



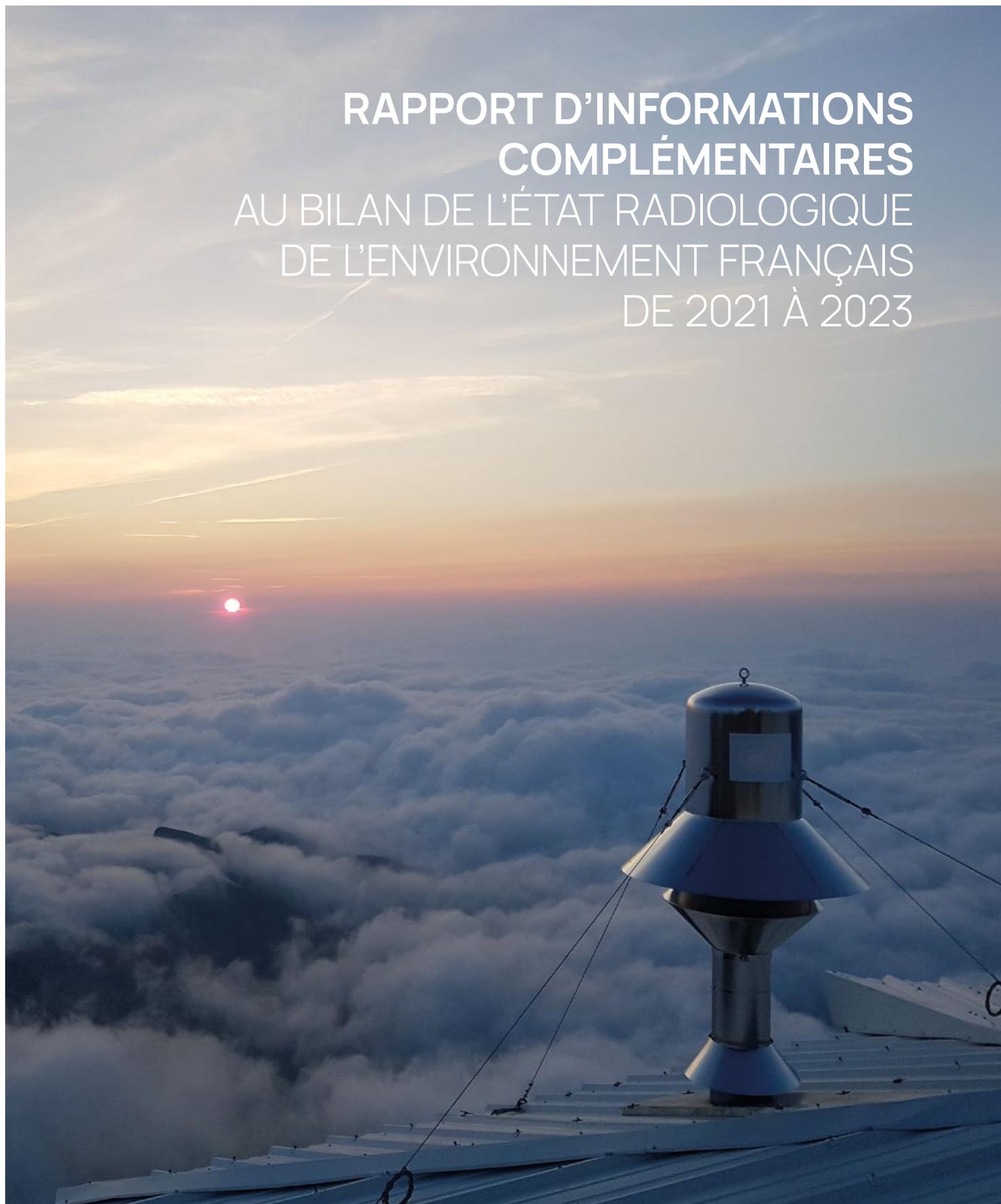
RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

IRSN

INSTITUT DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

RAPPORT D'INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES AU BILAN DE L'ÉTAT RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT FRANÇAIS DE 2021 À 2023



MEMBRE DE

ETSON



réseau national

Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement

SOMMAIRE

01. COMPRENDRE LA RADIOACTIVITÉ ET LES EXPOSITIONS DES PERSONNES QU'ELLE PEUT ENGENDRER	4
1.1. LES RADIONUCLÉIDES	4
1.2. LES RAYONNEMENTS	5
1.3. L'ACTIVITÉ : LES BECQUERELS (Bq)	5
1.4. LA PÉRIODE RADIOACTIVE	6
1.5. LES MODES D'EXPOSITION À LA RADIOACTIVITÉ ENVIRONNEMENTALE	7
1.6. LA DOSE : LE SIEVERT (Sv)	8
1.7. LA RADIOPROTECTION	11
02. LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT	14
2.1. OBJECTIFS DE LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT	14
La surveillance radiologique de l'environnement répond à différents objectifs	15
2.2. LES DISPOSITIFS DE LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT	16
La surveillance du compartiment atmosphérique	16
La surveillance du compartiment aquatique	21
La surveillance du compartiment terrestre	25
Synthèse des méthodes de prélèvement et de mesure associées à la surveillance radiologique des différents compartiments de l'environnement	27
2.3. DU PLAN DE PRÉLÈVEMENT AUX RÉSULTATS DE MESURE	29
Plans de prélèvement et d'analyse	29
Préparation des échantillons	29
Méthodes d'analyses radiologiques	31
2.4. LE RÉSEAU NATIONAL DE MESURES DE LA RADIOACTIVITÉ DE L'ENVIRONNEMENT (RNM)	44
Le site internet de référence des mesures de la radioactivité de l'environnement en France	44
Le fonctionnement du RNM	45
L'agrément des laboratoires	47
2.5. LES SOURCES D'INFORMATION SUR LA SURVEILLANCE DE LA RADIOACTIVITÉ ET LA DIFFUSION DES DONNÉES	50
Sites internet et supports d'information du public	50
Diffusion d'information dans le cadre de traités ou conventions internationales	53
03. LE « BRUIT DE FOND » RADIOLOGIQUE FRANÇAIS	56
3.1. LE BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE NATUREL	56
Le rayonnement cosmique et les radionucléides cosmogéniques dans l'environnement	56
Les radionucléides telluriques dans l'environnement	58
3.2. LE BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE RÉMANENT DES RETOMBÉES ANCIENNES	65
Retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires	65
Retombées de l'accident de Tchernobyl	73
Retombées de l'accident de Fukushima	75
3.3. GAMMES D'ACTIVITÉS MASSIQUES ET VOLUMIQUES DU BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE FRANÇAIS	76
3.4. GAMME DES DOSES À LA POPULATION, LIÉES AU BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE FRANÇAIS	83
Doses efficaces externes liées aux rayonnements cosmique et tellurique	83
Doses efficaces par ingestion de radionucléides naturels <i>via</i> l'alimentation et le tabagisme	83
Dose efficace liée à l'inhalation de radon	85
Doses efficaces liées à la rémanence des retombées anciennes de radionucléides artificiels	86
Bilan des doses efficaces liées au bruit de fond radiologique français	86

Salle de comptage bêta au laboratoire de mesures nucléaires de l'IRSN





01

COMPRENDRE LA RADIOACTIVITÉ ET LES EXPOSITIONS DES PERSONNES QU'ELLE PEUT ENGENDRER

1.1. LES RADIONUCLÉIDES	4
1.2. LES RAYONNEMENTS	5
1.3. L'ACTIVITÉ : LES BECQUERELS (Bq)	5
1.4. LA PÉRIODE RADIOACTIVE	6
1.5. LES MODES D'EXPOSITION À LA RADIOACTIVITÉ ENVIRONNEMENTALE	7
1.6. LA DOSE : LE SIEVERT (Sv)	8
1.7. LA RADIOPROTECTION	11



01

COMPRENDRE LA RADIOACTIVITÉ ET LES EXPOSITIONS DES PERSONNES QU'ELLE PEUT ENGENDRER

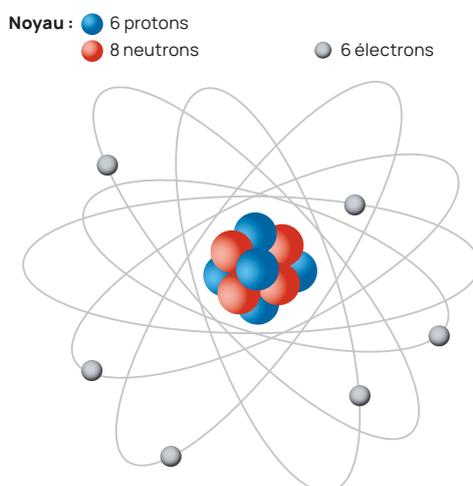
1.1. LES RADIONUCLÉIDES

La matière est constituée de molécules qui sont des combinaisons d'atomes de différents éléments chimiques : atomes de carbone, d'hydrogène, de potassium, de calcium, de fer, de plomb, d'uranium, etc. Un atome est composé d'un noyau central constitué notamment de protons et de neutrons, ainsi que d'un nuage périphérique composé d'électrons (figure 1).

Certains noyaux atomiques sont instables, radioactifs, et se transforment spontanément en d'autres noyaux : on dit qu'ils se désintègrent.

Chacun des éléments chimiques peut présenter des noyaux différents dont certains sont radioactifs ; ce sont des radionucléides (ou isotopes radioactifs). L'hydrogène a un radionucléide : le tritium. Parmi les radionucléides du carbone figure notamment le carbone-14. Le césium-134 et le césium-137 sont deux des quinze isotopes connus du césium. Certains éléments chimiques très lourds comme l'uranium ou le plutonium n'ont aucun noyau stable, seulement des noyaux radioactifs.

FIGURE 1 / REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE D'UN ATOME DE CARBONE-14



1.2. LES RAYONNEMENTS

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

Les principaux rayonnements ionisants issus de la désintégration des radionucléides sont (figure 2 et tableau 1) :

- les rayonnements alpha, constitués par un flux de noyaux d'hélium (formés de deux protons et de deux neutrons) ; ils peuvent être arrêtés par une simple feuille de papier ;
- les rayonnements bêta, constitués par un flux d'électrons ; ils peuvent être arrêtés par une feuille d'aluminium ;
- les ondes électromagnétiques X et gamma ; les plus énergétiques ne sont arrêtées que par de grosses épaisseurs de plomb ou de béton.

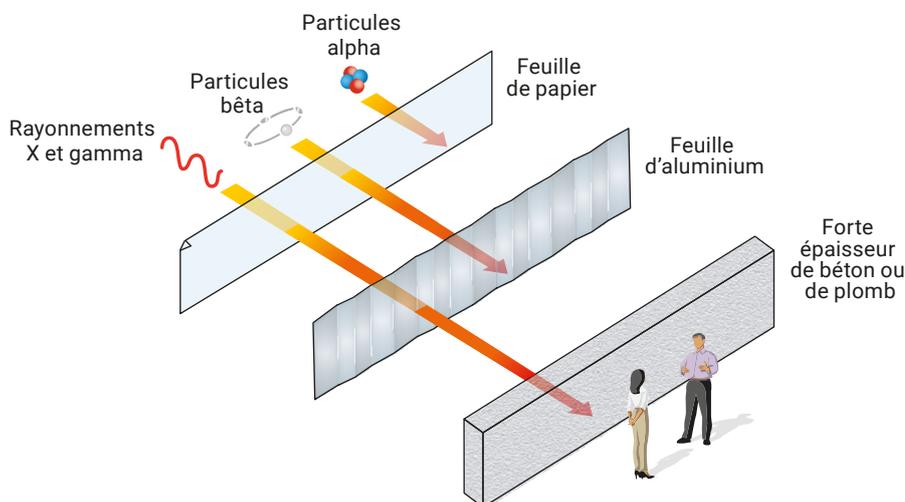
1.3. L'ACTIVITÉ : LES BECQUERELS (Bq)

L'activité d'un radionucléide est le nombre de désintégrations qu'il produit par seconde (1 Bq = 1 désintégration par seconde). Le nombre de désintégrations par seconde étant proportionnel au nombre d'atomes radioactifs, l'activité d'un radionucléide correspond à une quantité de ce radionucléide. Pour quantifier les rejets radioactifs d'une installation nucléaire, le becquerel étant une unité très petite, on utilise des multiples : kilo-becquerel kBq (= 1 000 Bq), méga-becquerel MBq (= 1 000 kBq), giga-becquerel GBq (= 1 000 MBq), tera-becquerel TBq (= 1 000 GBq).

Dans l'environnement, l'activité est souvent rapportée à une masse ou un volume. L'activité volumique (Bq/L ou Bq/m³) ou l'activité massique (Bq/kg) d'un radionucléide dans un échantillon de matière est une façon d'exprimer la teneur de ce radionucléide dans l'échantillon. Les activités dans l'environnement sont souvent très faibles et on utilise des sous-multiples : par exemple, milli-becquerel par kilogramme (1 mBq/kg = 0,001 Bq/kg), micro-becquerel par mètre cube (1 µBq/m³ = 0,000001 Bq/m³).

En mesurant l'activité des radionucléides grâce aux rayonnements qu'ils émettent, il est possible de détecter des quantités (masses) infimes de matière radioactive. Ainsi, une activité massique de 600 becquerels de césium-137 par kilogramme correspond à une teneur en césium de 0,00000086 gramme (0,86 microgramme) de césium-137 par tonne.

FIGURE 2 / PARCOURS DES DIFFÉRENTS TYPES DE RAYONNEMENT



1.4. LA PÉRIODE RADIOACTIVE

La désintégration d'un atome entraîne soit la formation d'un autre atome radioactif (d'un autre radionucléide), soit la production d'un atome stable (non radioactif). Elle entraîne donc la diminution de l'activité du radionucléide considéré.

La période radioactive (ou demi-vie) d'un radionucléide est le temps nécessaire pour que l'activité (le nombre de becquerels) d'un radionucléide donné soit réduite de moitié (figure 3 et tableau 1).

Elle varie suivant le radionucléide d'une fraction de seconde à des milliards d'années. L'uranium-238 a par exemple une demi-vie de près de 4,5 milliards d'années. C'est cette longue période qui explique qu'on en trouve encore sur Terre à l'état naturel. La période de l'uranium-235 est de près de 700 millions d'années ; c'est ce qui explique que, comparativement à l'uranium-238, on en trouve relativement peu (il ne constitue que 0,7 % de l'uranium naturel).

FIGURE 3 / REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DE LA DÉCROISSANCE RADIOACTIVE

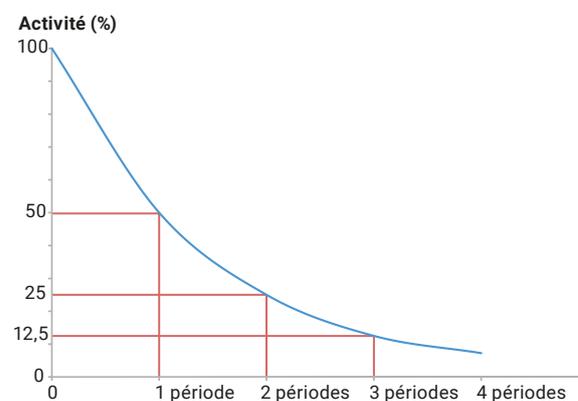


TABLEAU 1 / CARACTÉRISTIQUES DES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES MESURÉS DANS L'ENVIRONNEMENT

Radionucléide	Période radioactive (an)	Rayonnement		Origine
		Nature	Énergie	
³ H	12,3	bêta	très faible énergie	1, 2 et 3
¹⁴ C	5 730	bêta	faible énergie	1, 2 et 3
⁹⁰ Sr-Y	28	bêta	forte énergie	2 et 3
⁴⁰ K	1 260 000 000	bêta et gamma	forte énergie	1
^{110m} Ag	0,68	bêta et gamma	forte énergie	2
¹³⁴ Cs	2,1	bêta et gamma	forte énergie	2
⁶⁰ Co	5,3	bêta et gamma	forte énergie	2
¹³⁷ Cs ^m Ba	30	bêta et gamma	forte énergie	2, 3 et 4
¹⁰⁶ Ru-Rh	1	bêta et gamma	forte énergie	2
¹²⁹ I	15 700 000	bêta et gamma	faible à moyenne énergie	1 et 2
²²⁶ Ra	1 600	alpha et gamma	forte énergie	1
²¹⁰ Po	0,38	alpha	forte énergie	1
²³⁸ U	4 500 000 000	alpha	forte énergie	1 et 2
²³⁸ Pu	88	alpha	forte énergie	2 et 3
²³⁹ Pu	24 000	alpha	forte énergie	2 et 3

1 : naturelle * – 2 : rejets d'installation nucléaire – 3 : rémanence des essais d'armes nucléaires* – 4 : rémanence de l'accident de Tchernobyl*
* Chapitre 2.

1.6. LA DOSE : LE SIEVERT (Sv)

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

Par ailleurs, les différents organes sont plus ou moins sensibles aux rayonnements ionisants. Aussi, suivant les parties de l'organisme touchées par les rayonnements, les effets pourront être différents. L'estimation de la dose efficace permet de quantifier et de comparer les différentes expositions auxquelles peut être soumise une personne en prenant en compte les spécificités des radionucléides, de leur rayonnement, ainsi que des organes exposés. La dose efficace s'exprime en sievert (Sv). Pour les expositions qui résultent de la radioactivité environnementale, cette unité est très grande et on utilise des sous-multiples : le millisievert (1 mSv = 0,001 Sv) ou le microsievert (1 μ Sv = 0,000001 Sv). Dans ce bilan radiologique, les doses efficaces sont estimées au corps entier pour l'individu adulte et pour une durée d'exposition d'un an (mSv/an ou μ Sv/an).

Un facteur de dose permet d'estimer la dose en sievert à partir des activités environnementales mesurées (Bq/kg dans les denrées, Bq/m² dans les sols et Bq/m³ dans l'air notamment). Le facteur de dose qui permet d'estimer la dose consécutive à l'ingestion d'un radionucléide est exprimé en Sv/Bq ingéré ; celle pour estimer la dose par inhalation en Sv/Bq inhalé ; et l'exposition externe en Sv/h par Bq/m² si le radionucléide est dans l'air ou en Sv/h par Bq/m²

s'il est sur le sol. La figure 5 montre que les facteurs de dose sont très différents suivant le radionucléide et le mode d'exposition.

Pour évaluer la dose efficace annuelle potentielle qui résulte de l'ingestion, il faut estimer la quantité de denrées concernées ingérée par an (tableau 2). L'essentiel de l'influence des installations nucléaires étant limité à leur voisinage immédiat, il s'agit d'estimer la part de denrées locales consommées. Les enquêtes alimentaires menées en France montrent que la part de légumes et de fruits locaux peut être très importante (supérieure à 70 %). En revanche, la consommation de dérivés céréaliers (pain, pâtes, riz...) produits localement est le plus souvent négligeable. En multipliant la quantité de chaque denrée locale consommée annuellement (kg/an) par l'activité de chaque radionucléide mesurée dans chacune d'elles (Bq/kg), on obtient l'activité incorporée annuellement (Bq/an) pour chaque radionucléide. Le facteur de dose permet ensuite d'estimer la dose efficace par ingestion (Sv/an) à partir de cette activité incorporée.

Dans le cas de l'inhalation, il s'agit d'estimer l'activité inhalée par la personne (Bq/an) à partir de l'activité mesurée dans l'air (Bq/m³), en prenant en compte un débit respiratoire moyen (m³/h).

La méthode utilisée pour calculer les doses est détaillée dans le chapitre 5 du *Bilan radiologique 2021-2023*.

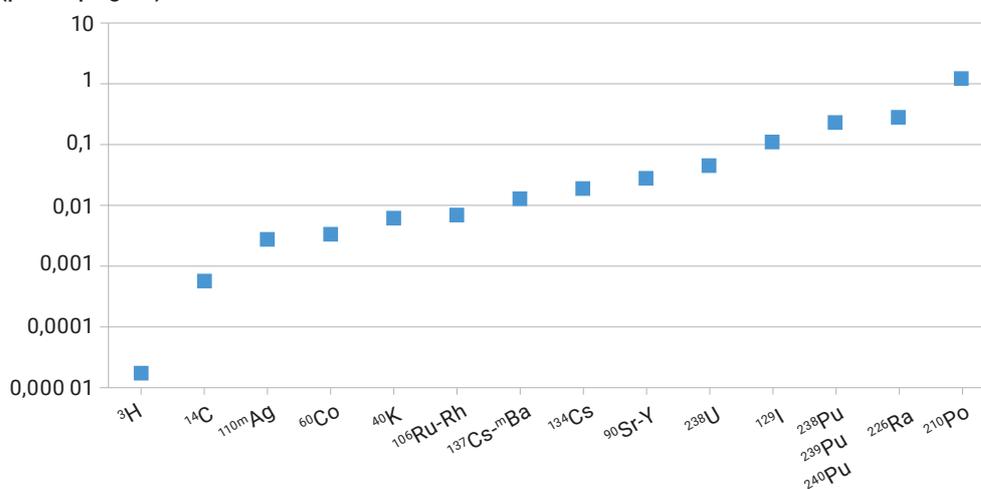
TABLEAU 2 / MODE DE CALCUL DES DOSES PAR EXPOSITIONS EXTERNE ET INTERNE À PARTIR DES ACTIVITÉS ENVIRONNEMENTALES

Exposition externe	=	Activité surfacique ou volumique en Bq/m ² ou Bq/m ³	X	Temps d'exposition en h	X	Coefficient de dose en Sv/h par Bq/m ² ou Sv/h par Bq/m ³
Exposition interne	=	Activité massique ou volumique (air, denrées) en Bq/kg ou Bq/L de denrées et Bq/m ³ d'air	X	Quantité d'air inhalée ou de denrées ingérée m ³ d'air, L ou kg de denrées	X	Coefficient de dose en Sv/Bq inhalé ou ingéré

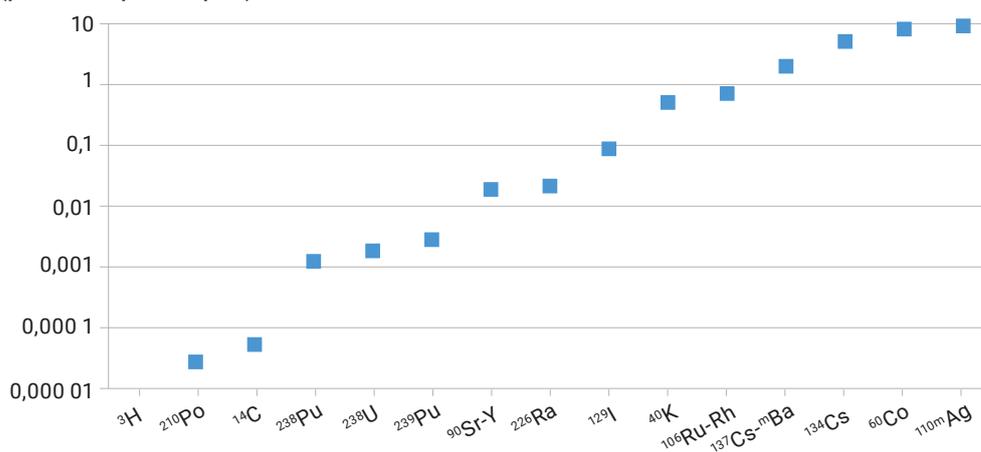
FIGURE 5 / DOSE EFFICACE POUR UNE INGESTION UNITAIRE ($\mu\text{Sv}/\text{Bq}$) ET DÉBIT DE DOSE DANS L'AIR PAR IRRADIATION POUR UNE ACTIVITÉ SURFACIQUE UNITAIRE ($\mu\text{Sv}/\text{heure par MBq}/\text{m}^2$) POUR LES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES MESURÉS DANS L'ENVIRONNEMENT FRANÇAIS

Pour une même activité ingérée ou pour une même activité déposée sur le sol, les doses générées par les radionucléides sont très différentes. Elles dépendent de la nature du rayonnement et de son énergie, ainsi que du devenir du radionucléide dans l'organisme dans le cas de l'ingestion. En raison notamment de son rayonnement bêta de très faible énergie, le tritium est près de 10 millions de fois moins radiotoxique par ingestion que le polonium-210. Il ne produit par ailleurs aucune irradiation externe. De manière générale, les radionucléides émetteurs alpha (plutonium, radium, polonium et uranium) sont les plus radiotoxiques par ingestion. En raison de leur rayonnement gamma de forte énergie, l'argent-110m, le cobalt-60, les césiums déposés à la surface du sol sont les plus irradiants dans l'air.

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



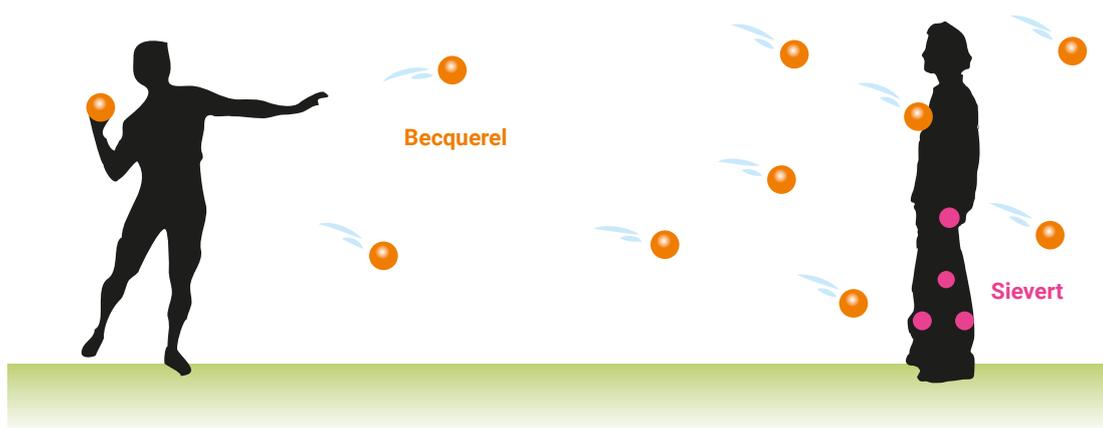
Débit de dose annuelle dans l'air par irradiation pour une activité surfacique au sol unitaire ($\mu\text{Sv}/\text{heure par MBq}/\text{m}^2$)



FOCUS LES EFFETS DES RAYONNEMENTS SUR LA SANTÉ

Les rayonnements ionisants peuvent entraîner des dommages sur les cellules des organes qui y sont exposées. En cas d'exposition très importante, la mort massive de cellules peut entraîner des effets rapides et certains (effets déterministes) : brûlure plus ou moins

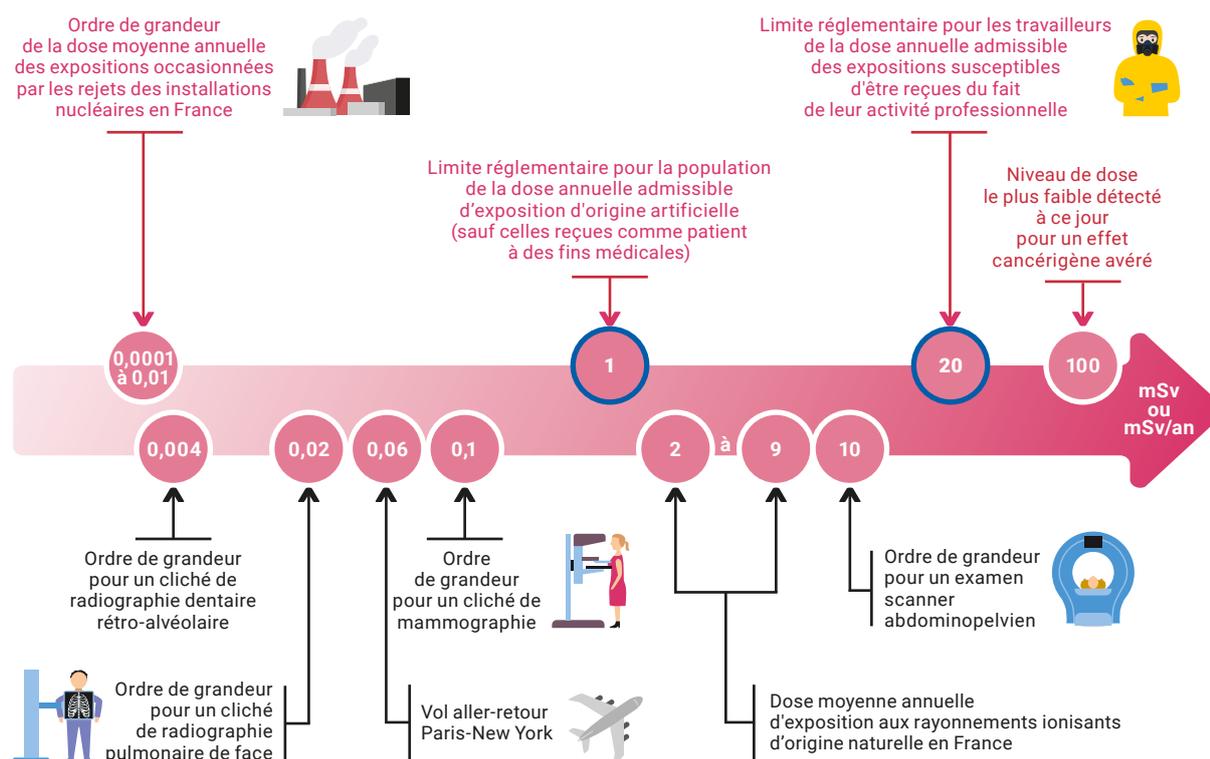
importante, nécrose, baisse des globules blancs, nausée et, dans le cas extrême, le décès de l'individu. Les activités présentes dans l'environnement ne peuvent en aucun cas conduire à ce genre de conséquences. Les expositions à la radioactivité environnementale sont de l'ordre de mille à un million de fois plus faibles que celles susceptibles de produire les effets cités précédemment. Elles peuvent cependant être à l'origine, de manière aléatoire, de pathologies qui apparaissent des années, voire des décennies plus tard (effets stochastiques), essentiellement des cancers. Ces conséquences sont assimilables à celles qui peuvent résulter du tabagisme ou de l'apparition de cancer de la peau après des expositions répétées au soleil.



