ASNR Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection

RAPPORT

SEPTEMBRE 2026

EXPOSITION DE LA POPULATION FRANÇAISE AUX RAYONNEMENTS IONISANTS (EXPOP)

Bilan 2020-2024

PROTÉGER LES PERSONNES ET L'ENVIRONNEMENT DES RISQUES RADIOLOGIQUES ET NUCLÉAIRES

Créée en janvier 2025, l'ASNR (Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection) est l'autorité administrative indépendante chargée de contrôler, au nom de l'État, les activités nucléaires civiles en France.

Elle contribue à l'élaboration de la réglementation, expertise la sûreté des installations nucléaires, évalue les risques liés à l'usage des rayonnements ionisants et mène des programmes de recherche pluridisciplinaires, dans les domaines de la sûreté nucléaire et de la radioprotection.

L'ASNR assure une surveillance radiologique de l'environnement. En situation d'urgence radiologique, l'ASNR conseille les autorités sur les actions de protection de la population.

L'ASNR mène ses missions au service de la sûreté et de la radioprotection en toute indépendance vis-à-vis des pouvoirs publics, des opérateurs et des intérêts privés.

Elle s'appuie, pour prendre ses décisions, sur les connaissances scientifiques les plus récentes, l'expertise des meilleurs spécialistes et le sens de la proportion aux enjeux.

L'ASNR s'inscrit dans une démarche continue de dialogue avec les parties prenantes. Elle veille à ce que les citoyens disposent d'une information claire et fiable sur les enjeux nucléaires et radiologiques et puissent participer à l'élaboration de ses décisions ainsi qu'à ses activités d'expertise et de recherche.

L'ASNR contribue au développement de la culture de sûreté et de radioprotection auprès des professionnels par son offre de formation et auprès des citoyens par la promotion des connaissances scientifiques et des comportements appropriés face aux différentes situations d'exposition aux rayonnements ionisants.

Au 1er janvier 2025, l'ASNR rassemble

2085

personnels de statuts public et privé

Pour mener à bien ses missions, elle dispose d'un budget de

380 M€

(budget 2025 incluant les recettes issues des activités de l'ASNR)

© ASNR – Rapport ASNR/2026-00492 – Crédits photographiques : © Magnific, Mark Garlick / Science Photo Libra / SPB / Science Photo Library via AFP, Guillaume Bression / Fabien Recoquillé / Médiathèque ASNR, Noak / Le bar Floréal / Médiathèque ASNR, Philippe Castano / Médiathèque ASNR – Conception graphique et réalisation : BATHYSCAPHE - www.agence-bathyscaphe.fr – Septembre 2026

RÉSUMÉ

Mots-clés : EXPOP, exposition, rayonnements ionisants, population, sources naturelles, cosmique, tellurique, radon, alimentation, sources artificielles, médical, industrie

Ce bilan de l'exposition de la population française métropolitaine aux rayonnements ionisants (EXPOP) porte sur la période 2020-2024. Les expositions prises en compte sont liées aux rayonnements naturels (rayonnements cosmiques, telluriques, radon et incorporation de radionucléides naturels), à l'imagerie médicale à visée diagnostique, aux retombées de l'accident de Tchernobyl et des essais atmosphériques d'armes nucléaires par les grandes puissances de la guerre froide, ainsi qu'aux rejets des activités nucléaires autorisées. L'accident de Fukushima-Daiichi n'a eu que des conséquences négligeables sur le territoire français.

La dose efficace moyenne par habitant est estimée à 7,1 mSv/an. Le radon est la principale source d'exposition (55 %). Viennent ensuite l'imagerie médicale (23 %), l'incorporation de radionucléides naturels (9 %), les rayonnements telluriques (9 %), les rayonnements cosmiques (4 %) et enfin l'usage industriel et militaire de la radioactivité (< 1 %).

L'augmentation observée par rapport au bilan précédent (portant sur la période 2014-2019) résulte en majeure partie de la mise à jour des coefficients de dose du radon, qui entraine une hausse de la dose évaluée pour l'exposition au radon, de 1,5 mSv/an en 2020 à 3,9 mSv/an aujourd'hui. Cette augmentation traduit une évolution de la méthode d'évaluation de la dose et du risque à partir d'une concentration moyenne de radon en France restée stable.

La période 2020-2024 a été marquée par la pandémie de Covid-19, qui a induit une baisse importante du trafic aérien entre mars 2020 et décembre 2021 et une diminution du nombre d'actes d'imagerie médicale en 2020. L'impact de cet événement sur la dose efficace moyenne sur la période est toutefois resté négligeable.

Les différentes situations d'exposition entraînent une variabilité importante autour de la moyenne nationale, c'est pourquoi plusieurs situations types ont été considérées dans ce rapport. Ainsi, la dose estimée pour une personne qui n'a bénéficié d'aucun examen médical, n'a pas pris l'avion, vit dans un logement à faible concentration de radon, à faible niveau de rayonnement tellurique, ne fume pas et ne consomme ni fruits de mer ni denrées forestières est de 2,5 mSv/an. Une variation de l'un de ces facteurs d'exposition conduit à une dose plus élevée, pouvant atteindre 28 mSv/an pour une personne qui cumulerait toutes les sources d'exposition au niveau le plus élevé considéré. Une application permettant à chacun d'estimer son exposition individuelle aux rayonnements ionisants est mise à disposition par l'ASNR sur internet (https://expop.asnr.fr/).

Les données d'exposition de la population du bilan précédent ont été actualisées de la manière suivante pour le présent rapport :

- Les données relatives à la structure de la population française ont été mises à jour par l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE). En particulier, les regroupements administratifs de communes opérés depuis 2019 ont eu un impact limité sur le calcul de la dose moyenne par habitant.

- Pour l'exposition aux rayonnements cosmiques, un nouvel outil de simulation a été utilisé pour une évaluation plus réaliste de la dose au niveau du sol tenant compte de l'ensemble des facteurs d'influence (altitude, latitude, modulation du cycle solaire).

- Les données utilisées pour l'exposition liée au transport aérien ont été mises à jour à partir des publications annuelles de la Direction générale de l'aviation civile (DGAC) et de sa dernière enquête nationale réalisée en 2023 auprès des passagers.

- L'activité volumique en radon dans l'habitat a été estimée à l'aide d'un nouveau modèle géostatistique alimenté par le résultat des campagnes de mesure récentes. Le coefficient de dose réglementaire de l'Arrêté du 16 novembre 2023 pour le radon-222 et le coefficient de dose recommandé par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) pour le radon-220 ont été appliqués pour convertir l'activité en dose.

- Une actualisation a été réalisée sur la base des données les plus récentes pour les estimations dosimétriques liées aux autres radionucléides présents dans l'environnement : d'origine naturelle, hérités des essais nucléaires et de l'accident de Tchernobyl ou apportés par les activités nucléaires autorisées.

- Enfin, l'exposition résultant de l'imagerie médicale a été mise à jour à partir des données de 2022 de l'Échantillon du système national des données de santé (ESND).

1 Introduction p.8

2 Méthode générale d'évaluation des expositions p.12

2.1 **Unité de mesure des expositions à la radioactivité** p.14

2.2 **Prise en compte de la variabilité dans l'estimation des doses efficaces et dans la restitution des résultats pour chaque source d'exposition** p.15

2.3 **Notion de dose efficace moyenne à l'échelle du pays** p.16

2.4 **Principaux éléments d'actualisation** p.17

3 Expositions et variabilité p.18

3.1 **Expositions associées aux sources naturelles de rayonnements ionisants** p.19

3.2 **Expositions associées à la présence de radionucléides artificiels dans l'environnement et à diverses sources artificielles de rayonnement** p.39

3.3 **Bilan de l'exposition de la population française** p.55

4 Références p.62

5 Annexes p.66

ANNEXE I **Exposition aux rayonnements cosmiques au niveau du sol** p.68

ANNEXE II **Transport aérien - exposition aux rayonnements cosmiques** p.75

ANNEXE III **Exposition aux rayonnements telluriques** p.84

ANNEXE IV **Exposition liée à l'incorporation de radionucléides d'origine naturelle** p.89

ANNEXE V **Exposition au radon** p.96

ANNEXE VI **Exposition aux retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires et de l'accident de Tchernobyl** p.103

ANNEXE VII **Exposition aux activités nucléaires autorisées** p.109

TABLE DES FIGURES

Figure 1 – Répartition de l'exposition de la population liée aux rayonnements telluriques - **p.15**

Figure 2 – Vue de la magnétosphère terrestre déviant le vent solaire - **p.20**

Figure 3 – Cartographie des doses (en mSv/an) en France métropolitaine sur la période 2020-2024 liées à l'exposition aux rayonnements cosmiques au niveau du sol - **p.23**

Figure 4 – Radionucléides « primordiaux » et chaînes de désintégration - **p.26**

Figure 5 – Cartographie des doses (en mSv/an) en France métropolitaine sur la période 2020-2024 liées à l'exposition aux rayonnements telluriques - **p.28**

Figure 6 – Doses liées à l'incorporation de radionucléides naturels par ingestion de denrées alimentaires et tabagisme (mSv/an) - **p.32**

Figure 7 – Estimation de l'activité volumique du radon (en Bq/m³) à l'intérieur de l'habitat en période hivernale sur une grille kilométrique - **p.35**

Figure 8 – Évolution entre 1945 et 2020 des doses efficaces (en µSv/an) estimées pour des adultes travaillant en extérieur en milieu rural (cas le plus pénalisant) et résidant dans trois ensembles géographiques différemment touchés par les retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires et de l'accident de Tchernobyl - **p.42**

Figure 9 – Cartographie des doses efficaces (en mSv/an) liées à la rémanence en 2020 des retombées de l'accident de Tchernobyl (à gauche) et des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires (à droite), estimées pour des adultes résidant en milieu urbain, travaillant à l'intérieur de locaux et ne consommant pas de champignons sauvages ni de viande de gibier - **p.43**

Figure 10 – Cartographies des doses efficaces (en mSv/an) liées à la rémanence en 2020 des « retombées radioactives anciennes », estimées pour des adultes résidant en milieu urbain ne consommant pas de champignons sauvages ni de viande de gibier - **p.44**

Figure 11 – Positions des installations nucléaires en France pour lesquelles une évaluation d'impact dosimétrique a été réalisée - **p.47**

Figure 12 – Positions des installations cyclotron en France pour lesquelles une évaluation d'impact dosimétrique a été réalisée - **p.49**

Figure 13 – Ordre de grandeur des doses efficaces reçues lors d'examens diagnostiques courants - **p.53**

Figure 14 – Répartition par modalité d'imagerie (à gauche) et contribution à la dose cumulée des actes diagnostiques (à droite) en France en 2022. La radiologie conventionnelle représente presque la moitié des actes, tandis que la scanographie contribue aux ¾ de la dose - **p.53**

Figure 15 – Exposition moyenne en France métropolitaine sur la période 2020-2024 - **p.56**

Figure 16 – Variabilité de l'exposition de la population française : cas-types - **p.58**

Introduction

Une personne peut être exposée de plusieurs manières à la radioactivité présente dans l'environnement : **l'exposition externe** résulte de rayonnements ionisants émis par des sources présentes à l'extérieur du corps humain, tandis que **l'exposition interne** résulte de l'incorporation de radionucléides, notamment par ingestion d'aliments contaminés ou par inhalation d'aérosols radioactifs. La population française dans son ensemble est exposée en permanence à des rayonnements d'origines naturelle et artificielle.

Il existe quatre modes d'exposition aux **sources naturelles de rayonnements ionisants** :

- **l'exposition externe aux rayonnements cosmiques** venant du soleil et de l'espace ;
- **l'exposition externe aux rayonnements telluriques** produits par les radionucléides naturellement présents dans la croûte terrestre depuis la formation de la Terre ;
- **l'exposition interne par incorporation d'éléments radioactifs naturels**, telluriques ou cosmogéniques (produits de manière continue dans l'atmosphère sous l'effet des rayonnements cosmiques), par ingestion de denrées (eau et aliments solides) ou par inhalation (principalement *via* la consommation de tabac) ;
- **l'exposition interne par inhalation de radon**, un gaz radioactif d'origine naturelle émanant du sol et ayant tendance à s'accumuler dans les espaces clos ou mal ventilés.

L'exposition liée à une **origine artificielle des rayonnements ionisants** peut être divisée en trois grandes catégories :

- **l'exposition liée aux retombées de particules radioactives** libérées dans l'atmosphère lors d'accidents majeurs (Tchernobyl...) et lors des essais atmosphériques d'armes nucléaires ;
- **l'exposition liée aux activités nucléaires autorisées** : il s'agit notamment des rejets de fonctionnement d'installations nucléaires civiles ou militaires ;
- **l'exposition liée à l'imagerie médicale diagnostique**, utilisant largement des rayonnements ionisants - l'exposition des patients dans ce cadre sera appelée par la suite « exposition médicale ».

Le bilan des doses individuelles moyennes présentées dans ce rapport, appelé **EXPOP** (pour « exposition de la population française aux rayonnements ionisants »), s'inscrit dans une démarche internationale soutenue par le Comité scientifique des Nations Unies sur les effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) [1]. Depuis sa création en 1955, l'UNSCEAR a entrepris, suivant son mandat, un examen approfondi des sources de rayonnements ionisants et des effets de ces rayonnements sur la santé humaine et l'environnement à l'échelle mondiale et régionale. Le présent rapport a été élaboré en cohérence avec la méthodologie mise en place par l'UNSCEAR, préparée et validée par toutes les délégations, y compris la délégation française dont l'ASNR (résultant de la fusion de l'IRSN et de l'ASN en 2025) est membre.

Il présente un **bilan actualisé pour la période 2020-2024** de l'exposition de la population en France métropolitaine aux sources d'exposition aux rayonnements ionisants citées précédemment, en les mettant en perspective les unes par rapport aux autres. Pour ce faire, la dose efficace[1] annuelle, exprimée en millisieverts par an (mSv/an), est estimée pour chaque source d'exposition ainsi que pour l'ensemble des sources (dose efficace totale), puis moyennée sur la période considérée. Le chapitre relatif aux expositions liées aux activités nucléaires autorisées est par ailleurs réalisé en application de l'article R. 1 333-27 du Décret n° 2018-434 du 4 juin 2018[2].

[1] *La notion de dose efficace est définie dans le chapitre 2.*

[2] *Décret n° 2018-434 du 4 juin 2018, article R. 1333-27 : en application de l'article L. 1333-6 du Code de la santé publique, les doses individuelles moyennes reçues par la population du fait des activités nucléaires autorisées sont estimées au moins tous les cinq ans par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire et font l'objet d'un rapport public publié sur le site internet de l'Institut.*

Ce nouveau rapport fait suite à celui publié par l'IRSN en 2021, réalisé à partir des données d'exposition de la population sur la période 2014-2019 [2]. Il vient compléter les derniers bilans réalisés par l'ASNR concernant la connaissance de l'état radiologique de l'environnement français [3], l'exposition des patients bénéficiant d'examens à visée diagnostique [4] et celle des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants [5], tous disponibles sur le site internet de l'ASNR[3].

S'agissant des **actes médicaux à visée thérapeutique** (radiothérapie externe et interne, etc.), les expositions associées correspondent à de fortes doses, délivrées localement pour soigner les pathologies concernées. Les patients ainsi traités constituent une fraction relativement peu nombreuse de la population générale et sont exposés dans le cadre très particulier de la thérapie, c'est pourquoi leur exposition n'est pas prise en compte dans le bilan présenté dans ce rapport.

L'exposition aux rayonnements ionisants **dans un cadre professionnel** est également exclue de ce bilan, dont l'objectif est d'étudier l'exposition globale de la population et d'objectiver les contributions à cette exposition des différentes sources de rayonnements ionisants évoquées ci-avant.

Selon le **baromètre**[4] 2024 de l'ASNR, l'importance réelle de ces contributions, au regard des doses évaluées pour les différentes sources d'exposition, peut parfois être très différente de la perception qu'en a la population : près d'un français sur trois (31 %) considère que les installations nucléaires industrielles et militaires sont les principales sources d'exposition à la radioactivité en France, loin devant le radon, alors que celui-ci est pourtant le principal contributeur à la dose moyenne estimée pour la population française.

Chaque source d'exposition présente, à l'échelle du territoire, une **variabilité** plus ou moins importante. Ainsi, l'exposition de la population française varie sensiblement en fonction du lieu d'habitation, qui peut avoir une influence notamment sur l'intensité des rayonnements cosmiques et telluriques et sur les teneurs en radon dans les habitations. Les habitudes de vie de la population peuvent également influencer le niveau d'exposition (temps passé à l'intérieur des habitations, régime alimentaire, consommation de fruits de mer, de tabac, nombre de vols en avion, nombre d'examens médicaux à visée diagnostique...). Aussi, en complément de la valeur de dose efficace totale moyennée pour la France, retenue comme indicateur macroscopique de l'exposition de la population, les variations de la dose pour chaque source d'exposition sont également présentées lorsqu'elles sont significatives.

Ce rapport détaille les expositions associées, d'une part, aux sources naturelles de rayonnements ionisants et, d'autre part, aux sources artificielles ; le détail des calculs est présenté dans les annexes pour chacune des sources d'exposition. Le rapport présente ensuite un bilan de l'exposition moyenne cumulée pour l'ensemble de ces sources, ainsi qu'un ensemble de cas permettant d'illustrer la variabilité individuelle de cette exposition en fonction de comportements ou de situations types.

[3] *https://www.asnr.fr*

[4] *L'intégralité de l'étude sur la perception des risques et de la sécurité par les Français est présentée dans le baromètre annuel de l'ASNR disponible sur https://barometre-perceptiondesrisques.asnr.fr.*

Méthode générale d'évaluation des expositions

2.1
Unité de mesure des expositions à la radioactivité

Afin d'évaluer l'exposition d'une personne à la radioactivité, la communauté scientifique [6] a mis au point une grandeur susceptible de rendre compte des effets biologiques et sanitaires des rayonnements ionisants sur les tissus. Cette grandeur est appelée la « dose efficace » et son unité de mesure est le sievert (Sv).

Une dose efficace est construite en trois étapes :

1. La première consiste à calculer le dépôt d'énergie des rayonnements ionisants dans les différents organes et tissus du corps humain. Par cette opération, on obtient pour chaque tissu un résultat sous la forme d'une énergie absorbée par unité de masse en joules par kg, encore appelés grays (Gy) ;

2. La deuxième étape, dont le but est de prendre en compte la capacité relative des différents types de rayonnements ionisants à créer des dommages biologiques aux tissus, consiste en une pondération du calcul précédent par des facteurs tenant compte de cette différence entre les types de rayonnements (particules alpha, bêta, neutrons, photons gamma, X...). Le produit de ce calcul s'exprime en Sv ;

3. La troisième étape, dont l'objectif est de tenir compte de la différence de sensibilité biologique des différents tissus aux rayonnements ionisants, consiste également en une pondération du résultat du calcul précédent par des facteurs tenant compte de ces différences de sensibilité tissulaires. Le résultat de ce calcul s'exprime également en Sv.

Même s'il existe des outils pour l'approcher au travers de la mesure de grandeurs opérationnelles (à l'aide de dosimètres), une dose efficace ne peut pas être mesurée ; elle ne peut être que calculée. La dose efficace est conçue en premier lieu pour évaluer diverses situations d'exposition, qu'elles soient d'origine naturelle ou le produit de l'activité humaine.

Mise en relation avec les résultats des données épidémiologiques (par exemple, le suivi médical de la cohorte des survivants des bombardements d'Hiroshima et Nagasaki), une dose efficace peut également être utilisée comme un indicateur de risque sanitaire et permettre de proposer des outils de gestion, comme des limites d'exposition pour le public ou pour les travailleurs. Dans ce rapport, la dose efficace sera utilisée uniquement comme un indicateur d'exposition.

La méthode d'estimation des doses efficaces dépend de la situation d'exposition (exposition externe ou exposition interne par ingestion ou inhalation) et de divers paramètres (environnement géologique et atmosphérique, importance respective des voies de transfert des radionucléides et évolution dans le temps, mesures d'activité (Bq) ou de débit de dose (mSv/h) et coefficients de dose). Les calculs effectués pour évaluer les doses efficaces pour chaque source d'exposition sont détaillés en annexe.

Les différences anatomiques, de métabolisme et d'habitude de vie conduisent à recevoir des doses différentes **selon l'âge** pour une même source d'exposition. Le débit respiratoire et la consommation alimentaire plus faibles des enfants par rapport aux adultes réduisent l'activité qu'ils incorporent. En revanche, leur plus faible corpulence augmente la dose qu'ils reçoivent pour une même activité incorporée ; ces facteurs tendant à se compenser. L'exposition externe au rayonnement gamma est peu influencée par les différences anatomiques mais elle varie, comme l'exposition au radon, avec la fraction du temps quotidien passé à l'extérieur. Au total, ces différences liées à l'âge dépassent rarement quelques dixièmes de la valeur moyenne pour la population globale et ne sont pas étudiées plus avant dans ce rapport.

2.2 Prise en compte de la variabilité dans l'estimation des doses efficaces et dans la restitution des résultats pour chaque source d'exposition

Qu'il s'agisse des sources d'exposition naturelles (rayonnements cosmiques et telluriques, radon, incorporation de radionucléides naturels) ou des sources artificielles (retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires et d'accidents nucléaires, rejets de fonctionnement des activités nucléaires autorisées, actes médicaux diagnostiques), les personnes sont plus ou moins exposées selon leur lieu d'habitation, leurs habitudes de vie (voyages, alimentation, tabac...) et les actes médicaux diagnostiques que nécessite leur état de santé.

Le présent rapport s'est ainsi donné pour objectif de rendre compte de **la grande variabilité des expositions individuelles.** Les doses efficaces sont estimées en fonction des principaux paramètres influents pour chaque source d'exposition, avec pour objectif d'approcher au mieux les doses reçues par chaque individu. Par exemple, les doses efficaces liées aux rayonnements telluriques et cosmiques au niveau du sol, ainsi que celles liées à l'inhalation de radon, sont principalement fonction du lieu de résidence et sont évaluées pour chaque commune. Une dose moyenne par département est ensuite calculée en pondérant les doses communales de chaque département par l'effectif de population. Ces doses par département ainsi que la méthode utilisée pour leur évaluation sont présentées en annexe, de même que des informations complémentaires qui permettent, d'une part, d'appréhender la variabilité de ces doses et, d'autre part, que chacun puisse situer sa propre exposition au regard de celle des autres résidents français.

Le graphique suivant illustre le cas de l'exposition aux rayonnements telluriques. Il montre que 90 % de la population française reçoit une dose efficace liée aux rayonnements telluriques estimée entre 0,38 mSv/an (5e percentile[5]) et 1,1 mSv/an (95e percentile[6]). Autrement dit, pour 5 % de la population française la dose est inférieure à 0,38 mSv/an et pour 5 % la dose est supérieure à 1,1 mSv/an. Une personne habitant dans l'Ain peut par ailleurs lire dans un tableau fournit en ***Annexe III*** que la dose moyenne due aux rayonnements telluriques pour son département est de 0,51 mSv/an, ce qui la situe dans les 30 % des personnes en France recevant les doses les plus faibles du fait des rayonnements telluriques.

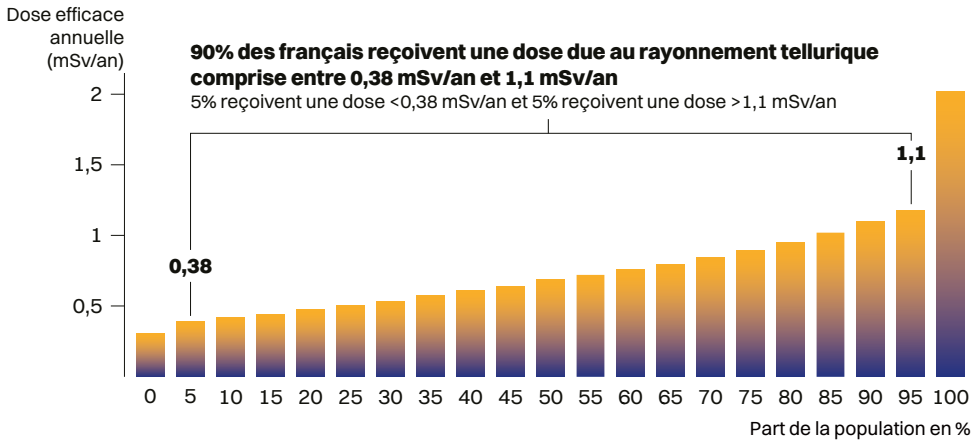


Figure 1 - Répartition de l'exposition de la population liée aux rayonnements telluriques

[5] *Le 5e percentile est la valeur de dose en-dessous de laquelle se situe l'exposition de 5 % de la population. Autrement dit, 95 % de la population reçoit une dose supérieure à cette valeur.*

[6] *Le 95e percentile est la valeur en-dessous de laquelle se situe l'exposition de 95 % de la population. Autrement dit, seule 5 % de la population reçoit une dose supérieure à cette valeur.*

Pour les retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires et de l'accident de Tchernobyl, qui dépendent aussi du lieu de résidence, les doses efficaces ont également été évaluées pour chaque commune. Pour les rejets des activités nucléaires autorisées, les doses ont été évaluées dans un rayon de 1 à 10 km autour de l'installation concernée.

Pour certaines sources d'exposition, les doses efficaces ont été évaluées pour des groupes particuliers de personnes : celles qui fument, consomment des fruits de mer, du gibier, des champignons, celles qui voyagent en avion ou ont bénéficié d'examens médicaux diagnostiques… À partir des doses efficaces associées à chaque évènement d'exposition (une radiographie des poumons, un scanner abdomino-pelvien, la consommation d'une cigarette, un trajet spécifique en avion…), dont les valeurs sont fournies en annexe à titre d'illustration, des doses efficaces moyennes ont été évaluées pour différents groupes de personnes avec différents niveaux d'exposition. Par exemple, dans le cas des rayonnements cosmiques lors de trajets en avion, on distingue les personnes qui ne prennent jamais l'avion, celles qui font 10 allers-retours par an et celles qui font 30 allers-retours par an. Pour la consommation de fruits de mer, on distingue les personnes qui n'en consomment jamais, celles qui en consomment occasionnellement (1 à 2 fois par mois), celles qui en consomment régulièrement (1 à 2 fois par semaine) et celles qui en consomment beaucoup (une cinquantaine de kg/an).

Enfin, pour permettre d'aller plus loin dans l'estimation de sa dose individuelle, l'ASNR a développé une application disponible sur internet[7], qui permet à chacun d'estimer son exposition individuelle aux rayonnements ionisants à partir d'un questionnaire, portant notamment sur le lieu et les habitudes de vie.

2.3 Notion de dose efficace moyenne à l'échelle du pays

Malgré la variabilité individuelle, il est intéressant, pour hiérarchiser les sources d'exposition, de disposer, pour chacune, d'une estimation de la dose efficace moyenne reçue par l'ensemble de la population française. Par exemple, la dose moyenne estimée en France du fait des rayonnements cosmiques, des rayonnements telluriques, de l'inhalation de radon, etc.

Faute de données suffisantes, les estimations des doses dépendantes du lieu de résidence (radon, rayonnements cosmique et tellurique…) n'ont pas pu être réalisées dans ce rapport pour les départements et territoires d'Outre-mer[8]. Pour évaluer les moyennes de dose à l'échelle du territoire métropolitain, les doses estimées en fonction du lieu de résidence, sous la forme d'une valeur par commune (cf. § 2.2), ont chacune été multipliées par le nombre d'habitants de la commune, sommées puis divisées par l'effectif moyen de la population française métropolitaine sur la période 2020-2024 (soit environ 66 millions de personnes).

Les doses concernant un groupe de population pratiquant une activité entraînant une exposition radiologique ont été évaluées suivant le nombre d'événements concernés (trajets en avion, cigarettes fumées, examens médicaux…), multiplié par la dose estimée pour chacun des événements, puis divisé par l'effectif de la population française métropolitaine. Les doses efficaces moyennes évaluées pour chaque source d'exposition ont ensuite été additionnées pour obtenir une dose efficace moyenne globale, toutes sources d'exposition confondues (cf. § 3.3.1).

Il est légitime de s'interroger sur le bien-fondé des évaluations de doses moyennes, compte tenu de l'importance de la variabilité des expositions : certaines personnes ne prennent pas l'avion, n'ont bénéficié d'aucun examen médical utilisant des rayonnements ionisants, ne consomment ni tabac ni fruits de mer ou encore habitent dans des plaines, alors que d'autres vivent en montagne. On perçoit donc bien l'effet d'homogénéisation et, dans le cas des doses les plus élevées estimées pour un nombre réduit de personnes, de dilution, induit par l'utilisation de la moyenne évaluée pour une personne représentative de la population française dans son ensemble.

[7] *https://expop.asnr.fr*

[8] *La dose moyenne due aux actes d'imagerie médicale diagnostique prend en compte, en revanche, un échantillon des bénéficiaires de l'Assurance maladie qui est représentatif de la population française tant métropolitaine que d'Outre-mer.*

Pour autant, la moyenne reste un indicateur utile pour fournir une image d'ensemble de l'exposition de la population française, agréger les différentes sources d'exposition et évaluer une exposition globale. Elle est utilisée par l'UNSCEAR dans le même objectif. De plus, elle permet de mettre en perspective les contributions des différentes sources d'exposition par des représentations graphiques (camemberts et histogrammes), qui fournissent des images synthétiques des résultats. Enfin, pour réduire l'effet de lissage imposé par le recours à la moyenne « France entière », des doses ont été calculées pour une **dizaine de cas-types** correspondant à des groupes de population ayant un comportement spécifique, afin d'illustrer cette variabilité (cf. § 3.3.2).

2.4 Principaux éléments d'actualisation

Certaines données nécessaires au calcul de la dose moyenne par habitant ont fait l'objet d'une mise à jour depuis la publication du précédent bilan [2] : il s'agit des données relatives à la structure de la population française (nombre d'habitants par commune, population totale en France) mises à disposition par l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE), à la création de communes nouvelles par regroupement de communes dans le cadre de la réforme des collectivités territoriales, aux habitudes de transport aérien de la population française (volume et fréquence des vols commerciaux, destinations en France et dans le monde, nombre de vols par habitant...), mises à disposition par la Direction générale de l'aviation civile (DGAC), et aux actes de diagnostic médical, mises à jour à partir des données de 2022 extraites de l'échantillon du système national des données de santé (ESND).

Pour l'exposition aux rayonnements cosmiques au sol, un nouvel outil basé sur des simulations numériques a été utilisé pour une évaluation plus réaliste, tenant compte de l'ensemble des facteurs d'influence (altitude, latitude, modulation du cycle solaire...).

Pour le radon, son activité volumique dans l'habitat a été estimée à l'aide d'un nouveau modèle géostatistique, alimenté par une base de données enrichie par des mesures compilées depuis 2019. Les doses associées sont calculées à l'échelle communale à partir des concentrations moyennes en radon et en thoron à l'intérieur et à l'extérieur. Celles-ci sont déduites des activités volumiques dans l'habitat selon une approche plus réaliste (corrigées des variations saisonnières et de l'hétérogénéité des mesures à l'intérieur d'un même bâtiment) et non plus selon une estimation haute comme dans les bilans précédents. Un nouveau coefficient de dose pour le radon a été introduit dans la réglementation en 2023 [7] ; sa valeur est plus du double de celle qui figurait dans la réglementation antérieure (une évaluation dosimétrique avait été réalisée lors du bilan de 2021 [2] afin d'anticiper le changement déjà prévisible de ce coefficient de dose). Un nouveau coefficient de dose a également été adopté pour le « thoron » (radon-220) [16], avec une valeur doublée par rapport à celle utilisée dans le bilan précédent.

Enfin, les estimations dosimétriques liées aux radionucléides naturels présents dans l'environnement, aux radionucléides hérités des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires et de l'accident de Tchernobyl, ainsi qu'aux radionucléides présents dans les rejets des activités nucléaires autorisées, ont fait l'objet d'une actualisation sur la base des données les plus récentes.

La période 2020-2024 a été marquée par une baisse importante du trafic aérien en raison de la pandémie de Covid-19, particulièrement entre mars 2020 et fin 2021. La pandémie de Covid-19 a par ailleurs eu un impact sur le nombre d'actes d'imagerie médicale réalisés en 2020, inférieur d'environ 10 % au nombre d'actes attendus. L'impact de ces événements sur la dose efficace moyenne sur la période 2020-2024 pour l'ensemble des expositions est toutefois resté négligeable.

Expositions et variabilité

Ce chapitre présente les doses individuelles pour la population française associées à chacune des sources d'exposition, en termes de moyenne et de variabilité. Il aborde ensuite l'exposition moyenne cumulée par habitant pour l'ensemble de ces sources et illustre avec quelques cas les variations possibles de cette exposition pour des situations et des comportements qui s'écartent de la situation moyenne considérée.

3.1
EXPOSITIONS ASSOCIÉES AUX SOURCES NATURELLES DE RAYONNEMENTS IONISANTS

Les expositions aux rayonnements cosmiques et telluriques, celles liées à l'incorporation de radionucléides naturels contenus dans les denrées, l'eau de boisson et le tabac puis celles associées à la présence de radon dans l'habitat sont successivement abordées dans ce chapitre.

3.1.1 Exposition aux rayonnements cosmiques

La Terre est bombardée en continu par des rayonnements cosmiques d'origine galactique et extragalactique qui parcourent l'espace dans toutes les directions. Ces rayonnements sont constitués à 90 % de particules de très haute énergie, principalement des protons (87 %) et des particules alpha (12 %).

Les particules ayant une énergie suffisante pour franchir la magnétosphère terrestre (cf. ***Figure 2***) interagissent avec notre atmosphère et y génèrent des gerbes de rayonnements secondaires (neutrons, muons, électrons, positrons...). L'intensité du flux de particules décroît avec l'épaisseur d'air traversé : seulement 0,05 % des protons arrivent au niveau de la mer, où environ 50 % de l'exposition est due aux muons, 25 % aux électrons et positrons, 20 % aux neutrons et 5 % aux photons.

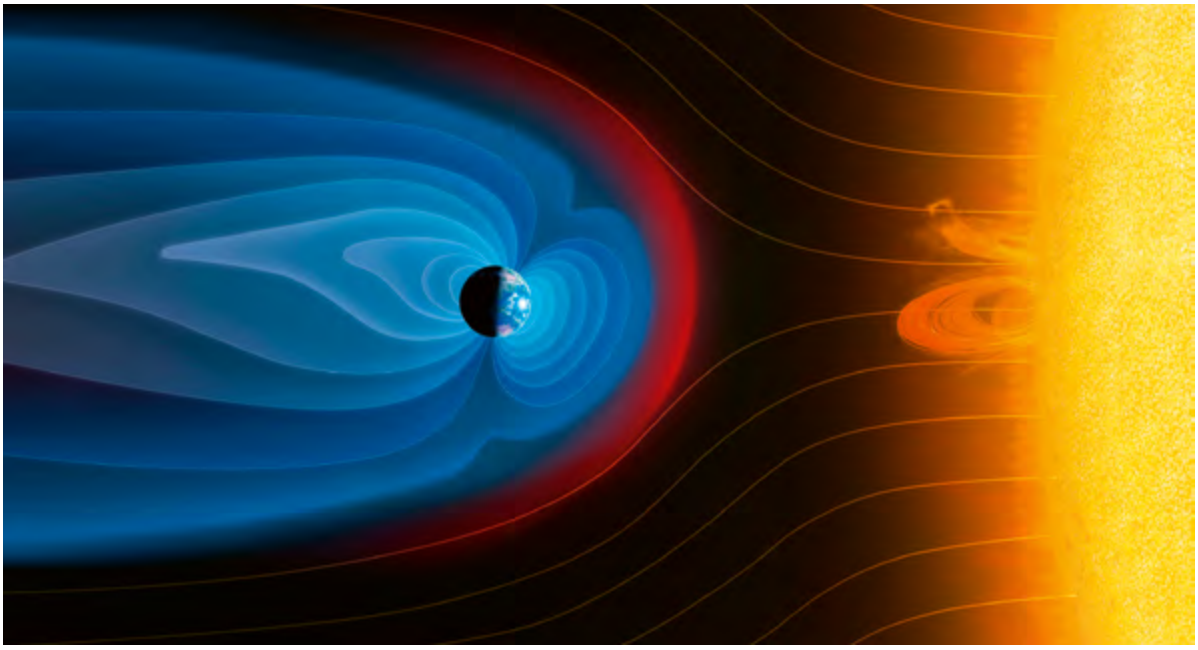


Figure 2 *- Vue de la magnétosphère terrestre déviant le vent solaire*

Les rayonnements cosmiques et les mécanismes de protection terrestre

L'espace est traversé en permanence par des flux de particules chargées, issues très probablement de l'explosion de supernovas. Ces particules - principalement des protons – sont accélérées à des vitesses quasi-relativistes et constituent le rayonnement cosmique galactique (RCG). La surface de la Terre est protégée de ce rayonnement par 3 boucliers naturels successifs :

- **Le champ magnétique solaire** filtre le RCG le moins énergétique. Son efficacité dépend directement de son intensité, qui varie selon des cycles d'une durée moyenne de 11 ans. En période de maximum de l'activité solaire, la protection apportée par le champ magnétique solaire est maximale.

- **Le champ magnétique terrestre** a un pouvoir de déviation des particules chargées plus intense à l'équateur qu'aux pôles. Il filtre également le RCG le moins énergétique et nous protège par ailleurs du vent solaire[9] lorsque celui-ci est peu énergétique.

- **L'atmosphère terrestre** absorbe de manière très efficace le RCG, qui interagit avec les molécules de l'atmosphère pour former des radionucléides dits « cosmogéniques » (comme le carbone-14), ce qui entraîne la production d'une « pluie » de particules secondaires (muons, neutrons, pions, électrons...), appelées « RCG secondaire ». Le maximum du débit de dose lié au RCG et au RCG secondaire est observé à environ 25 km d'altitude, avec une baisse graduelle jusqu'au niveau de la mer.

Notre exposition aux rayonnements cosmiques (au niveau du sol ou au cours d'un trajet en avion) est donc modulée par l'activité solaire, la latitude et l'épaisseur d'air traversée, qui est fonction de l'altitude.

Même si nous sommes globalement mieux protégés du RCG en période de maximum du cycle solaire, l'augmentation de l'activité solaire peut entraîner une accélération du vent solaire et induire des phénomènes violents tels que les éruptions solaires ou les éjections de masse coronale[10]. Ces phénomènes, lorsqu'ils perturbent et déforment la magnétosphère terrestre, sont à l'origine de tempêtes géomagnétiques propices à l'observation d'aurores boréales et australes. Lors de ces tempêtes, les aurores peuvent être visibles en dehors du cercle polaire à des latitudes beaucoup plus basses, comme ce fut le cas jusqu'en Corse en mai 2024.

Plus rarement, ces phénomènes peuvent accélérer les protons solaires et leur donner suffisamment d'énergie pour pénétrer la magnétosphère terrestre et interagir avec notre atmosphère, induisant des augmentations brusques et parfois intenses du débit de dose de l'ordre de quelques centaines de µSv/h, voire quelques mSv/h aux altitudes de vol. Ces événements, qui ne durent en moyenne que quelques heures, sont très difficiles à prévoir. Au cours des 25 dernières années, seuls quatre évènements de ce type ont entraîné une augmentation significative du débit de dose.

[9] *Le vent solaire est un flux de particules (principalement des électrons et des protons) envoyées par le soleil dans toutes les directions.*

[10] *Une éjection de masse coronale est une énorme explosion de plasma (gaz très chaud et ionisé) et de particules chargées qui se dégage de l'atmosphère du soleil, appelée la couronne solaire.*

3.1.1.1
Au niveau du sol

Principaux paramètres influents

L'exposition aux rayonnements cosmiques au niveau du sol varie en fonction :

- **de l'altitude :** l'exposition augmente avec l'altitude, d'environ 0,3 mSv/an au niveau de la mer à 0,8 mSv/an au-delà de 2000 m, où la couche d'atmosphère est plus mince et moins protectrice vis-à-vis des rayonnements ;

- **de la latitude :** les particules chargées de basse énergie sont déviées par le champ magnétique terrestre et leur entrée est facilitée au niveau des pôles, où elles suivent les lignes de force du champ magnétique - ainsi, l'exposition moyenne à quelques mètres au-dessus du niveau de la mer est légèrement plus basse en Corse-du-Sud, de l'ordre de 0,30 mSv/an, que dans le nord de la France, où elle est d'environ 0,32 mSv/an ;

- **de l'activité solaire :** lorsque le cycle solaire atteint son maximum[11], le champ magnétique solaire est plus intense et protège ainsi plus efficacement la Terre des rayonnements cosmiques - à titre d'exemple, la dose efficace estimée à Tignes est passée de 0,92 mSv en 2020 lorsque l'activité solaire était moins intense à 0,82 mSv en 2024, au maximum du cycle. Les évènements solaires, éruptions et éjections de masse coronale ont un effet considéré comme négligeable sur l'exposition, du fait de leur courte durée et de leur faible fréquence ;

- **du temps passé à l'intérieur et à l'extérieur de l'habitat :** les matériaux de construction apportent une protection vis-à-vis des rayonnements cosmiques. On considère que 90 % du rayonnement cosmique incident pénètre à l'intérieur de l'habitat. Ainsi, l'exposition des personnes aux rayonnements cosmiques est réduite de 10 % pendant le temps passé en intérieur.

Méthodologie utilisée

Le détail de la méthode utilisée pour déterminer l'exposition globale de la population française aux rayonnements cosmiques au niveau du sol et sa variabilité est présenté en ***Annexe I***.

