

UN 2917

**RADIOACTIVE MATERIAL
TYPE B(M) PACKAGE NON-FISSILE**

UN 2917, RADIOACTIVE MATERIAL,
TYPE B(M) PACKAGE, 7



RADIOACTIVE III

CONTENTS

Co-60

ACTIVITY

13.7716 TBq

1.7

TRANSPORT INDEX

7

Les activités nucléaires : rayonnements ionisants et risques pour la santé et l'environnement

1	L'état des connaissances sur les dangers et les risques liés aux rayonnements ionisants _____	90
1.1	Les effets biologiques et les effets sanitaires	
1.2	L'évaluation des risques liés aux rayonnements ionisants	
1.3	Les incertitudes scientifiques et la vigilance	
1.3.1	La radiosensibilité	
1.3.2	Les effets des faibles doses	
1.3.3	La signature moléculaire dans les cancers radio-induits	
2	Les différentes sources de rayonnements ionisants _____	94
2.1	Les rayonnements d'origine naturelle	
2.1.1	Les rayonnements d'origine terrestre (hors radon)	
2.1.2	Le radon	
2.1.3	Les rayonnements cosmiques	
2.2	Les rayonnements ionisants liés aux activités humaines	
2.2.1	Les installations nucléaires de base	
2.2.2	Le transport de substances radioactives	
2.2.3	Les activités nucléaires de proximité	
2.2.4	La gestion des déchets radioactifs	
2.2.5	La gestion des sites contaminés	
2.2.6	Les activités utilisant des substances radioactives d'origine naturelle	
3	La surveillance des expositions aux rayonnements ionisants _____	97
3.1	Les doses reçues par les travailleurs	
3.1.1	La surveillance de l'exposition des personnes travaillant dans les installations nucléaires	
3.1.2	L'exposition des travailleurs aux rayonnements naturels renforcés	
3.1.3	L'exposition des personnels navigants aux rayonnements cosmiques	
3.2	Les doses reçues par la population	
3.2.1	Les doses reçues par la population du fait des activités nucléaires	
3.2.2	L'exposition de la population aux rayonnements naturels	
3.3	Les doses reçues par les patients	
3.4	L'exposition des espèces non humaines (animales et végétales)	

Les activités nucléaires : rayonnements ionisants et risques pour la santé et l'environnement

Les rayonnements ionisants peuvent être d'origine naturelle ou provenir d'activités nucléaires d'origine humaine. Les expositions de la population aux rayonnements ionisants d'origine naturelle résultent de la présence de radionucléides d'origine terrestre dans l'environnement, de l'émanation de radon en provenance du sous-sol et de l'exposition aux rayonnements cosmiques.

Les activités nucléaires sont définies par le Code de la santé publique (CSP) comme « *les activités comportant un risque d'exposition des personnes aux rayonnements ionisants lié à la mise en œuvre soit d'une source artificielle, qu'il s'agisse de substances ou de dispositifs, soit d'une source naturelle, qu'il s'agisse de substances radioactives naturelles ou*

de matériaux contenant des radionucléides naturels... ». Ces activités nucléaires incluent celles qui sont menées dans les installations nucléaires de base (INB) et dans le cadre du transport des substances radioactives, ainsi que dans les domaines médical, vétérinaire, industriel et de recherche.

Les différents principes auxquels doivent répondre les activités nucléaires, notamment les principes de sûreté nucléaire et de radioprotection, sont présentés au chapitre 2.

Au-delà des effets des rayonnements ionisants, les INB sont, comme toute installation industrielle, à l'origine de risques et de nuisances non radiologiques tels que les rejets de substances chimiques dans l'environnement ou l'émission de bruit.

1 — L'état des connaissances sur les dangers et les risques liés aux rayonnements ionisants

Les rayonnements ionisants sont définis comme étant capables de produire directement ou indirectement des ions lors de leur passage à travers la matière. Parmi eux, on distingue les rayons X, les rayonnements gamma, alpha et bêta, ainsi que les rayonnements neutroniques, chacun d'entre eux étant caractérisé par des énergies et des pouvoirs de pénétration différents.