1.7. LA RADIOPROTECTION

Le but de la radioprotection est de réduire les risques liés aux rayonnements ionisants en limitant notamment les doses liées aux expositions individuelles. Pour la population, la limite annuelle d'exposition de 1 mSv s'applique à la somme des doses reçues en dehors de la radioactivité naturelle et de l'utilisation médicale des rayonnements ionisants. Les doses calculées dans ce bilan à partir des activités mesurées dans l'environnement sont de l'ordre de 100 à plus de 10 000 fois plus faibles que cette limite.

FIGURE 6 / LIMITES RÉGLEMENTAIRES D'EXPOSITION ET EXEMPLES DE DOSES EFFICACES REÇUES LORS D'EXAMENS MÉDICAUX (mSv ou mSv/an)



Prélèvement de sédiment (sable de plage) sur l'estran, en champ proche du CNPE (centre nucléaire de production d'électricité) de Flamanville.



© Claire Godinot/Médiathèque IRSN



02

LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT

2.1. OBJECTIFS DE LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT	14
La surveillance radiologique de l'environnement répond à différents objectifs	15
2.2. LES DISPOSITIFS DE LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT	16
La surveillance du compartiment atmosphérique	16
La surveillance du compartiment aquatique	21
La surveillance du compartiment terrestre	25
Synthèse des méthodes de prélèvement et de mesure associées à la surveillance radiologique des différents compartiments de l'environnement	27
2.3. DU PLAN DE PRÉLÈVEMENT AUX RÉSULTATS DE MESURE	29
Plans de prélèvement et d'analyse	29
Préparation des échantillons	29
Méthodes d'analyses radiologiques	31
2.4. LE RÉSEAU NATIONAL DE MESURES DE LA RADIOACTIVITÉ DE L'ENVIRONNEMENT (RNM)	44
Le site internet de référence des mesures de la radioactivité de l'environnement en France	44
Le fonctionnement du RNM	45
L'agrément des laboratoires	47
2.5. LES SOURCES D'INFORMATION SUR LA SURVEILLANCE DE LA RADIOACTIVITÉ ET LA DIFFUSION DES DONNÉES	50
Sites internet et supports d'information du public	50
Diffusion d'information dans le cadre de traités ou conventions internationales	53

02

LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT

2.1. OBJECTIFS DE LA SURVEILLANCE RADIOLOGIQUE DE L'ENVIRONNEMENT

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

- les exploitants d'installations nucléaires (Andra⁽¹⁾, CEA⁽¹⁾, EDF⁽¹⁾, ILL⁽¹⁾, Marine nationale et Orano⁽¹⁾...) qui réalisent une surveillance autour de leurs sites nucléaires en application de dispositions réglementaires. Pour les installations nucléaires civiles, le programme de surveillance de l'environnement à mettre en œuvre est fixé de manière générale par la décision n° 2013-DC-0360 de l'ASN du 16 juillet 2013 relative à la maîtrise des nuisances et de l'impact sur la santé et l'environnement des installations nucléaires de base, modifiée par la décision n° 2016-DC-0569 de l'ASN du 29 septembre 2016. Ce programme peut, le cas échéant, être précisé et adapté aux spécificités locales dans des décisions de l'ASN propres à chaque site. Pour les anciens sites miniers, le programme de surveillance à mettre en œuvre est défini par arrêté préfectoral ;
- l'IRSN⁽¹⁾, l'ASN⁽¹⁾, les ministères (ministère du Travail, de la Santé et des Solidarités, DGAL⁽¹⁾, DGCCRF⁽¹⁾...), les services de l'État et les autres acteurs publics qui ont pour mission de réaliser une surveillance du territoire national ou qui réalisent des missions de contrôle ou de surveillance sur des secteurs particuliers (les denrées alimentaires pour ce qui concerne par exemple les ministères chargés de l'agriculture et de la consommation) ;

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

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



Compteur alpha équipé d'un détecteur au silicium

© Philippe Dureuil/Médiathèque IRSN

(1) Voir glossaire du chapitre 5 du Bilan radiologique 2021-2023.

La surveillance radiologique de l'environnement répond à différents objectifs

Objectif n° 1

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

Objectif n° 2

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

Objectif n° 3

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

Objectif n° 4

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

Objectif n° 5

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

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



Prélèvements de végétaux aquatiques (myriophylles) en bordure du Rhône à proximité du CNPE EDF de Saint-Alban Saint-Maurice (38)

© Célia Goumard/Médiathèque IRSN

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

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

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

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

Les dispositifs de prélèvements et de mesures déployés, et les types d'analyse effectués en France par les nombreux acteurs qui participent à la surveillance radiologique de l'environnement peuvent donc être différents. Certains dispositifs sont adaptés aux objectifs assignés aux exploitants nucléaires dans le cadre de la surveillance réglementaire de leurs installations, tandis que d'autres acteurs utilisent des équipements de prélèvement et des techniques d'analyses beaucoup plus performants permettant d'atteindre des seuils de décision (cf. chapitre 5 d'annexes du *Bilan radiologique 2021-2023*) nettement plus bas pour répondre à des objectifs différents. Dans la base de données du RNM, cela se traduit par la coexistence de résultats issus de sources différentes et obtenus selon des gammes analytiques différentes.

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

La surveillance du compartiment atmosphérique

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

Mesure en continu du débit de dose gamma ambiant

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

Dosimétrie passive environnementale

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

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

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

1A



© LT2E/IRSN

1B



© Grégoire Maisonneuve/Médiathèque IRSN

Aérosols atmosphériques

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

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

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

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

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

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

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

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



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

Cas particulier des descendants à vie courte du radon-222 ; mesure de l'Énergie Alpha Potentielle (EAP)

Le radon-222 qui s'est dégagé de la roche et a migré à travers le sol vers l'atmosphère se désintègre pour donner successivement des atomes de polonium-218, de plomb-214, de bismuth-214 et de polonium-214 (chapitre 3). Ces radionucléides sont présents dans l'atmosphère sous forme de particules (aérosols) solides, attachées ou non à l'aérosol atmosphérique. Ce sont ces aérosols, et non le radon lui-même qui est un gaz inerte de courte période radioactive (3,8 jours) qui, une fois inhalés, peuvent se déposer dans les voies respiratoires et libérer, par désintégrations successives, des énergies non négligeables aux cellules. Ils sont donc à l'origine des doses habituellement attribuées au radon.

L'Énergie Alpha Potentielle volumique (ou EAPv) est un paramètre utilisé pour quantifier physiquement l'énergie qui peut potentiellement se déposer dans les voies respiratoires. Il est utilisé pour la surveillance des travailleurs et des sites miniers. Il s'exprime en J/m^3 (joule par mètre cube).

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

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

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



© IRSN

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

Outre les gaz rares, le tritium et le carbone-14 sont les principaux radionucléides rejetés dans l'air par les installations nucléaires.

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

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

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



© Pascal Paulat/Médiathèque IRSN

Depuis quelques années, l'IRSN utilise un dispositif de prélèvement passif de la vapeur d'eau tritiée atmosphérique qu'il a lui-même développé. Les piègeurs passifs constituent une alternative aux barboteurs beaucoup moins contraignante (cf. le focus du *Bilan radiologique 2015-2017* pp. 14-15). Ils se composent d'une matière absorbante (zéolite) contenue dans un pot en plastique déposé dans l'environnement (figure 5) durant une à deux semaines. Le tritium piégé dans la zéolite est ensuite récupéré par désorption en laboratoire avant analyse par scintillation liquide.

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

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

FIGURE 5 / PIÉGEURS PASSIFS TRITIUM



© Lionel Saey/Médiathèque IRSN

© IRSN

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

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

Eaux de pluie

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

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

FIGURE 6 / COLLECTEUR D'EAU DE PLUIE



© P. Demail

La surveillance du compartiment aquatique

Eaux et matières en suspension

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

FIGURE 7 / STATION HYDROTÉLÉRAY



© DR

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

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

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

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

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

FIGURE 8 / HYDROCOLLECTEUR



© Patrice Blaise/IRSN

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



© Arnaud Bouissou/MEDDE/Médiathèque IRSN

Sédiments

Les sédiments constituent un intégrateur sur le long terme pour les radionucléides peu solubles et de longue période. Des prélèvements ponctuels de sédiments sont ainsi réalisés en amont et en aval des installations nucléaires (figure 10). Dans le cadre des programmes de surveillance, il s'agit principalement de sédiments de surface prélevés en vue d'obtenir des informations sur la présence éventuelle de radionucléides liée à des rejets récents.

La fréquence de ce type de prélèvement varie d'annuelle à quinquennale. Des analyses par spectrométrie gamma et des indices d'activités alpha et bêta globaux sont principalement réalisées sur les sédiments. En fonction du spectre de rejets propre à chaque site, des analyses complémentaires (spectrométrie alpha, ^3H , ^{14}C , ^{90}Sr) sont également effectuées avec des méthodes d'analyse permettant d'atteindre des performances analytiques conformes aux objectifs fixés (surveillance réglementaire, étude radioécologique...).

FIGURE 10 / PRÉLÈVEMENT DE SÉDIMENT (vase) EN CHAMP PROCHE DU CNPE (centre nucléaire de production d'électricité) DE GRAVELINES



© Claire Godinot/Médiathèque IRSN

Faune et flore aquatiques

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

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

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

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

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

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

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

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



© Céline Quenneville/IRSN

Prélèvement de végétaux aquatiques



© Gilles Salün/IRSN

Prélèvement de salades

La surveillance du compartiment terrestre

Les végétaux terrestres et les sols

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

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

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



Analyse granulométrique de sédiments marins

Les denrées d'origine animale et végétale

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

Les feuilles des végétaux terrestres sont directement exposées au dépôt des autres radionucléides présents dans l'air sous forme d'aérosols. Elles présentent ainsi les activités les plus élevées de toutes les parties de plantes. Seule une partie de l'activité déposée est transférée des feuilles vers les autres organes de la plante (fruits, grains, racines ou tubercules).

Les radionucléides se transfèrent aux animaux essentiellement par ingestion de denrées. L'intensité des transferts vers les produits animaux (lait, viande et œuf) varie en fonction du produit et du radionucléide. Si les teneurs en tritium et en carbone-14 de ces denrées d'origine animale peuvent être du même niveau que celle des denrées végétales, les concentrations des autres radionucléides dans le lait, les viandes et les œufs sont le plus souvent inférieures, voire très inférieures, à celles des végétaux.

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

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

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

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



Échantillonnage de lait de vache

© Arnaud Bouissou/MEDDE/Médiathèque IRSN

Synthèse des méthodes de prélèvement et de mesure associées à la surveillance radiologique des différents compartiments de l'environnement

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

TABLEAU 1 / COMPARTIMENT ATMOSPHÉRIQUE

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

TABLEAU 2 / COMPARTIMENT TERRESTRE INCLUANT LES DENRÉES ALIMENTAIRES

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

TABLEAU 3 / COMPARTIMENT AQUATIQUE

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

2.3. DU PLAN DE PRÉLÈVEMENT AUX RÉSULTATS DE MESURE

Les techniques présentées ici sont les plus employées dans le domaine de la surveillance de l'environnement, en particulier par les contributeurs au RNM.

Plans de prélèvement et d'analyse

La surveillance réglementaire de l'environnement des installations nucléaires de base est adaptée à chaque type d'installation (centre nucléaire de production d'électricité, usine, laboratoire). Les analyses réalisées sur chaque échantillon suivent des plans prédéfinis élaborés en fonction des rejets (type de rejet, radionucléides et activités rejetées) et de son historique événementiel (incidents et rejets passés). Dans le chapitre 2 du *Bilan radiologique 2021-2023*, les plans de prélèvement et d'analyses sont fournis pour chaque site après présentation des rejets.

Préparation des échantillons

Dès réception au laboratoire, les prélèvements sont traités et conditionnés en fonction des analyses radiologiques auxquelles ils vont être soumis. L'analyse de la radioactivité sur un échantillon prélevé dans l'environnement débute par sa préparation.

Celle-ci va du simple conditionnement en récipient de forme normalisée à une préparation plus élaborée comme le séchage, la calcination ou la lyophilisation (figure 11). D'une manière générale, les différentes techniques de traitement des échantillons visent à concentrer un maximum de radioactivité dans un minimum de volume afin de pouvoir détecter la présence de radionucléides à bas, voire très bas niveaux. Dans certains cas, la concentration de l'échantillon débute dès son prélèvement grâce aux dispositifs spécifiques mis en œuvre (exemples : prélèvement des aérosols, des matières en suspension...).

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

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



Traitement en laboratoire : extraction de la chair de corbicules (mollusques d'eau douce)

© David Clava / Médiathèque IRSN

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



1.
Prélèvement,
conditionnement
et enregistrement
de l'échantillon



2.
Séchage
à l'étuve



3.
Lyophilisation



4.
Broyage et
homogénéisation



5.
Calcination

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



6.
Radiochimie pour
séparer et purifier
les radionucléides
à analyser



7.1
Détection des
rayonnements alpha
(spectrométrie alpha)



7.2
Détection des
rayonnements bêta
(scintillation liquide)



7.3
Détection des
rayonnements gamma
(spectrométrie
gamma)



8.
Spectrométrie
de masse par ICP-MS
ou accélérateur

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

* Crédits photos de la figure 11, de 1 à 8 :
Gilles Deschamps/Signatures/Médiathèque IRSN, Gilles Deschamps/Signatures/Médiathèque IRSN, Arnaud Bouissou/MEDDE/Médiathèque IRSN,
Florence Levillain/Signatures/Médiathèque IRSN, Olivier Seignette/Mikaël Lafontan/Médiathèque IRSN, Philippe Dureuil/Médiathèque IRSN,
Laurent Zylberman/Graphix-Images/Médiathèque IRSN, Rodolfo Gurriaran/Médiathèque IRSN.

Méthodes d'analyses radiologiques

De nombreuses méthodes de mesurage de la radioactivité dans l'environnement sont utilisées en fonction des radionucléides recherchés, des matrices à analyser et des performances métrologiques visées. Elles peuvent être divisées de façon générique en deux grandes typologies : la mesure du rayonnement émis par les radionucléides, alpha, bêta ou gamma, et la mesure de l'abondance en masse des radionucléides présents pour remonter à leur activité (on parle alors de spectrométrie de masse). Si la première famille fut la première historiquement et reste la plus répandue, la famille des analyses par spectrométrie de masse est aujourd'hui de plus en plus utilisée, permettant des performances incomparables sur des radionucléides parfois complexes à mesurer par d'autres techniques, comme le carbone-14. Cette partie présente ainsi un état des lieux synthétique des grandes techniques mises en œuvre aujourd'hui dans les laboratoires de mesure des échantillons environnementaux.

Le comptage proportionnel

Le comptage proportionnel est notamment mis en œuvre pour la mesure des indices d'activités alpha et bêta globaux dans les échantillons environnementaux, en particulier les eaux. Il peut également être utilisé pour des mesures d'émetteurs bêta comme le strontium-90 après une phase de radiochimie. Une préparation est nécessaire avant la mesure. Cette préparation est destinée à obtenir un mince dépôt de matière à analyser sur une coupelle qui est ensuite placée dans le compteur (figure 12). Ce mince dépôt résulte soit de l'évaporation d'une solution, soit d'un dépôt de cendre d'incinération de l'échantillon (filtre d'aérosols par exemple).

Le détecteur utilise l'ionisation gazeuse qui permet une mesure des rayonnements α et β : les particules émises par l'échantillon vont arracher des électrons aux atomes (ionisation) d'un gaz présent dans une chambre, générant ainsi des ions chargés, et donc un courant électrique mesurable et proportionnel aux rayonnements.

FIGURE 12 / PRÉPARATION D'UNE COUPELLE SUR UN ÉVAPORATEUR



© IRSN

TABLEAU 4 / GRANDES TECHNIQUES D'ANALYSE DE LA RADIOACTIVITÉ UTILISÉES DANS LE DOMAINE DE LA SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT

Mesures « nucléaires » (mesure du rayonnement)	Spectrométrie de masse
Comptage proportionnel	Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS)
Spectrométrie alpha	
Scintillation liquide	Spectrométrie de masse par accélérateur (AMS)
Spectrométrie gamma	

La spectrométrie gamma

La spectrométrie gamma est une méthode de mesure permettant d'identifier et de quantifier les radionucléides émetteurs gamma présents dans un échantillon, à partir de la détection des photons X et gamma émis lors de leur désintégration. Elle joue un rôle important dans la surveillance de l'environnement, étant donné qu'un grand nombre de radionucléides naturels ou produits par l'homme émettent ce type de rayonnement (tableau 5). La mesure peut être effectuée avec différents types de détecteurs, les plus utilisés étant les détecteurs à semi-conducteur (ex. : germanium hyper pur, GeHP, figure 13) et à scintillation (ex. : iodure de sodium dopé au thallium, NaI(Tl)). Il s'agit d'une technique rapide, non destructive, et permettant en une seule fois de mesurer l'ensemble des radionucléides émetteurs gamma présents dans l'échantillon. L'analyse peut cependant être complexe selon le type d'échantillon, le nombre de radionucléides présents et leurs caractéristiques, et les niveaux d'activités rencontrés.

FIGURE 13 / DÉTECTEUR GERMANIUM HYPER PUR UTILISÉ POUR LA MESURE PAR SPECTROMÉTRIE GAMMA



© Philippe Dureuil/Médiathèque IRSN

TABLEAU 5 / EXEMPLES DE RADIONUCLÉIDES ÉMETTEURS GAMMA D'ORIGINE NATURELLE ET ARTIFICIELLE

Radioactivité d'origine naturelle
<ul style="list-style-type: none"> • Cosmogénique : ^7Be, ^{22}Na • Tellurique : ^{40}K, descendants dans les chaînes de ^{235}U, ^{238}U et ^{232}Th
Radioactivité d'origine artificielle
<ul style="list-style-type: none"> • ^{58}Co, ^{60}Co, $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{129}I, ^{131}I, ^{134}Cs, ^{137}Cs

Les échantillons peuvent être analysés à l'état liquide ou solide et sont conditionnés dans des récipients de différentes formes (« géométries »), adaptées aux quantités à analyser (figure 14). En fonction des radionucléides et des niveaux d'activités attendus, l'échantillon pourra le cas échéant être prétraité (séchage, calcination, concentration). Par exemple, pour pouvoir détecter des radionucléides présentant de très faibles activités, on choisira de calciner l'échantillon afin de le concentrer au maximum dans un minimum de volume.

Les photons gamma émis par l'échantillon traité interagissent avec le matériau du détecteur en déposant tout ou partie de leur énergie. Ces interactions produisent des impulsions électriques proportionnelles aux énergies déposées, qui sont collectées et traitées par un système électronique pour être converties en valeurs numériques. Le classement des interactions dans un histogramme donnant le nombre d'événements détectés en fonction de l'énergie déposée permet d'obtenir un spectre dont la gamme s'étend de quelques keV à quelques MeV. Un schéma simplifié de la chaîne de mesure est présenté en figure 15.

Le spectre est caractérisé par un fond continu et la présence de plusieurs pics (figure 16).

En comparant les énergies des pics aux énergies connues des photons émis par les radionucléides, répertoriées dans les bases de données nucléaires, il est possible d'identifier les radionucléides présents dans l'échantillon. Par exemple, dans le spectre présenté en figure 16, le pic à 662 keV est caractéristique de la présence de césium-137, et le pic à 1 461 keV indique l'existence de potassium-40.

FIGURE 14 / EXEMPLES D'ÉCHANTILLONS MESURÉS EN SPECTROMÉTRIE GAMMA, CONDITIONNÉS DANS DIFFÉRENTES GÉOMÉTRIES (de gauche à droite et de bas en haut : filtre d'aérosols, poisson en cendres, sédiments en sec, algues en frais, eau liquide)



FIGURE 15 / SCHÉMA SIMPLIFIÉ DE LA CHAÎNE DE MESURE PAR SPECTROMÉTRIE GAMMA

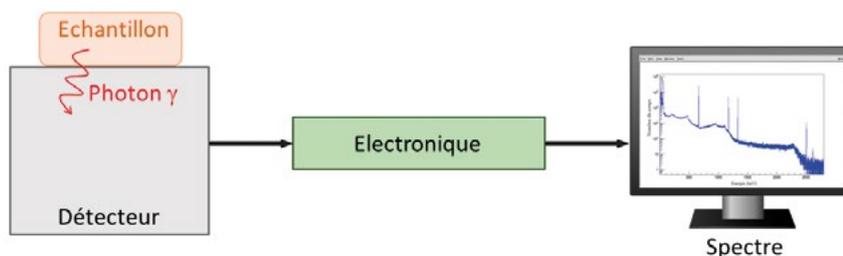
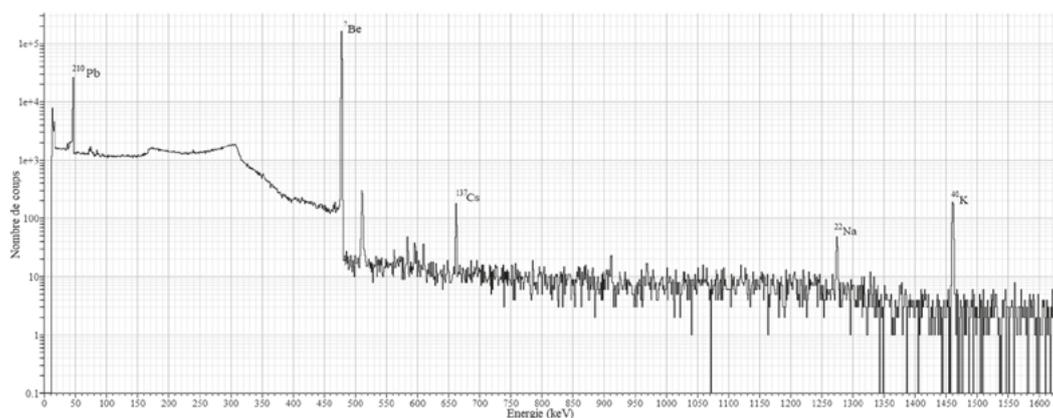


FIGURE 16 / EXEMPLE DE SPECTRE GAMMA D'UN FILTRE D'AÉROSOLS, AVEC IDENTIFICATION DES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES ÉMETTEURS GAMMA PRÉSENTS



Le nombre d'événements détectés dans un pic permet de remonter à l'activité du radionucléide associé. En effet, l'activité dépend du nombre de coups dans le pic, de l'intensité d'émission du photon détecté, du rendement de détection du système de mesure, du temps de comptage et de divers facteurs de correction.

Les niveaux d'activités dans les échantillons de l'environnement pouvant être faibles (jusqu'à quelques mBq par échantillon), la mesure nécessite de prendre un certain nombre de précautions pour protéger le détecteur du rayonnement gamma ambiant (radioactivité des matériaux entourant le détecteur, rayonnement cosmique). Pour ce faire, d'une part, un blindage de plomb entoure le système de détection de manière à réduire le bruit de fond extérieur

(radioactivité naturelle tellurique, échantillon mesuré à côté) et, d'autre part, les éléments du détecteur peuvent être également sélectionnés pour leur faible teneur en impuretés radioactives (« détecteur bas bruit »). La composante due à la présence de radon dans l'air peut également être réduite grâce à un renouvellement d'air dans la salle de mesure ou à un balayage de la chambre de détection par un flux d'azote. Pour réduire encore le bruit de fond, la contribution venant du rayonnement cosmique peut quant à elle être diminuée en ajoutant un système anti-cosmique (figure 17) ou en installant le détecteur dans un laboratoire souterrain.

Le temps de comptage peut varier entre quelques heures et plusieurs jours selon l'échantillon à analyser, le but étant d'avoir un nombre suffisant de coups dans les pics étudiés.

FIGURE 17 / SALLE DES DÉTECTEURS DE SPECTROMÉTRIE GAMMA À L'IRSN À ORSAY
(systèmes de détection classique sur la gauche et systèmes anti-cosmique sur la droite)



La spectrométrie alpha

Étant donné le caractère peu pénétrant des particules alpha, ce rayonnement ne traverse pas la matière. Cette faible pénétration impose donc de retirer de l'échantillon environnemental toute la matière qui le compose à l'exception de l'élément chimique à mesurer. Cette opération de purification résulte d'un traitement chimique poussé dont les étapes sont résumées dans la figure 18. Dans un premier temps, les échantillons solides sont séchés et calcinés pour éliminer respectivement l'eau et les composés organiques contenus dans l'échantillon. Une mise en solution est alors réalisée à chaud avec des acides concentrés (HNO_3 , HCl , HClO_4 , HF). Des étapes de séparation permettent de l'isoler du reste de la matrice, et donc des autres émetteurs alpha pour éviter les interférences (deux radionucléides pouvant émettre des rayons alpha de même énergie). La durée du traitement radiochimique peut atteindre 3 semaines selon le radionucléide, le type et la masse de l'échantillon à analyser.

Les échantillons issus de la radiochimie (sous la forme de disques inox ou de filtres) sont placés dans une chambre de comptage équipée d'un détecteur à semi-conducteur à base de silicium. Les particules alpha émises par l'échantillon interagissent avec le détecteur placé quasiment au contact de l'échantillon, créant un courant électrique dans celui-ci, dont l'amplitude et l'intensité sont proportionnelles à l'activité et à l'énergie des particules alpha. Le signal ainsi généré est converti en un spectre d'énergie exploitable par le mesureur. La figure 19 présente un spectre d'étalonnage (intensité du signal représenté en fonction de l'énergie – cf. le paragraphe relatif à la spectrométrie gamma) dans lequel la surface de chaque pic est proportionnelle à l'activité du radionucléide. Les durées d'acquisition sont généralement de 2 à 3 jours afin d'atteindre des seuils de décision compatibles avec les besoins de la surveillance.