Les évaluations de la dose liée aux rayonnements cosmiques au niveau du sol ont été réalisées à l'aide de l'outil EXPACS[12], basé sur des simulations des interactions rayonnement-matière tenant compte de l'ensemble des paramètres influents (altitude, latitude, modulation du cycle solaire). Dans les éditions précédentes de ce bilan, la dose associée aux rayonnements cosmiques ne prenait en compte que les variations liées à l'altitude, ce paramètre étant le plus influent. Les écarts entre les résultats plus réalistes obtenus avec EXPACS et les estimations antérieures sont de l'ordre de 20 % pour les altitudes les plus élevées.

Les évaluations de dose ont été effectuées pour chaque commune de France métropolitaine, à chaque mois de la période 2020-2024. Dans chaque commune, les habitants sont considérés résider au niveau de la mairie, dont l'altitude est utilisée pour le calcul. Le temps moyen passé en intérieur et le facteur de protection apporté par l'habitat vis-à-vis du rayonnement cosmique ont été pris en compte. Les résultats ont ensuite été moyennés par année et par commune. La dose moyenne par département a ensuite été calculée en pondérant les doses obtenues pour chaque commune du département par l'effectif de sa population.

La dose efficace moyenne en France a été calculée en sommant les doses évaluées par commune, multipliées par la population communale et divisées par la population française métropolitaine.

[11] *Le dernier maximum du cycle solaire actuel a été atteint en octobre 2024 et le dernier minimum en décembre 2019.*

[12] *Outil développé par Japan Atomic Energy Agency (JAEA), disponible sur le site http://phits.jaea.go.jp/expacs/.*

Résultats

Selon les communes, la dose efficace sur la période 2020-2024 varie entre 0,27 et 0,80 mSv/an. Ces variations, qui dépendent principalement de l'altitude de la commune considérée, sont représentées sur la ***Figure 3***.

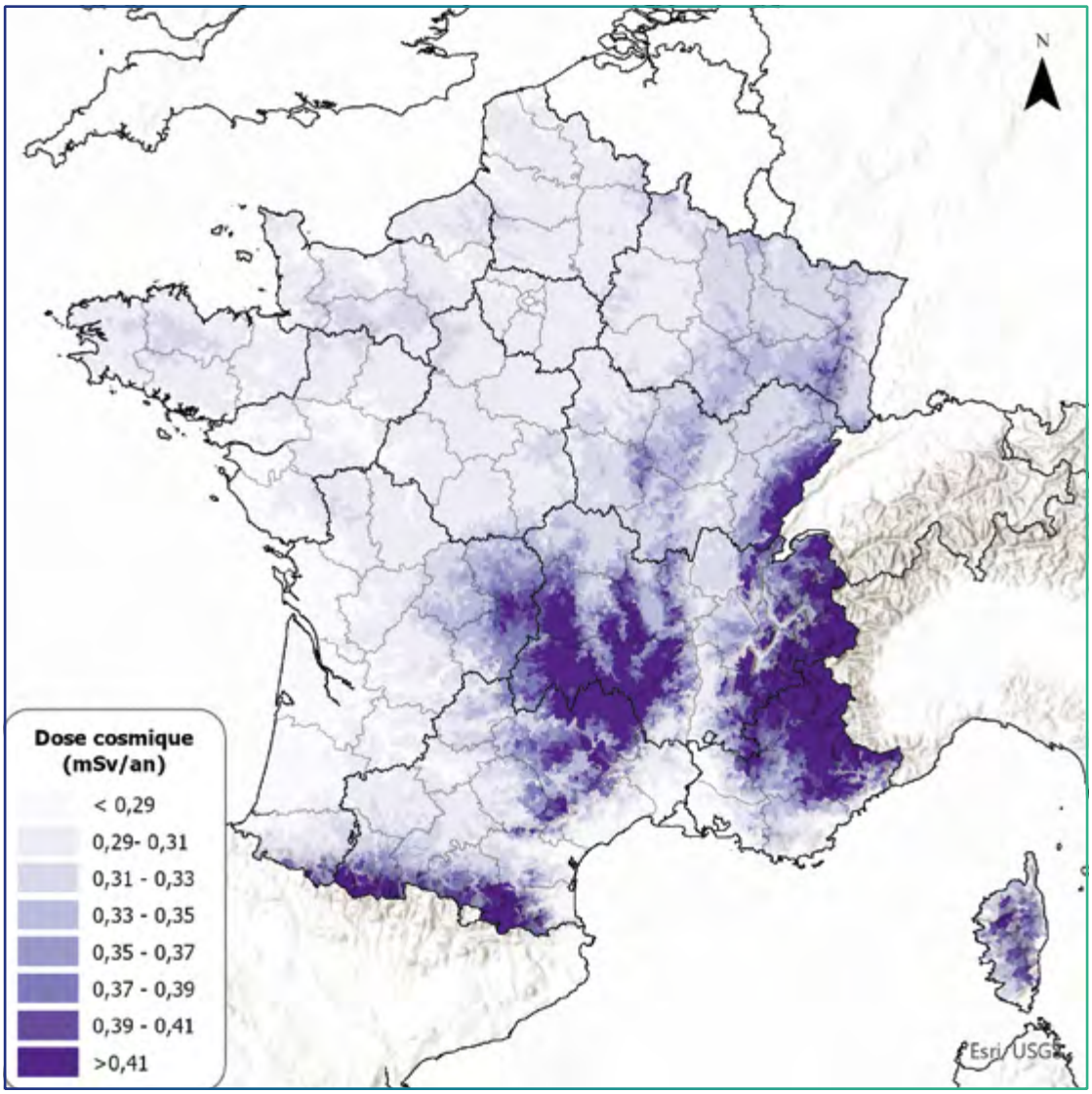


Figure 3 *- Cartographie des doses (en mSv/an) en France métropolitaine sur la période 2020-2024 liées à l'exposition aux rayonnements cosmiques au niveau du sol*

Les doses moyennes par département sont présentées en ***Annexe I*** dans le ***Tableau A3.*** Le résultat le plus élevé (0,44 mSv/an) est atteint dans le département des Hautes-Alpes et le plus bas (0,28 mSv/an) dans les départements de la Gironde, de l'Hérault et des Landes.

Pour l'ensemble de la France métropolitaine, la dose efficace moyenne par habitant est estimée à 0,30 mSv/an. Pour 5 % de la population la dose est inférieure ou égale à 0,28 mSv/an (5e percentile) et pour 5 % de la population la dose est supérieure à 0,35 mSv/an (95e percentile).

La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus sur la période 2014-2019, où la dose moyenne sur le territoire était estimée à 0,31 mSv/an, montre une légère baisse, en particulier dans les départements montagneux, qui s'explique par l'adoption de l'outil EXPACS et par le cycle d'activité solaire pendant la période considérée.

3.1.1.2
Lors de transports aériens

Principaux paramètres influents

L'exposition des passagers lors d'un vol dépend de :

- **sa durée :** l'exposition est d'autant plus importante que la durée du vol est longue ;
- **sa trajectoire :** elle fait intervenir les paramètres d'**altitude** (l'exposition augmente avec l'altitude, depuis environ 0,3 mSv/an au niveau de la mer à plus de 20 mSv/an au-delà de 10 000 m) et de **latitude** (l'exposition augmente lorsqu'on s'approche des pôles, depuis environ 0,26 mSv/an au niveau de la mer à l'équateur jusqu'à environ 0,33 mSv/an au niveau des cercles polaires) ;
- **sa date :** en période de forte activité solaire, le champ magnétique solaire est plus fort et par conséquent l'exposition sur Terre plus faible.

Méthodologie utilisée

Le détail de la méthode utilisée pour déterminer l'exposition globale de la population française aux rayonnements ionisants lors de transports aériens et sa variabilité est présenté en ***Annexe II***.

Pour chacune des liaisons aériennes à destination ou en provenance d'aéroports situés en France métropolitaine, le nombre de passagers pendant chacune des années de la période 2020-2024 a été déterminé à partir des données[13] publiées par la Direction générale de l'aviation civile (DGAC). Le pourcentage de résidents français parmi les passagers a été estimé à partir des résultats de la dernière enquête nationale[14] de la DGAC, ce qui a permis de déterminer le nombre annuel de résidents français empruntant chacune des liaisons aériennes.

L'outil SievertPN[15] (Système d'information et d'évaluation par vol de l'exposition au rayonnement cosmique dans les transports aériens) a été utilisé, de même que dans le précédent bilan, pour estimer la dose reçue pendant un vol pour chaque liaison. Cette estimation s'appuie sur les informations transmises par les compagnies aériennes (routes empruntées par les avions et durées de vol), et ce pour chaque année de la période 2020-2024 afin de prendre en compte la variation du cycle solaire et une amélioration de l'outil SievertPN opérée en 2021.

La dose totale, reçue chaque année de la période 2020-2024 par la population française, a été évaluée en multipliant le nombre annuel de résidents français empruntant chacune des liaisons aériennes par la dose associée à cette liaison. La dose totale annuelle moyennée sur la période 2020-2024 a ensuite été divisée par la population française métropolitaine pour déterminer la dose individuelle moyenne annuelle liée au transport aérien.

Afin d'illustrer la variabilité des expositions, le présent bilan a comparé les expositions des personnes qui ne prennent jamais l'avion et de celles qui peuvent être considérées comme des « voyageurs fréquents » effectuant plus de 10, voire 30 voyages aller-retour par an suivant l'enquête nationale de la DGAC. La dose reçue par ces voyageurs a été calculée comme étant la dose moyenne annuelle par vol multipliée par le nombre d'allers et de retours effectués.

[13] *https://www.ecologie.gouv.fr/statistiques-du-trafic-aerien*

[14] *https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/DGAC_Enquete_passagers_aeriens_2023_vf.pdf*

[15] *https://www.sievert-system.org*

Résultats

Les doses associées aux principales liaisons intérieures et internationales sont présentées en ***Annexe II***. Elles varient en fonction de l'année (par exemple, la dose associée à un vol aller-retour Paris-Toulouse était de 5,4 µSv en 2020 et de 3 µSv en 2024), en raison notamment de la fluctuation de l'activité solaire. Elles varient aussi suivant la durée du vol, et donc selon la distance parcourue (en 2024, la dose évaluée était de l'ordre de 5 µSv pour un vol aller-retour Paris-Ajaccio alors qu'elle était de l'ordre de 40 µSv pour un vol aller-retour Paris-Pointe-à-Pitre). De manière générale, la dose évaluée au cours d'un vol est de l'ordre d'une dizaine de µSv pour un aller-retour en Europe et peut monter selon les années jusqu'à une centaine de µSv pour des destinations plus lointaines, en Asie ou en Amérique par exemple.

La dose moyenne annuelle estimée pour une personne résidant en France métropolitaine sur la période 2020-2024 liée au transport aérien est de 10 µSv/an, pour une moyenne de 1,1 vol/an/habitant[16]. Cette dose, calculée à l'échelle de la population française, prend en compte à la fois les personnes qui ont pris l'avion une ou plusieurs fois pendant cette période et celles qui ne l'ont pas pris. La dose estimée pour un voyageur ayant effectué 10 voyages aller-retour par an sur la période 2020-2024 est de 0,18 mSv/an, elle est de 0,55 mSv/an pour une personne ayant effectué 30 voyages aller-retour annuels.

La dose moyenne annuelle évaluée sur la période 2020-2024 a diminué par rapport à celle évaluée sur la période 2014-2019 (14 µSv/an). Pour un même vol, la dose est en effet plus faible sur la période 2020-2024, en raison de la période de forte activité solaire (le champ magnétique solaire ayant été plus intense et ainsi plus protecteur vis-à-vis des rayonnements cosmiques) et d'une amélioration de l'outil SievertPN en 2021 permettant de réduire les incertitudes, qui a eu pour conséquence une diminution des doses évaluées (jusqu'à 30 % pour certaines destinations). À l'inverse, la durée et la trajectoire de certains vols ont été allongées en raison de la guerre entre la Russie et l'Ukraine, entrainant une augmentation des doses associées. Enfin, la période 2020-2024 a été marquée par une forte baisse du trafic aérien liée à la pandémie de Covid-19, particulièrement entre mars 2020 et fin 2021. Cette diminution a toutefois été compensée par l'augmentation constante du nombre de passagers au fil des années ; ainsi, le nombre annuel de passagers moyenné sur la période 2020-2024 s'avère très proche de celui recensé dans le précédent bilan.

Les valeurs suivantes, qui cumulent l'exposition au sol (premier terme des sommes présentées ci-dessous) et celle liée au transport aérien (second terme), sont retenues pour l'exposition aux rayonnements cosmiques :

- une dose efficace moyenne par habitant de 0,30 + 0,01 = 0,31 millisievert par an (mSv/an) ;
- une dose efficace de 0,30 + 0,18 = 0,48 mSv/an pour une personne ayant effectué 10 voyages aller-retour par an.

[16] *Valeur estimée en rapportant le nombre de vols effectués par des passagers français à la population totale métropolitaine.*

3.1.2 Exposition aux rayonnements telluriques

Principaux paramètres influents

La croûte terrestre contient des radionucléides dits « primordiaux », représentés *Figure 4*. Ils sont présents depuis la formation de la Terre en raison de périodes radioactives suffisamment longues par rapport à l'âge de celle-ci pour y subsister encore aujourd'hui. Ces radionucléides sont principalement l'uranium-238 (^{238}U), le thorium-232 (^{232}Th) et l'uranium-235 (^{235}U) qui, en se désintégrant, donnent naissance à d'autres radionucléides naturels[17]. Outre ces trois familles naturelles radioactives, il existe d'autres radionucléides dont la désintégration conduit à des éléments stables ; le plus important d'entre eux est le potassium-40 (^{40}K).

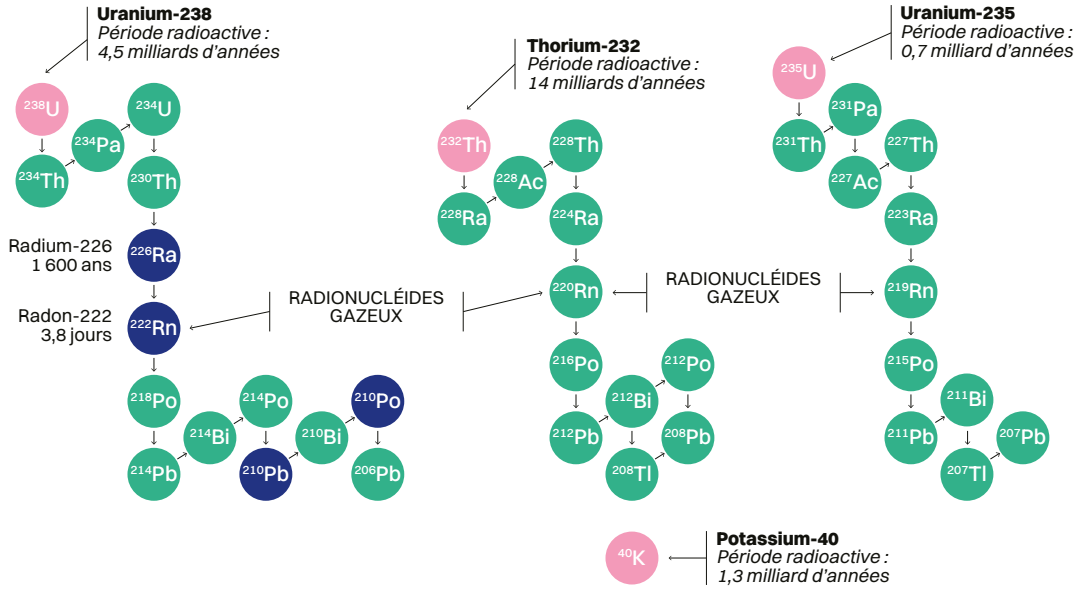


Figure 4 - *Radionucléides « primordiaux » et chaînes de désintégration*

[17] *L'uranium naturel est un mélange isotopique de 99,3 % d'^{238}U, 0,7 % d'^{235}U et 0,005 % d'^{234}U en masse (49 % d'^{238}U, 2 % d'^{235}U et 49 % d'^{234}U en activité) et la concentration moyenne de l'activité du ^{232}Th dans la croute terrestre est proche de celle de l'^{238}U.*

Les rayonnements gamma émis par ces radionucléides sont à l'origine d'une exposition externe, soit à l'extérieur depuis le sol, soit dans l'habitat depuis le sol et les murs, une grande partie des constituants du bâti (bétons, briques, remblais...) étant susceptible de contenir ces radionucléides. Dans le cadre de ce rapport, on présente sous le terme d'« exposition aux rayonnements telluriques » la somme des doses externes reçues par la population depuis ces constituants terrestres, à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments.

Méthodologie utilisée

La méthode utilisée pour évaluer la dose liée aux rayonnements telluriques est inchangée par rapport à celle présentée dans le précédent bilan. Elle est décrite ci-après.

Dose tellurique en intérieur

Pour estimer la composante tellurique de l'exposition aux rayonnements gamma dans les habitations, l'ASNR utilise le résultat de nombreuses mesures géolocalisées de débit de dose gamma réalisées dans des cabinets dentaires ou vétérinaires[18]. La composante cosmique calculée par ailleurs est déduite du résultat des mesures. Afin de disposer d'une cartographie exhaustive de ce débit de dose à l'échelle communale un traitement géostatistique est réalisé, utilisant le potentiel uranifère des formations géologiques comme information auxiliaire, car il existe une assez bonne corrélation en France entre la teneur en uranium des formations géologiques et celle des matériaux de construction produits localement.

Dose tellurique en extérieur

Pour estimer la dose reçue à l'extérieur par la population depuis le sol, l'ASNR utilise une relation simplifiée entre le débit de dose en intérieur et le débit de dose en extérieur (cf. ***Annexe III*** pour le détail des calculs).

Résultats

L'exposition aux rayonnements telluriques se caractérise par des débits de dose variables sur le territoire en fonction de la nature des sols et selon que l'on se trouve à l'intérieur ou à l'extérieur de bâtiments. Les calculs réalisés montrent que la dose efficace varie entre 0,30 mSv/an et 2,0 mSv/an selon les communes. Les valeurs les plus basses sont atteintes au niveau des bassins sédimentaires (parisien et aquitain) et des vallées fluviales, et les valeurs les plus élevées au niveau des massifs anciens granitiques ou métamorphiques (Massif-central, Vosges, Bretagne, Corse...). Ces variations sont représentées sur la ***Figure 5***.

[18] *La base de données est constituée de mesures du débit de dose lié au rayonnement gamma, enregistrées par des dosimètres témoins radio photo luminescents (RPL) sur 17 404 sites répartis sur le territoire et géolocalisés précisément. Le choix de cibler les établissements dentaires et vétérinaires s'explique par la bonne couverture du territoire français et la confiance accordée aux mesures.*

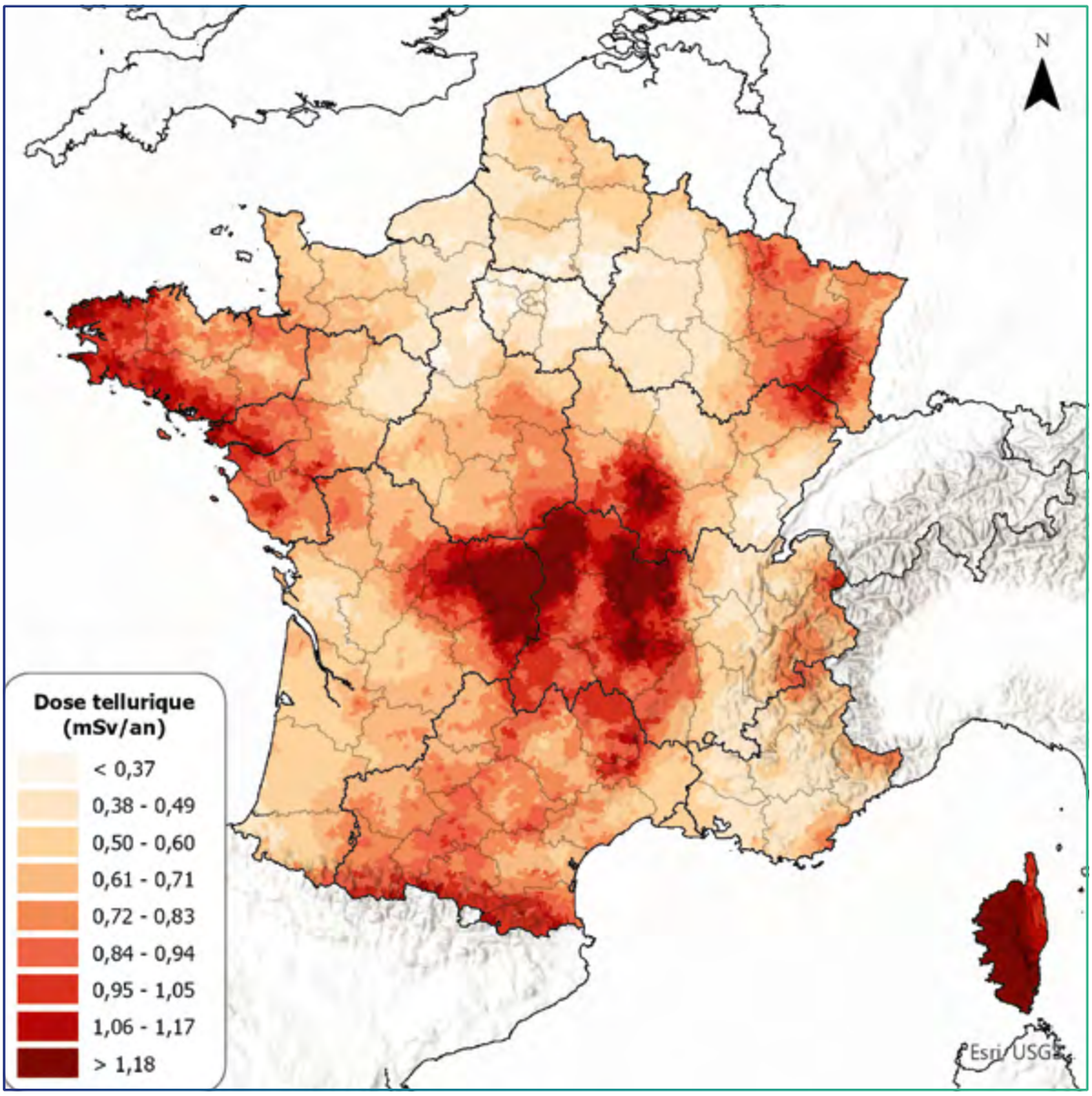


Figure 5 - Cartographie des doses (en mSv/an) en France métropolitaine sur la période 2020-2024 liées à l'exposition aux rayonnements telluriques

Les doses moyennes par département sont présentées en ***Annexe III*** dans le ***Tableau A10***. Le résultat le plus élevé (1,5 mSv/an) est atteint dans le département de la Corse-du-Sud et le plus bas (0,37 mSv/an) dans les départements des Yvelines et des Hauts-de-Seine.

Pour l'ensemble de la France métropolitaine, la dose efficace moyenne estimée par habitant est de 0,62 mSv/an. Pour 5 % de la population, la dose est inférieure ou égale à 0,38 mSv/an (5e percentile) et pour 5 % de la population, la dose est supérieure à 1,1 mSv/an (95e percentile).

Les doses évaluées dans le présent bilan pour l'exposition aux rayonnements telluriques, aux règles d'arrondi près, n'ont pas évolué par rapport à celles évaluées dans le précédent bilan.

Les valeurs suivantes sont retenues pour l'exposition aux rayonnements telluriques :

- une dose efficace moyenne par habitant de 0,62 millisievert par an (mSv/an) ;
- une gamme de variations entre 0,38 mSv/an (5e percentile) et 1,1 mSv/an (95e percentile).

Radioactivité naturellement plus élevée sur certaines plages

L'ASNR conduit régulièrement des études pour mieux caractériser le bruit de fond naturel et ses singularités. Parmi ces singularités, des activités élevées d'uranium et de thorium sur les plages situées à l'embouchure des fleuves de nombreux pays sont associées à l'érosion puis l'accumulation de minéraux denses contenant des monazites, des apatites ou des zircons, à l'origine d'augmentations significatives du débit de dose tellurique. Ainsi, des accumulations de sables contenant parfois plusieurs milliers de Bq/kg de radionucléides naturels sont rendues visibles localement sur le littoral français par la présence conjointe de minéraux denses radioactifs avec d'autres minéraux denses et colorés.

Des expertises ont été menées par l'IRSN en deux points des plages de Camargue (Est des phares de Beauduc et de l'Espiguette dans le delta du Rhône) entre 2000 et 2007, puis sur la plage de Trébézy à Saint-Nazaire (estuaire de la Loire) en 2023 et 2024, après la découverte fortuite de telles accumulations. Les minéraux radioactifs proviennent de l'érosion de roches granitiques et métamorphiques du bassin rhodanien et du massif sud-armoricain respectivement.

En Camargue, ces minéraux sont transportés par le Rhône puis redistribués sur les plages du littoral à la suite de processus naturels de sédimentation [8] ; à Saint-Nazaire, ils proviennent le plus vraisemblablement de l'érosion de la falaise littorale qui surplombe le littoral au nord de l'estuaire de la Loire. Les débits de dose mesurés par l'IRSN sur les plages de Camargue et sur celle de Saint-Nazaire dépassent par endroits 2 µSv/h [9] (à comparer au bruit de fond tellurique national de l'ordre de 0,04 à 0,13 µSv/h). Sous des hypothèses pénalisantes, la fréquentation de ces plages par des riverains ou des vacanciers pourrait induire une exposition maximum de l'ordre de 1 mSv/an [9,10][19].

[19] *https://recherche-expertise.asnr.fr/savoir-comprendre/environnement/etude-radiologique-sables-plage-trebezy-saint-nazaire*

3.1.3 Exposition liée à l'incorporation de radionucléides d'origine naturelle

Les denrées alimentaires, les feuilles de tabac et les eaux de boisson contiennent naturellement des radionucléides, qui trouvent leur origine dans les roches et les sols depuis la formation de la terre (radionucléides telluriques) ou sont produits en permanence dans les hautes couches de l'atmosphère sous l'effet de l'interaction des rayonnements cosmiques avec les noyaux des atomes présents dans l'atmosphère (radionucléides cosmogéniques).

Les principaux radionucléides telluriques que sont le potassium-40 (^{40}K) et les descendants des chaînes de désintégration de l'uranium-238 (^{238}U), du thorium-232 (^{232}Th) et de l'uranium-235 (^{235}U) (dites « chaînes U-Th ») entrent dans la chaîne alimentaire terrestre, absorbés par les racines des végétaux ou par des mécanismes de remise en suspension et de dépôt foliaire de particules de sols.

Certains descendants des chaînes U-Th sont également transférés par voie foliaire. En effet, chacune des trois chaînes de désintégration donne naissance à un gaz radioactif, le radon, qui s'échappe du sol dans l'air et s'y désintègre en donnant naissance à des radionucléides qui se fixent alors sur des particules atmosphériques et se déposent sur les plantes. C'est le cas notamment du polonium-210 (^{210}Po) et du plomb-210 (^{210}Pb), descendants de l'^{238}U.

Les principaux radionucléides cosmogéniques que sont le carbone-14 (^{14}C), le béryllium-7 (^{7}Be), le sodium-22 (^{22}Na) et le tritium (^{3}H) sont transférés principalement par voie aérienne aux feuilles des végétaux.

L'ensemble des radionucléides d'origine naturelle sont transférés aux animaux et denrées d'origine animale par leur alimentation. Pour tous ces radionucléides, à l'exception du ^{40}K et du ^{14}C qui sont maintenus à des niveaux constants dans l'organisme humain, les doses liées à leur incorporation *via* l'alimentation dépendent de leur teneur dans les denrées (activités massiques exprimées en Bq/kg), des quantités de denrées ingérées (kg/an), ainsi que d'un coefficient de dose par unité d'incorporation par ingestion (Sv/Bq ingéré). Les quantités de chaque type de denrées d'origine terrestre annuellement consommées ont été réestimées récemment sur la base d'un plus grand nombre d'enquêtes alimentaires et, par rapport à la précédente édition de ce rapport, la décroissance radioactive du ^{210}Po durant le délai entre la production de la denrée et sa consommation est désormais prise en compte.

Les radionucléides d'origine naturelle présents naturellement dans l'air ou remis en suspension peuvent également être incorporés par inhalation. La dose efficace moyenne associée est de l'ordre de quelques µSv/an [1].

Pour les mêmes raisons que celles exposées ci-avant, les feuilles de tabac contiennent des radionucléides naturels. La combustion du tabac les libère, en particulier le ^{210}Pb et le ^{210}Po, facilitant leur inhalation par le fumeur. Le tabagisme constitue ainsi une voie additionnelle d'exposition aux radionucléides d'origine naturelle.

En milieu marin, les radionucléides naturels proviennent du drainage des sols continentaux, du dégazage du radon dans l'eau ainsi que du dépôt atmosphérique à la surface de l'eau des radionucléides cosmogéniques et des descendants du radon émis sur les terres. Le ^{210}Po présent dans l'eau se concentre particulièrement dans le plancton et, par conséquent, dans les organismes qui s'en nourrissent : les coquillages, les crustacés et certains petits poissons. Compte tenu de la radiotoxicité de ce radionucléide, la quantité consommée de ces denrées est un facteur important pour la dose liée à l'ingestion de radionucléides naturels et sa variabilité.

Les éléments relatifs à la consommation d'eau d'adduction (eau du robinet) ont été actualisés sur la base des résultats acquis entre 2010 et 2019 par les Agences régionales de santé (ARS). Enfin, l'exposition liée à l'incorporation de radionucléides naturels par la consommation de cigarettes a été revue à la hausse sur la base du nombre moyen de cigarettes consommées annuellement en France par habitant et de la dose liée à la consommation d'une cigarette. Les estimations des valeurs de ces principaux paramètres sont détaillées dans ce qui suit.

L'exposition associée à l'incorporation de radionucléides naturels par ingestion (denrées et eaux de boisson) ou par inhalation (tabagisme) se caractérise par les éléments suivants (cf. *Annexe IV* pour le détail des calculs) :

- la dose efficace moyenne estimée pour un adulte, liée à l'incorporation de radionucléides naturels par ingestion de denrées, est autour de 0,6 mSv/an - elle est due principalement aux radionucléides des chaînes U-Th (0,42 mSv/an), au ^{40}K (0,17 mSv/an) et, dans une moindre mesure, aux radionucléides cosmogéniques (0,012 mSv/an) ;

- la dose liée au ^{40}K, dont la teneur est régulée dans l'organisme humain, est très peu variable d'une personne à l'autre ;

- la dose moyenne liée à l'incorporation des radionucléides des chaînes U-Th présents dans les denrées alimentaires (hors coquillages et crustacés) est de l'ordre de 0,25 mSv/an ;

- la dose moyenne associée à la consommation de fruits de mer (coquillages et crustacés) est de 0 pour les personnes qui n'en consomment jamais, de 0,17 mSv/an pour les personnes qui en consomment occasionnellement (1 à 2 fois par mois, soit 6 kg/an) et peut aller jusqu'à 1,3 mSv/an pour les personnes qui en consomment de grandes quantités (une cinquantaine de kg/an), en raison de leur concentration élevée en ^{210}Po ;

- la dose moyenne liée à l'incorporation des descendants des chaînes U-Th par consommation d'eau d'adduction assignée à la majeure partie des Français métropolitains (plus de 99 %) est de 0,01 mSv/an - la valeur haute de 0,30 mSv/an est retenue pour illustrer la variabilité de cette exposition ; elle correspond à la valeur seuil préconisée par la DGS pour rechercher des solutions de réduction de l'exposition ;

- la dose efficace moyenne liée à la consommation de tabac est évaluée à 0,037 mSv/an[20], avec une variation entre 0 (pour un non-fumeur) et 0,3 mSv/an (pour une personne ayant une consommation d'une vingtaine de cigarettes par jour).

[20] *En première approche pour les besoins de ce bilan, la consommation de cigarettes n'étant pas uniforme pour l'ensemble de la population ; pour information, en 2022, 25 % des Français adultes fumaient quotidiennement (tous âges et sexes confondus) et, à 17 ans, 16 % des adolescents fumaient quotidiennement.*

La ***Figure 6*** présente un histogramme de synthèse des doses liées à l'incorporation de radionucléides naturels *via* l'alimentation (denrées et eau de boisson) et la consommation de tabac pour différents scénarios de consommation. La valeur basse correspond à une absence de consommation de fruits de mer et de tabac (bas de la figure). Des valeurs intermédiaires correspondent respectivement à une consommation d'eau du robinet à teneur élevée en radionucléides naturels (« eau + »), une consommation importante de fruits de mer (« fruits de mer + »), une consommation importante de tabac (« tabac + ») et une consommation moyenne des trois.

La valeur la plus élevée correspond à une consommation importante de fruits de mer et de tabac, et à une consommation d'eau du robinet chargée en radionucléides naturels (haut de la figure).

Il est important de noter que la contribution du ^{210}Po représente de 60 % (cas de la valeur basse) à plus de 90 % de la dose totale (cas du gros consommateur de coquillages et de crustacés). Les autres radionucléides contributeurs sont le ^{210}Pb, suivi du radium-226 (^{226}Ra) et du radium-228 (^{228}Ra). Les autres radionucléides, notamment l'uranium et le thorium, ont une contribution négligeable.

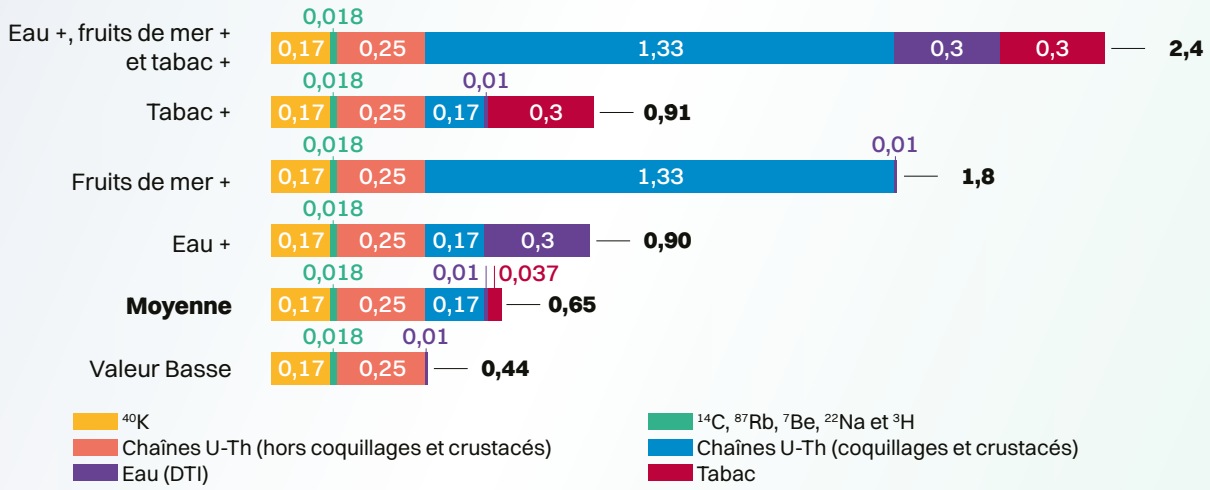


Figure 6 *- Doses liées à l'incorporation de radionucléides naturels par ingestion de denrées alimentaires et tabagisme (mSv/an)*

La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus sur la période 2014-2019, où la dose moyenne par habitant était estimée à 0,55 mSv/an, montre une augmentation de la dose moyenne estimée sur la période 2020-2024, du fait notamment de la réévaluation des quantités de denrées consommées annuellement. De plus, la décroissance radioactive du ^{210}Po durant le délai entre la production de la denrée et sa consommation est désormais prise en compte.

L'exposition liée à l'incorporation de radionucléides d'origine naturelle est à la fois fonction des habitudes de consommation de chacun et du lieu de résidence (essentiellement pour ce qui concerne la consommation d'eau). Les valeurs suivantes, incluant la consommation de denrées, d'eau et de tabac, sont retenues :

- une dose efficace moyenne par habitant de 0,65 millisievert par an (mSv/an) ;
- une dose efficace de 0,44 mSv/an pour une personne qui ne fume pas, ne mange pas de fruits de mer et consomme une eau peu chargée en radionucléides naturels ;
- une dose efficace de 2,4 mSv/an pour un gros fumeur, gros consommateur de fruits de mer et buvant une eau du robinet chargée en radionucléides naturels.

3.1.4 Exposition au radon

Le radon est un gaz radioactif d'origine naturelle, issu de la désintégration des radionucléides des chaînes de l'uranium et du thorium[21] présents dans la croûte terrestre. Il émane du sol et, dans une moindre mesure, des matériaux de construction et de l'eau, puis se disperse dans l'air que l'on respire. La concentration en radon dans l'air varie principalement selon la teneur en uranium du sous-sol et est plus importante au-dessus des sous-sols granitiques et de certains sous-sols volcaniques.

En se désintégrant, le radon forme des descendants solides, eux-mêmes radioactifs. Ces descendants peuvent se fixer sur les aérosols de l'air et, une fois inhalés, se déposent le long des voies respiratoires en provoquant leur irradiation. La dose efficace résultant de l'exposition au radon est principalement due à ses descendants, l'essentiel de la dose étant délivrée au niveau des tissus pulmonaires.

L'exposition des personnes varie fortement d'un lieu à un autre, y compris au sein d'une même commune, car elle dépend des caractéristiques de l'habitat et des habitudes de vie. En général, l'exposition à l'intérieur des bâtiments est beaucoup plus forte (environ 60 fois) que l'exposition à l'air libre, car :

- le radon pénètre dans les bâtiments après avoir traversé l'interface avec le sol et s'y concentre en l'absence d'aération complète ;
- la plupart des personnes passent l'essentiel de leur temps à l'intérieur (habitat, lieu de travail, bâtiments recevant du public).

Méthodologie utilisée

Le détail de la méthode utilisée pour déterminer l'exposition globale de la population française au radon et sa variabilité est présenté en ***Annexe 5***.

Estimation de l'activité volumique du radon dans l'habitat

La première étape consiste à estimer l'activité volumique du radon à l'intérieur de l'habitat sur une grille kilométrique à l'échelle de la France (***Figure 7***). Cette estimation s'appuie sur une base de données de mesures de radon dans l'air intérieur, réparties sur le territoire métropolitain, ainsi que sur un modèle géostatistique. Elle est représentative des activités volumiques de radon au rez-de-chaussée en période hivernale (voir encadré ci-après).

[21] *Des produits de filiation radioactive des isotopes 238 de l'uranium et 232 du thorium présents dans la croute terrestre sont les isotopes 222 et 220 du radon, respectivement. Ce dernier est aussi appelé « thoron ». Dans le cadre de ce rapport, les doses « radon » calculées comprennent les expositions aux isotopes 222 et 220 du radon (radon et thoron). Du fait de la très faible abondance de l'isotope 235 de l'uranium dans la croute terrestre, la composante d'exposition à l'isotope 219 du radon, également appelé « actinon » et qui en est un produit de filiation, est négligée.*

Estimation de l'activité volumique du radon dans l'habitat grâce à une base de données de mesures de radon dans l'air intérieur et une approche géostatistique

Les mesures de l'activité volumique du radon dans le bâti sont nombreuses mais réparties de façon hétérogène à l'échelle du territoire, car elles sont prioritairement réalisées dans les zones à potentiel radon élevé. Ainsi, l'ASNR dispose d'un grand nombre de données pour certaines communes et de très peu, voire aucune, pour d'autres. Pour estimer néanmoins une activité volumique de radon dans l'habitat, l'ASNR a développé une approche géostatistique qui utilise, d'une part, les mesures et, d'autre part, la cartographie du potentiel radon des formations géologiques.

La base de données compte 50 103 mesures de radon dans l'air intérieur. Elles proviennent de la campagne nationale de mesure IRSN/DGS menée de 1982 à 2003, des deux Campagnes Nationales Logements (CNL) coordonnées par l'Observatoire de la qualité des environnements intérieurs (OQEI) entre 2003 et 2005 puis entre 2020 et 2023, des campagnes de mesures territoriales dans l'habitat coordonnées notamment par les Agences régionales de santé (ARS) ainsi que des mesures réglementaires effectuées dans des établissements recevant du public (ERP) entre 2014 et 2024. Pour chaque lieu d'habitation, l'activité volumique retenue correspond à une mesure unique réalisée dans une pièce de vie située au niveau le plus bas ou, lorsque plusieurs mesures ont été réalisées, à la valeur maximale obtenue dans une pièce de vie. Pour chaque ERP, l'activité volumique retenue correspond à la valeur maximale mesurée dans une pièce occupée par le public. Toutes les mesures prises en compte dans le modèle géostatistique ont été réalisées en période hivernale ou leurs résultats ont été rapportés à la période hivernale, conformément à la norme NF ISO 11 665-8 [11].

La cartographie du potentiel radon des formations géologiques en France a été réalisée en 2010 [12,13]. Elle a conduit à classer les formations géologiques en fonction de leur potentiel à produire du radon et à faciliter son transport vers l'atmosphère. Une carte en 5 classes de potentiel, de faible à très élevé, en a résulté. Les zones identifiées à potentiel radon élevé ou très élevé correspondent essentiellement aux massifs anciens granitiques et métamorphiques (Massif-central, Vosges, Massif armoricain, Corse...). Le travail de traitement statistique décrit ci-après a été réalisé sur la base de cette carte. Notons qu'afin de faciliter la gestion du risque radon à l'échelle du territoire, une carte[22] simplifiée en trois classes est utilisée pour classer les communes de chaque département en fonction du potentiel radon des roches caractérisant leur sous-sol et de plusieurs facteurs géologiques particuliers pouvant favoriser la remontée du radon vers la surface comme les failles, les cavités souterraines, les zones minières...

