. Des prélèvements réalisés spécifiquement pour cette étude, sur des zones fréquentées par des pêcheurs et situées à quelques mètres des émissaires de rejets liquides de Chooz et de Cattenom ($13,7 \pm 0,7$ à $24,7 \pm 1,3$ Bq/L, Tableau 3), confirment ces conclusions.

Dans le Rhin, les activités des indicateurs aquatiques en tritium dépassent le bruit de fond dans 42 % (34/81) des cas ($6,6 \pm 1,0$ à $12\,500 \pm 700$ Bq/L), sans différence notable entre l'amont et l'aval du site. Ainsi, les résultats ne permettent pas de différencier l'activité de tritium provenant des installations suisses de celle rejetée par le CNPE de Fessenheim [37]. Les valeurs les plus élevées sont très probablement à mettre en relation avec la présence, en Suisse, d'industries ayant utilisé du tritium et dont on retrouve encore aujourd'hui la trace dans les cours d'eau (cf. Caractérisation du bruit de fond radiologique, [23, 13]).

Carbone-14

Dans le **milieu terrestre**, aucune mesure spécifique n'a été réalisée en carbone-14 dans le cadre de ce constat. Sont synthétisées ci-dessous les mesures disponibles par ailleurs. Les échantillons prélevés dans l'environnement des CNPE (herbe, feuilles d'arbres, salades et lait) présentent des activités en ^{14}C peu variables et pour la majorité d'entre elles comprises entre $227,5 \pm 1,7$ et 247 ± 18 Bq/kg de C. Ces niveaux sont comparables à ceux mesurés à distance des sites nucléaires pour la période étudiée⁽¹³⁾ (243 à 231 Bq/kg de C entre 2004 et 2013 d'après [24]). Une valeur élevée ($363,5 \pm 1,7$ Bq/kg de C à Cattenom) témoigne toutefois du marquage ponctuel de l'environnement par les rejets d'effluents gazeux du site. Une étude menée par l'IRSN sur un jeu de données important avait permis de montrer que les rejets gazeux de ^{14}C étaient à l'origine d'un léger marquage de l'environnement proche des CNPE (un excès de quelques Bq/kg de carbone par rapport au bruit de fond local, [38]). En outre, d'autres mesures sont proches

ou dépassent les plus hautes valeurs des niveaux de référence et pourraient témoigner d'un marquage de l'environnement par les rejets gazeux des CNPE (Figure 24) mais les incertitudes métrologiques associées⁽¹⁴⁾ à ces valeurs ne permettent pas de se prononcer avec certitude sur l'origine du marquage.

Dans le milieu aquatique l'essentiel des activités en ^{14}C des sédiments (11 mesures) est compris entre $162,0 \pm 1,3$ et $247,2 \pm 2,0$ Bq/kg de C. Les activités en ^{14}C dans les végétaux sont principalement comprises entre $190,3 \pm 1,3$ et 244 ± 16 Bq/kg de C (9 mesures). Ces valeurs sont similaires aux bruits de fond déterminés pour le milieu dulçaquicole (décroissant de 243 à 100 Bq/kg de C entre 2004 et 2012 d'après [33]). Deux échantillons de sédiments ($348,8 \pm 2,0$ et $798,0 \pm 4,3$ Bq/kg de C) et deux échantillons de végétaux aquatiques ($861,0 \pm 3,5$ et $1254,0 \pm 4,3$ Bq/kg de C) prélevés en 2008 en aval de Cattenom à l'occasion d'une étude réalisée pour EDF dépassent largement ces valeurs, signant ainsi le marquage du milieu aquatique par les rejets liquides du CNPE.

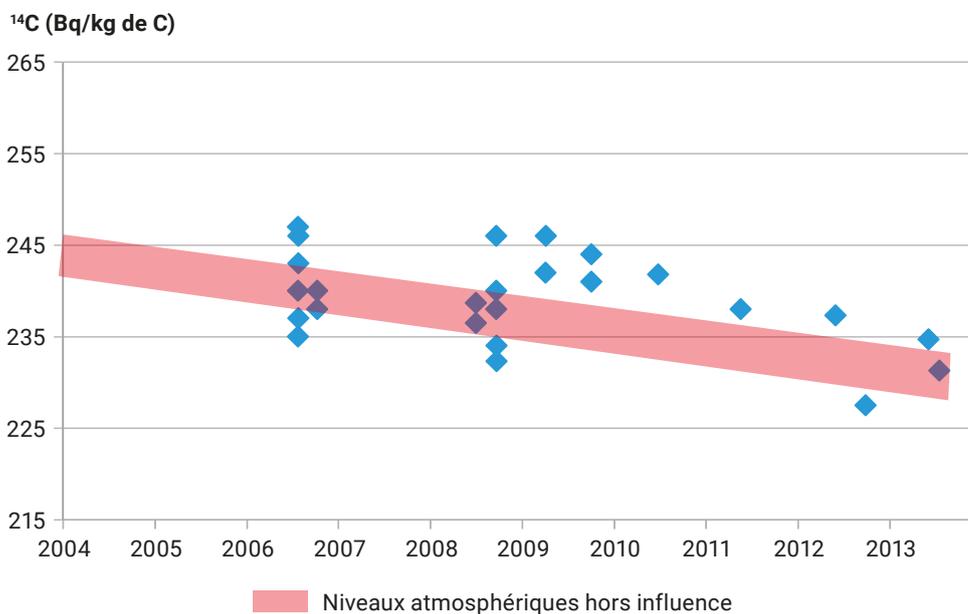


Figure 24. ^{14}C dans les indicateurs terrestres à proximité des CNPE du Nord-Est de la France.

(13) L'activité du carbone-14 dans l'environnement baisse continuellement depuis l'arrêt des essais atmosphériques d'armes nucléaires. En 2018, l'activité du carbone-14 est proche de celle antérieure aux essais (226 Bq/kg de C).

(14) Les incertitudes associées aux résultats de mesures diffèrent selon les méthodes d'analyse. Les plus fortes incertitudes sont associées à la mesure du ^{14}C par la méthode de synthèse du benzène (environ 11 % d'incertitude). Quant aux plus faibles, elles sont associées à la mesure du ^{14}C par spectromètre de masse par accélérateur.

Dans les poissons collectés dans les cours d'eau en aval des CNPE, les activités spécifiques sont comprises entre $221,0 \pm 1,7$ et $2\,830 \pm 150$ Bq/kg de C (Tableau 4 et Figure 25), et parmi elles, seule une valeur se situe en dessous de 240 Bq/kg de C. Bien qu'il soit plus difficile de donner une valeur précise du bruit de fond du ^{14}C en milieu aquatique⁽¹⁵⁾, ces résultats témoignent d'un marquage fréquent par les rejets liquides de l'industrie

électronucléaire (Meuse, Moselle, Rhin). En l'occurrence les résultats des échantillons de poissons prélevés à l'aval immédiat des points de rejets des sites de Cattenom et de Chooz (respectivement $751 \pm 3,3$ et $1\,155 \pm 5$ Bq/kg de C) confirment l'influence des rejets des CNPE sur les matrices biologiques.

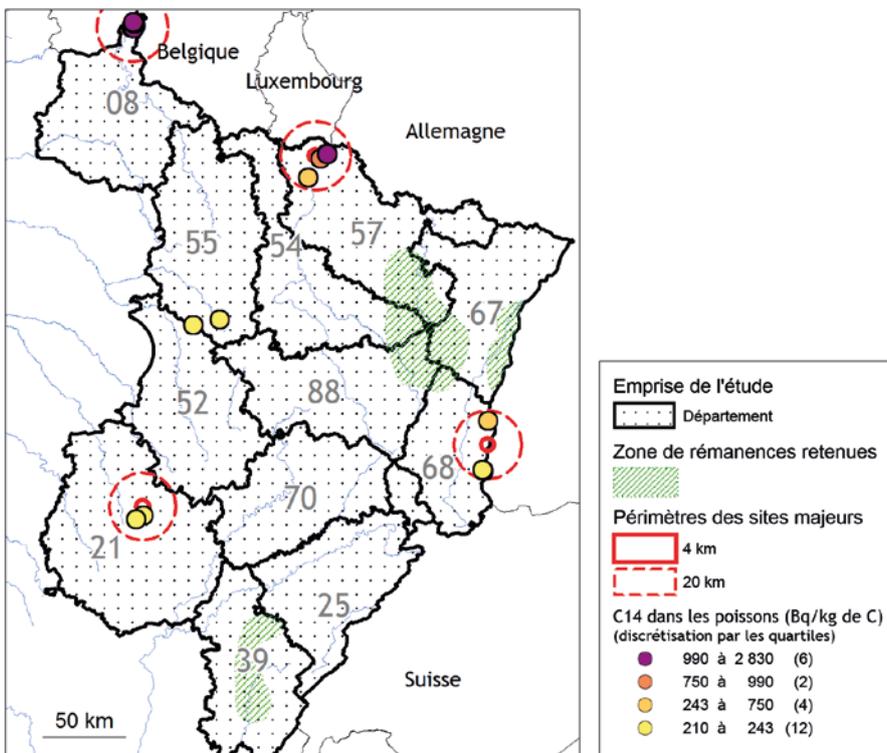


Figure 25. ^{14}C dans les poissons entre 2004 et 2013.

(15) La présence de carbonates anciens issus de l'altération des roches des bassins versants et dépourvus de ^{14}C contribue à « diluer » le bruit de fond du ^{14}C atmosphérique. Par ailleurs, la modification des conditions physico-chimiques tout au long des cours d'eau (apports d'affluents, géologie différente, rejets industriels et/ou agricole...) entraîne une fluctuation du niveau en ^{14}C des eaux d'un lieu de prélèvement à un autre. Toutefois, l'ensemble de ces processus ne contribuent qu'à moduler les niveaux en deçà du niveau de référence atmosphérique, dont on rappelle qu'il était de l'ordre de 240 Bq/kg de C au cours de la période étudiée.

Radionucléides émetteurs gamma d'origine artificielle

¹³⁴Cs et ¹³⁷Cs

Dans le milieu terrestre

Malgré l'utilisation d'une méthodologie apte à mesurer de très faibles niveaux de radioactivité, la majorité des résultats d'analyses par spectrométrie gamma est inférieure au seuil de décision. Neuf produits d'activation ou de fission ont toutefois pu être détectés à proximité des CNPE (⁵⁴Mn, ⁵⁷Co, ⁶⁰Co, ¹³¹I, ^{123m}Te, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs et ²⁴¹Am) dans les échantillons analysés au cours de la dernière décennie. Parmi eux, le ¹³⁷Cs représente 61 % des détections, le ⁶⁰Co et l'¹³¹I 12 % chacun et le ⁵⁸Co, 7 %. Les autres radionucléides représentent chacun moins de 2 % des détections.

Les activités massiques des sols, des mousses terricoles, de l'herbe, des légumes feuilles, du lait de vache, de la viande de bœuf et des céréales (grains de blé, maïs et orge) sont du même niveau que ce que l'on mesure à distance des sites industriels (Figure 26, [27][1]). Les prélèvements réalisés dans le cadre de cette étude ne mettent pas en évidence de marquage du milieu terrestre par les rejets gazeux des CNPE de Chooz, Cattenom et Fessenheim.

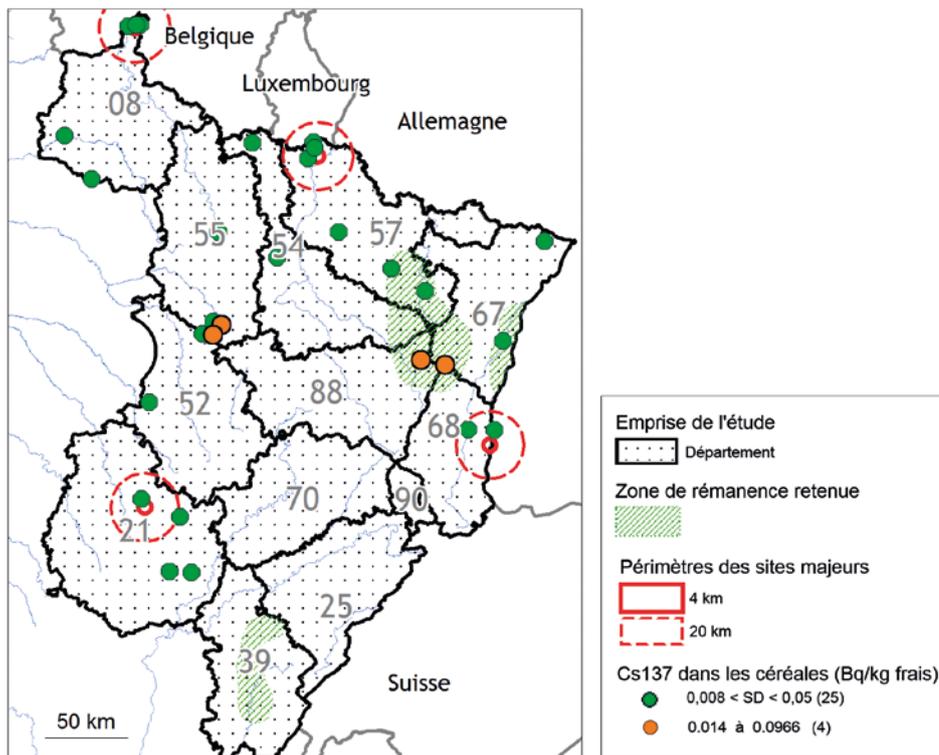


Figure 26. ¹³⁷Cs dans les grains de céréales (blé, maïs et orge) entre 2004 et 2013.

■ Dans le milieu aquatique

La comparaison entre les résultats acquis dans les sédiments et végétaux aquatiques en aval et en amont des CNPE de Chooz et de Fessenheim au cours des études antérieures n'a pas mis en évidence de marquage par les rejets liquides de ces sites, hormis un point dans les sédiments prélevés en aval immédiat du point de rejet du CNPE de Cattenom (en amont de la retenue de Mirgenbach). Il en est de même des analyses réalisées sur les muscles de poissons collectés en amont et en aval des CNPE de Cattenom et de Fessenheim qui n'ont pas montré de marquage par les rejets de ces deux CNPE. Une pêche spécifique, réalisée dans le cadre de cette étude, a permis de collecter des échantillons au plus près du point de rejet; les résultats obtenus ne témoignent encore d'aucune différence avec les échantillons prélevés en amont des sites (Tableau 6). En revanche, la chronique de résultats acquis depuis 2004 dans l'environnement aquatique du CNPE de Chooz, montre que l'activité mesurée en aval en césium-137 est toujours supérieure à celle mesurée en amont (Figure 27; à l'exception d'un prélèvement réalisé en aval lointain et présentant une activité équivalente au prélèvement réalisé en amont du CNPE). Ceci témoigne du marquage régulier des poissons en ^{137}Cs par les rejets liquides du CNPE de Chooz.

Notons que dans le cadre des études radioécologiques menées de 2004 à 2013 à proximité des CNPE du Nord-Est de la France, le ^{134}Cs n'a jamais été observé dans le milieu aquatique.

^{54}Mn , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co , $^{123\text{m}}\text{Te}$

Sur les 122 échantillons de sédiments analysés, le ^{54}Mn et le ^{57}Co ne sont pas détectés tandis que le ^{58}Co est mesuré à sept reprises avec des activités comprises entre $0,29\pm 0,14$ et $1,07\pm 0,18$ Bq/kg sec. Trois de ces résultats significatifs ont été obtenus en amont du CNPE de Fessenheim, ce qui implique une contribution des rejets liquides des centrales suisses au marquage du milieu aquatique en amont du site de Fessenheim. Le ^{60}Co est mesuré à 50 reprises à des activités comprises entre $0,18\pm 0,10$ et $3,00\pm 0,40$ Bq/kg sec. Six de ces mesures ont été obtenues en amont du CNPE de Fessenheim. Enfin, le $^{123\text{m}}\text{Te}$ a été mesuré à deux reprises en aval immédiat du CNPE de Cattenom ($0,40\pm 0,19$ et $0,65\pm 0,14$ Bq/kg sec).

Dans les 328 échantillons de végétaux aquatiques analysés (bryophytes et phanérogames), il a été comptabilisé :

- 78 détections de ^{60}Co ($0,25\pm 0,12$ à $4,6\pm 2,0$ Bq/kg sec) dont 23 en amont du CNPE de Fessenheim;
- 68 détections de ^{58}Co ($0,33\pm 0,14$ à $21,5\pm 2,6$ Bq/kg sec) dont 13 en amont du CNPE de Fessenheim;
- 15 détections de ^{54}Mn , dont 8 en amont du CNPE de Fessenheim ($0,24\pm 0,11$ à $1,3\pm 0,5$ Bq/kg sec);
- 14 détections de $^{123\text{m}}\text{Te}$ ($0,12\pm 0,06$ à $2,70\pm 0,30$ Bq/kg sec) en aval des CNPE de Chooz et de Cattenom;
- 4 détections de ^{57}Co ($0,12\pm 0,049$ à $0,16\pm 0,06$ Bq/kg sec) dont une en amont du CNPE de Fessenheim.

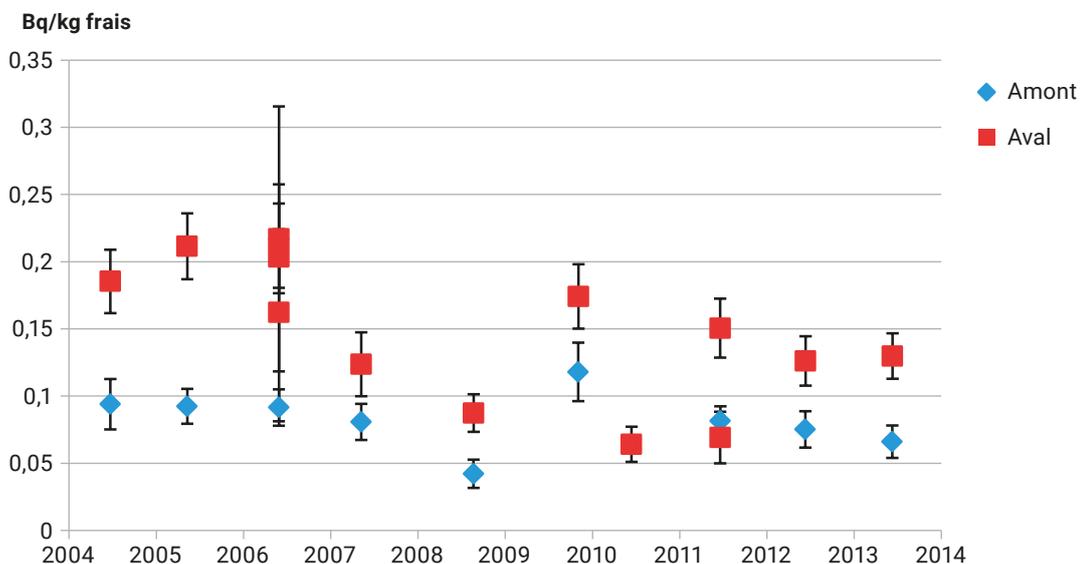


Figure 27. ^{137}Cs mesurés dans les poissons en amont et en aval du CNPE de Chooz entre 2004 et 2013.

Enfin, dans les échantillons de poissons, seul un lot d'anguilles collectées dans le Rhin en aval de la frontière franco-suisse et en amont du CNPE de Fessenheim présentait une activité mesurable de ^{60}Co de $0,0090 \pm 0,0048$ Bq/kg frais. Ce résultat, obtenu à l'aide de mesure à très bas niveau, exceptionnel dans cette matrice, est inférieur au seuil de décision d'une mesure réalisée sur un lot de poissons collecté la même année en aval du CNPE de Fessenheim ($\leq 0,045$ Bq/kg frais). Les anguilles étant des poissons très mobiles [39], il est difficile de statuer sur l'origine de ce marquage entre les centrales suisses ou le CNPE de Fessenheim.

On retiendra donc que les rejets liquides des CNPE de Chooz, Cattenom et Fessenheim marquent régulièrement les milieux aquatiques situés en aval des points de rejets. Toutefois les activités mesurées sont très faibles et stables au cours de la dernière décennie. Notons également que l'environnement aquatique du CNPE de Fessenheim est marqué par les rejets liquides des installations nucléaires suisses implantées plus en amont sur le Rhin, comme en atteste la détection régulière de produits d'activation et de fission dans des échantillons prélevés en amont du site français. Cette source additionnelle de radioactivité ne permet pas de discriminer spécifiquement la contribution du CNPE de Fessenheim sur son environnement direct.

Autres émetteurs gamma

Peu après l'accident de Fukushima Daiichi au printemps 2011, le territoire métropolitain a été, fugacement et très faiblement, marqué par des dépôts de radionucléides. En particulier, ^{131}I a été mesuré dans deux échantillons d'herbe ($2,5 \pm 0,6$ et $8,2 \pm 1,3$ Bq/kg sec) prélevés spécifiquement pour suivre les retombées de cet accident à proximité du CNPE de Chooz d'une part et à Dijon d'autre part [28].

Les détections de ^{131}I sont fréquentes dans le milieu aquatique à proximité d'établissements médicaux (cf. Services de médecine nucléaire). Lorsqu'il est quantifié dans les matrices aquatiques à proximité des CNPE ($0,80 \pm 0,40$ à $1\,520 \pm 20$ Bq/kg sec), la contribution des rejets liquides du site n'est jamais mise en évidence. En effet, les apports plus importants provenant essentiellement des rejets hospitaliers ne permettent pas de distinguer la contribution des CNPE.

^{241}Am a été détecté en 2011 dans un sol prélevé à proximité de Fessenheim ($0,26 \pm 0,15$ Bq/kg sec) et dans un lot de poissons prélevés en 2006 en aval de Chooz ($0,019 \pm 0,009$ Bq/kg frais). Des mesures de ^{241}Am , réalisées avec une technique plus performante (spectrométrie alpha après une radiochimie) sur des échantillons de sédiments et de végétaux prélevés la même année, ont permis de montrer que la présence de

ce radionucléide est liée à la rémanence des retombées des essais aériens d'armes nucléaires, comme en attestait en outre les rapports isotopiques calculés pour ces échantillons ($^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ et $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$).

Uranium

Quelques mesures ont été acquises spécifiquement dans le cadre de ce constat afin de disposer de niveaux de référence pour les isotopes de l'uranium à proximité des CNPE (Tableau 9).

En **milieu terrestre**, les choux à choucroute cultivés à proximité du CNPE de Fessenheim présentent des activités massiques en uranium 234, 235 et 238 ($0,23 \pm 0,031$ à $5,5 \pm 1,5$ mBq/kg sec) et des rapports d'activités et de masses⁽¹⁶⁾ (respectivement $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1,10 \pm 0,34$ et $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 0,72 \pm 0,13$) caractéristiques du bruit de fond mesuré à distance de toute installation nucléaire [1]. L'activité en ^{236}U est inférieure au seuil de décision ($< 0,003$ mBq/kg sec).

En **milieu aquatique**, les poissons prélevés en aval immédiat des CNPE de Chooz et de Cattenom, dans des zones autorisées à la pêche de loisir, témoignent d'activités massiques et de rapports d'activités et de masses ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ et $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$) caractéristiques du bruit de fond observé à distance de toute installation (Tableau 9). Des mesures complémentaires ont été réalisées dans les phanérogames immergées et des sédiments collectés à proximité immédiate du point de rejet du CNPE de Chooz, dans une zone très peu échantillonnée par le passé. Là encore, les activités massiques en uranium 234, 235 et 238 ($0,0142 \pm 0,0017$ à $16,4 \pm 1,9$ Bq/kg sec, Tableau 9) ainsi que les rapports d'activités et de masses (respectivement $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 0,97 \pm 0,19$ à $1,17 \pm 0,21$ et $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 0,72 \pm 0,12$) sont caractéristiques du bruit de fond. L' ^{236}U n'a été décelé dans aucun des échantillons mesurés.

Transuraniens

Dans les milieux terrestre (surface de sols non remaniés, légumes feuilles, herbe et lait de vache) et aquatique (sédiments, végétaux aquatiques et poissons), les résultats de mesure (^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ et ^{241}Am) s'inscrivent dans la gamme des niveaux d'activité attendus en dehors d'un apport anthropique local. Seul un prélèvement de salades collecté pour ce constat à proximité du CNPE de Chooz présente des activités élevées pour cette matrice, proches de celles attendues pour un sol (^{238}Pu : $0,30 \pm 0,08$; $^{239+240}\text{Pu}$: $8,6 \pm 0,5$ et ^{241}Am : $4,00 \pm 0,47$ mBq/kg frais). Ceci est très probablement lié à la présence de particules de sols sur les feuilles de salade.

Lorsqu'ils sont calculables⁽¹⁷⁾, les rapports d'activité

(16) Valeurs de référence des rapports isotopiques : rapport d'activité $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 1$ et rapport massique $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 0,72$.

(17) Deux valeurs assorties d'une forte incertitude ont été écartées. Il s'agit d'un échantillon de laitue : $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu} = 0,18 \pm 0,21$ et $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu} = 0,50 \pm 0,47$ et d'un échantillon d'herbe (rapports respectifs de $0,07 \pm 0,06$ et $0,49 \pm 0,18$).

$^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ et $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ de ces échantillons (respectivement de $0,0190\pm 0,0035$ à $0,053\pm 0,013$ et de $0,23\pm 0,07$ à $0,53\pm 0,13$) sont toujours proches des valeurs caractéristiques des retombées des essais aériens d'armes nucléaires (respectivement $0,028\pm 0,002$ et $0,436\pm 0,036$ [31, 32]).

Strontium-90

Les activités massiques dans les sols de surface (0-5 cm), l'herbe, les légumes feuilles⁽¹⁸⁾, les sédiments et les poissons collectés à proximité des CNPE (Tableau 11, Figures 28 à 30) sont comparables aux niveaux observés dans le Nord-Est de la France à distance de toute installation nucléaire [25, 26].

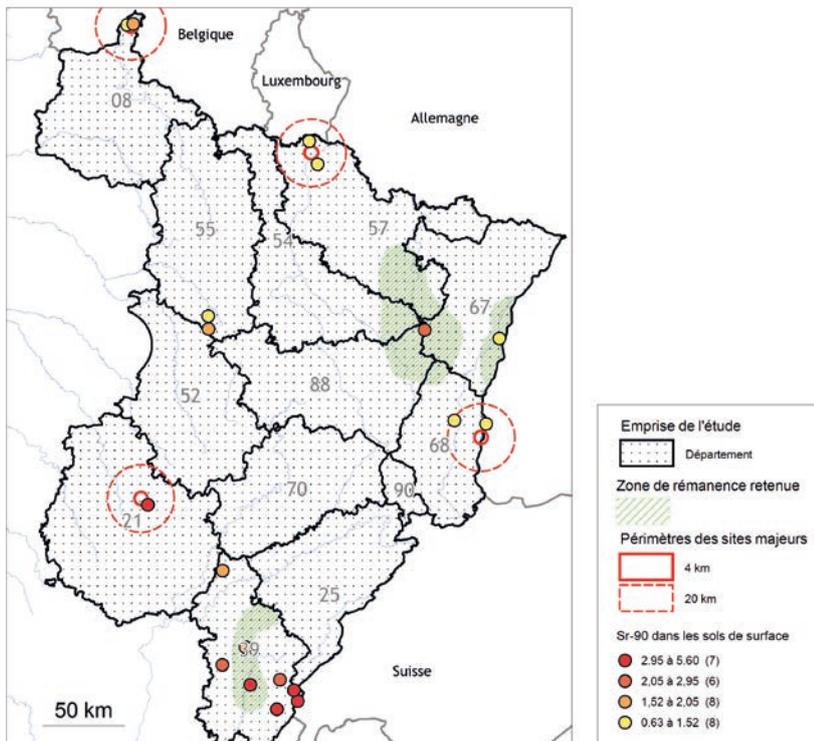


Figure 28. ^{90}Sr dans les sols non cultivés de surface entre 2004 et 2013.

