A thick red border frames the top and left sides of the page, with a white rectangular area in the upper left corner containing the IRSN logo and tagline.

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

Exposition de la population française aux rayonnements ionisants

Rapport IRSN/2015-00001

Pôle radioprotection, environnement, déchets et
crise

RESUME

CE RAPPORT PRESENTE LE BILAN DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION FRANÇAISE AUX RAYONNEMENTS IONISANTS. LES EXPOSITIONS PRISES EN COMPTE SONT CELLES LIEES AUX RAYONNEMENTS COSMIQUES ET TELLURIQUES, AU RADON, A L'INCORPORATION DE RADIONUCLEIDES NATURELS, A L'IMAGERIE MEDICALE ET AUX SOURCES INDUSTRIELLES ET MILITAIRES.

EN COMPLEMENT D'UNE VALEUR DE DOSE EFFICACE TOTALE MOYENNEE POUR LA FRANCE, RETENUE COMME INDICATEUR MACROSCOPIQUE DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION, LES VARIATIONS DE LA DOSE EFFICACE POUR CHAQUE SOURCE D'EXPOSITION SONT EGALEMENT PRESENTEES. SUR CETTE BASE, LA VARIATION DE LA DOSE EFFICACE TOTALE EST EGALEMENT ABORDEE.

ABSTRACT

THIS REPORT DEALS WITH THE EXPOSURE OF THE FRENCH POPULATION TO IONIZING RADIATION. THE EXPOSURES TAKEN INTO ACCOUNT ARE RELATED TO COSMIC AND TELLURIC RADIATIONS, TO RADON, TO INGESTION OF NATURAL RADIONUCLIDES, TO MEDICAL IMAGING AND TO INDUSTRIAL AND MILITARY SOURCES.

ADDITIONALLY TO THE MEAN EFFECTIVE DOSE, CONSIDERED AS THE MACROSCOPIC INDICATOR OF THE POPULATION EXPOSURE, THE VARIATIONS OF THE EFFECTIVE DOSE FOR EACH SOURCE OF EXPOSURE ARE ALSO PRESENTED. THEN, THE VARIATION OF THE TOTAL EFFECTIVE DOSE IS PRESENTED.

MOTS-CLES

Exposition, rayonnements ionisants, population, sources naturelles, cosmiques, telluriques, radon, alimentation, sources artificielles, médical, industrie

Table des matières

1 INTRODUCTION	3
2 ENJEUX DES EXPOSITIONS A DE FAIBLES DOSES	4
3 EXPOSITION ET VARIABILITE	6
3.1 EXPOSITIONS ASSOCIEES AUX SOURCES NATURELLES DE RAYONNEMENTS IONISANTS	6
3.1.1 Exposition aux rayonnements cosmiques.....	6
3.1.2 Exposition aux rayonnements telluriques	8
3.1.3 Exposition liée à l'incorporation de radionucléides.....	8
3.1.4 Exposition au radon	11
3.2 EXPOSITIONS ASSOCIEES AUX SOURCES ARTIFICIELLES.....	12
3.2.1 Exposition à des sources industrielles et militaires	12
3.2.2 Exposition « médicale »	15
3.3 BILAN DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION FRANÇAISE.....	17
3.3.1 Exposition moyenne.....	17
3.3.2 Variabilité de l'exposition	18
3.3.3 Estimation de l'exposition individuelle.....	21
4 CONCLUSION	22
5 REFERENCES	22

1 INTRODUCTION

Les français dans leur ensemble sont exposés en permanence à des rayonnements ionisants d'origines naturelle et artificielle.

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

- l'irradiation cosmique, due aux photons et aux particules venant de l'espace ;
- l'irradiation tellurique, due aux éléments radioactifs présents dans la croûte terrestre depuis la formation de la Terre ;
- l'incorporation d'éléments radioactifs naturels, dans l'air ou dans les produits consommés, présents depuis l'origine de la Terre ou recréés par le bombardement cosmique. L'ingestion de radionucléides naturels présents dans l'eau et dans la chaîne alimentaire constitue la voie prépondérante d'incorporation de ces éléments ;
- l'inhalation de radon, gaz radioactif émanant du sol et pouvant se concentrer dans les locaux.

L'exposition aux rayonnements artificiels peut quant à elle être divisée en deux grandes catégories :

- l'exposition résultant de l'utilisation des rayonnements ionisants à des fins diagnostiques et thérapeutiques, appelée exposition « médicale » par la suite. Les expositions liées à des actes thérapeutiques de radiothérapie externe et interne correspondent à des fortes doses, délivrées localement pour soigner les pathologies concernées. Les patients ainsi traités constituent une fraction de la population générale exposée dans un cadre très particulier. C'est pourquoi leur exposition n'est pas prise en compte dans le cadre de ce bilan ;
- l'exposition à des sources industrielles et militaires : rejets des installations nucléaires, retombées de particules radioactives libérées lors des accidents nucléaires (ceux de Tchernobyl et de Fukushima par exemple) et des tests d'armes nucléaires dans l'atmosphère, sols contaminés lors d'activités humaines impliquant l'utilisation de substances radioactives.

Dans le cadre d'une démarche internationale soutenue par le Comité Scientifique des Nations Unies sur les effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR - cf. référence [1]), ce rapport présente un bilan actualisé de l'exposition de la population française métropolitaine à l'ensemble de ces sources d'exposition, en les mettant en perspective les unes par rapport aux autres. Pour ce faire, la dose efficace¹, exprimée en millisievert (mSv), est utilisée pour toutes les expositions, si diversifiées soient elles : exposition externe du corps entier par des rayonnements gamma, contamination interne par des radionucléides émetteurs de rayonnements alpha... En effet, conçue par la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) comme indicateur de risque d'effets stochastiques pour des expositions qui peuvent être hétérogènes et concerner différents types de rayonnements, la dose efficace convient pour comparer des expositions dans différentes situations. La dose efficace est donc estimée pour chaque source d'exposition ainsi que la dose efficace totale pour l'ensemble de ces sources.

¹ Dose efficace : permet d'estimer l'exposition d'une personne en tenant compte de la sensibilité des différents tissus ou organes affectés et de la nature des rayonnements

Ce rapport complète par ailleurs les bilans réalisés par l'IRSN concernant l'exposition des patients bénéficiant d'examens à visée diagnostique (cf. référence [2], disponible sur le site internet de l'IRSN) et celle des travailleurs aux rayonnements ionisants (cf. référence [3], disponible sur le site internet de l'IRSN). Cette exposition professionnelle aux rayonnements ionisants est exclue du bilan présenté dans ce rapport.

La dose efficace associée à chaque source d'exposition présente une variabilité plus ou moins importante selon la source considérée (flux de rayonnement à la surface du globe ou concentration en radon dans les maisons, par exemple) et les modes de vie (temps passé à l'intérieur et régime alimentaire, par exemple). Aussi, en complément d'une valeur de dose efficace totale moyennée pour la France, retenue comme indicateur macroscopique de l'exposition de la population, les variations de la dose efficace pour chaque source d'exposition sont également présentées, lorsqu'elles sont significatives : une valeur basse et une valeur haute ont été déterminées à partir, lorsqu'ils peuvent être estimés, des 5^{ème} et 95^{ème} centiles de l'exposition.

La perception des risques nucléaires et radiologiques par les français est présentée dans le baromètre annuel de l'IRSN (cf. référence [4], disponible sur le site internet de l'IRSN). Par la mise en perspective des contributions de chacune des sources évoquées ci-dessus à l'exposition globale de la population, ce rapport précise les risques associés à chacune d'entre elles. Il montre ainsi que la perception de ces risques par la population peut différer fortement de l'estimation qui en est faite.

Les estimations de dose présentées dans ce rapport sont basées sur les règles de conversion des expositions en doses efficaces actuellement en vigueur aux niveaux national et international et ne tiennent pas compte des évolutions possibles à venir de celles-ci.

Ce rapport sera complété ultérieurement par une synthèse de l'exposition de la population des DROM-COM.