Afin de reproduire la variabilité spatiale des mesures dans les estimations à l'échelle kilométrique sur l'ensemble du territoire, l'approche géostatistique repose sur trois choix méthodologiques. Le premier est le recours au dégroupement[23], qui permet de corriger le biais lié au suréchantillonnage des zones à potentiel élevé où les mesures sont surreprésentées. Le second repose sur une estimation des concentrations pour chaque classe de potentiel radon des formations géologiques, afin de conserver l'hétérogénéité intra-classe et d'éviter toute influence ou lissage artificiel entre classes. Le troisième est l'utilisation d'une méthode géostatistique non linéaire (cosimulation colocalisée conditionnelle[24]) qui permet de reproduire la variabilité spatiale des mesures.

L'accroissement significatif du nombre de mesures (dont 39 260 données compilées depuis 2019) et une meilleure prise en compte de la variabilité des mesures disponibles améliorent la représentativité de la carte ainsi produite (***Figure 7***), qui remplace celle éditée en 2012.

[22] *https://recherche-expertise.asnr.fr/savoir-comprendre/environnement/connaitre-potentiel-radon-ma-commune#carto*

[23] *Dégroupement (declustering en anglais) : méthode de pondération qui consiste à réduire le poids des mesures regroupées spatialement, évitant ainsi qu'elles ne dominent l'estimation. Le dégroupement permet d'attribuer un poids plus faible aux échantillons surreprésentés et un poids plus élevé à ceux provenant de zones sous-échantillonnées, afin de rétablir une distribution représentative sur l'ensemble du territoire.*

[24] *Cosimulation colocalisée conditionnelle : méthode géostatistique multivariée qui permet de simuler la concentration en radon à partir des mesures disponibles et d'une variable auxiliaire connue sur l'ensemble du domaine. Elle génère plusieurs réalisations possibles du phénomène spatial. Ces réalisations permettent de reproduire la variabilité des données tout en respectant leurs caractéristiques statistiques et spatiales : les données mesurées, la structure spatiale de la variable principale, la structure spatiale des variables auxiliaires, et les corrélations croisées entre variables.*

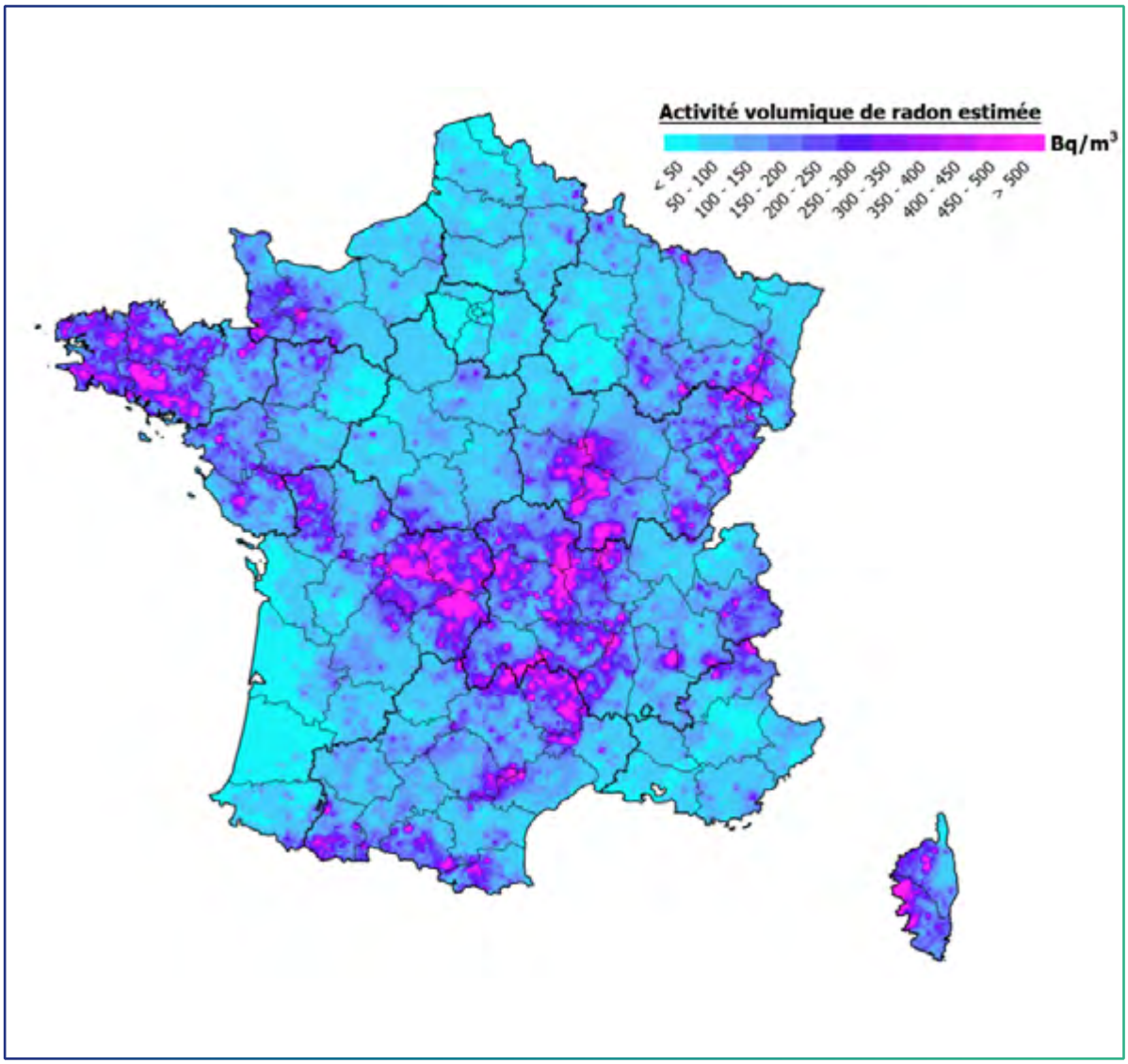


Figure 7 - Estimation de l'activité volumique du radon (en Bq/m³) à l'intérieur de l'habitat en période hivernale sur une grille kilométrique

Estimation de l'exposition de la population française

L'activité volumique représentée en *Figure 7* présente un biais majorant lié aux conditions des mesures, qui sont effectuées en période hivernale et de préférence en rez-de-chaussée, pour mettre en évidence les situations d'exposition potentiellement élevée. Or, en cohérence avec la méthode générale appliquée dans le bilan EXPOP aux différentes sources d'exposition, l'exposition de la population française au radon est calculée à partir d'une estimation de l'activité volumique moyenne, et non majorante, du radon dans l'habitat.

Pour chaque commune, la concentration moyenne de radon en intérieur est déterminée en tenant compte de la répartition de la population entre les habitats individuel et collectif ; la concentration moyenne de radon à l'extérieur en est déduite. Des facteurs de pondération sont appliqués pour prendre en compte l'hétérogénéité de l'activité volumique entre les pièces de vie d'une maison et sa valeur généralement plus élevée en hiver que le reste de l'année. Enfin, les doses associées sont calculées par commune en appliquant un budget-temps passé à l'intérieur ou à l'extérieur (cf. *Annexe V* pour le détail des calculs).

Résultats

Pour l'ensemble de la France métropolitaine, la dose efficace moyenne estimée est de 3,9 mSv/an. Pour 5 % de la population la dose est inférieure ou égale à 1,4 mSv/an (5e percentile) et pour 5 % de la population elle est supérieure à 9,4 mSv/an (95e percentile). Les doses moyennes par département sont présentées en ***Annexe V*** dans le ***Tableau A16***. La valeur la plus élevée (13 mSv/an) concerne le département de la Creuse et la plus basse (1,3 mSv/an) celui de Paris.

À coefficient de dose radon égal (voir l'encadré ci-après), la comparaison de ces résultats avec ceux présentés dans le précédent rapport (2014-2019) révèle une légère augmentation de la dose estimée (de 3,5 à 3,9 mSv/an), liée à la mise à jour de la méthode de calcul de l'exposition.

Évolution des coefficients de dose pour le radon et le thoron

Un coefficient de dose est un facteur (Sv/Bq) qui permet de déduire une dose efficace (Sv) d'une activité incorporée (Bq), calculée à partir de données d'exposition mesurables : par exemple, la teneur en radionucléide d'une denrée alimentaire (Bq/kg) et son taux de consommation (kg/an).

Dans le cas du radon, le coefficient de dose utilisé à partir des années 1990 [14] a été établi en comparant le modèle dose-risque de la CIPR, basé sur les survivants d'Hiroshima et Nagasaki, aux risques de cancer du poumon observés chez les mineurs d'uranium, afin d'en déduire un coefficient de conversion exprimé en sieverts par unité d'exposition. Au début des années 2010, par suite de l'actualisation des données de suivi épidémiologiques sur les cohortes de mineurs d'uranium et de la publication des résultats de nouvelles études sur le cancer du poumon dans la population générale, le niveau de risque moyen pour l'exposition au radon estimé par la CIPR a pratiquement été doublé par rapport aux études antérieures [15]. Le coefficient de dose recommandé par la CIPR pour les travailleurs, estimé de façon indépendante par des approches épidémiologiques et dosimétriques, est ainsi passé de la valeur de 3,1 nSv par Bq.h.m^{-3} à celle de 6,7 nSv par Bq.h.m^{-3}, soit un peu plus du double. Pour la population, le même coefficient de dose a également été retenu par la CIPR. Cette évolution s'est traduite par la publication d'un nouveau coefficient de dose pour le radon dans l'arrêté du 16 novembre 2023 [7]. L'influence de ce nouveau coefficient avait déjà été illustrée par un calcul dans le précédent rapport EXPOP.

Concernant le thoron, la réglementation ne dispose pas d'un coefficient de dose applicable à la population. Cependant, la CIPR recommande une valeur de 80 nSv par Bq.h.m^{-3} [16] soit le double de la valeur de 40 nSv par Bq.h.m^{-3} utilisée par l'UNSCEAR [17] et dans le précédent rapport EXPOP. Par souci de cohérence, la valeur recommandée par la CIPR est retenue dans le présent rapport, car elle est calculée avec le même modèle dosimétrique que celui utilisé pour la valeur réglementaire applicable au radon.

Ces augmentations sensibles des valeurs des coefficients de dose de référence traduisent une amélioration de la connaissance scientifique des mécanismes d'exposition et des risques associés. L'augmentation de dose qui s'ensuit ne reflète donc pas une augmentation des activités volumiques de radon en France, dont la moyenne reste stable.

Il convient toutefois de souligner que les évaluations dosimétriques faites dans le cadre de ce rapport sont réalisées principalement aux fins de la mise en perspective des différentes sources d'exposition de la population française aux rayonnements ionisants. Elles ne sont pas réalisées aux fins de gestion de telles expositions, notamment lorsqu'elles sont d'origine naturelle. Pour gérer le radon dans l'habitat, les pouvoirs publics ont défini un niveau de référence au-dessus duquel il est souhaitable d'entreprendre des actions de remédiation (voir l'encadré ci-après). Pour en savoir plus sur le potentiel radon de sa commune, se référer au site internet de l'ASNR[25].

[25] *www.asnr.fr/comprendre-le-radon*

Méthodes pour réduire le taux de radon dans un bâtiment

Des solutions existent pour réduire significativement la concentration en radon dans les habitations[26]. Elles reposent sur deux types d'actions :

- éliminer le radon présent dans le bâtiment en améliorant le renouvellement de l'air intérieur (renforcement de l'aération naturelle ou mise en place d'une ventilation mécanique adaptée) ;
- limiter l'entrée du radon en renforçant l'étanchéité entre le sol et le bâtiment (colmatage des fissures et des passages de canalisations à l'aide de colles silicone ou de ciment, pose d'une membrane sur une couche de gravillons recouverte d'une dalle en béton, etc.). L'efficacité de ces mesures peut être renforcée par la mise en surpression de l'espace habité ou la mise en dépression des parties basses du bâtiment (sous-sol ou vide sanitaire lorsqu'ils existent), voire du sol lui-même.

Les solutions les plus efficaces peuvent nécessiter de combiner les deux types d'actions. L'efficacité d'une technique de réduction doit être vérifiée après sa mise en œuvre en effectuant de nouvelles mesures de concentration en radon.

Les valeurs suivantes sont retenues pour l'exposition au radon :

- une dose efficace moyenne par habitant de 3,9 millisieverts par an (mSv/an),
- une gamme de variations entre 1,4 mSv/an (5e percentile) et 9,4 mSv/an (95e percentile).

[26] *https://recherche-expertise.asnr.fr/savoir-comprendre/environnement/comment-connaitre-reduire-son-exposition-radon*

3.2
EXPOSITIONS ASSOCIÉES À LA PRÉSENCE DE RADIONUCLÉIDES ARTIFICIELS DANS L'ENVIRONNEMENT ET À DIVERSES SOURCES ARTIFICIELLES DE RAYONNEMENT

3.2.1 Exposition aux retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires et des accidents

Essais nucléaires atmosphériques

De 1945 à 1980, plus de 500 essais atmosphériques d'armes nucléaires ont été réalisés par les États-Unis, l'Union soviétique et, dans une moindre mesure, la Grande-Bretagne, la Chine et la France. Ces essais ont libéré dans l'atmosphère des radionucléides qui se sont déposés à la surface des sols ; une vingtaine d'entre eux ont été régulièrement mesurés dans l'environnement français, notamment dans les denrées.

La plupart des radionucléides issus de ces retombées ont disparu, du fait de leur période radioactive courte. Il ne subsiste principalement aujourd'hui dans l'environnement français que 9 radionucléides de période longue. Le césium-137 (^{137}Cs), le strontium-90 (^{90}Sr), les isotopes du plutonium (^{238}Pu, ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{241}Pu) et l'américium-241 (^{241}Am), essentiellement présents dans les sols, sont transférés vers l'ensemble des composantes de l'environnement : l'air, par remise en suspension de poussières, les cours d'eau, par drainage des sols, et les denrées alimentaires, principalement par absorption racinaire. Le carbone-14 (^{14}C) et le tritium (^{3}H), présents dans l'air[27], s'intègrent lors de la photosynthèse à la matière organique et donc aux denrées alimentaires.

L'exposition actuelle de la population française aux retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires a été estimée sur la base des résultats de mesures acquis sur la période 2008-2018 [18], et d'une récente étude de la variabilité spatiale des retombées en France métropolitaine [19]. En 2020, la dose efficace moyenne[28] en France résultant de ces retombées est estimée à 0,0045 mSv/an.

[27] *Aujourd'hui, moins de 10 % du carbone-14 présent dans l'environnement provient des essais nucléaires, la majeure partie étant d'origine naturelle cosmogénique ; dans le cas du tritium, on peut considérer qu'il provient pour moitié des essais nucléaires, l'autre moitié étant d'origine cosmogénique.*

[28] *Il s'agit d'une dose efficace moyenne pondérée par la population, obtenue en multipliant la dose estimée au niveau de chaque commune par le nombre d'habitants de la commune considérée, en sommant ces résultats obtenus puis en divisant cette somme par le nombre total d'habitants en France.*

Cette dose a été estimée pour un adulte travaillant en intérieur dans un milieu urbain[29], ce qui est certainement représentatif du cas le plus fréquemment rencontré à l'échelle de la population française. Elle résulte principalement de l'incorporation de ^{90}Sr et de ^{14}C par ingestion de denrées et de l'exposition externe au rayonnement émis par le ^{137}Cs présent dans l'environnement. Les contributions liées au tritium et aux actinides (isotopes du plutonium et ^{241}Am) sont faibles, voire négligeables, au regard des précédentes.

Les doses estimées sont relativement homogènes sur le territoire (cf. ***Figure 9***, carte de droite), avec une gamme de variabilité allant de 0,0028 à 0,012 mSv/an, en relation principalement avec la carte des dépôts initiaux (cf. ***Annexe VI***). Un temps de présence quotidien en extérieur plus élevé, de 8 heures par jour, potentiellement lié à un travail en milieu rural, n'entraînerait qu'une augmentation limitée de la dose annuelle, dont la valeur maximale passerait de 0,012 mSv à 0,014 mSv/an du fait de l'augmentation de la dose externe liée au rayonnement émis par le ^{137}Cs.

Accident de Tchernobyl

Les masses d'air contaminées par l'accident de Tchernobyl ont affecté la France principalement entre le 1er et le 5 mai 1986. En raison de concentrations dans l'air plus importantes dans l'Est que dans l'Ouest du pays et de pluies très variables survenues durant cette période, les dépôts radioactifs, notamment ceux d'iode-131 (^{131}I), de césium-134 (^{134}Cs) et de césium-137 (^{137}Cs), ont été plus importants et plus hétérogènes dans l'Est de la France que dans le reste du pays (cf. carte des dépôts en ***Annexe VI***). Des différents radionucléides qui se sont déposés en France en mai 1986 lors de cet accident, il ne reste aujourd'hui que le seul ^{137}Cs.

L'exposition actuelle de la population française aux retombées de l'accident de Tchernobyl a été estimée par l'ASNR sur la base des résultats de mesures acquis sur la période 2008-2018 [18], ainsi que sur une récente étude de sa variabilité [20]. En 2020, la dose efficace moyenne en France résultant de ces retombées est estimée à 0,0005 mSv/an. Cette dose a été estimée pour un adulte résidant en milieu urbain, travaillant en intérieur et ne consommant pas de champignons sauvages ni de viande de gibier – scénario sans doute représentatif de la majeure partie de la population. Elle résulte de l'incorporation de ^{137}Cs par ingestion de denrées et de l'exposition externe au rayonnement émis par ce radionucléide présent dans l'environnement.

Les doses estimées sont dans une gamme allant de 0,0003 à 0,0025 mSv/an suivant le lieu de résidence (cf. ***Figure 9***, carte de gauche), en relation principalement avec la carte des dépôts initiaux (cf. ***Annexe VI***). Pour des personnes qui travailleraient en extérieur en milieu rural dans les zones les plus touchées par les retombées, en considérant un temps de présence de plusieurs heures par jour sur des surfaces non remaniées depuis 1986 (qui n'ont jamais été labourées, ni recouvertes...), la dose estimées pourrait atteindre une dizaine, voire une vingtaine de µSv/an. Près de 40 ans après les dépôts radioactifs, de telles surfaces se limitent souvent désormais à des espaces naturels ou boisés.

La contamination en ^{137}Cs des denrées forestières, champignons sauvages et viande de gibier est restée à un niveau significatif jusqu'à aujourd'hui, contrairement aux denrées issues de l'agriculture et de l'élevage dont les activités massiques, et par conséquent les doses liées à leur consommation, n'ont cessé de diminuer depuis 1986. Cette contamination est également beaucoup plus variable que celles des autres denrées, et ceci même à l'échelle d'une commune. Il en résulte que la consommation, même occasionnelle, de ces denrées peut impacter fortement la dose : pour les personnes consommant régulièrement ces denrées dans les communes les plus impactées par les retombées de l'accident de Tchernobyl, à l'Est de la France, la dose efficace associée peut atteindre plusieurs dizaines de µSv/an.

[29] *On désigne ici par « milieu urbain » un milieu constitué principalement de surfaces artificielles : voieries, trottoirs, constructions... Il peut s'agir de petits villages, voire de hameaux. Un milieu dit « rural » correspond principalement à des fermes dont les abords sont constitués de surfaces non artificialisées : sols labourés ou non, terre battue...*

Évolution dans le temps des doses liées aux « retombées radioactives anciennes »

Les doses liées à la rémanence des retombées de l'accident de Tchernobyl et des essais atmosphériques d'armes nucléaires - que l'on peut qualifier de « retombées radioactives anciennes » - sont très faibles aujourd'hui. La ***Figure 8*** montre leur évolution depuis 1945 pour des adultes travaillant en extérieur en milieu rural (cas le plus pénalisant) et résidant dans trois zones géographiques différentes au voisinage de trois stations de mesure (la région parisienne, les environs d'Épinal et les environs de Vaison-la-Romaine), représentatives de la variabilité de ces doses à l'échelle de la France métropolitaine. On y distingue deux « pics » en 1958 et en 1961-1963, au plus fort des retombées des essais américano-soviétiques, un moratoire ayant été respecté par ces deux nations entre 1959 et 1961. Les doses les plus élevées ont été estimées pour l'année 1963 : elles sont comprises entre 470 µSv (en région parisienne) et 780 µSv (aux environs d'Épinal), en relation avec la cartographie des dépôts (cf. ***Annexe VI***), elle-même reliée aux précipitations moyennes annuelles. Entre 1964 et 1985, après la signature en 1963 du Traité d'interdiction partielle des essais nucléaires par les États-Unis, l'Union soviétique et le Royaume-Uni et durant les essais nucléaires chinois (1964-1980), les doses ont été beaucoup plus faibles et en diminution : de 50 µSv en 1965 à 15 µSv en 1985 pour la région parisienne (respectivement 90 µSv et 23 µSv aux environs d'Épinal).

Les retombées de l'accident de Tchernobyl ont induit une augmentation des doses en 1986 : 90 µSv pour la région parisienne, 420 µSv aux environs d'Épinal et 620 µSv aux environs de Vaison-la-Romaine. Elles ont ensuite fortement diminué dès 1987 et plus lentement par la suite, pour être comprises en 2020 entre 5 µSv en région parisienne et 15 µSv aux environs de Vaison-la-Romaine.

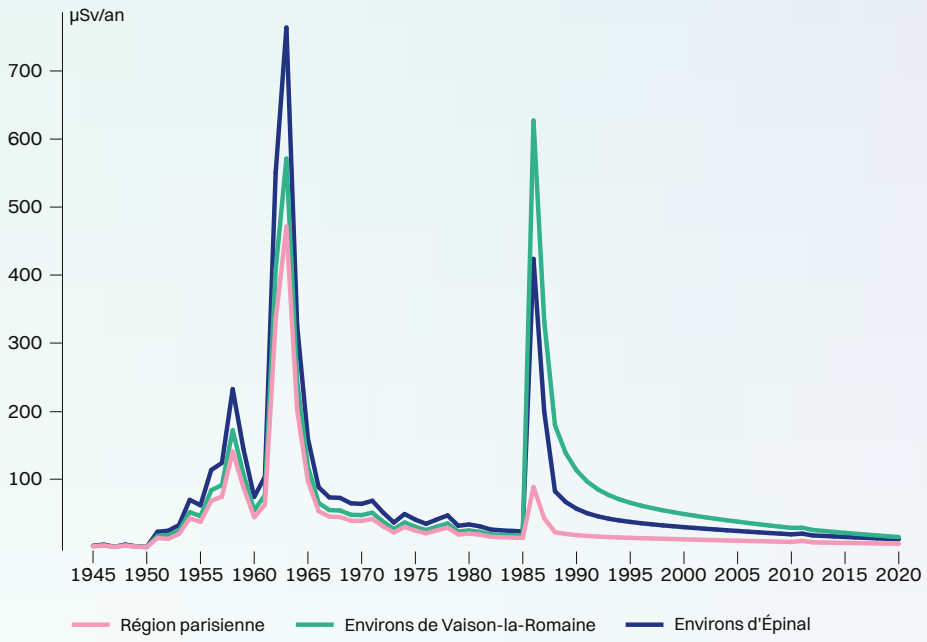


Figure 8 *- Évolution entre 1945 et 2020 des doses efficaces (en µSv/an) estimées pour des adultes travaillant en extérieur en milieu rural (cas le plus pénalisant) et résidant dans trois ensembles géographiques différemment touchés par les retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires et de l'accident de Tchernobyl*

Bilan de l'exposition aux « retombées radioactives anciennes » en 2020

Aujourd'hui, l'exposition de la très grande majorité de la population française aux retombées des essais nucléaires atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl résulte plus des essais atmosphériques d'armes nucléaires que de l'accident de Tchernobyl (cf. ***Figure 9***).

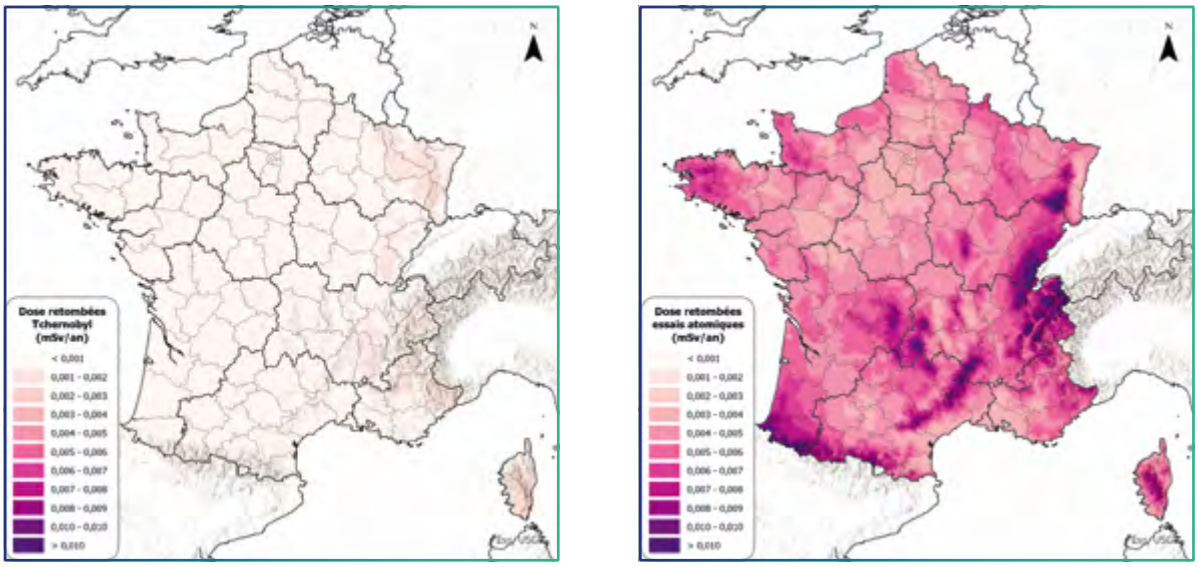


***Figure 9** - Cartographie des doses efficaces (en mSv/an) liées à la rémanence en 2020 des retombées de l'accident de Tchernobyl (à gauche) et des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires (à droite), estimées pour des adultes résidant en milieu urbain, travaillant à l'intérieur de locaux et ne consommant pas de champignons sauvages ni de viande de gibier*

La dose efficace moyenne en France métropolitaine résultant de cette exposition (cf. ***Figure 10***) est actuellement estimée à 0,005 mSv/an, dans une gamme comprise entre 0,003 et 0,013 mSv/an pour des adultes résidant en milieu urbain, travaillant à l'intérieur de locaux et ne consommant pas de champignons sauvages ni de viande de gibier. Ce scénario est représentatif de la majeure partie de la population française.

Cette dose peut atteindre 0,026 mSv/an pour des personnes travaillant en extérieur sur des surfaces naturelles non remaniées (espaces boisés, prairies permanentes...), situées dans les zones les plus touchées.

La consommation de viande de gibier et de champignons pourrait par ailleurs induire une dose supplémentaire de quelques µSv/an pour une consommation régulière de ces denrées et de plusieurs dizaines de µSv/an pour une consommation fréquente[30].

En dehors de la consommation de champignons sauvages et de viande de gibier, la dose moyenne française due à la rémanence actuelle des retombées anciennes, estimée dans le présent bilan à 0,005 mSv/an, est inférieure à celle qui avait été estimée dans le bilan précédent (0,012 mSv/an). Cette diminution résulte principalement de la baisse des doses estimées en conséquence des retombées de l'accident de Tchernobyl et, plus particulièrement, de la dose liée à l'exposition externe au ^{137}Cs présent dans l'environnement (cf. ***Annexe VI***).

[30] *Consommation régulière = 2 repas par mois composés de 200 g de viande de gibier et de 200 g de champignons ; Consommation fréquente = 2 repas par semaine ou plus composés de 200 g de viande de gibier et de 200 g de champignons*

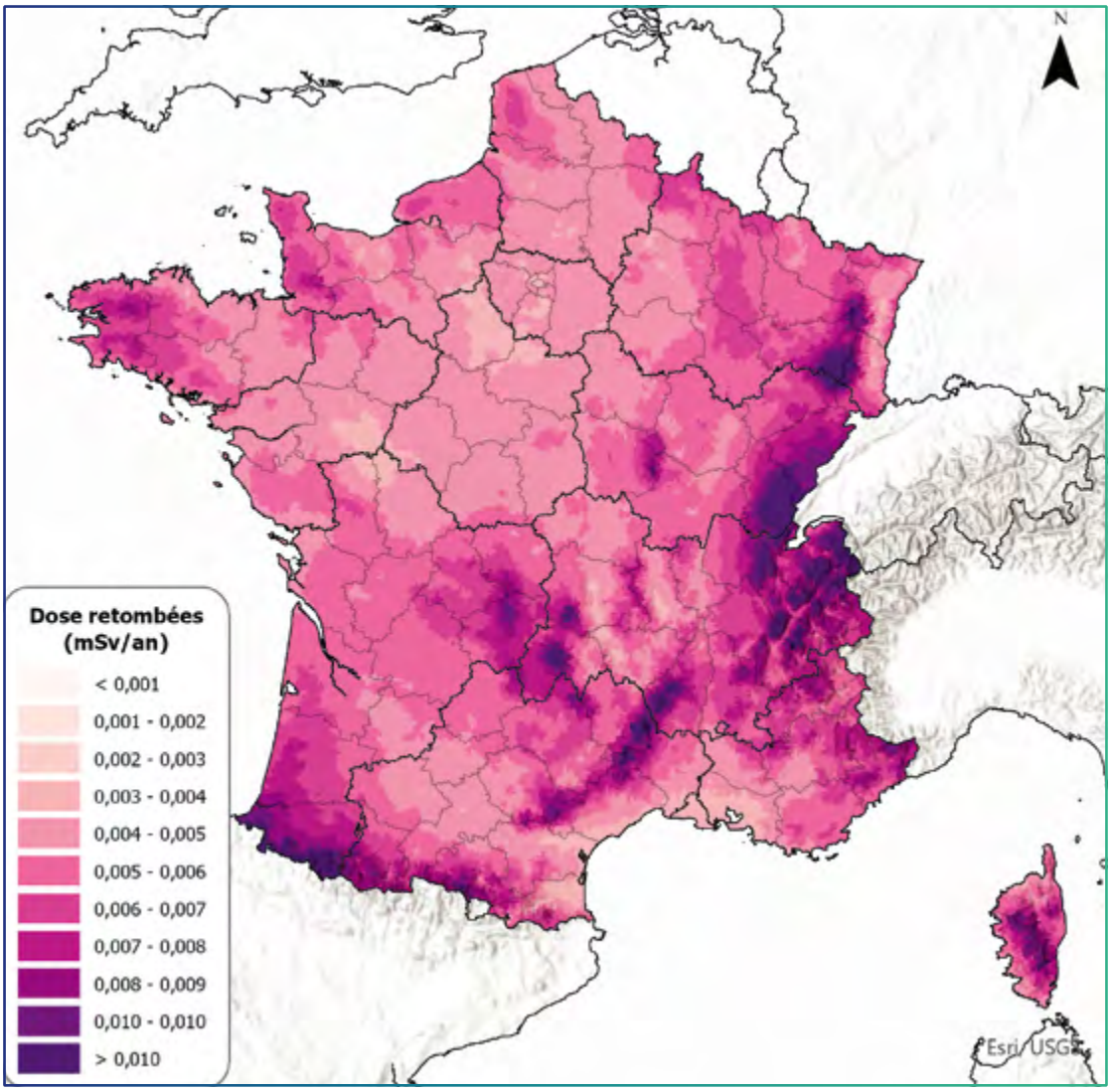


Figure 10 - Cartographies des doses efficaces (en mSv/an) liées à la rémanence en 2020 des « retombées radioactives anciennes », estimées pour des adultes résidant en milieu urbain ne consommant pas de champignons sauvages ni de viande de gibier

Accident de Fukushima-Daiichi

Bien que très éloignée de la centrale nucléaire de Fukushima-Daiichi, la France métropolitaine a été affectée par des masses d'air faiblement contaminées du fait des rejets liés à l'accident survenu en mars 2011 au Japon. Un plan renforcé de surveillance de la radioactivité sur l'ensemble du territoire français a été mis en œuvre par l'IRSN. Les mesures réalisées ont permis de mettre en évidence des activités d'^{131}I, de ^{134}Cs ainsi qu'une légère augmentation des niveaux de ^{137}Cs préexistants, dans presque toutes les composantes de l'environnement français. Cette influence a cependant été très faible et très limitée dans le temps, principalement entre le 20 mars et fin avril 2011 [21]. Ces concentrations ont ensuite décru : l'^{131}I n'était plus décelable dès le mois de mai, le ^{134}Cs quelques mois plus tard et les activités de ^{137}Cs sont revenues dans ce délai aux niveaux qu'elles avaient avant l'accident. Les doses efficaces maximales estimées pour un adulte étaient inférieures à 0,002 mSv pour l'année 2011 ; elles sont négligeables depuis.

Événements de contamination atmosphérique détectés en France sur la période 2020-2024

Deux événements ont eu lieu pendant la période 2020-2024. Le premier concerne les incendies en avril 2020 dans les territoires contaminés de la région de Tchernobyl. Une partie des radionucléides stockés dans la litière forestière et dans la biomasse a été remise en suspension dans l'atmosphère et transportée avec les panaches de fumée qui se sont ensuite dirigés vers l'Europe de l'Ouest, notamment vers la France. Les radionucléides concernés sont le césium-137 (^{137}Cs), le strontium-90 (^{90}Sr), et, dans une moindre mesure, les isotopes du plutonium ainsi que l'américium-241 (^{241}Am) formé par décroissance du ^{241}Pu. Bien que supérieures au bruit de fond habituel[31], les concentrations atmosphériques enregistrées en France métropolitaine et dans le reste de l'Europe ont mené à des doses efficaces insignifiantes, au maximum de l'ordre de quelques nSv[32] [22].

De tels incendies se sont à nouveau produits fin août/début septembre 2024 autour de Tchernobyl et ont entrainé une augmentation des concentrations atmosphériques en ^{137}Cs en Europe qui ont pu atteindre, sur une courte période, dix voire cinquante fois la valeur habituelle[33]. Malgré ces augmentations, les conséquences dosimétriques sont également restées négligeables.

Le second événement correspond aux épisodes de poussières provenant du Sahara et arrivant sur la France qui, depuis quelques années, sont relativement fréquents et significatifs en termes d'augmentation de l'empoussièrement atmosphérique et de dépôt de poussières de couleur ocre à brune. Ces poussières présentent un marquage en radionucléides artificiels, parmi lesquels le ^{137}Cs est le plus présent. Ce ^{137}Cs provient essentiellement des retombées sur les sols du Sahara des essais nucléaires atmosphériques réalisés dans l'hémisphère nord, principalement par les États-Unis et l'Union soviétique avant 1963.

Les activités de ^{137}Cs déposées lors de ces épisodes restent insignifiantes par rapport à l'activité surfacique des sols sur lesquels ont lieu ces dépôts, de l'ordre de plusieurs centaines voire milliers de Bq/m^2 en France. Dans tous les cas, l'impact dosimétrique associé lié à l'inhalation des poussières et à l'ingestion de denrées sur lesquelles ont eu lieu des dépôts reste négligeable par rapport à celui de la rémanence des retombées directes des essais nucléaires atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl.

Ces deux événements, ne conduisant à aucune exposition significative, ne sont pas pris en compte dans le présent bilan dosimétrique.

Les valeurs suivantes sont retenues pour l'exposition aux retombées des essais nucléaires atmosphériques et des accidents :

- une dose efficace moyenne par habitant de 0,005 millisievert par an (mSv/an), l'essentiel étant dû aux essais nucléaires (0,0045 mSv/an) auquel s'ajoute une faible contribution des retombées de l'accident de Tchernobyl (0,0005 mSv/an) ;
- une gamme de variations entre 0,003 et 0,013 mSv/an, liée principalement au lieu de résidence ;
- une dose efficace pouvant aller jusqu'à 0,026 mSv/an pour une personne travaillant en extérieur sur des surfaces naturelles non remaniées (espaces boisés, prairies permanentes...), situées dans les zones les plus touchées ;
- une dose efficace supplémentaire de quelques µSv/an pour une consommation régulière de viande de gibier et de champignons, et de plusieurs dizaines de µSv/an pour une consommation fréquente de ces denrées ; on retiendra une valeur majorante de 0,1 mSv/an pour cette exposition.

[31] *Ces concentrations étaient tout au plus de quelques µBq/m^3 d'air pour le ^{137}Cs et d'environ 1 000 fois moins pour les autres isotopes.*

[32] *1 nSv = 0,000001 mSv*

[33] *Le ^{137}Cs détecté habituellement provient des retombées des essais nucléaires atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl ; sa présence résiduelle dans l'air s'explique principalement par le soulèvement de poussières de sol (remise en suspension) ou par l'émission de cendres et d'espèces volatiles lors des feux.*

3.2.2 Exposition liée aux activités nucléaires autorisées

Les installations nucléaires de base en France comprennent divers types d'installations civiles (installations nucléaires de base, dites « INB ») et de défense (installations nucléaires de base secrètes, dites « INBS »). On distingue parmi ces installations celles qui rejettent des effluents radioactifs dans l'environnement : les 18 centres nucléaires de production d'électricité (CNPE) actuellement exploités par Électricité de France (EDF), le site de Fessenheim dont les 2 réacteurs sont arrêtés depuis 2020, les sites de Creys-Malville et de Brennilis dont les installations sont en cours de démantèlement, les installations de l'industrie du cycle du combustible nucléaire (ORANO...), les centres de recherche du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), les centres de stockage de déchets radioactifs de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), les sites de la Marine nationale, l'Institut Laue-Langevin (ILL) à Grenoble et le site du Grand accélérateur national d'ions lourds (GANIL) à Caen.

Les autres installations mettant en œuvre des radionucléides appartiennent à la catégorie dite du « nucléaire de proximité », qui regroupe certains domaines de la médecine (médecine nucléaire...), de la recherche (universités et organismes de recherche) ou de l'industrie (production de substances radiopharmaceutiques, gammagraphie...), ainsi que certaines activités vétérinaires. Certaines de ces activités ne sont pas prises en compte dans la présente étude, en raison du faible nombre de personnes concernées et des spécificités des situations d'exposition. Néanmoins, pour les plus importantes d'entre elles, à savoir les services de médecine nucléaire et les installations cyclotron[34], l'ASNR a engagé des travaux visant à mieux appréhender leur impact sur la population (cf. paragraphes suivants).

Installations nucléaires de base

La quasi-totalité des installations nucléaires de base (INB et INBS) sont amenées, dans le cadre de leur fonctionnement normal, à rejeter des substances radioactives dans l'environnement *via* leurs effluents liquides ou atmosphériques, après contrôle des niveaux de radioactivité.

Ces rejets font l'objet d'autorisations de la part des pouvoirs publics, lesquels prescrivent en particulier des limites de rejets à ne pas dépasser. Pour chaque installation ces limites sont fixées en vérifiant, d'une part, que des dispositions techniques et organisationnelles ont été prévues dans l'installation pour minimiser les quantités rejetées et, d'autre part, que l'impact dosimétrique de ces rejets sur les personnes du public les plus exposées au voisinage de l'installation reste très faible (au regard de la limite de dose efficace réglementaire de 1 mSv/an), et ce en tenant compte de l'ensemble des voies d'exposition possibles (inhalation, ingestion, exposition externe liée aux dépôts et au panache...). Les rejets réels en fonctionnement normal ne représentent toutefois qu'une fraction des rejets autorisés.

[34] *Une installation cyclotron est une infrastructure dédiée à l'utilisation d'un accélérateur de particules permettant la production de radionucléides pour l'élaboration de médicaments radiopharmaceutiques.*

Les personnes résidant à proximité de ces installations sont susceptibles d'être concernées par les expositions aux radionucléides mesurés dans l'air provenant des rejets atmosphériques (par exemple, exposition externe au krypton-85 (^{85}Kr) pour les personnes résidant autour de La Hague, inhalation de poussières d'uranium aux environs des sites de Malvési, du Tricastin ou de Romans-sur-Isère, inhalation ou transfert cutané du tritium autour des sites de Valduc et de Grenoble, inhalation de carbone-14 (^{14}C) et de tritium (^{3}H) aux environs des CNPE...). L'exposition varie suivant les scénarios et la distance par rapport au site, les doses associées correspondant souvent au cas le plus pénalisant (proximité immédiate).

Les doses liées à l'incorporation de radionucléides par ingestion de denrées alimentaires (^{14}C, iode-129 (^{129}I), ^{3}H, plutonium et américium autour de La Hague, ^{14}C autour des CNPE, ^{3}H autour de Valduc et de Grenoble...) ne peuvent quant à elles être reçues que par les personnes qui consomment des denrées produites localement (dans un rayon de 10 km autour des sites). Les doses estimées sont alors proportionnelles aux quantités consommées.

Les estimations, faites sur la base des mesures effectuées dans l'environnement[35], montrent que les expositions résultant du fonctionnement normal de ces installations sont globalement inférieures à 0,001 mSv/an, voire à 0,0001 mSv/an, dans leur environnement proche (cf. ***Figure 11***). Elles peuvent toutefois atteindre 0,01 mSv/an pour les personnes résidant aux environs du site de La Hague.