FIGURE 18 / ÉTAPES DU TRAITEMENT CHIMIQUE EN VUE D'UNE MESURE PAR SPECTROMÉTRIE ALPHA

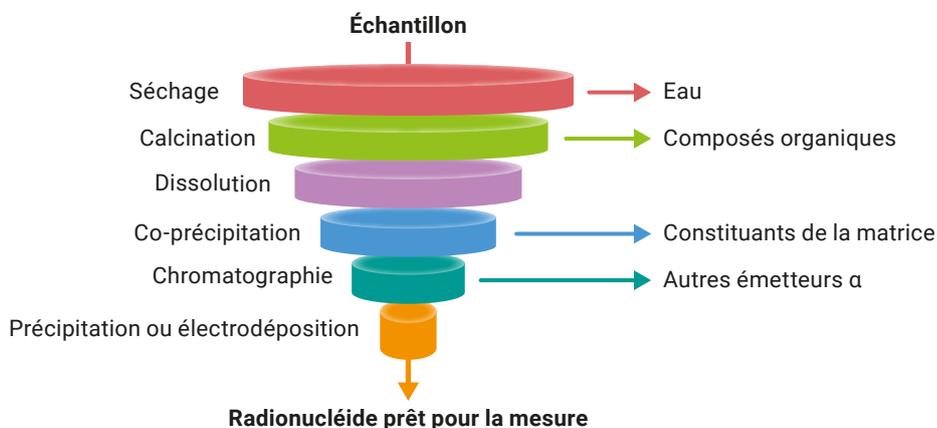
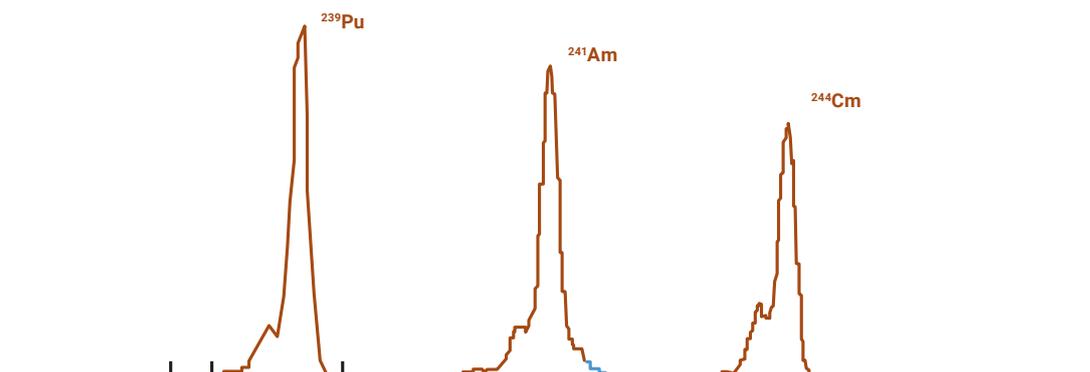


FIGURE 19 / EXEMPLE D'UN SPECTRE D'ÉTALONNAGE



La scintillation liquide

La scintillation liquide est la méthode privilégiée pour la mesure des radionucléides émetteurs bêta comme le tritium, le carbone-14 ou le strontium-90. Pour cette mesure, la solution radioactive est mélangée avec un liquide scintillant qui transforme l'énergie de la désintégration en rayonnement lumineux (figure 20).

Cette technique, très utilisée dans les laboratoires de mesures, est fiable et relativement facile à mettre en œuvre. Ses principaux avantages sont l'efficacité de détection et l'absence de barrière physique entre la solution radioactive et le scintillateur (les deux étant réunis dans une solution homogène). Cette configuration permet la détection de rayonnements de faible énergie avec des limites de détection basses, particulièrement pertinentes pour les activités dans l'environnement. Néanmoins, pour les échantillons complexes comme ceux de l'environnement, cette technique nécessite souvent une préparation et une séparation chimique afin d'éviter des interférences lors de la mesure.

La préparation dépend de la matrice à analyser et du radionucléide recherché. Pour les prélèvements liquides, un simple mélange (une filtration préalable de l'échantillon est parfois réalisée) avec le liquide scintillant est suffisant pour détecter le tritium ou le carbone-14 (figure 21).

En revanche, pour les matrices solides ou pour le strontium-90, une purification est nécessaire. Les échantillons solides sont dissous avec de l'acide concentré. L'élément recherché est alors séparé du reste de l'échantillon par différentes étapes de filtration, coprécipitation et chromatographie d'extraction avec des résines sélectives. La durée de ce traitement chimique peut atteindre trois semaines par exemple pour la purification du strontium-90 dans des prélèvements d'algues.

FIGURE 20 / SCHEMA DU PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA SCINTILLATION LIQUIDE

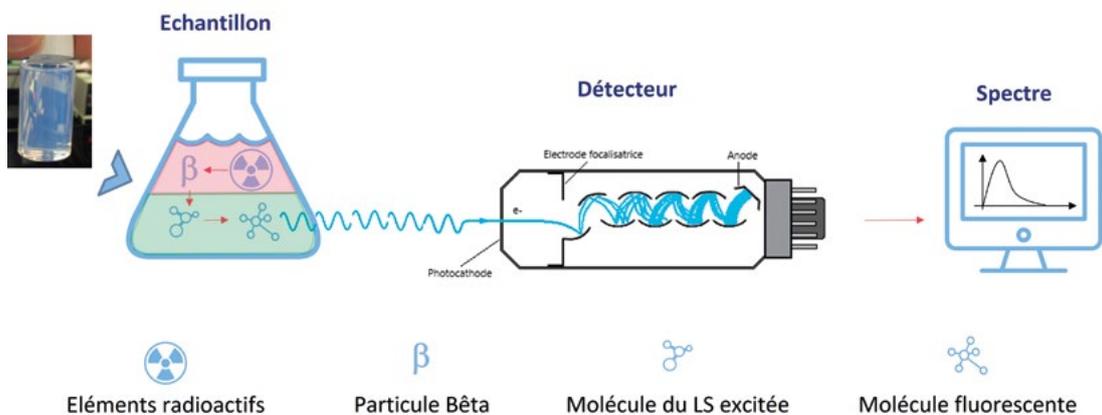


FIGURE 21 / PRÉPARATION D'UN ÉCHANTILLON POUR UNE MESURE DIRECTE (sans séparation préalable)



© Philippe Dureuil/Médiathèque IRSN

Après le traitement chimique, l'échantillon en solution est mélangé à du liquide scintillant. Ce dernier est notamment composé d'un solvant organique et de scintillateurs (molécules scintillantes) dont le rôle est de transformer le rayonnement bêta en rayonnement visible. Le solvant est excité sous l'effet du rayonnement bêta et les scintillateurs émettent de la lumière lorsque le solvant est excité. Des photomultiplicateurs amplifient ensuite la lumière émise par la scintillation. La majorité des compteurs récents comprennent des passeurs d'échantillons automatiques permettant de mesurer des séries d'échantillons et ainsi augmenter la capacité des laboratoires (figure 22).

Le signal obtenu est traité par un analyseur et présenté sous forme d'un spectre d'énergie. Comme pour la spectrométrie alpha (cf. plus haut), la surface des pics d'énergie du spectre fournit l'activité du radionucléide contenue dans l'échantillon initial.

La spectrométrie de masse à plasma induit (ICP-MS)

La spectrométrie de masse à plasma induit (ICP-MS) est l'une des techniques analytiques les plus sensibles pour l'identification et la mesure d'une large gamme d'éléments présents dans les échantillons de l'environnement. Ceux-ci pouvant être particulièrement complexes et difficiles à traiter, notamment en raison de leurs compositions chimiques très variables, une étape de préparation radiochimique est nécessaire. Elle inclut la mise en solution de l'échantillon, lorsqu'un solide est analysé, puis une séparation et une purification qui permettent d'isoler l'élément chimique d'intérêt. Cette étape de traitement est primordiale pour concentrer l'échantillon, supprimer ou diminuer les interférences principalement liées à la présence d'espèces ayant la même masse, et obtenir une solution adaptée à l'élément et à l'appareil de mesure.

FIGURE 22 / CHARGEMENT D'ÉCHANTILLONS DANS UN COMPTEUR À SCINTILLATION LIQUIDE



© Laurent Zyberman/Graphix-Images/Médiathèque IRSN

Un nombre de plus en plus important de laboratoires utilise cette technique pour la mesure rapide de certains radionucléides de longue période, comme l'uranium, le radium ou le thorium. Cette technique permettant également de quantifier les différents isotopes. La mesure par ICP-MS repose en effet sur la différence de masse entre atomes, et non sur leurs propriétés radioactives. La sensibilité de l'appareil et l'élimination des interférences lors de la mesure permettent d'atteindre de très faibles concentrations (voire des traces), comme celles présentes dans l'environnement : jusqu'à quelques femtogrammes (10-15 g) par gramme d'échantillon. Toutefois, la limite de quantification (masse de l'élément la plus faible mesurable) dépend de la prise d'essai analysée, de la matrice de l'échantillon et de la période radioactive du radionucléide recherché. En effet, à activité (en Bq) égale, un radionucléide de période longue aura un nombre d'atomes plus élevé, et donc une limite de quantification plus faible (figure 23). De ce fait, dans le cadre des analyses réalisées pour la surveillance de l'environnement, les performances des instruments actuels permettent de quantifier à bas niveau les radionucléides ayant une demi-vie supérieure à environ 1 000 ans.

La figure 24 schématise le principe de fonctionnement d'un ICP-MS.

Un ICP-MS est composé d'un système d'introduction, d'un spectromètre permettant la sélection des ions et d'un détecteur. À son introduction, l'échantillon liquide est pulvérisé en fines gouttelettes grâce à un gaz vecteur. Sous l'effet d'un plasma d'argon, les espèces présentes sont atomisées et les atomes sont ionisés. La partie spectromètre de masse permet alors de séparer les ions en fonction du rapport masse/charge (m/z) afin d'isoler les isotopes d'intérêt. Enfin, le détecteur en sortie du spectromètre est un multiplicateur d'électrons et permet de compter les ions et de déduire ainsi leur concentration et leur activité. La capacité de l'ICP-MS à balayer les isotopes très rapidement permet l'analyse de nombreux isotopes en quelques minutes seulement.

FIGURE 23 / CORRÉLATION ENTRE LIMITE DE QUANTIFICATION ET PÉRIODE RADIOACTIVE POUR LES PRINCIPAUX ISOTOPES D'INTÉRÊT

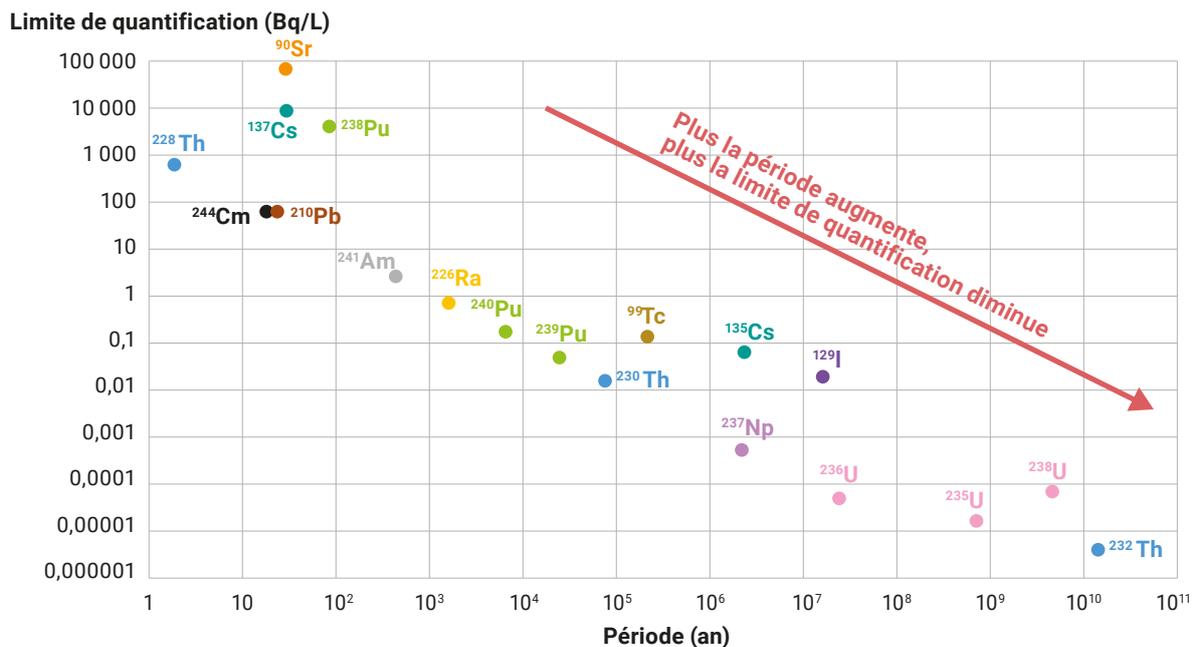
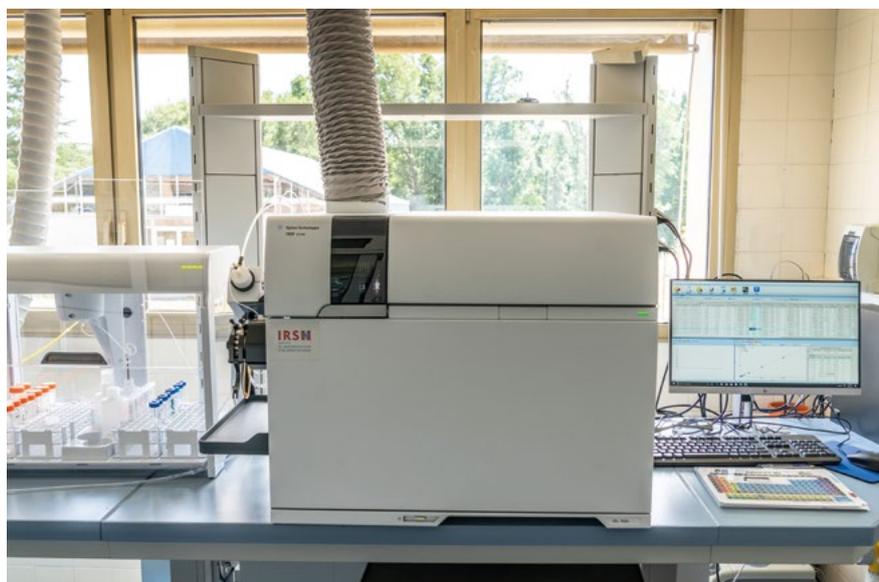
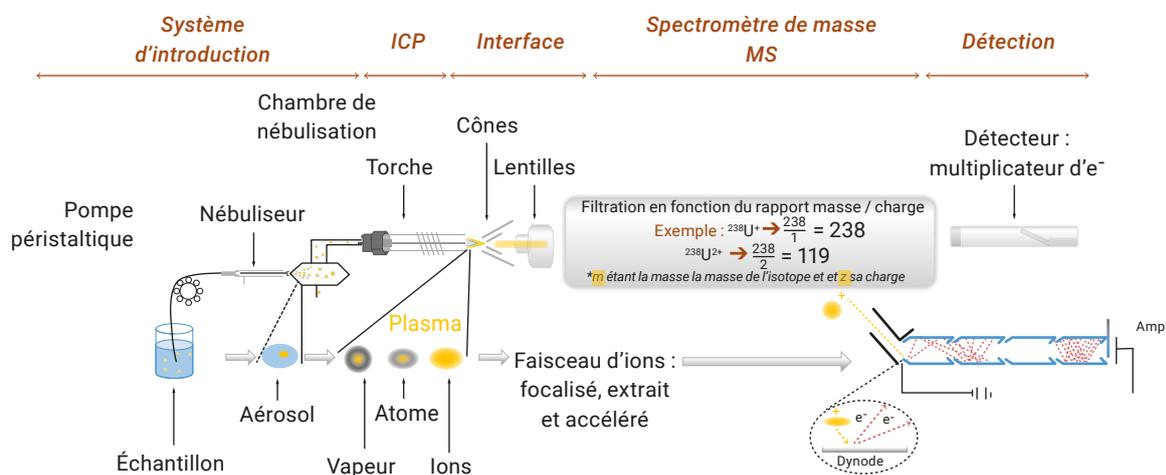


FIGURE 24 / PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'ICP-MS



Spectromètre de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS)

FOCUS LE TRITIUM ORGANIQUEMENT LIÉ (TOL)

Le tritium est un isotope de l'hydrogène, et présente donc le même comportement chimique. Autrement dit, où il y a de l'hydrogène, il y a du tritium. Ainsi, on va s'intéresser à toutes les formes dans lesquelles l'hydrogène intervient :

l'hydrogène gazeux (H_2), l'eau (H_2O), ou bien en tant que composant des molécules organiques (généralement composées de C, H, N et O). Cela correspond respectivement à de l'hydrogène tritié (HT), de l'eau tritiée (HTO) ou du tritium organiquement lié (TOL ou *OBT* en anglais).

Pour mesurer le TOL dans les échantillons solides, on retire préalablement toute présence d'eau tritiée par lyophilisation (cette eau sera quant à elle analysée séparément pour connaître l'activité du HTO dans l'échantillon). Deux techniques de mesure existent : la combustion suivie d'une analyse par scintillation liquide, ou bien la mesure du descendant du tritium, l'hélium-3 (3He), par spectrométrie de masse. Cette méthode, dite de recroissance de l'hélium-3, n'est utilisée que par quelques laboratoires à travers le monde, et en France, elle n'est mise en œuvre pour les échantillons environnementaux qu'à l'IRSN. Chaque technique présente bien sûr ses propres avantages et ses inconvénients.

Combustion suivie d'une mesure par scintillation liquide

Différents systèmes de combustion existent : dans un système clos sous oxygène pressurisé (type bombe de Parr), sous courant d'oxygène avec un dispositif automatisé (type Oxidizer), ou encore sous courant d'oxygène dans un four tubulaire (type Pyroxiser), ces deux derniers systèmes étant les plus employés en France.

La combustion et l'oxydation d'une grande masse d'échantillon (> 100 g), dans un système fermé, permet de récupérer l'ensemble de l'hydrogène de l'échantillon sous forme d'eau. Ces quelques millilitres sont ensuite purifiés par distillation avant d'être analysés par scintillation liquide, comme pour la mesure du HTO. La scintillation liquide permet de déterminer l'activité de l'échantillon en quantifiant la lumière résultante de l'interaction des particules bêta émises par le tritium avec le cocktail scintillant. Pour être capable de détecter les faibles teneurs en TOL – soit un seuil de décision (SD) d'environ 0,7 Bq/L d'eau de combustion – une mesure de 1 000 minutes est nécessaire par échantillon. En connaissant la teneur en hydrogène total de l'échantillon, il est alors possible de convertir cette valeur en Bq/kg sec d'échantillon.

Méthode de recroissance du 3He

Lorsque la masse d'échantillon est trop faible, que l'échantillon ne contient pas assez de matière organique (cas de certains sols ou sédiments par exemple), ou que l'on souhaite atteindre de très faibles limites de quantification, la mesure du TOL par recroissance est privilégiée, voire peut être nécessaire pour disposer de mesures significatives.

Le tritium, en tant que radionucléide, émet une particule bêta (qui permet la mesure en scintillation liquide) pour devenir un isotope stable de l'hélium : l' 3He . L'enjeu de cette technique est de mesurer ce descendant. Pour ce faire, l'échantillon lyophilisé est mis sous vide afin de retirer toutes les molécules de He présentes. Une fois sous vide, l'échantillon est laissé en recroissance afin de permettre la production de 3He par la seule présence du tritium de l'échantillon. Le temps de demi-vie du tritium étant de 12,32 ans, il faut donc quelques mois avant d'obtenir suffisamment de 3He pour permettre sa quantification. Pour mesurer ces quelques atomes de 3He , on utilise un spectromètre de masse pour gaz rares : le gaz présent dans l'échantillon est extrait grâce à un ultravide et les molécules qui pourraient interférer avec la mesure sont piégées avant l'introduction dans l'analyseur. Bien que le temps de recroissance puisse être long, cette technique de pointe présente l'avantage de ne pas détruire l'échantillon tout en mesurant directement l'activité du TOL en Bq/kg sec avec une très faible limite de quantification de l'ordre de 0,02 Bq/kg sec. L'analyse n'étant pas destructive, il est toujours possible de recommencer le processus pour mesurer des valeurs plus faibles en laissant plus de temps pour l'étape de recroissance.

FOCUS LA MESURE DU ^{14}C DANS LES MATRICES VÉGÉTALES

Les matrices végétales sont particulièrement complexes à traiter pour la détermination du ^{14}C . En effet, ces échantillons très riches en matière organique contiennent beaucoup d'éléments gênants pour la mesure (interférents) qu'il est nécessaire de séparer avant la mesure.

Hors de l'influence locale d'une installation nucléaire, l'activité de ^{14}C dans les végétaux est à l'équilibre avec leur milieu (chapitre 3 : Bruit de fond). En 2024, cette activité est de l'ordre de 220 Bq/kg de C. Une faible augmentation de ce niveau peut donc traduire l'influence d'une industrie nucléaire. Les méthodes analytiques actuelles visent donc à atteindre ces niveaux d'activités, tout en réduisant les incertitudes sur les résultats de mesures afin de discerner une variation de l'activité de ^{14}C dans les prélèvements analysés. Historiquement, le CO_2 était extrait de l'échantillon par combustion dans un four à oxidizer. Néanmoins, les incertitudes obtenues avec cette méthode sont de l'ordre de 15 % pour les niveaux d'activités attendus dans les prélèvements de l'environnement. Deux autres méthodes sont donc aujourd'hui mises en œuvre : l'extraction par synthèse benzénique suivie d'une mesure par scintillation liquide ou une graphitisation suivie d'une mesure par spectrométrie de masse par accélération (AMS).

La méthode par synthèse benzénique

L'extraction par synthèse benzénique consiste à synthétiser des molécules de benzène à partir de l'échantillon. Les avantages du benzène sont : son fort taux de carbone, ses propriétés optiques satisfaisantes pour la mesure par scintillation liquide et son état liquide à température ambiante.

La méthode benzénique est particulièrement adaptée aux matrices végétales. En effet, cette méthode permet d'obtenir des résultats avec des incertitudes de l'ordre de 4 à 8 % sur la mesure. *A contrario*, les matrices solides pauvres en carbone, comme les sols et les sédiments, ne peuvent pas être traitées avec cette méthode. La synthèse du benzène est un procédé de chimie organique complexe.

Préparation de l'échantillon par synthèse du benzène

Pour synthétiser le benzène (figure 1), plusieurs étapes sont nécessaires au cours d'un processus d'au moins une semaine : la combustion, la carburation, l'hydrolyse et enfin la trimérisation.

La combustion consiste à brûler l'échantillon sous atmosphère contrôlée afin de transformer l'échantillon – plus exactement les atomes de carbone de ce dernier – en CO_2 . Celui-ci est récupéré pour la seconde étape (carburation) où il est transformé en Li_2C_2 grâce à l'ajout de lithium.

Ensuite, pour l'hydrolyse, de l'eau est ajoutée pour former de l'acétylène (gaz C_2H_2) qui est piégé grâce à de l'azote liquide à $-196\text{ }^\circ\text{C}$.

Enfin, pour obtenir le benzène, de l'oxyde de chrome est ajouté comme catalyseur de la réaction de formation du benzène.

FIGURE 1 / MONTAGE POUR
LA SYNTHÈSE BENZÉNIQUE



© Philippe Dureau/Médiathèque IRSN



Mesure par scintillation liquide

Le benzène obtenu est transféré dans le flacon pour le comptage par scintillation liquide contenant la poudre scintillante. En effet, pour la mesure par scintillation liquide, l'ajout d'un scintillant est nécessaire. Dans ce cas particulier, étant donné que le benzène est déjà un solvant organique, les scintillateurs nécessaires à la mesure peuvent être directement ajoutés sous forme de poudre. Enfin, le flacon est placé dans le compteur à scintillation liquide pour le comptage.

Les performances de cette méthode sont bien adaptées à l'analyse d'échantillons prélevés dans l'environnement. Néanmoins, la faible capacité de traitement des échantillons de cette méthode ne permet pas de répondre seule aux besoins du programme de surveillance de l'environnement.

L'analyse du ^{14}C par spectrométrie de masse par accélération

La spectrométrie de masse par accélération (AMS, *Accelerator Mass Spectrometry*) est la technique la plus performante pour la mesure du ^{14}C dans les matrices végétales. En effet, cette technique permet d'atteindre des limites de détection extrêmement basses, ainsi que de très faibles incertitudes.

L'analyse par AMS a l'avantage de ne nécessiter qu'une très faible masse d'échantillon (quelques milligrammes seulement), ce qui permet de réaliser des mesures sur tous les types de matrices, même faibles en carbone, telles que les sols et sédiments. Cependant, la préparation de l'échantillon (broyage, séchage, homogénéisation) reste une étape primordiale pour garantir la représentativité de la prise d'essai.

L'analyse par AMS, comme toute technique de spectrométrie de masse, permet de quantifier l'isotope ^{14}C par sa masse et non ses propriétés radioactives. Le ^{14}C est beaucoup moins abondant dans la nature que les carbone-12 et carbone-13 ($1,2 \times 10^{-10} \%$ à comparer avec respectivement environ $\approx 99 \%$ et $\approx 1 \%$). Il faut donc un spectromètre de masse très performant pour être capable de détecter les quantités infimes de ^{14}C en présence des autres isotopes du carbone : c'est pour cette raison que le spectromètre est couplé à un accélérateur de particules.

Préparation de l'échantillon

Pour pouvoir être mesuré par l'AMS, le carbone des échantillons doit être converti en un produit contenant presque exclusivement du carbone : le graphite (matériau par exemple des mines des crayons à papier). Pour cela, les échantillons sont le plus souvent soumis à une combustion, ce qui génère du CO_2 . Celui-ci est ensuite purifié, et la quantité requise pour l'étape suivante est isolée et scellée dans un tube de quartz. Ces quelques milligrammes de CO_2 sont par la suite convertis sous forme solide, le graphite, par une réaction d'oxydo-réduction avec l'hydrogène, en présence de fer (catalyseur). Ce mélange est ensuite introduit dans le carrousel de l'AMS.



Principe de fonctionnement de l'AMS

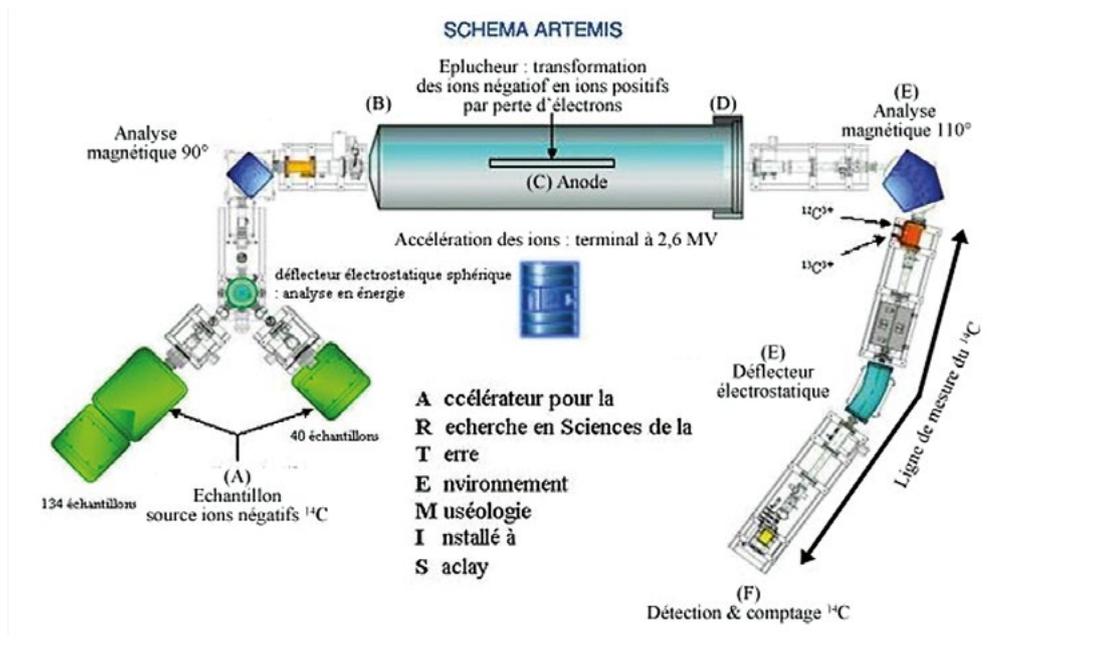
L'échantillon solide est bombardé par des ions Cs⁺, produisant des ions de carbone chargés négativement. Ce type d'ionisation est particulièrement efficace pour éliminer l'élément azote (¹⁴N) qui possède le même nombre de masse. Le faisceau d'ions carbone est ensuite focalisé avant d'être accéléré. Au centre de l'accélérateur se trouve un gaz dit « éplucheur ». La collision des ions carbone négatifs avec le gaz permet de les convertir en ions carbone positifs. Cette étape permet d'éliminer d'autres interférents pour la mesure.