(18) Le prélèvement, réalisé à proximité du CNPE de Chooz, atteint une activité massique en ^{90}Sr , presque deux fois plus élevée que le niveau des autres prélèvements du Nord-Est ($4,6\pm 0,7$ Bq/kg sec, Tableau 11 page 78). Après analyse, l'hypothèse qu'une quantité importante de sol soit restée sur les salades collectées est retenue. En effet, l'aliquote mesurée contenait peu de matière organique (rapport de poids sec/cendres très proche de 1).

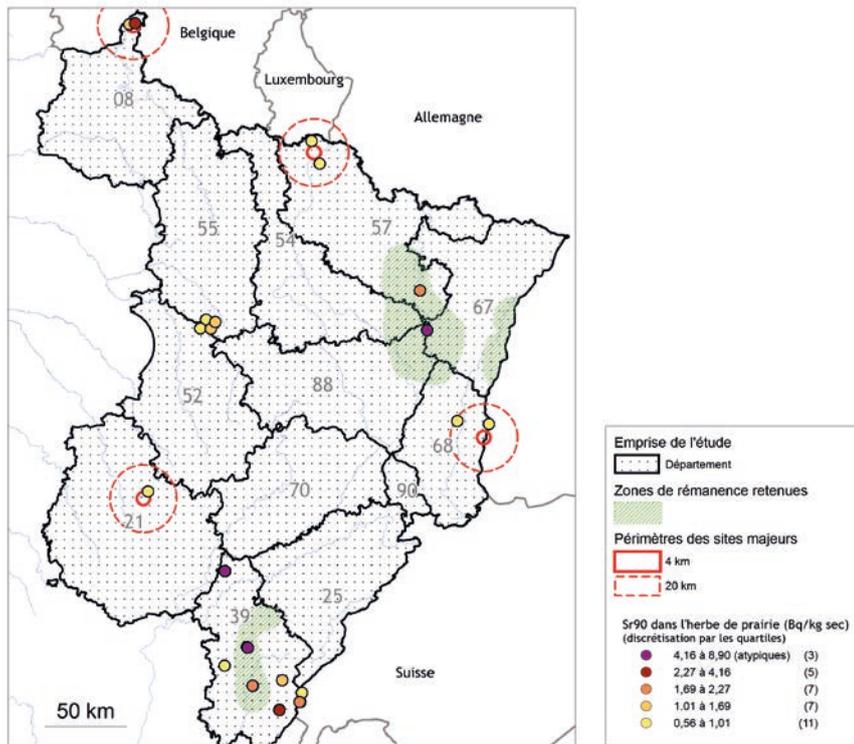


Figure 29. ⁹⁰Sr dans l'herbe de prairie entre 2004 et 2013.

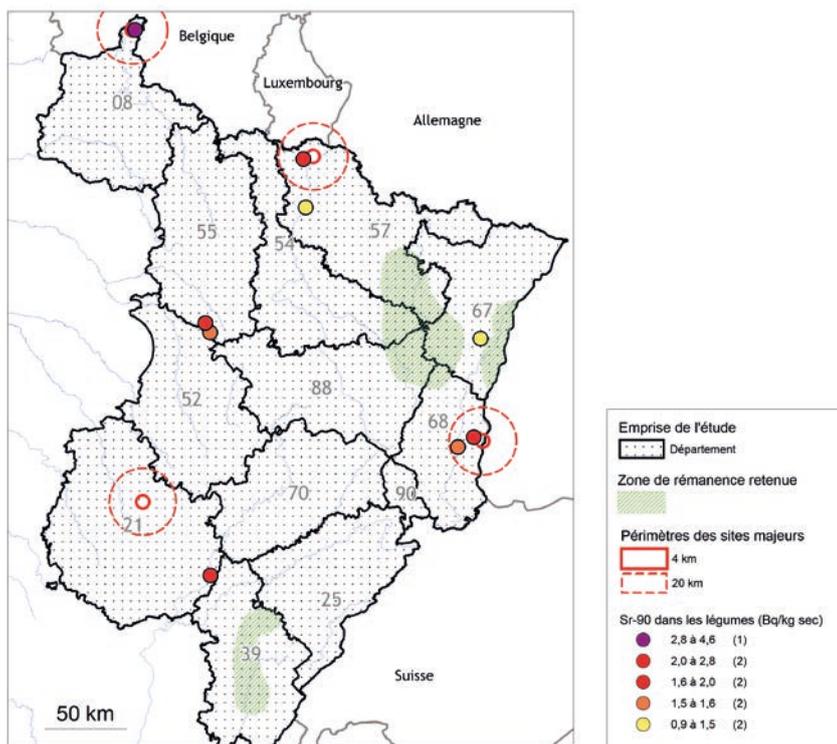


Figure 30. ⁹⁰Sr dans les légumes entre 2004 et 2013.

Les rejets d'effluents liquides et gazeux des CNPE implantés dans le Nord-Est de la France induisent un marquage ténu et localisé de l'environnement. En milieu terrestre, seuls le tritium et le carbone-14

sont parfois mesurés à des niveaux légèrement supérieurs à ceux observés hors influence des CNPE. En milieu aquatique, ces deux radionucléides marquent de manière un peu plus nette les matrices biologiques et minérales. D'autres radionucléides issus des CNPE y sont également détectés, plus rarement, mais permettent d'attester de l'influence des rejets liquides des CNPE sur leur environnement proche.

3 2 CENTRE DU CEA À VALDUC

Tritium

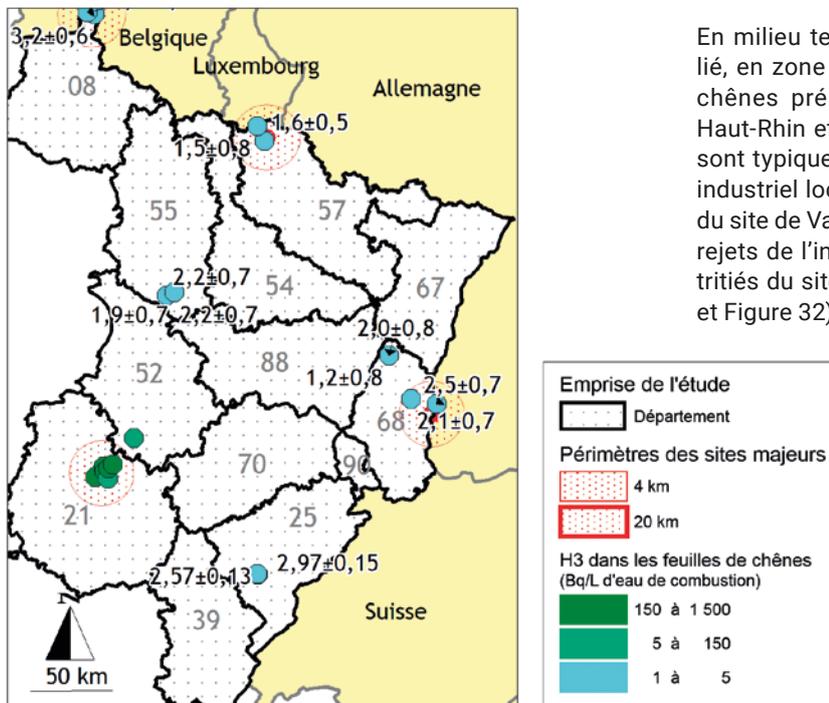


Figure 31. Tritium organiquement lié dans les feuilles d'arbres entre 2004 et 2013.

En milieu terrestre, les activités en tritium organiquement lié, en zone non influencée, mesurées dans les feuilles de chênes prélevées entre 2004 et 2013 dans le Doubs, le Haut-Rhin et la Meuse ($1,2 \pm 0,8$ à $2,97 \pm 0,15$ Bq/L, Figure 31) sont typiques de celles attendues en dehors de tout apport industriel local ($1,4 \pm 1,2$ Bq/L [21, 19, 22]). En se rapprochant du site de Valduc, dès 30 km dans la zone sous influence des rejets de l'installation, à Prasley, le marquage par les rejets tritiés du site est mis en évidence ($14,7 \pm 0,8$ Bq/L, Tableau 3 et Figure 32).

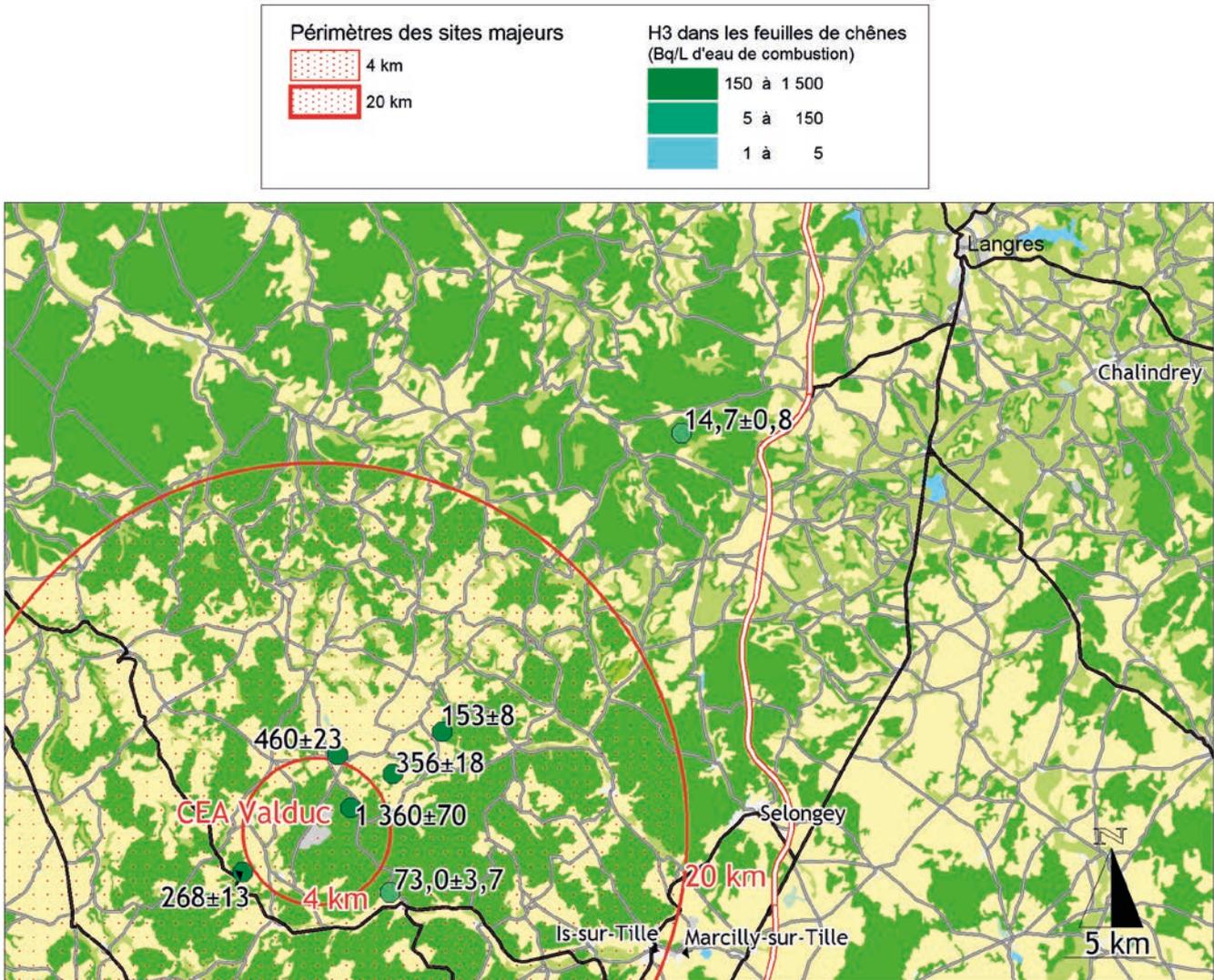


Figure 32. Tritium dans les feuilles d'arbre à proximité de Valduc entre 2004 et 2011.

Les activités en tritium lié, mesurées dans les feuilles de chênes prélevées à une distance comprise entre 4 et 20 km des installations de Valduc ($73,0 \pm 3,7$ à 460 ± 23 Bq/L, Tableau 3 et Figure 32) dans le cadre de ce constat, sont du même ordre de grandeur que celles acquises aux mêmes stations⁽¹⁹⁾ en 2001 ($81,8 \pm 1,5$ à 254 ± 4 Bq/L, [40]). L'activité la plus élevée mesurée en 2010 ($1\,360 \pm 70$ Bq/L) provient d'un échantillon collecté à moins de 4 km du site, zone qui n'avait pas été prospectée lors de l'étude réalisée en 2001.

Dans les prélèvements d'herbe collectés à proximité du site en 2010, les activités en tritium lié sont comprises entre $2,12 \pm 0,17$ et $7,81 \pm 0,32$ Bq/L [RNM⁽²⁰⁾]. Dans le lait de vache, l'activité en tritium est de $3,29 \pm 0,16$ Bq/L (Tableau 3). Les activités en tritium total (HTO+TOL) mesurées dans le lait à proximité de Valduc et reportées dans le bilan radiologique 2009 [41] sont comprises entre $6,5 \pm 2,1$ et 27 ± 3 Bq/L. Toutes ces valeurs dépassent le bruit de fond actuel ($0,9$ à 3 Bq/L [21, 19]) et signent le marquage de l'environnement terrestre proche par les rejets gazeux du site de Valduc. Les données acquises depuis et analysées par l'IRSN dans le cadre des bilans radiologiques parus en 2016 et 2018 confirment ce net marquage des matrices terrestres [1, 10].

Les résultats des mesures de tritium libre sont connus pour être beaucoup plus fluctuants car représentatifs des concentrations atmosphériques des heures précédant le prélèvement. Les échantillons, prélevés dans le cadre de ce constat début octobre 2010, présentent une activité en tritium libre ($\leq 0,7$ à 184 ± 7 Bq/L, Tableau 3) toujours inférieure à l'activité du tritium organiquement lié (TOL). Sachant que le TOL des végétaux correspond au niveau moyen du tritium de l'air au cours de leur période de développement, on peut en déduire que les rejets de tritium des installations étaient donc moins importants le jour du prélèvement que durant la majorité du reste de l'année ou que les conditions de dispersion atmosphérique n'orientaient pas, ce jour-là, les effluents vers les zones échantillonnées.

Dans le **milieu aquatique** (Figure 33), tous les échantillons prélevés présentent des activités en tritium organiquement lié ($5,03 \pm 0,26$ à $1\,170 \pm 60$ Bq/L, Tableau 3) supérieures aux niveaux mesurés à distance de toute installation (niveaux de référence: $2,6 \pm 0,4$ Bq/L, [33]) et ceci même à plusieurs kilomètres du site comme par exemple à Lamargelle (mousse: $5,03 \pm 0,26$ Bq/L et poissons: $10,4 \pm 0,6$ Bq/L), ou au nord-est à Barjon, (phanérogames: $38,0 \pm 1,9$ et $38,5 \pm 2,0$ Bq/L et sédiments: $56,0 \pm 2,9$ Bq/L). Au moment des prélèvements réalisés dans le cadre de cette étude, l'installation ne possédant plus d'autorisation de rejet liquide⁽²¹⁾ alors que jusqu'en 1994 ces effluents radioactifs étaient rejetés dans un vallon situé au sud du site (Combe du Tilleul), ce marquage du milieu aquatique provient des dépôts de tritium issu des rejets gazeux des installations du site de Valduc et pour partie de la rémanence des rejets tritiés liquides passés. Le marquage le plus fort est localisé au sud du site ($20,2 \pm 1,2$ à 214 ± 8 Bq/L de tritium libre et de $44,9 \pm 2,2$ à $1\,170 \pm 60$ Bq/L de tritium organiquement lié), dans les combes du Noirvau et de la Douix, situées en contrebas de l'enceinte de Valduc [42], dans les eaux phréatiques et de surface. La plus forte activité ($3\,150 \pm 160$ Bq/L) a été mise en évidence dans le sol de la combe du Tilleul, ancien émissaire des rejets liquides du site. Ces résultats sont bien corrélés avec ceux obtenus en milieu terrestre qui témoignent également d'un net marquage de l'environnement à proximité de l'installation.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude sont concordants avec ceux acquis par l'exploitant [43].

(19) Écart maximal de 1 km.

(20) <http://www.mesure-radioactivite.fr/>, extraction réduite aux données produites par l'IRSN.

(21) Les effluents liquides sont aujourd'hui soit vaporisés, soit entreposés sur le site, soit transférés vers des filières de traitement et/ou de stockage, selon les prescriptions de l'arrêté du 5 novembre 2018.

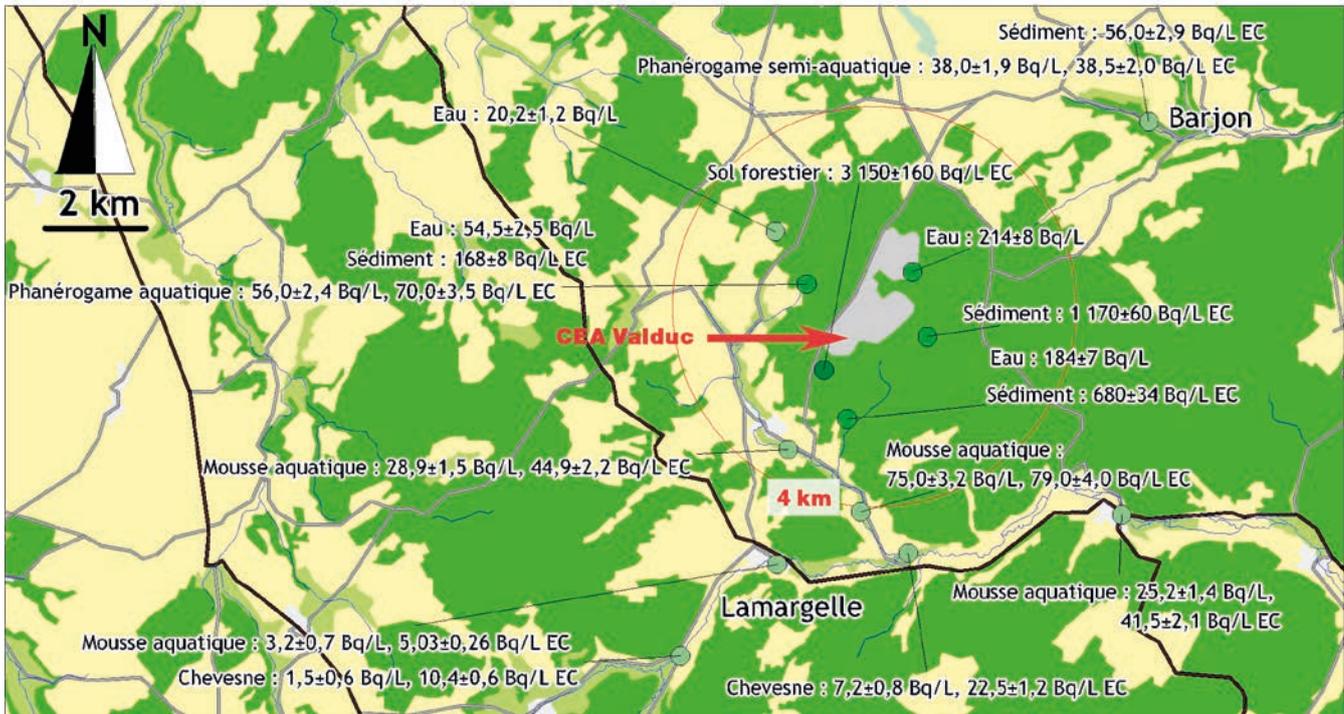


Figure 33. Tritium dans des matrices aquatiques à proximité de Valduc en 2010 et 2011.

Carbone-14

Les activités de ^{14}C dans les feuilles de chênes et le lait autour du site (en 2010 : $232,5 \pm 1,0$ à $235,3 \pm 1,3$ Bq/kg de C, Tableau 4) sont proches du bruit de fond pour ce radionucléide dans le milieu terrestre, hors influence (234 ± 2 Bq/kg de C en 2010 [24] et Figure 34).

Les sédiments et végétaux aquatiques, prélevés à proximité du site dans les cours d'eau, à l'ouest à Lochère, à l'est dans l'étang de Valduc et à proximité de Salives au nord-est, montrent des niveaux inférieurs (213 ± 2 à 231 ± 2 Bq/kg de C) au bruit de fond atmosphérique, signe d'un mélange du carbone atmosphérique avec des carbonates anciens, présents dans les cours d'eau et appauvris en ^{14}C .

Ces résultats sont dans la gamme des valeurs attendues en dehors de tout apport anthropique local ($94,5 \pm 1,5$ à $234,0 \pm 2,7$ Bq/kg de C [33]). En revanche, dans la combe du Tilleul et le ruisseau de Noirvau, au sud du site, les mesures ($240,5 \pm 1,7$ et $247,5 \pm 1,7$ Bq/kg de C) dépassent légèrement le bruit de fond atmosphérique. Plus en aval dans la Tille, à Frénois, les résultats obtenus dans les poissons ne mettent pas en évidence d'apport de ^{14}C local ($221,0 \pm 1,7$ et $225,8 \pm 1,7$ Bq/kg de C). Les activités en ^{14}C des deux sédiments de la combe du Tilleul et du ruisseau de Noirvau, plus élevées que celles obtenues sur l'ensemble des autres matrices analysées, peuvent être liées à la persistance de ^{14}C dans la matière organique présente dans ces sédiments, comme mis en évidence sur le bassin versant du Rhône [44, 45].

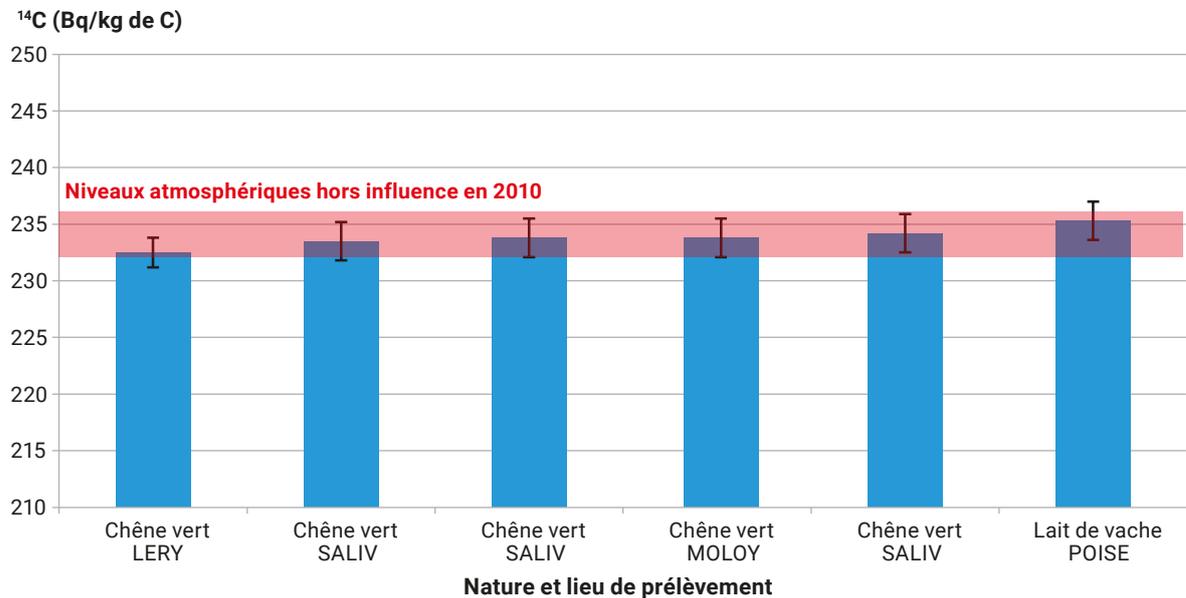


Figure 34. ¹⁴C dans les milieux terrestres à proximité du site de Valduc en 2010.

Strontium-90

Les valeurs acquises à proximité du site de Valduc dans le cadre de ce constat (sols 0-20 cm), herbe, lait de vache et sédiments (Tableau 11, Figure 28, Figure 29), sont proches des niveaux attendus en dehors d'un apport anthropique local [46] et proches des niveaux observés dans le nord-est de la France à distance des sites nucléaires [25, 26]. Aucune contribution du site de Valduc n'est ainsi mise en évidence dans les environnements terrestre et dulçaquicole alentour.

Émetteurs gamma artificiels (césiums, iode, cobalt, etc.)

Seul le ¹³⁷Cs est détecté dans les sols (*Profondeur 0-5 cm*), les sédiments, les mousses terricoles, l'herbe, le lait, les céréales (blé et orge), la chair de canards et les poissons (Tableau 8). Les activités mesurées sont en accord avec les niveaux observés en dehors d'un apport industriel local [27, 46] témoignant de l'origine globale de ce radionucléide.

Une recherche spécifique d'¹³¹I dans un des indicateurs les plus pertinents pour cette analyse (mousse terricole) n'a pas permis de mettre en évidence la présence de ce radionucléide ($\leq 1,4$ Bq/kg sec).

Uranium et radium

Dans les eaux, les sédiments, les sols, les mousses terrestres et aquatiques et les poissons collectés à proximité du site, les activités massiques des isotopes 234, 235 et 238 de l'uranium et les concentrations en uranium total sont proches du bruit de fond naturel (Tableau 9, [47]).

L'²³⁶U n'a pas pu être quantifié dans la majorité des échantillons analysés sauf dans les échantillons d'eau et de sédiments collectés dans la source du ruisseau de Noirvau, où il a été mesuré à des niveaux de $0,014 \pm 0,006$ mBq/L dans l'eau et $10,0 \pm 3,5$ mBq/kg sec dans les sédiments. Ces détections, exceptionnelles dans l'environnement, semblent témoigner d'un marquage localisé de l'environnement aquatique par les installations de Valduc. En aval plus lointain, dans les mousses collectées dans le ruisseau du Léry et dans les poissons prélevés à Frénois, les résultats ne montrent plus aucun marquage par l'²³⁶U.

Lorsque les éléments des familles des uraniums-235 et 238 sont mesurés par ICPMS, il est possible de calculer le rapport de masses ²³⁵U/²³⁸U. Un rapport proche de 0,72 % montre qu'il s'agit d'uranium naturel. Dans le cas des échantillons prélevés à proximité du site de Valduc (eaux, sédiments et végétaux terrestre et aquatique), les résultats sont généralement similaires au rapport de masse naturel. Les deux échantillons d'eau et de sédiments dans lesquels ont été mesurés de l'²³⁶U présentent des rapports massiques ²³⁵U/²³⁸U (respectivement $0,752 \pm 0,035$ et $0,747 \pm 0,033$) légèrement supérieurs à 0,72 %

(Figure 35). Ces rapports s'écartent légèrement des niveaux rencontrés hors influence d'activité nucléaire (actuelle ou passée). Néanmoins, compte tenu des incertitudes de mesures, il est difficile d'en déterminer l'origine (site de Valduc ou variabilité du bruit de fond).

Le ^{226}Ra recherché dans le lait collecté à proximité du site CEA de Valduc ne dépasse pas le seuil de décision ($\leq 0,013$ Bq/L). Il en va de même pour les quatre échantillons d'eau prélevés dans les quatre sources situées à proximité du site ($\leq 0,011$ Bq/L).

Transuraniens

Les résultats de mesure (Tableau 10) des transuraniens dont nous disposons ont tous été acquis dans le cadre de ce constat radiologique régional (sols, sédiments et aiguilles de résineux). Les valeurs observées sont cohérentes avec les niveaux attendus dans un environnement non marqué.