Après un rappel des enjeux liés à l'exposition à de faibles doses de rayonnements ionisants, ce rapport détaille les expositions associées, d'une part aux sources naturelles de rayonnements ionisants, d'autre part aux sources artificielles. Il présente enfin un bilan de l'exposition moyenne cumulée à l'ensemble de ces sources, ainsi que des cas illustrant la variabilité de cette exposition.

2 ENJEUX DES EXPOSITIONS A DE FAIBLES DOSES

L'exposition aux rayonnements ionisants pose la question de son impact potentiel sur la santé de l'homme. Les effets pour la santé d'une exposition aux rayonnements ionisants sont regroupés en deux catégories générales :

- les effets dits déterministes dus en grande partie à l'élimination/dysfonctionnement de cellules à la suite d'une exposition à de fortes doses, dont la gravité est proportionnelle à la dose ;
- les effets dits stochastiques, tels que les cancers, dont la probabilité d'apparition est considérée proportionnelle à la dose reçue, y compris pour les faibles doses.

Les doses liées à l'ensemble des expositions présentées dans ce rapport sont qualifiées de « faibles doses » et sont donc associées seulement à des effets stochastiques potentiels. Une des priorités dans

le domaine de la recherche pour la radioprotection, tant au niveau national qu'international, est d'améliorer les estimations des risques associés à ces niveaux d'exposition, que celle-ci soit d'origine professionnelle, due à la radioactivité naturelle ou consécutive à la réalisation d'une activité d'imagerie médicale à visée diagnostique ou industrielle.

A ce jour, la relation entre la dose de rayonnement reçue et le risque de développer un effet cancéreux est supposée de type « linéaire sans seuil ». Ainsi, la probabilité d'un tel effet est supposée proportionnelle à la dose reçue, même dans le domaine des faibles doses.

Cette approche reste soumise à de nombreuses incertitudes puisque :

- le risque à de faibles doses d'exposition est extrapolé des études épidémiologiques sur les survivants des bombardements atomiques au Japon en 1945. L'exposition de cette population, de type irradiation externe par des rayonnements gamma et neutroniques à des doses généralement fortes reçues sur de brèves périodes, est très différente de celles rencontrées par la plupart des personnes exposées à des rayonnements naturels, plus faibles et étalées sur de longues durées ;
- les études épidémiologiques réalisées jusqu'à présent n'ont pas permis de détecter des augmentations significatives du risque de développer un cancer à des niveaux de dose inférieurs à environ 100 mSv ;
- en l'état actuel des connaissances, l'hypothèse d'une relation linéaire entre la dose et l'effet estimé en termes de risque de survenue d'un cancer sur la vie entière conduit à retenir un excès de risque² de 0,5% de mortalité par cancer solide sur la durée de vie moyenne pour une exposition additionnelle de 100 mSv.

L'IRSN conduit depuis plusieurs années, notamment en lien avec l'agenda stratégique de la plateforme européenne MELODI, des recherches afin de déterminer les effets de ces expositions à faibles doses en termes de développement de pathologies cancéreuses et non cancéreuses. Plusieurs études épidémiologiques sont ainsi conduites pour estimer le risque de développer un cancer ou une pathologie non cancéreuse associés à une exposition de l'homme aux rayonnements ionisants à faibles doses, notamment :

- dans le cadre d'expositions professionnelles aux rayonnements ionisants, dans le but de quantifier les risques de cancer et de maladies cardio-vasculaires associés à une exposition chronique, en particulier chez les travailleurs de l'industrie nucléaire et les mineurs d'uranium. Ces études permettent en France le suivi de plus de 60 000 personnes sur plusieurs décennies ;
- pour les expositions d'origine médicale, en particulier en ce qui concerne les doses délivrées lors d'examens pédiatriques scannographiques. Une étude incluant plus de 130 000 enfants ayant bénéficié d'un ou de plusieurs scanners est en cours en France ;
- pour les expositions environnementales. Ces études ont contribué à démontrer l'existence d'un risque de cancer pulmonaire associé à l'exposition au radon dans l'habitat, et se poursuivent

² Un excès de risque de 1% sur la durée de vie équivaut à 1 cas supplémentaire pour 100 personnes exposées.

actuellement avec pour objectif d'analyser l'hypothèse d'un lien entre la radioactivité naturelle et les leucémies infantiles. Les conséquences potentielles d'une exposition environnementale, via l'ingestion de produits alimentaires contaminés, sont par ailleurs étudiées à l'IRSN chez des enfants (plus de 15 000) vivant sur des territoires russes contaminés à la suite de l'accident de Tchernobyl. L'objectif de cette étude clinique est de vérifier s'il existe un lien entre les troubles du rythme cardiaque et des opacités du cristallin chez ces enfants et leur niveau de contamination interne par du césium 137.

Du fait de la difficulté à mettre directement en évidence les effets des faibles doses de rayonnements ionisants par des études épidémiologiques, des études expérimentales sont par ailleurs menées. Ainsi, des recherches sur les pathologies non cancéreuses ont été mises en place à l'IRSN pour comprendre les effets et les mécanismes associés à une exposition chronique à faible dose due à un environnement contaminé (irradiation externe et contamination interne par l'eau de boisson).

3 EXPOSITION ET VARIABILITE

Ce chapitre présente la dose individuelle associée à chaque source d'exposition, en termes de moyenne et de variabilité. Il aborde ensuite l'exposition moyenne cumulée pour l'ensemble de ces sources et illustre avec quelques cas les variations possibles de cette exposition cumulée.

3.1 EXPOSITIONS ASSOCIEES AUX SOURCES NATURELLES DE RAYONNEMENTS IONISANTS

Sont successivement abordées l'exposition aux rayonnements cosmiques, celle aux rayonnements telluriques, celle liée à l'incorporation de radionucléides naturels contenus dans les denrées et l'eau de boisson puis celle associée au radon.

3.1.1 EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS COSMIQUES

Le système solaire est continuellement bombardé par des particules chargées de haute énergie (protons, particules alpha, électrons et ions lourds) constituant le rayonnement cosmique dit primaire. Il est admis que ces particules ont une origine galactique (soleil, étoiles à forte activité, explosions de supernovae, rayonnements des pulsars) et une origine extragalactique. En pénétrant dans l'atmosphère terrestre, les particules primaires incidentes interagissent avec les constituants de l'air en donnant naissance à un ensemble complexe de particules secondaires (protons, neutrons...) et de photons. Les particules produites réagissent à leur tour pour donner des phénomènes de cascades nucléoniques dans l'atmosphère.

La surface de la Terre est donc continuellement exposée à ces rayonnements primaire et secondaire, à des niveaux différents en fonction de :

- l'altitude. L'atmosphère terrestre agit comme un écran sur les particules primaires de haute énergie ; plus l'altitude est élevée et moins le flux de particules primaires est atténué ;
- la latitude. Les particules chargées de basse énergie sont déviées par le champ magnétique terrestre, ce phénomène dépendant de la latitude. L'entrée des particules est ainsi facilitée au niveau des pôles, où les particules suivent les lignes de force du champ magnétique, par

comparaison au niveau de l'équateur. Au niveau de la France métropolitaine, l'effet de ce paramètre est secondaire et n'est pas pris en compte dans les évaluations qui suivent.

L'exposition aux rayonnements cosmiques se caractérise par :

- des débits de dose variables sur le territoire en fonction de l'altitude (cf. figure 1) ;
- une dose efficace variant de 0,3 mSv/an à 1,68 mSv/an en fonction des communes ;
- une dose efficace moyenne pour l'ensemble du territoire de 0,31 mSv/an, 95% de la population recevant une dose inférieure à 0,36 mSv. Cette variabilité, considérée comme peu significative en valeur absolue par rapport à celle des autres sources d'exposition abordées dans ce rapport, n'est pas prise en compte par la suite.