Les ions sont ensuite filtrés par un analyseur magnétique en fonction de leur masse et de leur charge : les particules les plus légères sont plus déviées que les lourdes. Il est ainsi possible de séparer le ¹²C, le ¹³C et le ¹⁴C pour les quantifier individuellement. Le résultat est fourni en fonction du ratio ¹⁴C/¹²C, soit en pourcentage carbone moderne (pMC). La limite de détection de cet équipement est d'environ 0,5 pMC, soit une activité de ¹⁴C de 1 Bq/kg de carbone total, avec des incertitudes de l'ordre de 1 %.



© CEA

FIGURE 2 / SCHÉMA DE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU SPECTROMÈTRE DE MASSE PAR ACCÉLÉRATION ARTEMIS (LMC14, CEA Paris-Saclay)



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

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

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

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

Centraliser

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

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

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

Harmoniser et fiabiliser

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

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

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

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

Restituer

Depuis 2010, le site www.mesure-radioactivite.fr rend accessibles à tous, en toute transparence, les 420 000 mesures réalisées annuellement en France (soit près de 5 millions de mesures en janvier 2024) dans les différents compartiments de l'environnement (l'air, l'eau, le sol, la faune et la flore), dont les produits alimentaires. Initiative unique en Europe, ce site internet permet ainsi à chacun d'appréhender la surveillance de la radioactivité réalisée autour de son lieu de vie.

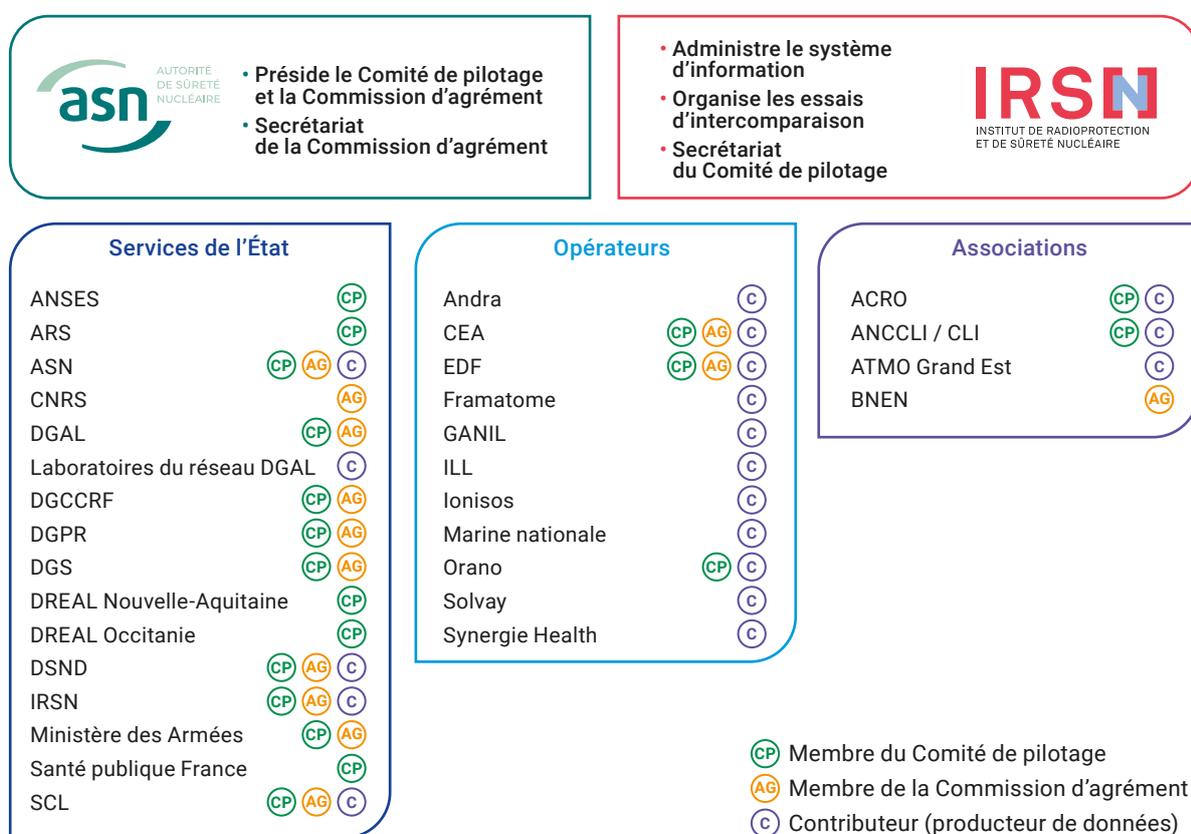
Le site existe également en langue anglaise afin de mieux répondre aux attentes d'un public non francophone.

Le fonctionnement du RNM

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

Les autres acteurs du réseau comprennent des représentants des principaux ministères concernés, des agences sanitaires, des instituts publics, des industriels du nucléaire, des personnes qualifiées et des associations de protection de l'environnement et des consommateurs. La figure 25 présente le schéma d'organisation du RNM.

FIGURE 25 / SCHÉMA D'ORGANISATION DU RNM



UN SITE EN CONSTANTE ÉVOLUTION

Refondu partiellement en 2016, le site internet du RNM a bénéficié d'une nouvelle version en avril 2024. Outre une refonte technique indispensable pour maintenir son bon fonctionnement, cette version intègre des évolutions importantes destinées à améliorer l'accès aux données comme un nouvel onglet dédié spécifiquement aux denrées contrôlées sur le territoire français, ou encore des possibilités accrues de recherche en « mode avancé » : possibilité de choisir un critère de distance à un site nucléaire et de télécharger globalement le fruit de cette recherche. Ces évolutions font partie des pistes identifiées par le groupe de travail « GT Modernisation » mené au sein du comité de pilotage du RNM entre 2022 et 2023.

Les instances de pilotage

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

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

La transmission des résultats de mesures au RNM

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

Chaque contributeur envoie, par un mode de transfert sécurisé *via* internet, ses données formatées selon un protocole d'échange d'informations défini en commun. À ce jour, 17 organismes transmettent des données au réseau national. Environ 35 000 mesures alimentent chaque mois la base de données centrale du réseau depuis sa mise en service en janvier 2009.

L'exploitation et la restitution des informations du RNM

Les données centralisées dans le système d'information du RNM sont restituées au public sous forme cartographique sur le site www.mesure-radioactivite.fr. Elles sont également analysées dans un bilan radiologique de l'état de l'environnement publié tous les trois ans. Ce rapport est le quatrième du genre, les précédents ayant été publiés en 2015 (juin 2011-décembre 2014), 2018 (janvier 2015-décembre 2017) et 2021 (janvier 2018-décembre 2020).

Pour les internautes non spécialistes du domaine, quinze couples matrice/radionucléide dits « témoins », présélectionnés pour leur représentativité, bénéficient d'une analyse particulière. L'utilisateur peut également consulter les mesures réalisées autour de lui (géolocalisation) (figure 26).

FIGURE 26 / TÉMOINS DU RNM FACILITANT L'ACCÈS ET LA COMPRÉHENSION DES DONNÉES



L'agrément des laboratoires

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

Pour être agréés, les laboratoires sont tenus de :

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

Les agréments sont délivrés par décision de l'ASN, sur avis de la commission d'agrément des laboratoires, après examen des demandes d'agrément et au vu des résultats des laboratoires aux essais de comparaison interlaboratoires (EIL) organisés par l'IRSN. Ils sont attribués pour une durée de validité maximale de 5 ans.

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

Les laboratoires agréés dans le cadre du réseau sont :

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

Situation des laboratoires agréés au 1^{er} janvier 2024

Au 1^{er} janvier 2024, le nombre de laboratoires agréés pour la mesure de la radioactivité de l'environnement est de 68, dont 41 laboratoires d'exploitants nucléaires, les autres se répartissant entre les secteurs public (17), privé (7) et associatif (3). Ces laboratoires disposent de 937 agréments (figure 27).

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

La figure 28 ci-après détaille le nombre d'agréments délivrés aux laboratoires par familles de matrices environnementales et par an depuis le 1^{er} janvier 2019.

Qu'est-ce qu'un essai de comparaison interlaboratoires ?

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

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

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

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

Ce type d'essai est organisé par l'IRSN depuis plus de 40 ans, avec actuellement un rythme annuel de 5 à 8 essais dans le cadre du RNM, soit un total de 96 essais depuis 2009 (figure 29).

FIGURE 27 / AGRÉMENTS RNM EN VIGUEUR AU 1^{ER} JANVIER 2024

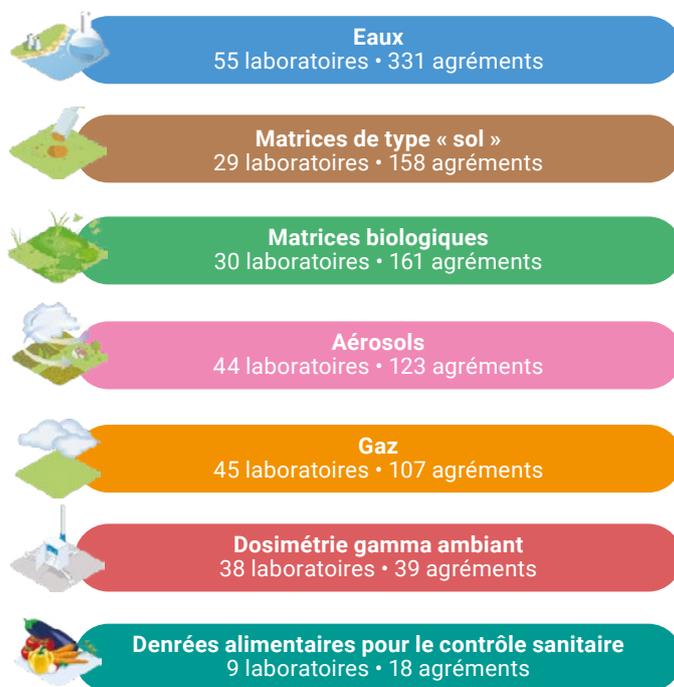


FIGURE 28 / AGRÉMENTS RNM EN VIGUEUR AU 01/01/2024 (hors IRSN)

Nombre d'agrément en vigueur au 1^{er} janvier 2024

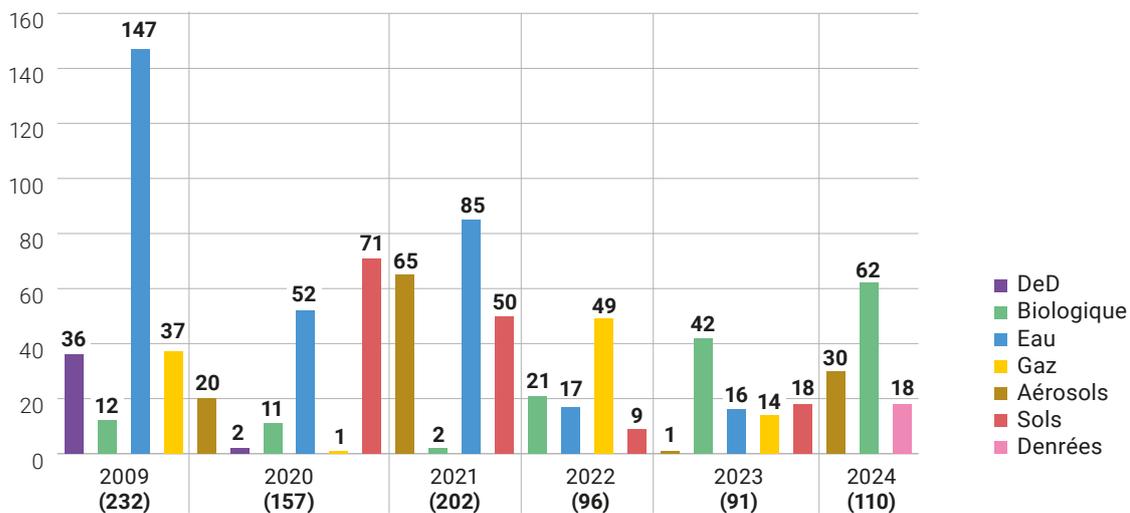
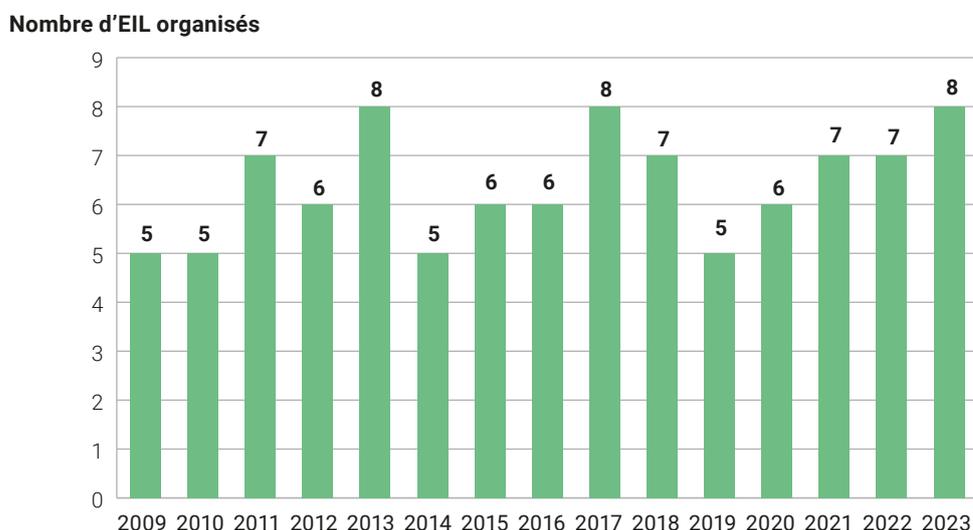


FIGURE 29 / EIL ORGANISÉS PAR L'IRSN DEPUIS 2009



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

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

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

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

CILEI : le site internet des comparaisons interlaboratoires pour l'environnement de l'IRSN

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

2.5. LES SOURCES D'INFORMATION SUR LA SURVEILLANCE DE LA RADIOACTIVITÉ ET LA DIFFUSION DES DONNÉES

L'information du public concernant la radioactivité de l'environnement est un élément essentiel de la transparence des activités nucléaires. La loi TSN du 13 juin 2006, intégrée dans le Code de l'environnement, précise que « la transparence en matière nucléaire est l'ensemble des dispositions prises pour garantir le droit du public à une information fiable et accessible ».

L'ASN, l'IRSN et les acteurs du nucléaire en France proposent de nombreux supports d'information pour répondre d'une part à des obligations légales, et d'autre part aux attentes du public.

La diffusion des données de la surveillance radiologique de l'environnement dépasse le cadre national. En application du traité Euratom et dans le cadre des travaux de la commission OSPAR (page 53), l'IRSN transmet chaque année les résultats de la surveillance qu'il effectue au titre de ses missions. De même, les exploitants nucléaires fournissent également à l'OSPAR leurs données concernant les rejets radioactifs liquides. Ces données font ensuite l'objet d'études et de publications disponibles pour le public *via* différents supports d'information.

Sites internet et supports d'information du public

Portail internet du réseau national de mesures (RNM) de la radioactivité de l'environnement

Le site internet du RNM, lancé le 2 février 2010, est la principale référence française concernant la surveillance de la radioactivité de l'environnement, en offrant notamment un accès centralisé à l'ensemble des résultats de la surveillance environnementale réalisée par l'ensemble des producteurs de données sur le territoire français.

La base de données du RNM est exploitable par un système d'information qui permet de restituer l'ensemble des informations au public et aux experts, notamment grâce à un portail internet cartographique : www.mesure-radioactivite.fr.

En moyenne, plus de 30 000 nouveaux résultats de mesures sont ajoutés chaque mois. Le RNM permet ainsi de disposer d'une vision la plus globale possible sur l'ensemble des mesures de radioactivité réalisées dans l'environnement par les différents acteurs impliqués.

Sites internet des principaux producteurs de données et des acteurs intéressés

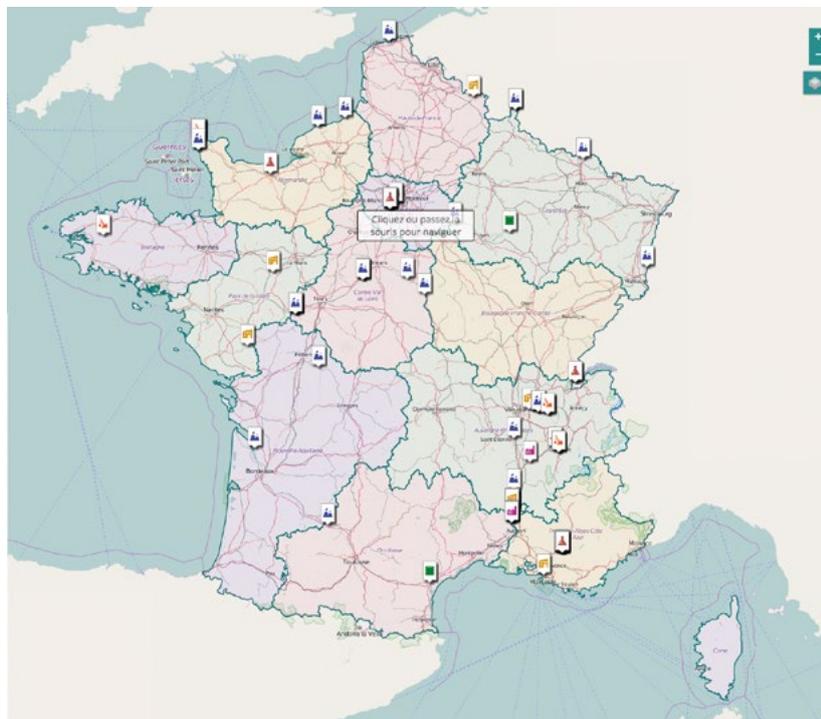
Tous les acteurs de la mesure de la radioactivité de l'environnement disposent de sites internet permettant au public d'obtenir des informations complémentaires sur leurs activités, leurs programmes de contrôle, de surveillance ou d'expertise ponctuelle. Certains sites internet permettent en outre la consultation du rapport annuel d'information du public prévu par le Code de l'environnement, qui comporte notamment une rubrique relative à la nature et aux résultats des mesures des rejets radioactifs et non radioactifs des installations nucléaires dans l'environnement.

Supports d'information de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN)

L'ASN a mis en place une politique d'information fondée sur des supports complémentaires de manière à rendre l'information accessible à ses différents publics. Le site www.asn.fr est le principal outil d'information du public. Il présente l'actualité de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France, et les prises de position de l'ASN dans ses domaines de compétences. Par ailleurs, le site donne accès à une base documentaire sur la vie des installations *via* une navigation simplifiée, un accès aux données amélioré et un téléchargement optimisé des informations ou publications sélectionnées. Depuis 2012, l'ASN a développé sur son site internet une page TV (<https://www.asn.fr/l-asn-informe/videos-de-l-asn>) dédiée à des sujets connexes à la surveillance de l'environnement.

L'ASN met en ligne depuis 2017 une carte de France interactive des installations qu'elle contrôle (figure 30) qui permet d'obtenir des informations générales sur ces installations (description de l'installation, réglementation applicable...), mais également des informations plus détaillées sur les incidents survenus, les lettres de suite d'inspection, ou encore les courriers de position de l'ASN.

FIGURE 30 / CARTE DE FRANCE INTERACTIVE DES INSTALLATIONS CONTRÔLÉES PAR L'ASN



Le Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France, publié annuellement, constitue un document de référence qui informe sur l'état des activités contrôlées par l'ASN dans ces deux domaines. L'ASN publie aussi quatre fois par an la revue *Contrôle*, diffusée à plus de 10 000 destinataires en France et à l'étranger.

Ces publications ainsi que les autres supports d'information de l'ASN (la *Lettre de l'ASN*, les plaquettes et fiches d'information à destination du grand public) sont consultables et téléchargeables sur www.asn.fr. Elles sont également à disposition au centre d'information et de documentation du public de l'ASN.

Supports d'information de l'institut de radioprotection et sûreté nucléaire (IRSN)

Informier et sensibiliser le grand public aux enjeux liés aux risques nucléaires et radiologiques est l'une des missions de l'Institut. À ce titre, l'IRSN développe des supports d'information pédagogiques pour permettre l'accès, au plus grand nombre, aux informations scientifiques et techniques essentielles sur les sujets couverts par l'Institut.

Ainsi, le site www.irsn.fr, refondu en 2023 pour mieux capter l'attention et l'intérêt du grand public, permet

de retrouver rapidement les informations essentielles liées à l'activité de l'Institut. La page d'accueil met en avant, en textes et en vidéos, les actualités, les contenus récents et les « Grands dossiers ». Des rubriques thématiques (environnement, santé, sûreté...) permettent un accès rapide aux nombreux contenus et formats disponibles, ainsi qu'aux avis et rapports de l'Institut sur chaque thème. La section « La recherche » permet de découvrir les laboratoires, projets scientifiques et installations expérimentales. Le site met en avant sa base de connaissances, riche en contenus pédagogiques, en infographies, en podcasts et en vidéos pour faciliter la compréhension du public.

L'IRSN met également à disposition du public un accès à sa médiathèque riche en photographies, vidéos et infographies illustrant ses activités de recherche et d'expertise.

Repères, le webmagazine trimestriel de l'IRSN à lire désormais sur reperes.irsn.fr, a pour vocation de donner aux professionnels et au grand public des clés de compréhension concernant la radioprotection, la sûreté et la sécurité nucléaires, avec une approche pédagogique de la prévention des risques. Le webmagazine décrypte les actualités liées à ces enjeux et relaie les actions de l'Institut dans ces domaines.

Le Rapport d'activité annuel de l'IRSN, disponible via son site internet dédié, permet d'avoir une vision synthétique des activités de l'IRSN, des principales expertises ou avancées de recherche dans tous les domaines couverts pour l'Institut.

Enfin, grâce à une présence digitale structurée et variée, l'IRSN communique de façon très régulière sur des sujets diversifiés allant de la pédagogie à des informations très techniques avec le même souci d'information.

Le Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire

Créé par le Code de l'environnement (article L. 125-34), le Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN) est une instance d'information, de concertation et de débat sur les risques liés aux activités nucléaires et l'impact de ces activités sur la santé des personnes, sur l'environnement et sur la sécurité nucléaire. À ce titre, le Haut Comité peut émettre un avis sur toute question dans ces domaines, ainsi que sur les contrôles et l'information qui s'y rapportent. Il peut également se saisir de toute question relative à l'accessibilité de l'information en matière de sécurité nucléaire et proposer toute mesure de nature à garantir ou à améliorer la transparence définie à l'article L. 125-12 du Code de l'environnement.

Il peut enfin être saisi par :

- le ministre chargé de la sûreté nucléaire ;
- les présidents des commissions compétentes de l'Assemblée nationale et du Sénat ;
- le président de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques ;
- les présidents des commissions locales d'information ;
- les exploitants d'installations nucléaires de base de toute question relative à l'information concernant la sécurité nucléaire et son contrôle.

Le HCTISN est composé de membres nommés pour six ans par décret, au nombre de quatre pour les parlementaires et de six au titre de chacune des autres catégories, ainsi répartis :

- deux députés désignés par l'Assemblée nationale et deux sénateurs désignés par le Sénat ;
- des représentants des commissions locales d'information ;
- des représentants d'associations de protection de l'environnement et d'associations mentionnées à l'article L. 1114-1 du Code de la santé publique ;

- des représentants des entités responsables d'activités nucléaires ;
- des représentants d'organisations syndicales de salariés représentatives ;
- des personnalités choisies en raison de leur compétence scientifique, technique, économique ou sociale, ou en matière d'information et de communication, dont trois désignées par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, une par l'Académie des sciences et une par l'Académie des sciences morales et politiques ;
- des représentants de l'Autorité de sûreté nucléaire, des services de l'État concernés et de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire.

Le président du Haut Comité est nommé par décret parmi les parlementaires, les représentants des commissions locales d'information et les personnalités choisies en raison de leur compétence.

Rapports « environnement » des installations nucléaires

Les exploitants sont soumis à des obligations légales d'information, soit générales (comme le rapport environnement prévu par le Code du commerce pour les sociétés par actions), soit spécifiques au domaine nucléaire.

Le Code de l'environnement impose à tout exploitant d'installation nucléaire d'établir chaque année un rapport sur sa situation et les actions qu'il mène, notamment dans le domaine de la surveillance radiologique de l'environnement de son installation. En parallèle, la réglementation impose également aux exploitants la publication d'un rapport environnemental annuel en application des règles générales relatives aux installations nucléaires de base (arrêté du 7 février 2012). *« L'exploitant établit annuellement un rapport présentant l'impact de son installation durant l'année civile écoulée. Ce rapport caractérise les prélèvements d'eau, les rejets d'effluents, la surveillance de l'environnement et les impacts et nuisances occasionnés. Le rapport est transmis, à l'Autorité de sûreté nucléaire, à la direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement, à l'Agence régionale de santé, au service chargé de la police de l'eau, ainsi qu'à la commission locale d'information. »*

L'ASN procède chaque année à une analyse de ces documents et publie dans son rapport annuel les principales conclusions relatives au traitement des rubriques mentionnées dans la loi, aux éléments stratégiques et à la pédagogie sur la transparence et le droit d'accès à l'information nucléaire.

Diffusion d'information dans le cadre de traités ou conventions internationales

L'action de l'IRSN en matière d'information sur la surveillance de la radioactivité de l'environnement s'opère également au niveau international, notamment dans le cadre du traité Euratom et de la Commission pour la protection du milieu marin de l'Atlantique Nord-Est, dite Commission OSPAR.

La diffusion des données françaises dans le cadre du traité Euratom

Chaque année, l'IRSN transmet à la Commission européenne, au nom de l'État français, plusieurs milliers de résultats de mesures de la radioactivité de l'environnement portant sur les particules aérosols, l'eau et le lait, pour satisfaire aux exigences des articles 35 et 36 du traité Euratom. Cet envoi est complété par un déversement automatique des moyennes horaires du débit de dose ambiant mesurées par les sondes du réseau Téléray sur la plateforme EURDEP (*European Radiological Data Exchange Platform*). La Commission européenne édite régulièrement un rapport de synthèse au niveau européen issu de l'exploitation des données transmises par les États membres. Un portail internet public, <https://remon.jrc.ec.europa.eu>, permet de se connecter aux différentes bases de données de la Commission européenne pour en visualiser les résultats.

Les données transmises à la commission OSPAR

La mission de la convention OSPAR est de protéger l'environnement marin de l'Atlantique Nord-Est, en prévenant et supprimant la pollution, en protégeant l'environnement marin contre les effets néfastes des activités humaines et en contribuant à l'usage durable des mers.

Cette commission est composée de représentants des gouvernements des 15 parties contractantes (Allemagne, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Irlande, Islande, Luxembourg, Norvège, Pays-Bas, Portugal, Royaume-Uni, Suède et Suisse) et de la Commission européenne, ainsi que d'organisations non gouvernementales.

L'IRSN est impliqué dans les travaux de la Commission OSPAR et transmet des données de radioactivité relatives aux prélèvements marins réalisés sur la façade Atlantique – Manche (eau, sédiments, faune et flore) qui ont été utilisées pour la mise en place d'une « ligne de base », point de référence permettant d'apprécier régulièrement les progrès accomplis depuis 1998 dans la diminution du marquage environnemental imputable aux activités humaines. Ces transmissions de données annuelles sont amenées à se poursuivre.

Enfin, la France rédige périodiquement un rapport incluant également des informations relatives à la surveillance de l'environnement opérée par les exploitants des INB (recommandation PARCOM 91/4) (voir le site <https://www.ospar.org/documents?v=6961>).