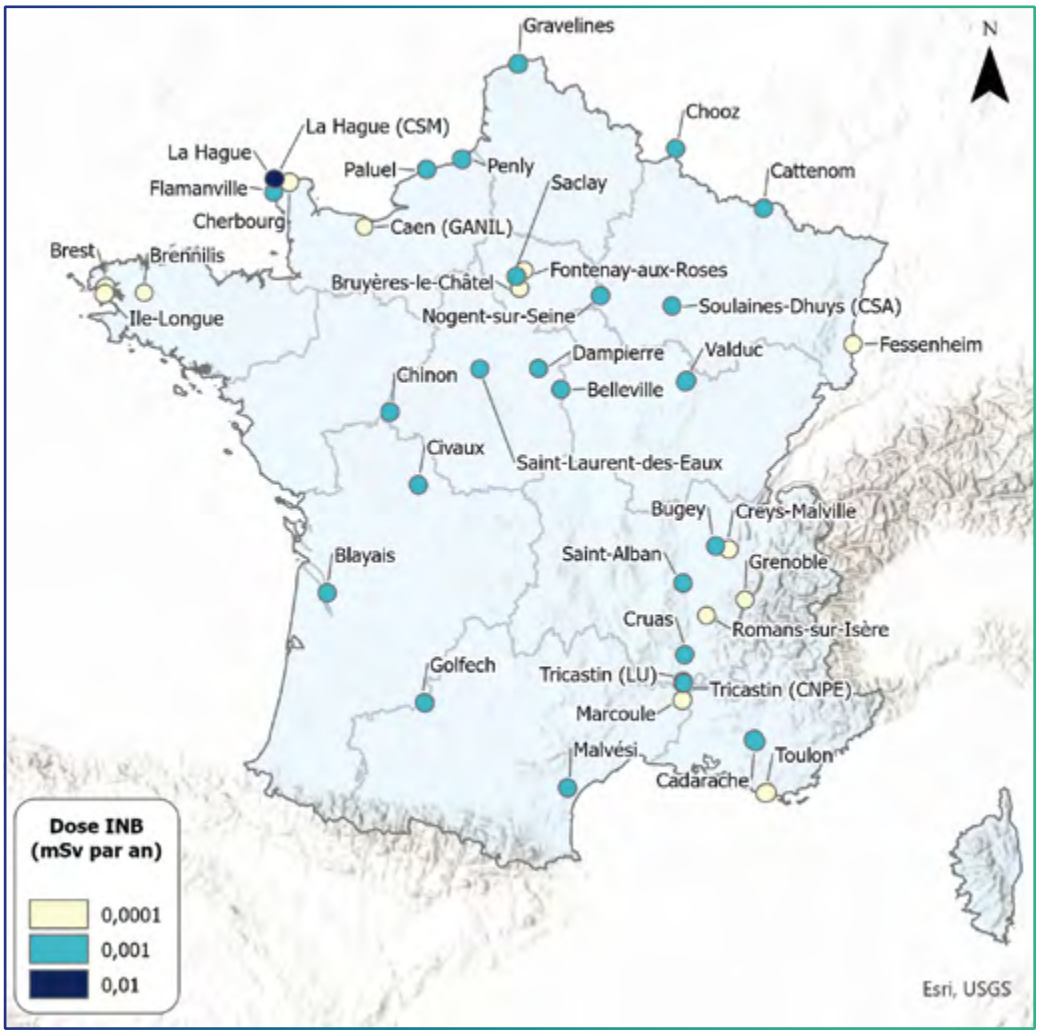


Figure 11 *- Positions des installations nucléaires en France pour lesquelles une évaluation d'impact dosimétrique a été réalisée*

[35] *Pour en savoir plus sur les mesures effectuées dans le cadre de la surveillance de l'environnement (objectifs, acteurs, cadre réglementaire, dispositif et stratégie de surveillance), se référer au Bilan radiologique 2021-2023 [3].*

Ainsi, s'agissant de l'exposition liée à la présence d'une installation nucléaire en fonctionnement normal pour les personnes résidant dans un rayon de 10 km autour du site, une dose forfaitaire de 0,0001, de 0,001 ou de 0,01 mSv/an (0,1, 1 ou 10 µSv/an) a été retenue suivant le site concerné. Ramenée à l'ensemble de la population, la dose moyenne par habitant résultant de ces activités industrielles est de 0,00003 mSv/an (0,03 µSv/an) (cf. ***Annexe VII*** pour le détail des calculs).

Cette valeur est inférieure à celle qui avait été estimée dans le bilan précédent (0,00011 mSv/an, soit 0,11 µSv/an). La différence s'explique principalement par la mise à jour des doses forfaitaires retenues pour certaines installations émettant peu de rejets dans l'environnement - par exemple pour les installations en démantèlement, les sites militaires et certains centres de recherche. Cette diminution de la dose forfaitaire est cohérente avec les évaluations présentées dans le Bilan radiologique 2021-2023 [3]. Une méthode plus précise a, de plus, été utilisée pour comptabiliser la population résidant à proximité des installations.

Certaines installations sont par ailleurs susceptibles d'entraîner une exposition externe de la population riveraine ou de personnes présentes occasionnellement en bordure de site, par exemple en cas de stockage ou d'entreposage de matières radioactives. Les études réalisées par l'ASNR montrent que la dose liée à l'exposition externe directe par le site peut parfois atteindre, sur une zone très localisée, quelques centaines de µSv/an [3]. Cette exposition, particulièrement en bordure de site, peut ainsi être plus élevée que celle liée aux rejets de l'installation. Le nombre de personnes potentiellement impactées est toutefois faible ; rapporté à l'ensemble de la population française, cette exposition reste négligeable devant celle liée aux rejets des installations.

Étude radiologique de site (ERS) du CNPE de Saint-Alban

Entre 2019 et 2021 l'IRSN a réalisé, en complément du programme de surveillance régulière, une étude radiologique de site (ERS) dans l'environnement du centre nucléaire de production d'électricité (CNPE) d'EDF de Saint-Alban (Isère). Ce programme d'étude innovant avait pour objectif principal d'améliorer les connaissances scientifiques de l'influence des rejets radioactifs du CNPE sur son environnement, afin d'estimer de la manière la plus réaliste possible l'exposition des populations avoisinantes sur la base de résultats de mesures de radioactivité dans les différents compartiments de l'environnement (atmosphérique, aquatique et terrestre) et des habitudes de vie des riverains. L'IRSN s'était également fixé l'objectif d'impliquer les acteurs locaux tout au long du projet (élus, associations, agriculteurs, population riveraine...) dans le but de répondre à leurs préoccupations, les informer et leur restituer de manière pédagogique les résultats de l'étude.

Dans ce cadre, ce sont plus de 970 prélèvements dans l'environnement et plus de 1 200 analyses radiologiques qui ont été réalisés, ainsi que plus de 270 personnes qui ont été interrogées. Les résultats et les informations recueillies lors de cette étude ont permis d'estimer la dose liée aux rejets radioactifs du CNPE de Saint-Alban entre 0,08 et 0,25 µSv/an. Cette dose, évaluée à partir des résultats de mesure, est de l'ordre de grandeur de celle estimée par l'exploitant à l'aide de codes de calculs sur la base des rejets réels (0,12 - 0,16 µSv/an). Les principales informations ainsi que les rapports de restitutions des résultats des différentes études sont consultables sur le site internet de l'ASNR[36]. D'autres ERS sont en cours (Orano Malvési, ancien site minier de l'Ecarpière) ou en projet (rejets des services de médecine nucléaire, CNPE marin).

[36] *https://recherche-expertise.asnr.fr/savoir-comprendre/environnement/ers-cnpe-saint-alban-saint-maurice-lexil-isere*

Installations cyclotrons

Il existe en 2025, sur le territoire français métropolitain, 34 installations équipées de cyclotrons (***Figure 12***). Parmi ces installations, 27 sont destinées à la fabrication de médicaments radiopharmaceutiques[37], utilisés à des fins diagnostiques (scintigraphie et tomographie par émission de positons, TEP) ou thérapeutiques (radiothérapie interne vectorisée). En raison de la courte demi-vie des radionucléides employés, les sites de production sont souvent situés à proximité d'hôpitaux, en zone urbaine ou péri-urbaine, pour permettre l'acheminement et l'utilisation des médicaments radiopharmaceutiques dans les meilleurs délais.

Figure 12 *- Positions des installations cyclotron en France pour lesquelles une évaluation d'impact dosimétrique a été réalisée*

[37] *Un « médicament radiopharmaceutique » contient un ou plusieurs isotopes radioactifs, incorporés à des fins médicales.*

Ces installations sont autorisées à produire et à rejeter dans l'atmosphère, dans le cadre de leur fonctionnement normal, des substances radioactives à vie courte (d'une période inférieure à 100 jours). Les principaux radionucléides produits et rejetés sont le fluor-18 (^{18}F) et le carbone-11 (^{11}C). D'autres radionucléides, tels que l'argon-41 (^{41}Ar) ou l'azote-13 (^{13}N), sont produits en faible quantité par l'activation de l'air ou de la cible du cyclotron, et sont également susceptibles d'être rejetés. Bien que les installations soient équipées de systèmes de limitation avant rejet (capture, décroissance, filtration), une partie des radionucléides produits est rejetée dans l'atmosphère *via* un circuit d'extraction d'air.

La quantité de rejets atmosphériques autorisée est variable selon la vocation de l'installation (recherche, production médicale) et les besoins identifiés par l'industriel. En particulier, les limites autorisées pour les rejets dans l'environnement sont plus faibles de plusieurs ordres de grandeur pour les installations de recherche par rapport aux installations de production.

Les installations cyclotron font l'objet d'une surveillance radiologique de leurs rejets, mais pas de leur environnement. Il n'est donc pas possible d'évaluer l'exposition de la population sur la base de mesures dans l'environnement, comme cela est fait pour les installations nucléaires de base. Cependant chaque exploitant de cyclotron doit réaliser, dans le cadre de ses demandes d'autorisation, une évaluation de la dose efficace reçue par la population avoisinante. Cette évaluation, intégrée aux études d'impact, repose sur une modélisation de la dispersion atmosphérique des rejets et s'appuie sur un scénario de rejet annuel maximal. La dose ainsi calculée - supérieure à l'exposition réelle de la population - conduit à une moyenne de 0,007 mSv/an (7 µSv/an) pour la population vivant à proximité d'un cyclotron et peut atteindre quelques dizaines de µSv/an pour les riverains des installations de production les plus importantes.

En l'absence des mesures qui permettraient de caractériser la zone d'influence des sites, un périmètre de 1 km est retenu ici. La méthode détaillée est présentée en ***Annexe VII***. Afin d'obtenir, pour le présent bilan, une estimation dosimétrique plus réaliste, les évaluations présentées dans les études d'impact, basées sur les rejets maximaux autorisés, ont été ajustées de manière proportionnelle aux rejets réels mesurés annuellement à l'émissaire lorsque cela était possible[38]. Ainsi, en s'appuyant à la fois sur les études d'impact et sur la surveillance à l'émissaire, la dose efficace annuelle moyenne estimée pour la population vivant à proximité d'un cyclotron est de 0,002 mSv/an (2 µSv/an). Rapportée à l'ensemble de la population de France métropolitaine, l'exposition annuelle moyenne s'élève à 0,00001 mSv/an (0,01 µSv/an).

Services de médecine nucléaire

La médecine nucléaire utilise des médicaments radiopharmaceutiques administrés aux patients afin de réaliser des examens diagnostiques et des applications thérapeutiques, utilisant des radionucléides tels que le ^{18}F, le technétium-99 métastable (^{99m}Tc), l'iode-131 (^{131}I) ou encore le lutétium-177 (^{177}Lu). La radioactivité administrée aux patients est rejetée dans les urines et les selles. Elle est éliminée, après décroissance, dans les effluents hospitaliers lors du séjour du patient dans le service de médecine nucléaire, mais aussi dans les eaux usées domestiques en cas de transfert du patient vers un autre établissement, ou lorsque le patient retourne à domicile. Dans les services de médecine nucléaire, ces effluents font l'objet d'une gestion réglementée, incluant notamment leur collecte et leur décroissance avant rejet lorsque les activités mises en œuvre le nécessitent. Pour évaluer les doses pouvant être reçues par les travailleurs des systèmes d'assainissement, l'ASNR met à disposition l'outil CIDRRE[39] qui propose une estimation majorante de l'exposition pour s'assurer du respect de la limite réglementaire.

Après leur traitement en station d'épuration, les eaux usées sont rejetées dans les eaux douces superficielles (fleuve, rivière ou lac) ou en mer. Les boues d'épuration, riches en éléments nutritifs et en matière organique, sont valorisées majoritairement en amendement agricole, directement ou sous forme de compost. Une partie des boues est utilisée comme source d'énergie par incinération et une dernière part, marginale, est utilisée en valorisation industrielle. Une fraction des radionucléides qu'elles contiennent est ainsi rejetée dans le milieu natu-

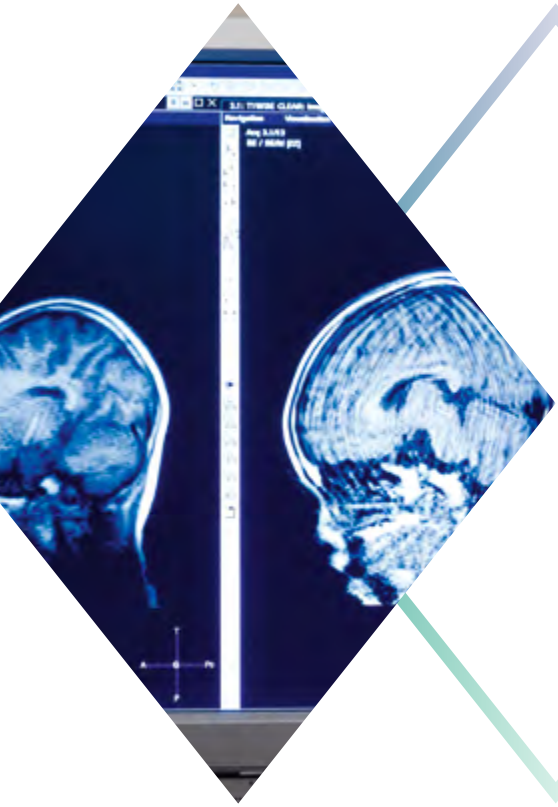
[38] *Cette information a été obtenue pour environ 70 % des sites au moment de la réalisation du présent rapport.*

[39] *https://cidrre.asnr.fr/*

rel, après une décroissance radioactive pendant le temps de traitement des eaux et de stockage des boues. Plusieurs études ont été conduites en France et à l'étranger pour estimer les doses qui s'ensuivent pour la population locale. Les études qui ne considèrent que l'impact des radionucléides d'origine médicale sous des hypothèses réalistes estiment généralement des doses associées très faibles, largement inférieures à 0,001 mSv/an pour les riverains des stations de traitement des eaux usées.

Les valeurs suivantes sont retenues pour l'exposition liée aux rejets de fonctionnement des activités nucléaires autorisées :

- pour les personnes résidant dans un rayon de 1 à 10 km autour d'une installation nucléaire de base, une dose de 0,0001 à 0,01 millisievert par an (mSv/an) (soit 0,1 à 10 microsieverts par an (µSv/an)) est retenue suivant le site ;
- pour les personnes résidant dans un rayon de 1 km autour d'une installation cyclotron, une dose de 0,002 mSv/an (soit 2 µSv/an) est retenue ;
- une dose efficace moyenne nationale par habitant de 0,00004 mSv/an, soit 0,04 µSv/an (la contribution des installations nucléaires est en moyenne de 0,03 µSv/an et celle des cyclotrons de 0,01 µSv/an).



3.2.3 Exposition en imagerie médicale diagnostique

L'imagerie médicale est une spécialité qui apporte un bénéfice incontestable dans la prise en charge des patients. Utilisant largement les rayonnements ionisants, elle contribue de manière importante à l'exposition de la population française aux rayonnements ionisants d'origine artificielle.

L'ASNR évalue périodiquement, dans le cadre de la mission prévue à l'article R.1333-67 du Code de la santé publique, l'exposition de la population française aux rayonnements ionisants liée aux actes de diagnostic. L'évaluation la plus récente a été publiée[40] en 2025 (rapport « ExPRI » [4]). Elle utilise les données de l'année 2022, extraites de l'échantillon du système national des données de santé (ESND) incluant environ 2 % des bénéficiaires de l'Assurance maladie et représentatif de la population française.

En 2022, 43 % de la population a été exposée à des rayonnements ionisants dans un contexte de diagnostic médical en radiologie conventionnelle, dentaire, mammographie, scanographie, radiologie interventionnelle à visée diagnostique (entraînant une exposition externe) ou en médecine nucléaire (imagerie après administration de radionucléides entraînant une exposition interne). Ce chiffre est du même ordre de grandeur que celui qui figurait dans le précédent bilan (en 2017, 45 % de la population était exposée). La fréquence d'actes diagnostiques réalisés en France en 2022, de l'ordre de 1 100 actes pour 1 000 individus, a baissé d'environ 8 % par rapport à l'année 2017. Cette baisse est principalement due à une diminution du nombre d'actes de radiologie conventionnelle.

Les ordres de grandeur des doses efficaces reçues par examen sont représentés sur la ***Figure 13***: pour ce qui concerne les examens les plus courants, la dose reçue par acte est comprise entre 0,1 mSv (pour une radiographie pulmonaire) et 15 mSv (pour un scanner abdomino-pelvien ou un TEP[41]-scanner). Pour un même examen, il existe une disparité des doses reçues par les patients fonction de la pratique médicale, de l'indication clinique, de la qualité des appareils, de la morphologie des patients...

[40] *https://www.asnr.fr/sites/asnr/files/2025-09/ASNR-Rapport-ExPRI_2025-04.pdf*

[41] *TEP : Tomographie par émission de positons.*

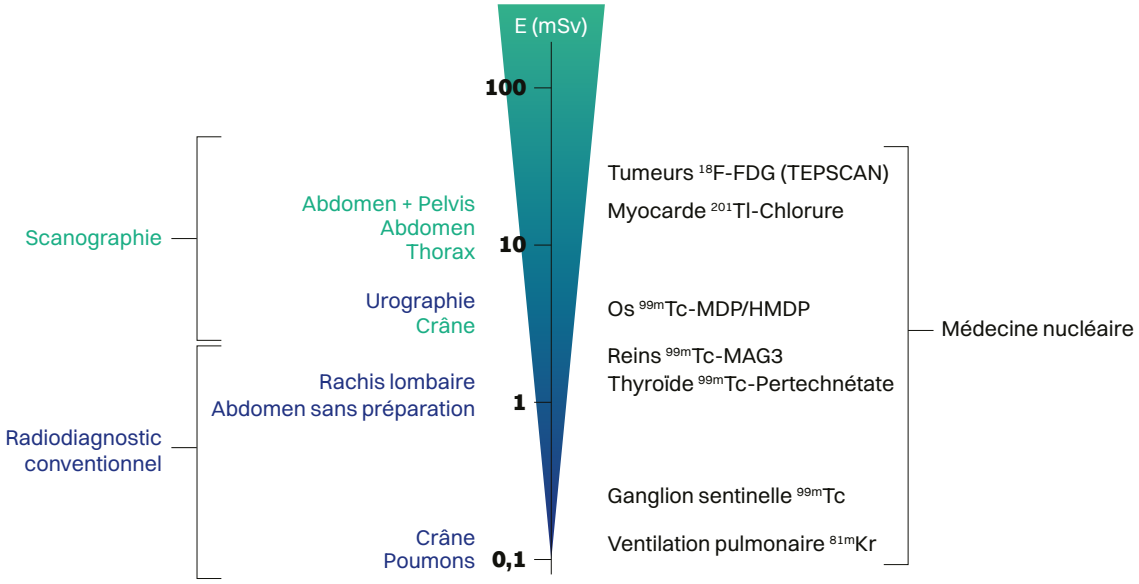


***Figure 13** - Ordre de grandeur des doses efficaces reçues lors d'examens diagnostiques courants*

La répartition en 2022 des actes diagnostiques par modalité d'imagerie[42] (radiologie conventionnelle, scanographie...) et leur contribution à la somme des doses reçues par les Français ayant fait l'objet d'actes d'imagerie médicale diagnostique en 2022 (« dose cumulée ») sont représentées en ***Figure 14***.

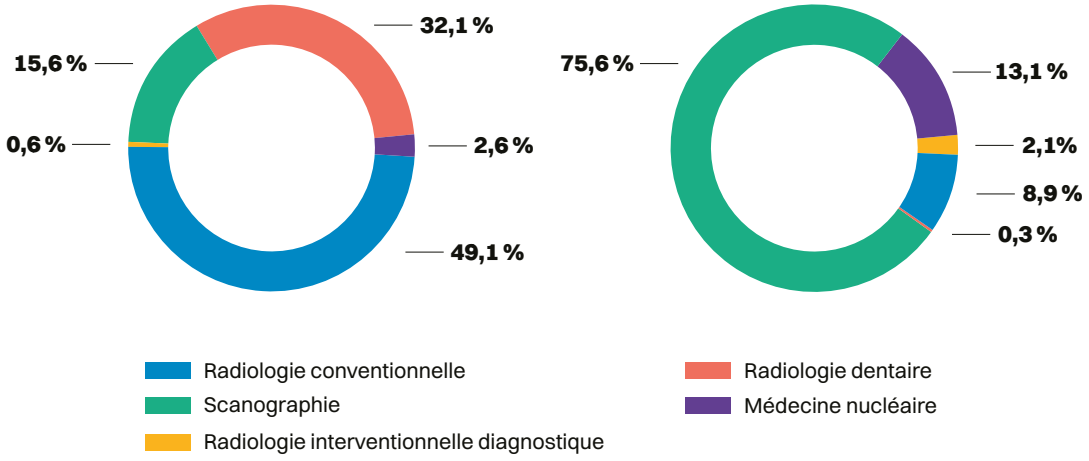


***Figure 14** - Répartition par modalité d'imagerie (à gauche) et contribution à la dose cumulée des actes diagnostiques (à droite) en France en 2022. La radiologie conventionnelle représente presque la moitié des actes, tandis que la scanographie contribue aux ¾ de la dose*

La scanographie, bien que ne représentant que 16 % des actes, reste de loin l'examen contribuant le plus à la somme des doses reçues par les Français ayant fait l'objet d'actes d'imagerie médicale diagnostique en 2022 (près de 76 %). Il convient de noter une augmentation de la part de la médecine nucléaire par rapport au bilan précédent, désormais deuxième contributrice à la dose cumulée (13 % en 2022 et 11 % en 2017).

[42] *« Modalité d'imagerie » est le terme technique employé dans le domaine médical pour désigner le nom de la technologie utilisée (TEP, scanner etc.).*

Bilan de l'exposition « médicale »

Rapportés à la population totale en France, les actes d'imagerie médicale diagnostique conduisent à une dose efficace moyenne par individu de l'ordre de 1,6 mSv/an.

La valeur obtenue ici est légèrement plus élevée que celle évaluée précédemment, de l'ordre de 1,5 mSv/an. Cette légère hausse est la conséquence d'une augmentation entre 2017 et 2022 du nombre d'actes de scanographie (+ 11 %) et de médecine nucléaire (+ 22 %), qui entraînent des doses plus élevées, en parallèle d'une baisse des fréquences d'actes en radiologie conventionnelle, conduisant à une baisse globale de la fréquence d'actes d'imagerie médicale. Ainsi, malgré une tendance générale de diminution des doses par acte, il n'est pas constaté de baisse générale de l'exposition de la population en diagnostic médical.

Cette valeur tient par ailleurs compte du fait qu'un grand nombre de Français n'ont pas bénéficié d'acte diagnostique sur cette période. Pour les personnes ayant bénéficié d'au moins un examen d'imagerie en 2022, la dose efficace individuelle moyenne était estimée à environ 3,7 mSv, en légère hausse par rapport à 2017 (3,4 mSv). L'exposition des patients est toutefois hétérogène : la moitié a reçu une dose annuelle inférieure ou égale à 0,1 mSv, 78 % une dose inférieure à la dose moyenne de 3,7 mSv, tandis que les patients les plus exposés ont reçu une dose pouvant atteindre plusieurs centaines de mSv.

La valeur suivante est retenue pour l'exposition médicale liée aux actes d'imagerie médicale diagnostique : une dose efficace moyenne par habitant de 1,6 millisievert par an (mSv/an).

Impact de la pandémie de Covid-19 sur le nombre d'actes d'imagerie en 2020

Depuis le précédent bilan, la France a été touchée par la pandémie de Covid-19 et plusieurs confinements ont été décrétés pour la contenir. Ces événements ont eu un impact sur le nombre d'actes d'imagerie et par conséquent sur la dose estimée pour la population française pendant cette période : le nombre d'actes réalisés en 2020, l'année la plus touchée par l'épidémie, a été inférieur d'environ 10 % au nombre d'actes attendus, entraînant une dose moyenne par bénéficiaire inférieure d'environ 8 % à la dose attendue.

L'impact de l'épidémie n'a toutefois pas été le même selon le type d'examen considéré : en particulier, le nombre de scanners du thorax et du cœur a sensiblement augmenté en 2020, le scanner du thorax s'étant imposé comme examen de référence de première intention pour le diagnostic de la Covid-19. Cette augmentation a contrasté avec une baisse du nombre de radiographies du thorax et de mammographies sur cette même année. L'année 2022, utilisée pour le présent bilan, peut être considérée comme peu impactée par la pandémie de Covid-19.

Pour en savoir plus : voir le rapport EXPRI publié en 2025[43] [4].

[43] *https://www.asnr.fr/sites/asnr/files/2025-09/ASNR-Rapport-ExPRI_2025-04.pdf*

3.3
BILAN DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION FRANÇAISE

3.3.1 Exposition moyenne

La dose efficace estimée en moyenne pour la population française sur la période 2020-2024 du fait de l'ensemble des expositions évaluées dans les chapitres précédents s'élève à 7,1 millisieverts par an (mSv/an).

Les contributions des différentes sources d'exposition sont représentées sur la *Figure 15*. L'exposition au radon (55 %) constitue la contribution principale. Viennent ensuite l'exposition médicale (23 %), l'exposition liée à l'incorporation de radionucléides naturels (9 %), l'exposition aux rayonnements telluriques (9 %), l'exposition aux rayonnements cosmiques (4 %) et enfin celle liée à l'usage industriel et militaire de la radioactivité (< 1 %), essentiellement due aux anciennes retombées des essais nucléaires atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl.

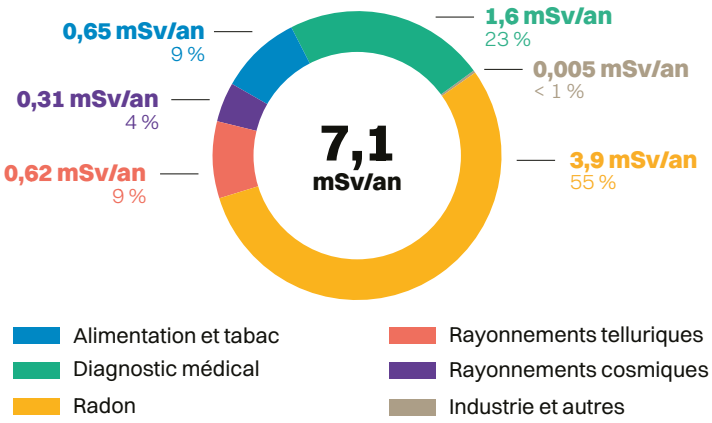


Figure 15 - Exposition moyenne en France métropolitaine sur la période 2020-2024

L'augmentation de la dose moyenne par rapport à la précédente évaluation sur la période 2014-2019 (4,5 mSv/an) [2] résulte en majeure partie de la mise à jour des coefficients de dose du radon, dont la valeur est plus du double de celle utilisée dans le bilan précédent. Cette évolution entraine une hausse de la dose évaluée pour l'exposition au radon, de 1,5 mSv/an à 3,9 mSv/an aujourd'hui. Une légère augmentation des doses liées à l'exposition médicale (1,6 mSv/an, contre 1,5 mSv/an dans le bilan précédent) et à l'incorporation de radionucléides naturels (0,65 mSv/an, contre 0,55 mSv/an précédemment), du fait notamment de la réévaluation des quantités de denrées consommées annuellement, est de plus observée.

3.3.2 Variabilité de l'exposition moyenne au travers de cas-types

Les disparités entre les doses efficaces estimées pour la population française sont principalement liées :

- **Au lieu d'habitation (rayonnements cosmiques au sol, rayonnements telluriques et radon) ;**
- **À la fréquence des voyages en avion (rayonnements cosmiques) ;**
- **Aux habitudes alimentaires, comme illustré dans ce rapport pour ce qui concerne d'une part les fruits de mer (incorporation de radionucléides naturels) et, d'autre part, les champignons sauvages et la viande de gibier dans les zones les plus touchées par les retombées de l'accident de Tchernobyl (retombées des essais nucléaires atmosphériques et des accidents) ;**
- **Au mode de vie, comme illustré par la consommation de tabac (incorporation de radionucléides naturels), au type d'habitation (radon) et au temps passé en intérieur ;**
- **À la fréquence et à la nature d'actes médicaux diagnostiques (exposition médicale).**

Afin d'illustrer les gammes de doses efficaces susceptibles d'être reçues par le public en fonction des différentes situations d'exposition, quelques exemples (ou « cas-types ») ont été développés ci-après :

- Le **cas n° 1 (« exposition faible »)** correspond à une situation de moindre exposition, où une personne n'a bénéficié d'aucun examen médical, n'a pas pris l'avion, vit dans une commune à faible concentration en radon[44], à faible niveau de rayonnement tellurique[44], ne consomme pas de fruits de mer, ne fume pas et ne consomme pas de champignons sauvages ni de viande de gibier ;

- Le **cas n° 2 (« exposition moyenne/ radon (-) »)** correspond à l'exposition moyenne d'une personne de la population française vivant dans une commune à faible concentration en radon[44] ;

- Le **cas n° 3 (« exposition moyenne/médical (-) »)** correspond à l'exposition moyenne d'une personne de la population française qui n'a bénéficié d'aucun examen médical ;

- Le **cas n° 4 (« exposition moyenne/ champignons gibier (+) »)** correspond à l'exposition moyenne d'une personne de la population française résidant sur une des zones les plus touchées par les retombées de l'accident de Tchernobyl et ayant une consommation importante de champignons sauvages et de viande de gibier ;

- Le **cas n° 5 (« exposition moyenne/avion (+) »)** correspond à l'exposition moyenne d'une personne de la population française prenant fréquemment l'avion[45] ;

- Le **cas n° 6 (« exposition moyenne/tabac (+) »)** correspond à l'exposition moyenne d'une personne de la population française ayant une consommation importante de tabac[46];

[44] *5e percentile*

[45] *Passager ayant réalisé 10 vols allers-retours en avion par an*

[46] *Consommation de vingt cigarettes par jour*

- Le **cas n° 7 (« exposition moyenne/fruits de mer (+) »)** correspond à l'exposition moyenne d'une personne de la population française, ayant une consommation importante de fruits de mer[47];
- Le **cas n° 8 (« exposition moyenne/ radon (+) »)** correspond à l'exposition moyenne d'une personne de la population française, vivant dans une commune à forte concentration en radon[48] ;
- Le **cas n° 9 (« exposition moyenne/médical (+) »)** correspond à l'exposition moyenne d'une personne de la population française, ayant bénéficié d'un scanner thorax-abdomen-pelvis[49] ;
- Le **cas n° 10 (« exposition élevée »)** correspond à une situation de forte exposition où une personne a bénéficié d'un scanner thorax-abdomen-pelvis[49], a pris fréquemment l'avion[45], vit dans une commune à forte concentration en radon[48] et à fort niveau de rayonnement tellurique[48], a une consommation importante de fruits de mer[47], de tabac[46], boit une eau du robinet chargée en radionucléides naturels[50], réside sur une des zones les plus touchées par les retombées de l'accident de Tchernobyl et a une consommation importante de champignons sauvages et de viande de gibier.

Ces 10 exemples donnent un large aperçu des variabilités mais n'en couvrent pas l'exhaustivité, puisque seules les sources prépondérantes de variation ont été examinées. Ainsi, la variabilité des doses liées au rayonnement cosmique hors voyage en avion, globalement comprises entre 0,28 mSv/an et 0,35 mSv/an (respectivement les 5e et 95e percentiles), est considérée comme peu significative en valeur absolue par rapport à celle des autres sources d'exposition abordées dans ce rapport et n'est pas prise en compte dans la présentation des cas types.

Les doses associées à chacun des cas détaillés ci-avant sont représentées sur la ***Figure 16***.

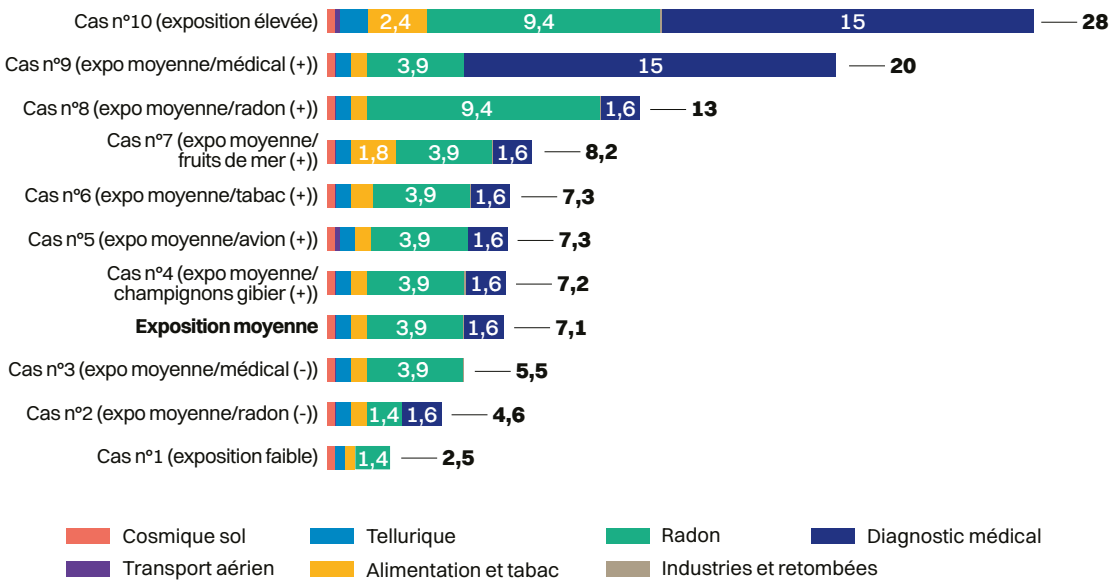


Figure 16 *- Variabilité de l'exposition de la population française : cas-types*

[47] *Consommation d'une cinquantaine de kg de fruits de mer par an*

[48] *95e percentile*

[49] *Pour illustrer la variabilité de l'exposition médicale, une dose de 15 mSv associée à un scanner thorax-abdomen-pelvis (acte de scanographie à la fois le plus fréquent et le plus exposant) est retenue.*

[50] *Valeur seuil préconisée par la Direction générale de la santé pour rechercher des solutions de réduction de cette exposition*

3.3.3
Vers une estimation de l'exposition individuelle

Le bilan présenté concerne l'exposition moyenne pour l'ensemble de la population, accompagnée de variations possibles autour de cette moyenne basées sur des conditions de vie stylisées. À cet égard, un nombre limité de cas-types a été choisi pour illustrer ces variations.

Toutefois, d'autres combinaisons de paramètres peuvent être envisagées afin d'estimer de manière plus précise l'exposition d'un individu particulier. Dans cet objectif le *Tableau 1* illustre, pour chaque source d'exposition, les principaux paramètres d'influence qui permettent d'affiner le calcul de l'exposition individuelle par comparaison avec les estimations présentées précédemment.

Tableau 1 - Principaux paramètres d'influence pour affiner le calcul de l'exposition individuelle

Source d'exposition	Paramètres d'influence
Radon	• Potentiel radon des sols du lieu de résidence • Type d'habitat (collectif, individuel) • Caractéristiques de construction de l'habitat, ventilation et habitudes de vie des occupants (temps passé dans l'habitat, aération...)
Médical	• Type et nombre d'examens à visée diagnostique
Radionucléides naturels dans l'eau, les denrées alimentaires et le tabac	• Teneur en radionucléides des aliments et des eaux • Habitudes alimentaires (nature et quantités des produits consommés, en particulier pour les fruits de mer) • Nombre de cigarettes consommées
Rayonnements telluriques	• Teneur en radionucléides naturels des sols • Teneur en radionucléides des matériaux de construction • Habitudes de vie (temps passé dans l'habitat)
Rayonnements cosmiques	• Altitude du lieu de résidence • Habitudes de vie (nombre et destinations pour les vols réalisés en avion, temps passé dans l'habitat)
Radionucléides artificiels dans l'environnement	• Si résidence dans une des zones les plus touchées par les retombées de l'accident de Tchernobyl, habitudes alimentaires (nature et quantités des produits consommés, en particulier pour les champignons sauvages et la viande de gibier) • Proximité du lieu de résidence avec une installation nucléaire ou un cyclotron

Comme indiqué dans le paragraphe 2.2, l'ASNR a développé une application internet permettant à chacun d'estimer de manière plus fine et personnalisée son exposition individuelle aux rayonnements ionisants à partir d'un questionnaire. Ce questionnaire, anonyme, est basé sur un nombre réduit de questions abordant les principaux paramètres d'influence de l'exposition et les données correspondantes susceptibles d'être connues de façon individuelle. Cette application est accessible sur le site internet de l'ASNR[51].

EXPOP, en quelques chiffres :

- L'exposition moyenne annuelle de la population française aux rayonnements ionisants sur la période **2020-2024** est évaluée à **7,1 millisieverts par an (mSv/an).**
- L'exposition était évaluée à **4,5 mSv/an** sur la période **2014-2019.**
- L'augmentation observée par rapport au bilan précédent résulte en majeure partie de la mise à jour des coefficients de dose du radon. Cette évolution entraine une hausse de la dose évaluée pour l'exposition au radon, de **1,5 mSv/an** à **3,9 mSv/an** aujourd'hui.
- Les contributions des différentes sources d'exposition sont les suivantes : l'exposition au radon constitue la source principale de cette exposition **(55 %)**, suivie de l'exposition médicale à visée diagnostique **(23 %)**, de l'exposition liée à l'incorporation de radionucléides naturels **(9 %)**, de l'exposition aux rayonnements telluriques **(9 %)**, de l'exposition aux rayonnements cosmiques **(4 %)** et enfin de celle liée à l'usage industriel et militaire de la radioactivité **(< 1 %)**, essentiellement due aux anciennes retombées des essais nucléaires atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl.
- Les différentes composantes de la dose moyenne annuelle estimée dans le présent bilan ont pu évoluer par rapport au bilan précédent en raison d'ajustements des méthodes de calcul ou de modification des paramètres utilisés. Toutefois, aucune évolution de la dose liée à des changements de pratiques ou à des événements n'a été observée pendant cette période.

[51] *https://expop.asnr.fr/*

Reconstitution de la composante radiologique de l'exposome dans l'étude épidémiologique CORALE

La recherche en santé publique tend depuis plusieurs années à considérer l'ensemble des facteurs susceptibles d'influer sur la santé humaine afin d'étudier leurs effets combinés : certains facteurs ayant individuellement une contribution très faible voire imperceptible pourraient en effet, lorsqu'ils s'additionnent, avoir un impact significatif sur la santé. Dans cette perspective, le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a introduit au début des années 2000 le concept d'exposome, représentant l'ensemble des expositions environnementales auxquelles une personne est soumise au long de sa vie, susceptibles d'avoir un effet sur sa santé. Cependant la tâche de reconstitution de ces expositions sur une vie entière est complexe, même lorsqu'elle ne concerne que le volet radioactivité.

L'IRSN s'est associé en 2020 à l'unité Cohortes épidémiologiques en population de l'Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines[52] dans le cadre du projet CORALE[53]. La cohorte Constances, sur laquelle est basé ce projet, regroupe 220 000 volontaires recrutés en France pour participer à une étude épidémiologique des causes de maladies chroniques et particulièrement des causes environnementales. L'objectif est de reconstituer les doses liées aux rayonnements ionisants d'origine environnementale, médicale et professionnelle reçues par les participants de la cohorte Constances depuis leur naissance, puis d'évaluer les risques de cancers et d'autres maladies chroniques potentiellement liés à ces doses en prenant en compte l'influence des autres facteurs de risque (tabac, alcool, éléments traces métalliques...).