Les rapports d'activités confirment qu'il n'y a pas de marquage de l'environnement dans les zones échantillonnées. Les rapports mesurés ($0,0260 \pm 0,0043 < ^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu} < 0,032 \pm 0,005$ et $0,260 \pm 0,033 < ^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu} < 0,58 \pm 0,15$) ne s'écartent pas significativement des rapports théoriques des retombées des essais aériens d'armes nucléaires (respectivement $0,028 \pm 0,002$ et $0,436 \pm 0,036$ [31, 32]).

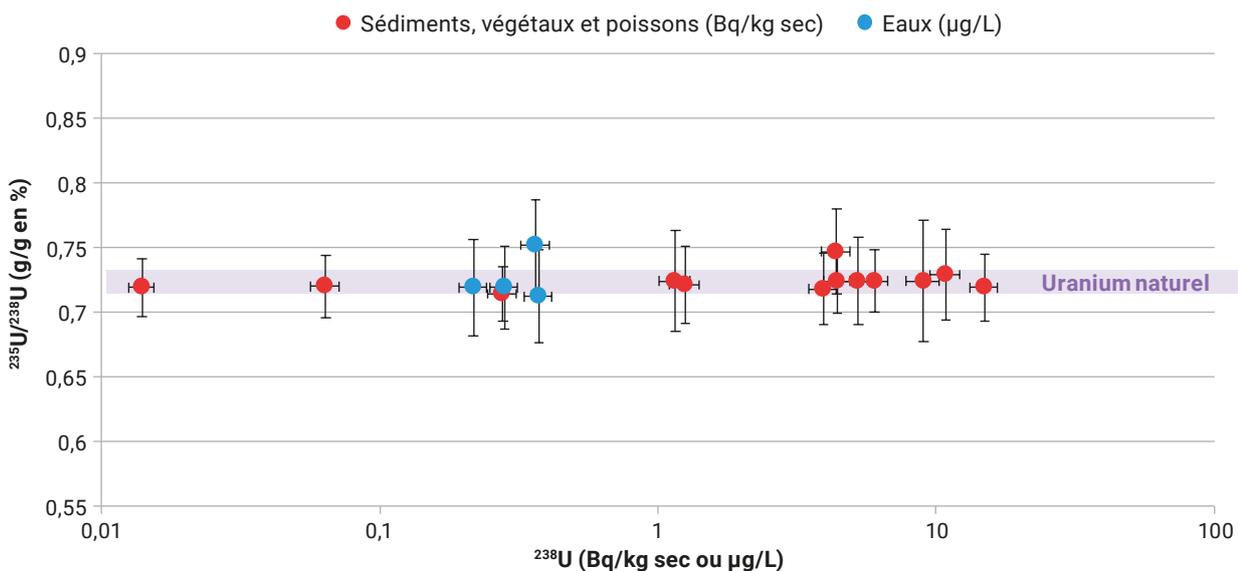


Figure 35. Rapports de masses $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ des échantillons prélevés en 2011 à proximité de Valduc.

L'ensemble des données analysées au cours de la dernière décennie et spécifiquement pour cette étude montre que les rejets atmosphériques du site de Valduc

sont à l'origine d'un marquage par le tritium, sous forme libre ou associé à la matière organique, de l'environnement terrestre sur quelques dizaines de kilomètres autour du site et du milieu aquatique sur un périmètre plus restreint.

Dans le milieu terrestre, les activités du tritium libre mesurées dans les feuilles d'arbres sont très nettement supérieures au bruit de fond tout comme les activités en tritium lié à la matière organique mesurées dans les feuilles d'arbres et dans un sol. Ces dernières valeurs témoignent d'une forme de rémanence du tritium organiquement lié dans les matrices ligneuses et dans le sol forestier échantillonné. En milieu aquatique, le marquage est également net tant pour le tritium libre que pour le tritium organiquement lié.

Par ailleurs, un marquage en uranium-236 a été détecté ponctuellement en milieu aquatique.

3 3

SERVICES DE MÉDECINE NUCLÉAIRE

Parmi les radionucléides utilisés en diagnostic *in vivo* (^{67}Ga , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{123}I , ^{131}I , etc. [12, 48, 49]) l'isotope radioactif 131 de l'iode, est le plus susceptible d'être détecté dans l'environnement en raison de sa période radioactive (8 jours, [50]) sensiblement plus longue que celle des autres radionucléides utilisés en médecine nucléaire.

Dans le cadre de ce constat, en aval de chaque centre de médecine nucléaire utilisant de l' ^{131}I ([12, 15]), l'IRSN a collecté des végétaux aquatiques (phanérogames ou bryophytes) en raison de leur capacité à rendre compte des niveaux d'activités moyens dans l'eau. Ces végétaux ont été mesurés très rapidement après leur collecte et leur traitement (moins d'une semaine) afin de limiter les risques de ne pas mesurer l' ^{131}I du fait de sa courte période radioactive.

Les activités en ^{131}I qui ont été mesurées sont presque systématiquement supérieures au seuil de décision. Elles sont comprises entre $0,84 \pm 0,40$ et 3900 ± 340 Bq/kg sec (Figure 36). Les activités les plus élevées sont en général mesurées lorsque les eaux assainies des stations de traitements sont rejetées dans les petits cours d'eau où la dilution est moins importante que dans les grands fleuves. C'est ce qui est observé à l'aval des agglomérations de Dijon, Nancy et Épinal.

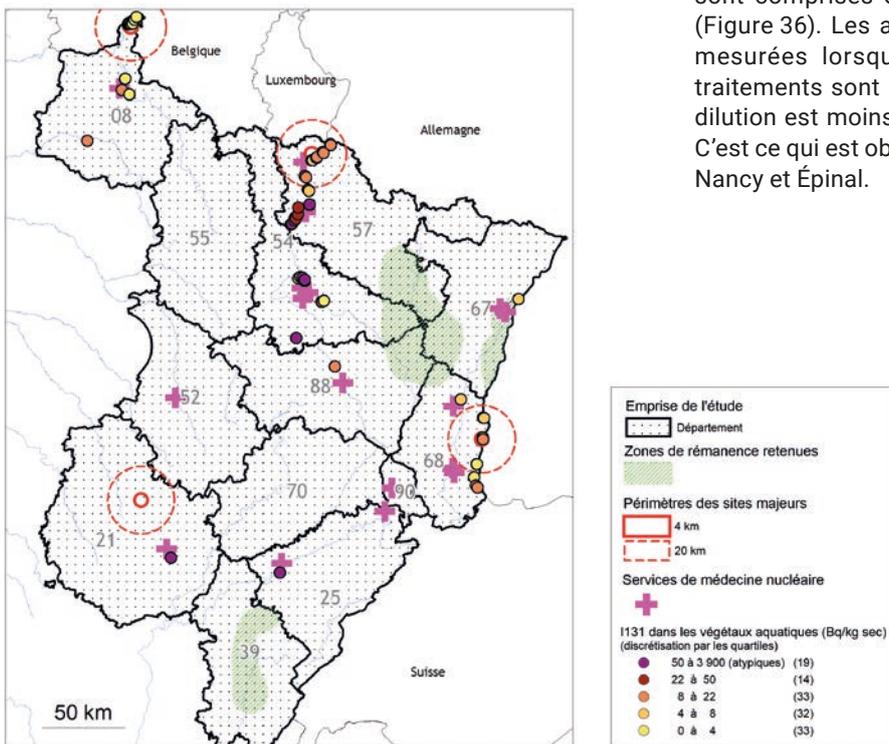


Figure 36. ^{131}I dans les végétaux aquatiques entre 2004 et 2013.

En aval des stations de traitement d'épuration des eaux, les résultats des mesures d'iode-131 attestent d'un marquage, parfois net (d'un à quelques milliers de Bq/kg), des végétaux aquatiques. Les concentrations les plus élevées sont systématiquement observées dans les petits cours d'eau dont les capacités de dilution sont les plus faibles (ex. Dijon, Nancy, Épinal).

3 4

ZONES DE RÉMANENCE DE L'INDUSTRIE HORLOGÈRE

Actuellement, les activités de tritium organiquement lié dans les sédiments du Doubs, en aval des trois agglomérations principales ayant hébergé des ateliers d'horlogerie, sont supérieures à 1 000 Bq/L (Figure 37). En aval des villes et villages où les ateliers étaient moins nombreux, le marquage de l'environnement aquatique est atténué: les activités en tritium organiquement lié des sédiments (6,6 à 15 Bq/L à Ornans, Pontarlier, Charquemont, etc.) y sont en effet plus proches des niveaux du bruit de fond (1,2 à 3 Bq/L [33]). Les activités dans les végétaux aquatiques à cycle de vie annuel, prélevés dans le Doubs en aval de La Chaux-de-Fond (6,9±0,8 à 77,0±3,4 Bq/L) dépassent les niveaux hors influence (1,2 à 3 Bq/L [33]). Ce marquage résulte soit de la présence de particules marquées en tritium adhérentes aux végétaux,

soit d'un apport actuel de tritium libre provenant de l'installation de lavage des gaz de la station d'incinération de la Chaux-de-Fond et qui est intégré dans la matière organique des végétaux tout au long de leur croissance. Cette dernière hypothèse est étayée par les données de la surveillance réalisées en Suisse avec une médiane atteignant 13,5 Bq/L sur 50 mesures réalisées en 2012 [13].

Une mesure de radium a également été réalisée sur un échantillon de sédiments prélevé dans une zone marquée en tritium. Le résultat obtenu, 19,0±4,3 Bq/kg sec, se situe parmi les valeurs les plus basses mesurées dans les sédiments prélevés en France métropolitaine [51].

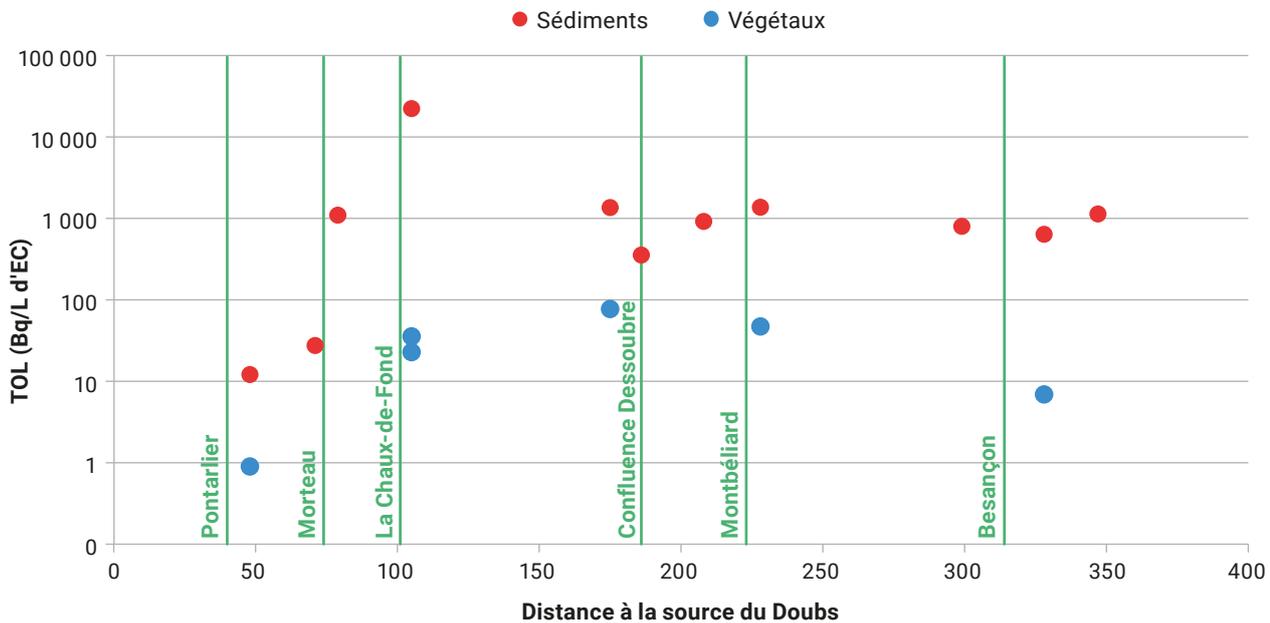


Figure 37. Activité en tritium organiquement lié dans les sédiments et végétaux annuels de la rivière Doubs.

La rémanence du tritium issu des ateliers d'horlogerie est encore très nette dans le milieu aquatique, notamment dans les sédiments de la rivière Doubs en aval des grands centres de production horlogère suisse (La Chaux-de-Fond) et français (Montbéliard, Besançon).

4 CONCLUSION

Un constat radiologique régional portant sur le quart nord-est de la France a été entrepris entre 2010 et 2013 pour améliorer et actualiser notre connaissance relative au bruit de fond radiologique provenant principalement des retombées des essais nucléaires et de l'accident de Tchernobyl, notamment en ce qui concerne les denrées présentant une valeur (économique, patrimoniale...) pour la zone étudiée. Il a permis d'acquérir des données complémentaires à la surveillance de routine dans certaines zones potentiellement influencées par des rejets radioactifs. L'analyse de plus de 30 000 mesures acquises sur ce territoire par l'IRSN et par certains exploitants permet de dresser un état des lieux pour les principaux radionucléides mesurables dans l'environnement. La mise en perspective de ces résultats avec les données acquises sur le reste du territoire métropolitain dans le cadre de la surveillance de l'environnement exercée par l'IRSN et les exploitants montre que peu de situations s'écartent des niveaux de radioactivité observés à distance des installations nucléaires.

Les principaux radionucléides naturels (^{40}K , ^3H et ^{14}C cosmogéniques, ^7Be , descendants de ^{238}U et du ^{232}Th , de ^{234}U et de ^{235}U) sont régulièrement détectés dans toutes les denrées (qu'elles soient cultivées ou naturelles) avec des niveaux observés s'inscrivant dans les gammes de valeurs connues. Ces résultats garantissent d'une part la qualité des opérations réalisées sur les prélèvements d'échantillons (pas de biais analytiques) et permettent d'autre part de disposer de niveaux de référence, en particulier pour les radionucléides naturels (^3H , ^{14}C et uranium). Dans la zone étudiée, des radionucléides artificiels ont également été détectés (^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am); ils proviennent des retombées atmosphériques globales des essais aériens d'armes nucléaires, de l'accident de Tchernobyl et, plus fugacement, de l'accident de Fukushima Daiichi.

Dans les zones définies comme étant sous influence potentielle de rejets radioactifs des installations nucléaires, l'analyse des résultats disponibles ou acquis spécifiquement pour ce constat régional témoigne en général d'un marquage de l'environnement qu'il faut cependant nuancer en fonction des situations.

Ainsi, les CNPE marquent de façon ténue l'environnement terrestre par les rejets atmosphériques de tritium et ^{14}C qu'ils émettent et la zone concernée ne s'étend pas au-delà de quelques kilomètres autour des 3 sites étudiés. Les rejets liquides de ces installations sont également responsables d'un marquage du milieu aquatique qui se traduit par l'augmentation des activités en tritium et ^{14}C dans certaines matrices organiques (poissons, végétaux) et par la détection ponctuelle de produits d'activation ou de fission (^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co et $^{123\text{m}}\text{Te}$ et ^{137}Cs).

L'exploitation du centre d'étude du CEA de Valduc entraîne également un marquage par le tritium de l'environnement terrestre qui s'étend sur quelques dizaines de kilomètres et, de l'environnement aquatique dans un périmètre plus restreint, à proximité du site. Par ailleurs, un marquage en uranium-236 a été détecté ponctuellement en milieu aquatique.

En aval des stations de traitement des eaux usées, les résultats des mesures d'iode 131 attestent d'un marquage, parfois net des végétaux aquatiques. Les concentrations les plus élevées sont systématiquement observées dans les petits cours d'eau dont les capacités de dilution sont les plus faibles (ex. Dijon, Nancy, Épinal).

La rémanence du tritium issu des ateliers d'horlogerie est encore très nette dans le milieu aquatique, notamment dans les sédiments de la rivière Doubs, en aval des grands centres de production horlogère suisse (La Chaux-de-Fond) et français (Montbéliard, Besançon).



Prélèvement de bryophytes aquatiques.

5 ANNEXE 1

Tableau 1. Plan de prélèvement et d'analyses : zones non influencées.

Zone non influencée		Gamma	Plutonium Américium	Strontium-90	Isotopes de l'uranium	Radium-226	Complément d'information sur la zone de prélèvement (département)
Hors zone de rémanence	Poisson consommé pisciculture	2					
	Poisson consommé sauvage	1					
	Feuille chêne						
	Lait	5				5	88, 70, 54, 08, 57
	Légume feuille	2		1	2		21 (+ ⁹⁰ Sr), 88
	Miel	1					
	Mirabelle	3					54, 67, 68
	Quetsche	6					67, 55, 54, 68, 88, 57
	Raisin pour vin rouge	2					67, 21
	Betterave industrielle	3					08, 52, 55
	Soja	4					21, 68, 70, 39
	Colza hiver et navette	7					21, 55, 52, 54, 70, 08, 57
	Blé tendre	3					21, 54, 08
	Orge ou escourgeon	5					21, 55, 52, 54, 08
	Maïs	1					67
	Tabac	1					67
	Oignon	2					21, 08
	Chou	2		2			67, 68
	Houblon	1					67
	Volaille chair	2					21, 52
Viande de bœuf	5					67, 88, 08, 54, 70	
Munster	2			2		88, 57	

Zone non influencée		Gamma	Plutonium Américium	Strontium-90	Isotopes de l'uranium	Radium-226	Complément d'information sur la zone de prélèvement (département)
Zone de rémanence	Sol non remanié	3	2				
	Herbe de prairie	2		2			Associé avec sol, lait et munster
	Myrtille	2			2		1 sauvage 1 production
	Lait	2		2		2	57 dont 1 associé sol, herbe et munster
	Légume feuille	2	2	2	2		39, 57
	Miel	1					57
	Mirabelle	2					54, 88
	Quetsche	1					57
	Soja	1					39
	Colza hiver et navette	1					57
	Blé tendre	1					57
	Orge ou escourgeon	1					57
	Mais	1					67
	Tabac	1					67
	Chou	1	1				67
	Houblon	1					67
	Munster	1			1		Associé avec sol, herbe et lait

Tableau 2. Plan de prélèvement et d'analyses : zones d'intérêt.

Zone influencée		Gamma	Iode-131	Tritium libre	Tritium lié
CNPE	Bioindicateur végétal aquatique	3		3	3
	Sédiment zone proche	3			3
	Poisson consommé influencé	2		2	2
	Légume feuille				
	Quetsche	2			
	Colza hiver et navette	2			
	Orge ou escourgeon	2			
	Chou	1			
	Viande de bœuf	2			
	Gibier	1			
	Munster	1			
Valduc	Bioindicateur végétal aquatique	3		3	3
		3	3	3	3
	Sédiment/sol zone proche	4		4	4
	Poisson amont	1		1	1
	Poisson aval consommé	1		1	1
	Sol non remanié	2			
	Herbe	1			
	Feuille chêne			6	6
	Feuille de résineux				
	Mousse terricole	1	1		
	Lait	1		1	1
	Légume feuille	1		1	1
	Eau de nappe			4	
	Raisin pour vin rouge	1			
	Soja	1			
	Colza hiver et navette	1			
	Blé tendre	1			
	Orge ou escourgeon	1			
Volaille chair	1				
Contexte hospitalier	Bioindicateur végétal aquatique		9		
Zone horlogère	Bioindicateur végétal aquatique				6
	Eau			4	
	Sédiment				17

Légende des tableaux 3 à 11 :

- $\leq X$: inférieur au seuil de décision, d'une valeur X;
- **les résultats de mesure apparaissant en bordeaux** sont exprimés dans l'unité Bq/kg frais; Bq/L d'échantillon ou $\mu\text{g/kg}$ frais, mBq/kg frais si précisé;
- pour passer de Bq/kg sec à Bq/kg frais, utilisez les rapports de masses frais/sec;
- les résultats de mesure apparaissant dans des cases vert clair sont obtenus sur un prélèvement aquatique réalisé en **aval** d'une installation;
- ZNI : zone non influencée;
- REM : zone de plus forte rémanence des retombées atmosphériques anciennes.

Tableau 3. Résultats des mesures de tritium libre et organiquement lié entreprises pour ce constat.

Longitude degré WGS84	Latitude degré WGS84	Zonage	Station	Date de prélèvement	Nature
4,86168	47,55773	Valduc	Source du ruisseau de Noirvau	03/05/2011	Eau douce
4,85099	47,582	Valduc	Source du ruisseau de Lochère	03/05/2011	
4,84268	47,59136	Valduc	Source du ruisseau de Notre-Dame	04/05/2011	
4,87894	47,58414	Valduc	Source du ruisseau de l'Abbaye de Valduc	04/05/2011	
6,5621	47,0333	Horloger	Grand'Combe-Châteleu	13/11/2013	
6,6403	47,0481	Horloger	Les Fins	13/11/2013	
6,8589	47,1648	Horloger	Biaufond	13/11/2013	
5,3831	47,1931	Horloger	Auxonne	14/11/2013	
4,86168	47,55773	Valduc	Source du ruisseau de Noirvau	03/05/2011	Sédiment
4,85099	47,582	Valduc	Source du ruisseau de Lochère	03/05/2011	
4,8828	47,5726	Valduc	Étang de Valduc	04/05/2011	
4,94131	47,61107	Valduc	Salives, sur la Tille	12/12/2011	
4,85552	47,56652	Valduc	Combe du Tilleul	06/10/2011	Sols non cultivés
6,25718	47,04101	Horloger	Lods	09/07/2012	Sédiment
6,38411	46,94546	Horloger	Arcon	09/07/2012	
6,57699	47,03822	Horloger	Grand'Combe-Châteleu	09/07/2012	
6,63986	47,04744	Horloger	Les Fins	09/07/2012	
6,85836	47,16385	Horloger	Biaufond	10/07/2012	
6,85836	47,16385	Horloger	Biaufond	10/07/2012	
6,81013	47,31403	Horloger	Saint-Hippolyte (Le Dessoubre)	10/07/2012	
6,92251	47,34672	Horloger	Vaufrey	10/07/2012	
6,79356	47,45363	Horloger	Mandeure	10/07/2012	
7,00258	47,60119	Horloger	Montreux-Château	10/07/2012	
6,71494	47,47488	Horloger	Bavans	10/07/2012	
6,35367	47,50814	Horloger	Chassey-les-Montbozon	10/07/2012	
6,14864	47,28498	Horloger	Vaire-Arcier	11/07/2012	
5,94888	47,18414	Horloger	Rancenay	11/07/2012	
5,88313	47,1018	Horloger	Quingey	11/07/2012	
5,8271	47,27386	Horloger	Recologne	11/07/2012	
5,56291	47,12398	Horloger	Rocheft-sur-Nenon	11/07/2012	

	Espèce	Fraction	Frais/Sec	³ H libre (Bq/L ED)	³ H lié (Bq/L EC)	³ H lié (Bq/kg MS)	
	Eau de nappe phréatique	Filtrat à 0,20 µm		184±7	n.a.	n.a.	
				54,5±2,5	n.a.	n.a.	
				20,2±1,2	n.a.	n.a.	
				214±8	n.a.	n.a.	
	Eau de cours eau			-	0,8±0,7	n.a.	n.a.
				-	0,9±0,7	n.a.	n.a.
				-	≤0,6	n.a.	n.a.
				-	≤0,6	n.a.	n.a.
	Sédiment	Ø < 2 mm	3,6371	n.a.	680±34	50,4±2,6	
			3,4837	n.a.	168±8	21,8±1,1	
			2,0817	n.a.	1 170±60	118±6	
			2,7958	n.a.	56,0±2,9	3,98±0,20	
	Sol forestier		2,154	n.a.	3 150±160	315±16	
			1,7290		12,9±0,7	0,280±0,020	
	Sédiment		3,6917	n.a.	12,1±0,7	0,98±0,05	
			2,1042	n.a.	27,5±1,4	1,64±0,09	
			2,2909	n.a.	1 100±60	88±5	
			2,3039	n.a.	3 000±150	123±7	
			4,2943	n.a.	22 300±1,200	1 640±80	
			2,0686	n.a.	355±18	13,9±0,7	
			2,7572	n.a.	1 360±70	25,0±2,0	
			Sédiment	2,0151	n.a.	920±46	45,0±3,0
				3,6759	n.a.	11,3±0,6	0,94±0,05
3,9879		n.a.		1 370±70	109±6		
1,2935		n.a.		6,60±0,33	0,0680±0,0040		
2,6566		n.a.		800±40	54,0±3,0		
1,6738		n.a.		640±32	18,4±1,0		
3,1139		n.a.		7,30±0,37	0,430±0,030		
2,0667	n.a.	53,5±2,7	3,78±0,19				
		3,1240	n.a.	1 130±60	82±5		

Longitude degré WGS84	Latitude degré WGS84	Zonage	Station	Date de prélèvement	Nature
4,85099	47,582	Valduc	Source du ruisseau de Lochère	03/05/2011	Phanérogames immergées
4,94131	47,61107	Valduc	Salives, sur la Tille	12/12/2011	Phanérogames semi-aquatiques
6,38411	46,94546	Horloger	Arcon	09/07/2012	Phanérogames immergées
6,85836	47,16385	Horloger	Biaufond	10/07/2012	
6,85836	47,16385	Horloger	Biaufond	10/07/2012	
6,92251	47,34672	Horloger	Vaufrey	10/07/2012	
6,71494	47,47488	Horloger	Bavans	10/07/2012	
5,94621	47,1933	Horloger	Avanne-Aveney	11/07/2012	
4,84324	47,53172	Valduc	Lamargelle, amont de l'Ignon	06/10/2011	Mousses aquatiques
4,84619	47,55227	Valduc	Amont de La Roussotte	03/05/2011	Mousses aquatiques
4,86524	47,54114	Valduc	Aval Les Meurgers	03/05/2011	Mousses aquatiques
4,93417	47,54059	Valduc	Moloy, aval de l'Ignon	06/10/2011	
4,8153	47,5582	Valduc	Léry	07/10/2010	Arbre feuillu
4,8836	47,6156	Valduc	Salives	06/10/2010	
4,9234	47,6060	Valduc	Salives	06/10/2010	
4,8932	47,5897	Valduc	Salives	07/10/2010	
4,9213	47,5482	Valduc	Moloy	07/10/2010	
4,9589	47,6268	ZNI	Barjon	06/10/2010	
5,1314	47,7724	ZNI	Praslay	06/10/2010	
4,81771	47,51524	Valduc	Amont de Lamargelle	13/09/2011	
4,87776	47,53373	Valduc	Moulin de Frénois	13/09/2011	
6,25970	49,4030	Cattenom	Aval du barrage de Koenigsmaker	15/06/2011	Poissons
4,8010	50,0870	Chooz	Aval proche du CNPE	21/06/2011	
4,6666	47,5584	Valduc	Poiseul-la-Ville-et-Laperrière	04/05/2010	Produits alimentaires
7,056	48,6875	ZNI/REM	Schneckenbusch	05/05/2010	
6,9523	48,6255	ZNI/REM	Hattigny	06/05/2010	

ED: eau de dessication

EC: eau de combustion

MS: matière sèche

MO: matière organique

	Espèce	Fraction	Frais/Sec	³ H libre (Bq/L ED)	³ H lié (Bq/L EC)	³ H lié (Bq/kg MS)
	Potamot <i>Potamogeton sp</i>	Entier	3,5026	56,0±2,4	70,0±3,5	8,4±0,5
	Jussie rampante <i>Ludwigia peploides</i>		21,1206	38,0±1,9	38,5±2,0	16,4±0,9
	Phanérogame	Parties aériennes	3,4955	n.a.	0,9±0,8	0,30±0,20
	Phanérogame		18,5624	n.a.	36,0±3,8	16,4±1,8
	Phanérogame		7,4803	n.a.	23,0±3,0	6,7±0,9
	Myriophylle		10,7006	n.a.	77,0±3,4	25,1±1,3
	Phanérogame		12,7737	n.a.	47,1±2,7	21,7±1,3
	Renoncule		11,1489	n.a.	6,9±0,8	3,50±0,40
	Mousse		Entier	3,6054	3,2±0,7	5,03±0,26
	Mousse	Entier	3,939	28,9±1,5	44,9±2,2	10,6±0,6
	Mousse	Entier	3,8128	75,0±3,2	79,0±4,0	23,6±1,2
			3,0689	25,2±1,4	41,5±2,1	8,30±0,42
	Chêne vert <i>Quercus ilex</i>	Feuilles annuelles	2,5946	82,3±2,9	268±13	139±7
			1,8225	44,5±1,9	460±23	233±12
			2,3613	25,7±1,3	356±18	186±10
			2,0742	91,0±3,1	1360±70	714±36
			1,9517	7,9±0,8	73,0±3,7	39,0±2,0
			2,0262	11,7±0,9	153±8	80,0±4,0
			2,1994	3,1±0,8	14,7±0,8	7,80±0,40
	Chevesne <i>Leuciscus cephalus</i>	Muscle	4,7434	1,5±0,6	10,4±0,6	6,60±0,34 1,39±0,07 Bq/kg frais
			4,661	7,2±0,8	22,5±1,2	14,5±0,8 3,11±0,17 Bq/kg frais
	Anguille <i>Anguilla anguilla</i>	Entier	3,4434	15,5±1,1	24,7±1,3	18,8±1,0 5,46±0,29 Bq/kg frais
		Muscle	2,1118	15,2±1,1	13,7±0,7	12,7±0,7 6,00±0,33 Bq/kg frais
	Lait de vache	Entier	7,5098	2,5±0,7	3,29±0,16	2,30±0,20 0,306±0,027 Bq/L
			7,3410	0,9±0,6	n.a.	n.a.
			8,3668	1,3±0,6	n.a.	n.a.