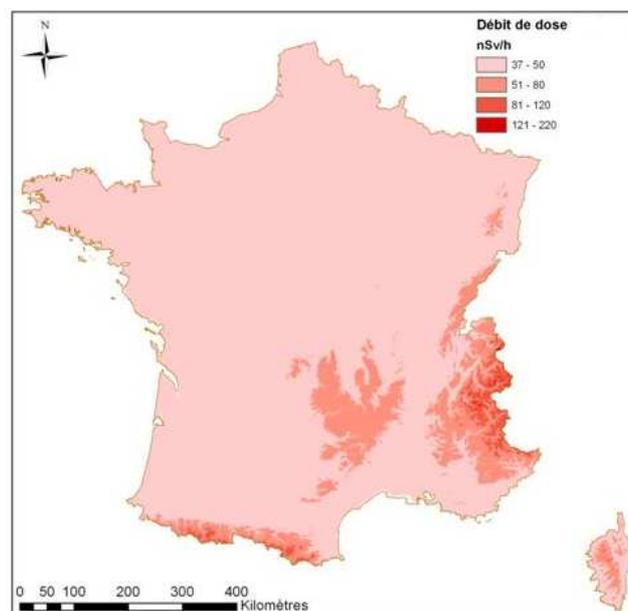


Figure 1: Débit de dose lié aux rayonnements cosmiques estimé à partir des données d'altitude (source IRSN)

L'exposition de la population aux rayonnements cosmiques doit également prendre en compte celle liée au transport aérien. En effet, l'exposition aux rayonnements cosmiques augmentant avec l'altitude, les personnes amenées à voyager en avion sont soumises à une exposition supplémentaire.

L'exposition aux rayonnements cosmiques due au transport aérien se caractérise par :

- une dose moyenne par habitant de 0,01 mSv/an, pour une moyenne de 0,3 vol/habitant ;
- une dose de 0,55 mSv/an en moyenne pour les voyageurs dits « fréquents », c'est-à-dire ceux effectuant entre dix et trente vols par an (soit environ 11% des passagers ou 3% de la population, selon une enquête DGAC 2012).

3.1.1.1 Bilan de l'exposition aux rayonnements cosmiques

Dans le cadre de ce bilan, les valeurs suivantes sont retenues pour l'exposition aux rayonnements cosmiques, valeurs cumulant l'exposition à terre et celle liée au transport aérien :

- une dose efficace moyenne de 0,32 mSv/an pour la population générale ;
- une dose efficace de 0,86 mSv/an pour le cas d'une personne prenant fréquemment l'avion.

3.1.2 EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS TELLURIQUES

La croûte terrestre contient des radionucléides dits « primordiaux », présents depuis la création de la Terre et de périodes radioactives suffisamment longues devant l'âge de celle-ci pour y subsister en quantité importante. Ces radionucléides sont l'uranium 235 (^{235}U), l'uranium 238 (^{238}U) et le thorium 232 (^{232}Th) qui, en se désintégrant, donnent naissance à autant de familles de radionucléides naturels. Outre ces trois familles naturelles radioactives, existent d'autres radionucléides dont la désintégration conduit à des éléments stables : les plus importants d'entre eux sont le potassium 40 (^{40}K) et, dans une moindre mesure, le rubidium 87 (^{87}Rb).

L'ensemble de ces radionucléides sont, en se désintégrant, à l'origine d'une irradiation externe depuis le sol terrestre. Cette irradiation représente l'exposition aux rayonnements telluriques. Elle 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 ;
- une dose efficace variant de 0,29 mSv/an à 2 mSv/an en fonction des communes ;
- une dose efficace moyenne pour l'ensemble du territoire évaluée à 0,62 mSv/an, 5% et 95% de la population recevant une dose inférieure respectivement 0,36 mSv/an et 1,1 mSv/an.

3.1.2.1 Bilan de l'exposition aux rayonnements telluriques

Dans le cadre de ce bilan, les valeurs suivantes de doses efficaces liées à l'exposition aux rayonnements telluriques sont retenues :

- moyenne pour la population générale : 0,62 mSv/an ;
- gamme typique de variation : 0,36 mSv/an à 1,1 mSv/an.

3.1.3 EXPOSITION LIEE A L'INCORPORATION DE RADIONUCLEIDES

3.1.3.1 Introduction

Les denrées alimentaires 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 primordiaux), ou qui sont produits en permanence dans les hautes couches de l'atmosphère sous l'effet du rayonnement cosmique (radionucléides cosmogéniques).

Les 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) (chaînes U-Th), entrent dans la chaîne alimentaire terrestre en étant absorbés par les racines des végétaux ou par remise en suspension et dépôt foliaire de particules de sols. Les principaux radionucléides cosmogéniques que sont le carbone 14 (^{14}C), le béryllium 7 (^7Be), le sodium 22 (^{22}Na) et le tritium (^3H), sont transférés principalement par voie aérienne aux feuilles des végétaux. 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 sur des particules atmosphériques et se déposent sur les plantes.

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. En milieu aquatique continental, ils proviennent essentiellement du drainage des sols.

Les deux principales composantes de l'exposition de la population liée à l'incorporation de radionucléides naturels par l'alimentation en France sont celles correspondant au potassium et aux descendants des chaînes U-Th.

Pour les mêmes raisons que celles exposées ci-dessus, les feuilles de tabac contiennent des radionucléides naturels. La combustion du tabac libérant ces derniers, ils sont inhalés lors de la consommation de cigarettes. Ceci constitue donc une voie supplémentaire d'exposition.

3.1.3.2 Estimation dosimétrique

L'exposition associée à l'incorporation par ingestion ou inhalation de radionucléides se caractérise par les éléments suivants :

- la dose efficace moyenne liée à l'ensemble des radionucléides cosmogéniques est de l'ordre de 0,02 mSv/an dont la moitié est due au seul ^{14}C . Cette dose est très faible au regard de celles liées au ^{40}K et aux descendants des chaînes de désintégration U-Th ;
- la dose efficace moyenne liée au ^{40}K , dont la teneur dans l'organisme est régulée (kaliémie), est de l'ordre de 0,18 mSv/an ;
- la dose efficace moyenne liée aux descendants des chaînes U-Th dans les denrées alimentaires est de 0,32 mSv/an. Sa variabilité est principalement due à la consommation de poissons/fruits de mer et les gammes typiques de variation sont présentées sur la figure 2 ci-dessous.

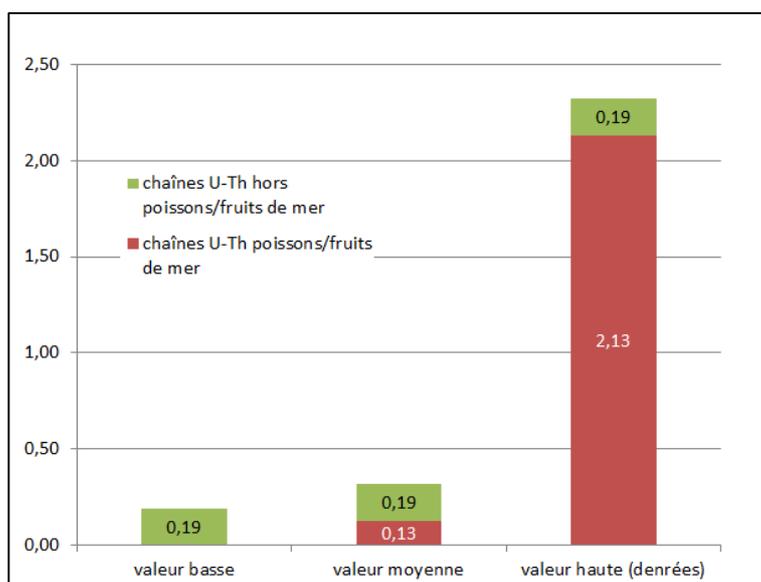


Figure 2 : Synthèse des doses (exprimées en mSv/an) dues à l'incorporation des descendants des chaînes U-Th dans les denrées alimentaires

- la dose efficace moyenne liée aux descendants des chaînes U-Th dans les eaux de boisson est estimée à 0,01 mSv/an. Une valeur haute de 0,3 mSv/an est retenue pour illustrer la variabilité de cette exposition, valeur seuil préconisée par la Direction générale de la santé pour rechercher des solutions de réduction de cette exposition (cf. référence [5]) ;
- la dose efficace moyenne liée à la consommation de tabac est évaluée³ à environ 0,02 μ Sv/an, avec une variation entre 0 mSv/an (non-fumeur) à 0,3 mSv/an (gros fumeur).