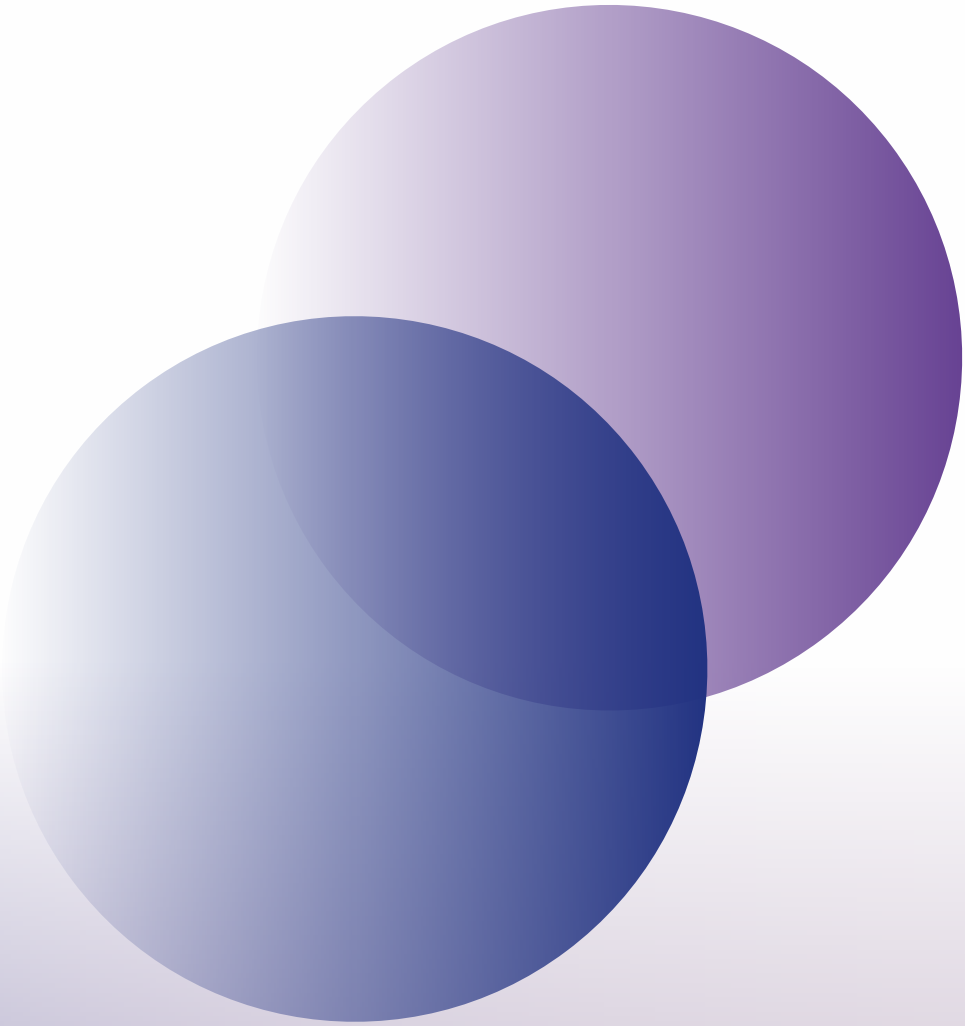
Plus de 42 000 volontaires ont répondu au questionnaire qui leur a été adressé, portant sur les facteurs ayant pu influencer leur exposition aux rayonnements ionisants (lieux de résidence successifs, caractéristiques des logements, consommation de fruits de mer, trajets aériens, examens médicaux et traitements...). En parallèle, l'IRSN (ASNR depuis 2025) a réalisé des travaux de reconstitution des doses associées à chacune des situations d'exposition, en se basant sur les résultats du rapport EXPOP et sur des analyses complémentaires. En particulier, des reconstitutions dosimétriques historiques ont été réalisées pour les retombées des essais nucléaires atmosphériques depuis 1945 et de l'accident de Tchernobyl depuis 1986, ainsi que pour l'imagerie médicale diagnostique. Alors que les doses efficaces évaluées dans le rapport EXPOP rendent compte de l'exposition globale récente, la mise en relation des expositions avec l'occurrence de maladies nécessite de disposer des doses reçues spécifiquement par les différents organes, sur la vie entière. Les organes sélectionnés dans un premier temps sont les poumons, le colon, la prostate, les seins, la thyroïde et le cerveau, afin de cibler les maladies les plus fréquentes (cancers notamment).

Des analyses épidémiologiques utilisant ces estimations de doses ont débuté dans le cadre d'une thèse de doctorat. La base de données CORALE sera mise à disposition de la communauté scientifique au 31 décembre 2027, dans le cadre de la charte pour l'accès à la cohorte Constances.

[52] *UMS011 (Inserm / Université Paris Saclay / Université Paris Cité / Université Versailles Saint-Quentin en Yvelines)*

[53] *Composante radiologique de l'exposome, multi-expositions, risques de cancers et d'autres pathologies chroniques dans la cohorte Constances*

Références



[1] **UNSCEAR** - Sources, effects and risks of ionizing radiation. Volume II : Scientific Annex B. UNSCEAR 2024 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations sales publication E.25.IX.2. United Nations, New York, 2025.

[2] **Rapport IRSN/2021-00108** - Exposition de la population française aux rayonnements ionisants - bilan 2014-2019.

[3] **Rapport IRSN/2024-00600** - Bilan de l'état radiologique de l'environnement français de 2021 à 2023.

[4] **Rapport IRSN/2025-00145** - Étude EXPRI - Exposition de la population aux rayonnements ionisants due aux actes d'imagerie médicale diagnostique – Actes réalisés en France en 2022.

[5] **Rapport IRSN/2024-00333** - La radioprotection des travailleurs - Exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France : bilan 2023.

[6] **ICRP, 2007** - The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).

[7] **Arrêté du 16 novembre 2023 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.** JORF du 25 novembre 2023, texte 54 sur 177.

[8] **Vassas C., Pourcelot L., Vella C., Carpéna J., Pupin J.-P., Bouisset P., Guillot L.** - Mechanisms of enrichment of natural radioactivity along the beaches of the Camargue, France (2006) - Journal of Environmental Radioactivity, 91 (3), pp. 146 – 159 DOI : 10.1016/j.jenvrad.2006.09.002.

[9] **Rapport ASNR/2025-00269** - Étude radiologique des sables de la plage de Trébézy (Saint-Nazaire). Caractérisation radiologique du site, évaluation dosimétrique, recherche de l'origine.

[10] **Frelon S., Chazel V., Tourlonias E., Blanchardon E., Bouisset P., Pourcelot L., Paquet F.** - Risk assessment after internal exposure to black sand from Camargue : Uptake and prospective dose calculation (2007) - Radiation Protection Dosimetry, 127 (1-4), pp. 64 – 67 DOI : 10.1093/rpd/ncm252.

[11] **NF ISO 11 665-8, Mesurage de la radioactivité dans l'environnement** - Air : radon 222 - Partie 8 : méthodologies appliquées aux investigations initiales et complémentaires dans les bâtiments, AFNOR, février 2021.

[12] **Rapport IRSN/DEI/SARG/2009-011. Ielsch G., 2009** - Cartographie du potentiel radon des formations géologiques à l'échelle du 1/1 000 000e, Méthode générale.

[13] **Ielsch, G., Cushing M.E., Combes Ph., Cuney M., 2010** - Mapping of the geogenic radon potential in France to improve radon risk management : methodology and first application to region Bourgogne. Journal of Environmental Radioactivity 101 (2010) 813-820.

[14] **ICRP, 1993** - Protection Against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23 (2).

[15] **ICRP, 2010** - Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115, Ann. ICRP 40(1) et **ICRP, 2017** - Occupational Intakes of Radionuclides : Part 3. ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4).

[16] **ICRP, 2024** - Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Members of the Public : Part 1. ICRP Publication 158. Ann. ICRP 53(4-5).

[17] **UNSCEAR** - Sources and effects of ionizing radiation. Volume I : Sources : Report to the General Assembly, Scientific Annexes A and B. UNSCEAR 2008 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations sales publication E.10. XI.3. United Nations, New York, 2010.

[18] **Rapport IRSN/2022-00131** - Le bruit de fond des radionucléides artificiels dans l'environnement français métropolitain - bilan des constats radiologiques régionaux.

[19] **Rapport IRSN/2024-00559. Renaud P., Vray F** - Conséquences radiologiques des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires sur le territoire français métropolitain.

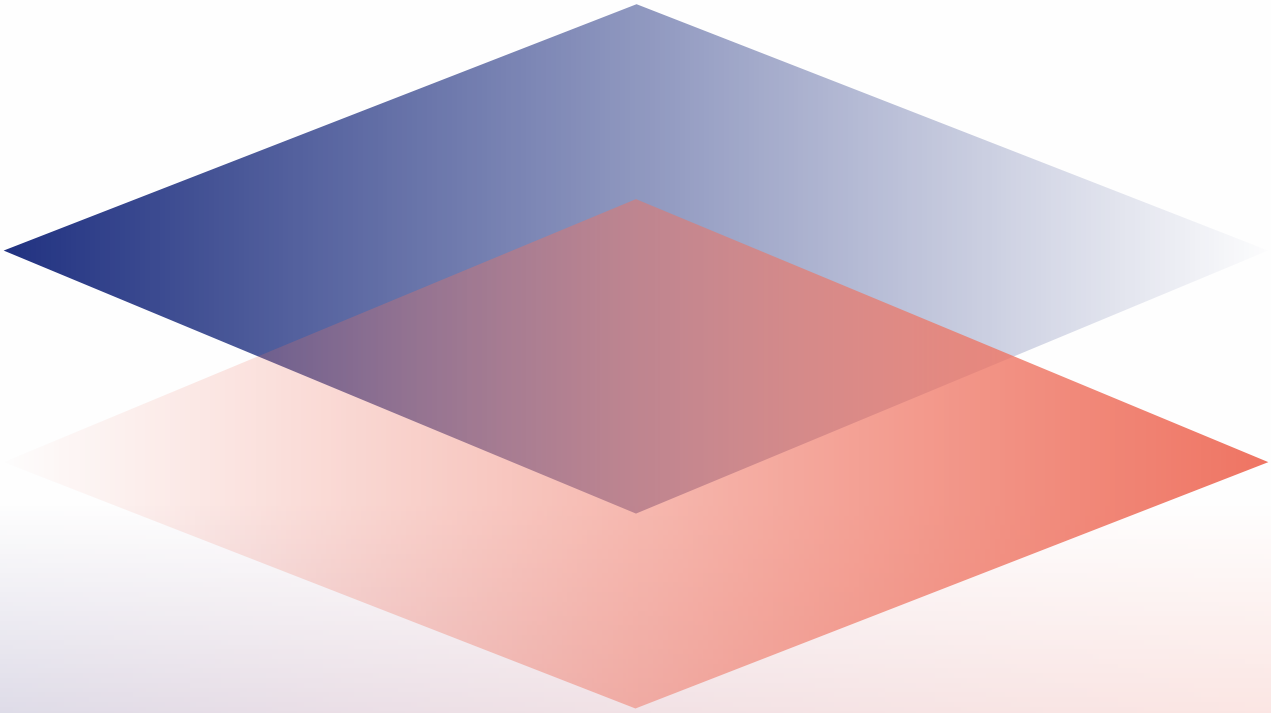
[20] **Rapport ASNR/2025-00253. Renaud P., Métivier J.M., Blanchardon E. (2025)** - Actualisation de l'évaluation des conséquences radiologiques en France de l'accident de Tchernobyl - contamination de l'environnement et exposition de la population.

[21] **Rapport IRSN/DEI/2011-01** - Analyse de l'impact de l'accident de Fukushima en France.

[22] **Rapport IRSN/2024-00428** - Estimation des conséquences radiologiques en France métropolitaine pouvant résulter d'incendies sur des zones contaminées par l'accident de Tchernobyl.

Annexes

5



ANNEXE I
Exposition aux rayonnements cosmiques au niveau du sol

Introduction

La Terre est bombardée en continu par des rayonnements cosmiques d'origine galactique et extra galactique, constitués à 90 % de particules de très haute énergie (10^2 à 10^5 MeV), principalement des protons (87 %) et des particules alpha (12 %). Les particules ayant une énergie suffisante pour franchir la magnétosphère terrestre interagissent avec notre atmosphère et y génèrent des gerbes de rayonnements secondaires (neutrons, muons, kaons, pions, électrons, positrons...). L'intensité du flux de particules décroît avec l'épaisseur d'air traversé : seulement 0,05 % des protons arrivent au niveau de la mer, où environ 50 % de l'exposition est due aux muons, 25 % aux électrons et positrons, 20 % aux neutrons et 5 % aux photons. Les particules chargées de basse énergie sont déviées par le champ magnétique terrestre, ce phénomène dépendant de la latitude : l'entrée des particules est facilitée au niveau des pôles, où elles suivent les lignes de force du champ magnétique, par rapport à l'équateur.

L'altitude étant le principal facteur de variation de l'exposition aux rayonnements cosmiques, c'est le seul paramètre qui était retenu dans le modèle analytique simplifié utilisé auparavant par l'UNSCEAR (UNSCEAR, 2008) ainsi que dans le précédent bilan EXPOP de 2021. D'autres facteurs interviennent toutefois, tels que le cycle solaire et la latitude, avec une variation maximale de l'exposition d'environ 10 % pour chacun de ces deux paramètres. Ainsi la dose moyenne annuelle reçue à quelques mètres au-dessus du niveau de la mer augmente d'environ 0,30 mSv/an à environ 0,32 mSv/an de la Corse-du-Sud au Nord de la France métropolitaine. Les évènements solaires, éruptions et éjections de masse coronale ont quant à eux un effet considéré comme négligeable sur l'exposition, du fait de leur durée et de leur fréquence d'occurrence.

Des outils de calcul, basés sur des simulations numériques, permettent désormais de proposer des évaluations plus réalistes de la dose au niveau du sol en tenant compte de l'ensemble des facteurs d'influence (altitude, latitude, modulation du cycle solaire...). Comme dans le dernier rapport de l'UNSCEAR (UNSCEAR, 2025), l'outil EXPACS[54] a été retenu dans la présente étude pour réaliser une estimation prenant en compte pour chacune des communes françaises étudiées les effets de l'altitude, de la latitude et du cycle solaire. Les écarts de résultats entre cet outil de calcul et le modèle simplifié utilisé auparavant dans les bilans EXPOP, basé sur une expression analytique fonction de l'altitude (Bouville, 1998) sont, aux latitudes des pays européens, de l'ordre de 14 % en-dessous de 1 000 m d'altitude et peuvent atteindre 22 % aux altitudes les plus élevées[55].

Données d'entrée

Les données d'entrée à considérer pour le calcul de l'exposition au sol de la population française aux rayonnements cosmiques sont les suivantes :

- la répartition de la population dans les différentes communes de France métropolitaine - les communes et leurs coordonnées (contour, centre) proviennent de l'API Geo[56], qui s'appuie sur le Code officiel géographique (COG) de l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE) du 1er janvier 2024 au moment où les données ont été extraites[57] ;
- la localisation des mairies, qui provient de l'annuaire des établissements publics[58] ;
- l'altitude des mairies dans les différentes communes de France métropolitaine, les données correspondantes provenant du service "altimétrie" de l'Institut géographique national (IGN)[59].

[54] *Japan Atomic Energy Agency, http://phits.jaea.go.jp/expacs/*

[55] *Débit de dose systématiquement moins élevé avec EXPACS pour les altitudes élevées.*

[56] *https://geo.api.gouv.fr/decoupage-administratif/communes*

[57] *https://www.insee.fr/fr/information/3720946*

[58] *https://etablissements-publics.api.gouv.fr/v3/communes/ + code_insee + '/mairie'*

[59] *https://geoservices.ign.fr/services-web-experts-altimetrie*

Méthodologie

Le débit de dose dû au rayonnement cosmique est calculé avec un modèle basé sur un code de simulation Monte Carlo du transport des rayonnements : *Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS)-based Analytical Radiation Model in the Atmosphere (PARMA)*, version 4 (Sato, 2015, 2016a). Ce modèle a été mis à disposition des utilisateurs sur un site internet sous la forme d'un classeur Excel : *Excel-based Program for calculating Atmospheric Cosmic-ray Spectrum (EXPACS)*, version 4.16. Les coefficients de conversion de la fluence en dose spécifiés pour une géométrie d'irradiation isotrope par les publications 116 et 123 de la CIPR (ICRP, 2010, 2013) sont utilisées dans ce modèle.

Pour chacune des communes considérées en France métropolitaine, l'individu représentatif pris en compte dans les évaluations est supposé vivre à l'extérieur à proximité de la mairie, l'altitude retenue dans les calculs pour chaque commune correspondant à celle de la mairie. La dose efficace de cet individu est calculée au 15 de chaque mois pour chaque commune à l'aide du code de calcul EXPACS, de janvier 2020 à décembre 2024, afin de prendre en compte l'influence du cycle solaire, puis elle est moyennée sur cette période de 5 ans.

L'exposition à l'intérieur de l'habitat est calculée en tenant compte d'un budget temps (temps moyen passé à l'intérieur) et d'un facteur de protection apportée par les bâtiments contre les rayonnements cosmiques. Un facteur de protection de 0,9 est retenu ici, sur la base des simulations de Sato (Sato, 2016b), en cohérence avec le choix de l'UNSCEAR (UNSCEAR, 2025). Cette valeur correspond à une atténuation du rayonnement cosmique par une épaisseur d'environ 13 cm de béton ordinaire. Elle est plus réaliste et légèrement plus élevée que celle de 0,8 utilisée précédemment par l'UNSCEAR et dans les précédents bilans EXPOP. Les budgets temps retenus, basés sur la publication 66 de la CIPR (ICRP, 1994), sont présentés dans le ***Tableau A1***.

Tableau A1 *- Budgets temps retenus pour les calculs*

	Budget temps moyen (journalier)		**Budget temps pour une personne pratiquant une activité professionnelle en extérieure (journalier)**	
Intérieur de l'habitat	22 h/j	92 %	16 h/j	67 %
Extérieur de l'habitat	2 h/j	8 %	8 h/j	33 %

Deux calculs sont effectués : le premier pour une personne passant 22 h/j à l'intérieur de son habitat et 2h /j à l'extérieur, et le second pour une personne exerçant une activité professionnelle en extérieur et passant 8 h/j à l'extérieur, (par exemple pour les métiers de l'agriculture, sylviculture, pêche, entretien des espaces verts, de la voirie, ouvriers du bâtiment et des travaux publics...). Ce second calcul est plus pénalisant puisqu'une personne en extérieur ne bénéficie pas de la protection apportée par les bâtiments vis-à-vis des rayonnements cosmiques.

Ainsi, pour une personne passant 22 h/j (92 % du temps) à l'intérieur et 2 h/j (8 % du temps) à l'extérieur, la dose efficace E_{moyen} estimée dans une commune C sera égale à :

$$E_{moyen}(C) = (E_{ext}(C) \times 0{,}08) + (E_{ext}(C) \times 0{,}9 \times 0{,}92)$$

Pour une personne travaillant en extérieur, la dose efficace $E_{extérieur}$ estimée dans une commune C sera égale à :

$$E_{extérieur}(C) = (E_{ext}(C) \times 0{,}33) + (E_{ext}(C) \times 0{,}9 \times 0{,}67)$$

La dose efficace individuelle moyenne dans un département D est ensuite déterminée en effectuant une pondération de la dose par la population de chaque commune du département, soit :

$$E_{moyen/extérieur}(D) = \frac{\sum_{Cj\ de\ D} [E_{moyen/extérieur}(C_j) P(C_j)}{\sum_{Cj\ de\ D} [P(C_j)]}$$

Avec :

- $E_{moyen/extérieur}(D)$ *(µSv/an)* : dose efficace individuelle moyenne annuelle dans le département D, pour un budget temps moyen ou de travailleur extérieur ;
- $E_{moyen/extérieur}(C_J)$ (µSv/an) : dose efficace individuelle moyenne annuelle dans la commune C_J du département D, pour un budget temps moyen ou de travailleur extérieur ;
- $P(C_J)$: population de la commune C_J.

De la même façon, la dose efficace individuelle moyenne en France est calculée en sommant ces résultats sur les communes de la France entière et en divisant par le nombre d'habitants en France métropolitaine.

Résultats

Les intervalles de variation des doses efficaces annuelles calculées à l'échelle des communes, établis en 2020 et actualisés en 2025, ainsi que les doses efficaces annuelles à l'échelle de la France en 2020 et 2025, tenant compte des deux hypothèses de budget temps (personne moyenne et travailleur extérieur), sont représentés dans le ***Tableau A2***.

Ce sont les valeurs par commune qui sont utilisées dans l'outil internet développé par l'ASNR, permettant d'estimer son exposition individuelle aux rayonnements ionisants à partir d'un questionnaire.

Tableau A2 *- Dose efficace moyenne à l'échelle de la France et intervalles de variation*

Dose annuelle	**Bilan 2014-2019**	**Bilan 2020-2024**
$E_{moyen}(C_j) \in$	[297 µSv ; 1068 µSv]	[273 µSv ; 799 µSv]
$E_{extérieur}(C_j) \in$	[311 µSv ; 1096 µSv]	[280 µSv ; 950 µSv]
$E_{moyen}(France)$	312 µSv	302 µSv
$E_{extérieur}(France)$	327 µSv	310 µSv

La comparaison des résultats obtenus dans le présent bilan avec ceux obtenus dans le bilan précédent montre une baisse générale des doses reçues, particulièrement dans les départements montagneux, ce qui s'explique à la fois par le changement de modèle de calcul et par le maximum d'activité solaire atteint fin 2024, entraînant une protection maximale sur Terre vis-à-vis des rayonnements cosmiques. La répartition de l'exposition annuelle de la population française est présentée sur la ***Figure A1***. En synthèse, 95 % de la population française métropolitaine est exposée à moins de 347 µSv/an et 5 % à moins de 280 µSv/an.

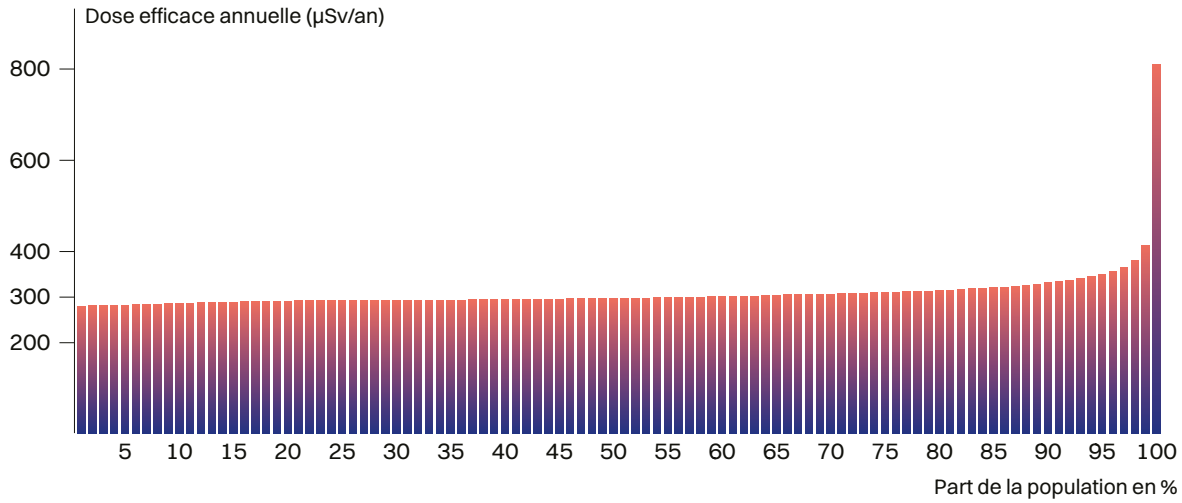


Figure A1 *- Répartition de l'exposition de la population liée aux rayonnements cosmiques*

Les résultats par département sont présentés dans le *Tableau A3*.

Tableau A3 - Exposition de la population française aux rayonnements cosmiques au sol par département

Département		Dose (µSv/an) Bilan 2014-2019	Dose (µSv/an) Bilan 2020-2024	Altitude moyenne (m)	Dose min (µSv/an)	Dose max (µSv/an)	Delta
1	AIN	339	326	341	305	457	-4 %
2	AISNE	306	299	110	292	322	-2 %
3	ALLIER	327	321	330	305	432	-2 %
4	ALPES-DE-HAUTE-PROVENCE	403	363	761	320	585	-10 %
5	HAUTES-ALPES	552	435	993	355	775	-21 %
6	ALPES-MARITIMES	319	293	555	279	572	-8 %
7	ARDÈCHE	341	321	472	286	528	-6 %
8	ARDENNES	315	307	167	294	342	-3 %
9	ARIÈGE	367	332	524	306	576	-9 %
10	AUBE	308	300	145	293	329	-3 %
11	AUDE	311	292	292	278	487	-6 %
12	AVEYRON	372	351	525	299	450	-6 %
13	BOUCHES-DU-RHÔNE	308	286	139	278	347	-7 %
14	CALVADOS	302	293	79	288	327	-3 %
15	CANTAL	412	389	779	299	507	-6 %
16	CHARENTE	304	292	108	284	327	-4 %
17	CHARENTE-MARITIME	299	285	39	283	301	-5 %
18	CHER	312	304	187	296	344	-3 %
19	CORRÈZE	339	325	455	293	433	-4 %
21	CÔTE-D'OR	324	319	310	308	377	-1 %
22	CÔTES-D'ARMOR	306	298	119	288	328	-3 %
23	CREUSE	354	349	499	304	416	-2 %
24	DORDOGNE	310	295	148	283	335	-5 %
25	DOUBS	361	349	506	296	477	-3 %
26	DRÔME	319	304	400	286	511	-5 %
27	EURE	305	298	120	288	319	-2 %
28	EURE-ET-LOIR	310	303	153	293	325	-2 %

Tableau A3 - Exposition de la population française aux rayonnements cosmiques au sol par département

Département		Dose (µSv/an) Bilan 2014-2019	Dose (µSv/an) Bilan 2020-2024	Altitude moyenne (m)	Dose min (µSv/an)	Dose max (µSv/an)	Delta
29	FINISTÈRE	302	293	85	287	329	-3 %
30	GARD	307	289	182	279	497	-6 %
31	HAUTE-GARONNE	315	300	332	290	524	-5 %
32	GERS	311	299	191	283	363	-4 %
33	GIRONDE	299	284	49	282	299	-5 %
34	HÉRAULT	303	284	162	279	423	-6 %
35	ILLE-ET-VILAINE	301	292	77	287	312	-3 %
36	INDRE	312	303	167	292	346	-3 %
37	INDRE-ET-LOIRE	304	291	78	289	306	-4 %
38	ISÈRE	343	324	479	298	676	-5 %
39	JURA	352	341	433	308	504	-3 %
40	LANDES	301	284	75	280	307	-6 %
41	LOIR-ET-CHER	306	295	108	292	316	-3 %
42	LOIRE	357	347	526	300	493	-3 %
43	HAUTE-LOIRE	417	393	808	340	533	-6 %
44	LOIRE-ATLANTIQUE	299	287	33	285	296	-4 %
45	LOIRET	307	298	120	294	313	-3 %
46	LOT	321	309	267	283	402	-4 %
47	LOT-ET-GARONNE	304	289	108	283	310	-5 %
48	LOZÈRE	454	409	874	303	521	-10 %
49	MAINE-ET-LOIRE	301	290	58	287	309	-4 %
50	MANCHE	302	294	77	288	339	-3 %
51	MARNE	307	298	130	294	325	-3 %
52	HAUTE-MARNE	325	322	302	301	355	-1 %
53	MAYENNE	306	298	128	289	329	-3 %
54	MEURTHE-ET-MOSELLE	324	318	265	310	360	-2 %
55	MEUSE	321	315	233	303	343	-2 %
56	MORBIHAN	301	291	74	286	323	-3 %
57	MOSELLE	320	316	248	284	355	-1 %
58	NIÈVRE	320	314	262	291	386	-2 %

Tableau A3 - Exposition de la population française aux rayonnements cosmiques au sol par département

Département		Dose (µSv/an) Bilan 2014-2019	Dose (µSv/an) Bilan 2020-2024	Altitude moyenne (m)	Dose min (µSv/an)	Dose max (µSv/an)	Delta
59	NORD	300	293	69	289	323	-2 %
60	OISE	304	295	103	291	319	-3 %
61	ORNE	315	310	197	293	334	-2 %
62	PAS-DE-CALAIS	301	293	75	289	315	-3 %
63	PUY-DE-DÔME	357	349	596	285	510	-2 %
64	PYRÉNÉES-ATLANTIQUES	315	295	208	280	417	-6 %
65	HAUTES-PYRÉNÉES	372	332	489	296	519	-11 %
66	PYRÉNÉES-ORIENTALES	324	292	507	276	607	-10 %
67	BAS-RHIN	314	307	215	300	412	-2 %
68	HAUT-RHIN	329	321	324	307	415	-2 %
69	RHÔNE	320	312	360	301	423	-3 %
70	HAUTE-SAÔNE	329	322	273	296	424	-2 %
71	SAÔNE-ET-LOIRE	323	317	281	283	374	-2 %
72	SARTHE	303	294	94	289	320	-3 %
73	SAVOIE	441	352	627	312	807	-20 %
74	HAUTE-SAVOIE	401	363	633	319	514	-10 %
75	PARIS	300	290	34	290	290	-3 %
76	SEINE-MARITIME	303	294	110	288	322	-3 %
77	SEINE-ET-MARNE	304	295	99	291	314	-3 %
78	YVELINES	305	297	105	289	311	-3 %
79	DEUX-SÈVRES	305	295	115	285	340	-3 %
80	SOMME	302	294	84	289	316	-3 %
81	TARN	325	307	304	291	427	-5 %
82	TARN-ET-GARONNE	308	292	160	286	332	-5 %
83	VAR	314	290	294	278	462	-8 %
84	VAUCLUSE	309	292	248	282	465	-5 %
85	VENDÉE	301	289	55	285	314	-4 %
86	VIENNE	306	295	110	289	308	-4 %
87	HAUTE-VIENNE	330	323	334	305	381	-2 %

Tableau A3 - Exposition de la population française aux rayonnements cosmiques au sol par département

Département		Dose (µSv/an) Bilan 2014-2019	Dose (µSv/an) Bilan 2020-2024	Altitude moyenne (m)	Dose min (µSv/an)	Dose max (µSv/an)	Delta
88	VOSGES	351	339	363	297	408	-3 %
89	YONNE	311	301	175	293	352	-3 %
90	TERRITOIRE DE BELFORT	341	337	393	332	483	-1 %
91	ESSONNE	304	294	92	290	309	-3 %
92	HAUTS-DE-SEINE	302	292	69	290	304	-3 %
93	SEINE-SAINT-DENIS	302	292	62	290	301	-3 %
94	VAL-DE-MARNE	302	292	65	290	299	-3 %
95	VAL-D'OISE	302	294	87	290	311	-3 %
2A	CORSE-DU-SUD	325	295	454	274	407	-9 %
2B	HAUTE-CORSE	332	299	469	276	546	-10 %

Références

- Bouville A., Lowder W.M. - Human population exposure to cosmic radiation (1988) Radiation Protection Dosimetry, 24 (1-4), pp. 293 - 299. DOI: 10.1 093/rpd/24.1-4.293
- ICRP, 1994 - Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3)
- ICRP, 2010 - Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2-5)
- ICRP, 2013 - Assessment of Radiation Exposure of Astronauts in Space. ICRP Publication 123. Ann. ICRP 42(4)
- Sato, T. (2015) - Analytical model for estimating terrestrial cosmic ray fluxes nearly anytime and anywhere in the world: Extension of PARMA/EXPACS, PLOS ONE, 10(12): e0144679.
- Sato, T. (2016a) - Analytical Model for Estimating the Zenith Angle Dependence of Terrestrial Cosmic Ray Fluxes, PLOS ONE, 11(8) : e0160390
- Sato, T. (2016b) - Évaluation of World Population-Weighted Effective Dose due to Cosmic Ray Exposure. Sci. Rep. 6, 33932; doi: 10.1038/srep33932
- UNSCEAR - 2008 report – sources and effects of ionizing radiation – volume I: sources
- UNSCEAR - Sources, effects and risks of ionizing radiation. Volume II: Scientific Annex B. UNSCEAR 2024 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations sales publication E.25.IX.2. United Nations, New York, 2025.

ANNEXE II
TRANSPORT AÉRIEN - EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS COSMIQUES

Introduction

Au cours d'un transport aérien, passagers et équipages sont soumis à des rayonnements cosmiques d'origine galactique et extragalactique, ainsi qu'à des gerbes de rayonnements secondaires issus de l'interaction des rayonnements cosmiques avec l'atmosphère terrestre.

Les principaux paramètres influant sur l'exposition des passagers et de l'équipage sont les suivants :

- **La durée de vol :** l'exposition est d'autant plus importante que la durée du vol est longue ;
- **L'altitude :** l'exposition augmente avec l'altitude, la couche d'atmosphère étant plus mince et devenant de ce fait moins protectrice vis-à-vis des rayonnements cosmiques ; ainsi, à l'altitude de croisière des avions de ligne (10 000 m environ), le rayonnement cosmique est plus intense qu'au niveau de la mer et l'exposition y est près de 100 fois plus élevée ;
- **La latitude :** la magnétosphère terrestre constitue une barrière vis-à-vis des rayonnements cosmiques, toutefois moins efficace aux latitudes élevées (à proximité des pôles) qu'au niveau de l'équateur. Ainsi, la route empruntée lors du transport aérien influe sur l'exposition (à une même altitude, l'exposition aux pôles est plus élevée qu'à l'équateur, de l'ordre de 20 %) ;
- **La date de vol :** le champ magnétique solaire étant plus fort et donc plus protecteur en période de forte activité solaire, l'exposition associée à un vol est plus basse en période de forte activité solaire qu'en période de faible activité solaire - le maximum du cycle solaire actuel, d'une durée de 11 ans environ, a été atteint en octobre 2024.

Données d'entrée

Bulletins statistiques annuels de la DGAC

Les bulletins statistiques annuels du trafic aérien commercial de la Direction générale de l'aviation civile (DGAC)[60] permettent d'obtenir des informations, fournies par les transporteurs aériens, sur le trafic commercial provenant des aéroports français. Le nombre total de passagers commerciaux pour l'année concernée est indiqué par liaison aérienne, avec une analyse faite par numéro de vol. En cas de correspondance à l'étranger, les vols ultérieurs ne sont pas comptabilisés.

Dans les bulletins statistiques annuels de la DGAC, les données relatives au trafic intérieur sont détaillées pour les principales liaisons radiales (Paris-province) et transversales (province-province), tandis que les données relatives au trafic international sont détaillées par continent pour les principales liaisons (France métropolitaine-pays étrangers). La part du trafic intérieur ne desservant pas Paris (liaisons transversales) augmente chaque année et représente 42 % du trafic intérieur en 2023, contre 34 % en 2016.

[60] *https://www.ecologie.gouv.fr/statistiques-du-trafic-aerien*

Enquête nationale de la DGAC

La dernière enquête nationale de la DGAC a été réalisée en 2023 auprès de voyageurs dans les aéroports français métropolitains[61].

D'après cette enquête :

- près de 20 % des passagers interrogés voyagent dans un cadre professionnel ;
- au cours des 12 derniers mois, 20 % des personnes interrogées indiquent avoir effectué de 6 à 10 trajets[62], 9 % de 11 à 30 et 2 % plus de 30 trajets ;
- concernant les correspondances, 76 % des passagers interrogés n'avaient pas de correspondance pendant leur voyage, 11 % avaient une correspondance après le vol à venir, 10 % étaient en correspondance entre deux vols et 3 % en correspondance entre deux vols avec, en plus, une correspondance après le second vol. Ces statistiques ont permis d'établir le nombre moyen de 1,12 vols associé à un trajet complet, du point de départ initial à la destination finale ;
- le pourcentage de résidents français parmi les passagers interrogés est de 91 % pour les vols domestiques et de 56 % pour les vols internationaux. Ces proportions sont utilisées dans le présent bilan afin de comptabiliser uniquement les vols se rapportant à la population française.

Statistiques de l'INSEE

Le site internet de l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE)[63] présente les données relatives à la population totale en France métropolitaine au 1er janvier de chaque année. Dans le présent bilan, la population retenue pour une année donnée est prise au 1er janvier de l'année suivante.

Méthodologie

La présente étude porte sur les transports aériens à destination et en provenance d'aéroports situés en France métropolitaine, pour des résidents français.

Les doses moyennes annuelles associées aux différentes liaisons sont pour la plupart issues de données transmises par les compagnies : calculées à l'aide du système SievertPN[64] (Système d'information et d'évaluation par vol de l'exposition au rayonnement cosmique dans les transports aériens), elles s'appuient sur les routes réelles empruntées par les avions et les temps de vol correspondants. Les valeurs manquantes ont été estimées par l'ASNR, également à l'aide de SievertPN.

En raison de la pandémie de Covid-19, la période 2020-2024 a été marquée par une baisse importante du nombre de passagers en 2020 et en 2021 (52 millions de passagers en 2020 et 68 millions en 2021), suivie d'une augmentation dès 2022 (141 millions), pour revenir à un nombre relativement similaire à la période pré-Covid en 2023 (165 millions) et en 2024 (173 millions). Compte tenu de la variation du nombre annuel de passagers sur cette période, le présent bilan a été réalisé à partir des données disponibles année par année (dans le bilan précédent, seules les données de 2016, représentatives de la période 2014-2019, avaient été utilisées).

Estimation du nombre total de vols

En tenant compte des proportions respectivement de 0,91 et 0,56 de résidents français sur les vols domestiques et internationaux (cf. enquête nationale de la DGAC), le nombre total de vols réalisés par la population française métropolitaine est estimé à 33 millions en 2020, 44 millions en 2021, 86 millions en 2022, 100 millions en 2023 et 104 millions en 2024. Dans le bilan précédent, le nombre de vols en 2016 (année considérée comme représentative de la période 2014-2019) avait été estimé à 63 millions.

Ramené à une population métropolitaine de près de 66 millions de Français en moyenne sur la période 2020-2024, le nombre moyen de vols pour la population française métropolitaine sur la période 2020-2024 est estimé à 1,1 par an. En considérant un nombre moyen de 1,1 vols associé à un trajet (en tenant compte des correspondances, cf. enquête nationale de la DGAC), le nombre moyen de trajets aller-retour annuels pour les résidents français est de 0,5 environ (chiffre identique à celui qui figurait dans le bilan EXPOP de 2020).

[61] *https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/DGAC_Enquete_passagers_aeriens_2023_vf.pdf*

[62] *Un trajet correspond à un voyage vers une destination finale et inclut les correspondances éventuelles qui pourraient intervenir.*

[63] *https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/000067670*

[64] *https://www.sievert-system.org*

Répartition entre les destinations (en France et à l'international)

À titre de comparaison, la répartition du trafic intérieur et international au départ de la France métropolitaine est présentée dans le *Tableau A4* pour les années 2020 à 2024 et pour l'année 2016 (bilan précédent 2014-2019).

Hormis une modification des habitudes de transport en 2020 et 2021 au moment de la période de pandémie de Covid-19 (augmentation de la proportion de voyages en France et diminution de celle liée aux voyages à l'international), la répartition du trafic a globalement peu évolué entre les années 2016 et 2024.

Tableau A4 - Répartition du trafic intérieur et international en 2016 et entre 2020 et 2024

Répartition du trafic intérieur et international	2024	2023	2022	2021	2020	2016
France métropolitaine	12 %	13 %	15 %	23 %	22 %	16 %
DROM COM	3 %	3 %	3 %	5 %	5 %	4 %
International	86 %	84 %	81 %	72 %	73 %	80 %
• Europe	65 %	66 %	68 %	70 %	67 %	65 %
• Afrique	16 %	16 %	15 %	16 %	16 %	14 %
• Amériques	11 %	11 %	11 %	9 %	9 %	11 %
• Asie	8 %	7 %	6 %	5 %	8 %	10 %

Estimation des doses pour les différentes liaisons

Comme indiqué précédemment, les doses ont été évaluées pour chacune des années de la période 2020-2024 afin de tenir compte dans la moyenne globale de la variation importante du nombre de vols annuels pendant la période de pandémie de Covid-19, mais également de la diminution globale des doses associées aux différentes liaisons (cf. encadré ci-après).

Évolution des doses associées au transport aérien

La période 2020-2024 a été marquée par une baisse du trafic aérien en raison de la pandémie de Covid-19, particulièrement entre le mois de mars 2020 et la fin de l'année 2021. Cela a contribué à une diminution globale de la dose reçue sur cette période par la population française du fait de l'exposition aux rayonnements cosmiques lors de ses déplacements en avion.

La période 2020-2024 correspondait par ailleurs à une période de forte activité solaire (le maximum du cycle solaire, d'une durée d'environ 11 ans, a été atteint en octobre 2024), avec un champ magnétique solaire plus fort et donc plus protecteur vis-à-vis des rayonnements cosmiques, et ainsi des doses liées à l'exposition aux rayonnements cosmiques plus faibles pendant cette période. Depuis le dernier minimum solaire, atteint en décembre 2019, la dose moyenne estimée sur les vols empruntant les routes les plus exposées aux rayonnements cosmiques (passage à proximité des pôles, vol à des altitudes élevées...) a ainsi diminué de moitié.

En outre, depuis le début de la guerre entre la Russie et l'Ukraine en février 2022, des destinations ont été supprimées et la Russie a fermé son espace aérien aux compagnies de certains pays comme la France. De nouvelles routes de contournement de la Russie, au Sud pour l'aller et au Nord pour le retour, ont ainsi dû être mises en place pour des destinations entre la France et l'Asie, ce qui a entraîné un allongement des durées de ces vols pouvant aller jusqu'à 2 heures et une augmentation des doses associées.

Enfin, depuis juillet 2021, l'outil SievertPN utilisé pour l'évaluation des doses tient compte des facteurs de pondération radiologique recommandés par la CIPR en 2007, en remplacement des facteurs issus de ses recommandations de 1990. Ce changement a eu pour conséquence une diminution de la dose évaluée pouvant aller jusqu'à 30 % pour certaines destinations.

En France métropolitaine

Pour la France métropolitaine, selon les bulletins statistiques de la DGAC, les vols se répartissent entre 25 liaisons radiales (Paris-province) et une centaine de liaisons transversales (province-province). Seules les doses associées aux principales liaisons ont été évaluées dans le présent bilan, soit 20 liaisons radiales et 23 liaisons transversales. Pour les autres liaisons, une moyenne des doses évaluées a été appliquée (pour les liaisons radiales d'une part et pour les liaisons transversales d'autre part).