Tableau 4. Résultats des mesures de ¹⁴C entreprises pour ce constat.

Longitude degré WGS84	Latitude degré WGS84	Zonage	Station	Date de prélèvement	
4,86168	47,55773	Valduc	Source du ruisseau de Noirvau	03/05/2011	
4,85099	47,582	Valduc	Source du ruisseau de Lochère	03/05/2011	
4,8828	47,5726	Valduc	Étang de Valduc	04/05/2011	
4,94131	47,61107	Valduc	Salives, sur la Tille	12/12/2011	
4,85099	47,582	Valduc	Source du ruisseau de Lochère	03/05/2011	
4,94131	47,61107	Valduc	Salives, sur la Tille	12/12/2011	
4,81771	47,51524	Valduc	Amont de Lamargelle	13/09/2011	
4,87776	47,53373	Valduc	Moulin de Frénois	13/09/2011	
6,25970	49,4030	Cattenom	Aval du barrage de Koenigsmaker	15/06/2011	
4,8010	50,0870	Chooz	Aval proche du CNPE	21/06/2011	
4,85552	47,56652	Valduc	Combe du Tilleul	06/10/2011	
4,8153	47,5582	Valduc	Léry	07/10/2010	
4,8836	47,6156	Valduc	Salives	06/10/2010	
4,8932	47,5897	Valduc	Salives	07/10/2010	
4,9234	47,606	Valduc	Salives	06/10/2010	
4,9213	47,5482	Valduc	Moloy	07/10/2010	
5,1314	47,7724	ZNI	Praslay	06/10/2010	
4,9589	47,6268	ZNI	Barjon	06/10/2010	
4,6666	47,5584	Valduc	Poiseul-la-Ville-et-Laperrière	04/05/2010	

* Les mesures de ¹⁴C par AMS réalisées il y a quelques années ne prenaient pas en compte toutes les sources d'incertitudes ce qui conduit à une incertitude globale sous-estimée pour les mesures anciennes. Depuis, le bilan global des incertitudes des mesures de ¹⁴C par AMS a été revu. Ces sous-estimations des incertitudes ne remettent pas en cause les interprétations réalisées dans cette étude.

	Nature	Espèce	Fraction	Frais/Sec	¹⁴ C (Bq/kg de C)*
	Sédiment	Sédiment	Ø < 2 mm	3,6371	240,5±1,7
				3,4837	226,8±1,7
				2,0817	212,7±1,3
				2,7958	231,2±1,7
	Phanérogames immergées	Potamot non identifié <i>Potamogeton sp</i>	Entier	3,5026	218,0±1,7
	Phanérogames semi-aquatiques	Jussie rampante <i>Ludwigia peploides (Kunth)</i>		21,1206	230,8±1,7
	Poissons	Chevesne <i>Leuciscus cephalus</i>	Muscle	4,7434	225,8±1,7
	Poissons	Chevesne <i>Leuciscus cephalus</i>	Muscle	4,6611	221,0±1,7
		Anguille <i>Anguilla anguilla</i>	Entier	3,4434	751,0±3,3
			Muscle	2,1118	1155±5
	Sols non cultivés	Sol forestier	Ø < 2 mm	2,1546	247,5±1,7
	Arbre feuillu	Chêne vert <i>Quercus ilex</i>	Feuilles annuelles	2,5946	232,5±1,0
				1,8225	233,5±1,0
				2,0742	233,8±1,0
				2,3613	234,2±1,3
				1,9517	233,8±1,0
				2,1994	233,2±1,0
				2,0262	232,8±1,0
	Produits alimentaires liquides non transformés	Lait de vache	Entier	7,5098	235,3±1,3

Tableau 5. Résultats des mesures des radionucléides naturels émetteurs gamma dans le milieu aquatique entreprises pour ce constat.

Longit. WGS84	Latit. WGS84	Zonage	Position/site	Station	Date de prélèvement	Nature	
4,85099	47,582	Valduc	aval	Source ruisseau de Lochère	03/05/2011	Sédiment	
4,86168	47,55773	Valduc	aval	Source ruisseau de Noirvau	03/05/2011		
4,8828	47,5726	Valduc	aval	Étang de Valduc	04/05/2011		
4,801	50,087	Chooz	aval	Émissaire effluents liquides	24/05/2011		
4,85099	47,582	Valduc	aval	Source ruisseau de Lochère	03/05/2011	Phanérogames immergées	
4,851	47,582	Valduc	aval	Source ruisseau de Lochère	27/07/2011		
5,10482	47,27837	Hôpitaux		Neully-lès-Dijon	23/08/2010	Phanérogames immergées	
7,3968	48,1178	Hôpitaux		Colmar aval	25/08/2010		
5,1434	48,1424	Hôpitaux		Chaumont aval	24/08/2010		
5,1787	48,0698	Hôpitaux		Chaumont amont	24/08/2010		
6,3996	48,2924	Hôpitaux		Épinal aval	26/08/2010		
5,9657	47,1989	Hôpitaux		Avanne-Aveney	26/08/2010		
7,8537	48,6499	Hôpitaux		Strasbourg aval	25/08/2010		
7,53	47,65	Fessenheim	amont	Kembs, écluse	25/08/2010		
7,57112	47,90653	Fessenheim	aval	Fessenheim	25/08/2010	Phanérogames immergées	
7,58154	48,01809	Fessenheim	aval	Vogelgrun, écluse	25/08/2010		
4,801	50,087	Chooz	aval	Émissaire effluents liquides	24/05/2011		
4,84324	47,53172	Valduc	amont	Lamargelle, amont de l'Ignon	06/10/2011	Mousses aquatiques	
4,84619	47,55227	Valduc	aval	Amont de La Roussotte	03/05/2011	Mousses aquatiques	
4,8462	47,5523	Valduc	aval	Amont de La Roussotte	27/07/2011		
4,86524	47,54114	Valduc	aval	Aval Les Meurgers	03/05/2011		
4,8652	47,5411	Valduc	aval	Aval Les Meurgers	27/07/2011		
4,93417	47,54059	Valduc	aval	Moloy, aval de l'Ignon	06/10/2011		
5,1327	48,1335	Hôpitaux		Chaumont aval Tannerie	24/08/2010	Mousses aquatiques	
4,81771	47,51524	Valduc	amont	Amont de Lamargelle	13/09/2011	Poissons	
4,87776	47,53373	Valduc	aval	Moulin de Frenois	13/09/2011	Poissons	
6,53274	48,96696	ZNI		Arraincourt	04/10/2011	Poissons	
6,92929	48,46699	ZNI		Lac de Pierre-Percée	25/10/2011		
6,965298	48,63228	ZNI		Hattigny Pisciculture	18/10/2011		
6,2597	49,403	Cattenom	aval	Aval barrage de Koenigsmacker	15/06/2011	Poissons	
4,801	50,087	Chooz	aval	Émissaire effluents liquides	21/06/2011		

Espèce	Fraction	Date de mesure	Qualité	Frais/Sec	Sec/Cendre	⁴⁰ K	Famille ²³² Th	Famille de l' ²³⁸ U			⁷ Be
							²²⁸ Ac	²³⁴ Th	^{234m} Pa	²¹⁰ Pb	
Sédiment	Ø < 2 mm	12/07/2011	sec	3,4837		107±11	17,8±2,1		≤40		8,9±2,2
		12/07/2011		3,6371		23,0±3,1	3,0±0,5		≤30		17,0±2,5
		21/07/2011		2,0816		247±24	26,0±3,0		20±10		11,5±2,6
		21/11/2011		2,3246		273±25	30,0±4,0		21±8		≤8
Potamot <i>Potamogeton sp</i>	Entier	12/07/2011	cendres	3,4912	1,2498	84±10	1,2±0,6	3,1±1,4		6,0±2,2	10,0±3,2
		03/08/2011	sec	3,3576		53±8	≤2,0	≤3		3,9±1,2	20,4±2,8
Myriophylle <i>Myriophyllum spicatum</i>	Entier	02/09/2010	sec	12,8162		410±60	18±6	≤9		79±12	370±40
Potamot <i>Potamogeton sp</i>		06/09/2010		15,4379		1,330±140	15±5	≤7		12±6	34±8
Renoncule <i>Ranunculus aquatica</i>		02/09/2010		12,3681		860±100	≤10	≤6		12±5	51±10
Myriophylle <i>Myriophyllum spicatum</i>		02/09/2010		13,5045		350±60	≤20	≤9		17±8	41±11
Myriophylle <i>Myriophyllum spicatum</i>		06/09/2010		10,7814		840±130	250±32	26±8		59±10	186±22
Myriophylle <i>Myriophyllum spicatum</i>		06/09/2010		12,5427		630±80	≤11	≤7		44±8	128±17
Potamot <i>Potamogeton sp</i>		03/09/2010		9,0934		400±50	8,2±1,7	9,6±1,8		15,5±2,4	89±9
Potamot <i>Potamogeton sp</i>		03/09/2010		11,7123		760±90	6,3±2,8	4,9±2,2		12,0±3,0	54±7
Potamot <i>Potamogeton sp</i>	Entier	03/09/2010	sec	13,2390		500±70	9,0±3,1	8,0±3,0		19±5	130±14
		03/09/2010		9,3662		610±70	≤13	≤17		15±7	48±9
Nénuphar <i>Nuphar luteum</i>	Aérienne	25/07/2011	cendres		7,7847	730±80	0,86±0,26	≤0,6		1,5±0,5	8,9±1,2
Mousse aquatique	Entier	14/12/2011	cendres	4,6615	2,9971	290±30	10,0±1,3	6,1±0,7		60±6	56±6
Mousse aquatique	Entier	21/07/2011	cendres	2,9329	1,8079	141±15	5,2±0,9	5,1±1,3		37,0±3,9	96±10
		03/08/2011	sec	4,4105		116±21	≤3	≤5		16±5	110±15
		21/07/2011	cendres	3,3071	1,6114	133±14	6,7±1,1	5,4±1,1		34,0±3,7	62±7
		03/08/2011	sec	4,7230		165±24	≤6	≤10		38±6	107±13
		14/12/2011	cendres	6,8364	2,6127	233±27	5,1±0,8	3,8±1,0		33,0±3,4	91±9
Mousse aquatique	Entier	02/09/2010	sec	6,4266		192±26	≤8	≤5		81±10	330±40
Chevesne <i>Leuciscus cephalus</i>	Muscle	22/11/2011	cendres	3,8660	6,8526	350±35	0,42±0,18	≤0,5		1,00±0,38	2,9±0,7
Chevesne <i>Leuciscus cephalus</i>	Muscle	22/11/2011	cendres	4,6895	15,4460	530±60	≤0,16	≤0,4		≤0,4	≤0,5
Truite <i>Salmo trutta</i>	Muscle	14/12/2011	cendres	3,7055	11,5181	410±43 sec	≤0,17	≤0,3		≤0,4	≤0,5
Coregone <i>Coregonus lavaretus</i>	Muscle	14/12/2011		4,5274	11,6270	510±50 sec	≤0,3	≤0,7		≤0,8	≤0,7
Gardon <i>Rutilus rutilus</i>	Éviscéré	14/12/2011		4,1564	6,1294	340±34	1,34±0,26	≤0,5		1,00±0,38	≤0,6
Anguille <i>Anguilla anguilla</i>	Entier	21/11/2011	cendres	3,9430	6,7808	320±32	0,65±0,19	≤0,4		≤0,5	≤1,9
	Muscle	22/11/2011		3,3557	7,7555	258±26	0,39±0,18	≤0,6		≤1,7	≤3

Tableau 6. Résultats des mesures des radionucléides artificiels émetteurs gamma dans le milieu aquatique entreprises pour ce constat.

Longit. WGS84	Latit. WGS84	Zonage	Position/ Site	Station	Date de prélèvement	Denrées / Indicateur	
4,801	50,087	Chooz	Aval	Chooz, émissaire des effluents liquides de la SENA	24/05/2011	Indicateur	
4,8828	47,5726	Valduc		Étang de Valduc	04/05/2011		
4,85099	47,582	Valduc		Source du ruisseau de Lochère	03/05/2011		
4,86168	47,55773	Valduc		Source du ruisseau de Noirvau	03/05/2011		
4,801	50,087	Chooz	Aval	Chooz, émissaire des effluents liquides de la SENA	24/05/2011	Indicateur	
7,57112	47,90653	Fessenheim		Fessenheim	25/08/2010		
4,85099	47,582	Valduc		Source du ruisseau de Lochère	03/05/2011		
4,851	47,582	Valduc		Source du ruisseau de Lochère	27/07/2011		
7,58154	48,01809	Fessenheim		Vogelgrün, écluse	25/08/2010		
7,53	47,65	Fessenheim	Amont	Kembs, écluse	25/08/2010	Indicateur	
5,10482	47,27837	Hôpitaux		Neuilly-lès-Dijon	23/08/2010		
5,1787	48,0698	Cattenom		Chaumont amont	24/08/2010		
5,1434	48,1424	Cattenom		Chaumont aval	24/08/2010		
7,8537	48,6499	Hôpitaux		Strasbourg aval	25/08/2010		
7,3968	48,1178	Cattenom		Colmar aval	25/08/2010		
6,3996	48,2924	Cattenom		Épinal aval	26/08/2010		
5,9657	47,1989	Hôpitaux		Avanne-Aveney	26/08/2010		
4,84619	47,55227	Valduc	Aval	Amont de La Roussotte	03/05/2011		
4,8462	47,5523	Valduc		Amont de La Roussotte	27/07/2011		
4,86524	47,54114	Valduc		Aval Les Meurgers	03/05/2011		
4,8652	47,5411	Valduc		Aval Les Meurgers	27/07/2011		
4,84324	47,53172	Valduc	Amont	Lamargelle, amont de l'Ignon	06/10/2011	Indicateur	
4,93417	47,54059	Valduc	Aval	Moloy, aval de l'Ignon	06/10/2011		
5,1327	48,1335	Hôpitaux		Chaumont aval Tannerie	24/08/2010		
4,801	50,087	Chooz		Chooz, émissaire des effluents liquides de la SENA	21/06/2011	Denrée et indicateur	
6,2597	49,403	Cattenom	Aval	Aval du barrage de Koenigsmacker	15/06/2011	Denrée et indicateur	
4,87776	47,53373	Valduc		Moulin de Frénois	13/09/2011		
4,81771	47,51524	Valduc	Amont	Amont de Lamargelle	13/09/2011	Denrée et indicateur	
6,53274	48,96696	ZNI		Arraincourt	04/10/2011		
6,965298	48,632208	ZNI		Hattigny Pisciculture	18/10/2011		
6,92929	48,46699	ZNI		Lac de Pierre Percée	25/10/2011		

	Nature	Espèce	Fraction	Date de mesure	Frais/Sec	Sec/Cendre	¹³⁷ Cs	¹³¹ I
	Sédiments	Sédiment	Ø < 2 mm	21/11/2011	2,324619		5,6±0,5	n.a.
21/07/2011				2,081671		2,80±0,30	n.a.	
12/07/2011				3,483734		8,0±0,7	n.a.	
12/07/2011				3,637129		6,1±0,6	n.a.	
	Phanérogames immergées	Nénuphar <i>Nuphar luteum</i>	Parties aériennes	25/07/2011		7,784761	0,12±0,05	n.a.
		Potamot <i>Potamogeton sp</i>	Entier	03/09/2010	13,239075		≤0,7 ⁶⁰ Co: 1,7±0,6	8,4±1,4
				12/07/2011	3,491202	1,249838	≤0,20	n.a.
				03/08/2011	3,35762		≤0,20	≤0,3
				03/09/2010	9,366295		≤3	≤6
	Phanérogames immergées	Potamot <i>Potamogeton sp</i>	Entier	03/09/2010	11,712389		1,1±0,5	9,3±1,3
		Myriophylle <i>Myriophyllum spicatum</i>		02/09/2010	12,816234		≤3	880±90
				02/09/2010	13,504594		≤1,5	≤3
		Renoncule <i>Ranunculus aquatica</i>		02/09/2010	12,368159		≤0,8	≤1,5
		Potamot non identifié <i>Potamogeton sp</i>		03/09/2010	9,093432		1,20±0,30	4,2±0,7
				06/09/2010	15,437936		≤1,1	7,1±2,0
		Myriophylle <i>Myriophyllum spicatum</i>		06/09/2010	10,781449		≤3	12,0±2,4
	06/09/2010		12,542751		≤3	4,1±1,6		
	Mousses aquatiques	Mousse	Entier	21/07/2011	2,93297	1,80793	1,15±0,18	n.a.
				03/08/2011	4,410596		≤1,6	≤0,9
				21/07/2011	3,307181	1,611453	1,90±0,31	n.a.
				03/08/2011	4,723057		≤1,2	≤0,9
	Mousses aquatiques	Mousse	Entier	14/12/2011	4,661544	2,997121	1,30±0,17	n.a.
				14/12/2011	6,836453	2,612708	0,74±0,13	n.a.
				02/09/2010	6,426603		≤0,7	≤1,1
	Poissons	Anguille <i>Anguilla anguilla</i>	Muscle	22/11/2011	3,35578	7,755578	0,069±0,019	n.a.
	Poissons	Anguille <i>Anguilla anguilla</i>	Entier	21/11/2011	3,943069	6,780893	0,086±0,015	n.a.
		Chevesne <i>Leuciscus cephalus</i>	Muscle	22/11/2011	4,689519	15,446021	0,029±0,007	n.a.
	Poissons	Chevesne <i>Leuciscus cephalus</i>	Muscle	22/11/2011	3,866016	6,852696	0,019±0,008	n.a.
		Truite <i>Salmo trutta</i>	Muscle	14/12/2011	3,705556	11,518126	0,063±0,012	n.a.
		Gardon <i>Rutilus rutilus</i>	Éviscéré	14/12/2011	4,156449	6,129574	0,098±0,016	n.a.
		Corégone du Bourget <i>Coregonus lavaretus</i>	Muscle	14/12/2011	4,527426	11,627027	1,37±0,13	n.a.

Tableau 7. Résultats des mesures des radionucléides naturels émetteurs gamma dans le milieu terrestre entreprises pour ce constat.

Longit. WGS84	Latit. WGS84	Zonage	Station	Date de prélèvement	Nature	Espèce
4,85552	47,56652	Valduc	Combe du Tilleul	06/10/2011	Sols non cultivés	Sol forestier
4,9213	47,5482	Valduc	Moloy	04/05/2010		Sol de taillis
4,9065	47,6223	Valduc	Salives	04/05/2010		Sol de pâturage ou de prairie
7,056	48,6875	ZNI/REM	Schneckenbusch	05/05/2010		
6,9523	48,6255	ZNI/REM	Hattigny	06/05/2010		
7,1139	48,4785	ZNI	Crête des Vosges	06/05/2010	Sols non cultivés Profondeur 0-5 cm	Sol de pâturage ou de prairie
7,1139	48,4785	ZNI	Crête des Vosges	27/07/2011	Sols non cultivés Profondeur 0-5 cm	
7,1139	48,4785	ZNI	Crête des Vosges	27/07/2011	Sols non cultivés Profondeur 5-15 cm	
7,1139	48,4785	ZNI	Crête des Vosges	27/07/2011	Sols non cultivés Profondeur 15-30 cm	
7,705681	48,434035	ZNI	Nordhouse	05/10/2011	Sols non cultivés Profondeur 0-5 cm	
7,705681	48,434035	ZNI	Nordhouse	05/10/2011	Sols non cultivés Profondeur 5-15 cm	
7,705681	48,434035	ZNI	Nordhouse	05/10/2011	Sols non cultivés Profondeur 15-30 cm	
5,8356	48,7197	ZNI	Lucey	24/08/2010	Arbres et arbustes fruitiers	Mirabellier <i>Prunus insititia</i>
7,4443	48,6022	ZNI	Westhoffen	24/08/2010		
6,1987	49,1784	ZNI	La Maxe	25/08/2010		
6,2979	48,3252	ZNI	Évaux-et-Menil	27/07/2011		
6,9719	48,4687	ZNI	Celles-sur-Plaine	07/05/2012		
6,17078	49,38458	Cattenom	Manom	06/09/2011	Arbres et arbustes fruitiers	Quetsche <i>Prunus domestica subsp. insititia</i>
5,8356	48,7197	ZNI	Lucey	06/09/2011		
5,7104	48,9878	ZNI	Vigneulles-lès-Hattonchatel	06/09/2011		
6,1987	49,1784	ZNI	La Maxe	06/09/2011		
7,4683	48,5725	ZNI	Dangolsheim	07/09/2011		
7,3124	48,1253	ZNI	Sigolsheim	07/09/2011		
6,27	48,3057	ZNI	Gugney-aux-Aulx	08/09/2011		
4,9285	47,1332	ZNI	Nuits-Saint-Georges	04/10/2010	Arbres et arbustes fruitiers	Vigne <i>Vitis vinifera</i>
7,4261	48,3806	ZNI	Andlau	05/10/2010		
7,5018	48,5809	ZNI	Dahlenheim	05/10/2010		
5,14194	47,52929	Valduc	Is-sur-Tille	28/07/2011	Céréales	Blé <i>Triticum L.</i>
5,7085	49,487	ZNI	Cons-la-Grandville	26/07/2011		
4,24	49,5245	ZNI	Chateau-Porcien	26/07/2011		
6,3807	49,0217	ZNI	Lemud	26/07/2011		
6,7929	48,8284	ZNI	Zommange	26/07/2011		
5,2285	47,2356	ZNI	Genlis	28/07/2011		

Fraction	Date de mesure	Frais/Sec	Sec/Cendre	Qualité	⁴⁰ K	Famille ²³² Th	Famille de l' ²³⁸ U			⁷ Be
						²²⁸ Ac	²³⁴ Th	^{234m} Pa	²¹⁰ Pb	
Ø < 2 mm	19/12/2011	2,1546		sec	59±6	7,6±1,0		12±6		7,9±1,7
	04/11/2010	1,4395		sec	420±50	52±7	35±5	37±18	78±8	≤2,0
	08/11/2010	1,2311		sec	400±50	42±6	29,0±4,0	≤30	57±6	≤1,6
	08/11/2010	1,4400		sec	630±70	39±5	38±5	≤30	57±7	≤2,0
	08/11/2010	1,3176		sec	470±60	35±5	42±5	≤30	67±7	≤1,6
	08/11/2010	1,3187		sec	260±30	9,7±2,7	10,6±1,8	≤15	66±10	≤1,4
	24/11/2011	1,8822		sec	244±23	13,8±1,7		≤40		≤7
	24/11/2011	1,5782		sec	260±24	16,6±2,0		≤30		≤6
	28/11/2011	1,2799		sec	143±13	9,1±1,1		11±5		≤3
	15/12/2011	1,1957		sec	410±40	30,0±3,3		27±9		5,1±1,6
	15/12/2011	1,1652		sec	430±40	32,0±4,0		19±10		≤3
	19/12/2011	1,1728		sec	410±40	31,0±4,0		25±10		≤3
Fruits dénoyautés	14/10/2010	3,8311	8,0949	cendres	1,420±150	≤0,4	≤0,9		1,5±0,7	16,4±1,9
	14/10/2010	5,6471	9,6019	cendres	1,300±140	≤0,5	≤3		1,2±0,6	11,8±1,6
	14/10/2010	5,5292	17,4603	cendres	660±70	≤0,3	≤0,7		≤0,8	3,3±0,7
	28/11/2011	6,2386	15,8022	cendres	370±38	≤0,13	≤0,3		≤1,3	2,7±0,7
Fruit entier	28/11/2012	7,2879		sec	199±21	1,2±0,5		≤13		≤13
Fruits dénoyautés	30/11/2011	4,5294	7,0085	cendres	360±36	≤0,3	≤0,4		≤1,4	1,9±0,7
	28/11/2011	4,6079	8,0023	cendres	370±37	≤0,25	≤1,4		≤1,6	2,1±0,7
	28/11/2011	4,1483	9,7132	cendres	275±28	≤0,14	≤0,3		≤0,4	1,5±0,5
	28/11/2011	4,8649	9,8220	cendres	350±41	≤0,3	≤0,6		≤0,7	1,7±0,7
	30/11/2011	5,3276	13,9180	cendres	290±36	≤0,11	≤0,3		≤0,3	1,60±0,43
	30/11/2011	5,8187	5,8448	cendres	430±44	≤0,3	≤1,7		≤1,1	2,4±1,0
	01/12/2011	6,1500	15,6620	cendres	350±38	≤0,6	≤0,3		≤0,9	3,6±0,6
Fruit entier	29/11/2010	4,4264	19,4241	cendres	280±31	≤0,15	≤0,6		0,36±0,21	2,40±0,41
	30/11/2010	4,1852	9,7558	cendres	310±32	≤0,21	≤0,4		≤1,3	3,7±0,6
	30/11/2010	4,7890	18,6360	cendres	280±32	≤0,11	≤0,24		≤0,3	2,70±0,38
Graine	28/11/2011	1,1523	25,0978	cendres	108±11	≤0,24	≤0,14		≤0,5	1,20±0,40
	22/11/2011	1,1655	56,9701	cendres	140±14	0,35±0,07	≤0,12		≤0,5	1,90±0,32
	22/11/2011	1,1545	71,7465	cendres	123±13	0,120±0,038	≤0,3		≤0,3	0,75±0,21
	23/11/2011	1,1482	53,7881	cendres	119±13	0,130±0,048	≤0,17		0,33±0,15	1,10±0,32
	23/11/2011	1,1491	53,2805	cendres	122±13	0,130±0,043	≤0,4		0,32±0,09	2,10±0,34
	28/11/2011	1,1554	36,4755	cendres	121±14	0,120±0,044	≤0,11		0,24±0,08	1,20±0,30