3.1.3.3 Bilan de l'exposition liée à l'incorporation de radionucléides

L'exposition aux radionucléides telluriques et cosmiques via l'incorporation de denrées alimentaires et des eaux de boisson et la consommation de tabac est synthétisée sur la figure 3 pour les différents scénarii pris en compte dans cette étude.

La valeur moyenne de cette exposition est estimée à 0,55 mSv/an. En fonction des habitudes de consommation de chacun, en particulier des poissons/fruits de mer et du tabac, cette exposition peut fortement varier, de 0,4 mSv/an jusqu'à plus de 3,1 mSv/an pour, respectivement, les personnes ne consommant pas ces produits et celles en consommant de façon importante.

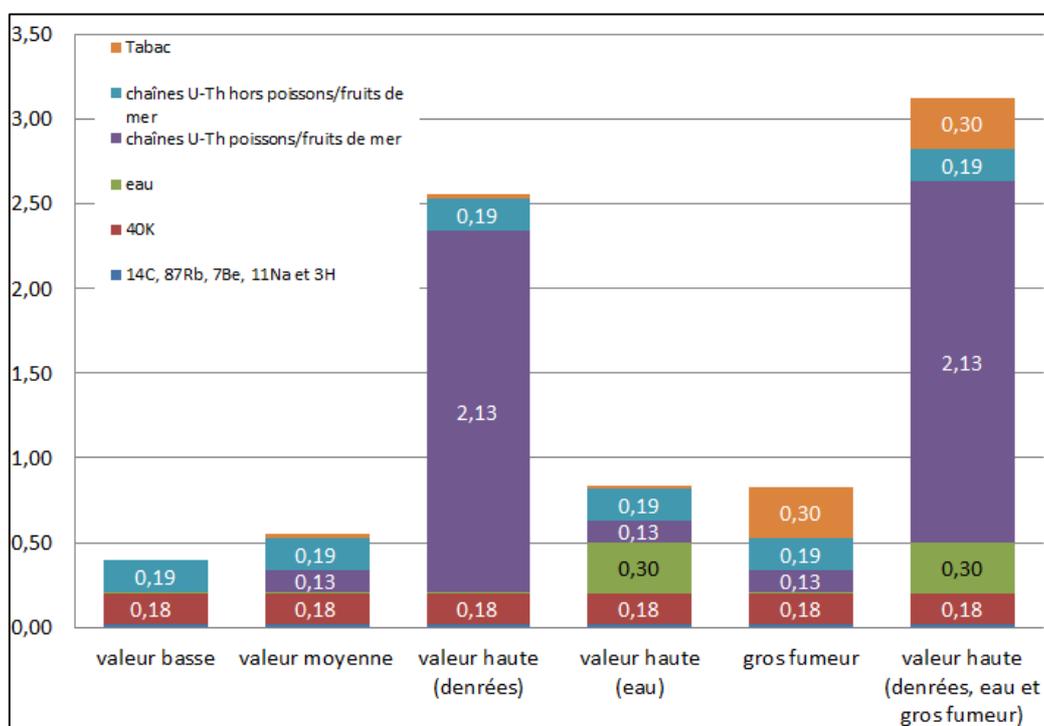


Figure 3 : Synthèse des doses (exprimées en mSv/an) dues à l'incorporation par un adulte de radionucléides naturels

³ En première approche, pour les besoins de ce bilan, la consommation de cigarettes n'étant bien évidemment pas uniforme pour l'ensemble de la population. Pour information, en 2013, 29 % des français fumaient (tous âges confondus) et la tranche d'âge 26-34 ans est celle pour laquelle la consommation était la plus importante.

3.1.4 EXPOSITION AU RADON

Le radon est un gaz radioactif d'origine naturelle. Il est issu de la désintégration de l'uranium et du radium présents dans la croûte terrestre. Il émane du sol (et dans une moindre mesure des matériaux de construction et de l'eau) et se dilue dans l'air que l'on respire. La concentration en radon dans l'air varie ainsi selon la teneur en uranium naturel du sous-sol et est plus importante pour des sous-sols granitiques et volcaniques. L'exposition de l'homme à l'air libre varie donc d'un lieu à un autre mais elle reste marginale par rapport à l'exposition à l'intérieur des bâtiments car :

- le radon se concentre dans les bâtiments clos, après avoir migré à travers les parties directement en contact avec le sol (cave, vide sanitaire...) dont les caractéristiques influent également sur la variabilité de l'exposition ;
- l'homme passe l'essentiel de son temps à l'intérieur (habitat, lieu de travail, bâtiments recevant du public).

L'exposition au radon se caractérise par :

- une activité volumique du radon à l'intérieur de l'habitat variable sur le territoire, comme illustré sur la figure 4 suivante. Cette figure présente une estimation des activités volumiques du radon dans l'habitat réalisée à partir d'une modélisation géostatistique utilisant des résultats de mesures de la concentration en radon et la cartographie du potentiel radon des formations géologiques ;

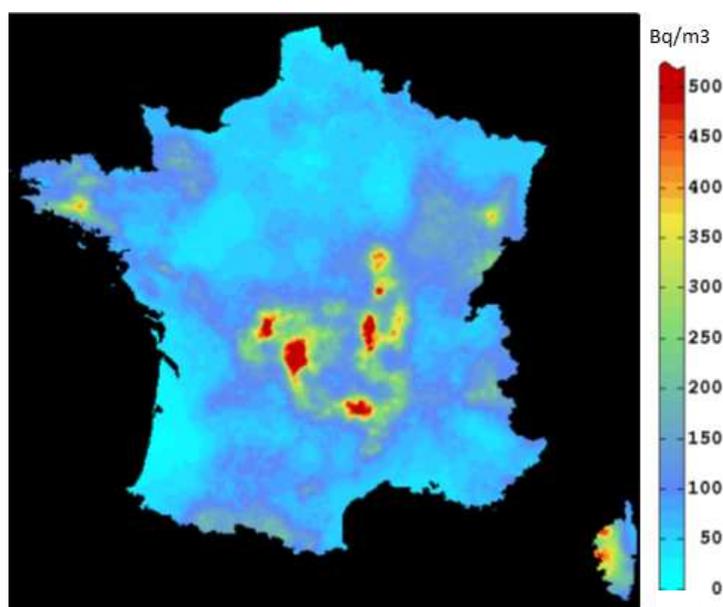


Figure 4 : Activité volumique du radon à l'intérieur de l'habitat (source IRSN)

- une dose efficace variant de 0,3 mSv/an à 19,2 mSv/an en fonction des communes ;
- une dose efficace moyenne pour l'ensemble du territoire évaluée à 1,43 mSv/an, 5% et 95% de la population recevant une dose inférieure respectivement à 0,54 mSv et 3,15 mSv/an.

3.1.4.1 Bilan de l'exposition au radon

Dans le cadre de ce bilan, les valeurs suivantes de doses efficaces pour l'exposition au radon sont retenues :

- moyenne pour la population générale : 1,43 mSv/an ;
- gamme typique de variation : 0,54 mSv/an à 3,15 mSv/an.

A noter que la prise en compte des résultats des récentes études épidémiologiques pourrait conduire les instances internationales à réviser prochainement le coefficient de dose associé à l'exposition au radon. Dès lors, les doses présentées ci-dessus pourraient être augmentées d'un facteur d'environ 2 à 3.

3.2 EXPOSITIONS ASSOCIEES AUX SOURCES ARTIFICIELLES

3.2.1 EXPOSITION A DES SOURCES INDUSTRIELLES ET MILITAIRES

Sont prises en compte les expositions suivantes :

- expositions associées aux retombées de particules radioactives libérées lors des anciens tests d'armes nucléaires dans l'atmosphère ;
- expositions associées aux retombées de particules radioactives libérées lors des accidents nucléaires de Tchernobyl et de Fukushima ;
- expositions associées aux rejets des installations nucléaires lors de leur fonctionnement.

3.2.1.1 Retombées des essais nucléaires atmosphériques

Plus de 2400 essais nucléaires, dont 543 essais atmosphériques, ont été réalisés par les Etats-Unis, la Russie, la Grande-Bretagne, la France et la Chine entre 1945 et 1980. Les sites d'essais sont répartis sur l'ensemble du globe, mais la plupart des explosions ont eu lieu dans l'hémisphère nord. A partir de 1961, les essais atmosphériques laissent progressivement la place aux essais souterrains, moins polluants pour la biosphère. Le dernier tir atmosphérique a eu lieu en Chine le 18 octobre 1980.