Les ***Tableaux A5 et A6*** présentent les doses associées aux différentes liaisons radiales et transversales, pour 2016 et pour les années 2020 à 2024.

Tableau A5 - Doses associées aux liaisons radiales (en mSv[65]) en 2016 et entre 2020 et 2024

Liaisons radiales	Dose par vol (mSv)					
	2024	2023	2022	2021	2020	2016
Paris-Toulouse	0,0015	0,0016	0,0018	0,0022	0,0027	0,0015
Paris-Nice	0,0020	0,0023	0,0024	0,0029	0,0034	0,0022
Paris-Marseille	0,0016	0,0017	0,0019	0,0025	0,0028	0,0018
Paris-Bordeaux	0,0013	0,0015	0,0016	0,0021	0,0022	0,0012
Paris-Montpellier	0,0015	0,0016	0,0018	0,0021	0,0023	0,0018
Paris-Biarritz	0,0019	0,0021	0,0023	0,0026	0,0033	0,0033
Paris-Lyon	0,00060	0,00080	0,00080	0,0011	0,0011	0,00070
Paris-Ajaccio	0,0024	0,0026	0,0028	0,0030	0,0029	0,0031
Paris-Brest	0,0012	0,0013	0,0015	0,0020	0,0021	0,0010
Paris-Pau	0,0020	0,0021	0,0024	0,0029	0,0033	0,0028
Paris-Nantes	0,00070	0,00080	0,00080	0,0010	0,0011	0,0013
Paris-Bastia	0,0025	0,0027	0,0028	0,0030	0,0030	0,0038
Paris-Toulon	0,0021	0,0024	0,0026	0,0029	0,0037	0,0018
Paris-Clermont-Ferrand	0,00060	0,00060	0,00070	0,00080	0,00080	0,0010
Paris-Mulhouse/Bâle	0,00080	0,00090	0,00090	0,0010	0,00090	0,0019
Paris-Perpignan	0,0019	0,0021	0,0024	0,0031	0,0033	0,0022
Paris-Rennes	0,00070	0,00070	0,00080	0,00090	0,00090	0,0011
Paris-Tarbes/Lourdes	0,0021	0,0025	0,0020	0,0034	0,0023	0,0025
Paris-Figari	0,0027	0,0032	0,0034	0,0038	0,0044	0,0019
Paris-Calvi	0,0025	0,0027	0,0029	0,0034	0,0041	0,0019
Autres	0,0016	0,0018	0,0019	0,0023	0,0025	0,0019

[65] *1 mSv = 1 000 µSv*

Tableau A6 - Doses associées aux liaisons transversales (en mSv) en 2016 et entre 2020 et 2024

Liaisons transversales	Dose par vol (mSv)					
	2024	2023	2022	2021	2020	2016
Bordeaux-Lyon	0,0012	0,0011	0,0011	0,0012	0,0015	0,0012
Lyon-Nantes	0,0012	0,0013	0,0009	0,0012	0,0015	0,0021
Lyon-Toulouse	0,00060	0,00060	0,00050	0,00050	0,00070	0,00090
Marseille-Nantes	0,0021	0,0023	0,0024	0,0028	0,0030	0,0030
Lille-Nice	0,0022	0,0033	0,0036	0,0040	0,0050	0,0046
Bordeaux-Marseille	0,0012	0,00080	0,0011	0,0010	0,0014	0,0012
Ajaccio-Marseille	0,00040	0,00040	0,00040	0,00040	0,00040	0,00040
Bastia-Marseille	0,00050	0,00040	0,00040	0,00040	0,00040	0,00050
Lille-Marseille	0,0022	0,0030	0,0031	0,0035	0,0043	0,0037
Nantes-Toulouse	0,0006	0,0010	0,0010	0,0013	0,0011	0,0012
Nantes-Nice	0,0023	0,0025	0,0027	0,0032	0,0032	0,0033
Lille-Toulouse	0,0020	0,0023	0,0028	0,0031	0,0038	0,0037
Nice-Mulhouse/Bâle	0,00090	0,0011	0,0012	0,0012	0,0017	0,0023
Lyon-Nice	0,00050	0,00050	0,00040	0,00050	0,00060	0,00060
Bordeaux-Nice	0,0014	0,0020	0,0019	0,0021	0,0034	0,0019
Nice-Toulouse	0,0011	0,0012	0,00060	0,0013	0,0018	0,0032
Bordeaux-Lille	0,0018	0,0021	0,0023	0,0035	0,0034	0,0030
Montpellier-Nantes	0,0013	0,0017	0,002	0,0024	0,0032	0,0021
Brest-Lyon	0,0024	0,0025	0,0026	0,0030	0,0035	0,0033
Brest-Marseille	0,0028	0,0031	0,0034	0,0038	0,0047	0,0041
Strasbourg-Toulouse	0,0017	0,0020	0,0017	0,0025	0,0029	0,0027
Bordeaux-Mulhouse	0,0017	0,0020	0,0022	0,0022	0,0031	0,0023
Biarritz-Lyon	0,0014	0,0015	0,0012	0,0013	0,0017	0,0023
Autres	0,0015	0,0017	0,0017	0,0020	0,0024	0,0023

Métropole-Outremer

Douze liaisons entre la France métropolitaine et les DROM COM sont prises en compte dans les bulletins statistiques de la DGAC. Seules les doses associées aux 7 liaisons principales ont été évaluées dans le présent bilan. Pour les autres, la dose associée à la liaison la plus proche a été appliquée (par exemple, la dose associée à la liaison Paris-Guadeloupe est appliquée à la liaison Bordeaux-Guadeloupe). Pour les liaisons « autres », la moyenne de l'ensemble des doses évaluées a été appliquée.

Le ***Tableau A7*** présente les doses associées aux liaisons métropole-outremer, pour 2016 et pour les années 2020 à 2024.

Tableau A7 *- Doses associées aux liaisons métropole-outremer (en mSv) en 2016 et entre 2020 et 2024*

Liaisons métropole-outremer	Dose par vol (mSv)					
	2024	2023	2022	2021	2020	2016
Paris-Pointe-à-Pitre (Guadeloupe)	0,020	0,024	0,025	0,029	0,032	0,025
Bordeaux-Pointe-à-Pitre (Guadeloupe)	0,020	0,024	0,025	0,029	0,032	0,025
Lyon-Pointe-à-Pitre (Guadeloupe)	0,020	0,024	0,025	0,029	0,032	0,025
Paris-Fort-de-France (Martinique)	0,020	0,023	0,025	0,028	0,031	0,024
Nantes-Fort-de-France (Martinique)	0,020	0,023	0,025	0,028	0,031	0,024
Paris-Saint-Denis de la Réunion (La Réunion)	0,018	0,019	0,020	0,024	0,028	0,025
Marseille-Saint-Denis de la Réunion (La Réunion)	0,017	0,018	0,019	0,020	0,024	0,024
Lyon-Saint-Denis de la Réunion (La Réunion)	0,018	0,019	0,019	0,022	0,026	0,024
Paris-Cayenne (Guyane)	0,019	0,021	0,022	0,023	0,026	0,023
Paris-Papeete (Polynésie française)	0,055	0,064	0,072	0,086	0,12	0,10
Paris-Dzaoudzi (Mayotte)	0,017	0,018	0,018	0,021	0,024	0,025
Marseille-Dzaoudzi (Mayotte)	0,017	0,018	0,018	0,021	0,024	0,025
Autres (< 5 000 passagers)	0,024	0,027	0,029	0,033	0,040	0,036

Métropole-International

Les liaisons entre la France métropolitaine et l'international sont présentées dans les bulletins statistiques de la DGAC par pays de destination et regroupées par continent. Seules les doses associées aux principales liaisons pour chacun des continents ont été évaluées dans le présent bilan, ce qui représente en tout 44 liaisons. Pour les autres liaisons, une moyenne des doses évaluées pour le continent concerné a été appliquée.

Le *Tableau A8* présente les doses associées aux liaisons métropole-international, par pays (les villes utilisées comme référence pour établir ces doses sont indiquées entre parenthèses), pour 2016 et pour les années 2020 à 2024.

Tableau A8 - Doses associées aux liaisons métropole-international (en mSv[65]) en 2016 et entre 2020 et 2024

Liaisons métropole-international	Dose par vol (mSv)					
	2024	2023	2022	2021	2020	2016
EUROPE						
Allemagne (Berlin)	0,0033	0,0040	0,0046	0,0055	0,0057	0,0045
Italie (Rome)	0,0035	0,0038	0,0042	0,0053	0,0064	0,0052
Angleterre (Londres)	0,0005	0,0006	0,00060	0,0008	0,0010	0,0025
Espagne (Madrid) (avec Canaries)	0,0034	0,0038	0,0044	0,0054	0,0066	0,0058
Pays-Bas (Amsterdam)	0,00070	0,00090	0,0011	0,0012	0,0013	0,0021
Portugal (Lisbonne)	0,0052	0,0058	0,0062	0,0073	0,0090	0,0074
Suisse (Genève)	0,0008	0,0009	0,0011	0,0014	0,0015	0,0012
Turquie (Istanbul)	0,0082	0,0086	0,0090	0,011	0,014	0,012
Grèce (Athènes)	0,0069	0,0078	0,0083	0,0096	0,013	0,012
Irlande (Dublin)	0,0032	0,0039	0,0043	0,0051	0,0068	0,0064
Danemark (Copenhague)	0,0039	0,0046	0,0049	0,0066	0,0082	0,0075
Autriche (Vienne)	0,0036	0,0041	0,0045	0,0054	0,0073	0,0059
Pologne (Varsovie)	0,0050	0,0059	0,0067	0,0083	0,0107	0,0090
Fédération de Russie (Moscou)	0,0042	0,0051	0,017	0,019	0,021	0,021
Suède	0,0066	0,0078	0,0091	0,012	0,014	0,0073
République Tchèque	0,0031	0,0035	0,0039	0,0045	0,0057	0,0073
Autres	0,0039	0,0044	0,0056	0,0067	0,0082	0,0073
AFRIQUE						
Algérie (Alger)	0,0042	0,0047	0,0051	0,0069	0,008	0,0062
Maroc (Marrakech)	0,0066	0,0073	0,0077	0,0088	0,011	0,0089
Tunisie (Tunis)	0,0047	0,0052	0,0054	0,0065	0,008	0,0068

[65] *1 mSv = 1 000 µSv*

Tableau A8 - Doses associées aux liaisons métropole-international (en mSv) en 2016 et entre 2020 et 2024

Liaisons métropole-international	Dose par vol (mSv)					
	2024	2023	2022	2021	2020	2016
AFRIQUE						
Égypte (Le Caire)	0,010	0,012	0,011	0,014	0,017	0,014
Sénégal (Dakar)	0,0098	0,011	0,011	0,014	0,016	0,015
Maurice (Maurice)	0,0206	0,019	0,020	0,021	0,026	0,025
Afrique du Sud (Le Cap)	0,023	0,023	0,023	0,025	0,033	0,034
Cameroun	0,013	0,013	0,013	0,014	0,017	0,0092
Nigéria	0,012	0,013	0,013	0,016	0,018	0,0092
Autres	0,012	0,012	0,012	0,014	0,017	0,014
AMÉRIQUES						
Brésil (Rio)	0,018	0,020	0,020	0,027	0,032	0,030
Canada (Ottawa)	0,030	0,036	0,044	0,059	0,075	0,076
USA (San Francisco)	0,042	0,05	0,059	0,070	0,089	0,069
Mexique (Mexico)	0,041	0,042	0,047	0,057	0,075	0,066
Cuba	0,028	0,032	0,035	0,044	0,048	0,067
République Dominicaine	0,031	0,031	0,028	0,029	0,035	0,067
Autres	0,032	0,035	0,039	0,048	0,059	0,063
ASIE						
Chine (Pékin)	0,030	0,035	0,051	0,054	0,070	0,043
Émirats arabes unis (Dubaï)	0,014	0,015	0,016	0,019	0,024	0,021
Hong Kong (Hong Kong)	0,029	0,027	0,023	0,043	0,059	0,053
Inde (New Delhi)	0,022	0,023	0,025	0,031	0,034	0,031
Israël (Tel Aviv)	0,011	0,013	0,013	0,015	0,018	0,015
Japon (Tokyo)	0,032	0,036	0,041	0,066	0,080	0,056
Liban (Beyrouth)	0,011	0,012	0,013	0,015	0,018	0,015
Singapour (Singapour)	0,022	0,022	0,025	0,036	0,040	0,038
Thaïlande (Bangkok)	0,021	0,023	0,021	0,031	0,038	0,029
Viêt Nam (Hanoï)	0,023	0,023	0,021	0,035	0,038	0,038
Corée du Sud (Séoul)	0,029	0,033	0,039	0,060	0,078	0,050
Arabie Saoudite	0,012	0,020	0,014	0,016	0,024	0,034
Jordanie	0,014	0,014	0,014	0,015	0,017	0,034
Autres	0,021	0,023	0,024	0,034	0,041	0,035

Les données correspondant à l'Océanie ne figurent pas dans le ***Tableau A8***, les liaisons entre la France métropolitaine et l'Océanie n'étant pour la plupart pas directes : dans ce cas, le premier vol métropole - international est comptabilisé[66], mais pas les suivants, le départ du second vol se faisant alors en dehors d'un aéroport français.

Résultats

Connaissant les doses $E_{vol}(i, j)$ associées à chacune des liaisons i pour chaque année j, il est possible d'évaluer la dose moyenne individuelle annuelle sur la période 2020-2024 pour la population française à partir du nombre de passagers ayant emprunté la liaison pendant cette période et des coefficients 0,91 et 0,56 correspondant respectivement à la part des résidents français dans les vols domestiques et internationaux :

$$E_{moyen}(population) = \sum_{années\ j} \sum_{liaison\ i} \frac{E_{vol}(i,j) \times Nombre\ passagers\ (i,j) \times Part_{français}(i)}{5 \times Population\ France\ métropolitaine}$$

Les résultats obtenus sont les suivants :

- La dose moyenne annuelle estimée pour une personne de la population française sur la période 2020-2024 est de 10 µSv (soit 0,01 mSv), basée sur une dose moyenne par vol évaluée à 9,2 µSv et une estimation de 1,1 vol/an en moyenne pour la population française. La dose moyenne calculée était un peu plus élevée sur la période 2014-2019 (14 µSv), en raison d'une baisse globale des doses par vol liée notamment au cycle solaire et à la mise à jour de l'outil SievertPN, et d'une baisse du trafic global pendant la période de pandémie de Covid-19 (cf. encadré ci-avant).

Des calculs spécifiques ont été réalisés dans le présent bilan pour des voyageurs fréquents réalisant 10 et 30 vols aller-retour annuellement :

- Si on considère un voyageur fréquent réalisant 10 vols aller-retour annuellement, la dose moyenne annuelle estimée sur la période 2020-2024 est de 184 µSv.

- Pour un voyageur fréquent réalisant 30 vols aller-retour annuels, la dose moyenne annuelle estimée sur la période 2020-2024 est de 553 µSv par an.

[66] *Avertissement de la DGAC sur les limites des données communiquées dans les bulletins statistiques annuels.*

ANNEXE III
EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS TELLURIQUES

Introduction

Les radionucléides présents naturellement dans le sol émettent des rayonnements susceptibles d'exposer les personnes à la radioactivité. Cette source d'exposition externe peut se manifester à la fois à l'extérieur, depuis le sol, et à l'intérieur des habitations, la plupart des matériaux de construction (bétons, briques, remblais...) contenant eux-mêmes des radionucléides naturels susceptibles de produire ces rayonnements. Dans le cadre de ce rapport, on entend par « exposition aux rayonnements telluriques » la somme des expositions externes liées aux radionucléides terrestres à l'extérieur et des expositions se produisant à l'intérieur des habitations. La manière de calculer les deux composantes de cette exposition est différente et détaillée ci-après.

Les principaux radionucléides naturels présents dans le sol et à l'origine d'une exposition externe sont l'uranium-238 (^{238}U), le thorium-232 (^{232}Th), l'uranium-235 (^{235}U) et leurs descendants, ainsi que le potassium-40 (^{40}K).

Données d'entrée

Résultats dosimétriques

La base de données utilisée provient du suivi de l'exposition au rayonnement X des dentistes et vétérinaires à l'aide de dosimètres radio photo luminescents (RPL) pour les années 2011 et 2012. Elle est constituée de mesures du débit de dose de rayonnement gamma, enregistrées par des dosimètres témoins sur 17 404 sites de mesure répartis sur le territoire et géolocalisés précisément. Le choix de cibler les établissements dentaires et vétérinaires s'explique par la bonne couverture du territoire français et la confiance accordée aux mesures. Ce sont les mesures du débit de dose de rayonnement gamma enregistrées par ces dosimètres témoins qui sont exploitées (Warnery et al., 2015).

Données relatives à la population française

La répartition de la population dans les différentes communes de France métropolitaine, les communes et leurs coordonnées (contour, centre) proviennent de l'API Geo[67] qui s'appuie sur le Code officiel géographique (COG) de l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE) du 1er janvier 2024 au moment où les données ont été extraites[68].

Méthodologie

La méthode de calcul de l'exposition aux rayonnements telluriques en France métropolitaine est identique à celle utilisée dans le précédent rapport EXPOP, hormis pour la mise à jour du découpage communal au 1er janvier 2024. Elle s'appuie sur les résultats dosimétriques du suivi radiologique des dentistes et vétérinaires, et sur le croisement de ceux-ci avec le classement des formations géologiques en fonction de leur teneur en uranium établi pour construire la cartographie du potentiel uranium, l'intensité du rayonnement d'origine tellurique en France étant liée en grande partie à la teneur en uranium (et ses descendants) dans les sols.

Un traitement géostatistique permet de fournir une cartographie, à l'échelle du territoire, des débits de dose gamma telluriques à l'intérieur de l'habitat. Le débit de dose à l'extérieur est ensuite évalué en se basant sur une corrélation entre les deux situations d'exposition.

[67] *https://geo.api.gouv.fr/decoupage-administratif/communes*

[68] *https://www.insee.fr/fr/information/3720946*

Évaluation du débit de dose à l'intérieur de l'habitat

Par site de mesure

L'estimation du débit de dose gamma à l'intérieur de l'habitat est basée sur les résultats dosimétriques du suivi radiologique des dentistes et vétérinaires (cf. paragraphe 3.2.1). Le rayonnement gamma mesuré par les dosimètres RPL peut se décomposer comme la somme d'un rayonnement cosmique et d'un rayonnement tellurique. La composante neutronique du rayonnement cosmique n'étant pas détectée, la composante ionisante du rayonnement cosmique est déterminée par calcul pour pouvoir ensuite la soustraire à la valeur mesurée et obtenir la valeur du débit de dose gamma d'origine tellurique.

Ce calcul est réalisé en utilisant, comme dans la précédente édition, l'expression analytique suivante issue de la publication UNSCEAR de 2008 :

$$\dot{E}_i(z)=E_i(0)\,[0{,}21e^{-1{,}649z}+0{,}79e^{0{,}4528z}]$$

Avec :

- $\dot{E}_i(z)$ = le débit de dose (en nSv/h) lié à la composante ionisante du rayonnement cosmique à une altitude z et une latitude de 46°
- $\dot{E}_i(0)$ = 32 nSv/h
- z = l'altitude en kilomètres.

L'altitude prise en compte dans les calculs correspond à celle du site de mesure. De même que dans la précédente édition, un facteur de protection de l'habitat vis-à-vis des rayonnements de 0,8[69] est appliqué pour déterminer le débit de dose correspondant à l'intérieur de l'habitat par site de mesure.

Par commune

Un modèle géostatistique de cokrigeage colocalisé permet d'estimer le débit de dose gamma tellurique dans l'habitat à partir des valeurs calculées par site de mesure (cf. paragraphe précédent) et de la cartographie du potentiel uranium des formations géologiques.

Cette cartographie a été réalisée en 2017 et a conduit à classer les formations géologiques en fonction de leur teneur en uranium. En résulte une carte du potentiel uranium en 5 classes des formations géologiques de France à l'échelle 1 : 1 000 000 (Ielsch et al., 2017).

Le modèle de cokrigeage conduit à des estimations du débit de dose gamma tellurique dans l'habitat (nSv/h) sur une grille de 1×1 km (Warnery et al., 2015). La liste des communes en vigueur au 01/01/2024 a été prise en compte. Entre 2020 et 2024, 73 communes ont fusionné. Pour les nouvelles communes créées par ces fusions, l'estimation du rayonnement gamma tellurique moyen correspond à la moyenne des valeurs calculées en 2024, pondérée par le nombre d'habitants de chacune des anciennes communes. Il y a eu également 3 scissions de communes, entraînant la création de 7 nouvelles communes. Pour celles-ci, l'estimation du gamma tellurique moyen de l'ancienne commune « mère » a été conservée pour les différentes communes « filles ».

Évaluation du débit de dose à l'extérieur de l'habitat

De même que dans la précédente édition, une relation simplifiée a été retenue dans le cadre de cette étude pour évaluer le débit de dose gamma d'origine tellurique à l'extérieur de l'habitat en fonction des résultats obtenus précédemment pour le débit de dose à l'intérieur de l'habitat. L'expression analytique utilisée est la suivante :

$$\dot{E}_{extérieur}(C_i) = 0{,}698 \times \dot{E}_{intérieur}(C_i) + 10{,}9$$

Avec :

- $\dot{E}_{extérieur}(C_i)$ = débit de dose gamma d'origine tellurique à l'extérieur de l'habitat (nSv/h) pour la commune C_i ;
- $\dot{E}_{intérieur}(C_i)$ = débit de dose gamma d'origine tellurique à l'intérieur de l'habitat (nSv/h) pour la commune C_i.

L'exploitation des résultats des campagnes de mesures passées a mis en évidence l'existence d'une bonne corrélation entre les moyennes des débits de dose gamma d'origine tellurique obtenus à l'intérieur et à l'extérieur de l'habitat.

[69] *Comme dans le précédent rapport EXPOP, la contribution du rayonnement cosmique à la mesure des dosimètres RPL est calculée à l'aide d'une équation approximant les simulations plus précises de la section 3.1.1 et d'un facteur de protection par le bâti de 0,8 au lieu de 0,9 utilisé en section 3.1.1. Cette différence d'hypothèse sur le facteur de protection n'induit qu'une variation modeste de l'ordre de + 5 % de la dose tellurique estimée ici par rapport à la valeur qui serait obtenue en appliquant un facteur de protection de 0,9.*

Cette expression analytique reflète le double rôle joué par les matériaux de construction, qui, d'une part, atténuent[70] fortement les rayonnements telluriques provenant des sols et, d'autre part, contribuent à la majeure partie du débit de dose à l'intérieur des bâtiments du fait de l'émission des rayonnements gamma par les radionucléides naturels qui les composent. Ainsi, dans la majorité des cas, le débit de dose à l'intérieur de l'habitat, quel que soit l'étage, peut être relié au débit de dose extérieur : les matériaux utilisés pour une construction proviennent en général de l'environnement proche, avec des teneurs en ^{238}U, ^{232}Th, ^{235}U et ^{40}K similaires à celles des sols environnants. Les résultats des campagnes de mesures en France montrent que les débits de dose sont très proches dans des maisons individuelles et dans des habitats collectifs, avec des valeurs moyennes respectives de 55 nSv/h et de 53 nSv/h.

Évaluation de la dose

Pour chaque commune de France métropolitaine, l'exposition (dose efficace) associée aux rayonnements gamma d'origine tellurique a été calculée en tenant compte d'un budget temps à l'intérieur de l'habitat.

Les budgets temps retenus, basés sur la publication 66 de la CIPR (ICRP, 1994), sont présentés dans le ***Tableau A9***.

Tableau A9 *- Budgets temps retenus pour les calculs*

	Temps moyen journalier		Moyenne annuelle
Intérieur de l'habitat	22 $h.j^{-1}$	Soit 92 % du temps	8 030 h
Extérieur de l'habitat	2 $h.j^{-1}$	Soit 8 % du temps	730 h

La dose efficace individuelle annuelle pour une commune C_i est donnée par :

$$E_{moyen}(C_i) = E_{intérieur\ moyen}(C_i) + E_{extérieur\ moyen}(C_i)$$

Avec :

- $E_{intérieur\ moyen}(C_i) = \dot{E}_{intérieur}(C_i) \times 8\,030\,h$
- $E_{extérieur\ moyen}(C_i) = \dot{E}_{extérieur}(C_i) \times 730\,h$

La dose efficace individuelle moyenne dans un département est calculée en effectuant une pondération des doses par la population de chaque commune :

$$E_{moyen}(D) = \frac{\sum_{Ci\ de\ D} E_{moyen}(C_i) \times P(C_i)}{\sum_{Ci\ de\ D} [P(C_i)]}$$

Avec :

- $E_{moyen}(D)$ (mSv/an) = dose efficace individuelle moyenne du département D ;
- $P(C_i)$ = population de la commune C_i.

De la même façon, la dose efficace individuelle moyenne en France est calculée en sommant les doses de toutes les communes de France métropolitaine, pondérées par leurs populations respectives.

[70] *Une simulation avec le code de calcul Monte-Carlo N-Particle (MCNP) montre que le facteur d'atténuation des rayonnements telluriques par une épaisseur de béton de 15 cm est de l'ordre de 5 à 6, suivant la nature des sols.*

Résultats

Les résultats obtenus à l'issue des calculs sont les suivants :

- Le débit de dose gamma tellurique moyen à l'intérieur de l'habitat pondéré par la population communale est de 72 nSv/h ;
- Les doses individuelles moyennes associées aux communes françaises se situent dans l'intervalle [0,3 mSv/an ; 2,0 mSv/an] ;
- La dose individuelle moyenne en France est égale à 0,62 mSv/an ;
- La répartition de l'exposition annuelle de la population dans son ensemble, détaillée ***Figure A2***, est la suivante : 95 % de la population reçoit une dose comprise entre 0,38 mSv/an (5e percentile) et 1,1 mSv/an (95e percentile).

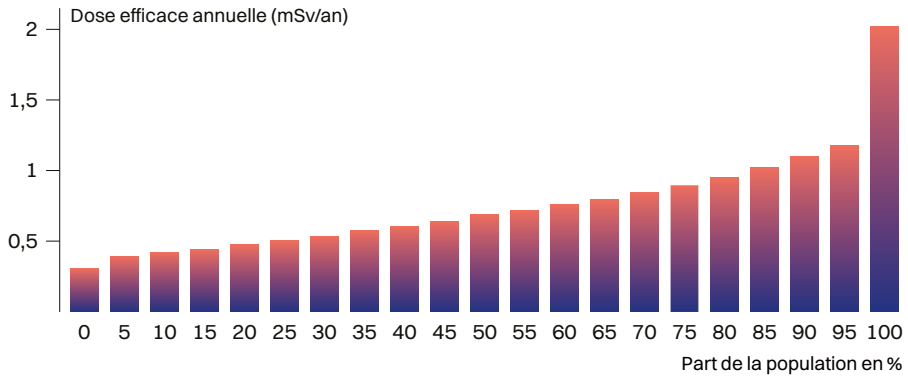


Figure A2 *- Répartition de l'exposition de la population liée aux rayonnements telluriques*

La dose moyenne par département est présentée dans le ***Tableau A10***.

Tableau A10 *- Exposition de la population française aux rayonnements telluriques par département*

Département		Dose (mSv/an)	Département		Dose (mSv/an)
1	Ain	0,51	18	Cher	0,80
2	Aisne	0,46	19	Corrèze	0,88
3	Allier	1,2	21	Côte-d'Or	0,54
4	Alpes-de-Haute-Provence	0,48	22	Côtes-d'Armor	0,76
5	Hautes-Alpes	0,55	23	Creuse	1,2
6	Alpes-Maritimes	0,45	24	Dordogne	0,63
7	Ardèche	0,77	25	Doubs	0,63
8	Ardennes	0,50	26	Drôme	0,57
9	Ariège	0,88	27	Eure	0,42
10	Aube	0,42	28	Eure-et-Loir	0,40
11	Aude	0,67	29	Finistère	1,1
12	Aveyron	0,73	2A	Corse-du-Sud	1,5
13	Bouches-du-Rhône	0,47	2B	Haute-Corse	1,2
14	Calvados	0,54	30	Gard	0,61
15	Cantal	0,95	31	Haute-Garonne	0,88
16	Charente	0,61	32	Gers	0,73
17	Charente-Maritime	0,56	33	Gironde	0,59

Département		Dose (mSv/an)
34	Hérault	0,65
35	Ille-et-Vilaine	0,68
36	Indre	0,71
37	Indre-et-Loire	0,66
38	Isère	0,52
39	Jura	0,45
40	Landes	0,53
41	Loir-et-Cher	0,65
42	Loire	1,1
43	Haute-Loire	1,0
44	Loire-Atlantique	1,0
45	Loiret	0,69
46	Lot	0,72
47	Lot-et-Garonne	0,68
48	Lozère	0,91
49	Maine-et-Loire	0,73
50	Manche	0,61
51	Marne	0,40
52	Haute-Marne	0,51
53	Mayenne	0,64
54	Meurthe-et-Moselle	0,83
55	Meuse	0,53
56	Morbihan	1,0
57	Moselle	0,88
58	Nièvre	0,86
59	Nord	0,58
60	Oise	0,40
61	Orne	0,55
62	Pas-de-Calais	0,52
63	Puy-de-Dôme	0,97
64	Pyrénées-Atlantiques	0,58

Département		Dose (mSv/an)
65	Hautes-Pyrénées	0,84
66	Pyrénées-Orientales	0,88
67	Bas-Rhin	0,74
68	Haut-Rhin	0,82
69	Rhône	0,68
70	Haute-Saône	0,87
71	Saône-et-Loire	0,83
72	Sarthe	0,44
73	Savoie	0,59
74	Haute-Savoie	0,54
75	Paris	0,42
76	Seine-Maritime	0,40
77	Seine-et-Marne	0,38
78	Yvelines	0,37
79	Deux-Sèvres	0,72
80	Somme	0,49
81	Tarn	0,78
82	Tarn-et-Garonne	0,77
83	Var	0,54
84	Vaucluse	0,49
85	Vendée	0,86
86	Vienne	0,68
87	Haute-Vienne	1,1
88	Vosges	1,0
89	Yonne	0,56
90	Territoire de Belfort	1,0
91	Essonne	0,44
92	Hauts-de-Seine	0,37
93	Seine-Saint-Denis	0,38
94	Val-de-Marne	0,39
95	Val-d'Oise	0,38

Références

- Ielsch, G., Cushing M.E., Combes Ph., Cuney M., 2010. Mapping of the geogenic radon potential in France to improve radon risk management: methodology and first application to region Bourgogne. Journal of Environmental Radioactivity 101 (2010) 813-820
- Ielsch G., Cuney M., Buscail F., Rossi F, Leon A., Cushing. M.E., 2017. Estimation and mapping of uranium content of geological units in France. Environmental Radioactivity 166, 210-219
- Warnery E., Ielsch G., Lajaunie C., Cale E., Wackernagel H., Debayle C., Guillevic J., 2015. Indoor terrestrial gamma dose rate mapping in France: a case study using two different geostatistical models. Journal of Environmental Radioactivity 139 (2015) 140-148
- ICRP, 1994. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3)
- UNSCEAR 2008 report – Sources and effects of ionizing radiation – volume I: sources.

ANNEXE IV
EXPOSITION LIÉE A L'INCORPORATION DE RADIONUCLÉIDES D'ORIGINE NATURELLE

Introduction

Les denrées alimentaires, les feuilles de tabac et les eaux de boisson contiennent naturellement des radionucléides qui trouvent leur origine dans les roches et les sols depuis la formation de la Terre (radionucléides telluriques) ou sont produits en permanence dans les hautes couches de l'atmosphère sous l'effet du rayonnement cosmique (radionucléides cosmogéniques).

Les principaux radionucléides telluriques que sont le potassium-40 (^{40}K), le rubidium-87 (^{87}Rb) et les descendants des chaînes de désintégration de l'uranium-238 (^{238}U), du thorium-232 (^{232}Th) et de l'uranium-235 (^{235}U) (dites « chaînes U-Th ») entrent dans la chaîne alimentaire terrestre en étant absorbés par les racines des végétaux ou par les mécanismes de remise en suspension et de dépôt foliaire de particules de sols.

Certains descendants des chaînes U-Th sont également transférés par voie foliaire. En effet, chacune des trois chaînes de désintégration donne naissance à un gaz radioactif, le radon, qui s'échappe du sol dans l'air et s'y désintègre en donnant naissance à des radionucléides qui se fixent alors sur des particules atmosphériques et se déposent sur les plantes. C'est le cas notamment du polonium-210 (^{210}Po) et du plomb-210 (^{210}Pb), descendants de l'^{238}U.

Les principaux radionucléides cosmogéniques que sont le carbone-14 (^{14}C), le béryllium-7 (^{7}Be), le sodium-22 (^{22}Na) et le tritium (^{3}H) sont transférés principalement par voie aérienne aux feuilles des végétaux.

Tous ces radionucléides naturels sont transférés aux animaux et aux denrées d'origine animale par leur alimentation.

Pour les mêmes raisons que celles exposées ci-dessus, les feuilles de tabac contiennent des radionucléides naturels. La combustion du tabac les libère, en particulier le ^{210}Pb et le ^{210}Po, facilitant leur inhalation par le fumeur. Le tabagisme constitue ainsi une voie additionnelle d'exposition aux radionucléides d'origine naturelle.

En milieu marin, les radionucléides naturels proviennent du drainage des sols continentaux, du dégazage du radon dans l'eau ainsi que du dépôt atmosphérique à la surface de l'eau des radionucléides cosmogéniques et des descendants du radon émis sur les terres. Le ^{210}Po, présent dans l'eau, se concentre particulièrement dans le plancton et, par conséquent, dans les organismes qui s'en nourrissent : les coquillages, les crustacés et certains petits poissons. Compte-tenu de la radiotoxicité de ce radionucléide, la quantité consommée de ces denrées est un facteur important pour la dose liée à l'ingestion de radionucléides naturels et sa variabilité.

Méthodologie

Pour tous les radionucléides naturels, à l'exception notable du potassium-40 et du carbone-14 qui sont maintenus à des niveau constants dans l'organisme humain, les doses liées à leur incorporation *via* l'alimentation dépendent de leur teneur dans les denrées (activités massiques exprimées en Bq/kg), des quantités de ces denrées ingérées (kg/an), ainsi que d'un coefficient de dose par unité d'incorporation par ingestion (Sv/Bq ingéré).

La méthodologie utilisée pour estimer cette exposition est présentée dans un rapport de l'IRSN (IRSN, 2014) ainsi que dans trois publications (Renaud et al, 2015-1, 2015-2 et 2015-3). Toutefois, les quantités de chaque type de denrées d'origine terrestre annuellement consommées ont été réestimées récemment sur la base d'un plus grand nombre d'enquêtes alimentaires (Renaud et al., 2024). Par ailleurs, par rapport à la précédente édition de ce rapport, la décroissance radioactive du polonium-210 durant le délai entre la production de la denrée et sa consommation est désormais prise en compte (Johansen et al, 2023).

Les éléments relatifs à la consommation d'eau d'adduction (eau du robinet) ont été actualisés sur la base des résultats acquis entre 2010 et 2019 par les Agences régionales de santé (ARS). Enfin, l'exposition liée à l'incorporation de radionucléides naturels par la consommation de cigarettes a été revue sur la base du nombre moyen de cigarettes consommées annuellement en France par habitant et de la dose liée à la consommation d'une cigarette. Les estimations des valeurs de ces principaux paramètres sont détaillées dans ce qui suit.

Résultats

Dose efficace due au potassium-40

Le potassium est régulé par l'organisme (kaliémie) : si l'apport alimentaire est suffisant, l'homéostasie maintient sa teneur dans l'organisme humain autour de 0,18 % de la masse corporelle. Le rapport de masse $^{40}K/K$ étant de $1{,}2.10^{-4}$ et l'activité spécifique de ^{40}K étant de $2{,}6.10^{8}$ Bq/kg de potassium, l'activité corporelle en ^{40}K d'un adulte est constante (de l'ordre de 4 000 à 5 000 Bq/personne) et conduit à une dose efficace de l'ordre de 0,17 mSv/an pour un adulte (Source UNSCEAR).

Doses efficaces dues aux radionucléides cosmogéniques (tritium, carbone-14, béryllium-7, sodium-22)

La teneur en carbone est également peu variable d'une personne à l'autre. Pour une activité de carbone-14 par unité de masse de carbone qui était à cette époque autour de 240 Bq/kg de carbone, la dose correspondante due au ^{14}C a été estimée en 2007 à 12 µSv/an (Roussel-Debet 2007). La diminution de cette activité vers la valeur de 221 Bq/kg de carbone sur la période 2020-2024 (IRSN, 2024) ne modifie pas significativement cette estimation (UNSCEAR, 2024).

Par ailleurs, les doses relativement faibles dues aux ^{7}Be, ^{22}Na et ^{3}H ont été estimées par l'UNSCEAR (UNSCEAR, 2024) à, respectivement, 0,028 µSv/an, 0,016 µSv/an et 0,009 µSv/an.

La dose par ingestion liée à l'ensemble des radionucléides cosmogéniques est ainsi de l'ordre 12 µSv/an, essentiellement due au ^{14}C.

Dose efficace due au rubidium-87

La dose liée au ^{87}Rb a été estimée par l'UNSCEAR (UNSCEAR, 1982) à 6 µSv/an.

Doses efficaces dues aux chaînes U-Th dans les denrées alimentaires solides

Ces doses ont été estimées sur la base des activités des radionucléides dans les différentes catégories de denrées mesurées par l'ASNR ou issues de la bibliographie et des quantités annuellement consommées de chacune de ces catégories et issues des enquêtes alimentaires menées en France.

Activités des radionucléides des chaînes U-Th dans les denrées alimentaires solides

Les activités massiques des principaux radionucléides des chaînes de désintégration de l'uranium et du thorium utilisées dans la présente étude sont en partie issues de résultats de mesures acquis par l'ASNR. Ainsi, les valeurs indiquées sur fond bleu dans le ***Tableau A11*** sont issues des données françaises jugées suffisamment nombreuses et dont on a montré qu'elles étaient en bon accord avec la bibliographie internationale (il est important de noter qu'elles se rapportent aux quatre principaux radionucléides contributeurs aux doses par ingestion). Lorsqu'aucune donnée française n'était disponible, les données répertoriées dans la bibliographie internationale ainsi que les valeurs de référence retenues par l'UNSCEAR (2008) ont été examinées pour définir celles à prendre en compte. Elles sont représentées sur fond rose dans le ***Tableau A11***.

Tableau A11 *- Activités massiques retenues à l'issue de cette étude pour évaluer les doses par ingestion de radionucléides naturels en France (mBq/kg frais ; (IRSN, 2014))*

	Activité massique (mBq/kg frais)									
	^{234}U	^{238}U	^{230}Th	^{226}Ra	^{210}Pb	^{210}Po	^{232}Th	^{228}Ra	^{228}Th	^{235}U
Produits laitiers	5	5	0,5	10	30	30	0,3	10	1	0,25
Viandes	2	2	2	50	100	100	2	50	4	0,1
Céréales	20	20	10	180	410	410	3	180	12	1
Légumes feuilles	20	20	20	90	340	340	15	90	60	1
Autres légumes et fruits	3	3	0,5	50	120	120	0,5	60	2	0,1
Poissons de mer	30	30	10	160	550	2000	10	160	100	1,5
Fruits de mer*	30	30	10	400	550	22500	10	400	100	1,5

Valeur issue de données françaises (ASNR)

Valeur issue de la bibliographie dont UNSCEAR

**Coquillages et crustacés*

Les activités massiques les plus élevées sont celles du plomb-210 et du polonium-210 (notamment dans les denrées marines pour le polonium-210) et, dans une moindre mesure, celles du radium-226 (^{226}Ra) et du radium-228 (^{228}Ra).

Rations alimentaires

Les résultats de 21 enquêtes alimentaires ont été récemment comparés en termes de quantités ingérées par des adultes pour différentes catégories de denrées d'origine terrestre issues de l'agriculture et de l'élevage (Renaud et al., 2024). Il s'agit des 4 enquêtes nationales menées par l'INSEE en 1991 et l'AFSSA (aujourd'hui ANSES)[72] entre 1999 et 2015 (INCa1, INCa2 et INCa3), ainsi que 17 enquêtes locales réalisées entre 1977 et 2020 autour d'installations nucléaires (dont 7 réalisées par l'IRSN de 2004 à 2020).

Cette étude comparative a montré une assez bonne concordance globale des résultats de ces enquêtes alimentaires qui, par ailleurs, comportent toutes des biais ou des approximations, liés soit aux protocoles d'enquête, soit à leur exploitation à des fins de calculs de doses. On note par ailleurs que des variations des quantités consommées (du simple au double, voire au triple) sont observées pour l'une ou l'autres des différentes catégories de denrées issues de certaines enquêtes. Effectuer une moyenne des quantités consommées pour chaque type de denrées à partir des résultats de l'ensemble de ces enquêtes permet donc de limiter toute surestimation ou sous-estimation importante. Ces enquêtes, menées sur une grande plage temporelle (de 1977 à 2020), témoignent également de tendances d'évolution, en particulier une baisse de la consommation de produits laitiers et des viandes au profit d'une augmentation de la consommation de légumes. Ces tendances ne sont cependant pas suffisamment significatives pour être prises en compte.