Longit. WGS84	Latit. WGS84	Zonage	Station	Date de prélèvement	Nature	Espèce
7,988308	48,970391	ZNI	Seebach	04/10/2011	Céréales	Maïs <i>Zea mays</i>
7,66407	48,44883	ZNI	Nordhouse	05/10/2011		
4,90295	48,1296	ZNI	Vaudremont	01/07/2010		
5,0601	47,24153	ZNI	Fenay	05/07/2010		
5,44158	49,0208	ZNI	Ambly-sur-Meuse	10/07/2010		
7,05381	48,71279	ZNI	Buhl-Lorraine	13/07/2010		
5,89945	48,88767	ZNI	Limey-Remenauville	14/07/2010		
4,45342	49,29826	ZNI	Saint-Pierre-à-Arnes	21/07/2010		
6,19135	49,46225	Cattenom	Roussy-le-Village	13/07/2010		
4,80273	50,1054	Chooz	Chooz, campagne de Croix	15/07/2010		
4,84104	47,62103	Valduc	Échalot	10/07/2010		
4,41319	49,5077	ZNI	Rethel	03/10/2011	Légumes	Betterave sucrière <i>Beta vulgaris</i>
4,929348	48,89115	ZNI	Nettancourt	04/10/2011		
7,5431	48,4521	ZNI	Meistratzheim	24/08/2010		
7,4212	48,1132	ZNI	Holtzwihr	05/10/2010		
7,5202	48,4742	ZNI	Obernai	07/09/2011		
7,49068	47,92637	Fessenheim	Balgau-ober-Rheinfeld	21/09/2010		
7,366	47,8743	Fessenheim	Ensisheim	08/09/2010		
6,333	48,1363	ZNI	Girancourt	27/07/2011		
5,4026	47,192	ZNI	Auxonne	28/07/2011		
7,72706	48,759015	ZNI	Kriegsheim	04/10/2011		
7,540946	48,337767	ZNI	Kogenheim	04/10/2011		
7,5202	48,4742	ZNI	Obernai	07/09/2011	Plantes aromatiques	Houblon <i>Humulus lupulus</i>
7,5202	48,4742	ZNI	Obernai	07/09/2011		
7,6133	48,6598	ZNI	Truchtersheim	19/09/2011		
6,50255	48,65132	ZNI	Raville-sur-Sanon	11/07/2010	Plantes oléagineuses	Colza <i>Brassicca rapa L.</i>
5,0991	47,94362	ZNI	Bugnières	20/07/2010		
5,99435	47,50776	ZNI	Grandvillage-et-le-Perrenot	21/07/2010		
5,26061	47,02014	ZNI	Montagny-lès-Seurre	25/07/2010		
5,11075	48,67181	ZNI	Rupt-aux-Nonains	25/07/2010		
6,36824	49,05053	ZNI	Bazoncourt	27/07/2010		
5,1845	49,595	ZNI	Sailly	30/07/2010		
7,1452	48,7404	ZNI	Hommarting	24/08/2010		
5,68621	46,8498	ZNI	Tourmont	05/10/2011		
5,32123	46,98239	ZNI	Chemin	05/10/2011		
5,63068	47,47708	ZNI	GAEC de Rigny	05/10/2011		
5,14262	47,39193	ZNI	Saint-Julien	06/10/2011		
7,33673	47,86847	Fessenheim	Ensisheim	05/10/2011		Soja <i>Soja hispida</i>

Fraction	Date de mesure	Frais/Sec	Sec/Cendre	Qualité	⁴⁰ K	Famille ²³² Th	Famille de ²³⁸ U			⁷ Be
						²²⁸ Ac	²³⁴ Th	^{234m} Pa	²¹⁰ Pb	
Graine	15/12/2011	1,2611	23,9018	cendres	109±11	≤0,06	≤0,13		≤0,4	0,50±0,17
	15/12/2011	1,2755	64,9568	cendres	115±12	≤0,16	≤0,3		≤0,25	≤0,15
	12/10/2010	1,1206	40,9924	cendres	173±17	≤0,09	≤0,7		1,29±0,24	18,3±2,0
	12/10/2010	1,1118	34,1358	cendres	176±18	0,16±0,07	≤0,4		1,82±0,26	23,7±2,3
	13/10/2010	1,1242	33,6921	cendres	199±21	0,34±0,08	≤0,18		0,86±0,18	10,7±1,2
	13/10/2010	1,1234	40,7409	cendres	155±17	0,12±0,05	≤0,13		1,82±0,22	20,6±2,2
	13/10/2010	1,1179	36,8104	cendres	182±19	0,32±0,08	≤0,7		1,01±0,24	12,0±1,4
	13/10/2010	1,1502	44,6717	cendres	166±18	≤0,17	≤0,6		≤0,6	6,9±0,7
	13/10/2010	1,1349	38,0313	cendres	187±18	0,14±0,05	≤0,14		0,82±0,16	7,8±0,9
	13/10/2010	1,1314	37,6195	cendres	165±16	0,30±0,08	≤0,4		1,04±0,19	12,2±1,3
12/10/2010	1,0864	33,1588	cendres	187±21	≤0,11	≤0,3		1,40±0,30	15,4±1,8	
Racine	15/12/2011	3,4344	63,1715	cendres	116±13	0,150±0,046	≤0,12		≤0,13	0,38±0,14
	15/12/2011	4,4737	35,4717	cendres	226±23	≤0,07	≤0,16		≤0,18	0,42±0,17
Parties aériennes	14/10/2010	17,0192	10,1111	cendres	1,060±110	0,43±0,21	≤0,6		≤0,7	≤0,7
	30/11/2010	14,3784	11,9654	cendres	850±90	≤0,3	≤0,5		≤0,6	1,1±0,5
Entier	30/11/2011	16,2296	10,2866	cendres	1,060±110	≤0,3	≤0,6		≤0,6	≤0,9
Parties aériennes	29/11/2010	9,4944	7,5307	cendres	1,140±120	≤0,3	≤0,7		4,2±0,8	35,0±3,6
	29/11/2010	12,8226	10,1858	cendres	1,010±110	≤0,8	≤0,7		≤0,8	≤1,0
Parties aériennes	28/11/2011	21,8809	6,0915	cendres	1,740±180	≤1,7	≤1,2		9,8±1,5	153±15
	28/11/2011	16,7504	4,4016	cendres	2,040±200	≤0,6	≤1,2		5,0±1,1	65±7
Feuilles	15/12/2011	1,1866	5,0887	cendres	1,080±120	3,5±0,6	2,6±0,8		22,0±2,4	94±10
	15/12/2011	1,1992	7,0843	cendres	720±80	1,80±0,34	≤0,6		20,5±2,1	124±13
Cône	15/12/2011	1,1067	9,7215	cendres	800±80	0,66±0,24	≤2,1		9,6±1,1	83±8
Liane	15/12/2011	4,2812	5,8060	cendres	480±48	2,40±0,45	≤2,4		30,0±3,1	226±22
Cône	15/12/2011	1,0887	11,6167	cendres	690±70	0,36±0,18	≤1,2		9,1±1,0	68±7
Graine	13/10/2010	1,0640	15,9559	cendres	201±25	≤0,13	≤0,3		≤0,3	4,5±0,7
	13/10/2010	1,0519	28,4893	cendres	207±21	≤0,09	≤0,18		0,32±0,14	6,1±0,7
	13/10/2010	1,0797	25,5827	cendres	211±23	0,27±0,10	≤0,4		≤0,8	6,4±0,9
	14/10/2010	1,0648	21,3890	cendres	238±23	0,24±0,08	≤0,23		0,75±0,22	7,3±0,8
	14/10/2010	1,1113	22,5177	cendres	240±31	0,25±0,09	≤0,22		≤0,9	5,2±0,7
	14/10/2010	1,0757	22,5923	cendres	252±27	≤0,11	≤0,22		≤0,3	2,70±0,44
	29/11/2010	1,0901	26,2241	cendres	164±19	≤0,25	≤0,17		0,31±0,15	3,1±0,5
	14/10/2010	1,1122	22,9571	cendres	240±26	0,30±0,10	≤1,1		≤0,9	2,90±0,39
	19/12/2011	1,1332	11,8271	cendres	620±70	≤0,21	≤0,5		≤0,5	≤3
	19/12/2011	1,1542	16,7477	cendres	600±60	0,39±0,16	≤0,5		0,70±0,42	1,10±0,48
	19/12/2011	1,2510	16,3612	cendres	650±70	≤0,21	≤0,5		≤0,5	≤0,6
19/12/2011	1,1417	16,8535	cendres	640±70	≤0,18	≤0,4		≤0,4	0,90±0,42	
19/12/2011	1,1247	10,3028	cendres	610±70	≤0,24	≤0,5		≤0,6	1,5±0,6	

Longit. WGS84	Latit. WGS84	Zonage	Station	Date de prélèvement	Nature	Espèce
6,19135	49,46225	Cattenom	Roussy-le-Village	25/07/2010	Plantes oléagineuses	Colza <i>Brassica rapa L.</i>
4,80273	50,1054	Chooz	Chooz, campagne de Croix	24/07/2010		
4,84104	47,62103	Valduc	Échalot	18/07/2010		
4,9065	47,6223	Valduc	Salives	04/05/2010	Prairies	Herbe de prairie permanente
7,056	48,6875	ZNI/REM	Schneckenbusch	05/05/2010		
7,1139	48,4785	ZNI	Crête des Vosges	06/05/2010		
4,9213	47,5482	Valduc	Moloy	07/10/2010	Mousses terricoles	Mousse <i>Rhytidiadelphus triquetrus</i>
4,88792	47,59963	Valduc	Moloy	27/07/2011		
4,804779	50,10201	Chooz	Chooz, cimetière et village	09/01/2011	Gibiers, animaux sauvages	Sanglier <i>Sus scorfa</i>
4,89292	47,53075	Valduc	Frenois	26/04/2011	Animaux élevage	Canard <i>Anas platyrhynchos</i>
6,2638	49,3328	Cattenom	Distroff	19/01/2011		Bœuf <i>Bos taurus</i>
6,30918	48,07579	ZNI	La Manche Rasey	09/02/2011		
6,17052	48,7289	ZNI	Champigneulles	04/03/2011		
4,69005	49,5294	ZNI	Lametz	09/03/2011		
6,14498	47,61976	ZNI	Vesoul	18/03/2011		
6,77594	49,003601	ZNI	Freybouse	19/04/2011		
4,67111	47,12159	ZNI	Hameau Oucherotte	04/05/2011		
5,09239	47,89456	ZNI	Saint-Loup-sur-Aujon	05/05/2011		
6,9954	48,6679	ZNI	Lorquin	05/05/2010		
6,8136	47,9874	ZNI	Basse-sur-le-Rupt	06/05/2010	Produits alimentaires solides non transformés	Miel
7,056	48,6875	ZNI/REM	Schneckenbusch	05/05/2010	Produits alimentaires transformés	Fromage Munster
6,7941	47,9821	ZNI	Saulxures-sur-Moselotte	06/05/2010		
4,6666	47,5584	Valduc	Poiseul-la-Ville-et-Laperrière	04/05/2010	Produits alimentaires non transformés	Lait de vache
7,056	48,6875	ZNI/REM	Schneckenbusch	05/05/2010		
6,9523	48,6255	ZNI/REM	Hattigny	06/05/2010		
6,7941	47,9821	ZNI	Saulxures-sur-Moselotte	06/05/2010		
6,2327	47,4871	ZNI	Fontenois-lès-Montbozon	04/10/2010		
6,4069	48,6692	ZNI	Drouville	05/10/2010		
4,7513	49,5075	ZNI	Le Chesne	06/10/2010		
6,5493	49,0582	ZNI	Elvange	07/09/2011		

Fraction	Date de mesure	Frais/Sec	Sec/Cendre	Qualité	⁴⁰ K	Famille ²³² Th	Famille de l' ²³⁸ U			⁷ Be
						²²⁸ Ac	²³⁴ Th	^{234m} Pa	²¹⁰ Pb	
Graine	14/10/2010	1,0941	22,8368	cendres	254±26	0,20±0,08	≤0,24		≤0,3	1,90±0,39
	14/10/2010	1,0808	23,4611	cendres	251±26	0,20±0,09	≤0,19		0,43±0,17	3,8±0,6
	29/11/2010	1,0618	27,2333	cendres	213±22	≤0,11	≤0,17		0,48±0,15	7,0±1,0
Parties aériennes	30/07/2010	3,6606	10,1463	cendres	780±80	≤0,4	≤1,0		13,0±1,8	74±8
	02/08/2010	4,6562	11,7864	cendres	820±80	≤0,9	≤0,6		4,0±0,7	47±5
	02/08/2010	4,3564	34,7689	cendres	86±9	1,06±0,20	≤0,6		360±35	760±70
Entier	30/11/2010	2,5516	15,2109	cendres	179±18	2,20±0,39	2,0±0,5		370±39	470±46
	03/08/2011	3,7047		sec	157±27	≤4	≤6		350±40	740±80
Muscle	11/07/2011	3,0236	30,5467	cendres	252±26	≤0,4	≤0,3		≤0,8	≤2,1
Muscle	12/07/2011	2,9352	28,7093	cendres	300±31	≤0,09	≤0,17		≤0,19	≤0,24
	11/07/2011	3,8915	16,4643	cendres	430±43	≤0,21	≤0,5		≤0,6	≤2,4
	12/07/2011	3,6667	11,3011	cendres	420±44	≤0,18	≤0,3		≤0,4	≤1,8
	12/07/2011	4,3745	19,7524	cendres	500±50	≤0,13	≤0,3		≤0,4	≤1,0
	12/07/2011	3,9611	13,5200	cendres	390±44	≤0,18	≤0,3		≤0,4	≤1,0
	12/07/2011	3,6293	14,9591	cendres	270±33	≤0,13	≤0,3		≤0,3	≤0,7
	12/07/2011	3,8073	16,8330	cendres	420±42	≤0,15	≤0,3		≤0,3	≤0,4
	25/07/2011	3,8303	26,3418	cendres	310±34	≤0,11	≤0,23		≤0,3	≤0,4
Entier	02/08/2010	1,2279		frais	53±6	≤0,3		≤7		≤1,2
	03/08/2010	1,2145		frais	37,0±3,9	≤0,3		≤24		≤1,2
Entier	02/08/2010	1,7608	13,4833	cendres	48±5	≤0,09	≤0,5		0,41±0,16	≤0,4
	03/08/2010	1,8774	14,5967	cendres	70±8	0,70±0,13	≤0,21		0,38±0,17	≤0,5
Entier	30/07/2010	7,9981	16,1016	cendres	48,0±4,7	≤0,03	≤0,05		≤0,05	≤0,09
	02/08/2010	7,6386	17,0690	cendres	48±5	≤0,019	≤0,05		≤0,05	≤0,08
	04/11/2010	8,0580	16,8014	cendres	44,0±4,4	≤0,022	≤0,05	≤0,6	≤0,05	≤0,03
	03/08/2010	7,9758	15,9144	cendres	51±6	≤0,03	≤0,06		≤0,06	≤0,16
	29/11/2010		16,3612	cendres	43,0±4,5	≤0,03	≤0,07		≤0,15	≤0,07
	30/11/2010		15,7052	cendres	48,0±4,7	≤0,020	≤0,04		≤0,04	≤0,05
	30/11/2010	7,9244	15,4799	cendres	45,0±4,9	≤0,024	≤0,12		≤0,05	≤0,06
	30/11/2011	8,1324	15,7052	cendres	49±5	≤0,023	≤0,05		≤0,05	≤0,07

Tableau 8. Résultats des mesures des radionucléides artificiels émetteurs gamma dans le milieu terrestre entreprises pour ce constat.

Longit. WGS84	Latit. WGS84	Zonage	Station	Date de prélèvement	Denrées / indicateur	Nature
4,85552	47,56652	Valduc	Combe du Tilleul	06/10/2011	Indicateur	Sols non cultivés
4,9213	47,5482	Valduc	Moloy	04/05/2010		
4,9065	47,6223	Valduc	Salives	04/05/2010		
7,056	48,6875	ZNI/REM	Schneckenbusch	05/05/2010		
6,9523	48,6255	ZNI/REM	Hattigny	06/05/2010		
7,1139	48,4785	ZNI/REM	Crête des Vosges	06/05/2010		
7,1139	48,4785	ZNI/REM	Crête des Vosges	27/07/2011		
7,1139	48,4785	ZNI/REM	Crête des Vosges	27/07/2011		
7,1139	48,4785	ZNI/REM	Crête des Vosges	27/07/2011		
7,705681	48,434035	ZNI/REM	Nordhouse	05/10/2011		
7,705681	48,434035	ZNI/REM	Nordhouse	05/10/2011		
7,705681	48,434035	ZNI/REM	Nordhouse	05/10/2011		
7,988308	48,970391	ZNI	Seebach	04/10/2011		
7,66407	48,44883	ZNI/REM	Nordhouse	05/10/2011		
5,2285	47,2356	ZNI	Genlis	28/07/2011		
5,14194	47,52929	ZNI	Is-sur-Tille	28/07/2011		
5,7085	49,487	ZNI	Cons-la-Grandville	26/07/2011		
4,24	49,5245	ZNI	Château-Porcien	26/07/2011		
6,3807	49,0217	ZNI	Lemud	26/07/2011		
6,7929	48,8284	ZNI/REM	Zommange	26/07/2011		
4,80273	50,1054	Chooz	Chooz, campagne de Croix	15/07/2010		
6,19135	49,46225	Cattenom	Roussy-le-Village	13/07/2010		
4,84104	47,62103	Valduc	Échalot	10/07/2010		
4,90295	48,1296	ZNI	Vaudremont	01/07/2010		
5,0601	47,24153	ZNI	Fenay	05/07/2010		
5,44158	49,0208	ZNI	Ambly-sur-Meuse	10/07/2010		
7,05381	48,71279	ZNI/REM	Buhl-Lorraine	13/07/2010		
5,89945	48,88767	ZNI	Limey-Remenauville	14/07/2010		
4,45342	49,29826	ZNI	Saint-Pierre-à-Arnes	21/07/2010		
4,80273	50,1054	Chooz	Chooz, campagne de Croix	24/07/2010	Plantes oléagineuses	
6,19135	49,46225	Cattenom	Roussy-le-Village	25/07/2010		
4,84104	47,62103	Valduc	Échalot	18/07/2010		
6,50255	48,65132	ZNI	Raville-sur-Sanon	11/07/2010		
5,0991	47,94362	ZNI	Bugnières	20/07/2010		

	Espèce	Fraction	Date de mesure	Frais/Sec	Sec/Cendre	¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co	²⁴¹ Am	¹³¹ I	
	Sol forestier Profondeur 0-20 cm	Ø < 2 mm	19/12/2011	2,154563		13,1±1,1	≤0,09	n.d.	n.a.	
	Sol de taillis Profondeur 0-5 cm		04/11/2010	1,43953		32,0±3,1	≤0,3	≤0,4	n.a.	
	Sol de pâturage ou de prairie Profondeur 0-5 cm		08/11/2010	1,231077		21,9±2,1	≤0,3	≤0,3	n.a.	
			08/11/2010	1,440042		34,0±4,0	≤0,3	≤0,4	n.a.	
			08/11/2010	1,31762		42,0±4,0	≤0,3	≤0,4	n.a.	
			08/11/2010	1,318723		73±7	≤0,17	0,79±0,17	n.a.	
			24/11/2011	1,882169		143±12	≤0,12	n.a.	n.a.	
	Sol de pâturage ou de prairie Profondeur 5-15 cm		24/11/2011	1,578245		26,6±2,2	≤0,13	n.a.	n.a.	
	Sol de pâturage ou de prairie Profondeur 15-30 cm		28/11/2011	1,279895		5,1±0,5	≤0,07	n.a.	n.a.	
	Sol de pâturage ou de prairie Profondeur 0-5 cm		15/12/2011	1,195689		9,5±0,8	≤0,12	n.a.	n.a.	
	Sol de pâturage ou de prairie Profondeur 5-15 cm		15/12/2011	1,165179		10,4±0,9	≤0,15	n.a.	n.a.	
	Sol de pâturage ou de prairie Profondeur 15-30 cm	19/12/2011	1,172764		7,0±0,6	≤0,14	n.a.	n.a.		
	Maïs <i>Zea mays</i>	Graine	15/12/2011	1,261052	23,901847	≤0,010	≤0,017	≤0,010	n.a.	
			15/12/2011	1,275543	64,956824	≤0,008	≤0,013	≤0,008	n.a.	
	Blé <i>Triticum L.</i>		28/11/2011	1,155399	36,475451	≤0,009	≤0,015	≤0,009	n.a.	
				28/11/2011	1,152273	25,097848	≤0,014	≤0,022	≤0,014	n.a.
				22/11/2011	1,165483	56,970143	≤0,020	≤0,015	≤0,011	n.a.
				22/11/2011	1,154544	71,746501	≤0,03	≤0,013	≤0,008	n.a.
				23/11/2011	1,148234	53,788101	≤0,03	≤0,017	≤0,016	n.a.
				23/11/2011	1,149099	53,280537	≤0,03	≤0,015	≤0,010	n.a.
	Orge <i>Hordeum L.</i>		13/10/2010	1,13142	37,619536	≤0,014	≤0,025	≤0,015	n.a.	
				13/10/2010	1,134945	38,031289	≤0,012	≤0,020	≤0,014	n.a.
				12/10/2010	1,086388	33,158815	≤0,021	≤0,03	≤0,03	n.a.
				12/10/2010	1,120555	40,992441	≤0,015	≤0,023	≤0,020	n.a.
				12/10/2010	1,111833	34,135801	≤0,017	≤0,03	≤0,017	n.a.
				13/10/2010	1,124243	33,6921	≤0,015	≤0,024	≤0,017	n.a.
				13/10/2010	1,123383	40,740878	≤0,04	≤0,019	≤0,013	n.a.
				13/10/2010	1,117904	36,810418	≤0,05	≤0,023	≤0,021	n.a.
	Colza <i>Brassica rapa L.</i>		13/10/2010	1,150159	44,671672	≤0,015	≤0,019	≤0,019	n.a.	
				14/10/2010	1,080772	23,461138	0,039±0,016	≤0,04	≤0,020	n.a.
				14/10/2010	1,094063	22,836825	0,036±0,016	≤0,03	≤0,024	n.a.
				29/11/2010	1,06184	27,2333	0,080±0,017	≤0,03	≤0,017	n.a.
			13/10/2010	1,064018	15,955896	≤0,024	≤0,04	≤0,024	n.a.	
		13/10/2010	1,051922	28,489308	≤0,04	≤0,03	≤0,018	n.a.		

Longit. WGS84	Latit. WGS84	Zonage	Station	Date de prélèvement	Denrées / indicateur	Nature	
5,99435	47,50776	Fessenheim	Grandvelle-et-le-Perrenot	21/07/2010	Denrées	Plantes oléagineuses	
5,26061	47,02014	ZNI	Montagny-lès-Seurre	25/07/2010			
5,11075	48,67181	ZNI	Rupt-aux-Nonains	25/07/2010			
6,36824	49,05053	ZNI	Bazoncourt	27/07/2010			
5,1845	49,595	ZNI	Sailly	30/07/2010			
7,1452	48,7404	ZNI/REM	Hommarting	24/08/2010			
7,33673	47,86847	Fessenheim	Ensisheim	05/10/2011			
5,68621	46,8498	ZNI/REM	Tourmont	05/10/2011			
5,32123	46,98239	ZNI	Chemin	05/10/2011			
5,63068	47,47708	ZNI	GAEC de Rigny	05/10/2011			
5,14262	47,39193	ZNI	Saint-Julien	06/10/2011			
4,9285	47,1332	ZNI	Nuits-Saint-Georges	04/10/2010		Arbres et arbustes fruitiers	
7,4261	48,3806	ZNI/REM	Andlau	05/10/2010			
7,5018	48,5809	ZNI	Dahlenheim	05/10/2010			
6,17078	49,38458	Cattenom	Manom	06/09/2011			
5,8356	48,7197	ZNI	Lucey	24/08/2010			
7,4443	48,6022	ZNI	Westhoffen	24/08/2010			
6,1987	49,1784	ZNI	La Maxe	25/08/2010			
6,2979	48,3252	Cattenom	Évaux-et-Menil	27/07/2011			
5,8356	48,7197	ZNI	Lucey	06/09/2011			
5,7104	48,9878	Valduc	Vigneulles-lès-Hattonchatel	06/09/2011			
6,1987	49,1784	ZNI	La Maxe	06/09/2011	Plantes aromatiques		
7,4683	48,5725	ZNI	Dangolsheim	07/09/2011			
7,3124	48,1253	ZNI	Sigolsheim	07/09/2011			
6,27	48,3057	ZNI	Gugney-aux-Aulx	08/09/2011	Légumes		
6,9719	48,4687	ZNI/REM	Celles-sur-Plaine	07/05/2012			
7,5202	48,4742	ZNI	Obernai	07/09/2011			
7,6133	48,6598	ZNI	Truchtersheim	19/09/2011			
7,5202	48,4742	ZNI/REM	Obernai	07/09/2011			
7,366	47,8743	Fessenheim	Ensisheim	08/09/2010	Indicateur	Légumes	
7,5431	48,4521	ZNI/REM	Meistratzheim	24/08/2010			
7,49068	47,92637	Fessenheim	Balgau-ober-Rheinfeld	21/09/2010			
7,5202	48,4742	ZNI/REM	Obernai	07/09/2011			
7,4212	48,1132	ZNI	Holtzwihr	05/10/2010			
6,333	48,1363	ZNI	Girancourt	27/07/2011			
5,4026	47,192	ZNI	Auxonne	28/07/2011			

	Espèce	Fraction	Date de mesure	Frais/Sec	Sec/Cendre	¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co	²⁴¹ Am	¹³¹ I	
	Colza <i>Brassica rapa L.</i>	Graine	13/10/2010	1,079701	25,58273	0,083±0,025	≤0,04	≤0,03	n.a.	
			14/10/2010	1,06476	21,388996	≤0,020	≤0,03	≤0,024	n.a.	
			14/10/2010	1,111271	22,517713	≤0,020	≤0,03	≤0,022	n.a.	
			14/10/2010	1,075731	22,592344	≤0,019	≤0,03	≤0,023	n.a.	
			29/11/2010	1,090102	26,224109	≤0,016	≤0,024	≤0,017	n.a.	
	Soja <i>Soja hispida</i>		14/10/2010	1,11222	22,95709	≤0,06	≤0,03	≤0,03	n.a.	
			19/12/2011	1,124708	10,302805	≤0,13	≤0,06	≤0,05	n.a.	
			19/12/2011	1,133176	11,827053	0,082±0,030	≤0,06	≤0,04	n.a.	
			19/12/2011	1,154212	16,74769	0,080±0,031	≤0,06	≤0,04	n.a.	
			19/12/2011	1,251029	16,361173	0,068±0,024	≤0,05	≤0,04	n.a.	
	Vigne <i>Vitis vinifera</i>	Fruit entier	19/12/2011	1,141747	16,853506	0,057±0,026	≤0,05	≤0,03	n.a.	
			29/11/2010	4,42641	19,424128	≤0,006	≤0,010	≤0,006	n.a.	
			30/11/2010	4,18515	9,755816	≤0,009	≤0,013	≤0,009	n.a.	
	Quetsche <i>Prunus domestica subsp. insititia</i>	Fruit entier	30/11/2010	4,789046	18,63602	≤0,005	≤0,007	≤0,006	n.a.	
			30/11/2011	4,529404	7,008519	≤0,011	≤0,017	≤0,009	n.a.	
			30/11/2011	4,529404	7,008519	≤0,011	≤0,017	≤0,009	n.a.	
	Mirabellier <i>Prunus insititia</i>	Fruits dénoyautés	14/10/2010	3,831098	8,094947	≤0,023	≤0,04	≤0,024	n.a.	
			14/10/2010	5,647137	9,601874	≤0,016	≤0,03	≤0,016	n.a.	
			14/10/2010	5,529207	17,460337	≤0,010	≤0,015	≤0,014	n.a.	
			28/11/2011	6,238576	15,802162	≤0,005	≤0,007	≤0,005	n.a.	
	Quetsche <i>Prunus domestica subsp. insititia</i>		28/11/2011	4,607887	8,002307	≤0,012	≤0,018	≤0,011	n.a.	
			28/11/2011	4,148321	9,713167	0,011±0,006	≤0,012	≤0,007	n.a.	
			28/11/2011	4,864947	9,821997	≤0,010	≤0,015	≤0,013	n.a.	
30/11/2011			5,327585	13,917998	≤0,016	≤0,007	≤0,005	n.a.		
	Myrtille <i>Vaccinium myrtillus L.</i>		Fruit entier	30/11/2011	5,818667	5,844806	0,014±0,008	≤0,018	≤0,010	n.a.
				01/12/2011	6,150042	15,661998	≤0,016	≤0,008	≤0,005	n.a.
	Houblon <i>Humulus lupulus</i>	Cône	28/11/2012	7,287915		5,30±0,43	≤0,017	n.d.	n.a.	
			15/12/2011	1,106695	9,72153	≤0,06	≤0,09	≤0,06	n.a.	
		15/12/2011	1,088672	11,616749	≤0,05	≤0,08	≤0,06	n.a.		
	Chou <i>Brassica tuberosum</i>	Parties aériennes	15/12/2011	4,281236	5,806015	≤0,03	≤0,022	≤0,018	n.a.	
			29/11/2010	12,822568	10,185813	≤0,05	≤0,09	≤0,07	n.a.	
			14/10/2010	17,01915	10,111124	≤0,06	≤0,10	≤0,07	n.a.	
		Entier	29/11/2010	9,494431	7,53071	≤0,07	≤0,11	≤0,08	n.a.	
		Parties aériennes	30/11/2011	16,229608	10,286556	≤0,05	≤0,09	≤0,06	n.a.	
	Salade Laitue Batavia <i>Lactuca Sativa</i>	Parties aériennes	30/11/2010	14,378364	11,965434	0,090±0,042	≤0,10	≤0,06	n.a.	
			28/11/2011	21,880879	6,091461	0,90±0,13	≤0,17	≤0,13	n.a.	
			28/11/2011	16,750391	4,401574	0,39±0,09	≤0,18	≤0,14	n.a.	