Pose de détecteurs radon dans une cave viticole près de Saumur





03

LE « BRUIT DE FOND » RADIOLOGIQUE FRANÇAIS

3.1. LE BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE NATUREL	56
Le rayonnement cosmique et les radionucléides cosmogéniques dans l'environnement	56
Les radionucléides telluriques dans l'environnement	58
3.2. LE BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE RÉMANENT DES RETOMBÉES ANCIENNES	65
Retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires	65
Retombées de l'accident de Tchernobyl	73
Retombées de l'accident de Fukushima	75
3.3. GAMMES D'ACTIVITÉS MASSIQUES ET VOLUMIQUES DU BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE FRANÇAIS	76
3.4. GAMME DES DOSES À LA POPULATION, LIÉES AU BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE FRANÇAIS	83
Doses efficaces externes liées aux rayonnements cosmique et tellurique	83
Doses efficaces par ingestion de radionucléides naturels <i>via</i> l'alimentation et le tabagisme	83
Dose efficace liée à l'inhalation de radon	85
Doses efficaces liées à la rémanence des retombées anciennes de radionucléides artificiels	86
Bilan des doses efficaces liées au bruit de fond radiologique français	86

03

LE « BRUIT DE FOND » RADIOLOGIQUE FRANÇAIS

On désigne par « bruit de fond » radiologique les activités des différents radionucléides présents dans l'environnement, en dehors de toute influence anthropique actuelle (industrie nucléaire, autres industries, rejets hospitaliers...). Ce bruit de fond résulte d'une part de sources naturelles, et d'autre part de la rémanence d'apports anciens de radionucléides artificiels qui ont concerné l'ensemble du territoire ; il s'agit notamment des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires et des retombées de l'accident de Tchernobyl (cf. Rapport IRSN/DG 2022-00131 relatif au bruit de fond des radionucléides artificiels dans l'environnement français). Ce bruit de fond contribue aux expositions radiologiques auxquelles est soumise la population. Ce chapitre décrit le bruit de fond naturel (chapitre 3.1), le bruit de fond d'origine artificielle (chapitre 3.2), puis donne des éléments relatifs à l'exposition radiologique de la population qu'il engendre (chapitre 3.3).

3.1. LE BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE NATUREL

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

Le rayonnement cosmique et les radionucléides cosmogéniques dans l'environnement

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

Variabilité du rayonnement cosmique

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

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

Le tritium cosmogénique

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

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

Les activités de tritium mesurées actuellement dans l'environnement sont toujours supérieures à ces valeurs. En effet, à ce tritium naturel s'ajoute la rémanence du tritium apporté par les retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires réalisés dans l'hémisphère nord de 1945 à 1980, principalement entre 1953 et 1963 (chapitre 3.2 relatif aux retombées des essais nucléaires).

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

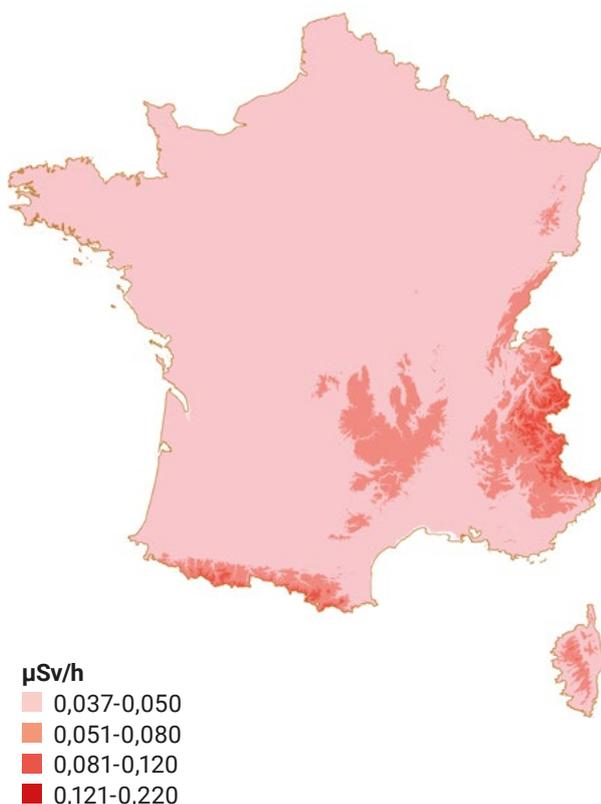
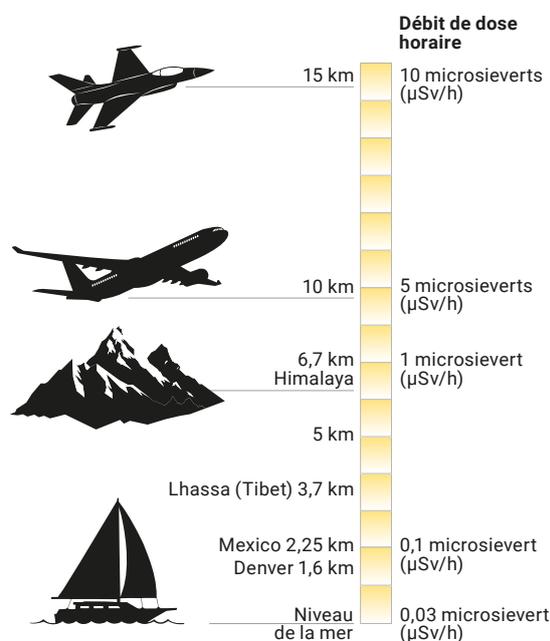


FIGURE 2 / ÉVOLUTION DU DÉBIT DE DOSE AVEC L'ALTITUDE ($\mu\text{Sv/h}$)



Le carbone-14 cosmogénique

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

Comme pour le tritium, de grandes quantités de carbone-14 ont été produites lors des essais atmosphériques d'armes nucléaires (chapitre 3.2 relatif aux retombées des essais nucléaires).

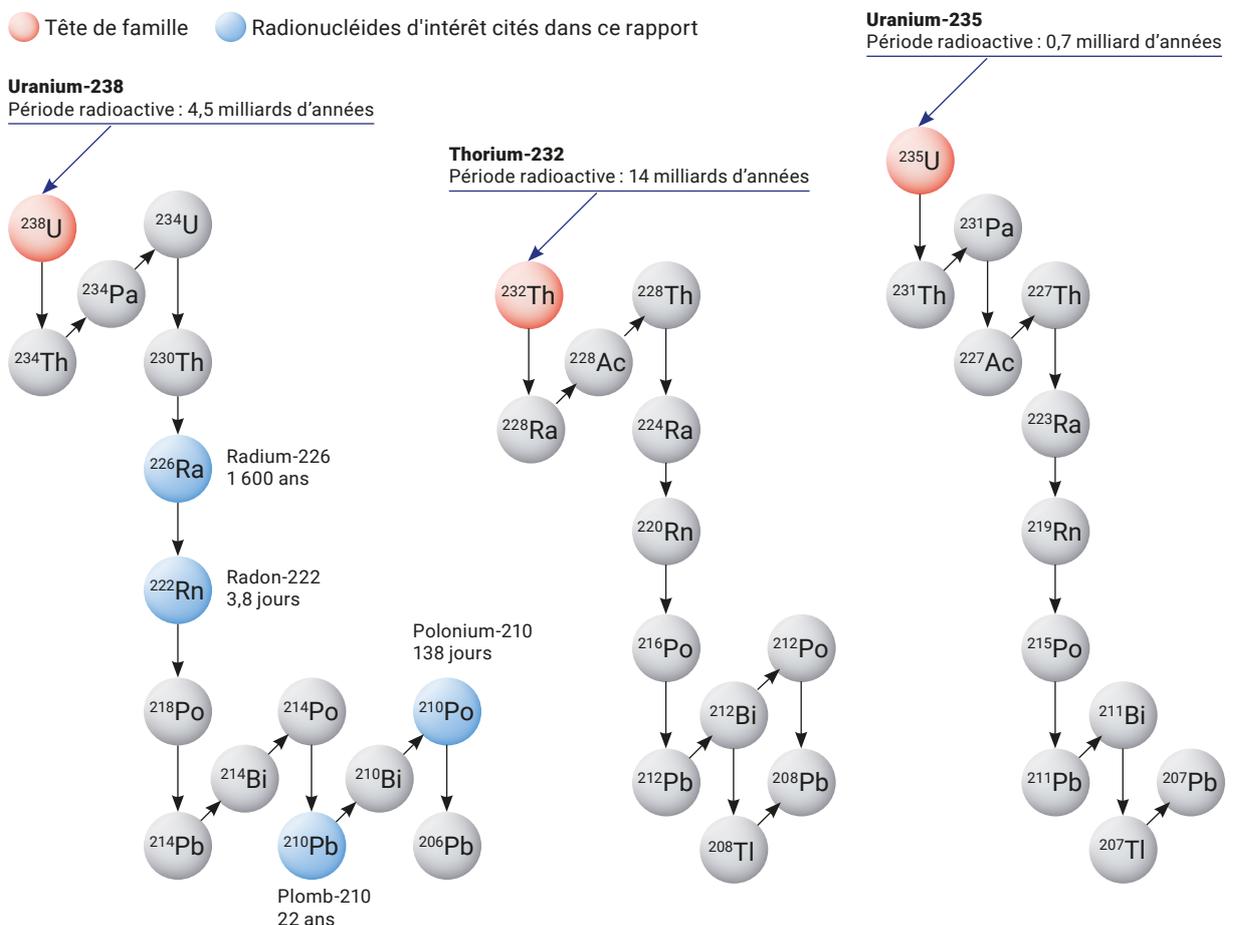
Les radionucléides telluriques dans l'environnement

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

Le potassium-40

Le potassium est un élément très répandu sur Terre où il est contenu dans de nombreux minéraux. Même si le potassium-40 ne représente que 0,0117 % de la masse du potassium, ce radionucléide est le plus abondant dans l'environnement avec des activités de plusieurs centaines de Bq/kg sec dans les sols et les sédiments continentaux et marins (figure 18). Élément majeur pour les organismes vivants, le potassium (dont le ^{40}K) est fortement transféré aux végétaux et animaux, ce qui explique les activités de l'ordre de la centaine de Bq/kg frais dans les denrées (figure 19). Ces activités sont de loin les plus importantes de tous les radionucléides naturels et artificiels présents dans l'environnement, en dehors de toute influence anthropique locale.

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



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

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

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

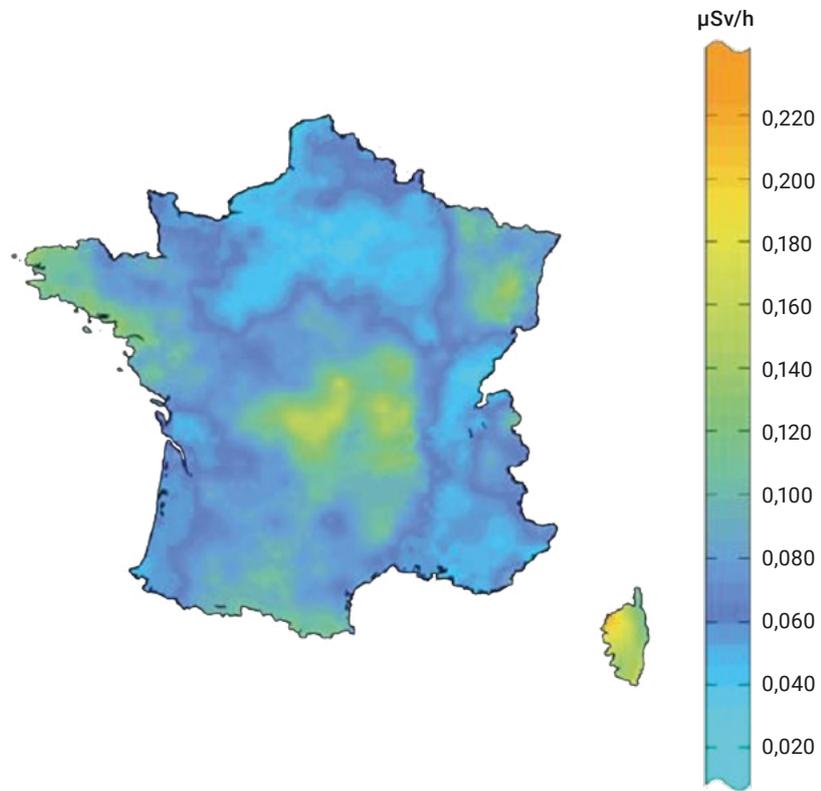
Variabilité de la teneur en uranium et thorium des sols et variabilité du débit de dose lié au rayonnement tellurique

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

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

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

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



© Gilles Deschamps/Signatures/Médiathèque IRSN

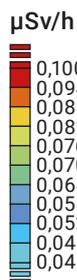
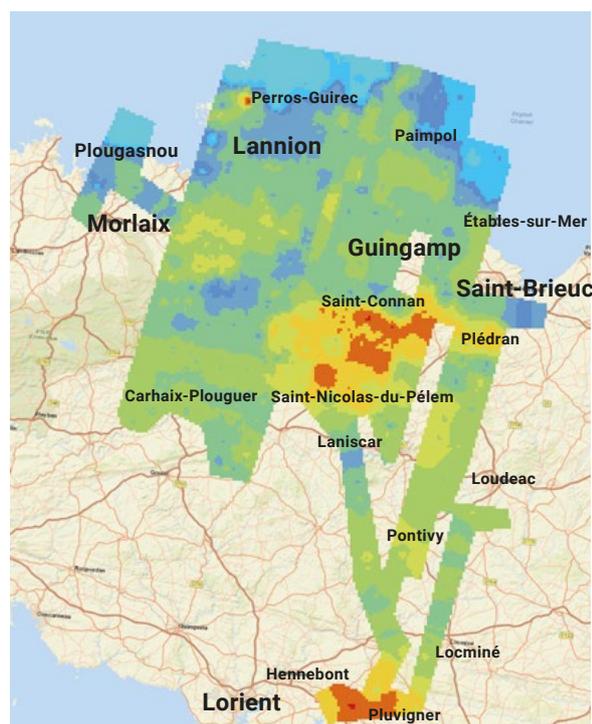
La variabilité des teneurs en uranium et thorium des sols et la variabilité du débit de dose dans l'air qu'elle engendre sont également bien visibles à l'échelle régionale. Ainsi, la figure 5A présente les variations du débit de dose à l'échelle de la partie nord de la Bretagne. Cette carte a été établie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

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

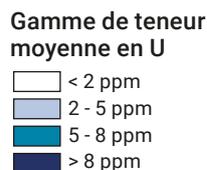
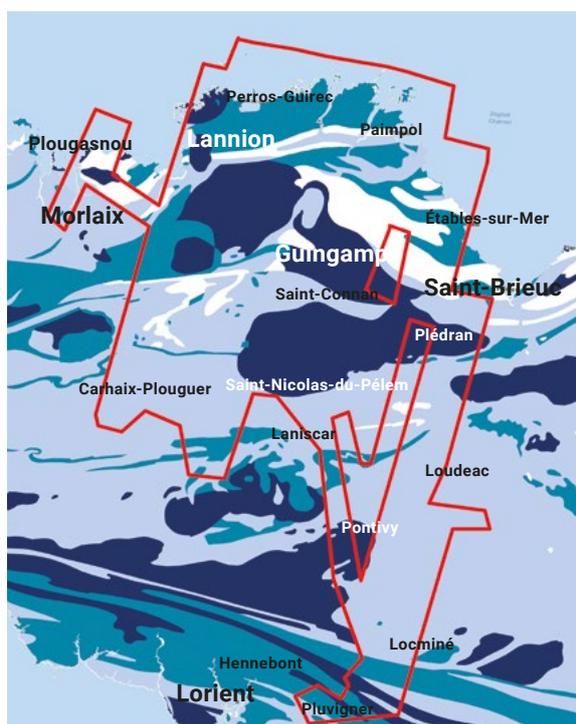
Enfin, une variabilité très locale, à l'échelle métrique, peut être observée en des points particuliers du territoire (cf. focus p. 50 du *Bilan radiologique 2018-2020*).

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

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



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



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

Variabilité de la teneur en radon de l'air extérieur

→ Pour en savoir plus :
<https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/environnement/risque-radon-10-questions>

Le radon est un gaz radioactif omniprésent à la surface de la Terre où il se forme lors de la désintégration de l'uranium et du thorium naturellement présents dans les sols et les roches. Le radon existe sous trois isotopes (^{219}Rn , ^{220}Rn , ^{222}Rn), mais seul le radon-222 présente une demi-vie suffisamment longue (3,8 jours) pour permettre d'observer des activités volumiques non négligeables dans l'environnement. Le radon-222 fait partie de la chaîne de désintégration de l'uranium-238 et provient de la désintégration du radium-226 (figure 3, p. 58).

Le radon émane des sols et des roches, en quantité variable en fonction des propriétés de celles-ci (nature géologique, teneur en radium, porosité, perméabilité à l'air). Les activités volumiques du radon dans l'air présent dans le sol sont plus élevées dans les régions caractérisées par des roches plus riches en uranium, telles que certains granites et certaines roches métamorphiques (Massif armoricain, Massif central, Vosges, Corse...), voire plus exceptionnellement dans des formations sédimentaires (dans la région de Lodève par exemple) ou karstiques. Une grande variabilité des activités en radon peut donc être observée à l'échelle du territoire national, mais aussi comme pour le débit de dose, à l'échelle régionale et même communale. De plus, l'existence de certains paramètres géologiques structuraux (présence de failles, cavités souterraines, sources thermales...) peut constituer un facteur facilitant les conditions de transfert du radon vers la surface. La connaissance de la géologie du territoire a conduit à l'établissement d'une carte nationale du potentiel radon (figure 6), permettant de cibler les zones les plus propices à la production et au transfert du radon vers la surface du sol et l'atmosphère.

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

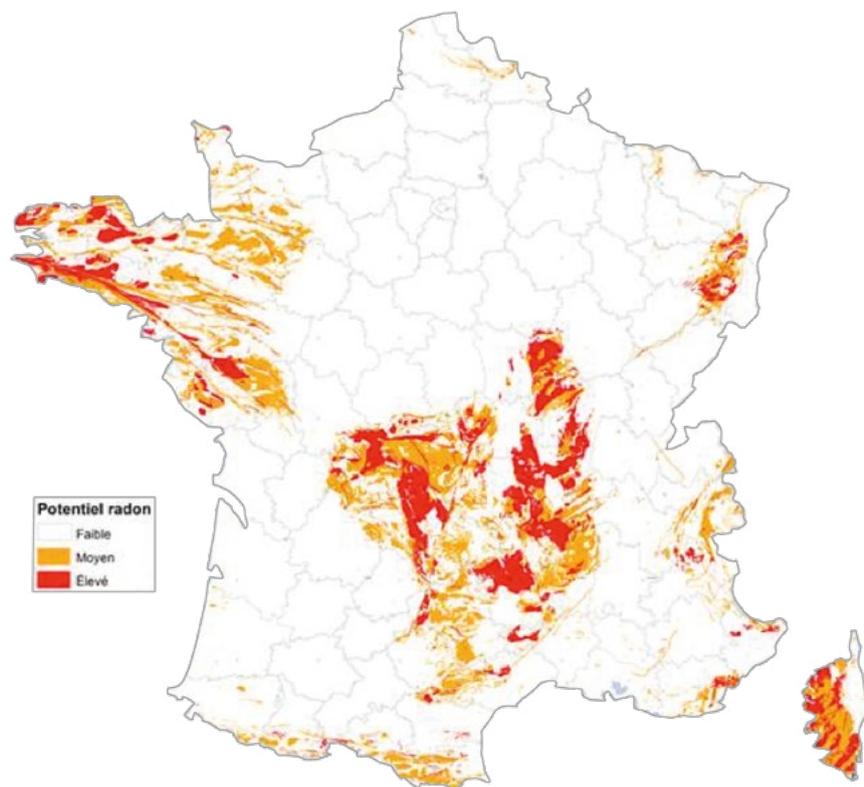
En plus des propriétés des sols et des roches, l'émission du radon vers l'atmosphère dépend également des conditions météorologiques. Ces dernières (vent, pluies, froid, etc.) jouent sur la variation de l'activité en radon dans le temps en un lieu donné.

Les activités volumiques observées dans l'atmosphère sont beaucoup plus faibles que dans le sol : elles varient de quelques Bq/m^3 à une centaine de Bq/m^3 , avec une moyenne de quelques dizaines de Bq/m^3 . Ces activités varient selon de nombreux facteurs, dont la géologie du point considéré, la distance au sol, la topographie, ainsi que les conditions atmosphériques. Par exemple, à l'échelle de quelques centaines de mètres, des écarts peuvent être observés entre un fond de vallée encaissé peu ventilé où le radon se concentre, une position intermédiaire en mi-pente et une zone sommitale mieux aérée où le radon se disperse plus facilement (chapitre 3 du *Bilan radiologique 2021-2023*). Enfin, des fluctuations journalières en un même point peuvent être observées avec des valeurs plus élevées au niveau du sol au coucher et au lever du soleil, lorsque les circulations d'air sont réduites.

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

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

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

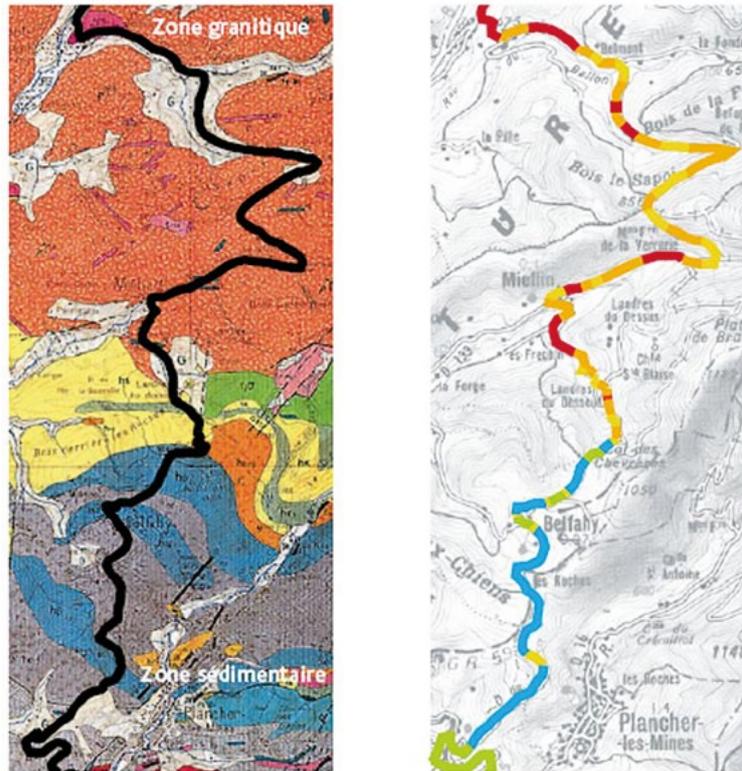


La figure 7 présente les activités volumiques du radon dans l'atmosphère mesurées à deux mètres au-dessus du sol, le long d'une route dans la partie sud du massif des Vosges. Ces mesures ont été réalisées au moyen d'un laboratoire mobile se déplaçant de nuit à faible vitesse. Cette cartographie met en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

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

Les radionucléides naturels présents dans le sol peuvent être absorbés par les racines des végétaux. Ceux présents dans l'air, notamment le polonium-210 et le plomb-210 descendants du radon, se déposent sur leurs feuilles. De tous les descendants des chaînes de désintégration de l'uranium et du thorium, ces deux radionucléides présentent les activités les plus élevées dans les denrées (figure 19, p. 78). Par ailleurs, l'absorption des isotopes du radium par les racines des végétaux est en général beaucoup plus forte que celle des isotopes de l'uranium ou du thorium. Il en résulte une activité en radium des végétaux plus importante.

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



Carte IGN n° 31 au 1/100 000

— = 1 km



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

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

Les teneurs en descendants des chaînes de l'uranium et du thorium des eaux de surface et des eaux souterraines sont extrêmement variables en raison de la variabilité des teneurs dans les roches et les sols, et aussi des caractéristiques physico-chimiques des eaux qui peuvent varier. Pour l'uranium-238, l'uranium-234, le radium-226 et le radium-228, les activités dans les cours d'eau, majoritairement inférieures à 0,1 Bq/L (plus de 95 %), vont de moins de 0,001 Bq/L jusqu'à atteindre exceptionnellement 1 Bq/L. Des valeurs plus élevées sont observées dans les eaux de surface sous influence des anciens sites miniers (chapitre 3 du *Bilan radiologique 2021-2023*).

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

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

3.2. LE BRUIT DE FOND RADIOLOGIQUE RÉMANENT DES RETOMBÉES ANCIENNES

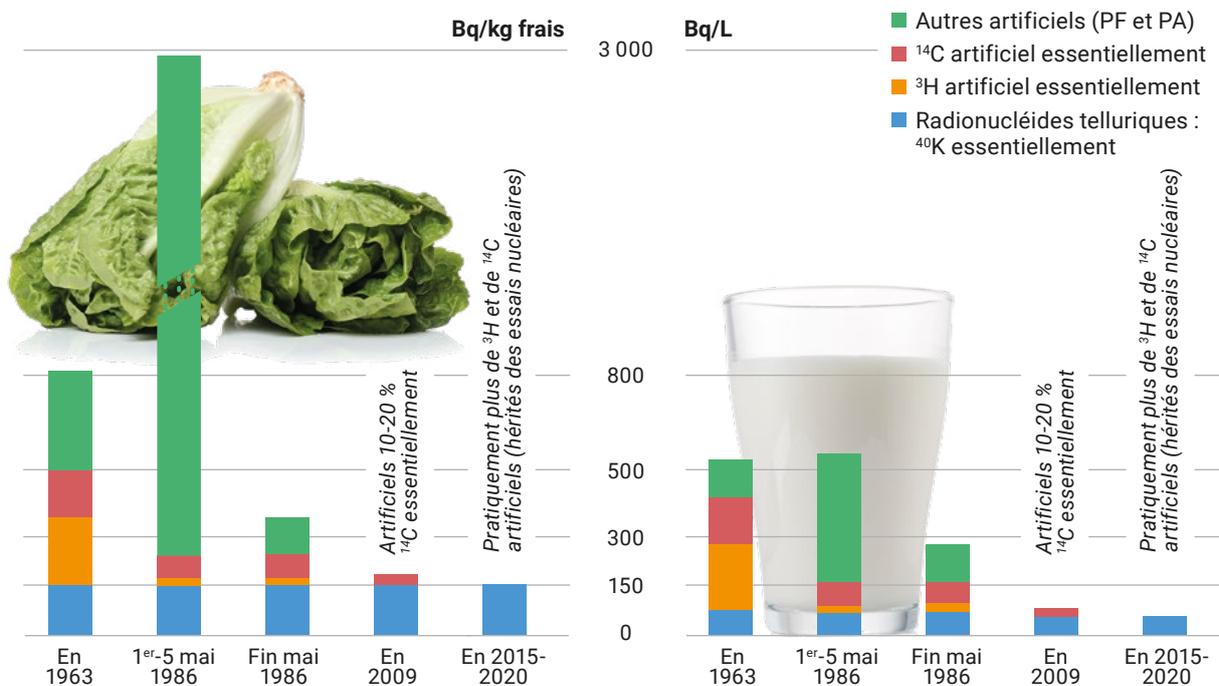
La connaissance du bruit de fond environnemental des radionucléides artificiels hérités des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires et de l'accident de Tchernobyl répond à plusieurs objectifs : estimer les expositions des populations qui en résultent, déterminer les activités ajoutées du fait des rejets des installations nucléaires, et disposer d'un référentiel actualisé dans l'éventualité d'un accident ou de toute autre cause d'augmentation d'un niveau radiologique environnemental. Ce bruit de fond a fait l'objet d'un rapport de l'IRSN paru en 2022 (Rapport IRSN/DG 2022-00131) dont sont extraits les éléments suivants.

Retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires

De 1945 à 1980, plus de 500 essais atmosphériques d'armes nucléaires ont été réalisés par les États-Unis, l'Union soviétique, la Grande-Bretagne, la Chine et la France⁽¹⁾. L'essentiel des retombées radioactives s'est produit sur deux périodes : de 1951 à 1958 et de 1961 à 1962 avant le moratoire de 1963. Ces essais ont relâché dans l'atmosphère de nombreux radionucléides, dont une vingtaine était régulièrement mesurée dans l'air en France (figure 22, p. 81), dans les eaux de pluie et diverses denrées. En 1963, au plus fort de ces retombées radioactives, l'activité moyenne de l'air en radionucléides artificiels a atteint 8 Bq/m³ (dont 6 Bq/m³ de tritium), celle des salades 650 Bq/kg frais (dont 1/3 de tritium et 1/5 de carbone-14), celle du lait 450 Bq/L (figure 8). La plupart des radionucléides de période radioactive courte (inférieure à 3 ans) issus de ces retombées ayant disparu, il ne subsiste aujourd'hui que le tritium, le carbone-14 (^{14}C), le césium-137 (^{137}Cs), le strontium-90 (^{90}Sr), les isotopes 238, 239, 240 et 241 du plutonium (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu et ^{241}Pu) et l'américium-241 (^{241}Am) provenant de la désintégration du plutonium-241.

Pour l'ensemble de ces radionucléides, à l'exception du tritium et du carbone-14, le sol constitue aujourd'hui le réservoir qui alimente toutes les autres composantes de l'environnement : l'air par remise en suspension, les végétaux par absorption racinaire et dépôt sur les feuilles des particules remises en suspension, les cours d'eau par drainage des sols et les animaux

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



par ingestion. La figure 9 présente la carte des dépôts cumulés de plutonium-239+240, de césium-137 et de strontium-90 dans les sols à l'issue des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires. La majeure partie de ces dépôts radioactifs se sont constitués lors de précipitations. C'est pourquoi cette carte est le reflet des hauteurs moyennes annuelles des précipitations sur le pays.

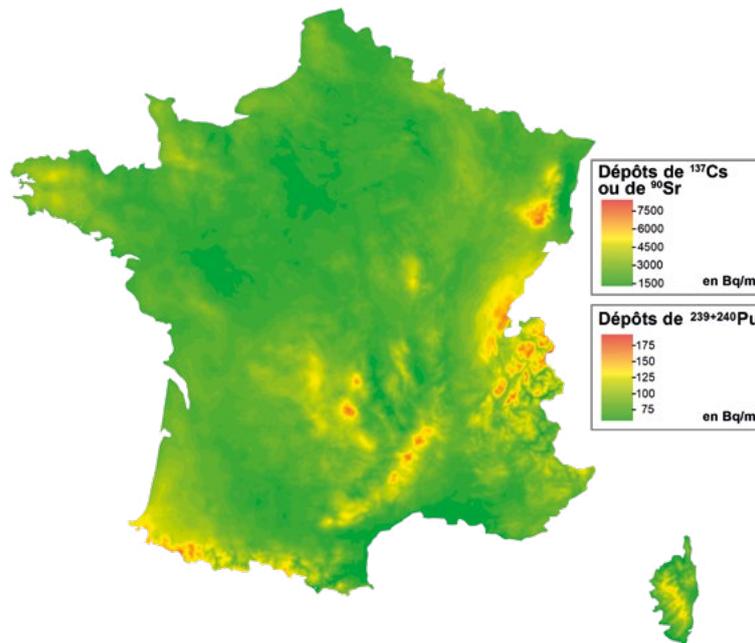
Les activités de ces radionucléides dans les sols ont ensuite diminué, d'une part par décroissance radioactive et d'autre part en raison de différents phénomènes, dont leur migration en profondeur. Cette diminution a entraîné la diminution de la concentration de ces radionucléides dans les denrées et, de manière plus générale, dans toutes les autres composantes de l'environnement, mais à des vitesses très variables suivant les radionucléides et les régions (figure 17, p. 74).

Cas du strontium-90

Les activités de strontium-90 dans les sols ont pu diminuer de près de 100 fois depuis l'année des retombées maximales en 1963, passant de quelques dizaines de Bq/kg à moins de 1 Bq/kg. Cette diminution est liée en grande partie à la solubilité de cet élément qui facilite sa migration vers la profondeur des sols et son drainage vers les cours d'eau, et dans une moindre mesure à sa période radioactive (28 ans). Cette diminution est en partie à l'origine de celle des denrées : les activités de strontium-90 dans le lait sont passées de quelques Bq/L en 1963 à moins de 0,1 Bq/L ces dernières années. La baisse des teneurs en strontium-90 des sols s'est également directement répercutée sur les cours d'eau. Ainsi, les activités volumiques de strontium-90 dissous dans les eaux de la Seine sont passées de 0,01 Bq/L en 1967 à 0,002 Bq/L sur la période 2008-2019. Dans les poissons de rivière, cette diminution a été de l'ordre de 100 fois entre 1978 et 2015 (de l'ordre de 1 Bq/kg frais dans les années 1970 à 0,01 Bq/kg frais ces dernières années).

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

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



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

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

Les dépôts de plutonium consécutifs aux retombées des essais nucléaires (et à la désintégration du satellite américain SNAP9 en 1964) ont été de l'ordre de 40 fois plus faibles que ceux de strontium-90 ou de césium-137. Par ailleurs, ce radioélément ne s'est pratiquement pas déposé en France à la suite de l'accident de Tchernobyl. Comme le césium, et contrairement au strontium, le plutonium migre peu vers la profondeur

et se trouve toujours essentiellement dans les 10 cm de surface des sols, près de 60 ans après la fin de la principale période des essais atmosphériques. Il en résulte que sur la majeure partie du territoire, les activités massiques de plutonium à la surface des sols sont en moyenne de 0,2 à 0,4 Bq/kg secs, soit 20 à plus de 100 fois plus faibles que celles de césium-137, mais moins de 10 fois inférieures à celles de strontium-90 (dont les activités massiques ont fortement baissé au fil des décennies). Sur certaines zones des Vosges, du Massif central et d'altitude dans les Alpes et les Pyrénées, les activités massiques de plutonium dans les sols peuvent en moyenne atteindre 1 Bq/kg sec, exceptionnellement 2 Bq/kg sec pour les valeurs les plus élevées.

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

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

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

Cas du tritium et du carbone-14

Contrairement aux autres radionucléides dont les retombées ont été spatialement hétérogènes, le réservoir de tritium et de carbone-14 pour l'ensemble de la biosphère reste l'air et leurs concentrations y sont très homogènes. Ces radionucléides intègrent les végétaux par la photosynthèse et, dès lors, suivent les cycles de la matière organique et de l'eau (dans le cas du tritium). De ce fait, les concentrations en tritium et en carbone sont assez homogènes au sein des compartiments atmosphériques et continentaux (terrestres et aquatiques⁽²⁾) d'une part, et du compartiment aquatique

marin d'autre part⁽³⁾. Cette homogénéité ainsi que les particularités des transferts de ces deux radionucléides permettent de disposer d'indicateurs d'activités particuliers, communs à toutes les composantes de l'environnement. Pour le carbone-14, il s'agit de l'activité de carbone-14 par unité de masse de carbone (Bq/kg de carbone) ; pour le tritium, il s'agit de l'activité volumique exprimée en Bq/L d'eau, qu'il s'agisse d'eau de pluie, de cours d'eau, d'eau marine, d'eau contenue dans les organismes vivants ou d'eau issue de l'hydrogène contenu dans la matière organique. Ces indicateurs permettent de caractériser le bruit de fond de ces radionucléides dans toutes les composantes de l'environnement de manière beaucoup plus précise que les activités massiques et volumiques habituelles (Bq/kg frais ou sec ou Bq/L dans un échantillon), auxquelles elles sont cependant directement liées. Cette précision leur confère une meilleure sensibilité à déceler de très faibles influences des rejets d'une installation nucléaire et aussi la possibilité de suivre également avec précision l'évolution temporelle des concentrations de ces deux radionucléides.

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

La figure 10 présente l'évolution de l'activité de carbone-14 par unité de masse de carbone, commune à tout l'hémisphère nord depuis 1950. Cette activité est passée du niveau cosmogénique de 226 Bq/kg de C, antérieur aux essais nucléaires (chapitre 3.1 sur les radionucléides cosmogéniques), à près de 420 Bq/kg de C en 1963, au plus fort des retombées des essais atmosphériques américano-soviétiques. Si l'activité totale contenue dans le compartiment atmosphérique a peu diminué depuis (décroissance radioactive négligeable et faible prélèvement/fixation par la matière organique), l'activité de carbone-14 par unité de masse de carbone a, quant à elle, fortement diminué en raison de l'augmentation du CO_2 d'origine fossile. En effet, ce CO_2 dont la teneur en carbone-14 est très faible, voire nulle⁽⁴⁾, dilue le carbone-14 rémanent des essais nucléaires. Cette diminution s'est poursuivie au cours des 20 dernières années comme le montre la figure 11.

(2) Dans le cas du carbone-14 dans le compartiment aquatique continental, les niveaux sont plus faibles et plus hétérogènes (cf. focus, pp. 61-66 du Bilan radiologique 2018-2020).

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

(4) Le pétrole et le charbon issus de la transformation de la matière organique produite il y a plusieurs dizaines à plusieurs centaines de millions d'années ne contiennent plus de carbone-14 qui a disparu du fait de sa décroissance radioactive (période de 5 600 ans). La combustion de ces énergies fossiles émet donc du carbone dépourvu de carbone-14.

FIGURE 10 / ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ SPÉCIFIQUE DU CARBONE-14 DANS L'HÉMISPHERE NORD DE 1950 À 2011, ÉTABLIE À PARTIR DE LA BIBLIOGRAPHIE

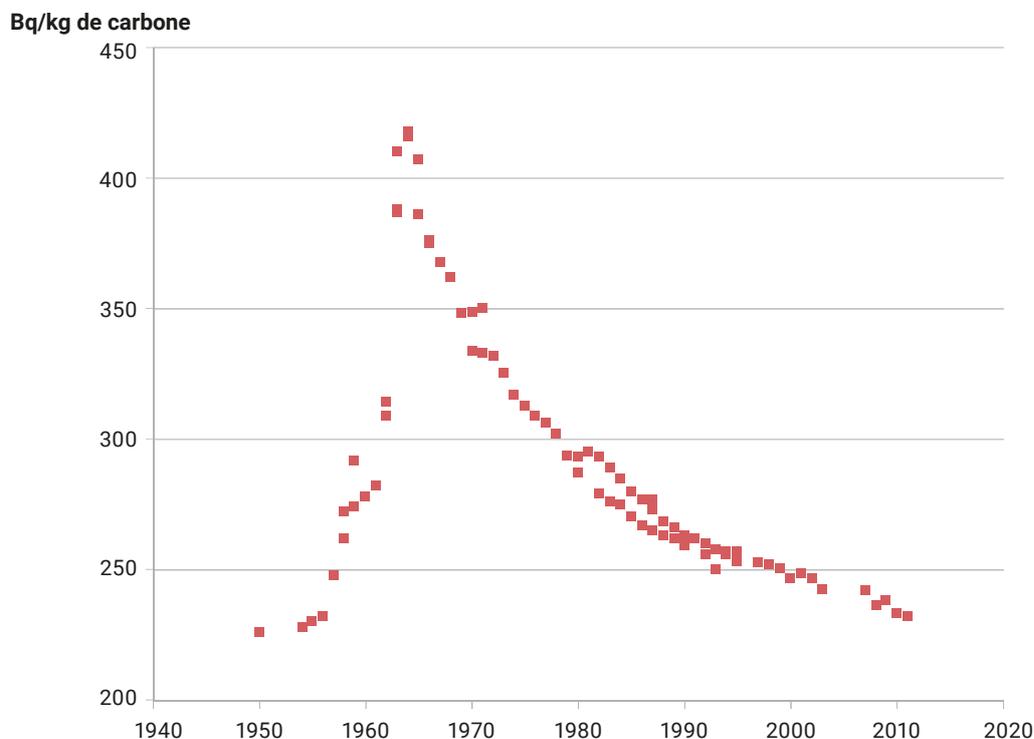
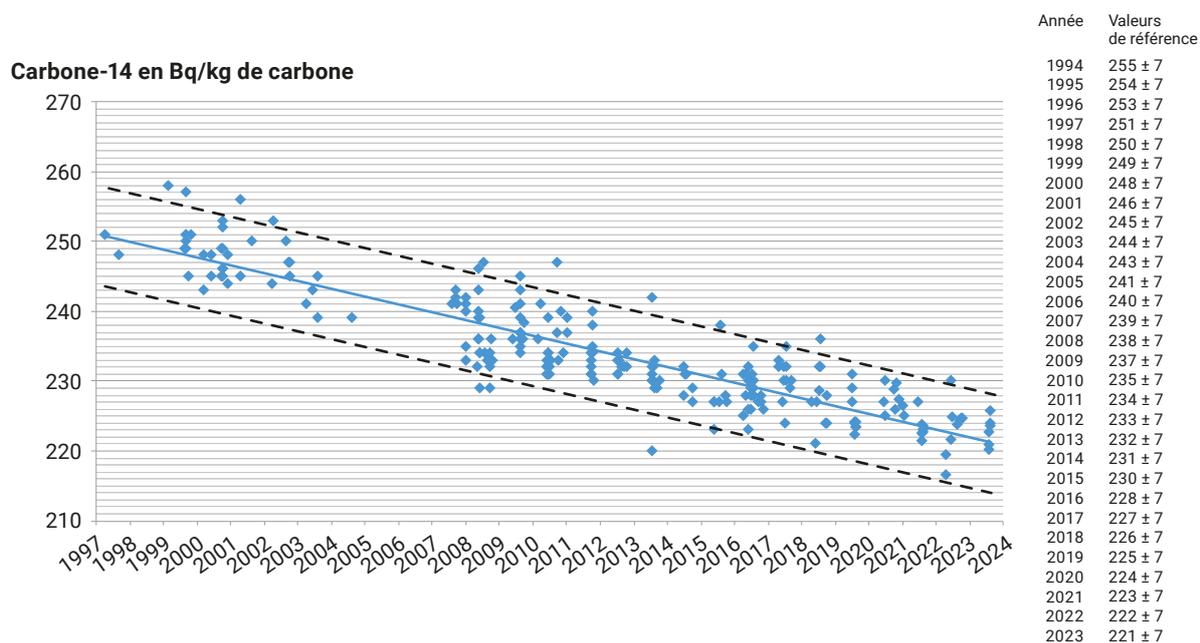


FIGURE 11 / ÉVOLUTION RÉCENTE DES ACTIVITÉS DE CARBONE-14 EN MILIEUX ATMOSPHÉRIQUE ET TERRESTRE HORS INFLUENCE D'INSTALLATIONS NUCLÉAIRES (Bq/kg de carbone)



Avec une valeur centrale de 222 Bq/kg de C sur la période 2021-2023, l'activité de carbone-14 par unité de masse de carbone est maintenant en dessous du niveau cosmogénique antérieur aux essais nucléaires du fait d'une plus forte concentration de CO₂ dans l'air aujourd'hui qu'au début des années 1950. Une activité différente de plus de 7 Bq/kg de C autour de ces valeurs de référence traduit une influence anthropique locale. Si l'activité par unité de masse de carbone mesurée est supérieure, cela peut résulter de l'influence d'une installation nucléaire ; si cette activité massique est inférieure, cela peut résulter de l'influence d'une industrie rejetant du CO₂ d'origine fossile. L'activité de carbone-14 par unité de masse de carbone permet donc de détecter de très faibles influences locales non mesurables par l'activité massique (Bq/kg frais).

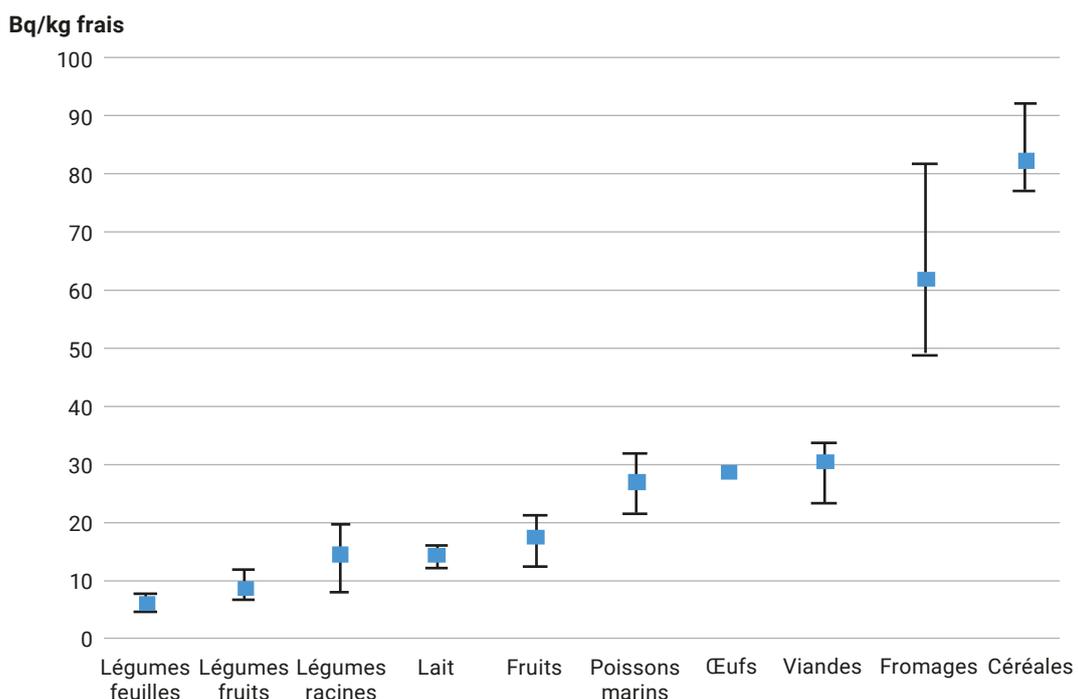
Dans les cours d'eau et les lacs, l'activité de carbone-14 par unité de masse de carbone est toujours inférieure à celle observée dans les autres composantes de l'environnement en raison d'une dilution plus ou moins importante par des carbonates anciens, non affectés par les retombées des essais nucléaires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

Suivant cette teneur en carbonates, l'activité spécifique du carbone-14 dans les cours d'eau varie actuellement entre 200 et 220 Bq/kg de C (cf. rapport IRSN/DG 2022-00113 ou focus du *Bilan radiologique 2018-2020*, pp. 61 à 63). À l'inverse, la concentration du carbone-14 dans le compartiment marin est très homogène et plus élevée que celle observée dans les compartiments atmosphérique et terrestre, en raison du dégazage de matière organique terrigène ancienne stockée dans les sédiments.

Les activités massiques de carbone-14 dans toutes les composantes de l'environnement, exprimées en Bq/kg frais, peuvent être déduites facilement de l'activité de carbone-14 par unité de masse de carbone (Bq/kg de C) à partir de la teneur en carbone. Dans les denrées, par exemple, les teneurs en carbone varient de 30 g de carbone par kilogramme de salade fraîche, à 200 g/kg de viande fraîche et jusqu'à 400 g/kg de céréales.

À titre d'illustration, la figure 12 fournit des valeurs repères du carbone-14 dans des denrées, exprimées en Bq/kg frais, et qui correspondent au bruit de fond actuel de 222 Bq/kg de carbone. La variabilité autour de ces valeurs repères est principalement liée à celle des teneurs en carbone au sein même de ces catégories de denrées ; elle est assez faible.

FIGURE 12 / ACTIVITÉS MASSIQUES DE CARBONE-14 DANS DIFFÉRENTS TYPES DE DENRÉES (en Bq/kg frais) CORRESPONDANT AU BRUIT DE FOND SUR LA PÉRIODE 2021-2023



Comme pour le carbone-14, le réservoir du tritium rémanent des retombées des essais d'armes nucléaires est l'atmosphère. C'est également par la photosynthèse des végétaux que le tritium entre dans la composition de la matière organique dont l'activité, exprimée en Bq/L d'eau, est ainsi en équilibre (même activité) avec celle de la vapeur d'eau atmosphérique. Par ailleurs, le compartiment atmosphérique détermine l'activité des cours d'eau, notamment *via* les précipitations. L'évolution du bruit de fond du tritium dans l'ensemble atmosphère/terrestre/aquatique continental peut donc être représentée par l'activité de l'eau de pluie. La figure 13 montre que l'activité en tritium de l'eau de pluie dans l'hémisphère nord a augmenté brutalement à partir des années 1950 depuis le niveau cosmogénique (0,1 à 0,6 Bq/L, chapitre 3.1) pour atteindre un maximum de près de 600 Bq/L en 1963 au plus fort des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires. Depuis, cette activité a fortement diminué, principalement par décroissance radioactive. La figure 14 montre l'évolution récente de l'activité volumique du tritium dont la valeur moyenne en 2022 était de 0,8 Bq/L dans une gamme allant de 0,34 Bq/L à 1,7 Bq/L. L'importance du réservoir d'hydrogène que constituent les océans a fait que les retombées des essais nucléaires n'ont eu qu'une faible influence

sur l'activité de tritium dans les eaux marines qui sont restées au niveau cosmogénique (0,1 à 0,2 Bq/L).

Les activités massiques de tritium dans toutes les composantes de l'environnement, exprimées en Bq/kg frais peuvent être déduites des activités volumiques à partir de la teneur en eau ou en hydrogène.

À titre d'illustration, la figure 15 fournit des valeurs repères du tritium dans des denrées, exprimées en Bq/kg frais et qui correspondent au bruit de fond actuel moyen de 0,8 Bq/L. La variabilité autour de ces valeurs est liée principalement à la variabilité de la teneur en eau au sein de chaque catégorie de denrées qui peut atteindre quelques dizaines de pour-cent.

FIGURE 13 / ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ EN TRITIUM DE L'EAU DE PLUIE (Bq/L) (sources : AIEA et IRSN)

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

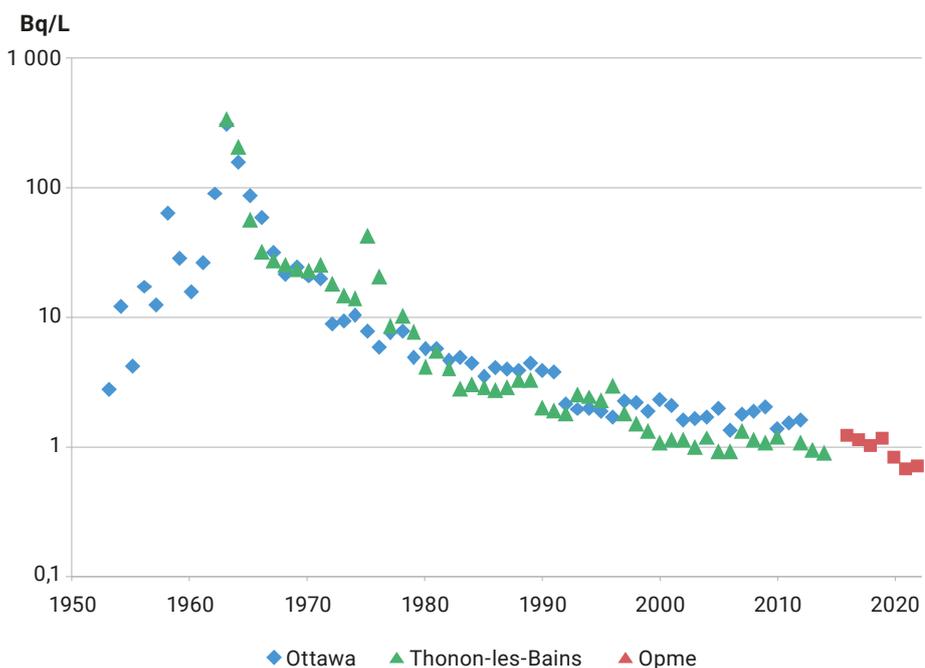


FIGURE 14 / ÉVOLUTION RÉCENTE DES ACTIVITÉS DE TRITIUM ORGANIQUEMENT LIÉ (TOL) DANS LE COMPARTIMENT TERRESTRE (Bq/L d'eau de combustion)

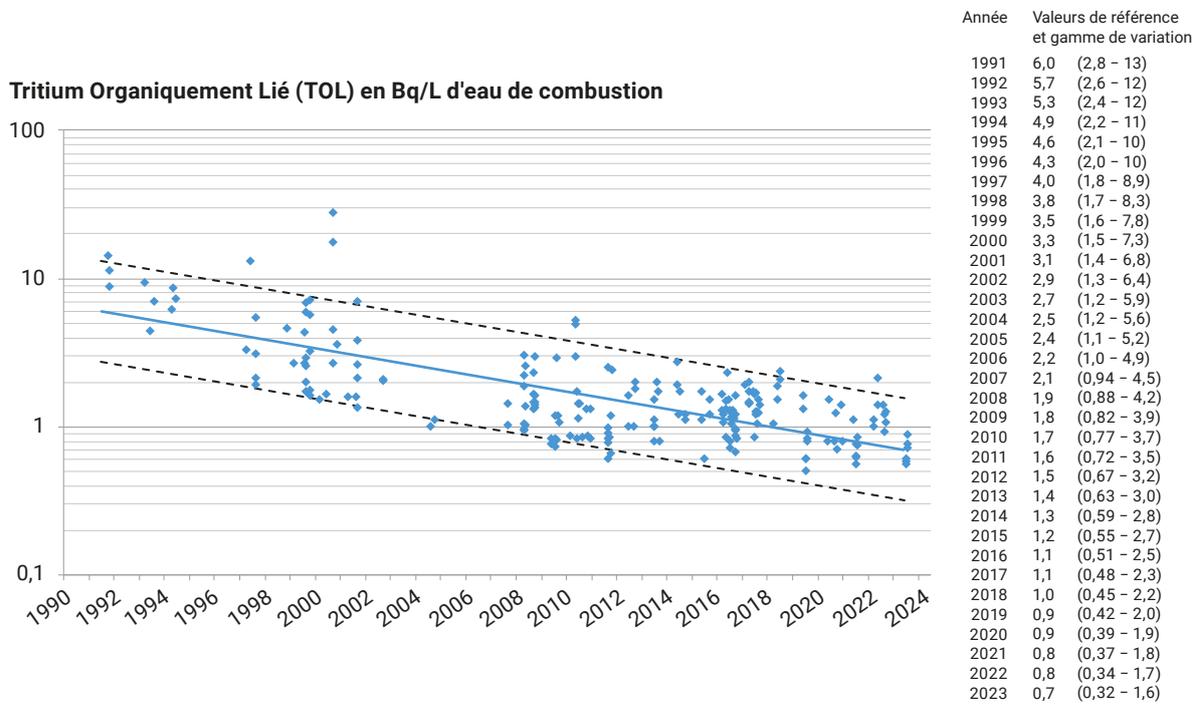
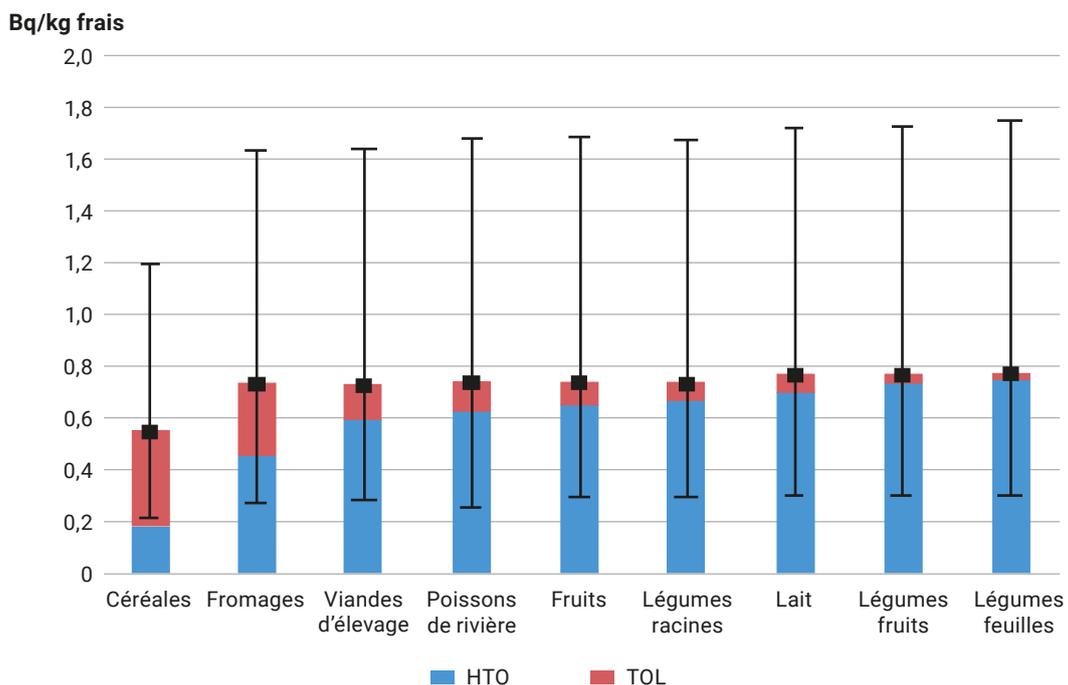


FIGURE 15 / ACTIVITÉS MASSIQUES DE TRITIUM DANS DIFFÉRENTS TYPES DE DENRÉES (Bq/kg frais) CORRESPONDANT AU BRUIT DE FOND ACTUEL DE 0,8 Bq/L (VALEUR DE RÉFÉRENCE POUR L'ANNÉE 2022 ET VARIABILITÉ) ET CONTRIBUTIONS DU TRITIUM LIBRE (HTO) ET DU TRITIUM ORGANIQUEMENT LIÉ (TOL)



Retombées de l'accident de Tchernobyl

Les masses d'air contaminées par l'accident de Tchernobyl ont affecté la France au début de mai 1986, principalement entre le 1^{er} et le 5 mai 1986. En raison des pluies très variables survenues durant cette période dans l'est du pays, les dépôts radioactifs y ont été plus importants que dans le reste du pays et très hétérogènes (figure 16). Parmi la dizaine de radionucléides décelés dans l'air et dans des végétaux, les trois principaux ont été l'iode-131 et les césium-134 et césium-137. Les dépôts d'iode-131 ont été de l'ordre de 5 à 10 fois supérieurs à ceux de césium-137 ; ceux de césium-134 deux fois inférieurs à ceux de césium-137.