Cette récente étude comparative des résultats des différentes enquêtes alimentaires menée par l'ASNR ne traitait pas des denrées d'origine marine. La plupart de ces enquêtes, notamment celles effectuées autours des sites nucléaires continentaux, fournissent en effet peu d'éléments sur ces denrées et le plus souvent ne permettent pas de discriminer la consommation de poissons de celle des fruits de mer (coquillages et crustacés). Une enquête nommée Calipso[73], consacrée spécifiquement à la consommation de produits de la mer, a cependant été menée de 2003 à 2006 auprès des habitants des communes du Havre, de Toulon, de La Rochelle et de Lorient, par l'AFSSA et l'Institut national de la recherche agronomique (INRA[74]) (AFSSA-INRA, 2006).

Tous les résultats exploitables concernant les fruits de mer issus de l'ensemble des enquêtes alimentaires étudiées sont synthétisés dans la ***Figure A3***.

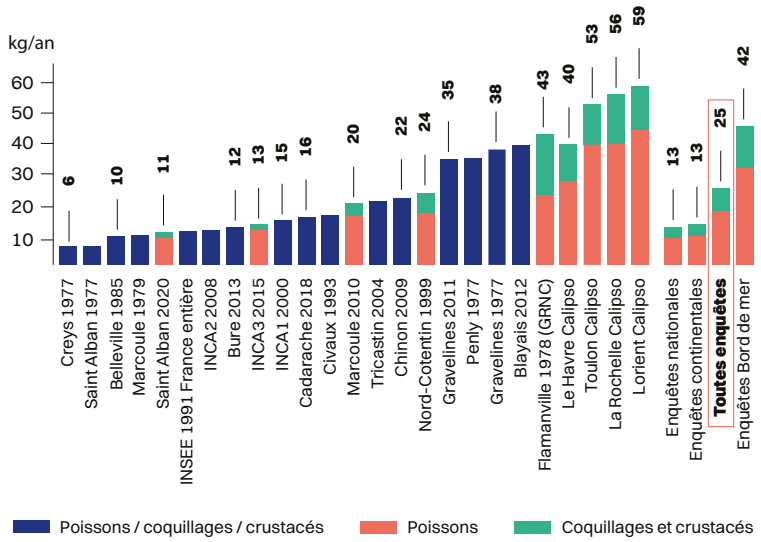


Figure A3 *- Quantités de denrées marines consommées annuellement (en kg/an) issues des différentes enquêtes alimentaires utilisées dans la présente étude.*

[72] *Depuis juillet 2010, l'AFSSA a fusionné avec l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail pour former l'agence nationale de sécurité sanitaire (ANSES).*

[73] *Étude des consommations alimentaires de produits de la mer et imprégnation aux éléments traces, polluants et oméga 3.*

[74] *L'INRA a fusionné le 1er janvier 2020 avec l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (IRSTEA) pour former l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE)*

Cette figure montre qu'avec une moyenne de 42 kg par an (115 g/j) les personnes habitant en bord de mer (Nord-Cotentin, Gravelines, Penly, Blayais, Flamanville, Le Havre, Toulon, La Rochelle et Lorient) consomment plus de denrées marines (poissons et fruits de mer) que celles qui habitent loin de la mer (sites continentaux), avec une moyenne de seulement 13 kg/an (36 g/j). La moyenne issue des enquêtes nationales est identique à celle des sites continentaux.

Seules 9 enquêtes permettent de discriminer la consommation de poissons de celle des fruits de mer[75] (denrées marines autres que les poissons); elles montrent que la consommation de poissons représente autour de 70 % de la consommation totale de denrées marines. La consommation annuelle de poissons retenue pour la présente étude est de 17,5 kg/an (arrondie à 18 kg/an), ce qui correspond à la moyenne issue des différentes enquêtes (encadré en rouge sur la ***Figure A3***).

Concernant la consommation de fruits de mer, compte tenu, d'une part de l'importance potentielle qu'ils revêtent du fait de leur teneur élevée en polonium-210 (radionucléide parmi les plus radiotoxiques) et, d'autre part, de la probable forte variabilité des habitudes de consommation les concernant, quatre cas sont considérés :

- les personnes qui n'en mangent jamais ;
- les consommateurs occasionnels (1 à 2 fois par mois), pour lesquels la quantité ingérée est fixée à 6 kg/an (500 g/mois) ;
- les consommateurs réguliers (1 à 2 fois par semaine), soit 24 kg/an (≈500 g/semaine) ;
- les gros consommateurs de ces produits (48 kg/an[76]).

Tableau A12 - Quantités annuellement consommées des différents types de denrées alimentaires retenues pour estimer les doses (Renaud et al, 2024 pour les denrées terrestres)

Type de denrées	kg/an
Produits laitiers (équivalent lait)	123
Viandes	77
Céréales	76
Légumes feuilles	35
Autres légumes et fruits	252
Poissons	18
Fruits de mer 1 à 2 fois par mois	6
Fruits de mer 1 à 2 fois par semaine	24
Fruits de mer si plus de 2 fois par semaine	48

Évaluation des doses efficaces pour les denrées alimentaires solides et variabilité liée à la consommation de fruits de mer

Le ***Tableau A13*** présente les doses efficaces évaluées pour un adulte, liées à l'incorporation des radionucléides des chaînes U-Th via l'ingestion de denrées alimentaires solides, hors fruits de mer. Le calcul est basé sur les activités de ces radionucléides dans les denrées considérées (cf. ***Tableau A11***) et sur les quantités de ces denrées consommées annuellement (cf. ***Tableau A12***).

La dose totale hors consommation de fruits de mer est de 248 µSv/an, soit 0,25 mSv/an. Les principaux radionucléides contributeurs à la dose sont le ^{210}Po (58 %), le ^{210}Pb (26 %), le ^{228}Ra (11 %) et le ^{226}Ra (4 %).

Tableau A13 - Doses efficaces annuelles (µSv/an) pour un adulte, liées à la consommation de denrées alimentaires solides (hors fruits de mer)

Type de denrées	µSv/an	%
Produits laitiers (équivalent lait)	8	3 %
Viandes	12	7 %
Céréales	73	29 %
Légumes feuilles	26	10 %
Autres légumes et fruits	71	29 %
Poissons	52	21 %
Total (sans fruits de mer)	248	100 %

[75] *À noter que l'enquête Calipso permet de distinguer les parts respectives des crustacés, coquillages et autres mollusques (calmar, seiches...) dans la contribution de 30 % représentée par l'ensemble des fruits de mer, mais elle n'a pas été exploitée en ce sens pour la présente étude car cette discrimination est difficile à réaliser en termes d'activités massiques, par manque de données.*

[76] *Cette valeur correspond au 95e percentile (95 % des résultats se situent en-dessous de cette valeur) le plus élevé issu de l'enquête Calipso pour la consommation de fruits de mer enregistré auprès des habitants de La Rochelle. À noter que les quantités correspondant aux 95e percentiles pour Lorient, Toulon et Le Havre sont comprises entre 30 et 37 kg/an.*

La *Figure A4* présente la variabilité de la dose efficace annuelle liée à l'incorporation des radionucléides des chaînes U-Th *via* l'ingestion de denrées alimentaires solides, en fonction de la consommation de fruits de mer (coquillages et crustacés). La dose va de 0,25 mSv/an pour une personne qui ne consomme pas de fruits de mer, jusqu'à 1,6 mSv/an pour un gros consommateur (une cinquantaine de kg/an). Ces doses sont principalement liées à l'incorporation de ^{210}Po (contribution à la dose de 91 % pour le gros consommateur). Les doses efficaces susceptibles d'être reçues par les adolescents de 13 à 17 ans peuvent être jusqu'à 2 fois supérieures à la dose estimée pour un adulte, du fait d'une ration alimentaire proche de celle des adultes et de coefficients de doses plus élevés. Les doses estimées pour les enfants plus jeunes sont du même niveau ou inférieures à celles des adultes.

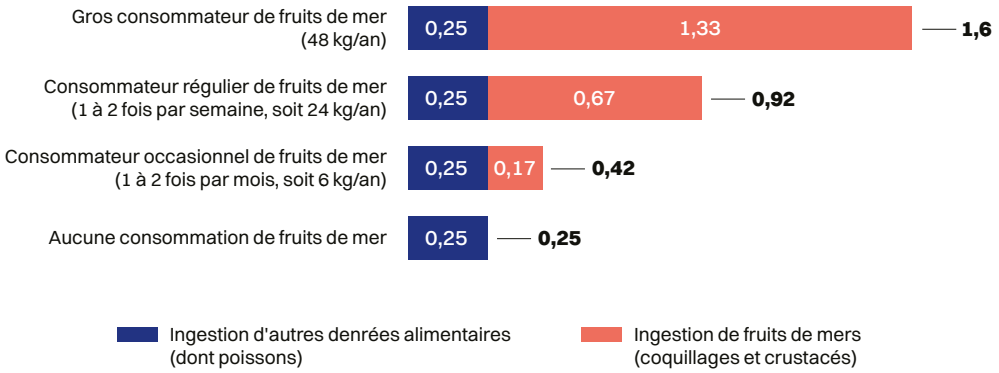


Figure A4 - Doses efficaces pour un adulte (en mSv/an) liées à l'incorporation de radionucléides des chaînes U-Th via *l'ingestion de denrées alimentaires solides, en fonction de sa consommation de fruits de mer.*

Dose efficace due à la consommation d'eau d'adduction

Pour estimer, à l'échelle communale comme à l'échelle métropolitaine, la dose efficace pour la population du fait de l'ingestion de l'eau destinée à la consommation humaine (EDCH), c'est-à-dire les eaux du robinet et les eaux conditionnées produites en France, l'ASNR a utilisé les données résultant des contrôles réalisés par les ARS entre 2010 et 2019. Ces données sont consultables sur internet[77],[78].

Durant cette période, près de 125 000 prélèvements ont été effectués et analysés sur le plan radiologique (plus de 12 000 par an en moyenne). Conformément aux modalités du contrôle des EDCH[79], la dose efficace liée à l'ingestion d'EDCH (encore appelée « dose indicative » (DI), estimée en considérant une consommation de 2 L d'eau par jour) est calculée uniquement lorsque la mesure de l'un des paramètres du contrôle dépasse la valeur de référence associée (0,1 Bq/L pour l'activité alpha globale, 1 Bq/L pour l'activité bêta globale résiduelle et 100 Bq/L pour le tritium). En-deçà, la dose est réputée être inférieure à 0,1 mSv/an. Sur la période 2010-2019, plus de 99 % de la population française a reçu une dose inférieure à 0,1 mSv/an liée à la consommation d'EDCH.

Il convient de noter que la teneur en radon dissous, bien que mesurée depuis 2015, n'entre pas en compte dans le calcul des doses indicatives. Ce calcul tient compte de la présence des radionucléides naturels et du tritium, pour lequel il n'y a eu aucun dépassement de la valeur de référence dans les prélèvements réalisés entre 2010 et 2019.

Pour estimer la dose efficace moyenne liée à la consommation d'EDCH à l'échelle communale puis à l'échelle de la France métropolitaine, l'ASNR a considéré la dose forfaitaire de 0,01 mSv/an lorsque le contrôle conduisait à une dose indicative « inférieure à 0,1 mSv/an », les données disponibles ne permettant pas de préciser les doses reçues en-dessous de cette valeur, et la dose forfaitaire de 0,3 mSv/an lorsque le contrôle conduisait à une dose indicative comprise entre 0,1 et 1 mSv/an.

[77] *https://orobnat.sante.gouv.fr/*

[78] *https://www.data.gouv.fr/datasets/resultats-du-controle-sanitaire-de-leau-distribuee-commune-par-commune*

[79] *Circulaire de la Direction générale de la santé*

La valeur de 0,3 mSv/an correspond au seuil préconisé par la DGS pour rechercher des solutions de réduction de l'exposition. La dose forfaitaire de 0,01 mSv/an est en accord avec la dose moyenne estimée par l'UNSCEAR à l'échelle mondiale liée à l'exposition aux radionucléides naturels présents dans l'eau de boisson. Cette valeur sous-estime vraisemblablement l'exposition des personnes résidant dans des zones dont le sous-sol est riche en radionucléides naturels, ce qui a toutefois peu d'impact sur la dose globale à l'échelle de la population française liée à l'incorporation de radionucléides naturels.

Dose efficace due à la consommation de tabac

Présence de radionucléides dans le tabac

Les radionucléides des chaînes U-Th sont présents dans les feuilles de tabac à des niveaux similaires à ceux que l'on retrouve dans les légumes-feuilles, conséquence du dépôt sur les feuilles des descendants du radon et, dans une moindre mesure, du transfert racinaire des radionucléides présents naturellement dans le sol. Le plomb-210 et le polonium-210, en particulier, sont relativement volatiles et partiellement transférés dans la fumée (sous forme de particules) lors de la combustion du tabac puis sont déposés dans le système respiratoire, notamment les poumons.

Les teneurs moyennes sont de l'ordre de 15 mBq par cigarette pour chacun de ces deux radionucléides, considérés à l'équilibre (Berthet et al. 2022).

Estimation de la consommation de tabac en France

Après une baisse du tabagisme quotidien en France entre 2016 et 2019, sa prévalence s'est depuis stabilisée chez les adultes. Suivant les dernières enquêtes de consommation, un quart (24,5 %) de la population française métropolitaine de 18 à 75 ans fumait quotidiennement en 2022, avec une consommation moyenne de 12,6 cigarettes (ou équivalent) par jour (Pasquereau et al., 2023[80]). Compte-tenu de la structure de la population française[81], ces chiffres correspondent à la consommation annuelle d'environ 60 milliards de cigarettes par la population adulte, la consommation totale des adolescents étant faible en regard.

Cette estimation est confirmée par les données de vente de cigarettes, qui indiquent une moyenne de 41 666 tonnes de tabac vendues par les buralistes chaque année de la période 2020-2023. À ces ventes s'ajoutent entre 10 % et 20 % d'achats réalisés en dehors des bureaux de tabac (Douchet et al. 2024). En considérant un poids de 0,8 g de tabac par cigarette et 15 % de consommation supplémentaire aux ventes des bureaux de tabac, la consommation annuelle est bien d'environ 60 milliards de cigarettes.

Estimation de la dose associée

Selon une étude récente (Desorgher et al. 2023), la dose efficace annuelle moyenne reçue par une personne fumant 20 cigarettes chaque jour est de l'ordre de 0,3 mSv. La dose associée à la consommation d'une cigarette est ainsi estimée à 41 nSv (soit 0,00004 mSv).

Rapporté à l'ensemble de la population française, la dose efficace individuelle moyenne correspondante est estimée à environ 37 µSv/an (soit 0,037 mSv/an). Cette valeur, sensiblement supérieure à celle de 20 µSv/an estimée en 2020, est mieux justifiée car elle bénéficie de données jugées plus robustes d'une étude dosimétrique récente (Desorgher et al. 2023) et de la prise en compte de la proportion de cigarettes achetées en dehors des bureaux de tabac. La variabilité retenue pour le tabagisme dans le présent bilan reste inchangée et est comprise entre 0 pour un non-fumeur et 0,3 mSv/an pour un fumeur ayant une consommation de 20 cigarettes par jour.

[80] *https://beh.santepubliquefrance.fr/beh/2023/9-10/2023_9-10_1.html*

[81] *https://www.insee.fr/fr/statistiques/series/103088458?qserie=2023*

Références

- Renaud P. - Doses liées à l'incorporation de radionucléides naturels par l'alimentation en France métropolitaine. Rapport IRSN PRP-ENV SESURE 2014-18.

- Renaud P., V. Parache V. and Roussel-Debet S. - Internal doses of French adult population linked to the intake of radionuclides from the decay-chains of uranium and thorium by foodstuffs ingestion. Radioprotection 50 (2) : 118-122. 2015.

- Renaud P., Roussel-Debet S., Pourcelot L., Gurriaran R. - 226Ra and 228Ra in French foodstuffs, Radioprotection, 50 (2) ; 111-116. 2015.

- Renaud P., Roussel-Debet S., Pourcelot L., Thébault H., Loyen. J., Gurriaran R. - ^{210}Pb and ^{210}Po in French foodstuffs, Radioprotection, 50 (2) ; 123-128. 2015.

- Renaud P., Vray F. - Conséquences radiologiques des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires sur le territoire français métropolitain. Rapport IRSN/2024-00559.

- Johansen MP, Carpenter JG, Charmasson S, Gwynn JP, Mc Ginnity P, Mori A, Orr B, Simon-Cornu M, Osvath I. - Seafood dose parameters : Updating 210Po retention factors for cooking, decay loss and mariculture. J Environ Radioact. 2023 Nov ; 268-269 : 107 243. doi : 10.1 016/j.jenvrad.2023.107243. Epub 2023 Jul 27. PMID : 37 515 860.

- UNSCEAR 2008 - Sources and effects of ionizing radiation - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation - Report to the General Assembly with Scientific Annexes VOLUME I.

- Roussel-Debet S. - Evaluation of 14C doses since the end of the 1950s in metropolitan France ; Radioprotection, vol 42 (3), 297-313. 2007.

- Bilan radioécologique décennal de l'environnement proche du centre nucléaire de production d'électricité du Tricastin – Rapport IRSN/2024-0350 – 2024.

- UNSCEAR - Sources, effects and risks of ionizing radiation. Volume II : Scientific Annex B. UNSCEAR 2024 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations sales publication E.25.IX.2. United Nations, New York, 2025.

- UNSCEAR 1982 - Ionizing radiation : sources and biological effects - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation - Report to the General Assembly, with annexes.

- CALIPSO 2006 - Étude des consommations alimentaires de produits de la mer et imprégnation aux éléments traces, polluants et omega 3, AFSSA, INRA, Ministère de l'agriculture et de la pêche.

- Berthet, A., Butty, A., Rossier, J., Sadowski, I.J., Froidevaux, P., 2022 - (^{210})Po and (^{210})Pb content in the smoke of heated tobacco products versus conventional cigarette smoking. Sci. Rep. 12, 10 314 - https://doi.org/10.1038/s41598-022-14200-2.

- Pasquereau A. et al - Prévalence du tabagisme et du vapotage en France métropolitaine en 2022 parmi les 18-75 ans, https://beh.santepubliquefrance.fr/beh/2023/9-10/2023_9-10_1.html.

- Douchet M.-A., Le Nézet O., Philippon A., Andler R., Pasquereau A., Guignard R. (2024) - L'approvisionnement en tabac des fumeurs en France, 2014-2022. Note réalisée par l'Observatoire français des drogues et des tendances addictives (OFDT) et Santé publique France. Paris, OFDT, coll. Notes de résultats, 20 p.

- Desorgher L., Berthet A., Rossier J., Bochud F., Froidevaux P. (2023) - Dosimetry in the lungs of -particles (^{210}Po) and -particles (^{210}Pb) present in the tobacco smoke of conventional cigarettes and heated tobacco products. Journal of Environmental Radioactivity, 263, art. no. 107 178, DOI : 10.1 016/j.jenvrad.2023.107178.

ANNEXE V
EXPOSITION AU RADON

Introduction

Le radon est un gaz radioactif issu de la désintégration de l'uranium et du thorium présents naturellement dans le sol et les roches. En se désintégrant, il forme des descendants solides, eux-mêmes radioactifs, qui peuvent se fixer sur les aérosols de l'air et, une fois inhalés, se déposer le long des voies respiratoires en provoquant leur irradiation. L'accumulation du radon dans les espaces confinés, tels que les bâtiments, est variable selon le lieu, la nature du sous-sol, le type de bâtiment, son mode de construction et les habitudes de vie de ses occupants.

Méthodologie

Répartition de la population

La liste des communes de France métropolitaine, leurs coordonnées (contour et centre) et la répartition de la population proviennent de l'API Geo[82] qui s'appuie sur le Code officiel géographique (COG) de l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE) du 1er janvier 2024 au moment où les données ont été extraites[83].

Le nombre d'habitations réparti selon le type de logement pour chaque commune est fourni par la base de l'INSEE[84] « Logements et résidences principales en 2021 » parue le 27 juin 2024 : PRINC3 – Résidences principales par type de logement, nombre de pièces et taille du ménage.

Évaluation de la concentration en radon dans l'habitat

Le radon existe sous la forme de trois isotopes (radon-219, radon-220, radon-222), mais seul le radon-222, issu de la chaine de désintégration de l'uranium-238, présente une demi-vie de 3,8 jours suffisamment longue pour permettre d'observer des activités volumiques non négligeables dans l'environnement en fonction de la nature géologique des sols.

Sa concentration (activité volumique) moyenne dans l'habitat a été définie pour chacune des communes de France selon la méthodologie suivante.

Estimation de l'activité volumique du radon à l'échelle kilométrique

Un nouveau modèle géostatistique a été développé en 2025 à partir de 50 103 mesures de radon dans l'air intérieur et de la carte du potentiel radon en 5 classes (voir encadré dans le paragraphe 3.1.4 sur l'exposition au radon). Il combine l'ensemble des mesures disponibles dans l'air intérieur avec les classes de potentiel radon, de manière à extrapoler sur l'ensemble du territoire les niveaux de concentration plausibles dans l'habitat, en relation avec le potentiel radon local du sol. Il conduit à des estimations de l'activité volumique du radon dans l'air intérieur (en Bq/m³) en période hivernale sur une grille kilométrique.

Estimation de l'activité volumique moyenne annuelle du radon à l'échelle communale

L'activité volumique moyenne en période hivernale a été estimée pour chaque commune. Pour revenir à des estimations moyennes annuelles, un facteur de pondération de 0,88 a été appliqué. Cette valeur est calculée à l'aide des données figurant dans l'article de Baysson et al (Baysson, 2003), qui propose des facteurs de pondération en fonction du mois de début de la mesure et de sa durée, afin d'obtenir une estimation non biaisée de l'activité volumique moyenne annuelle :

$$C_{222Rn,est,ann} = 0{,}88 \times C_{222Rn,est,hiv}$$

avec :

- $C_{222Rn,est,ann}$ = activité volumique de radon-222 estimée en moyenne annuelle (Bq.m³) ;
- $C_{222Rn,est,hiv}$ = activité volumique de radon-222 estimée en moyenne hivernale à partir du modèle géostatistique (Bq.m³).

[82] *https://geo.api.gouv.fr/decoupage-administratif/communes*

[83] *https://www. insee.fr/fr/information/3720946*

[84] *https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/8202488/TD_PRINC3_2021_COM_xlsx.zip*

Estimation de la concentration en radon par type d'habitat

La majorité des mesures de radon présentes dans la base de données a été effectuée dans des maisons individuelles ou au rez-de-chaussée d'établissements recevant du public. Pour chaque bâtiment, la valeur retenue est la valeur maximale mesurée dans une pièce de vie (pour l'habitat) ou dans une pièce occupée par le public (pour les établissements recevant du public). La principale source du radon étant le sol, les concentrations sont généralement moins élevées dans les étages qu'au rez-de-chaussée.

Afin de prendre en compte l'hétérogénéité des activités volumiques de radon au sein d'une maison individuelle, en particulier lorsqu'elle présente des étages, un facteur de pondération a été appliqué. Il a été obtenu par une corrélation linéaire entre la concentration maximale mesurée dans une pièce de vie et la moyenne des concentrations mesurées dans les autres pièces de vie, déterminée à partir d'une base de données de 2 293 maisons individuelles dans lesquelles 3 mesures étaient effectuées. La meilleure droite de régression obtenue (R^2 = 0,96)[85] à partir de ces valeurs est la suivante :

$$C_{22Rn,ind} = 0,7289 \times C_{22Rn,est,ann}$$

avec :

- $C_{222Rn,ind}$ = concentration moyenne en radon-222 dans des maisons individuelles (Bq.m³) ;
- $C_{222Rn,est,ann}$ = concentration moyenne en radon-222 estimée en moyenne annuelle (Bq.m^{-3})

L'application de ce facteur permet d'obtenir une estimation réaliste de l'exposition moyenne de la population, plutôt qu'une estimation haute comme dans le précédent bilan.

Pour estimer la valeur moyenne dans les logements collectifs à partir du faible nombre de mesures connues pour ce type d'habitat, une autre correction des estimations du modèle géostatistique a été réalisée, par corrélation linéaire entre les résultats de mesure obtenus dans des maisons individuelles et ceux obtenus dans des logements collectifs parmi les données de la campagne IRSN/DGS menée en 1982 et 2003. Pour chaque département, la moyenne arithmétique respective des résultats disponibles pour chaque type d'habitat a été calculée. La meilleure droite de régression obtenue (R^2 = 0,83) à partir de ces valeurs départementales est la suivante :

$$C_{222Rn,coll} = 0,4645 \times C_{22Rn,est,ann}$$

avec :

- $C_{222Rn,est,ann}$ = concentration moyenne en radon-222 estimée en moyenne annuelle (Bq.m³) ;
- $C_{222Rn,coll}$ = concentration moyenne en radon-222 dans des logements collectifs (Bq.m^{-3}).

Les concentrations moyennes de radon dans les logements individuels et collectifs ($C_{222Rn,com,ind}$) et ($C_{222Rn,com,coll}$) ont été calculées à partir de ces deux relations, pour chaque commune, en considérant que la valeur de l'estimation obtenue par le modèle géostatistique est la concentration moyenne en radon en rez-de-chaussée.

Pour chaque commune, le nombre d'habitations réparties selon le type de logement est fourni par une base de l'INSEE, qui distingue trois types de logement : les maisons, les appartements et les autres logements (logements-foyers, chambres d'hôtel, habitations de fortune, pièces indépendantes). Le pourcentage de la population vivant dans chaque type d'habitat (maison ou appartement) a été calculé pour chaque commune[86]. Ainsi, une concentration moyenne en radon à l'intérieur de l'habitat, pondérée par le type d'habitat, a été calculée pour chaque commune par la relation suivante :

$$C_{222Rn,intérieur} = (\%_{com,ind} \times C_{222Rn,com,ind}) + (\%_{com,coll} \times C_{222Rn,com,coll})$$

avec :

- $\%_{com,ind}$ = pourcentage de la population de la commune vivant en maisons individuelles ;
- $\%_{com,coll}$ = pourcentage de la population de la commune vivant en logements collectifs ;
- $C_{222Rn,com,ind}$ = concentration moyenne en radon dans les maisons individuelles de la commune ;
- $C_{222Rn,com,coll}$ = concentration moyenne en radon dans les logements collectifs de la commune ;
- $C_{222Rn,intérieur}$ = concentration moyenne en radon à l'intérieur de l'habitat de la commune, pondérée par le type d'habitat.

[85] *Le coefficient de détermination R^2 est un indice de la qualité de la prédiction de la régression linéaire. Plus R^2 est élevé (valeur maximale de 1), mieux le modèle décrit les données observées.*

[86] *Il n'a pas été tenu compte de la catégorie « autres logements » du fait de l'absence de mesures correspondantes. Cette typologie d'habitat ne concerne qu'un faible nombre de personnes au regard de la population totale d'une commune et le biais induit par cette approximation est donc supposé sans influence sur l'estimation globale au niveau des communes.*

Estimation de la concentration moyenne en radon-222 à l'intérieur de l'habitat en France

La concentration moyenne en radon-222 à l'intérieur de l'habitat français métropolitain, pondérée par la population et le type d'habitat, est calculée de la manière suivante :

$$C_{222Rn} = \frac{\sum C_{222Rn,intérieur}(C_i) \times P(C_i)}{\sum P(C_i)}$$

avec :

- C_{222Rn} = concentration moyenne en radon-222 à l'intérieur de l'habitat français métropolitain, pondérée par la population et le type d'habitat (en Bq.m^{-3}) ;
- $C_{222Rn,intérieur}(C_i)$ = concentration moyenne en radon-222 à l'intérieur de l'habitat, pondérée par le type d'habitat dans la commune C_i (en Bq.m^{-3}) ;
- $P(C_i)$ = population de la commune C_i.

Concentrations en radon-222 et radon-220 à l'intérieur et à l'extérieur de l'habitat

Le gaz radon présent dans l'air ambiant se transforme, par désintégration alpha, en descendants solides, eux-mêmes radioactifs à période courte. Les descendants diffusent rapidement dans l'atmosphère et finissent par se déposer au sol ou sur les parois des bâtiments si bien que, quel que soit le lieu, ils ne sont jamais totalement à l'équilibre radioactif avec le radon. Les fractions d'équilibre des descendants à période courte du radon avec celui-ci sont décrites par un facteur sans dimension dénommé « facteur d'équilibre ». Celui-ci est compris entre 0 (lorsque le radon est présent dans l'air sans descendants) et 1 (lorsque les descendants sont présents dans l'air avec la même activité que celui-ci). Ainsi, il est possible de relier la concentration mesurée en radon à une concentration dite équivalente à l'équilibre (CEE) *via* ce facteur. Cette concentration équivalente à l'équilibre correspond à la concentration de gaz radon à l'équilibre radioactif total avec ses descendants qui conduit à la même dose que celle due aux descendants du radon mesuré ; son calcul est une première étape dans l'évaluation de la dose efficace engagée.

À partir de la concentration moyenne en radon-222 à l'intérieur de l'habitat de la commune, la concentration en radon équivalente à l'équilibre est calculée :

$$C_{222Rn,CEE,intérieur}(C_i) = 0{,}4 \times C_{222Rn,intérieur}(C_i)$$

avec :

- $C_{222Rn,CEE,intérieur}(C_i)$ = concentration en radon-222 équivalente à l'équilibre à l'intérieur de l'habitat de la commune C_i (en Bq.m^{-3}) ;
- $C_{222Rn,intérieur}(C_i)$ = concentration en radon-222 à l'intérieur de l'habitat de la commune C_i (en Bq.m^{-3}) ;
- *0,4* = valeur usuelle du facteur d'équilibre entre le radon et ses descendants à vie courte dans un bâtiment normalement ventilé.

Si la présence de radon-222 dans les habitats est due à la désintégration du radium-226, un autre isotope du radon dû à la désintégration du thorium-232, le radon-220 (aussi appelé thoron), est également présent dans l'air et contribue à l'exposition globale liée au radon. En l'absence de données de mesure du radon-220 sur le territoire français, la concentration moyenne en radon-220 équivalente à l'équilibre estimée par l'UNSCEAR de 1,2 Bq/m^3 (UNSCEAR, 2025) est retenue ici.

La concentration équivalente à l'équilibre moyenne en radon-222 à l'extérieur de l'habitat pour chaque commune est dérivée de la concentration en radon-222 à l'intérieur $C_{222Rn,est,ann}$ (estimation du modèle géostatistique en moyenne annuelle) par la relation suivante en considérant un ratio de 0,2 entre la concentration en radon à l'extérieur et à l'intérieur et un facteur d'équilibre de 0,6 entre le radon et ses descendants à vie courte à l'extérieur (UNSCEAR, 2025) :

$$C_{222Rn,EEC,extérieur}(C_i) = C_{222Rn,est,ann}(C_i) \times 0{,}2 \times 0{,}6$$

La concentration équivalente à l'équilibre en radon-220 à l'extérieur de l'habitat est retenue égale à 0,3 Bq.m^{-3} (UNSCEAR, 2025).

Évaluation de la dose efficace associée

Les budgets temps retenus, basés sur la publication 66 de la CIPR (ICRP, 1994), sont présentés dans le ***Tableau A14***.

Tableau A14 *- Budgets temps retenus pour les calculs*

	Temps moyen journalier		Moyenne annuelle
Intérieur de l'habitat	22 $h.j^{-1}$	Soit 92 % du temps	8 030 h
Extérieur de l'habitat	2 $h.j^{-1}$	Soit 8 % du temps	730 h

Les calculs de dose efficace (en mSv/an) due au radon-222 ont été réalisés avec le coefficient de dose réglementaire (arrêté du 16 novembre 2023) de 3 mSv par $mJ.h.m^{-3}$. Pour un facteur d'équilibre de 0,4, ce coefficient de dose CD_{222Rn} correspond à $6{,}7.10^{-6}$ mSv par $Bq.h.m^{-3}$. La dose efficace (mSv/an) due au radon-222 à l'intérieur de l'habitat est calculée selon l'équation suivante :

$$E_{222Rn,intérieur}(C_i) = \frac{CD_{222Rn} \times C_{222Rn,CEE,intérieur}(C_i) \times 8030}{0{,}4}$$

La dose efficace due au radon-222 à l'extérieur de l'habitat est évaluée selon l'équation suivante :

$$E_{222Rn,intérieur}(C_i) = \frac{CD_{222Rn} \times C_{222Rn,CEE,extérieur}(C_i) \times 730}{0{,}4}$$

La dose efficace (en nSv/an) due au radon-220 à l'intérieur de l'habitat est évaluée en retenant le coefficient de dose adopté par la CIPR (ICRP, 2024), soit 80 nSv par $Bq.h.m^{-3}$ de radon-220 équivalent à l'équilibre, selon l'équation suivante :

$$E_{220Rn,intérieur}(C_i) = 80 \times 8030 \times C_{220Rn,CEE,intérieur}(C_i)$$

La dose efficace (en nSv/an) due au radon-220 à l'extérieur de l'habitat est évaluée selon l'équation suivante :

$$E_{220Rn,extérieur}(C_i) = 80 \times 730 \times C_{220Rn,CEE,extérieur}(C_i)$$

La dose efficace individuelle totale moyenne (en mSv/an) due à l'exposition au radon dans la commune C_i est alors :

$$E_{220Rn,222Rn}(C_i) = 10^{-6} \times (E_{220Rn,extérieur}(C_i) + E_{220Rn,intérieur}(C_i) + E_{222Rn,extérieur}(C_i) + E_{222Rn,intérieur}(C_i))$$

La dose moyenne dans un département est calculée en effectuant une pondération, de la dose totale due à l'exposition au radon et au thoron par la population de chaque commune, soit :

$$E_{220Rn,222Rn}(D) \frac{\sum_{Ci\,de\,D}[E_{220Rn,222Rn}(C_i) \times P(C_i)]}{\sum_{Ci\,de\,D}[P(C_i)]}$$

avec :

- $E_{220Rn,222Rn}(D)$ = dose efficace individuelle moyenne annuelle due à l'exposition au radon dans le département D (en mSv/an) ;
- $P(C_i)$ = population de la commune C_i.

De la même façon, les doses efficaces moyennes en France sont calculées en sommant les doses communales pondérées par les populations correspondantes sur les communes de la France métropolitaine.

Résultats

Les résultats obtenus sont les suivants :

- La concentration moyenne annuelle en radon-222 à l'intérieur de l'habitat en France métropolitaine, pondérée par la population et le type d'habitat, est de 56 Bq.m^{-3}.
- La dose efficace moyenne française est estimée à 3,9 mSv/an.
- Les doses moyennes communales sont comprises entre 1,1 mSv/an et 60 mSv/an – la cartographie des doses estimées par commune est présentée en ***Figure A5***.

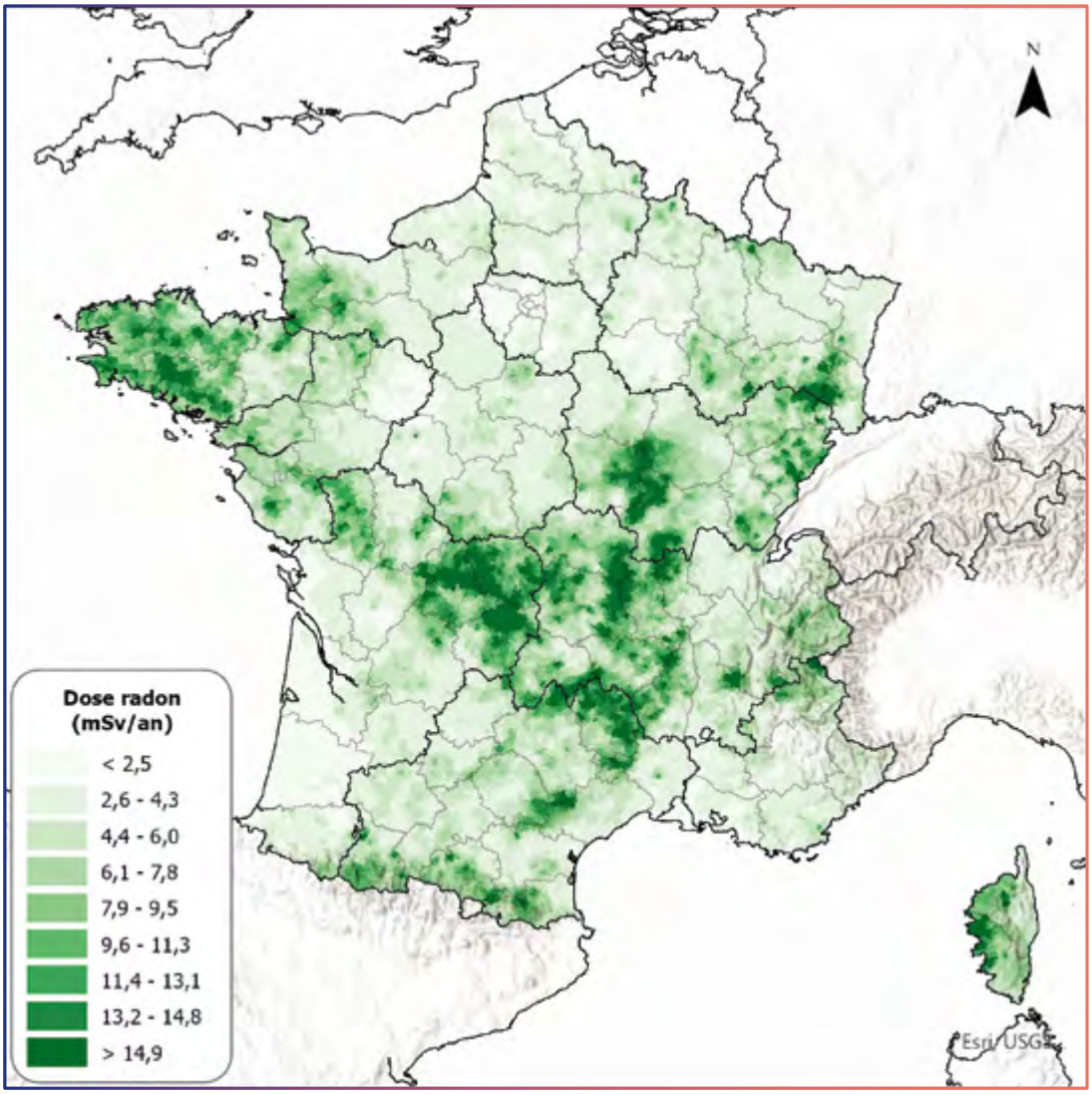


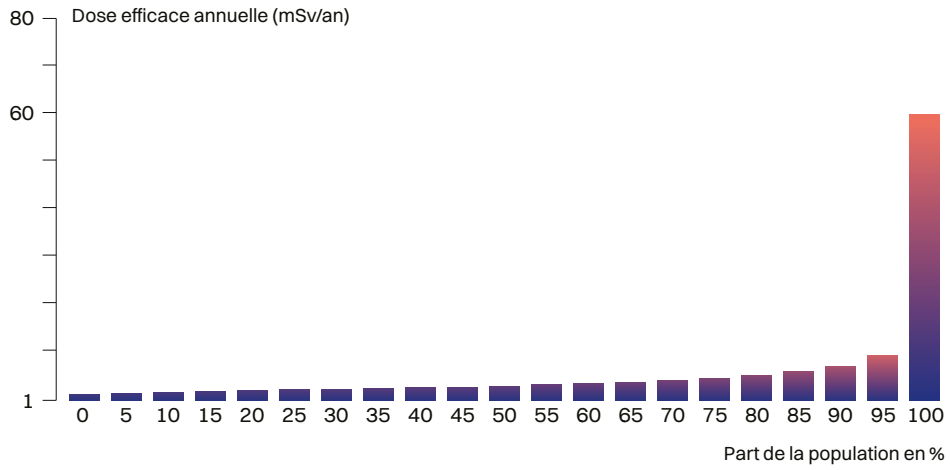
Figure A5 - Cartographie des doses (en mSv/an) liées à l'exposition au radon estimées par commune en France métropolitaine sur la période 2020-2024

- Les moyennes de dose efficace annuelle (en mSv/an) pondérées par le nombre d'habitants par commune sont les suivantes :

	Intérieur de l'habitat	Extérieur de l'habitat
^{222}Rn	3,0	0,13
^{220}Rn	0,77	0,02

La répartition de l'exposition annuelle de la population dans son ensemble est présentée sur la ***Figure A6***: pour 5 % de la population la dose est inférieure à 1,4 mSv/an (5e percentile) et pour 5 % de la population la dose est supérieure à 9,4 mSv/an (95e percentile).

Figure A6 - *Répartition de l'exposition de la population liée au radon*



La dose efficace moyenne par département est présentée dans le ***Tableau A16***.