Longit. WGS84	Latit. WGS84	Zonage	Station	Date de prélèvement	Denrées / indicateur	Nature	
4,41319	49,5077	ZNI	Rethel	03/10/2011	Denrées	Légumes	
4,929348	48,89115	ZNI	Nettancourt	04/10/2011			
7,72706	48,759015	ZNI	Kriegsheim	04/10/2011			
7,540946	48,337767	ZNI/REM	Kogenheim	04/10/2011			
4,9065	47,6223	Valduc	Salives	04/05/2010	Indicateur	Prairies	
7,056	48,6875	ZNI/REM	Schneckenbusch	05/05/2010			
7,1139	48,4785	ZNI/REM	Crête des Vosges	06/05/2010			
4,9213	47,5482	Valduc	Moloy	07/10/2010			
4,88792	47,59963	Valduc	Moloy	27/07/2011		Mousses terricoles	
6,2638	49,3328	Cattenom	Distroff	19/01/2011	Denrées	Animaux élevage	
6,30918	48,07579	ZNI	La Manche Rasey	09/02/2011			
6,17052	48,7289	ZNI	Champigneulles	04/03/2011			
4,69005	49,5294	ZNI	Lametz	09/03/2011			
6,14498	47,61976	ZNI	Vesoul	18/03/2011			
6,77594	49,003601	Fessenheim	Freybouse	19/04/2011			
4,67111	47,12159	ZNI	Hameau Oucherotte	04/05/2011			
5,09239	47,89456	ZNI	Saint-Loup-sur-Aujon	05/05/2011			
4,89292	47,53075	Valduc	Frenois	26/04/2011			
4,804779	50,10201	Chooz	Chooz, cimetière et village	09/01/2011		Gibiers, animaux sauvages	
4,6666	47,5584	Valduc	Poiseul-la-Ville-et-Laperrière	04/05/2010	Denrées et indicateur	Produits alimentaires liquides non transformés	
7,056	48,6875	ZNI/REM	Schneckenbusch	05/05/2010			
6,9523	48,6255	ZNI/REM	Hattigny	06/05/2010			
6,7941	47,9821	ZNI	Saulxures-sur-Moselotte	06/05/2010			
6,2327	47,4871	ZNI	Fontenois-lès-Montbozon	04/10/2010			
6,4069	48,6692	ZNI	Drouville	05/10/2010			
4,7513	49,5075	ZNI	Le Chesne	06/10/2010			
6,5493	49,0582	ZNI	Elvange	07/09/2011			
6,9954	48,6679	ZNI/REM	Lorquin	05/05/2010	Denrées	Produits alimentaires solides non transformés	
6,8136	47,9874	ZNI	Basse-sur-le-Rupt	06/05/2010			
7,056	48,6875	ZNI/REM	Schneckenbusch	05/05/2010		Produits alimentaires transformés	
6,7941	47,9821	ZNI	Saulxures-sur-Moselotte	06/05/2010			

	Espèce	Fraction	Date de mesure	Frais/Sec	Sec/Cendre	¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co	²⁴¹ Am	¹³¹ I
	Betterave sucrière <i>Beta vulgaris macrocarpa et maritima</i> (hybride)	Racine	15/12/2011	3,434411	63,171478	≤0,003	≤0,005	≤0,004	n.a.
			15/12/2011	4,473658	35,471681	0,0090 ±0,0032	≤0,005	≤0,004	n.a.
	Tabac <i>Nicotiana tabacum</i>	Feuilles	15/12/2011	1,186579	5,088694	0,46±0,08	≤0,10	≤0,08	n.a.
			15/12/2011	1,199195	7,084322	≤0,05	≤0,08	≤0,06	n.a.
	Herbe de prairie permanente	Parties aériennes	30/07/2010	3,660567	10,146333	≤0,08	≤0,12	≤0,11	n.a.
			02/08/2010	4,656168	11,786376	1,04±0,12	≤0,09	≤0,07	n.a.
			02/08/2010	4,356434	34,768939	60±5	≤0,04	≤0,07	n.a.
	Mousse <i>Rhytidadelphus triquetrus</i>	Entier	30/11/2010	2,551564	15,210855	3,50±0,39	≤0,05	≤0,07	n.a.
			03/08/2011	3,704686		3,0±0,9	≤1,1	≤0,7	≤1,4
	Bœuf <i>Bos taurus</i>	Muscle	11/07/2011	3,891546	16,464347	≤0,011	≤0,016	≤0,015	n.a.
			12/07/2011	3,666684	11,301085	0,135±0,017	≤0,017	≤0,010	n.a.
			12/07/2011	4,374514	19,752401	0,116±0,014	≤0,010	≤0,008	n.a.
			12/07/2011	3,961137	13,519974	0,050±0,009	≤0,013	≤0,009	n.a.
			12/07/2011	3,62925	14,95911	0,162±0,018	≤0,012	≤0,008	n.a.
			12/07/2011	3,807314	16,832953	0,027±0,006	≤0,011	≤0,009	n.a.
	Poulet <i>Gallus gallus sp</i>		25/07/2011	3,830314	26,341815	≤0,014	≤0,009	≤0,006	n.a.
			25/07/2011	3,774312	19,532997	0,012±0,007	≤0,012	≤0,009	n.a.
	Canard <i>Anas platyrhynchos</i>		12/07/2011	2,935194	28,709265	0,027±0,006	≤0,009	≤0,007	n.a.
	Sanglier <i>Sus scorfa</i>		11/07/2011	3,023562	30,546711	0,096±0,015	≤0,016	≤0,011	n.a.
	Lait de vache	Entier	30/07/2010	7,9981	16,101629	≤0,005	≤0,009	≤0,005	n.a.
			02/08/2010	7,6386	17,069046	0,022±0,007	≤0,007	≤0,005	n.a.
			04/11/2010	8,058	16,80137	0,0160±0,0044	≤0,007	≤0,005	n.a.
			03/08/2010	7,9758	15,914413	4,40±0,47	≤0,008	≤0,006	n.a.
			29/11/2010		16,361214	0,0190±0,0045	≤0,007	≤0,007	n.a.
			30/11/2010		15,705212	0,0200±0,0040	≤0,006	≤0,004	n.a.
			30/11/2010	7,9244	15,479901	≤0,016	≤0,008	≤0,005	n.a.
			30/11/2011	8,1324	15,7052	≤0,004	≤0,006	≤0,005	n.a.
	Miel	Entier	02/08/2010	1,227884		0,29±0,06	≤0,06	n.d.	n.a.
			03/08/2010	1,214473		1,34±0,15	≤0,06	n.d.	n.a.
	Munster	Entier	02/08/2010	1,760782	13,483314	0,019±0,009	≤0,017	≤0,011	n.a.
			03/08/2010	1,877418	14,596744	3,40±0,36	≤0,016	≤0,013	n.a.

Tableau 9. Résultats des mesures des uraniums (^{234}U , ^{235}U , ^{236}U et ^{238}U) entreprises pour ce constat. Bq/kg sec sauf pour les légumes et les poissons (Bq/kg frais), le lait et l'eau (Bq/L) et sauf mention contraire dans les en-têtes de tableau

Longit. WGS84	Latit. WGS84	Zonage	Station	Position/ Site	Date de prélèvement	Nature	Espèce	Fraction	
4,84268	47,59136	Valduc	Source du ruisseau Notre-Dame	Aval	04/05/2011	Eau douce	Eau de nappe phréatique	Filtrat à 0,45 µm	
4,87894	47,58414	Valduc	Source du ruisseau de l'Abbaye de Valduc	Aval	04/05/2011				
4,85099	47,582	Valduc	Source du ruisseau de Lochère	Aval	03/05/2011				
4,86168	47,55773	Valduc	Source du ruisseau de Noirvau	Aval	03/05/2011				
4,801	50,087	Chooz	Chooz, émissaire des effluents liquides	Aval	24/05/2011	Sédiment	Sédiment	Ø < 2 mm	
4,85099	47,582	Valduc	Source du ruisseau de Lochère	Amont	03/05/2011	Sédiment	Sédiment	Ø < 2 mm	
4,86168	47,55773	Valduc	Source du ruisseau de Noirvau	Aval	03/05/2011	Sédiment	Sédiment	Ø < 2 mm	
4,8828	47,5726	Valduc	Étang de Valduc	Aval	04/05/2011	Sédiment	Sédiment	Ø < 2 mm	
4,85552	47,56652	Valduc	Combe du Tilleul		06/10/2011	Sols non cultivés	Sol forestier	Ø < 2 mm	
7,705681	48,434035	ZNI/REM	Nordhouse		05/10/2011		Sol de pâturage Profondeur 0-5 cm		
7,705681	48,434035	ZNI/REM	Nordhouse		05/10/2011		Sol de pâturage Profondeur 5-15 cm		
7,705681	48,434035	ZNI/REM	Nordhouse		05/10/2011		Sol de pâturage Profondeur 15-30 cm		
4,801	50,087	Chooz	Chooz, émissaire des effluents liquides	Aval	24/05/2011	Phanérogames immergées	Nénuphar <i>Nuphar luteum</i>	Parties aériennes	
4,85099	47,582	Valduc	Source du ruisseau de Lochère	Amont	03/05/2011	Phanérogames immergées	Potamot <i>Potamogeton sp</i>	Entier	
4,84324	47,53172	Valduc	Lamargelle, amont de l'Ignon	Amont	06/10/2011	Mousses aquatiques	Mousse	Entier	
4,84619	47,55227	Valduc	Amont de La Roussotte	Amont	03/05/2011				
4,93417	47,54059	Valduc	Moloy, aval de l'Ignon	Aval	06/10/2011	Mousses aquatiques	Mousse	Entier	
4,86524	47,54114	Valduc	Aval Les Meurgers	Aval	03/05/2011				
4,9213	47,5482	Valduc	Moloy		07/10/2010	Mousses terrioles	Mousse <i>Rhytidiadelphus triquetrus</i>	Entier	
4,88862	47,58046	Valduc	La Combe de l'Abbaye		04/05/2011	Conifère	Épicéa <i>Picea</i>	Feuilles	

	Date de l'analyse	Frais/Sec	Sec/Cendre	²³⁴ U	²³⁵ U	²³⁶ U	²³⁸ U	U tot (µg/kg)	²³⁴ U/ ²³⁸ U (Bq/Bq)	²³⁵ U/ ²³⁸ U (g/g, %)
	28/10/2011	-	-	0,0049 ±0,0012	0,000213 ±0,000027	≤0,000004	0,0047 ±0,0005	0,380±0,043	1,06±0,28	0,712±0,036
	28/10/2011	-	-	0,0037 ±0,0009	0,000161 ±0,000020	≤0,000004	0,00350 ±0,00040	0,280±0,032	1,05±0,27	0,719±0,032
	28/10/2011	-	-	0,0032 ±0,0011	0,000125 ±0,000016	≤0,000004	0,00270 ±0,00030	0,219±0,024	1,20±0,43	0,719±0,037
	28/10/2011	-	-	0,0051 ±0,0013	0,000219 ±0,000027	0,000014 ±0,000006	0,0045 ±0,0005	0,370±0,042	1,10±0,32	0,752±0,035
	03/11/2011	2,318992	1,142457	16,0±2,5	0,76±0,10	≤0,007	16,4±1,9	1 330±160	0,97±0,19	0,722±0,028
	02/11/2011	3,591233	1,701184	10,6±2,0	0,51 ±0,07	≤0,006	10,9±1,4	880±110	0,98±0,22	0,729±0,035
	24/11/2011	3,568721	1,145643	4,8±1,3	0,211±0,026	0,0100 ±0,0035	4,4 ±0,5	360±42	1,10±0,32	0,747±0,033
	02/11/2011	2,15591	1,117825	14,8±2,1	0,69±0,08	≤0,007	15,0±1,7	1 210±140	0,98±0,18	0,719±0,026
	09/12/2011	2,169532	1,185681	8,7±2,7	0,42±0,06	≤0,005	9,0±1,3	730±100	1,00±0,33	0,724±0,047
	09/12/2011	1,190131	1,077407	18,2±2,9	0,85±0,10	≤0,008	18,2±2,0	1 470±170	1,00±0,19	0,723±0,024
	09/12/2011	1,162648	1,041709	16,2±2,6	0,81±0,09	≤0,007	17,3±1,9	1 400±160	0,93±0,18	0,723±0,024
	09/12/2011	1,170711	1,031915	17,0±4,0	0,79±0,13	≤0,007	16,9±2,4	1 370±200	0,98±0,27	0,724±0,047
	22/12/2011	7,208084	7,784761	0,36±0,05	0,0142 ±0,0017	≤0,00017	0,310 ±0,033	24,8±2,7	1,17±0,21	0,721±0,023
	24/11/2011	3,491202	1,249838	1,41±0,23	0,058 ±0,007	≤0,0005	1,25±0,15	102±12	1,13±0,23	0,721±0,030
	09/12/2011	4,661544	2,997121	6,2±1,3	0,280 ±0,032	≤0,003	6,0±0,7	490±60	1,03±0,24	0,724±0,024
	28/10/2011	2,93297	1,80793	4,5±0,7	0,205 ±0,023	≤0,0015	4,40±0,48	360±39	1,02±0,19	0,724±0,025
	09/12/2011	6,836453	2,612708	4,1±0,7	0,182 ±0,021	≤0,0013	3,90±0,46	320±37	1,03±0,20	0,718±0,028
	02/11/2011	3,307181	1,611453	5,2±1,0	0,250 ±0,032	≤0,003	5,3±0,7	430±60	0,99±0,23	0,724±0,034
	02/11/2011	2,953069	15,210855	1,13±0,22	0,054 ±0,008	≤0,0006	1,16±0,15	94±12	0,97±0,23	0,724±0,039
	17/11/2011	1,157451	20,113548	0,061 ±0,010	0,00300 ±0,00034	≤0,000024	0,064 ±0,007	5,2±0,6	0,96±0,19	0,720±0,024

Longit. WGS84	Latit. WGS84	Zonage	Station	Position/ Site	Date de prélèvement	Nature	Espèce	Fraction	
7,49068	47,92637	Fessenheim	Balgau-ober-Rheinfeld		21/09/2010	Légumes	Chou <i>Brassica tuberosum</i>	Parties aériennes	
7,4212	48,1132	ZNI	Holtzwihr		05/10/2010				
5,4026	47,192	ZNI	Auxonne		28/07/2011		Salade Laitue Batavia <i>Lactuca Sativa</i>		
6,333	48,1363	ZNI	Girancourt		27/07/2011				
4,801	50,087	Chooz	Chooz, émissaire des effluents liquides	Aval	21/06/2011	Poissons	Anguille <i>Anguilla anguilla</i>	Muscle	
6,2597	49,403	Cattenom	Aval du barrage de Koenigsmacker	Aval	15/06/2011			Entier	
4,81771	47,51524	Valduc	Amont de Lamargelle		13/09/2011	Poissons	Chevesne <i>Leuciscus cephalus</i>	Muscle	
4,87776	47,53373	Valduc	Moulin de Frénois		13/09/2011				

	Date de l'analyse	Frais/Sec	Sec/Cendre	²³⁴ U	²³⁵ U	²³⁶ U	²³⁸ U	U tot (µg/kg)	²³⁴ U/ ²³⁸ U (Bq/Bq)	²³⁵ U/ ²³⁸ U (g/g, %)
	02/11/2011	9,494431	7,53071	0,0055 ±0,0015	0,000230 ±0,000031	≤0,000003	0,0049 ±0,0006	0,400±0,049	1,10±0,34	0,722±0,038
	17/11/2011	14,378364	11,965434	0,00052 ±0,00010	0,0000204 ±0,0000024	≤0,0000008	0,000450 ±0,000049	0,0360±0,0040	1,17±0,27	0,713±0,032
	03/09/2012	16,750391	4,401574	0,0153 ±0,0026	0,00071 ±0,00008	≤0,000015	0,0154 ±0,0019	1,25±0,15	0,99±0,21	0,715±0,021
	03/09/2012	21,880879	6,091461	0,00320 ±0,00043	0,000126 ±0,000014	≤0,0000019	0,00280 ±0,00031	0.224±0.025	1,17±0,20	0,711±0,020
	22/12/2011	3,35578	7,755578	0,0173 ±0,0026	0,00077 ±0,00009	≤0,000009	0,0167 ±0,0018	1,35±0,15	1,04±0,19	0,714±0,026
	22/12/2011	3,943069	6,780893	0,0240 ±0,0033	0,00096 ±0,00011	≤0,000010	0,0208 ±0,0023	1,69±0,19	1,16±0,21	0,715±0,025
	22/12/2011	3,866016	6,852696	0,069 ±0,009	0,00330 ±0,00038	≤0,00003	0,072 ±0,008	5,8±0,7	0,96±0,17	0,714±0,021
	03/09/2012	4,689519	15,446021	0,0033 ±0,0005	0,000138 ±0,000015	≤0,0000022	0,00300 ±0,00032	0,241±0,026	1,09±0,22	0,719±0,022

Tableau 10. Résultats des mesures des transuraniens (^{238}Pu , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{226}Ra) entreprises pour ce constat. mBq/kg sec sauf pour le lait et l'eau (mBq/L) et les légumes (mBq/kg frais).

Longitude degré WGS84	Latitude degré WGS84	Zonage	Station	Date de prélèvement	Espèce
4,86168	47,55773	Valduc	Source du ruisseau de Noirvau	03/05/2011	Sédiment
4,85099	47,582	Valduc	Source du ruisseau de Lochère	03/05/2011	
4,8828	47,5726	Valduc	Étang de Valduc	04/05/2011	
7,056	48,6875	ZNI/REM	Schneckenbusch	05/05/2010	Sol de pâturage Profondeur 0-5 cm
7,1139	48,4785	ZNI	Crête des Vosges	06/05/2010	Sol de pâturage ou de prairie Profondeur 0-5 cm
7,1139	48,4785	ZNI	Crête des Vosges	27/07/2011	
7,1139	48,4785	ZNI	Crête des Vosges	27/07/2011	Sol de pâturage Profondeur 5-15 cm
7,1139	48,4785	ZNI	Crête des Vosges	27/07/2011	Sol de pâturage Profondeur 15-30 cm
7,705681	48,434035	ZNI	Nordhouse	05/10/2011	Sol de pâturage Profondeur 0-5 cm
7,705681	48,434035	ZNI	Nordhouse	05/10/2011	Sol de pâturage Profondeur 5-15 cm
7,705681	48,434035	ZNI	Nordhouse	05/10/2011	Sol de pâturage Profondeur 15-30 cm
4,9065	47,6223	Valduc	Salives	04/05/2010	Sol de pâturage Profondeur 0-5 cm
4,9213	47,5482	Valduc	Moloy	04/05/2010	Sol de taillis Profondeur 0-5 cm
4,85552	47,56652	Valduc	Combe du Tilleul	06/10/2011	Sol forestier Profondeur 0-20 m
7,5431	48,4521	ZNI	Meistratzheim	24/08/2010	Chou <i>Brassica tuberosum</i>
7,366	47,8743	Fessenheim	Ensisheim	08/09/2010	
4,8076	50,1026	Chooz	Chooz	28/07/2010	Salade laitue <i>Lactuca sativa</i>
7,4212	48,1132	ZNI	Holtzwihr	05/10/2010	Chou <i>Brassica tuberosum</i>
7,5202	48,4742	ZNI	Obernai	07/09/2011	
4,88862	47,58046	Valduc	La Combe de l'Abbaye	04/05/2011	Épicéa <i>Picea</i>
4,6666	47,5584	Valduc	Poiseul-la-Ville-et-Laperrière	04/05/2010	Lait de vache
7,056	48,6875	ZNI/REM	Schneckenbusch	05/05/2010	
6,7941	47,9821	ZNI	Saulxures-sur-Moselotte	06/05/2010	
4,86168	47,55773	Valduc	Source du ruisseau de Noirvau	03/05/2011	Eau de nappe phréatique
4,85099	47,582	Valduc	Source du ruisseau de Lochère	03/05/2011	
4,84268	47,59136	Valduc	Source du ruisseau de Notre-Dame	04/05/2011	
4,87894	47,58414	Valduc	Source du ruisseau de l'Abbaye de Valduc	04/05/2011	

n.c.: non calculé

n.a.: non analysé

Fraction	Date de mesure	Frais/Sec	Sec/cendre	²³⁸ Pu	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Am	²²⁶ Ra	²³⁸ Pu/ ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Am/ ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu
Ø < 2 mm	03/11/2011	3,5687	1,1456	6,0±1,4	229±11	93±9	n.a.	0,026±0,006	0,400±0,043
	03/11/2011	3,5912	1,7012	3,6±0,9	123±6	53±5	n.a.	0,030±0,007	0,430±0,048
	03/11/2011	2,1559	1,1178	3,1±1,2	113±7	47±5	n.a.	0,028±0,010	0,42±0,05
Ø < 2 mm	02/02/2011	1,4481	1,0766	6,5±1,6	215±11	103±12	n.a.	0,030±0,008	0,48±0,06
	02/02/2011	1,3015	1,0813	39,0±4,6	1 290±60	560±37	n.a.	0,0300±0,0038	0,440±0,034
	02/02/2012	1,9782	1,25	57,0±4,0	2 080±70	720±60	n.a.	0,0273±0,0021	0,346±0,029
	02/02/2012	1,5891	1,1527	10,8±1,6	385±16	166±12	n.a.	0,0280±0,0042	0,430±0,036
	02/02/2012	1,2733	1,0423	1,40±0,48	61,0±3,8	31,0±3,8	n.a.	0,023±0,008	0,50±0,07
	20/03/2012	1,1901	1,0774	2,9±0,9	127±8	58±9	n.a.	0,023±0,007	0,46±0,08
	20/03/2012	1,1626	1,0417	3,6±1,1	146±9	56±8	n.a.	0,025±0,007	0,38±0,06
	20/03/2012	1,1707	1,0319	3,1±1,1	94±7	43±6	n.a.	0,033±0,012	0,45±0,07
	02/02/2011	1,2311	1,1324	14,8±2,3	470±19	168±14	n.a.	0,032±0,005	0,360±0,033
	02/02/2011	1,4271	1,1522	22,0±3,5	830±35	380±35	n.a.	0,0260±0,0043	0,460±0,046
20/03/2012	2,1695	1,1857	12,8±1,9	449±19	175±15	n.a.	0,0290±0,0043	0,390±0,037	
Parties aériennes	09/02/2012	17,0192	10,1111	≤0,04	0,13±0,10	≤0,05	n.a.	n.c.	n.c.
	11/03/2011	12,8226	10,1858	≤0,04	0,08±0,06	0,07±0,07	n.a.	n.c.	0,9±1,1
Parties aériennes	11/03/2011	11,1884	1,5329	0,30±0,08	8,6±0,5	4,00±0,47		0,035±0,009	0,47±0,06
Parties aériennes	11/03/2011	14,3784	11,9654	≤0,03	≤0,04	≤0,03	n.a.	n.c.	n.c.
Entier	11/01/2012	16,2296	10,2866	≤0,05	≤0,07	≤0,05	n.a.	n.c.	n.c.
Feuilles	09/02/2012	1,1575	20,1135	≤0,018	0,59±0,10	0,34±0,07	n.a.	n.c.	0,58±0,15
Entier	05/10/2010	7,9981	16,1016	n.a.	n.a.	n.a.	≤13	n.c.	n.c.
	05/10/2010	7,6386	17,069	n.a.	n.a.	n.a.	≤17	n.c.	n.c.
	05/10/2010	7,9758	15,9144	n.a.	n.a.	n.a.	≤21	n.c.	n.c.
Entier	03/08/2011	-	-	n.a.	n.a.	n.a.	≤9	n.c.	n.c.
	03/08/2011	-	-	n.a.	n.a.	n.a.	≤11	n.c.	n.c.
	03/08/2011	-	-	n.a.	n.a.	n.a.	≤11	n.c.	n.c.
	03/08/2011	-	-	n.a.	n.a.	n.a.	≤8	n.c.	n.c.

Tableau 11. Résultats des mesures de ⁹⁰Sr entreprises pour ce constat.
Bq/kg sec sauf pour le lait (Bq/L) et le fromage (Bq/kg frais).