La contamination des denrées a été maximale immédiatement après les dépôts du fait d'interception de ceux-ci par les feuilles des végétaux ; elle a concerné essentiellement les légumes, notamment les légumes feuilles (quelques milliers de Bq/kg frais d'iode-131 et de l'ordre de 1 000 Bq/kg frais de césium-134 et césium-137) et le lait (quelques centaines de Bq/L d'iode-131 et de l'ordre de 100 Bq/L de césium-134 et césium-137) du fait de la contamination foliaire des herbages. Les activités d'iode-131 ont disparu au bout de 3 mois par décroissance radioactive et celles de césium-134 et césium-137 dans ces denrées ont diminué de 100 à 1 000 fois dans ce délai.

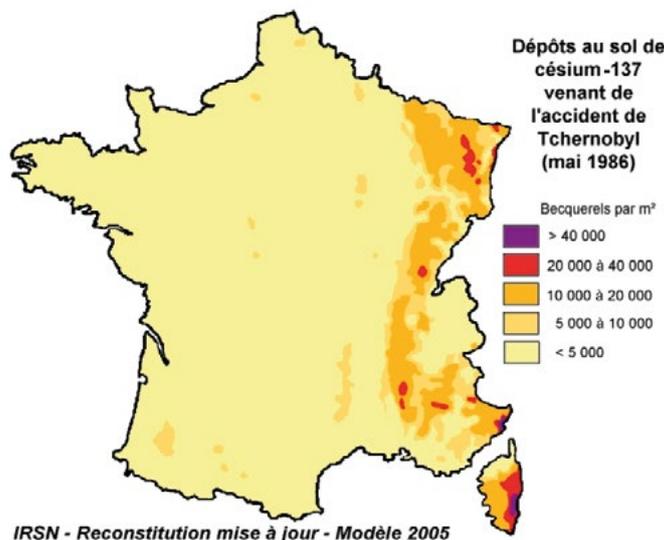
Les activités de césium les plus élevées dans les viandes ovines et bovines (quelques milliers de Bq/kg frais de césium-134 et césium-137) ont été observées au bout de quelques semaines. En raison de la date de l'accident très précoce dans le développement de la plupart des cultures, les grandes cultures céréalières et fruitières ont été relativement épargnées : leurs activités ont rarement dépassé 10 Bq/kg frais. Passé les premiers mois après les dépôts radioactifs, la contamination des denrées ne résultait plus que de celle du sol qui constitue le réservoir alimentant toutes les autres composantes de l'environnement. En raison de sa période radioactive de 2 ans, les concentrations de césium-134 ont rapidement diminué et n'étaient quasiment plus mesurables dans l'environnement dès la fin des années 1990.

Cas du césium-137

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

FIGURE 16 / CARTE DES ACTIVITÉS SURFACIQUES DE CÉSIMUM-137 DÉPOSÉES À LA SUITE DES RETOMBÉES DE L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL (Bq/m²)

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



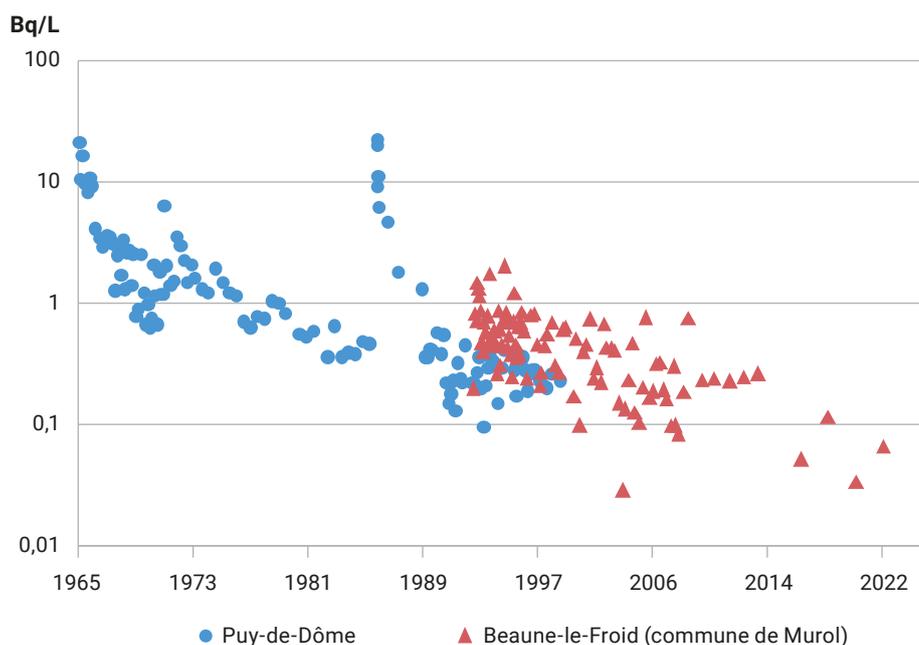
Les activités massiques de césium-137 dans les sols diminuent depuis la fin des retombées atmosphériques anciennes. Cette diminution est plus rapide que celle qui résulterait de la seule décroissance radioactive (période radioactive de 30 ans). Elle est due principalement à l'action de l'eau qui entraîne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

Les concentrations de césium-137 dans les denrées ont également diminué depuis 1987. Cette diminution est liée à celle des concentrations du césium dans les sols, mais aussi à la diminution de sa bio-disponibilité (une partie du césium se fixe progressivement de manière irréversible sur les particules d'argile des sols et devient ainsi de moins en moins disponible pour être absorbée par les racines des végétaux). La figure 17 présente, à titre d'exemple, l'évolution de 1966 à 2013 de l'activité de césium-137 dans du lait prélevé dans le Puy-de-Dôme. Les points sont relatifs

à des échantillons prélevés de 1965 à 1998 dans de grands centres de collecte de lait représentatifs du département ; les triangles correspondent à des échantillons prélevés depuis 1993 dans une seule exploitation située à Beaune-le-Froid, sur la commune de Murol qui, comme le montrent les résultats des mesures, a été plus touchée par les retombées de l'accident de Tchernobyl que le reste du département.

Il est important de noter que cette figure n'est qu'une illustration de l'évolution dans le temps de l'activité de césium-137 dans le lait. Les activités observées dans le lait produit dans d'autres régions de France ont pu être sensiblement différentes du fait de l'importance relative des dépôts de césium-137 (des essais nucléaires et de l'accident de Tchernobyl) et d'autres facteurs comme les caractéristiques des sols et les pratiques d'élevage. Notamment, les données acquises au cours des dix dernières années montrent qu'il existe en France des zones de rémanence élevées (ZRE) des retombées des essais nucléaires et de l'accident de Tchernobyl, où les activités de césium-137 dans les sols, les herbages, le lait et les fromages, les viandes et les denrées forestières (champignons et gibiers) sont supérieures à celles observées sur le reste du territoire (cf. rapport IRSN/DG 2022-00131).

FIGURE 17 / ÉVOLUTION DEPUIS 1965 DE L'ACTIVITÉ VOLUMIQUE DE ^{137}CS DANS LE LAIT PRODUIT DANS LE PUY-DE-DÔME (Bq/L)



Retombées de l'accident de Fukushima

Les retombées atmosphériques en France métropolitaine des radionucléides issus de l'accident de Fukushima, survenu le 11 mars 2011 au Japon, ont été très faibles et très fugaces : des traces d'iode-131, césium-134 et césium-137 ont été détectées de fin mars jusqu'en mai 2011 dans l'air, les eaux de pluie et dans quelques denrées (légumes feuilles, lait...) avec des activités 500 à plus de 1 000 fois inférieures à celles mesurées en France début mai 1986 suite à l'accident de Tchernobyl. L'influence de ces dépôts n'est plus mesurable depuis mi-2011 (cf. rapport IRSN DEI 2011-01 « Analyse de l'impact de l'accident de Fukushima en France à partir des résultats de la surveillance renforcée de la radioactivité de l'environnement » disponible sur le site internet de l'IRSN).



Prélèvement d'herbe

© Arnaud Bouissou/MEDDE/Médiathèque IRSN

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

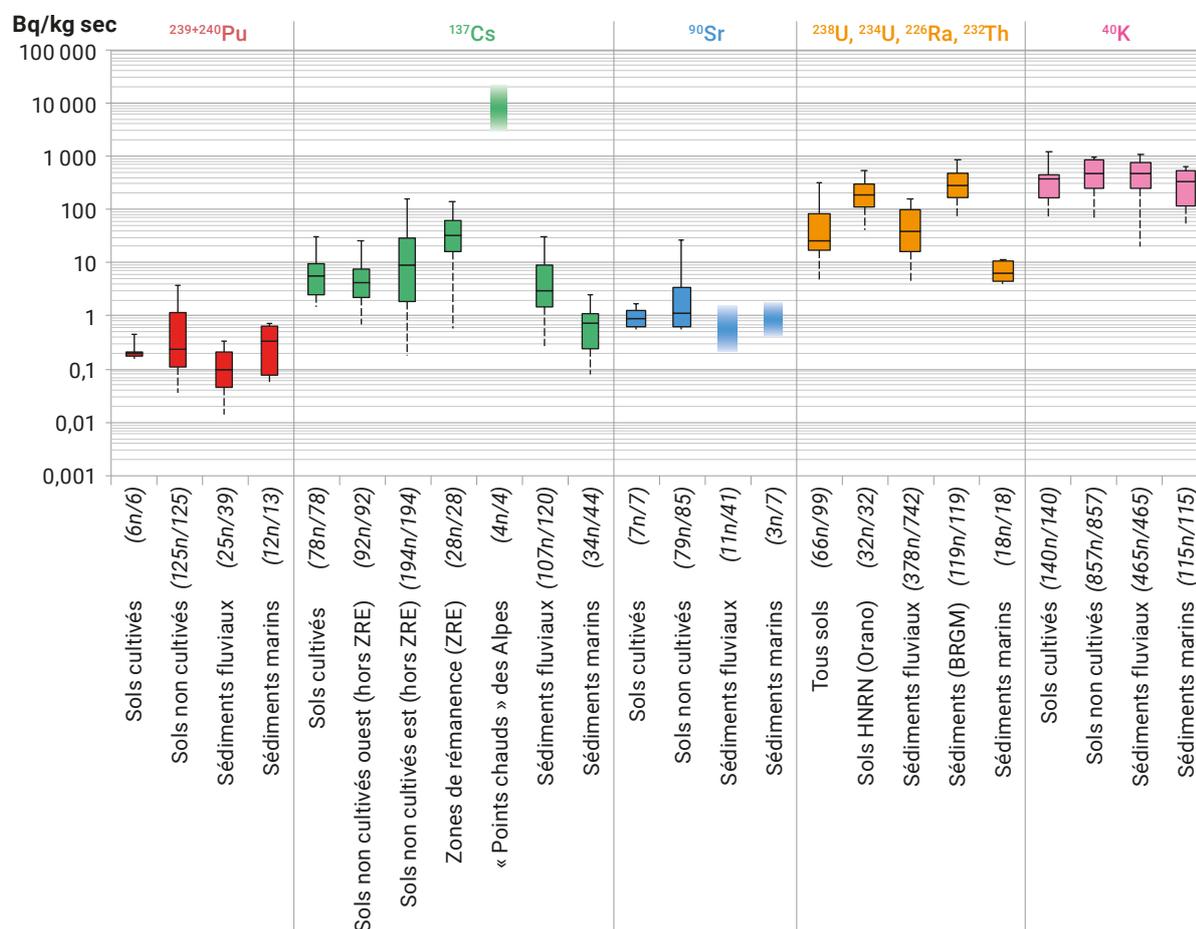
Les figures 18 à 23 présentent les activités des principaux radionucléides mesurés en France et qui contribuent au bruit de fond radiologique métropolitain. Il s'agit soit de radionucléides naturels (chapitre 3.1), soit de radionucléides rémanents des retombées anciennes (chapitre 3.2). Les données à l'origine de ces graphiques ont été acquises par l'IRSN dans différents cadres. Afin d'être plus complètes, certaines séries, dont les origines sont précisées, ont été ajoutées. Il s'agit d'une représentation en « boîtes à moustaches » qui permet de visualiser les gammes d'activités correspondant à 80 % des valeurs significatives mesurées (activités comprises entre les percentiles 10 % et 90 % représentées par le rectangle coloré), les modes (percentile 50 % ou médiane) représentés par le tiret coupant en deux les rectangles colorés, ainsi que les valeurs maximales mesurées (tirets supérieurs). Ces valeurs statistiques sont représentatives des mesures effectuées par l'IRSN et ne constituent qu'une approche de la réalité. Notamment, seuls les résultats de mesure significatifs, supérieurs au seuil de décision (chapitre 5 du *Bilan radiologique 2021-2023*) ont été pris en compte ; les activités environnementales les plus faibles, non mesurables, ne sont pas représentées. C'est pourquoi les « boîtes à moustaches » ne comportent pas de valeurs minimales.

De manière générale, la représentativité de ces statistiques est d'autant plus réaliste que le nombre de données est important. À titre d'information, le nombre d'analyses et le nombre de résultats significatifs exploités sont fournis pour chaque série de données au niveau de l'axe des abscisses. Même si ce nombre est élevé, des biais peuvent avoir influencé les indicateurs statistiques présentés, notamment pour les radionucléides naturels. En effet, les teneurs en radionucléides naturels sont très contrastées en France, entre les bassins sédimentaires et les massifs anciens. Or, les zones des massifs anciens, plus riches en descendants de l'uranium et du thorium, sont peu représentées dans les échantillons prélevés et analysés par l'IRSN. Pour compenser ce biais, la figure 20, p. 79, permet de comparer les activités sur des sites caractérisés par un haut niveau de radioactivité naturelle (notés HNRN) à celles acquises sur le reste de la France métropolitaine.

Par ailleurs, de manière à fournir l'information la plus complète possible, le choix a été fait de présenter une « boîte à moustaches », même si le nombre de données disponibles est très restreint, dès lors que les indicateurs statistiques paraissent réalistes. Cette représentation est appliquée si le nombre de résultats supérieurs aux seuils de décision dépasse 50 % du nombre de résultats disponibles et si le nombre de résultats significatifs est supérieur ou égal à 5. Dans le cas contraire, le choix a été fait de représenter, à titre indicatif, la gamme de variation des résultats significatifs disponibles sous forme de dégradé monochrome. Enfin, il est important de souligner que des valeurs supérieures aux valeurs maximum présentées peuvent toujours être mesurées.

FIGURE 18 / ACTIVITÉS DES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES DANS LES SOLS ET LES SÉDIMENTS FRANÇAIS (Bq/kg sec)

Bien que les teneurs moyennes des sols et des sédiments en plutonium-239+240, héritées des retombées des essais nucléaires, semblent assez homogènes sur la France, la variabilité observée dans les sols non cultivés traduit la variabilité des dépôts que montre la carte page 67 : des activités de plutonium plus importantes sur les massifs montagneux en raison de précipitations moyennes annuelles plus élevées. Les activités de césium des sols sont quant à elles globalement cohérentes avec les cartes des dépôts des essais nucléaires et de l'accident de Tchernobyl (page 73) : des activités plus faibles à l'ouest qu'à l'est et plus élevées sur les zones où les retombées ont été les plus importantes (zones de rémanence élevée). Par ailleurs, les « points chauds » d'altitude sont de petites surfaces de moins de 1 m² où les dépôts neigeux de mai 1986 se sont reconcentrés. Concernant les teneurs en radionucléides naturels telluriques descendants des chaînes de l'uranium et du thorium, les données permettent de distinguer les sols provenant de zones à très haut niveau de radioactivité naturelle (données de Haute-Vienne et de Saône-et-Loire). Enfin, les activités en potassium-40 sont, comme attendu, plus élevées et homogènes entre sols et sédiments. Pour chaque catégorie de sols ou de sédiments sont fournis le nombre de résultats exploités (supérieurs aux seuils de décision) et le nombre total de résultats de mesure (exemple : 262n/270).



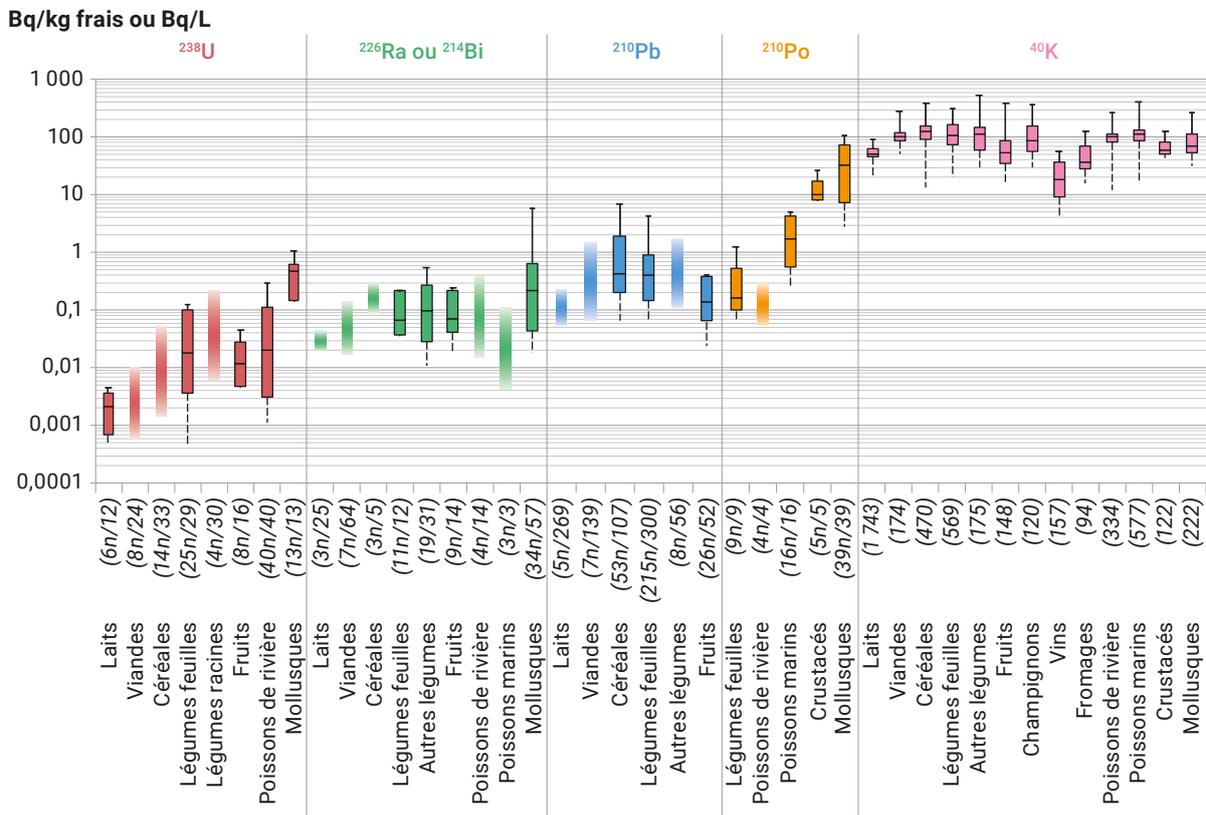
Données IRSN : 2009-2023.

ZRE : zone de rémanence élevée.

HNRN : haut niveau de radioactivité naturelle.

FIGURE 19 / ACTIVITÉS DES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES NATURELS DANS LES DENRÉES PRODUITES EN FRANCE (Bq/kg frais ou Bq/L)

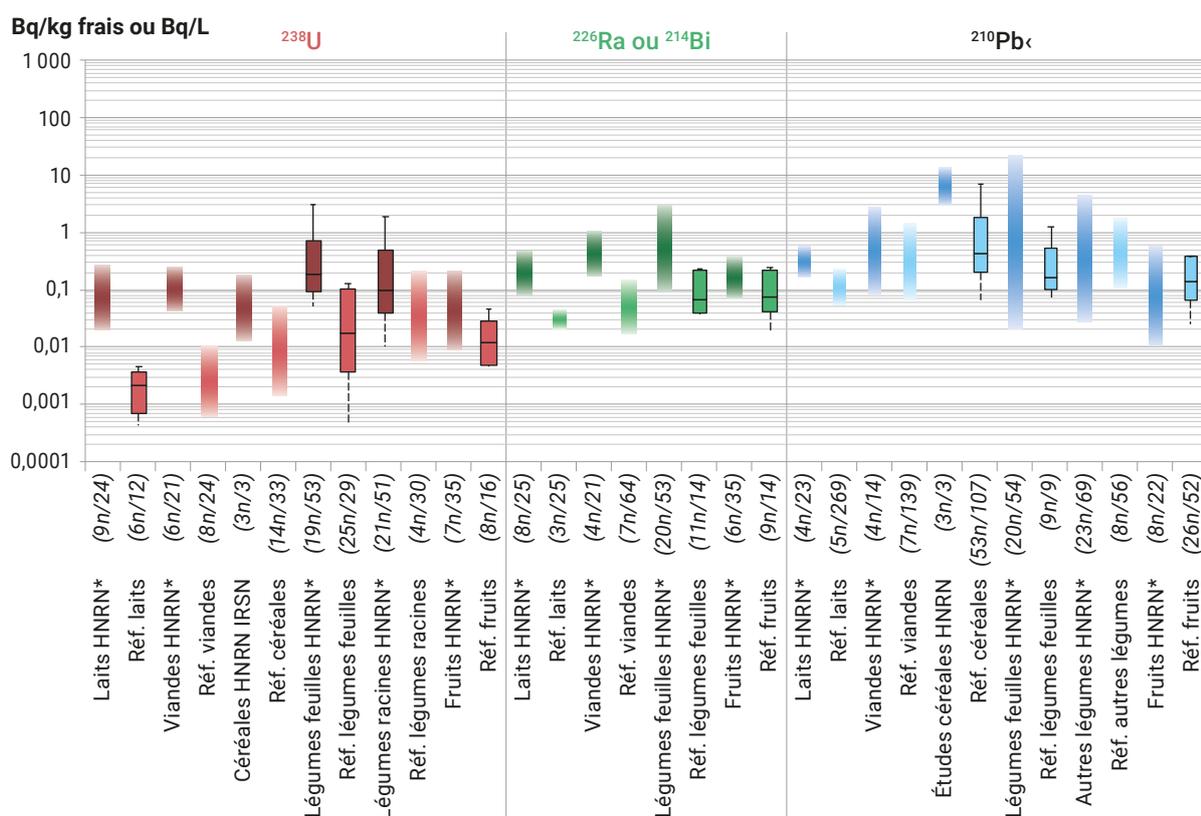
Les activités des principaux radionucléides naturels dans les denrées s'étalent sur cinq ordres de grandeur. Les activités d'uranium dans le compartiment terrestre sont plus faibles que celles du radium en raison d'une plus faible absorption racinaire. Elles sont plus élevées dans le compartiment marin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



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

FIGURE 20 / COMPARAISON DES ACTIVITÉS (Bq/kg frais ou Bq/L) DANS CERTAINES DENRÉES PRODUITES SUR DES ZONES À HAUT NIVEAU DE RADIOACTIVITÉ NATURELLE (HNRN principalement de Haute-Vienne et de Saône-et-Loire) AVEC CELLES PRODUITES PRINCIPALEMENT EN ZONES SÉDIMENTAIRES (bassins parisiens, aquitains, vallées fluviales...)

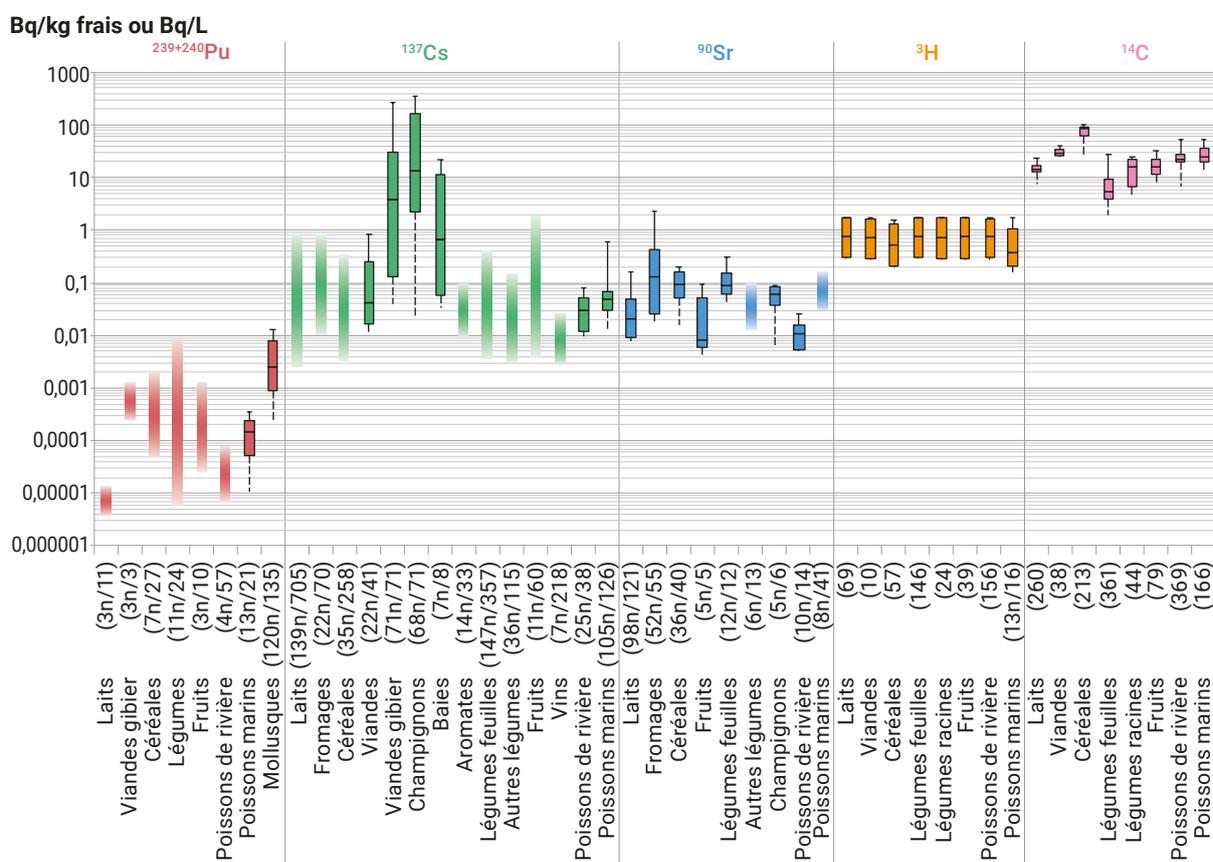
Sur les zones HNRN, les gammes d'activités des radionucléides naturels sont le plus souvent supérieures, voire très supérieures à celles représentatives du reste de la France. Ce sont à ces données acquises sur les HNRN que doivent être comparées les activités mesurées autour des anciens sites miniers. Pour chaque catégorie de denrées sont fournis le nombre de résultats exploités (supérieurs aux seuils de décision) et le nombre d'analyses (exemple : 8n/20).