A chaque explosion aérienne, des particules radioactives sont libérées dans l'atmosphère à une altitude qui dépend des conditions du tir. Elles y séjournent de quelques heures à quelques mois avant de retomber au sol, après avoir, dans le second cas, été transportées sur des milliers de kilomètres par les vents dominants. Compte-tenu des phénomènes de circulation atmosphérique, de la répartition des sites, du nombre d'essais et de la variété de puissance des tirs, les dépôts affectent la planète toute entière.

En raison de la localisation des sites de tir, l'hémisphère nord a reçu 75% des retombées radioactives totales. Les grandes circulations de masses d'air ont concentré les dépôts dans les régions tempérées, notamment dans la bande comprise entre le 40° et le 50° degré de latitude, où se trouve la France.

Transférés à toutes les composantes de l'environnement (air, eau, sols, denrées), l'iode 131, le césium 137 et le strontium 90 ont constitué l'essentiel de la contamination de la chaîne alimentaire. Pour la plupart des autres radionucléides, moins mobiles dans l'environnement, l'atteinte a été limitée aux légumes à feuilles : salades, épinards... Si les dépôts des radionucléides à vie très courte comme l'iode

131 ont été les plus importants, la contamination de la chaîne alimentaire qui en résulte a disparu rapidement. La contamination de la chaîne alimentaire par le césium 137 et le strontium 90, radionucléides à vie longue, ne diminue quant à elle que lentement depuis le milieu des années 60.

Après avoir atteint un maximum de 0,3 mSv au cours de l'année 1963, la dose efficace annuelle en France liée aux retombées des essais est aujourd'hui de l'ordre de 0,01 mSv. Cette exposition est considérée comme homogène sur l'ensemble du territoire.

3.2.1.2 Retombées des accidents de Tchernobyl et de Fukushima

3.2.1.2.1 *Tchernobyl*

En France, les doses efficaces reçues par la population à la suite de l'accident de Tchernobyl ont été faibles, les niveaux les plus élevés ayant été reçus dans l'Est du pays (cf. figure 5).

En 1986, année de l'accident, les doses efficaces reçues par les personnes résidant dans les zones les plus touchées de l'est du pays étaient en dessous de 1 mSv/an. Ces doses étaient principalement liées à l'ingestion de denrées contaminées, notamment le lait et les produits laitiers, les légumes à feuilles et la viande de bœuf. A partir de 1987, la contamination de la chaîne alimentaire étant beaucoup plus faible, c'est l'exposition aux rayonnements émis par ce qu'il reste des dépôts qui a contribué le plus aux doses annuelles. Les années suivantes, les doses reçues du fait des éléments radioactifs persistant dans l'environnement ont décliné de façon continue, pour atteindre à ce jour une valeur moyenne inférieure à 0,01 mSv/an. Toutefois, certains comportements alimentaires très particuliers, comme par exemple une importante consommation de champignons de forêt et de gibier provenant de l'est du pays, peuvent conduire à des doses plus élevées, de l'ordre de quelques dizaines de $\mu\text{Sv}/\text{an}$. Cette variation, considérée comme peu significative en valeur absolue par rapport aux autres sources d'exposition abordées dans ce rapport, n'est pas prise en compte par la suite.

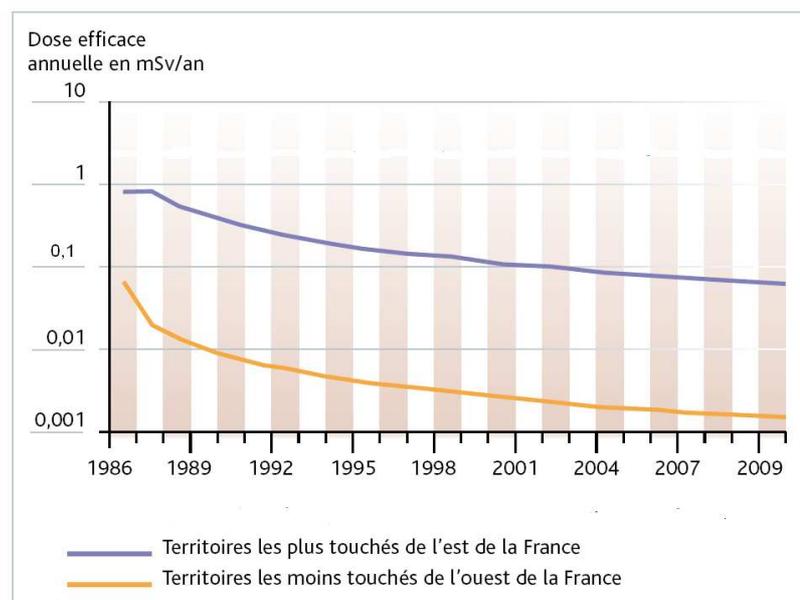


Figure 5 : Retombées de l'accident de Tchernobyl - Evolution des gammes de doses efficaces reçues annuellement de 1986 à 2010 par les personnes résidant dans les territoires les plus touchés de l'est du pays et dans les territoires les moins touchés de l'ouest (source IRSN)

3.2.1.2.2 Fukushima

La métropole française, bien que très éloignée du lieu de l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi survenu le 11 mars 2011, a été affectée par des masses d'air faiblement contaminées par les rejets accidentels de cette centrale. Des calculs à très longue distance ont été utilisés par l'IRSN pour prédire les dates d'arrivée des masses d'air contaminées et les niveaux d'activités attendus. Un plan renforcé de surveillance de la radioactivité sur l'ensemble du territoire français a été mis en œuvre par l'IRSN en mars 2011. Il a consisté en un renforcement de la vigilance sur les dispositifs de surveillance traditionnels de l'IRSN, associé à un déploiement de moyens complémentaires, tant pour la surveillance de la radioactivité ambiante que la surveillance par prélèvements d'échantillons dans l'environnement.

S'appuyant sur plus de 5 700 résultats de mesure obtenus par ses soins sur environ 1 400 prélèvements effectués et sur les quelque 3 000 résultats qui lui ont été transmis par les exploitants nucléaires, l'IRSN a réalisé une étude de l'impact en France de l'accident (cf. rapport [6] disponible sur le site internet de l'IRSN).

Ces mesures ont permis de mettre en évidence la présence de traces des principaux radionucléides rejetés dans l'air lors de cet accident (iode 131, césiums 134 et 137 et dans une moindre mesure tellure 132) et d'en suivre l'évolution jusqu'en mai 2011. La première détection d'iode 131 dans l'air a été observée au sommet du Puy-de-Dôme le 24 mars 2011. Les valeurs de concentration les plus élevées ont été observées entre le 27 mars et le 9 avril 2011. Ces concentrations ont ensuite décliné, l'iode 131 ayant complètement disparu de notre environnement au début du mois de mai 2011 en raison de sa courte période radioactive. Bien qu'il ait une durée de vie beaucoup plus longue, le césium 137 n'a pas persisté dans l'air en France, puisque cinq mois après l'accident sa concentration était revenue à un niveau à peine supérieur à celui qui préexistait avant l'accident.

Ces résultats ne mettent pas en évidence de différences d'exposition entre les zones géographiques de notre territoire, que ce soit en métropole ou en outre-mer. Les doses efficaces maximales reçues (adulte) ont été estimées inférieures à 0,002 mSv/an pour l'année 2011 et sont négligeables à ce jour.

3.2.1.3 Rejets des installations nucléaires

Chaque installation nucléaire est amenée, dans le cadre de son fonctionnement normal, à rejeter des substances radioactives dans l'environnement, sous formes liquide ou gazeuse. Ces rejets font l'objet d'une autorisation de la part des pouvoirs publics, laquelle prescrit en particulier les limites de rejets à ne pas dépasser. Pour chaque installation, ces limites sont par ailleurs fixées en vérifiant, d'une part que les dispositions techniques et organisationnelles ont été prévues dans l'installation pour limiter autant que faire se peut les quantités rejetées, d'autre part que l'impact dosimétrique de ces rejets sur les personnes les plus exposées au voisinage de l'installation (groupe de référence) reste très faible, en tenant compte de l'ensemble des voies d'exposition possibles (inhalation, ingestion, dépôts).