Longitude degré WGS84	Latitude degré WGS84	Zonage	Station	Date de prélèvement	Nature
4,86168	47,55773	Valduc	Source du ruisseau de Noirvau	03/05/2011	Sédiment
4,85099	47,582	Valduc	Source du ruisseau de Lochère	03/05/2011	
4,8828	47,5726	Valduc	Étang de Valduc	04/05/2011	
7,1139	48,4785	ZNI/REM	Crête des Vosges	27/07/2011	Sols non cultivés Profondeur 0-5 cm
7,1139	48,4785	ZNI/REM	Crête des Vosges	27/07/2011	Sols non cultivés Profondeur 5-15 cm
7,1139	48,434035	ZNI/REM	Crête des Vosges	27/07/2011	Sols non cultivés Profondeur 15-30 cm
7,705681	48,434035	ZNI/REM	Nordhouse	05/10/2011	Sols non cultivés Profondeur 0-5 cm
7,705681	48,434035	ZNI/REM	Nordhouse	05/10/2011	Sols non cultivés Profondeur 5-15 cm
7,705681	47,56652	ZNI/REM	Nordhouse	05/10/2011	Sols non cultivés Profondeur 15-30 cm
4,85552	48,4521	Valduc	Combe du Tilleul	06/10/2011	Sols non cultivés Profondeur 0-20 cm
4,92213	47,5482	Valduc	Moloy	04/05/2010	Sols non cultivés Profondeur 0-5 cm
7,5431	47,8743	ZNI	Meistratzheim	24/08/2010	Légumes
7,366	47,192	Fessenheim	Ensisheim	08/09/2010	
4,8076	50,1026	Chooz	Chooz	28/07/2010	Légumes
5,4026	48,6875	ZNI	Auxonne	28/07/2011	Légumes
7,056	48,4785	ZNI/REM	Schneckenbusch	05/05/2010	Prairies
7,1139	47,5584	ZNI/REM	Crête des Vosges	06/05/2010	Prairies
4,9065	47,6223	Valduc	Salives	04/05/2010	Prairies
4,6666	48,6875	Valduc	Poiseul-la-Ville-et-Laperrière	04/05/2010	Produits alimentaires liquides non transformés
7,056	48,6875	ZNI/REM	Schneckenbusch	05/05/2010	Produits alimentaires liquides non transformés
6,9523	47,9821	ZNI/REM	Hattigny	06/05/2010	Produits alimentaires liquides non transformés
7,056	48,6255	ZNI/REM	Schneckenbusch	05/05/2010	Produits alimentaires transformés
6,7941	47,9821	ZNI	Saulxures-sur-Moselotte	06/05/2010	Produits alimentaires transformés

	Espèce	Fraction	Date de mesure	Frais/Sec	Sec/cendre	⁹⁰ Sr
	Sédiment	Ø < 2 mm	06/10/2011	3,5687	1,1456	≤1,4
06/10/2011			3,5912	1,7012	≤0,24	
06/10/2011			2,1559	1,1178	≤0,4	
	Sol de pâturage ou de prairie	Ø < 2 mm	19/03/2012	1,9782	1,25	2,4±0,8
			19/03/2012	1,5891	1,1527	1,30±0,42
			19/03/2012	1,2733	1,0423	0,50±0,36
			19/04/2012	1,1901	1,0774	1,10±0,37
			19/04/2012	1,1626	1,0417	1,00±0,46
			19/03/2012	1,1707	1,0319	1,1±0,6
	Sol forestier		19/04/2012	2,1695	1,1857	≤1,0
	Sol de taillis		16/12/2010	1,4271	1,1522	5,6±1,3
	Chou <i>Brassica tuberosum</i>	Parties aériennes	03/02/2011	17,0192	10,1111	0,96±0,14
			03/02/2011	12,8226	10,1858	1,50±0,20
	Salade laitue <i>Lactuca sativa</i>	Parties aériennes	11/03/2011	11,1884	1,5329	4,6±0,7
	Salade Laitue Batavia <i>Lactuca Sativa</i>	Parties aériennes	06/02/2012	16,7504	4,4016	1,61±0,30
	Herbe de prairie permanente	Parties aériennes	16/12/2010	4,6562	11,7864	1,69±0,22
	Herbe de prairie permanente	Parties aériennes	16/12/2010	4,3564	34,7689	8,9±0,9
	Herbe de prairie permanente	Parties aériennes	16/12/2010	3,6606	10,1463	0,74±0,14
	Lait de vache	Entier	17/12/2010	7,9981	16,1016	0,0150±0,0040
	Lait de vache	Entier	17/12/2010	7,6386	17,069	0,057±0,010
	Lait de vache	Entier	22/11/2011	8,058	16,8014	0,027±0,006
	Munster	Entier	17/12/2010	1,7608	13,4833	0,280±0,040
	Munster	Entier	17/12/2010	1,8774	14,5967	2,45±0,27

Annexe – Boîte à moustaches

Pour décrire une série de résultats de mesures, 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 minimum et maximum 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 déciles. Ainsi, 90 % des données sont comprises entre le 1^{er} décile et le 9^e décile; ou encore 90 % des résultats sont inférieurs à ce 9^e décile.

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 déciles et notamment une médiane (5^e décile) 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 relatif aux valeurs de référence du bruit de fond radiologique environnemental (seules les valeurs supérieures au seuil de décision sont prises en compte).

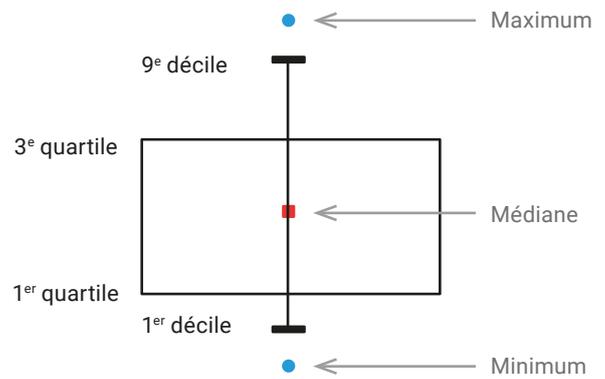


Figure 38. Exemple de graphique en boîte à moustaches.

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 SirSé 2018 « Méthodes statistiques pour le traitement de données censurées - Choix d'indicateur(s) applicable à la surveillance de l'environnement ».



Barrage situé sur la Meuse dans l'agglomération de Charleville-Mézières (Ardennes).

ANNEXE 2

PROCÉDURES DE COLLECTE, PRÉPARATION ET ANALYSES

6 1

TECHNIQUES DE PRÉLÈVEMENT DES ÉCHANTILLONS ET CONDITIONNEMENT

Afin de mettre en évidence une éventuelle influence de l'environnement par l'utilisation de radionucléides (industrie nucléaire, domaine médical...), les analyses doivent atteindre des limites de détection très basses en regard des niveaux d'activités très faibles habituellement observés. Pour cela, des méthodes de prélèvements, traitements et d'analyses spécifiques sont mises en œuvre :

- les volumes de prélèvements sont généralement importants (près de 100 litres pour des eaux, jusqu'à 10 kilogrammes pour les matrices solides);
- les traitements par séchage et calcination visent à concentrer au maximum les échantillons;
- de grosses aliquotes d'échantillons sont utilisées par les métrologues afin de réaliser les préparations chimiques qui précèdent l'analyse (par exemple: ^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am);
- les appareillages utilisés par les métrologues sont spécialisés dans la détection des niveaux à bas bruit de fond;
- les installations de mesure du rayonnement gamma sont spécialement adaptées pour permettre une efficacité élevée dans la détection du signal avec le minimum de perturbation par le rayonnement ambiant naturel.

L'ensemble des procédures utilisées s'appuie sur les normes en vigueur, en particulier les documents :

- NF M60-780-00, NF M60-780-01, NF M60-780-02, NF M60-780-08 de la série « Mesure de la radioactivité dans l'environnement – bioindicateurs »;
- NF V03-009-01 et NF V03-009-02, de la série « Produits alimentaires – Mesure de la radioactivité dans les denrées alimentaires ».

Les principaux modes opératoires sont résumés ci-après.

- Sols _

Les sols de culture sont prélevés avec une tarière racinaire sur une profondeur de 20 cm.

Pour les sols non cultivés, les prélèvements sont effectués à l'aide d'une tarière racinaire de 8 cm de diamètre, graduée tous les 5 cm. Trois horizons sont prélevés :

- 0-5 cm;
- 5-15 cm;
- 15-30 cm.

Entre 8 et 15 prélèvements unitaires, répartis sur une aire représentative du champ sélectionné, sont réalisés pour constituer un échantillon. Chaque échantillon de 2 à 3 kg est placé dans un sachet plastique, préalablement référencé.

- Végétaux _

La quantité de végétal ou de fraction de végétal à prélever est déterminée en fonction du rapport poids frais/poids cendres de l'échantillon et de la quantité nécessaire pour faire la mesure.

Les végétaux terrestres sont récoltés à la main, puis placés dans un sac plastique préalablement référencé et immédiatement obturé.

Les végétaux aquatiques sont prélevés à partir de la berge à la main ou à l'aide de gaffes ou de grappins. Lavés dans le cours d'eau, ils sont ensuite disposés par espèce dans des bacs aérés afin d'éviter tout pourrissement, et traités dès leur arrivée au laboratoire. Les fractions d'échantillon destinées à l'analyse du tritium ou du ^{14}C sont conservées dans des glacières (< 4 °C) jusqu'à leur arrivée au laboratoire où elles sont aussitôt congelées ou lyophilisées.

- Eaux __

90 litres d'eau de boisson sont prélevés, stockés en bidons plastiques référencés, et acidifiés à l'acide nitrique 11 N à raison de 1 mL par litre. Cette acidification est destinée à éviter le développement des microalgues et limiter la fixation de radionucléides sur les parois des récipients. Les échantillons d'eau destinés à la mesure du tritium libre sont filtrés et conditionnés au moment du prélèvement selon un plan d'assurance de la qualité.

- Le lait __

Ce produit est directement recueilli chez le producteur puis stocké en bidons plastiques référencés. De la même façon que les végétaux, les fractions destinées aux analyses tritium ou ^{14}C sont conservées dans des glacières jusqu'à leur arrivée au laboratoire ($< 4\text{ °C}$) où elles sont aussitôt lyophilisées ou congelées.

- Sédiments __

4 litres de sédiments sont prélevés à chaque station au cône de Berthois ou à la pelle en acier inox et déposés dans un récipient plastique à usage unique et fermeture hermétique.

De retour au laboratoire, ces boîtes sont conservées en chambre froide à 4 °C en attente du traitement.

- Poissons __

Les pêches ont été réalisées par un pêcheur professionnel. Pour chaque espèce pêchée, les individus sont groupés en lots de caractéristiques biométriques homogènes. La quantité nécessaire est fonction du nombre d'analyses demandées pour chaque espèce. Ces échantillons sont conditionnés en sacs plastiques, référencés et placés dans des glacières. De retour au laboratoire les échantillons sont traités immédiatement, dans le cas contraire, ils sont alors congelés.

6 2 PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS ET CONDITIONNEMENT POUR LES ANALYSES

La préparation et le conditionnement des échantillons dépendent des analyses à effectuer.

- Sols et sédiments _

Le prélèvement est fractionné en deux parties qui sont pesées fraîches.

Une partie est séchée à 40 °C, après émottage, environ 500 g sont conditionnés, référencés et expédiés pour l'analyse granulométrique, la détermination de la teneur en matière organique et l'évaluation de la capacité d'échange cationique. La seconde partie de l'échantillon est lyophilisée et pesée après dessiccation. À la suite d'un tamisage destiné à éliminer les grains d'un diamètre supérieur à 2 mm, un broyage est effectué jusqu'à l'obtention d'une poudre, qui permet d'obtenir des échantillons homogènes. Sur les échantillons secs, sont effectuées les mesures de tritium lié à la matière organique et de radioactivité γ .

Après pesée, le reste des échantillons séchés de sédiments ou de sols est incinéré dans un four dont la montée en température jusqu'à 480 °C (minéralisation complète) est programmée sur un cycle de 52 heures (Figure ci-dessous).

Les cendres sont pesées et broyées.

Sur les échantillons incinérés, sont effectuées la spectrométrie γ , la mesure du ^{90}Sr et la teneur en calcium.

Le conditionnement est réalisé dans un conteneur cylindrique en matière plastique (des boîtes de géométrie « B » de volume utile = 380 mL, diamètre = 90 mm, hauteur = 60 mm), dont les dimensions sont spécifiques aux comptages en spectrométrie. Pour les autres analyses chimiques ou radioactives, les échantillons sont adressés aux mesureurs dans des sacs en plastique hermétiquement fermés.

- Végétaux _

Les végétaux aquatiques sont soigneusement lavés à l'eau courante, afin d'éliminer le sédiment et les débris qui peuvent leur être associés, puis pesés frais. Les végétaux terrestres et les fruits font uniquement l'objet d'un tri soigneux.

Pour l'analyse du tritium libre, du tritium lié à la matière organique et du ^{14}C les échantillons sont lyophilisés. Le poids de l'échantillon est noté. Les échantillons sont référencés et placés dans des sacs en aluminium scellés sous vide.

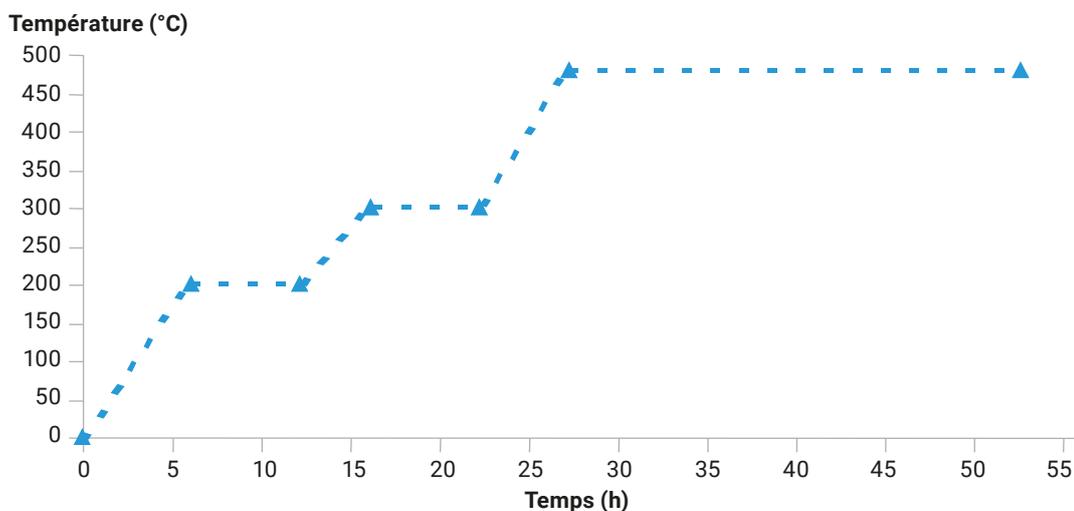


Figure A. 4. 1. Cycle de l'incinération des matrices jusqu'à 480 °C pour une minéralisation complète.

Pour la mesure par spectrométrie γ , tous les échantillons sont séchés puis le résidu sec est mis au four. La montée en température s'effectue selon le cycle présenté sur la Figure A. 4. 1.

À la sortie du four, les cendres sont pesées, broyées puis conditionnées en géométrie « K » (volume utile = 20 mL, diamètre = 50 mm, hauteur = 10 mm) pour la mesure par spectrométrie γ , ou dans des sacs en plastique pour les autres mesures de radioactivité et les analyses chimiques. Le poids du contenu est noté puis le conteneur référencé est expédié au laboratoire d'analyses.

Dans le cas d'une analyse de ^{131}I par spectrométrie γ , l'échantillon est conditionné dès le retour au laboratoire sans montée en température, après nettoyage et homogénéisation. L'aliquote destinée à ce type d'analyse est disposée dans un conteneur de 380 mL. Le rapport poids frais sur poids sec est déterminé sur chaque aliquote de façon à exprimer l'ensemble des résultats dans la même unité (Bq/kg sec).

La mesure de l'iode stable et l'identification des espèces sont réalisées sur les échantillons séchés à l'air libre.

- Eaux _

Pour la spectrométrie gamma, 80 litres d'eau sont prélevés et acidifiés avec de l'acide nitrique RP à raison de 1 mL/L. Chaque échantillon est ramené à un volume de 500 mL par évaporation à 70 °C à l'aide d'évaporateurs automatiques RTN-PR03. L'échantillon concentré est transvasé dans la géométrie B précédemment décrite.

La mesure du tritium libre se fait à partir d'un échantillon de 40 mL d'eau filtrée lors du prélèvement.

- Le lait _

L'ensemble des mesures nécessite un prélèvement de 10 litres minimum. Afin de maintenir les échantillons dans un état de conservation satisfaisant jusqu'au retour au laboratoire, 5 mL/L de formol sont ajoutés dans un premier aliquote destiné aux analyses par spectrométries gamma et alpha et à la mesure du ^{90}Sr et des iodes. Cette aliquote est séchée à 105 °C, pesée et incinérée au four à 480 °C selon le protocole décrit ci-dessus. Après incinération, la pesée des cendres est effectuée. Pour la spectrométrie γ , le conditionnement est réalisé dans la géométrie K précédemment décrite.

Le second aliquote destiné à la mesure du tritium libre, du tritium organique et du ^{14}C , conservé en glacière durant la mission, est congelé ou directement lyophilisé à son arrivée au laboratoire afin de séparer les phases solide (organiques) et liquide (eau) pour les analyses ^3H et ^{14}C . La mesure du tritium libre est réalisée à partir d'un échantillon de 40 mL d'eau du lyophilisat récupéré.

- Poissons _

Le traitement et le conditionnement des muscles de poissons, en vue des mesures de radioactivité et des analyses chimiques, sont identiques à ceux décrits pour les végétaux, exception faite des durées de dessiccation beaucoup plus longues en raison de la teneur en graisse des poissons.

6 3 ANALYSES EFFECTUÉES

Mesure par scintillation (émetteurs de particules alpha ou bêta) _

Le rayonnement ionisant consécutif à la désintégration ou désexcitation d'un atome radioactif est transformé en un rayonnement lumineux (photons $h\nu$) détectable et quantifiable. Les photons de scintillation sont détectés par un ou plusieurs tubes photomultiplicateurs.

Radionucléides émetteurs α (dont transuraniens)

Les transuraniens (^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am) sont présents à l'état de traces par rapport aux éléments des familles de l' ^{238}U et du ^{232}Th . L'émission α subissant le phénomène d'autoabsorption, il convient d'extraire et de concentrer ces radionucléides à quantifier et de les électro déposer sur un support de comptage, sous forme d'une couche la plus mince possible.

Le traitement de l'échantillon comprend cinq opérations :

- une calcination destinée à détruire la matière organique ;
- un ajout de traceur (^{236}Pu ou ^{242}Pu et ^{243}Am), servant à déterminer le rendement chimique de l'ensemble de la manipulation ;
- une mise en solution par attaque acide oxydante (HNO_3) ;
- une série de co-précipitations permettant la séparation des autres constituants interférents ;
- un passage sur résines suivi d'éluions séquentielles permettant de récupérer sélectivement les transuraniens.

L'éluat est électro déposé en couche ultra-fine sur un support destiné à la spectrométrie α . Le détecteur utilisé est un détecteur silicium à barrière de surface. Son bruit de fond, quasiment nul, autorise des durées d'acquisition du spectre de l'ordre de 7 jours. La limite de détection globale de cette technique de mesure, pour une telle durée de comptage, est de l'ordre de 1×10^{-3} Bq/kg dans l'échantillon traité. L'ensemble de ces opérations – radiochimie et spectrométrie – dure en moyenne quatre semaines.

Strontium-90

C'est le fils du ^{90}Sr , le ^{90}Y qui est mesuré pour déterminer la teneur en ^{90}Sr .

Les échantillons de cendres sont minéralisés et mis en solution, soit par HNO_3 concentré à chaud avec ajout d'eau oxygénée pour les poissons, soit par HCl concentré pour les autres échantillons. Le groupe des alcalino-terreux auquel appartient le ^{90}Sr est isolé en effectuant une précipitation par une solution d'oxalate d'ammonium. Après filtration et séchage, une calcination est réalisée à 550°C pendant 4 heures.

Deux précipitations des hydroxydes et de l'oxalate d'yttrium sont alors effectuées. La première permet d'éliminer l'yttrium par une précipitation de $\text{Y}(\text{OH})_3$ avec NH_4OH . La deuxième précipitation, effectuée 15 jours plus tard, permet d'isoler l' ^{90}Y nouvellement formé. Après précipitation de l'oxalate d'yttrium sont effectués la filtration, le séchage et la pesée du filtre.

Pour les poissons, la purification du strontium est réalisée par le chromate de baryum à chaud et centrifugation avec reprise du surnageant par le carbonate de sodium.

La mesure de radioactivité est réalisée sur un compteur β à bas mouvement propre. L'activité en ^{90}Y est déterminée au bout de 15 jours, temps au bout duquel, l' ^{90}Y est à l'équilibre avec son père, le ^{90}Sr .

Les résultats sont exprimés en Bq/L pour l'eau et le lait, en Bq/kg sec pour les sédiments, les sols, les boues de décantation et les végétaux, en Bq/kg frais pour les poissons. La connaissance de la concentration en calcium de l'échantillon permet également d'exprimer l'activité du ^{90}Sr en Bq.g^{-1} de Ca^{2+} , le calcium étant l'analogie chimique du strontium.

Tritium

La mesure du tritium s'effectue sur l'eau par scintillation liquide. Le résultat est exprimé en Bq/L, puis éventuellement transformé en Bq/kg de matière sèche ou fraîche.

Tritium libre

Il est entendu par « tritium libre » le tritium dans l'eau ou pouvant être recouvré sous forme d'eau par déshydratation d'un échantillon solide (eau interstitielle, eau tissulaire).

Les échantillons d'eau, excepté les eaux de lyophilisation, sont distillés à sec. Les échantillons solides frais sont lyophilisés à froid sous vide, permettant de séparer la fraction eau et la fraction sèche. Dans le cas des produits alcoolisés, une distillation partielle est effectuée sur la fraction liquide recueillie pour isoler l'eau de l'alcool.

La limite de détection pour 10 mL d'eau mesurée et pour un temps de comptage de 1 000 minutes est de l'ordre de 1 Bq/L.

Tritium organiquement lié

Il est entendu par « tritium organiquement lié » le tritium lié à la matière organique par des liaisons plus ou moins fortes.

L'échantillon déshydraté subit une combustion en flux d'oxygène et d'argon. Le système de combustion est constitué d'un tube de quartz glissé dans deux fours annulaires. Le premier four mobile est réglable en température de l'ambiant à 1 000 °C. La combustion est considérée totale pour une température de four de 850 °C. Dans le cas de produits alcoolisés, la fraction des alcools est ajoutée au lyophilisat avant la combustion. Les vapeurs d'eau de combustion sont récupérées en sortie de four dans un tube en U plongé dans un piège froid. L'eau de combustion recueillie est neutralisée et distillée à sec. L'activité est mesurée par scintillation liquide. Comme précédemment, la limite de détection pour 10 mL d'eau mesurée et pour un temps de comptage de 1 000 minutes est de l'ordre de 1 Bq/L d'eau de combustion. Cette quantité d'eau correspond à une quantité d'échantillon déshydraté comprise entre 15 et 40 g suivant les matrices.

Le tritium organiquement lié peut être également déterminé en mesurant par spectrométrie de masse, la quantité d'hélium-3 (descendant du tritium) formée au cours d'une période prédéterminée. Cette technique est privilégiée pour les échantillons à faible teneur en matière organique (sols, sédiments). L'échantillon est lyophilisé, puis conditionné dans un conteneur, qui une fois fermé, doit présenter un taux de fuite à l'hélium le plus faible possible (verre spécifique, pot métallique soudé et fermé par des pinces), garantissant une étanchéité totale pendant toute la durée du stockage. Le conteneur est lui-même préalablement dégazé dans une étuve sous gaz inerte afin d'éliminer l'hélium-3 présent dans les parois et susceptible de diffuser à l'intérieur du volume. Une fois l'échantillon introduit dans le conteneur, un dégazage sous vide poussé est réalisé (élimination de l'hélium) avant de sceller le conteneur. L'isolement est maintenu le temps nécessaire à la formation d'une quantité d'hélium-3 suffisante pour obtenir un résultat significatif. Ce délai

varie généralement entre 3 et 6 mois et dépend de la masse d'échantillon introduite, des performances du spectromètre de masse (limite de détection de ${}^3\text{He} = 0,5 \times 10^{-20}$ mole soit 3,4 mBq/L pour 50 grammes d'eau stockés 6 mois), de la quantité de tritium attendue et de l'incertitude souhaitée. À l'issue de la période de stockage, le conteneur est monté sur la ligne d'introduction du spectromètre de masse pour la mesure de l'hélium. L'activité en tritium est déterminée par calcul de décroissance. Les mesures sont effectuées sur un spectromètre VG-3000 de chez Micromass.

Carbone-14

Le résultat est exprimé en Bq/kg de C, puis éventuellement transformé en Bq/kg sec ou Bq/kg de matière organique. Il est entendu par « activité en ${}^{14}\text{C}$ » celle du carbone sous forme organique et *pro parte* du carbone sous forme de carbonate, en raison du mode de préparation des échantillons et des contraintes de transformation.

Le mesurage s'effectue par scintillation sur du benzène pour les échantillons avec un fort taux de matière organique, les végétaux notamment. Le carbone des échantillons est oxydé en gaz carbonique dans une bombe à combustion. Le gaz carbonique est ensuite transformé en carbure de lithium qui, par hydrolyse, donne de l'acétylène. Ce dernier est trimérisé en benzène. La multiplication par le rapport 78/72 de l'activité mesurée en benzène permet d'exprimer l'activité en Bq/kg de carbone. La prise d'essai est équivalente à une teneur en carbone comprise entre 0,5 et 4 g. L'échantillon doit avoir une teneur en carbone organique d'au moins 10 % pour être oxydé dans une bombe à combustion.

La mesure par accélérateur est privilégiée sur les échantillons présentant un faible taux de matière organique, les sols et les sédiments notamment. Les sédiments, sols à traiter sont totalement décarbonatés durant plusieurs jours dans de l'acide dilué HCl 0.5 N, puis rincés à l'eau ultrapure jusqu'à pH neutre. Après décarbonatation, les teneurs en carbone organique total (COT) sont mesurées par chromatographie gazeuse afin de déterminer les quantités à prélever pour obtenir, après combustion, des volumes de CO_2 contenant environ 1 mg de carbone. Les échantillons sont brûlés en présence d'environ 500 mg d'oxyde de cuivre (CuO) et d'un fil d'argent pendant 4 heures à 900 °C. La quantité de carbone contenu dans le gaz est mesurée à la pression du gaz dans un volume calibré. Le CO_2 obtenu est ensuite réduit par H_2 en présence de poudre de fer à 575 °C. La quantité de fer utilisée est égale à trois fois la masse de carbone. Le carbone se dépose sur la poudre de fer et le mélange est pressé dans une cible afin d'être mesuré. L'activité en ${}^{14}\text{C}$ de l'échantillon est calculée en comparant les intensités mesurées séquentiellement des faisceaux de ${}^{14}\text{C}$, ${}^{13}\text{C}$ et ${}^{12}\text{C}$ de chaque échantillon avec ceux de standards de CO_2 préparés à partir de l'acide oxalique de référence HOxI.

Nickel-63

Les échantillons de cendres sont minéralisés par attaque oxydante. Une première purification par chromatographie spécifique au nickel est réalisée, suivie d'une deuxième purification par précipitation et filtration. Le précipité est calciné à 500 °C, puis le résidu est repris en milieu chlorhydrique faiblement concentré pour le comptage par scintillation liquide. Le rendement radiochimique est déterminé par la mesure du nickel stable.

Le comptage est fait par scintillation liquide en 1 000 min. Les résultats sont exprimés en Bq/kg sec.

Fer -55

Les échantillons solides secs sont calcinés à 460 °C. Une mesure par ICP-AES de la concentration en fer de l'échantillon est ensuite réalisée. Si besoin, une quantité connue de fer est ajoutée. L'échantillon est ensuite minéralisé avant qu'une séparation du ^{55}Fe soit menée avec une résine chromatographique sélective. Enfin, par scintillation liquide une mesure du ^{55}Fe est conduite sur une aliquote de la solution issue de la préparation chimique. Pour obtenir le rendement de la préparation, une nouvelle analyse par ICP-AES de la concentration en fer est menée sur une seconde aliquote de la même solution.