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

FIGURE 21 / ACTIVITÉS DES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES ARTIFICIELS DANS LES DENRÉES PRODUITES EN FRANCE (Bq/kg frais ou Bq/L)

Les activités de plutonium sont les plus faibles, d'une part parce que les dépôts de ces isotopes lors des essais nucléaires ont été de l'ordre de 100 fois plus faibles que celles de césium-137 ou de strontium-90, et d'autre part du fait que leur transfert dans l'environnement sont également extrêmement faibles. Les activités de ^{238}Pu sont trente fois plus faibles que celles de $^{239+240}\text{Pu}$; les activités de ^{241}Am sont de l'ordre de deux fois plus faibles que celles de $^{239+240}\text{Pu}$ (rapport d'activités isotopiques $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$ de 0,4); celles de ^{241}Pu sont du même niveau que celles de $^{239+240}\text{Pu}$. Bien que les activités de ^{90}Sr dans le sol soient plus faibles que celles de ^{137}Cs (pas de ^{90}Sr dans les retombées de l'accident de Tchernobyl), les activités massiques dans les denrées sont souvent du même niveau en raison d'un transfert racinaire du ^{90}Sr plus élevé que celui du ^{137}Cs . Pour chaque catégorie de denrées sont fournis le nombre de résultats exploités (supérieurs aux seuils de décision) et le nombre total de résultats de mesure (exemple : 3n/11).

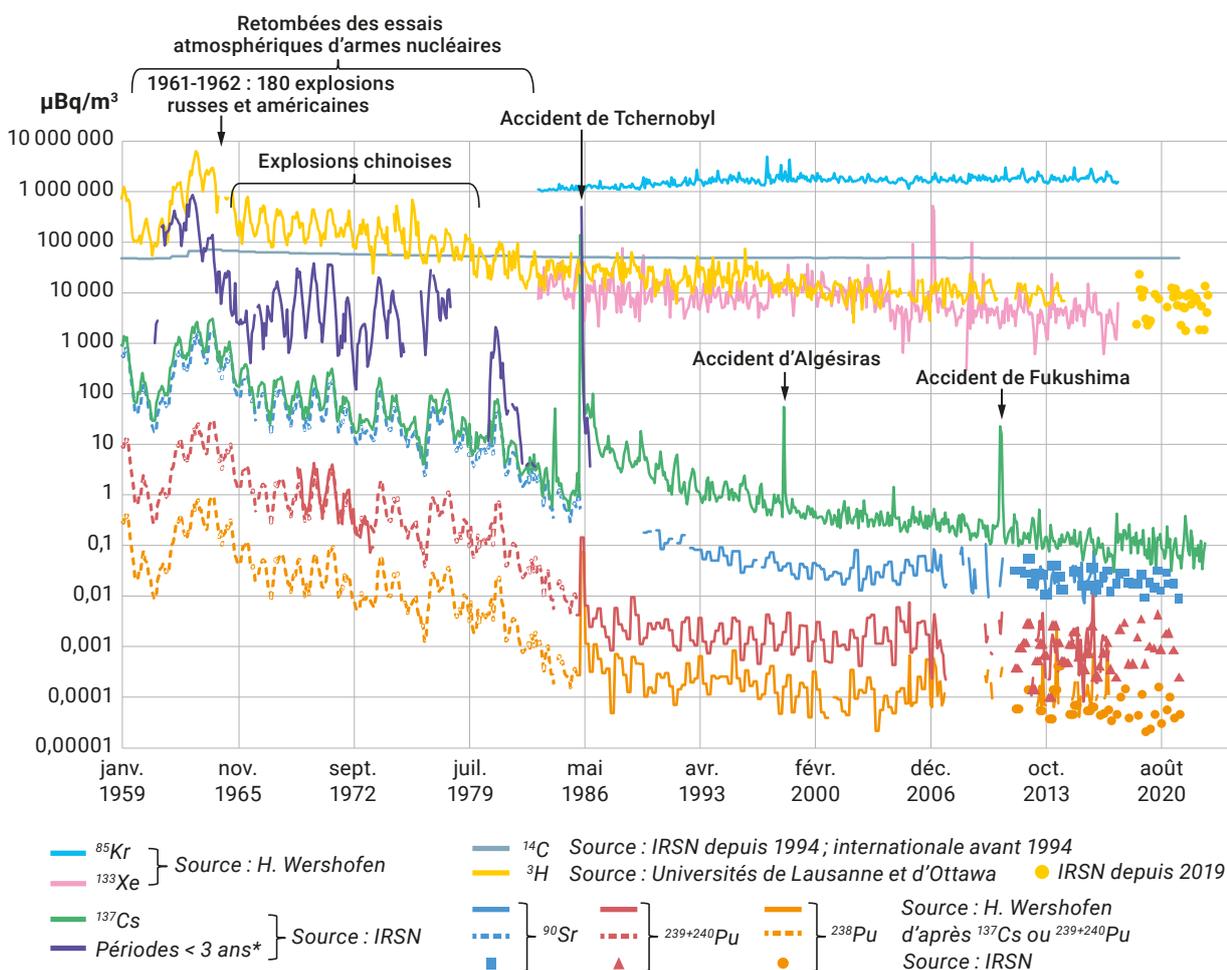


Données IRSN : 2014 à 2023 (quelques séries 2000-2023).

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

FIGURE 22 / ÉVOLUTION DES ACTIVITÉS DES PRINCIPAUX RADIONUCLÉIDES ARTIFICIELS MESURÉS DANS L'AIR EN FRANCE ET EN ALLEMAGNE AU COURS DES 60 DERNIÈRES ANNÉES ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)

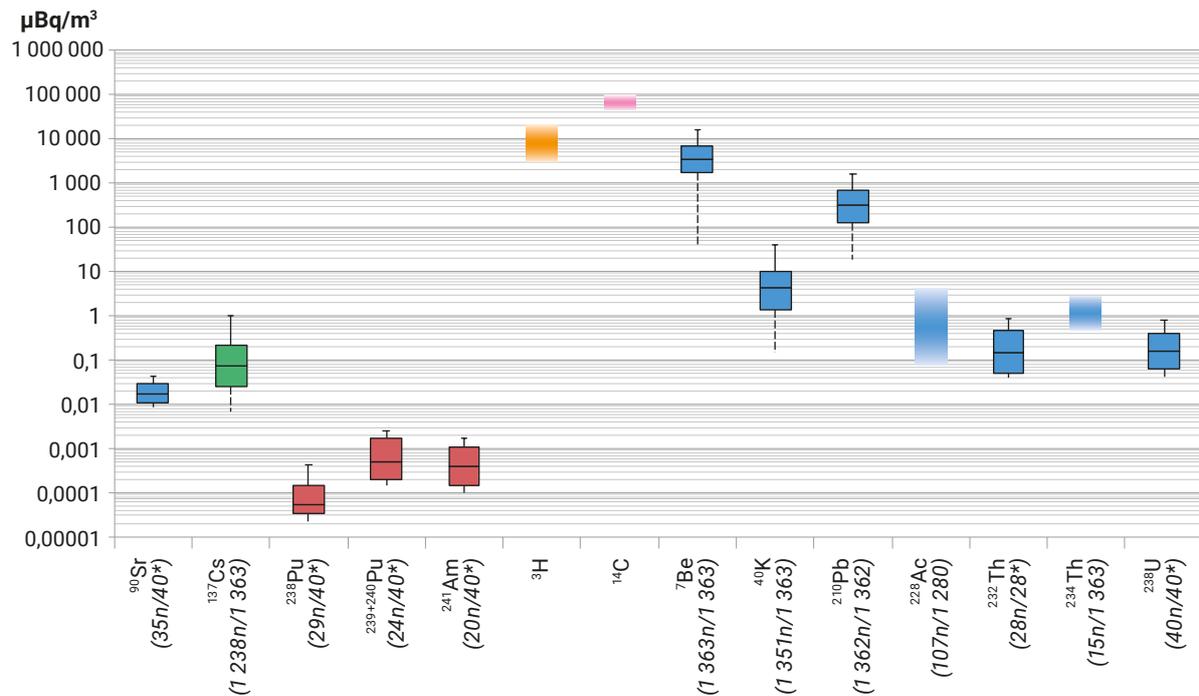
La figure 22 présente des données acquises en France par l'IRSN et en Allemagne par le Physikalisch-Technische Bundesanstalt (source H. Wershofen). Pour les radionucléides issus des retombées des essais nucléaires, ces données allemandes sont tout à fait représentatives du bruit de fond radiologique français ; les données de strontium-90 et de plutonium acquises par l'IRSN depuis 2012 montrent notamment une bonne concordance avec les données allemandes. Le krypton-85 mesuré en France a quatre origines : naturelle (très faible), les essais d'armes nucléaires, les accidents de Tchernobyl et de Fukushima, et l'ensemble des rejets des usines de retraitement du combustible mondiales. Les activités de krypton-85 mesurées en Allemagne peuvent être considérées comme représentatives du bruit de fond radiologique français. En France, l'influence spécifique des rejets de l'usine de La Hague vient s'ajouter à ce bruit de fond (chapitre 2.3, La Hague). Le xénon-133 a été émis lors des essais d'armes nucléaires, lors des accidents de Tchernobyl et de Fukushima, et il est rejeté par de nombreuses installations nucléaires, notamment les CNPE. Toutefois, sa principale origine s'explique par les rejets de l'industrie radio-pharmaceutique. Ainsi, le xénon-133 présent dans l'air en France et en Allemagne provient principalement de l'Institut national des radioéléments (IRE) installé à Fleurus, en Belgique. Pour tous les radionucléides, les valeurs présentées sont des moyennes mensuelles pour la France entière. Ces moyennes ne rendent pas compte des valeurs atteintes ponctuellement. Ainsi, le 1^{er} mai 1986 après l'accident de Tchernobyl, l'activité en césium-137 de l'air a atteint $5,5 \text{ Bq}/\text{m}^3$ ($5\,500\,000 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$) à Verdun. De même, l'activité de césium-137 mesurée sur la station de La Seyne-sur-Mer suite à l'incinération accidentelle d'une source de césium-137 le 25 mai 1998 à Algesiras, en Espagne, a été de $2\,480 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ début juin. Enfin, les activités maximales en radionucléides de période inférieure à 3 ans (^{131}I et ^{134}Cs notamment) ont approché ponctuellement $10\,000 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (dont $7\,500 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'iode-131 gazeux et $2\,000 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ d'iode-131 particulaire) et $250 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ de césium-137, entre le 25 mars et le 20 avril 2011 après l'accident de Fukushima. Les activités en plutonium-238 sont 30 fois inférieures à celles du plutonium-239+240. Elles résultent des essais d'armes nucléaires et aussi de la désintégration dans l'atmosphère, en 1964, d'un satellite (SNAP 4) dont l'énergie était fournie par ce radionucléide. Enfin, l'américium-241, descendant du plutonium-241 émis lors des essais nucléaires, n'est pas représenté dans ce graphique.



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

FIGURE 23 / ACTIVITÉS DE QUELQUES RADIONUCLÉIDES ARTIFICIELS ET NATURELS MESURÉS DANS L'AIR EN FRANCE ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)

Pour chaque radionucléide sont fournis le nombre de résultats exploités (supérieurs aux seuils de décision) et le nombre d'analyses (exemple : 35n/40).



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

* Station OPÉRA-AIR de l'OPE ANDRA/IRSN d'Houdelaincourt.

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

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

Doses efficaces externes liées aux rayonnements cosmique et tellurique

Sur la base de la carte de France du rayonnement cosmique (figure 1, p. 57), en considérant d'une part qu'une personne passe l'essentiel de son temps à l'intérieur de constructions (22 h/j en moyenne et 16 h/j pour un travail en extérieur) et que d'autre part, la construction atténue de 20 % ce rayonnement, la dose efficace moyenne reçue par un adulte et due au rayonnement cosmique est évaluée à 0,31 mSv/an. Pour 95 % des personnes, elle est inférieure à 0,35 mSv/an, mais peut atteindre 1,1 mSv/an pour les communes situées en altitude. Ainsi, pour la majeure partie de la population, l'exposition au rayonnement cosmique est peu variable si l'on excepte les communes d'altitude et les expositions lors des trajets aériens. En effet, les personnes amenées à voyager en avion sont soumises à des expositions supplémentaires. Compte tenu du faible nombre moyen de trajets par habitant, cette exposition supplémentaire est de seulement 0,014 mSv/an en moyenne pour l'ensemble de la population, mais elle est de 0,28 mSv/an en moyenne pour les voyageurs effectuant dix vols aller-retour par an⁽⁵⁾ et de 0,84 mSv/an pour ceux effectuant 30 vols aller-retour par an.

L'exposition de la population aux rayonnements telluriques dépend du sous-sol et des matériaux utilisés. De manière pénalisante, on considère que les matériaux de construction participent au débit de dose à l'intérieur des habitations en ajoutant 40 % du débit de dose mesuré à l'extérieur. Les données de mesures utilisées proviennent de dosimètres témoins placés dans 17 404 établissements dentaires et vétérinaires répartis sur le territoire (chapitre 3.1). Sur la base de ces résultats et après déduction de la contribution due au rayonnement cosmique, la dose efficace moyenne pour un adulte due au rayonnement tellurique est de 0,63 mSv/an, la majeure partie de la population (90 %) recevant une dose comprise entre 0,36 et 1,1 mSv/an.

Cette dose peut atteindre 2 mSv/an dans certaines communes.

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

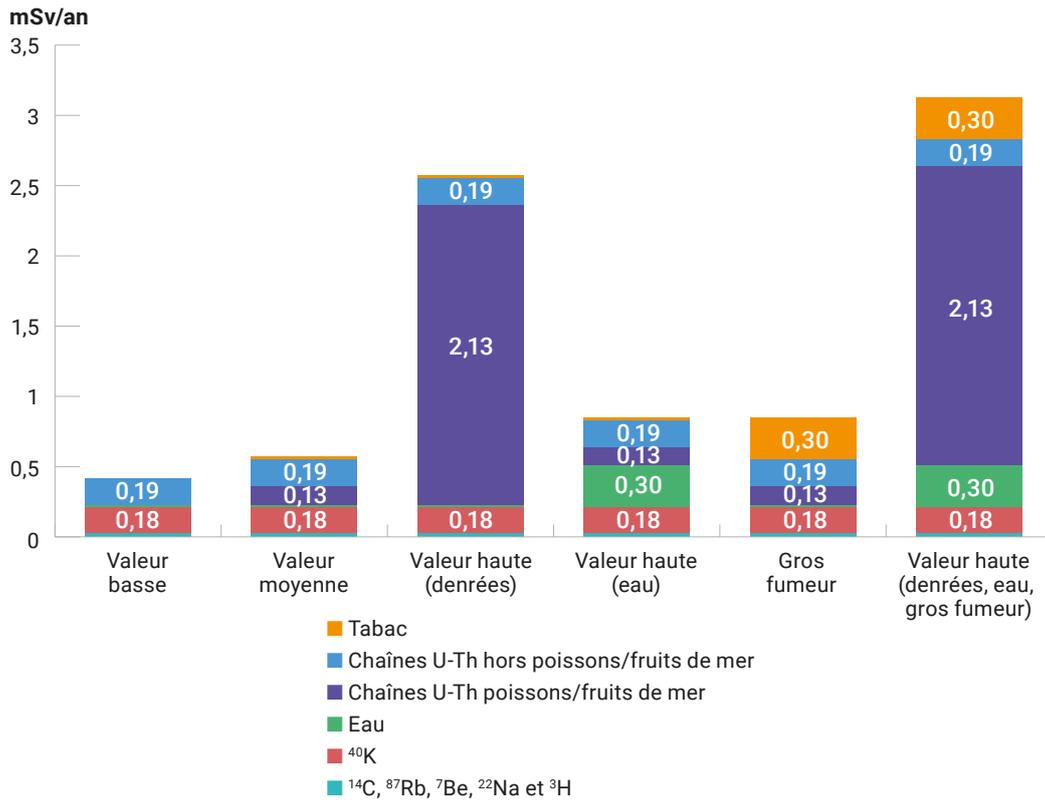
La dose efficace moyenne pour un adulte liée à l'incorporation de radionucléides naturels (cosmogéniques et telluriques) due à l'ingestion de denrées et au tabagisme est estimée à 0,55 mSv/an. Cette dose ne varie pas en fonction de la région, mais des habitudes de consommation de chacun, en particulier de poissons/fruits de mer, dans une gamme allant de 0,4 mSv/an pour les personnes ne consommant pas ces produits et jusqu'à plus de 3,1 mSv/an pour celles en consommant de façon importante (figure 24). Bien que le potassium-40 représente une part importante (30 %) de cette dose, cette part varie très peu d'un individu à l'autre et ne dépend pas des habitudes alimentaires, le potassium étant régulé par l'organisme (kaliémie). Par ailleurs, les radionucléides cosmogéniques sont de faibles contributeurs (0,02 mSv/an, soit moins de 4 %). La dose efficace moyenne liée aux descendants des chaînes de l'uranium et du thorium présents dans les denrées alimentaires est de 0,32 mSv/an, ce qui représente près de 60 % de la dose totale due à l'ingestion de denrées. Elle est extrêmement variable, car liée à la consommation de poissons et surtout de coquillages et de crustacés qui présentent des teneurs élevées en polonium-210. Par rapport à une personne qui ne consomme jamais ces produits, une consommation très régulière de coquillages et de crustacés (1 à 2 fois par semaine) conduit à une dose efficace supplémentaire de 0,54 mSv/an, doublant ainsi la dose totale moyenne due à l'ingestion de denrées. De même, un gros fumeur peut recevoir une dose efficace supplémentaire de l'ordre de 0,3 mSv/an par rapport à un non-fumeur, en raison principalement de la teneur en polonium-210 du tabac.

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

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

FIGURE 24 / SYNTHÈSE DES DOSES (exprimées en mSv/an) DUES À L'INCORPORATION PAR UN ADULTE DE RADIONUCLÉIDES NATURELS

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



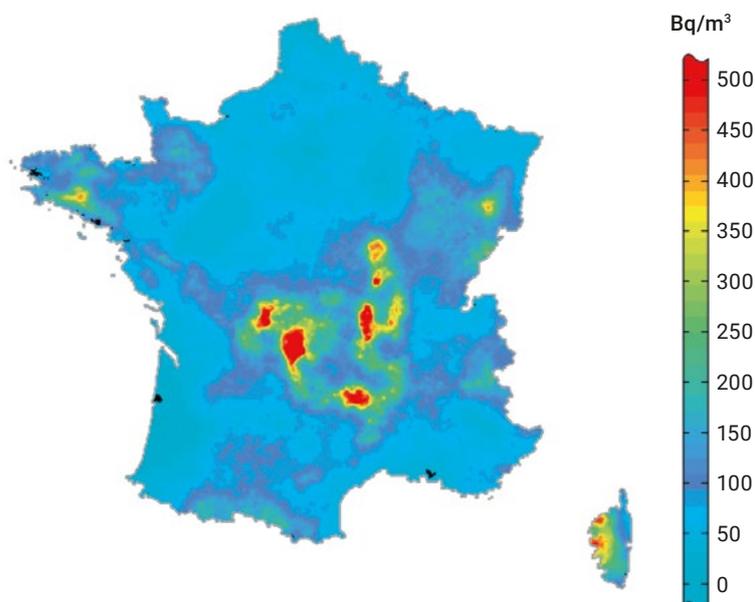
Dose efficace liée à l'inhalation de radon

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

La concentration moyenne en radon-222 à l'intérieur de l'habitat en France métropolitaine, pondérée par la population et le type d'habitat, est de 60 Bq/m³. La dose moyenne correspondante est estimée à 1,45 mSv/an. La carte des activités volumiques potentielles de radon à l'intérieur des habitations (figure 25) montre une situation extrêmement contrastée entre une majeure partie de la France où les activités sont inférieures à 150 Bq/m³ et quelques zones du Massif central, des Vosges, d'Armorique et de l'ouest de la Corse où les activités dépassent 400 Bq/m³. Ainsi, si 90 % de la population française reçoit une dose efficace due au radon comprise entre 0,54 et 3,2 mSv/an, les habitants de certaines communes peuvent recevoir des doses supérieures à 10 mSv/an. Enfin, il faut signaler le cas d'habitations construites sur des résidus miniers où les activités en radon dans l'air peuvent atteindre plusieurs milliers de Bq/m³ avec des doses correspondantes d'autant plus élevées.

FIGURE 25 / ACTIVITÉ VOLUMIQUE POTENTIELLE DU RADON À L'INTÉRIEUR DES HABITATIONS DÉDUITE DE LA NATURE DES ROCHES QUI COMPOSENT LE SOUS-SOL (Bq/m³)

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



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

L'exposition actuelle de la population française à la rémanence des retombées des essais d'armes nucléaires et de l'accident de Tchernobyl a été récemment réévaluée par l'IRSN (Rapport IRSN/2021-00108 et rapport IRSN/2022-00131).

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

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

Bilan des doses efficaces liées au bruit de fond radiologique français

L'exposition moyenne de la population française au bruit de fond radiologique, tel que défini précédemment, est estimée à 5 mSv/an. Cette dose varie de manière importante autour de cette valeur moyenne en fonction du lieu de résidence (accumulation de radon dans l'air, rayonnement tellurique) et du mode de vie (consommation de fruits de mer, tabagisme, voyages en avion).

Pour illustrer cette variabilité, l'IRSN a défini pour son récent bilan sur l'exposition de la population française aux rayonnements ionisants (Rapport IRSN/2021-00108) une dizaine des situations types d'exposition. Trois de ces situations sont présentées dans la figure 26 à titre d'illustration : la situation conduisant à l'exposition la plus faible (cas B), celle conduisant à la dose la plus élevée (cas C), ainsi qu'une situation très spécifique dans laquelle la rémanence des retombées de l'accident de Tchernobyl induit une contribution non négligeable (cas D).

Le cas B correspond à une personne vivant dans une commune à faible concentration en radon et à faible niveau de rayonnements telluriques, et consommant peu de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels. Cette situation conduit à une dose de 2,4 mSv/an.

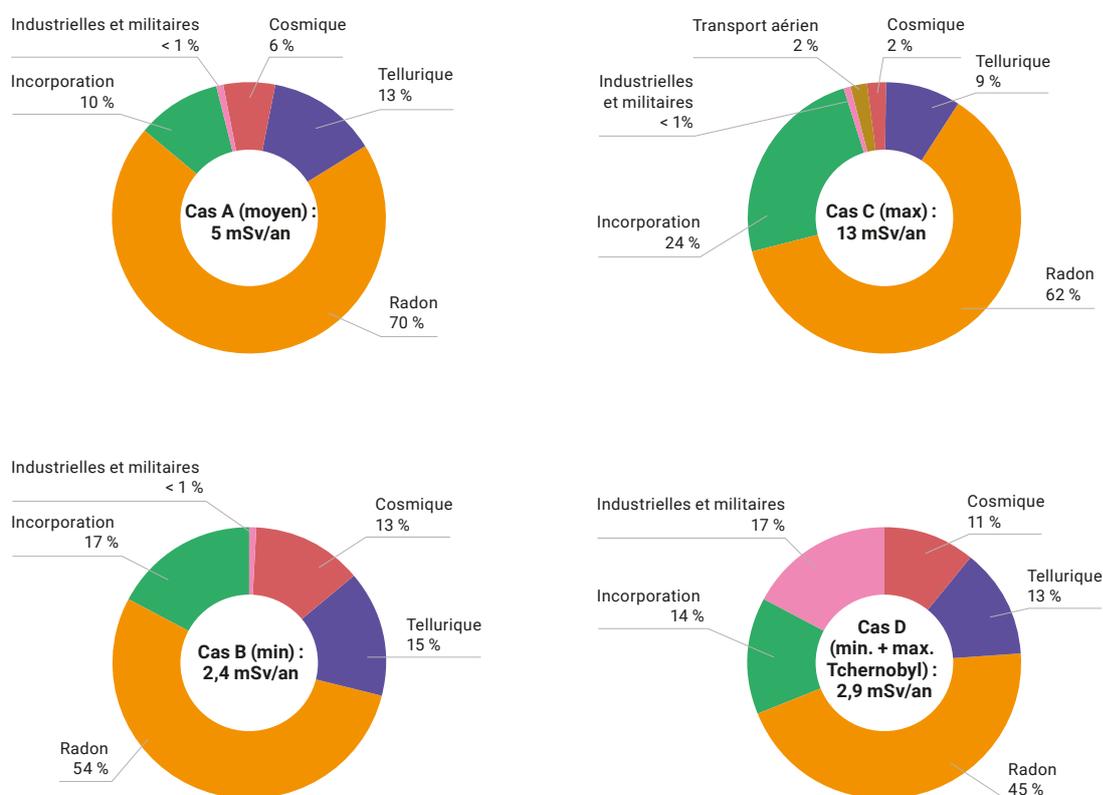
Le cas C correspond à la personne la plus exposée, c'est-à-dire vivant dans une commune à forte concentration en radon et à niveau élevé de rayonnements telluriques, fumant beaucoup, ayant une consommation importante de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels et voyageant fréquemment en avion. Cette situation conduit à une dose de 13 mSv/an.

Enfin, le cas D, reprend celui de la personne la moins exposée (cas B), mais consommant très fréquemment du gibier et des champignons présentant les teneurs en césium-137 dues aux retombées de l'accident de Tchernobyl les plus élevées mesurées en France

ces dernières années. Cette situation conduit à une dose totale de 2,9 mSv/an, proche de la dose la plus faible (cas B), mais dans laquelle l'ingestion de ces aliments contaminés en césium-137 contribue à 17 % de la dose totale.

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

FIGURE 26 / DOSES EFFICACES TOTALES ET CONTRIBUTIONS DES DIFFÉRENTES VOIES D'EXPOSITION POUR UN ADULTE VIVANT EN FRANCE MÉTROPOLITAINE ET POUR DIFFÉRENTES SITUATIONS D'EXPOSITION



Coordination éditoriale et réalisation

Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire
Pôle Santé et Environnement
Direction de l'Environnement

Pilotage

Philippe RENAUD
Lionel SAEY

Rédaction

Philippe RENAUD
Lionel SAEY
Maxime MORIN
Olivier PIERRARD
Émilie BAUDAT
Lucile BECK (Laboratoire national de mesure du carbone-14)
Coralie CARRIER
Claire DALENCOURT
Donato D'AMICO
Sandrine FLEURY
Kévin GALLIEZ
Azza HABIBI
Hugo JAEGLER
Anne MEYER

Relecture

Membres du COPIL du RNM

Pour toute information complémentaire, vous pouvez contacter :

Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire
Direction de l'Environnement
31, avenue de la Division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses

E-mail

contact@irsn.fr

N° du rapport

IRSN/2024-00601
Tous droits réservés IRSN
Décembre 2024

Photo de couverture

© IRSN/O. Masson – Station de prélèvement d'aérosols atmosphériques du pic du Midi (65)

Conception graphique-réalisation

Agence Kazoar – www.kazoar.fr



31, avenue de la Division Leclerc
92260 Fontenay-aux-Roses
RCS Nanterre B 440 546 018

COURRIER
BP 17
92262 Fontenay-aux-Roses Cedex

TÉLÉPHONE
+33 (0)1 58 35 88 88

SITE INTERNET
www.irsn.fr

E-MAIL
contact@irsn.fr
 [@IRSNFrance](https://twitter.com/IRSNFrance), [@radioprotection](https://twitter.com/radioprotection)