D'une manière générale, les études montrent que l'exposition d'un groupe de référence (nombre très limité de personnes) du fait des rejets d'une installation nucléaire est de l'ordre de 0,01 mSv/an.

Aussi :

- pour la population générale, cette exposition conduit à une dose efficace moyenne extrêmement faible ;
- la variabilité de la dose efficace associée à cette exposition, considérée comme peu significative en valeur absolue par rapport aux autres sources d'exposition abordées dans ce rapport, n'est pas prise en compte par la suite.

3.2.1.4 Bilan de l'exposition à des sources industrielles et militaires

Dans le cadre de cette étude, une dose efficace moyenne de 0,02 mSv/an est retenue pour l'exposition de la population aux sources industrielles et militaires. Cette exposition est relative aux anciennes retombées des essais nucléaires atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl.

3.2.2 EXPOSITION « MEDICALE »

Au sein de la population, de nombreuses personnes sont exposées aux rayonnements ionisants dans un contexte médical lors :

- d'examens de radiologie à visée diagnostique (radiographie conventionnelle, mammographie, scanographie, radiologie interventionnelle) qui conduisent à une exposition externe ;
- d'examens par imagerie à visée diagnostique utilisant des radioéléments (médecine nucléaire) qui conduisent à une exposition interne ;
- de traitements par radiothérapie externe ou interne.

Les expositions liées à des actes thérapeutiques par radiothérapie externe ou interne correspondent à des fortes doses, délivrées localement pour traiter les pathologies concernées. Les patients ainsi traités constituent une fraction de la population générale exposée dans un cadre très particulier. C'est pourquoi leur exposition n'est pas prise en compte dans le cadre de ce bilan.

Les ordres de grandeur des doses reçues lors d'examens diagnostiques apparaissent sur la figure 6 (pour la comparaison des examens, l'échelle représente les doses efficaces associées à ces examens). Cependant, pour un même examen, il existe une grande disparité des doses reçues selon la pratique médicale, la qualité des appareils, la morphologie des patients.

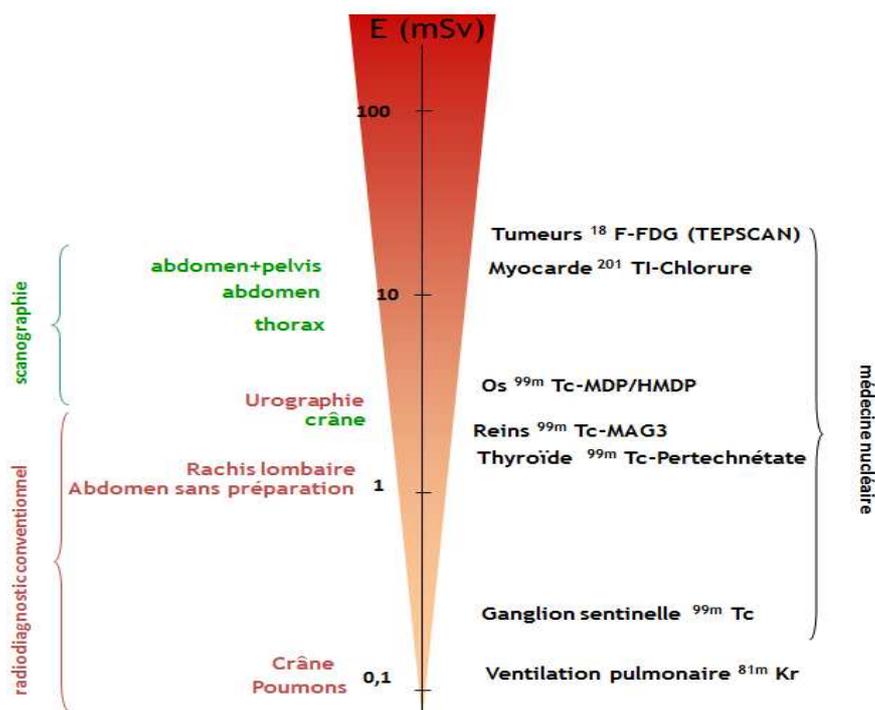


Figure 6 : Quelques ordres de grandeur des doses efficaces reçues lors d'examens diagnostiques

L'exposition de la population française a été récemment réévaluée par l'IRSN en se basant sur les données de l'année 2012 (cf. rapport [3] disponible sur le site internet de l'IRSN). En 2012, le nombre d'actes diagnostiques réalisés en France est estimé à environ 81,8 millions, soit en moyenne 1 247 actes pour 1 000 habitants. La radiologie conventionnelle, la radiologie dentaire et la scanographie représentent respectivement 54 %, 34 % et 10,5 % des actes. Ces actes conduisent, pour l'année 2012, à une dose efficace moyenne par habitant de l'ordre de 1,6 mSv/an.

Il convient toutefois de souligner que l'exposition « médicale » individuelle est très hétérogène et peut s'écarter significativement de cette valeur moyenne. Pour illustrer cette variabilité, les cas suivants peuvent être considérés :

- l'absence d'acte diagnostique et donc d'exposition ;
- pour la modalité d'imagerie la plus répandue qu'est la radiologie conventionnelle :
 - l'un des types d'acte les plus fréquents est l'examen du thorax, associé à une dose efficace < 0,05 mSv ;
 - l'examen de l'abdomen est un examen assez fréquent qui délivre une dose efficace d'environ 2 mSv ;
- le scanner abdomino-pelvien, acte scanographique à la fois le plus fréquent et le plus exposant, conduit quant à lui à une dose efficace de l'ordre de 15 mSv.

D'une manière générale, l'exposition « médicale » de la population en 2012 est telle que :

- 56% des personnes n'ont pas été exposées ;
- 30,8% des personnes exposées ont reçu moins de 1 mSv ;

- 8% d'entre elles ont reçu entre 1 et 10 mSv ;
- 5,2% d'entre elles ont reçu plus de 10 mSv.

Pour illustrer la variabilité de cette source d'exposition, la dose de 15 mSv associée à un scanner abdomino-pelvien est retenue dans le cadre de ce rapport.

Il convient de rappeler que, pour une personne bénéficiant de plusieurs examens au cours d'une année, dont des examens scanographiques, la dose individuelle correspondante peut être largement supérieure à ces valeurs. Ainsi, pour l'année 2012 :

- 0,3 % de la population a reçu entre 50 et 100 mSv ;
- 0,05% de la population a reçu plus de 100 mSv.

Toutefois, ces cas correspondant à une très faible partie de la population générale, ils ne sont pas considérés comme représentatifs de son exposition et ne sont donc pas retenus dans la suite de ce rapport.

3.2.2.1 Bilan de l'exposition « médicale »

Dans le cadre de ce bilan, les valeurs suivantes de doses efficaces sont retenues pour l'exposition « médicale » :

- moyenne pour la population générale : 1,6 mSv/an ;
- gamme typique de variation : de 0 mSv/an à 15 mSv/an.

3.3 BILAN DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION FRANÇAISE

3.3.1 EXPOSITION MOYENNE

La dose efficace reçue en moyenne par la population en France du fait de l'ensemble des expositions estimées dans les chapitres précédents s'élève à 4,5 mSv/an, dont 2,9 mSv/an dûs aux sources naturelles et 1,6 mSv/an dûs aux sources artificielles.

Les contributions des différentes sources d'exposition sont synthétisées sur la figure 7. L'exposition « médicale » (35%) et l'exposition au radon (32 %) constituent les contributions principales. Viennent ensuite l'exposition aux rayonnements telluriques (14%), l'exposition liée à l'incorporation de radionucléides (12%), l'exposition aux rayonnements cosmiques (7%), enfin celle due aux activités industrielles et militaires (<1%) essentiellement liée aux anciennes retombées des essais nucléaires atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl.