Tableau A16 - *Exposition de la population française au radon par département*

Département		Dose (mSv/an)	Département		Dose (mSv/an)
1	Ain	3,6	29	Finistère	9,5
2	Aisne	3,3	30	Gard	3,8
3	Allier	8,1	31	Haute-Garonne	4,1
4	Alpes-de-Haute-Provence	2,6	32	Gers	4,1
5	Hautes-Alpes	4,1	33	Gironde	2,3
6	Alpes-Maritimes	2,5	34	Hérault	3,6
7	Ardèche	6,2	35	Ille-et-Vilaine	4,7
8	Ardennes	4,1	36	Indre	5,1
9	Ariège	6,1	37	Indre-et-Loire	2,9
10	Aube	2,3	38	Isère	3,6
11	Aude	3,4	39	Jura	5,9
12	Aveyron	5,6	40	Landes	1,9
13	Bouches-du-Rhône	2,4	41	Loir-et-Cher	3,6
14	Calvados	4,3	42	Loire	7,1
15	Cantal	7,0	43	Haute-Loire	8,0
16	Charente	3,9	44	Loire-Atlantique	6,5
17	Charente-Maritime	2,5	45	Loiret	3,6
18	Cher	3,5	46	Lot	4,2
19	Corrèze	8,0	47	Lot-et-Garonne	3,7
2A	Corse-du-Sud	9,9	48	Lozère	11
2B	Haute-Corse	4,5	49	Maine-et-Loire	4,7
21	Côte-d'Or	4,8	50	Manche	7,2
22	Côtes-d'Armor	8,3	51	Marne	2,6
23	Creuse	13	52	Haute-Marne	6,6
24	Dordogne	4,9	53	Mayenne	5,7
25	Doubs	6,9	54	Meurthe-et-Moselle	3,7
26	Drôme	4,5	55	Meuse	3,8
27	Eure	3,2	56	Morbihan	9,8
28	Eure-et-Loir	2,8	57	Moselle	3,9

Département		Dose (mSv/an)
58	Nièvre	7,8
59	Nord	2,5
60	Oise	2,6
61	Orne	5,7
62	Pas-de-Calais	2,5
63	Puy-de-Dôme	8,5
64	Pyrénées-Atlantiques	2,6
65	Hautes-Pyrénées	7,4
66	Pyrénées-Orientales	3,9
67	Bas-Rhin	2,7
68	Haut-Rhin	5,7
69	Rhône	3,9
70	Haute-Saône	7,3
71	Saône-et-Loire	7,8
72	Sarthe	2,7
73	Savoie	5,2
74	Haute-Savoie	2,6
75	Paris	1,3
76	Seine-Maritime	2,7

Département		Dose (mSv/an)
77	Seine-et-Marne	2,5
78	Yvelines	1,7
79	Deux-Sèvres	8,8
80	Somme	2,5
81	Tarn	5,5
82	Tarn-et-Garonne	4,6
83	Var	3,4
84	Vaucluse	2,7
85	Vendée	6,4
86	Vienne	4,5
87	Haute-Vienne	11
88	Vosges	7,0
89	Yonne	3,7
90	Territoire de Belfort	7,3
91	Essonne	2,3
92	Hauts-de-Seine	1,5
93	Seine-Saint-Denis	1,7
94	Val-de-Marne	1,9
95	Val-d'Oise	2,1

Références

- Baysson H., Billon S., Laurier D., Rogel A., Tirmarche M. (2003) - Seasonal correction factors for estimating radon exposure in dwellings in France. Radiation Protection Dosimetry, 104(3), 245-252.

- ICRP, 1994 - International Commission on Radiological Protection. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3).

- ICRP, 2024 - Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Members of the Public : Part 1. ICRP Publication 158. Ann. ICRP 53(4-5).

- UNSCEAR 2000 - Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume II : Effects. UNSCEAR 2000 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations sales publication E.00.IX.4. United Nations, New York, 2000.

- UNSCEAR 2006 - Effects of Ionizing Radiation. Volume I : Report to the General Assembly, Scientific Annexes A and B. UNSCEAR 2006 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations sales publication E.08.IX.6. United Nations, New York, 2008.

- UNSCEAR 2008 - Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume I : Sources. Report to the General Assembly, Scientific Annexes A and B. UNSCEAR 2008 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations sales publication E.10.XI.3. United Nations, New York, 2010.

- UNSCEAR 2025 - Sources, effects and risks of ionizing radiation. Volume II : Scientific Annex B. UNSCEAR 2024 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations sales publication E.25.IX.2. United Nations, New York, 2025.

- Arrêté du 16 novembre 2023 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants. JORF du 25 novembre 2023, texte 54 sur 177.

ANNEXE VI
EXPOSITION AUX RETOMBÉES DES ESSAIS ATMOSPHÉRIQUES D'ARMES NUCLÉAIRES ET DE L'ACCIDENT DE TCHERNOBYL

Introduction

Les doses efficaces dues aux retombées des essais nucléaires atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl (dites "retombées anciennes") ont fait l'objet d'un rapport, publié en 2022 par l'IRSN, qui s'appuie sur les résultats des mesures effectuées par l'Institut sur la période 2008-2018 (IRSN, 2022). Les activités massiques et volumiques des principaux radionucléides qui constituent aujourd'hui la rémanence de ces retombées ont ainsi été mesurées dans différentes composantes de l'environnement : sols de diverses natures, sédiments fluviaux et marins, herbages, plantes aquatiques, denrées alimentaires issues de l'agriculture et de l'élevage et denrées sauvages (champignons, gibier et baies). Les radionucléides concernés sont le strontium-90 (^{90}Sr), le carbone-14 (^{14}C), le tritium (^{3}H), des isotopes du plutonium (^{238}Pu, ^{239}Pu, ^{240}Pu et ^{241}Pu) et l'américium-241 (^{241}Am) issus des explosions d'armes nucléaires, ainsi que le césium-137 (^{137}Cs), provenant à la fois des retombées des essais nucléaires et de l'accident de Tchernobyl.

Les résultats de ces mesures ont permis d'estimer les doses liées à l'incorporation par ingestion de chacun des radionucléides précités, ainsi que les doses liées à l'exposition externe au rayonnement émis par le ^{137}Cs présent dans l'environnement (les doses associées au ^{90}Sr et à l'^{241}Am sont négligeables). Pour le ^{137}Cs, les résultats de mesures étaient en nombre suffisant pour constater qu'il existe sur le territoire des « zones de rémanence élevées » (ZRE) des retombées anciennes et pour distinguer les doses susceptibles d'être reçues par des personnes résidant dans ces zones de celles des personnes habitant sur le reste du territoire. Pour les autres radionucléides, les mesures n'ont pas été en nombre suffisant pour permettre une telle distinction.

L'ASNR a publié récemment deux études de reconstitution des doses reçues par la population en France métropolitaine entre 1945 et 2020 résultant des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires (Renaud et al. 2024) et des retombées de l'accident de Tchernobyl (Renaud et al. 2025). Ces deux études s'appuient sur des dizaines de milliers de résultats de mesures effectuées par l'ASNR et ses prédécesseurs (Le SCPRI, l'OPRI, l'IPSN puis l'IRSN) au cours des trois périodes 1961-1978, 1986-1989 et 2008-2018 (rapport IRSN, 2022 précité). Pour les autres périodes, les doses ont été estimées à l'aide de modèles ajustés aux résultats de mesures disponibles, d'estimations faites par l'UNSCEAR et de diverses données internationales adaptées aux spécificités françaises. Outre les évolutions temporelles (doses annuelles entre 1945 et 2020), l'exploitation de l'ensemble de ces éléments a permis d'étudier les principales sources de variabilité des doses : la variabilité spatiale (estimation par commune), la variabilité suivant l'âge et la variabilité liée au mode de vie (travail en extérieur ou en intérieur, milieu rural ou urbain, habitudes de consommation de denrées forestières...).

Les principaux éléments issus de ces études, exploités dans le présent bilan, sont présentés dans les paragraphes suivants, de même que le calcul permettant l'obtention d'une dose moyenne française imputable en 2020 à la rémanence dans l'environnement des retombées des essais nucléaires atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl.

Évaluation des doses dues aux essais atmosphériques d'armes nucléaires

En 1963, au plus fort des retombées radioactives liées aux essais atmosphériques d'armes nucléaires, les doses efficaces reçues par les adultes en France étaient de l'ordre de 0,1 mSv, dues principalement à l'ingestion de denrées contaminées par les radionucléides libérés dans l'atmosphère, qui se sont déposés à la surface des sols. La principale source de variabilité des doses reçues était la localisation géographique, les dépôts radioactifs ayant été proportionnels, durant toute la période des retombées des essais nucléaires, aux précipitations - ce qui a mené à la cartographie présentée *Figure A7*. Les doses reçues par la population ont ensuite fortement diminué ; leur évolution dans le temps, de 1945 à 2020, est représentée plus loin dans le document.

Le rapport de l'IRSN publié en 2022 montre que les doses liées à la rémanence actuelle des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires sont liées principalement à l'incorporation de ^{90}Sr et de ^{14}C par ingestion de denrées alimentaires et à l'exposition externe aux rayonnements émis par le ^{137}Cs présent dans les sols (une partie du ^{137}Cs présent dans l'environnement français ayant par ailleurs pour origine les retombées de l'accident de Tchernobyl.

Dans cette étude, la dose moyenne en France métropolitaine actuelle pour un adulte a été estimée à 1,3 µSv/an pour le ^{90}Sr et à 1 µSv/an pour le ^{14}C hérité des essais nucléaires. Cette dernière valeur est une estimation majorante de la contribution des essais nucléaires à la dose due au ^{14}C présent dans l'environnement, évaluée à 12 µSv/an et principalement d'origine naturelle (cf. paragraphe 3.2.3 du rapport). La dose liée au ^{137}Cs provenant des essais nucléaires a été estimée autour de 1,5 µSv/an. Les doses liées aux autres radionucléides (isotopes du plutonium, ^{241}Am et tritium) sont très faibles, voire négligeables au regard des précédentes.

L'étude de l'IRSN publiée en 2022 montre qu'il existe, encore aujourd'hui, des zones où la rémanence des activités de ^{137}Cs déposé lors des retombées[87] des essais nucléaires est plus élevée qu'ailleurs et où ce ^{137}Cs est quasi-exclusivement imputable à ces retombées. Il s'agit des Monts d'Arrée, des Pyrénées et du Massif-central, ces trois ensembles ayant la particularité d'être soumis à des précipitations annuelles élevées et d'avoir été peu touchés en 1986 par les retombées de l'accident de Tchernobyl.

La variabilité spatiale des retombées des essais nucléaires et des doses associées a été récemment étudiée par l'IRSN (Renaud et al. 2024) sur la base de nombreuses données plus anciennes. Cette étude a montré la concordance entre, d'une part, la carte des dépôts consécutifs aux essais nucléaires (cf. ***Figure A7***), obtenue à partir d'une relation entre les dépôts et les hauteurs de précipitations moyennes annuelles et, d'autre part, la variabilité spatiale des activités massiques et volumiques de différents radionucléides mesurés dans plusieurs composantes de l'environnement, notamment dans des denrées alimentaires au cours de la période 1961-1978. Cette concordance a aussi été constatée avec les activités de ^{137}Cs et de ^{90}Sr mesurées dans les plateaux-repas de 6 établissements scolaires répartis sur le territoire, apportant ainsi un élément de validation important de la variabilité géographique des doses reçues par ingestion.

À partir de ce constat, les doses liées aux retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires ont été estimées pour la commune du Vésinet en région parisienne, pour laquelle le nombre de résultats de mesures était le plus important ; les doses pour les autres communes françaises ont ensuite été déduites en appliquant des ratios de précipitations moyennes entre chaque commune et Le Vésinet, ce qui revient à appliquer aux doses la répartition spatiale des dépôts présentée sur la carte ***Figure A7***. Les activités de tritium et de ^{14}C dans l'environnement sont, elles, très homogènes, puisqu'elles ne résultent pas du dépôt par la pluie et reflètent l'homogénéité des concentrations atmosphériques en tritium et ^{14}C résultant des essais (IRSN, 2024).

[87] *Il n'est pas possible de distinguer dans une activité de ^{137}Cs mesurée la part qui a pour origine les essais nucléaires de celle provenant des retombées de l'accident de Tchernobyl sans avoir recours à la mesure d'autres indicateurs.*

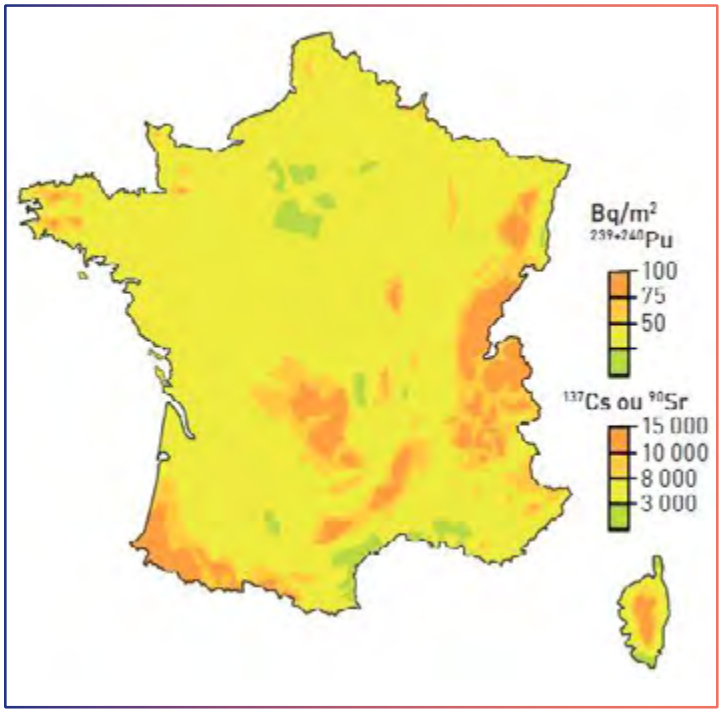


Figure A7 - Carte des dépôts de ^{137}Cs, ^{239}Pu et ^{240}Pu consécutifs aux retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires[88] (1963).

La dose moyenne en France métropolitaine, pondérée par la population totale, a ensuite été calculée en multipliant, pour chaque commune, les doses estimées par l'effectif de sa population ; la somme de ces produits a ensuite été divisée par le nombre total d'habitants en France.

Évaluation des doses dues aux retombées de l'accident de Tchernobyl

Les masses d'air contaminé par l'accident de Tchernobyl ont affecté la France principalement entre le 1er et le 5 mai 1986. En raison de concentrations dans l'air plus importantes dans l'Est que dans l'Ouest du pays et de pluies très variables survenues durant cette période, les dépôts radioactifs, notamment ceux d'iode-131 (^{131}I), de césium-134 (^{134}Cs) et de césium-137 (^{137}Cs), ont été plus importants et plus hétérogènes dans l'Est de la France que dans le reste du pays (cf. *Figure A8*). Ainsi, pour l'année 1986, la dose efficace reçue par certains habitants du tiers Est du pays a pu approcher 1 mSv, alors qu'elle n'a pas atteint 0,1 mSv pour les habitants de l'Ouest. L'essentiel de cette dose (70 %) a résulté de l'ingestion de denrées contaminées et le reste de l'exposition externe due au rayonnement émis par le césium présent dans les sols ; la contribution à la dose de l'inhalation des radionucléides lors du passage des masses d'air contaminées n'a pas dépassé 10 % et a été négligeable pour la majeure partie du territoire.

[88] *Les dépôts de ^{90}Sr ont été du même niveau que ceux de ^{137}Cs. Les dépôts de ^{238}Pu ont été 30 fois inférieurs à ceux de ^{239}Pu + ^{240}Pu. Ce facteur de 30 inclut le ^{238}Pu ajouté à l'environnement par la désintégration dans l'atmosphère d'un satellite américain en 1964. Les dépôts de ^{241}Pu ont été initialement 13 fois plus élevés que ceux de ^{239}Pu + ^{240}Pu mais, en raison de sa plus courte période radioactive (14 ans), les activités de ^{241}Pu dans les sols sont aujourd'hui du même niveau que celles de ^{239}Pu + ^{240}Pu. La désintégration du ^{241}Pu a produit de l'^{241}Am, dont la teneur dans les sols est actuellement 2,5 fois plus faible que celles de ^{239}Pu + ^{240}Pu.*

En raison de la diminution rapide de la contamination en césium dans les denrées et de la disparition de l'^{131}I par décroissance radioactive, la dose par ingestion a fortement diminué dans les mois qui ont suivi les dépôts. Il en va de même pour la dose liée à l'exposition externe, en raison de la décroissance radioactive des radionucléides de périodes courtes et moyennes (iodes, tellures, ruthéniums, ^{134}Cs...). Au fil des années, les doses liées à ces deux voies d'exposition ont continué à baisser régulièrement en raison de l'enfouissement ou du drainage (emport vers les cours d'eau) du ^{137}Cs présent dans les sols, de son élimination progressive des surfaces artificielles et de la diminution de sa teneur dans les denrées agricoles et les denrées issues de l'élevage.

Des différents radionucléides qui se sont déposés en France en mai 1986 lors des retombées de l'accident de Tchernobyl, il ne reste aujourd'hui que le seul ^{137}Cs.

Les doses liées à l'incorporation de ce radionucléide par ingestion de denrées et celles résultant de l'exposition externe à son rayonnement ont été estimées en 2022 sur la base de nombreux résultats de mesures acquis sur la période 2008-2018 (IRSN, 2022). Ces résultats ont permis d'estimer les doses liées à sa présence dans l'environnement et de mettre en évidence les ZRE où son activité massique dans les sols, les herbages, le lait, les différents fromages, la viande et les denrées forestières (champignons, viande de gibier et baies) est nettement plus élevée que dans le reste du pays. Ces zones sont majoritairement localisées dans le tiers Est du pays, là où les précipitations survenues entre le 1er et le 5 mai 1986 ont été les plus abondantes, situées dans les Vosges, le Jura, la vallée du Rhône, l'arrière-pays niçois et, dans une moindre mesure, la Corse orientale[89] (cf. ***Figure A8***).

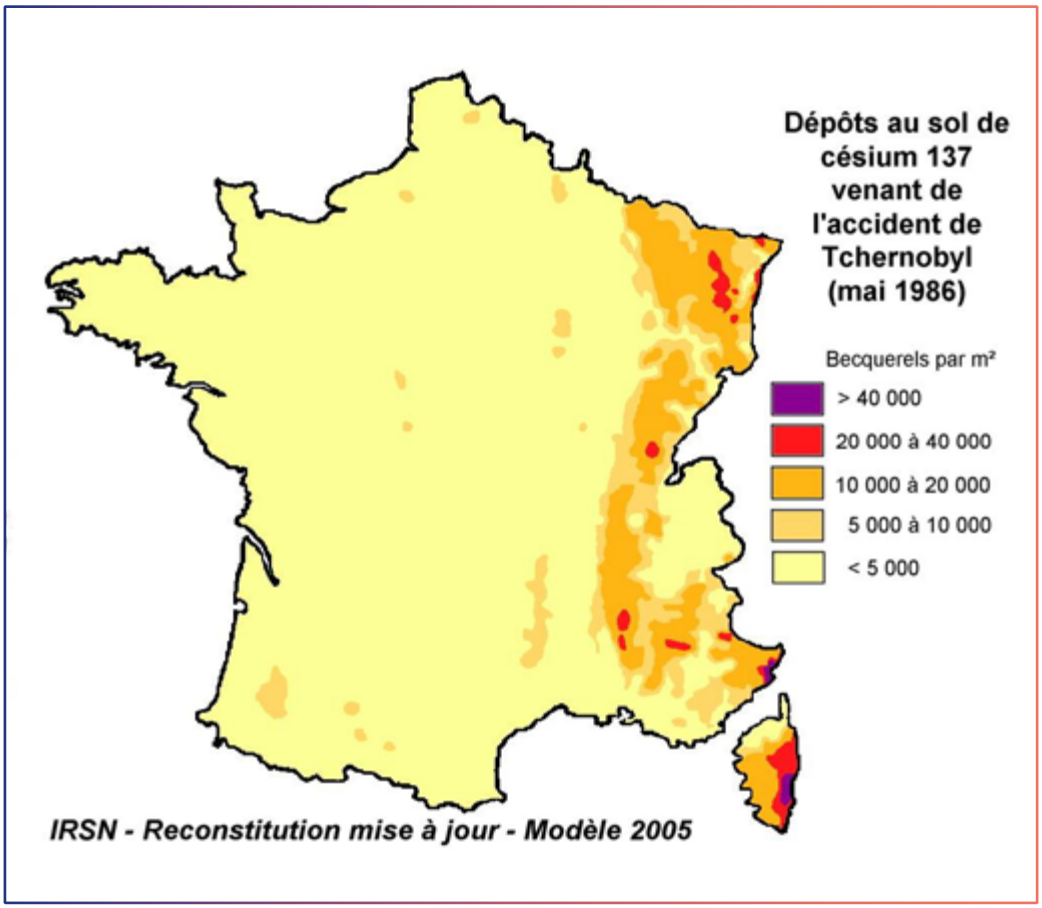


Figure A8 - Carte des activités surfaciques de ^{137}Cs déposées sur les sols français en mai 1986 à l'issue des retombées de l'accident de Tchernobyl

[89] *Si la côte orientale de la Corse fait partie des régions où les dépôts radioactifs consécutifs à l'accident de Tchernobyl ont été parmi les plus importants en France, la rémanence de ces retombées y est faible en raison de la faible propension des sols à fixer le ^{137}Cs.*

Aujourd'hui, si la répartition initiale des dépôts reste, pour l'essentiel de la population qui vit en milieu urbain (entourée de surfaces artificielles), la principale cause de variabilité des doses consécutives à l'accident de Tchernobyl, des doses significativement plus élevées peuvent être reçues par des personnes passant plusieurs heures par jour à l'extérieur en milieu rural ou consommant régulièrement des champignons sauvages ou de la viande de gibier (Renaud et al., 2025). Sauf spécificités locales, ces sols contiennent encore aujourd'hui l'essentiel du ^{137}Cs déposé lors de l'accident de Tchernobyl, contrairement aux surfaces artificielles urbaines (voiries, constructions...) desquelles il a en majeure partie disparu. Ceci induit la nécessité de distinguer pour les estimations des doses externes les personnes fréquentant ces deux types d'environnement, urbain et rural. De plus, à l'intérieur des constructions, le rayonnement provenant de l'extérieur émis par le ^{137}Cs est atténué. Cette atténuation est d'autant plus importante que la construction est vaste et que l'on réside dans les étages. Pour chacun de ces deux types d'environnement, deux populations d'adultes ont été distinguées : celle des adultes passant huit heures par jour en extérieur, du fait de leur travail par exemple, et celle des adultes ne passant que 3 heures par jour à l'extérieur.

Dans l'étude de 2022, les doses efficaces liées à l'incorporation de ^{137}Cs par ingestion de denrées ont été estimées à 4 µSv/an pour un adulte pour lequel une partie des denrées consommées proviendrait de ZRE et à 1 µSv/an pour un adulte dont toutes les denrées consommées proviendraient du reste du territoire. Malgré la prise en compte d'une faible consommation de champignons sauvages (2,5 kg frais par an), ce type de denrée contribue à 75 % de la dose en ZRE et à 50 % de la dose sur le reste du territoire.

Alors que les teneurs en ^{137}Cs des denrées issues de l'agriculture et de l'élevage ont fortement diminué dans les mois suivants les dépôts, puis plus lentement mais régulièrement les années suivantes, les teneurs des champignons et de la viande de gibier sont restées élevées. Ceci résulte du fait qu'en milieu forestier le ^{137}Cs, fixé à la matière organique, reste très biodisponible pour les végétaux et donc pour les animaux qui s'en nourrissent. De ce fait, au fil des décennies, l'écart entre les teneurs en ^{137}Cs des denrées forestières et des denrées issues de l'agriculture et de l'élevage est devenu très important. Sur la base de mesures effectuées pendant la période 2008-2018, l'IRSN a estimé les activités massiques et volumiques moyennes des denrées agricoles et de l'élevage produites sur la majeure partie du territoire entre 0,01 et 0,7 Bq/kg frais, et jusqu'à 1,7 Bq/kg frais pour la viande de bœuf produite en ZRE (IRSN, 2022). Pour cette même période, les activités massiques des champignons ont été estimées à 94 Bq/kg en ZRE et 16 Bq/kg pour le reste du territoire. Dans le cas des viandes de gibier, la valeur moyenne était de 55 Bq/kg en ZRE et 2 Bq/kg sur le reste du territoire. Ces activités moyennes de ^{137}Cs dans les denrées forestières cachent par ailleurs une très importante variabilité à l'échelle micro-locale. Ainsi, les mesures faites par l'ASNR montrent que des champignons sauvages de la même espèce, cueillis le même jour dans la même commune, peuvent présenter des teneurs en ^{137}Cs de quelques Bq/kg frais à plusieurs centaines de Bq/kg frais. De plus, les habitudes de consommation de ces denrées sont extrêmement variables. La plupart des personnes n'en consomment que très peu mais une petite partie de la population peut en consommer de grandes quantités.

Il résulte des constats précédents qu'il est difficile d'estimer de manière générique les doses liées à la consommation de champignons et de viande de gibier. Néanmoins, compte tenu de l'importance que peuvent avoir ces doses au regard de celles liées aux autres voies d'exposition, il est important de disposer d'un ordre de grandeur. Aujourd'hui, sur la majeure partie du pays, la consommation de deux repas par mois, composés chacun de 200 g de champignons sauvages et de 200 g de viande de gibier, est susceptible de conduire à une dose de l'ordre de 5 fois supérieure à la dose totale résultant de toutes les autres voies d'expositions aux retombées cumulées des essais d'armes nucléaires et de l'accident de Tchernobyl, pour un adulte résidant en milieu urbain et travaillant en intérieur. Pour cette même personne, la consommation de deux repas de ce type par semaine conduirait à multiplier la dose par 20. Enfin, une telle consommation de denrées forestières par une personne résidant sur une des zones les plus touchées par les retombées de l'accident de Tchernobyl (50 kBq/m^2) pourrait conduire à une dose approchant 0,1 mSv en 2020.

Exposition aux « retombées radioactives anciennes » en 2020

La dose efficace moyenne en France métropolitaine résultant de l'exposition aux retombées des essais nucléaires atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl - que l'on peut qualifier de « retombées radioactives anciennes » - est actuellement estimée à 0,005 mSv/an, dans une gamme comprise entre 0,003 et 0,013 mSv pour des adultes résidant en milieu urbain, travaillant à l'intérieur de locaux et ne consommant pas de champignons sauvages ni de viande de gibier - scénario représentatif de la majeure partie de la population française.

Aujourd'hui, l'exposition de la très grande majorité de la population française à ces « retombées anciennes » résulte plus des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires que des retombées de l'accident de Tchernobyl. Pour les personnes travaillant en extérieur sur des surfaces naturelles non remaniées depuis l'accident de Tchernobyl (espaces boisés, prairies permanentes...) situées dans les zones les plus touchées par les retombées de cet accident, cette dose peut atteindre 0,026 mSv/an. La consommation de viande de gibier et de champignons peut induire une dose supplémentaire de quelques µSv/an pour une consommation régulière[90] de ces denrées et de plusieurs dizaines de µSv/an pour une consommation fréquente.

Évolution des doses dues aux retombées anciennes depuis le précédent bilan

En dehors de la consommation de champignons sauvages et de viande de gibier, la dose moyenne française due à la rémanence actuelle des retombées anciennes, estimée dans le présent bilan à 5 µSv/an, est inférieure à celle estimée dans le bilan précédent, qui était de 12 µSv/an.

Cette diminution résulte principalement de la baisse des doses attribuables aux retombées de l'accident de Tchernobyl, et plus particulièrement de la dose liée à l'exposition externe au ^{137}Cs présent dans l'environnement. En effet, dans la précédente édition de ce rapport, les doses externes étaient estimées pour des adultes travaillant en extérieur (8 heures par jour) en milieu rural sur des surfaces non ou peu remaniées depuis les dépôts de 1986, ce qui représente un cas très pénalisant. Ce scénario est d'autant plus pénalisant que de telles surfaces sont aujourd'hui limitées et ne concernent probablement qu'une petite minorité de personnes. D'autre part, la valeur de 40 µSv/an - valeur la plus élevée dans la gamme allant de 10 à 40 µSv/an, pour une moyenne de 23 µSv/an - avait été retenue en tant que dose efficace externe pour les zones de rémanence élevées (ZRE) des retombées de l'accident de Tchernobyl (IRSN, 2022). L'application de cette valeur à l'ensemble des habitants des ZRE (plus de 4 millions de personnes) avait induit une majoration importante de la dose moyenne française correspondante.

Ce scénario de la personne travaillant en extérieur en milieu rural existe toujours dans la présente étude. Toutefois l'étude publiée par l'ASNR en 2025 a eu pour objectif d'estimer les doses externes reçues par la très large majorité de français qui vivent entourés de surfaces artificielles en milieu urbain et ne passe en moyenne que peu de temps à l'extérieur (3 heures par jour). C'est ce dernier scénario qui a été retenu pour l'estimation de la moyenne française.

Enfin, la prise en compte de la variabilité spatiale induit, par rapport au précédent bilan, une augmentation modérée des doses liées aux retombées des essais nucléaires, considérées dans la précédente édition comme homogènes sur l'ensemble du territoire, ce qui revient à sous-estimer les doses sur les zones de rémanence élevées de ces retombées, non quantifiables par les mesures récentes. À l'inverse, le fait d'estimer les doses par commune induit une probable diminution de la dose moyenne due aux retombées de l'accident de Tchernobyl, liée au découpage arbitraire des ZRE dans la précédente édition.

Références

- IRSN, 2022 - Le bruit de fond des radionucléides artificiels dans l'environnement français métropolitain - bilan des constats radiologiques régionaux. Rapport IRSN/2022-00131
- Renaud P., Vray F. - Conséquences radiologiques des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires sur le territoire français métropolitain. Rapport IRSN/2024-00559.
- Renaud P., Métivier J.M., Blanchardon E. (2025) - Actualisation de l'évaluation des conséquences radiologiques en France de l'accident de Tchernobyl - contamination de l'environnement et exposition de la population. Rapport ASNR/2025-00253.
- Rapport d'informations complémentaires au bilan de l'état radiologique de l'environnement français de 2021 à 2023. Rapport IRSN/2024-00601

[90] *Consommation régulière = 2 repas par mois composés de 200 g de viande de gibier et de 200 g de champignons ; Consommation fréquente = 2 repas par semaine ou plus composés de 200 g de viande de gibier et de 200 g de champignons*

ANNEXE VII
EXPOSITION AUX ACTIVITÉS NUCLÉAIRES AUTORISÉES

Rejets de fonctionnement des installations nucléaires de base

Le bilan de l'état radiologique de l'environnement (IRSN, 2024), édité tous les trois ans par l'ASNR pour le compte du réseau national de mesure de la radioactivité de l'environnement (RNM), présente des estimations des doses efficaces potentiellement reçues par les populations résidant à proximité de 27 des 37 sites nucléaires français, dont les centres nucléaires de production d'électricité (CNPE). Ces estimations sont basées sur des résultats de mesure et sont en bonne concordance avec celles calculées par modélisation par les exploitants d'installations nucléaires de base (INB) à partir des activités des radionucléides rejetées. Elles sont synthétisées dans le bilan par site, par radionucléide et par voie d'exposition.

Les personnes résidant à proximité des sites nucléaires sont susceptibles d'être concernées par les expositions aux radionucléides mesurés dans l'air et provenant des rejets atmosphériques : par exemple, exposition externe au krypton-85 (^{85}Kr) pour les personnes résidant autour de La Hague, inhalation de poussières d'uranium aux environs des sites de Malvési, du Tricastin ou de Romans-sur-Isère, inhalation ou transfert cutané du tritium autour des sites de Valduc et Grenoble, inhalation de carbone-14 (^{14}C) et de tritium aux environs des CNPE. Cette exposition varie suivant les scénarios et la distance au site, les doses indiquées correspondant le plus souvent au cas le plus pénalisant (proximité immédiate).

En revanche, les doses liées à l'incorporation de radionucléides par ingestion de denrées alimentaires (^{14}C, ^{129}I, tritium, plutonium et américium autour de La Hague, ^{14}C autour des CNPE, tritium autour de Valduc et de Grenoble…), ne peuvent être reçues que par les personnes consommant ces denrées produites localement (dans un rayon de 10 km autour des sites). Les doses estimées sont alors proportionnelles aux quantités consommées.

Dans le cas des CNPE, les doses par ingestion d'eau ou de poissons d'eau douce ne peuvent concerner que les personnes résidant à proximité d'un CNPE situé au bord d'un fleuve. Inversement, les CNPE de la Manche sont seuls concernés par la consommation de denrées marines pêchées à proximité. Dans le cas particulier du CNPE de Flamanville, une personne consommant des denrées marines issues de la pêche locale serait également exposée aux rejets liquides provenant du site de La Hague en raison de sa proximité. Enfin, une personne consommant de l'eau ou des poissons provenant des grands cours d'eau recevant les rejets de plusieurs INB (Rhône, Garonne, Loire, Meuse, Seine, Rhin et Moselle) peut être concernée dans une moindre mesure, même si elle se trouve loin en aval d'une ou plusieurs installations nucléaires.

Ainsi, une personne qui réside autour d'un CNPE et cumulerait toutes les voies d'exposition (consommation régulière des denrées produites localement, 2 L/j d'eau de boisson provenant du fleuve et consommation de quelques kg/an de poissons pêchés en aval des rejets du site) recevrait une dose inférieure à 1 µSv/an, c'est-à-dire moins du millième de la limite d'exposition du public fixée à 1 mSv/an (1 000 µSv/an). Un même cumul de voies d'exposition pour des personnes résidant autour de La Hague conduirait à une dose efficace de l'ordre de quelques µSv/an, qui pourrait atteindre 9 µSv/an (valeur la plus élevée estimée dans le bilan radiologique) en cas de consommation importante de denrées produites localement.

Les doses n'ont pas pu être estimées autour des sites dont l'influence des rejets sur l'environnement est trop faible pour être quantifiable par la mesure. Il s'agit des sites nucléaires de la Marine nationale (Cherbourg, Toulon, Brest), de Fontenay-aux-Roses, Bruyères-le-Châtel, Cadarache, Brennilis, Creys-Malville et du site de l'Aube. Pour ces sites, les doses estimées par les exploitants par calcul sur la base des activités rejetées, toutes voies d'atteinte et radionucléides considérés, sont inférieures, voire parfois très inférieures à 0,1 µSv/an.

Les doses efficaces retenues dans le cadre du présent bilan pour les personnes résidant à proximité des sites nucléaires français, estimée à partir des mesures réalisées dans leur environnement, sont de 1 µSv/an pour les CNPE en activité, les sites CEA de Cadarache, Saclay et Valduc, le site ORANO de Malvési et le site ANDRA CSA, de 10 µSv/an pour le site ORANO de La Hague et de 0,1 µSv/an pour les autres sites nucléaires.

Les mesures montrant que l'influence des rejets radioactifs ne dépasse pas 10 km (et même le plus souvent 5 km), à l'exception du site de Valduc dont les rejets tritiés marquent l'environnement au-delà de 10 km autour du site, c'est cette distance de 10 km par rapport au site qui est retenue pour l'application des doses forfaitaires détaillées ci-avant.

La population autour de chacun des sites est déterminée en utilisant les données INSEE carroyées à 200 m issues du Dispositif Fichier localisé social et fiscal[91]. Pour les carreaux n'étant pas inclus en totalité dans le périmètre, la population est comptabilisée au prorata de la surface du carreau incluse dans le périmètre. De manière majorante, on retient dans ce bilan qu'environ 6 300 000 personnes résident à proximité de sites nucléaires, ce qui représente 10 % de la population métropolitaine. Parmi ces personnes, environ 1 300 000 reçoivent la dose forfaitaire de 1 µSv/an (soit 2 % de la population), 8 500 personnes 10 µSv/an (0,013 % de la population) et environ 4 000 000 0,1 µSv/an (6 % de la population), ce qui induit une dose efficace pondérée pour l'ensemble de ces résidents de 0,29 µSv/an[92]. Ramenées à la population française métropolitaine dans son ensemble, la dose efficace moyenne par habitant est de 0,03 µSv/an.

Rejets de fonctionnement des cyclotrons

Spécificité des installations cyclotron

Sur le territoire français métropolitain, il existe à ce jour une trentaine d'installations exploitant des cyclotrons, pour la plupart destinées à la fabrication de médicaments radiopharmaceutiques à usage diagnostique (scintigraphie et tomographie par émission de positons, TEP) ou thérapeutique (radiothérapie interne vectorisée). Ces installations sont amenées, dans le cadre de leur fonctionnement normal, à rejeter des substances radioactives dans l'environnement *via* leurs effluents atmosphériques. Elles sont autorisées à rejeter des radionucléides de période radioactive inférieure à 100 jours, les principaux étant le fluor-18 et le carbone-11, de périodes respectives de 110 minutes et 20 minutes. Ces installations sont majoritairement implantées en zone urbaine et périurbaine, afin de limiter la décroissance des produits à courte demi-vie lors de leur acheminement. Les activités rejetées dans l'environnement varient en règle générale de quelques dizaines de MBq à plusieurs centaines de GBq par an (Cordelle et al, 2017).

De même que pour les installations nucléaires de base, les rejets des installations cyclotron font l'objet d'autorisations des pouvoirs publics. La quantité de rejets atmosphériques autorisée est variable en fonction de la vocation de l'installation (recherche, production médicale) et des besoins identifiés par l'industriel. En particulier, les limites autorisées pour les rejets dans l'environnement sont plus faibles de plusieurs ordres de grandeur pour les installations de recherche par rapport aux installations de production.

Les rejets des installations cyclotron sont surveillés à l'émissaire mais leur environnement ne l'est pas, contrairement au cas des INB. Il n'est donc pas possible d'évaluer l'exposition de la population vivant autour des cyclotrons sur la base de mesures de radioactivité dans l'environnement. Cependant, chaque exploitant de cyclotron réalise une évaluation de la dose efficace à la population riveraine, basée sur un rejet annuel maximal, dans le cadre de l'étude d'impact de sa demande d'autorisation. Ces évaluations sont utilisées pour le bilan EXPOP.

Population autour des sites

Pour la réalisation des études d'impact, l'exploitant identifie des groupes de population (travailleurs, résidents, établissements recevant du public...) représentatifs des situations d'exposition (IRSN, 2022). Ces groupes se situent généralement à une distance allant de quelques dizaines de mètres jusqu'à environ 1 km autour de l'installation.

En l'absence de mesures dans l'environnement permettant de caractériser la zone d'influence du site, un périmètre de 1 km est retenu ici. Pour chaque site, la dose maximale évaluée dans l'étude d'impact est attribuée à l'ensemble de la population présente dans ce périmètre.

La population autour de chacun des sites est déterminée ici en utilisant les données INSEE carroyées à 200 mètres, issues du Dispositif Fichier localisé social et fiscal. Pour les carreaux n'étant pas inclus en totalité dans le périmètre, la population est comptabilisée au prorata de la surface du carreau incluse dans le périmètre.

[91] *https://www.insee.fr/fr/statistiques/7655515*

[92] *Les personnes résidant en bordure et en aval des grands cours d'eau qui reçoivent les rejets liquides des installations nucléaires et qui potentiellement peuvent ingérer de l'eau ou des poissons provenant de ces cours d'eau ne sont pas prises en compte dans cette étude.*

Évaluation des expositions sur la base des études d'impact

L'évaluation de l'exposition de la population présentée dans l'étude d'impact repose sur une modélisation de la dispersion atmosphérique pour un scénario de rejet annuel maximal. Cette approche conduit à une évaluation volontairement supérieure à l'exposition réelle de la population.

Sur la base des rejets maximaux autorisés, l'exposition annuelle moyenne de la population vivant à proximité d'un cyclotron est évaluée à 0,007 mSv/an (7 µSv/an). Rapportée à l'ensemble de la population de France métropolitaine, l'exposition annuelle moyenne est de 0,00004 mSv/an (0,04 µSv/an).

Dans les études d'impact présentées par les exploitants de cyclotrons dans leurs demandes d'autorisation, les expositions potentielles évaluées pour les riverains sont souvent supérieures à celles des personnes vivant à proximité des INB, ces dernières étant en général plus éloignées des points de rejet. Toutefois, la population concernée par les rejets des INB est moins nombreuse que dans le cas des installations cyclotron. De plus, aucune accumulation dans l'environnement ni rémanence après l'arrêt de l'exploitation ne sont attendues, en raison de la courte durée de vie des radionucléides rejetés.

Évaluation des expositions sur la base des études d'impact et des rejets mesurés à l'émissaire

Afin d'obtenir une estimation dosimétrique plus réaliste, les évaluations présentées dans les études d'impact ont été ajustées de manière proportionnelle aux rejets réels mesurés annuellement à l'émissaire[94]. Lorsque ces données ne sont pas disponibles, l'estimation dosimétrique prise en compte demeure celle figurant dans l'étude d'impact.

En s'appuyant à la fois sur les études d'impact et sur les rejets annuels mesurés à l'émissaire, quand cela est possible, la dose efficace annuelle moyenne reçue par la population vivant à proximité d'un cyclotron est évaluée à 0,002 mSv/an (2 µSv/an). Rapportée à l'ensemble de la population de France métropolitaine, l'exposition annuelle moyenne s'élève à 0,00001 mSv/an (0,01 µSv/an).

Références

- IRSN, 2024 - Bilan de l'état radiologique de l'environnement français de 2021 à 2023. Rapport IRSN 2024-00600.
- Cordelle A., Van Ryckeghem S., Fallot A. - État des lieux en France des rejets radioactifs gazeux émis par les installations détenant un cyclotron, Radioprotection, Volume 52, Number 4, October-December 2017.
- IRSN, 2022 – Eléments méthodologiques pour l'élaboration de l'étude d'impact radiologique d'une installation cyclotron – Rapport IRSN/2022-00193.

[94] *Information obtenue pour environ 70 % des sites au moment de la réalisation de l'étude.*

ASNR Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection

Siège social :
15 rue Louis Lejeune
92120 Montrouge

Adresse postale :
BP 17 - 92262
Fontenay-aux-Roses cedex

Divisions territoriales :
asnr.fr/nous-contacter

info@asnr.fr
Tél. : 01 58 35 88 88

asnr.fr