Radionucléides détectés par spectrométrie γ Ge

Concernant les radionucléides naturels et plus particulièrement la famille de l' ^{238}U , la qualité analysée de l'échantillon influe sur les radionucléides détectés. Ainsi, sur un échantillon mesuré sec, le ^{234}Th est décelable alors que sur des cendres il sera remplacé par le ^{234}Pa . Toutefois, afin de faciliter la compréhension des résultats, cette distinction ne sera pas faite et l'ensemble des résultats obtenus sera présenté sous l'étiquette ^{234}Th .

Dans le cas des deux familles du ^{232}Th et de l' ^{238}U le mesurage est le plus souvent réalisé à l'aide de raies d'émission de plusieurs éléments fils de chacune de ces deux chaînes naturelles :

- pour la famille du ^{232}Th : ^{228}Ac , ^{212}Pb - ^{212}Bi - ^{208}Tl ;
- pour la famille de l' ^{238}U : ^{234}Pa , ^{234}Th , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{210}Pb .

En fonction de l'énergie d'émission, de l'activité dans l'échantillon et de l'éventuel déséquilibre au sein de la chaîne, la mesure ne s'effectue pas toujours sur les raies d'énergie du même élément fils.

Principe

La détection des rayonnements γ repose sur leur capacité à ioniser la matière qu'ils traversent. Ce sont ces phénomènes d'ionisation au sein d'un cristal de germanium (détecteur à jonction) qui sont transformés en impulsions électriques. Ces impulsions électriques sont à leur tour amplifiées et comptées après codage en fonction de leurs tailles. C'est la distribution en énergie des photons détectés qui est ainsi établie.

La qualité du rapport signal/bruit de fond des installations de mesure est basée sur une efficacité élevée dans la détection du signal et une réduction du mouvement propre au niveau le plus faible possible.

La protection contre les sources de rayonnements parasites

Le mouvement propre d'une installation de spectrométrie γ est principalement dû au rayonnement cosmique, à l'utilisation de matériaux contaminés et au rayonnement ambiant du laboratoire.

Afin de protéger les détecteurs du rayonnement cosmique secondaire, la salle de mesure blindée est en sous-sol, à 6 m de profondeur. Pour augmenter la protection contre ce type de rayonnement, sous-sol et rez-de-chaussée sont séparés par une dalle de béton de 3 m d'épaisseur. Le blindage de la salle est constitué d'un mur de 10 cm de plomb (115 tonnes de plomb) de faible radioactivité. Cependant, les rayonnements cosmiques induisent une fluorescence X du plomb qui fait apparaître des raies parasites jusqu'à 90 keV. Le mur de la salle blindée a donc été doublé d'une couche interne de 10 mm de cuivre électrolytique qui neutralise cette fluorescence X.

De plus, les matériaux utilisés dans la chambre blindée, en particulier les aciers entrant dans les supports des détecteurs, ont été sélectionnés pour leurs faibles niveaux radioactifs. Ces précautions réduisent les sources de radioactivité liées à l'introduction du matériel de mesure.

De même, des précautions sont prises pour limiter les effets des sources potentielles de radioactivité naturelle, tels les radionucléides appartenant aux familles radioactives de l'uranium et du thorium comme le ^{40}K , ou artificielles comme les radionucléides issus des essais nucléaires aériens ou d'accidents nucléaires.

Grâce à l'ensemble de ces précautions, le mouvement propre de l'installation est de l'ordre de 0,7 coup par seconde dans la bande d'énergie de 20 keV à 3 MeV.

L'équipement de spectrométrie γ

La recherche et la quantification des principaux radionucléides émetteurs γ ont été réalisées par spectrométrie directe. Les échantillons sont en effet introduits dans des boîtes de comptage de géométries définies, pour lesquelles le rendement de comptage est déjà connu.

Les détecteurs sont de type Gamma-X Ge System, d'efficacité comprise entre 10 et 23 % et d'une résolution de 850 eV à 100 keV. Les spectrométries ont été réalisées dans la bande d'énergie allant de 20 keV à 3 MeV. La méthode de mesure (acquisition et traitement des spectres) est celle développée par la société Silena et utilisée dans les logiciels Emca Plus et Silgamma.

Iode-129

La quantification de l'iode-129 peut être obtenue par spectrométrie gamma directe pour les matrices environnementales à partir d'activité de l'ordre de 1 Bq/kg sec (dépendant des quantités de matière analysée). Cette méthode a été développée à l'IRSN [52, 53] car les autres techniques sont destructives (activation neutronique ou SMA) et peu faciles d'accès. La détection de l'émission gamma et X à basse énergie est actuellement standard avec les générations de détecteurs disponibles depuis les années 1995. La détection des émissions caractéristiques de l'iode-129 en dessous de 40 keV est fortement influencée par la composition de la matrice et en particulier par les éléments les plus lourds, même en très faibles teneurs. L'IRSN a validé une méthode de correction expérimentale (en déterminant le coefficient d'atténuation massique aux énergies du radionucléide) permettant de quantifier l'iode-129 dans tous types de matrices.

En pratique, la quantification de cet isotope de l'iode est réalisée par une spectrométrie gamma standard (80 000 s de comptage sur géométrie de comptage 380 mL) en même temps que les autres radionucléides émetteurs gamma de l'échantillon. La correction d'atténuation est faite à partir d'une mesure de transmission gamma (généralement 80 000 s de comptage sur géométrie de comptage 60 mL) [52, 53].

Iode-131

Pour quantifier les activités en ^{131}I dans les matrices de l'environnement, les échantillons sont lyophilisés et mesurés au plus vite après le prélèvement, en général en une semaine soit une période radioactive.

Identification des espèces vivantes

Une fraction des échantillons de mousses prélevées est mise à sécher à l'air libre. Leur identification est réalisée grâce à la collaboration de divers partenaires.

Les phanérogames terrestres, aquatiques et semi-aquatiques ont été identifiées par nos soins avec les flores suivantes: Fournier, 1976; Montségut, 1987; Bonnier, 1987; Boullard, 1988. Pour cela, après chaque prélèvement, une plante avec fleur et fruit, est disposée dans une presse à hercier.

La détermination des espèces de poissons est effectuée après capture, lors des mesures de biométrie, par les équipes responsables des pêches.

Matières organiques, teneur en aluminium, granulométrie et capacité d'échange cationique des sédiments et des sols

La **matière organique** des sédiments et des sols a été dosée par calcination (norme NF U-44-160 de novembre 1985). Les échantillons, préalablement séchés à 105 ± 2 °C jusqu'à poids constant, sont calcinés dans un four à moufle porté progressivement jusqu'à une température de 480 °C. La perte de masse permet de connaître directement le pourcentage de matière organique.

La technique d'**analyse granulométrique** (norme expérimentale X-31-107 de juillet 1983) consiste tout d'abord en une attaque de la matière organique par l'eau oxygénée à 20 volumes, qui permet d'éliminer ce liant des particules. Une agitation mécanique dans l'hexamétophosphate de sodium va disperser les particules dans un flacon à sédimentation.

La séparation des argiles, limons fins et grossiers est réalisée au moyen de prélèvements de 20 mL de cette suspension, en se basant sur la loi de Stokes qui régit la sédimentation des particules dans un liquide à température constante. Des abaques permettent en effet de connaître la profondeur de sédimentation de chacune de ces fractions en un temps donné. Les aliquotes prélevées sont déposées dans des capsules et desséchées à 103 ± 2 °C jusqu'à poids constant.

Le fractionnement des sables se fait par la superposition de tamis de 200 μm et de 50 μm . Le sédiment est tamisé sous un jet d'eau pour éliminer les particules de diamètre inférieur à 50 μm .

- Concentration en calcium _

Le calcium est mesuré en spectrométrie d'absorption de flamme air-acétylène avec une longueur d'onde de 422,7 nm après minéralisation à reflux par de l'eau régale pour les échantillons biologiques.

- Iode stable _

Les échantillons sont minéralisés par combustion en fiole de Schöniger. L'iode est réduit sous forme d'iodure par une solution d'hydrate d'hydrazine. Les solutions obtenues après minéralisation sont analysées par chromatographie ionique avec détection électrochimique. La limite de détection est de 0,25 µg/L d'I.

- Carbone total _

L'échantillon subit au préalable une combustion totale sous courant d'oxygène à une température comprise entre 1 030 °C et 1 070 °C. Le dioxyde de carbone obtenu est titré par colorimétrie acidimétrique (limite de détection de 3 000 ppm pour le carbone), par infrarouge (limite de détection de 20 % pour le carbone).

6 4

EXPRESSION DES RÉSULTATS DE MESURES

Les résultats sont accompagnés de l'incertitude statistique, calculée pour un intervalle de confiance de 95 %, et sont présentés dans les tableaux par : « valeur ± incertitude » ($\pm 2 \sigma$).

Lorsque, dans un échantillon, l'activité d'un radionucléide n'est pas détectable par la méthode de mesure, la limite de détection (LD) est présentée dans les tableaux par : « < LD ».



Four pour la combustion d'échantillons solides prélevés dans l'environnement afin d'analyser le tritium organiquement lié (TOL).
À gauche: le piège froid pour récupérer l'eau en sortie de four.

7 RÉFÉRENCES

- [1] IRSN, *Bilan de l'état radiologique de l'environnement français de juin 2011 à décembre 2014*. 2015, IRSN. 253 p.
- [2] IRSN, *Constat radiologique « Rémanence de la radioactivité d'origine artificielle »*. R.d. mission, Editor 2016, IRSN. 129 p.
- [3] Renaud, P., Champion, D., et Brenot, J., *Les retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl sur le territoire français: Conséquences environnementales et exposition des personnes*. Sciences et techniques 2008. p. 190.
- [4] Roussel-Debet, S., Renaud, P., et Métivier, J.M., *Cs-137 in French soil: deposition patterns and 15-year evolution*. Science of the Total Environment, 2007. **374**: 388-398 p.
- [5] IRSN, *Caractérisation radiologique de l'environnement de surface de la zone de l'Observatoire Pérenne de l'Environnement du Centre de Meuse/Haute-Marne - Volet n° 5: matrices biologiques et terrestres*. 2013, IRSN. Rapport PRP-ENV/SESURE/2013-20, 59 p.
- [6] IRSN, *Données existantes permettant une première caractérisation radiologique de l'environnement de surface de la zone l'Observatoire Pérenne de l'Environnement du centre Meuse/Haute-Marne*. 2011, IRSN. Rapport DEI/SESURE n° 2011-27, 96 p.
- [7] IRSN, *Caractérisation radiologique de l'environnement de surface de la zone de l'Observatoire Pérenne de l'Environnement du Centre de Meuse/Haute-Marne - Volet n° 4: milieu aquatique*. 2013, IRSN. Rapport PRP-ENV/SESURE/2013-21, 64 p.
- [8] IRSN, *Caractérisation radiologique de l'environnement de surface de la zone de l'Observatoire Pérenne de l'Environnement du Centre de Meuse/Haute-Marne - Volet n° 3: étude de l'eau de pluie et des aérosols dans la zone OPE*. 2013, IRSN. Rapport PRP-ENV/SESURE/2013-24, 26 p.
- [9] IRSN, *Caractérisation radiologique de l'environnement de surface de la zone de l'Observatoire Pérenne de l'Environnement du Centre de Meuse/Haute-Marne - Volet n° 2: étude des sols*. 2013, IRSN. Rapport PRP-ENV/SESURE/2013-17, 48 p.
- [10] IRSN, *Bilan de l'état radiologique de l'environnement français de 2015 à 2017*. 2018, IRSN. 353 p.
- [11] IRSN, *État de la surveillance environnementale et bilan du marquage des nappes phréatiques et des cours d'eau autour des sites nucléaires et des entreposages anciens de déchets radioactifs*. 2008, IRSN. Rapport Rapport pour le HTCISN – 15 septembre 2008 – Mise à jour du 13 novembre 2008, 204 p.
- [12] Andra. *Inventaire national des déchets radioactifs*. Portail www.andra.fr. 2009. Accessible à l'adresse: <http://www.andra.fr/pages/fr/menu1/les-dechets-radioactifs/ont-ont-les-dechets-radioactifs---10.html>.
- [13] OFSP, *Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse*. 2012: 190 p.
- [14] OFSP, *Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnements en Suisse - 2008*. 2009: 178 p.
- [15] IRSN, *Constat radiologique régional - Objectifs et méthode - Application au quart Nord-Est de la France*. 2011, IRSN. Rapport DEI/SESURE/2011-11, 69 p.
- [16] Agreste. *Comptes de l'agriculture*. 2007. Accessible à l'adresse: <http://agreste.maapar.lbn.fr/ReportFolders/ReportFolders.aspx>.
- [17] Confédération générale des planteurs de betteraves. *Portail d'information*. 2009 [cited 2009; Accessible à l'adresse: <http://www.labetterave.com/>].
- [18] Agreste. *Recensement général de l'agriculture (CD)*. 2000.
- [19] ASN. *Livre blanc du tritium*. 2010; Accessible à l'adresse: <http://livre-blanc-tritium.asn.fr/>.
- [20] Boyer, C., Vichot, L., Fromm, M., Losset, Y., Tatin-Froux, F., Guétat, P., et Badot, P.M., *Tritium in plants: A review of current knowledge*. Environmental and Experimental Botany, 2009. **67**: 34-51 p.
- [21] IRSN, *Bilan des mesures OPERA terrestre 2007-2008*. 2009, IRSN. Rapport DEI/SESURE/2009-19, 30 p.
- [22] Roussel-Debet, S., *Bruit de fond du tritium en milieu terrestre*. Radioprotection, 2014. **49**(2): 139-142 p.
- [23] IRSN, *Actualisation des connaissances acquises sur le tritium dans l'environnement*. 2017, IRSN. Rapport PRP-ENV/SERIS/2017-00004, 76 p.
- [24] IRSN, *Comportement du carbone-14 en milieu continental et niveaux d'activité hors de l'influence d'une installation nucléaire*. 2012, IRSN. Rapport PRP-ENV/SESURE/2012-25, 27 p.
- [25] Besson, B., *Sensibilité radioécologique des zones de prairies permanentes*, 2009, Thèse de Franche-Comté. 317 p.
- [26] Besson, B., Pourcelot, L., Lucot, E., et Badot, P.M., *Variations in the Transfer of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr from Milk to Cheese*. Journal of Dairy Science, 2009. **92**(11): 5363-5370 p.
- [27] IRSN, *Bilan radiologique de l'environnement français en 2012*. 2014, IRSN. 136 p.
- [28] IRSN, *Analyse de l'impact de l'accident de Fukushima en France (métropole et DROM-COM) à partir des résultats de la surveillance renforcée de la radioactivité de l'environnement*. 2011, IRSN. Rapport DEI/2011-01, 90 p.
- [29] Jeambrun, M., *L'uranium et ses descendants dans la chaîne alimentaire*, 2012, Thèse de Strasbourg. 202 p.
- [30] IRSN. *Uranium naturel et environnement*. 2012; Accessible à l'adresse: <http://www.irsn.fr/FR/Larecherche/publications-documentation/fiches-radionucleides/environnement/Pages/Uranium-naturel-environnement.aspx#ur3>.
- [31] Masson, O., Piga, D., Gurriaran, R., et D'Amico, D., *Impact of an exceptional Saharan dust outbreak in France: PM10 and artificial radionuclides concentrations in air and in dust deposit*. Atmospheric Environment, 2010. **44**(20): 2478-2486 p.
- [32] UNSCEAR, *Radiation risk assessment: The 1982 UNSCEAR Report*. International Atomic Energy Agency bulletin, 1982. **24**(4): 33-39 p.
- [33] Eyrolle-Boyer, F., Claval, D., Calmon, P., et Cossonnet, C., *Tritium and ¹⁴C background levels in aquatic systems - Potential sources of variability*. Journal of Environmental Radioactivity, 2015. **139**: 24-32 p.

- [34] IRSN, *Bilan radiologique de l'environnement français en 2010-2011*. 2012, IRSN. 308 p.
- [35] IRSN, *Bilan radiologique de l'environnement français en 2009*. 2010, IRSN. 136 p.
- [36] IRSN, *Bilan radiologique de l'environnement français en 2008*. 2009, IRSN. 163 p.
- [37] Gontier, G. et Siclet, F., *Le tritium organique dans les écosystèmes d'eau douce: évolution à long terme dans l'environnement des centres nucléaires de production d'électricité français*. Radioprotection, 2011. **46**(4): 34 p.
- [38] Roussel-Debet, S., Gontier, G., Siclet, F., et Fournier, M., *Distribution of Carbon 14 in the terrestrial environment close to French nuclear power plants*. Journal of Environmental Radioactivity, 2006. **87**(3): 246-259 p.
- [39] Adam, G. et Elie, P., *Mise en évidence des déplacements d'anguilles sédentaires (anguilla anguilla L.) en relation avec le cycle lunaire dans le lac du Grand-Lieu (Loire-Atlantique)*. Bulletin français de la pêche et de la pisciculture, 1994. **335**: 123-132 p.
- [40] IPSN, *Dispersion des rejets atmosphériques tritiés de Valduc: approche utilisant le marquage des feuilles de chênes dans l'environnement du site*. 2003, IPSN. Rapport DPRE/SERNAT/2003-12, 31 p.
- [41] *Bilan de l'état radiologique de l'environnement français en 2009*. 2010, 175 p.
- [42] BRGM. *Référentiel hydrogéologique français (BDRHFV1)*. 2009. Accessible à l'adresse: <http://sandre.eaufrance.fr/geonetwork/srv/fr/metadata.show?id=631&currTab=simple>.
- [43] Guetat, C., Boyer, A., Tognelli, et Duda, J.M., *50 years environmental tritium transfer review in the vicinity of a French research center*. Fusion Science and Technology, 2011. **60**(4): 1238-1243 p.
- [44] Eyrolle, F., Lepage, H., Copard, Y., Ducros, L., Claval, D., Saey, L., Cossonnet, C., Giner, F., et Mourier, D., *A brief history of origins and contents of Organically Bound Tritium (OBT) and ¹⁴C in the sediments of the Rhône watershed*. Science of the Total Environment, 2018. **643**: 40-51 p.
- [45] Eyrolle-Boyer, F., Boyer, P., Claval, D., Charmasson, S., et Cossonnet, C., *Apparent enrichment of organically bound tritium in rivers explained by the heritage of our past*. Journal of Environmental Radioactivity, 2014. **136**: 162-168 p.
- [46] IRSN, *Bilan de l'état radiologique de l'environnement français de juin 2011 à décembre 2014*. 2015, IRSN. 252 p.
- [47] European Geological Surveys. *Atlas géochimique européen (FOREGS)*. Accessible à l'adresse: <http://www.gtk.fi/publ/foregsatlas/>
- [48] IRSN, *Étude des termes sources et du transfert de la radioactivité d'origine médicale dans le réseau d'assainissement de la ville de Toulouse*. 2004, IRSN. Rapport DEI/SESURE/2004-25, 77 p.
- [49] IRSN, *Étude de l'état radiologique des eaux usées de la ville de Tours*. 2005, IRSN. Rapport DEI/SESURE/2005-06, 44 p.
- [50] LNE-LNHB. *Table de radionucléides*. 2013; Accessible à l'adresse: http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm.
- [51] IRSN, *Radionucléides naturels en France*. 2007, IRSN. Rapport DEI/SESURE n°2007-21, 45 p.
- [52] Bouisset, P., Lefevre, O., Cagnat, X., Kerlau, G., Ugron, A., et Calmet, D., *Direct gamma-X spectrometry measurement of ¹²⁹I in environmental samples using experimental self-absorption corrections*. Nuclear Instrumental 1999: 114-127 p.
- [53] Lefevre, O., Bouisset, P., Germain, P., Barker, E., Kerlau, G., et Cagnat, X., *Self-absorption correction factor applied to ¹²⁹I measurement by direct gamma-X spectrometry for fucus serratus samples*. Nucl. Inst. & Meth. in phys. Res., 2003. **A506**: 173-185 p.

Table des illustrations et des tableaux

■ Illustrations

Figure 1. Localisation des zones d'intérêt situées sur l'emprise géographique du constat Nord-Est. Dans la suite du document, les résultats reportés sur les cartes sont issus des données de la littérature et de celles acquises spécifiquement à l'occasion de ce constat, qu'elles se trouvent à proximité des zones d'intérêt (chapitre 3) ou à distance (y compris dans les zones plus marquées par les retombées anciennes).....	6	Figure 11. ¹³⁷ Cs dans les grains de céréales (blé, maïs et orge) entre 2004 et 2013.....	17
Figure 2. Utilisation du tritium par l'industrie horlogère. Source: [14].....	9	Figure 12. ¹³⁷ Cs dans les cultures oléagineuses (colza et soja) entre 2004 et 2013.....	18
Figure 3. Localisation des ateliers d'horlogerie dans le massif du Jura.....	9	Figure 13. ¹³⁷ Cs dans le vin et le raisin entre 2004 et 2013.	18
Figure 4. Catégories de productions agricoles dominantes sur le territoire étudié. Source: [16]. Pourcentage de la valeur de la production du quart nord-est de la France dans la production de la France métropolitaine en 2009 (en euros au prix de 2008). Les couleurs représentent les contributions de chacun des départements. Le trait rouge souligne la limite de 10 % retenue pour cette étude.	10	Figure 14. Comparaison des activités en ¹³⁷ Cs (Bq/kg frais) acquises dans les légumes feuilles collectés dans le cadre du constat Nord-Est (gauche) avec celles acquises par l'IRSN sur la période 2009-2017 dans le reste de la France (droite).	19
Figure 5. Localisation générale des échantillons prélevés pour ce constat.	13	Figure 15. ¹³⁷ Cs dans la viande de bœuf entre 2004 et 2013.	19
Figure 6. Tritium (HTO et TOL) dans les denrées terrestres (lait, blé, viande de bœuf, etc.) entre 2004 et 2013.	14	Figure 16. ¹³⁷ Cs dans les volailles entre 2004 et 2013.	20
Figure 7. Comparaison des activités en tritium organiquement lié (Bq/L) acquises dans les échantillons de denrées agricoles collectés dans le Nord-Est (gauche) avec celles acquises par l'IRSN sur la période 2009-2017 dans le reste de la France (droite).	15	Figure 17. Comparaison des activités en ¹³⁷ Cs (Bq/kg frais) acquises dans les échantillons de viande de volailles et de bœuf collectés dans le cadre du constat Nord-Est (gauche) avec celles acquises par l'IRSN sur la période 2009-2017 dans le reste de la France (droite).....	20
Figure 8. Comparaison des activités en carbone-14 (Bq/kg frais) dans les échantillons de denrées agricoles acquis dans le cadre du constat Nord-Est (gauche) avec ceux acquis par l'IRSN sur la période 2009-2017 en France (droite).	15	Figure 18. ¹³⁷ Cs dans le lait de vache entre 2004 et 2013.	21
Figure 9. Comparaison des niveaux de césium-137 mesurés sur les sols non cultivés du Nord-Est de la France entre les zones les plus touchées par les retombées anciennes et hors de ces zones.....	16	Figure 19. Comparaison des activités en ¹³⁷ Cs (Bq/L) acquises dans les échantillons de lait collectés dans le cadre du constat Nord-Est (gauche) avec celles acquises par l'IRSN sur la période 2009-2017 dans le reste de la France (droite).	21
Figure 10. ¹³⁷ Cs dans les sols non cultivés de surface entre 2004 et 2013.	17	Figure 20. ⁹⁰ Sr dans le lait entre 2004 et 2013.....	23
		Figure 21. ⁹⁰ Sr dans le fromage entre 2004 et 2013.	23
		Figure 22. Comparaison des activités en ⁹⁰ Sr acquises dans les échantillons de légumes feuilles (Bq/kg) et de lait (Bq/L) collectés dans le cadre du constat Nord-Est avec celles acquises par l'IRSN sur la période 2009-2017 en France.....	24
		Figure 23. Tritium (HTO et TOL) dans les muscles de poissons entre 2004 et 2013.....	26
		Figure 24. ¹⁴ C dans les indicateurs terrestres à proximité des CNPE du Nord-Est de la France.	29

Figure 25. ^{14}C dans les poissons entre 2004 et 2013. 30

Figure 26. ^{137}Cs dans les grains de céréales (blé, maïs et orge) entre 2004 et 2013..... 31

Figure 27. ^{137}Cs mesurés dans les poissons en amont et en aval du CNPE de Chooz entre 2004 et 2013. 32

Figure 28. ^{90}Sr dans les sols non cultivés de surface entre 2004 et 2013 34

Figure 29. ^{90}Sr dans l’herbe de prairie entre 2004 et 2013 35

Figure 30. ^{90}Sr dans les légumes entre 2004 et 2013 35

Figure 31. Tritium organiquement lié dans les feuilles d’arbres entre 2004 et 2013..... 36

Figure 32. Tritium dans les feuilles d’arbre à proximité de Valduc entre 2004 et 2011..... 37

Figure 33. Tritium dans des matrices aquatiques à proximité de Valduc en 2010 et 2011..... 39

Figure 34. ^{14}C dans les milieux terrestres à proximité du site de Valduc en 2010..... 40

Figure 35. Rapports de masses $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ des échantillons prélevés en 2011 à proximité de Valduc.....41

Figure 36. ^{131}I dans les végétaux aquatiques entre 2004 et 2013. 42

Figure 37. Activité en tritium organiquement lié dans les sédiments et végétaux annuels de la rivière Doubs..... 43

Figure 38. Exemple de graphique en boîte à moustaches. 80

Figure A. 4. 1. Cycle de l’incinération des matrices jusqu’à 480 °C pour une minéralisation complète 84

Tableaux

Tableau 1. Plan de prélèvement et d’analyses : zones non influencées..... 46

Tableau 2. Plan de prélèvement et d’analyses : zones d’intérêt. 48

Tableau 3. Résultats des mesures de tritium libre et organiquement lié entreprises pour ce constat. 50

Tableau 4. Résultats des mesures de ^{14}C entreprises pour ce constat..... 54

Tableau 5. Résultats des mesures des radionucléides naturels émetteurs gamma dans le milieu aquatique entreprises pour ce constat. 56

Tableau 6. Résultats des mesures des radionucléides artificiels émetteurs gamma dans le milieu aquatique entreprises pour ce constat. 58

Tableau 7. Résultats des mesures des radionucléides naturels émetteurs gamma dans le milieu terrestre entreprises pour ce constat. 60

Tableau 8. Résultats des mesures des radionucléides artificiels émetteurs gamma dans le milieu terrestre entreprises pour ce constat. 66

Tableau 9. Résultats des mesures des uraniums (^{234}U , ^{235}U , ^{236}U et ^{238}U) entreprises pour ce constat. Bq/kg sec sauf pour les légumes et les poissons (Bq/kg frais), le lait et l’eau (Bq/L) et sauf mention contraire dans les en-têtes de tableau 72

Tableau 10. Résultats des mesures des transuraniens (^{238}Pu , ^{241}Am , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{226}Ra) entreprises pour ce constat. mBq/kg sec sauf pour le lait et l’eau (mBq/L) et les légumes (mBq/kg frais).....76

Tableau 11. Résultats des mesures de ^{90}Sr entreprises pour ce constat. Bq/kg sec sauf pour le lait (Bq/L) et le fromage (Bq/kg frais) 78

IRSN
Pôle Santé et Environnement
PSE-ENV

Service d'expertise et d'étude en radioprotection des populations
et de la radioactivité dans l'environnement
IRSN/PSE-ENV/SEREN
BP 17
92262 Fontenay-aux-Roses

E-mail
contact@irsn.fr

N° du rapport
IRSN/2020-00449
Tous droits réservés IRSN
Juillet 2020

Conception graphique :
Agence Kazoar
www.kazoar.fr

Photo de couverture :
Vallée de Thann (Haut-Rhin). © David Claval/Médiathèque IRSN

Autres photos :
David Claval/Médiathèque IRSN, Francesco Acerbis/Médiathèque IRSN



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

 [@IRSN France](#), [@radioprotection](#)