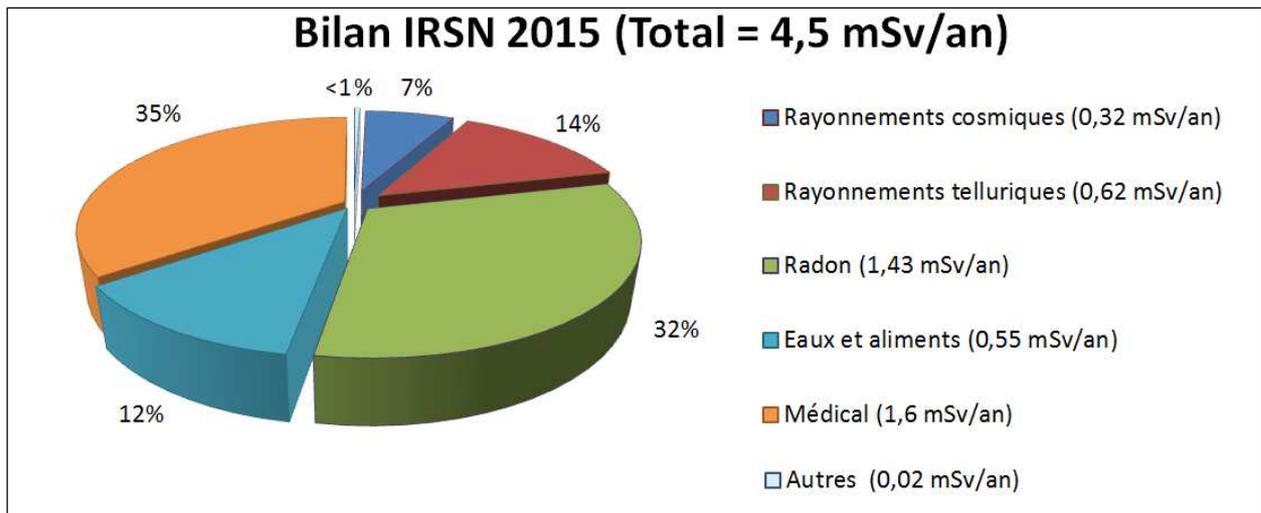


Figure 7 : Bilan de l'exposition moyenne de la population française

3.3.2 VARIABILITE DE L'EXPOSITION

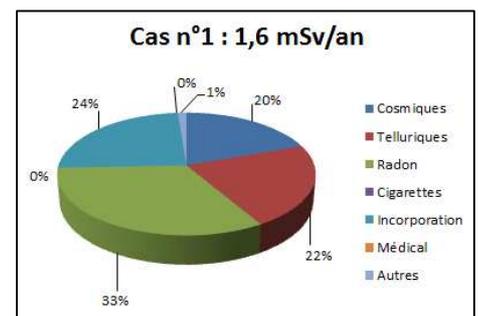
Comme présenté dans ce rapport, les sources d'exposition pour lesquelles la dose efficace correspondante est susceptible de varier de façon significative d'un individu à l'autre sont les suivantes :

- l'exposition aux rayonnements cosmiques ;
- l'exposition aux rayonnements telluriques ;
- l'exposition par incorporation d'éléments radioactifs naturels ;
- l'exposition au radon ;
- l'exposition « médicale » lors d'actes diagnostiques.

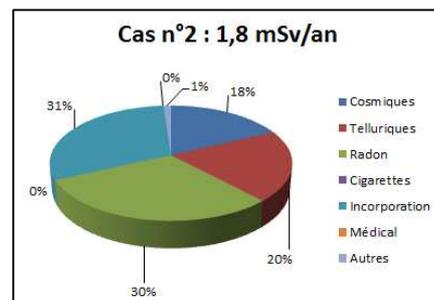
La combinaison de ces expositions en fonction du lieu d'habitation, des habitudes de vie et de consommation alimentaire et des examens médicaux réalisés peut conduire à des situations individuelles d'exposition annuelle très différentes.

Afin d'illustrer cette variabilité, les cas types suivants peuvent être présentés sur la base des gammes typiques de variation présentées plus haut, de la dose efficace associée la plus faible à celle la plus élevée :

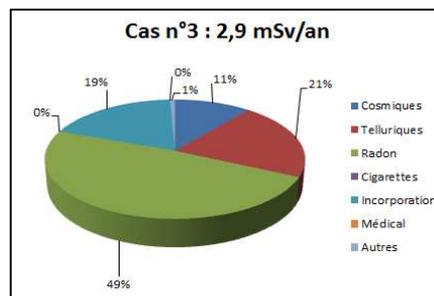
- cas n°1 : individu n'ayant bénéficié d'aucun examen médical, vivant dans une commune à faible concentration en radon et à faible niveau de rayonnements telluriques, et consommant peu de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels.



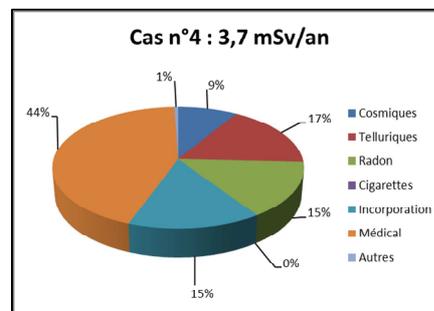
- cas n°2 : individu n'ayant bénéficié d'aucun examen médical, vivant dans une commune à faible concentration en radon et à faible niveau de rayonnements telluriques, et ayant une consommation moyenne de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels.



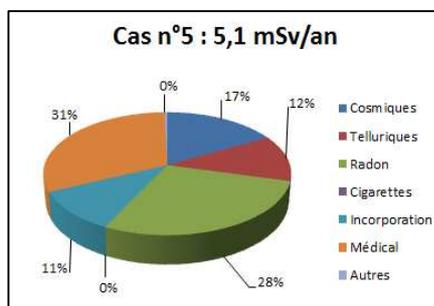
- cas n°3 : individu n'ayant bénéficié d'aucun examen médical, vivant dans une commune à concentration moyenne en radon et à niveau moyen de rayonnements telluriques, et ayant une consommation moyenne de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels.



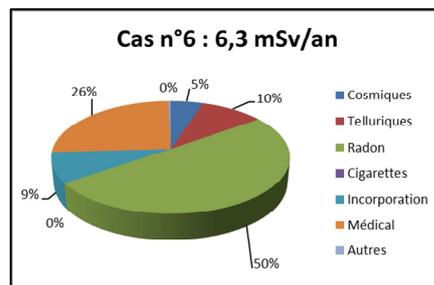
- cas n°4 : individu ayant une exposition « médicale » moyenne, vivant dans une commune à faible concentration en radon et niveau moyen de rayonnements telluriques, et ayant une consommation moyenne de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels.



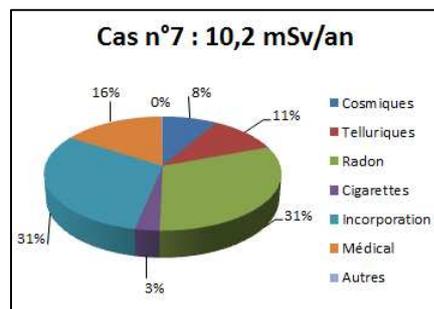
- cas n°5 : individu ayant une exposition « médicale » moyenne, vivant dans une commune à concentration moyenne en radon et à niveau moyen de rayonnements telluriques, ayant une consommation moyenne de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels et voyageant fréquemment en avion.



- cas n°6 : individu ayant une exposition « médicale » moyenne, vivant dans une commune à forte concentration en radon et à niveau moyen de rayonnements telluriques, et ayant une consommation moyenne de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels.

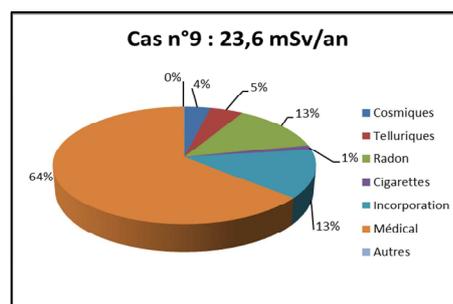
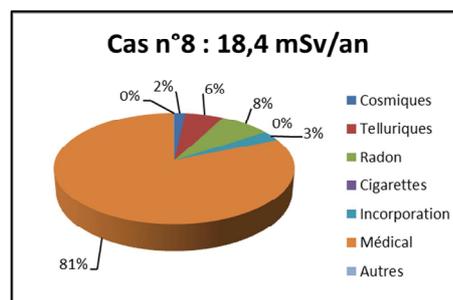


- cas n°7 : individu ayant une exposition « médicale » moyenne, vivant dans une commune à forte concentration en radon et à niveau élevé de rayonnements telluriques, fumant beaucoup, voyageant fréquemment en avion et ayant une consommation importante de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels.



Les deux cas supplémentaires ci-dessous illustrent des situations particulières associées à une exposition « médicale » importante ne pouvant être considérée comme reproductible annuellement :

- cas n°8 : individu ayant une exposition « médicale » importante, vivant dans une commune à concentration moyenne en radon et niveau élevé de rayonnements telluriques, et ayant une consommation moyenne de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels.
- cas n°9 : individu le plus exposé, c'est-à-dire ayant une exposition « médicale » importante, vivant dans une communes à forte concentration en radon et niveau élevé de rayonnements telluriques, fumant beaucoup, ayant une consommation importante de denrées alimentaires riches en radionucléides naturels et voyageant fréquemment en avion.



L'ensemble des cas présentés ci-dessus sont repris sur la figure 8 suivante.

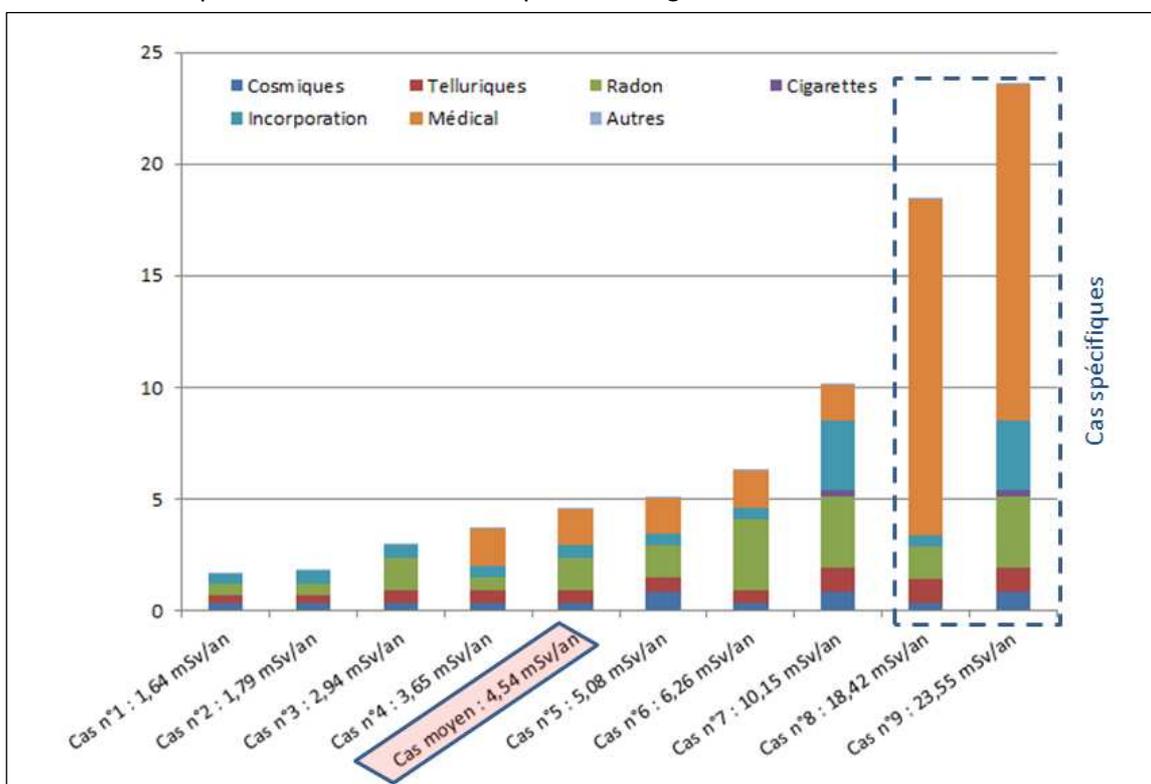


Figure 8 : Variabilité de l'exposition de la population française : cas types et cas spécifiques

3.3.3 ESTIMATION DE L'EXPOSITION INDIVIDUELLE

Le bilan présenté concerne l'exposition à l'ensemble des sources en termes de moyenne pour l'ensemble de la population et de variations possibles. Un nombre limité de cas a été choisi pour illustrer ces variations de l'exposition individuelle.

En effet, l'exposition à l'ensemble des sources de rayonnements ionisants est multifactorielle et donc propre à chaque individu. Le tableau suivant illustre, pour chaque source d'exposition, les principaux paramètres d'influence.

Source d'exposition	Paramètres d'influence
Radon	<ul style="list-style-type: none">• Potentiel radon des sols du lieu de résidence• Type d'habitat (collectif, individuel)• Caractéristiques de construction de l'habitat, de sa ventilation et du mode de vie des occupants
Médical	<ul style="list-style-type: none">• Type et nombre d'examens à visée diagnostique, pratiques médicales
Radionucléides dans l'eau et les aliments	<ul style="list-style-type: none">• Teneur en radionucléides des aliments et des eaux• Habitudes alimentaires (nature et quantités des produits consommés)• Nombre et teneur en radionucléides des cigarettes consommées
Rayonnements telluriques	<ul style="list-style-type: none">• Teneur en radionucléides des sols• Type d'habitat (collectif, individuel)• Teneur en radionucléides des matériaux de construction• Habitudes de vie (taux d'occupation de l'habitat)
Rayonnements cosmiques	<ul style="list-style-type: none">• Altitude du lieu de résidence• Habitudes de vie (taux d'occupation de l'habitat, nombre et destinations des vols réalisés en avion)

Il existe autant de jeux de valeurs des différents paramètres qu'il y a d'individus et seule la connaissance précise de l'ensemble de ces paramètres propres à une situation donnée peut permettre d'estimer fidèlement l'exposition de la personne considérée aux rayonnements ionisants.

Aussi, l'IRSN a développé un outil internet avec comme objectif de permettre à chacun d'estimer au mieux 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.

Cet outil est accessible sur le site internet de l'IRSN.

4 CONCLUSION

L'exposition moyenne aux rayonnements ionisants de la population en France s'élève à 4,5 mSv/an, la part des expositions aux sources naturelles et artificielles de rayonnements ionisants s'établissant respectivement à 2,9 mSv/an et 1,6 mSv/an. L'exposition médicale (35%) et l'exposition au radon (32%) constituent les principales sources d'exposition. Viennent ensuite l'exposition aux rayonnements telluriques (14%), l'exposition liée à l'incorporation de radionucléides naturels (12%) et celles liées aux rayonnements cosmiques (7%) et aux activités industrielles et militaires (<1%).

Au-delà de cette exposition moyenne par habitant, les situations d'exposition de chacun d'entre nous varient en fonction du lieu d'habitation, des habitudes de vie et de consommation et des examens médicaux dont on bénéficie. Cette grande variabilité de l'exposition individuelle a conduit l'IRSN à mettre à disposition du public un outil, unique en son genre notamment de par l'ensemble des sources d'exposition prises en compte, permettant à chacun d'estimer au mieux sa propre exposition. Cet outil est disponible sur internet (www.irsn.fr).

5 REFERENCES

- [1] Rapport UNSCEAR 2008 - Sources and effects of ionizing radiation - Report to the General Assembly volume 1
- [2] Rapport IRSN/PRP-HOM/2014-6 - Exposition de la population française aux rayonnements ionisants liée aux actes de diagnostic médical en 2012
- [3] Rapport IRSN/PRP-HOM/2014-007 - La radioprotection des travailleurs - Exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France : bilan 2013
- [4] Baromètre IRSN 2014 - La perception des risques et de la sécurité par les Français
- [5] circulaire n° DGS/EA4/2007/232 du 13 juin 2007
- [6] Rapport IRSN/DEI/2011-01 - Analyse de l'impact de l'accident de Fukushima en France