1.1 — Les effets biologiques et les effets sanitaires

Qu'ils soient le fait de particules chargées, par exemple un électron (rayonnement bêta) ou un noyau d'hélium (rayonnement alpha), ou de photons (rayons X ou rayons gamma), les rayonnements ionisants interagissent avec les molécules constitutives des cellules de la matière vivante et les transforment chimiquement. Parmi les lésions ainsi créées, les plus importantes concernent l'ADN des cellules; elles ne sont pas fondamentalement différentes de celles provoquées par certaines substances chimiques toxiques, exogènes ou endogènes (résultant du métabolisme cellulaire).

Lorsqu'elles ne sont pas réparées par les cellules elles-mêmes, ces lésions peuvent conduire soit à la mort cellulaire soit à l'apparition d'effets biologiques néfastes, dès lors que le tissu ne peut plus assurer ses fonctions.

Ces effets, appelés « effets déterministes », sont connus de longue date puisque les premiers effets ont été observés assez tôt après la découverte des rayons X par W. Röntgen (début des années 1900). Ils dépendent de la nature du tissu exposé et apparaissent de façon certaine dès que la quantité de rayonnements absorbée dépasse un certain niveau de dose. Parmi ces effets, citons par exemple l'érythème, la radiodermite, la radionécrose et la cataracte. Les effets sont d'autant plus graves que la dose de rayonnements reçue par le tissu est elle-même importante.

Les cellules peuvent aussi réparer, mais de façon imparfaite ou erronée, les lésions ainsi provoquées. Parmi les lésions qui

subsistent, celles de l'ADN revêtent un caractère particulier, car des anomalies résiduelles au niveau des chromosomes peuvent être transmises par divisions cellulaires successives à de nouvelles cellules. Une seule mutation génétique est loin d'être suffisante pour la transformation en cellule cancéreuse mais cette lésion due aux rayonnements ionisants peut constituer une première étape vers la cancérisation qui apparaît après un laps de temps variable (5 à 20 ans après l'exposition).

La suspicion d'un lien de causalité entre une exposition aux rayonnements ionisants et la survenue d'un cancer remonte à 1902 (observation d'un cancer de la peau sur une radiodermite).

Par la suite, plusieurs types de cancer ont été observés en milieu professionnel, dont certains types de leucémie, des cancers bronchopulmonaires (par inhalation de radon) et des ostéosarcomes de la mâchoire. Hors du domaine professionnel, le suivi pendant plus de soixante ans d'une cohorte d'environ 85 000 personnes irradiées à Hiroshima et Nagasaki a permis de faire régulièrement le point sur la morbidité et la mortalité par cancer après exposition aux rayonnements ionisants, et de décrire les relations dose-effets, à la base de la réglementation actuelle. D'autres travaux épidémiologiques ont permis de mettre en évidence, chez les patients traités par radiothérapie, une augmentation statistiquement significative des cancers (effets secondaires) imputables aux rayonnements ionisants. Citons également l'accident de Tchernobyl qui, du fait de l'iode radioactif rejeté, a provoqué dans les régions proches du lieu de l'accident un excès de cancers de la thyroïde chez des sujets jeunes exposés pendant leur enfance. Les conséquences sanitaires de l'accident de Fukushima pour les populations avoisinantes ne sont pas encore suffisamment connues et analysées pour en tirer les enseignements au plan épidémiologique.

Le risque de cancer radio-induit apparaît pour différents niveaux d'exposition et n'est pas lié à un dépassement de seuil. Il se manifeste par un accroissement de la probabilité de cancer

pour une population d'âge et de sexe donnés. On parle alors d'effets probabilistes, stochastiques ou aléatoires.

Établis au plan international, les objectifs de santé publique de la radioprotection visent à éviter l'apparition des effets déterministes et à réduire la probabilité d'apparition de cancers liés à une exposition aux rayonnements ionisants, aussi appelés cancers radio-induits ; l'ensemble des résultats des études semble indiquer que les cancers radio-induits constituent le risque sanitaire prépondérant lié à l'exposition aux rayonnements ionisants.

1.2 – L'évaluation des risques liés aux rayonnements ionisants

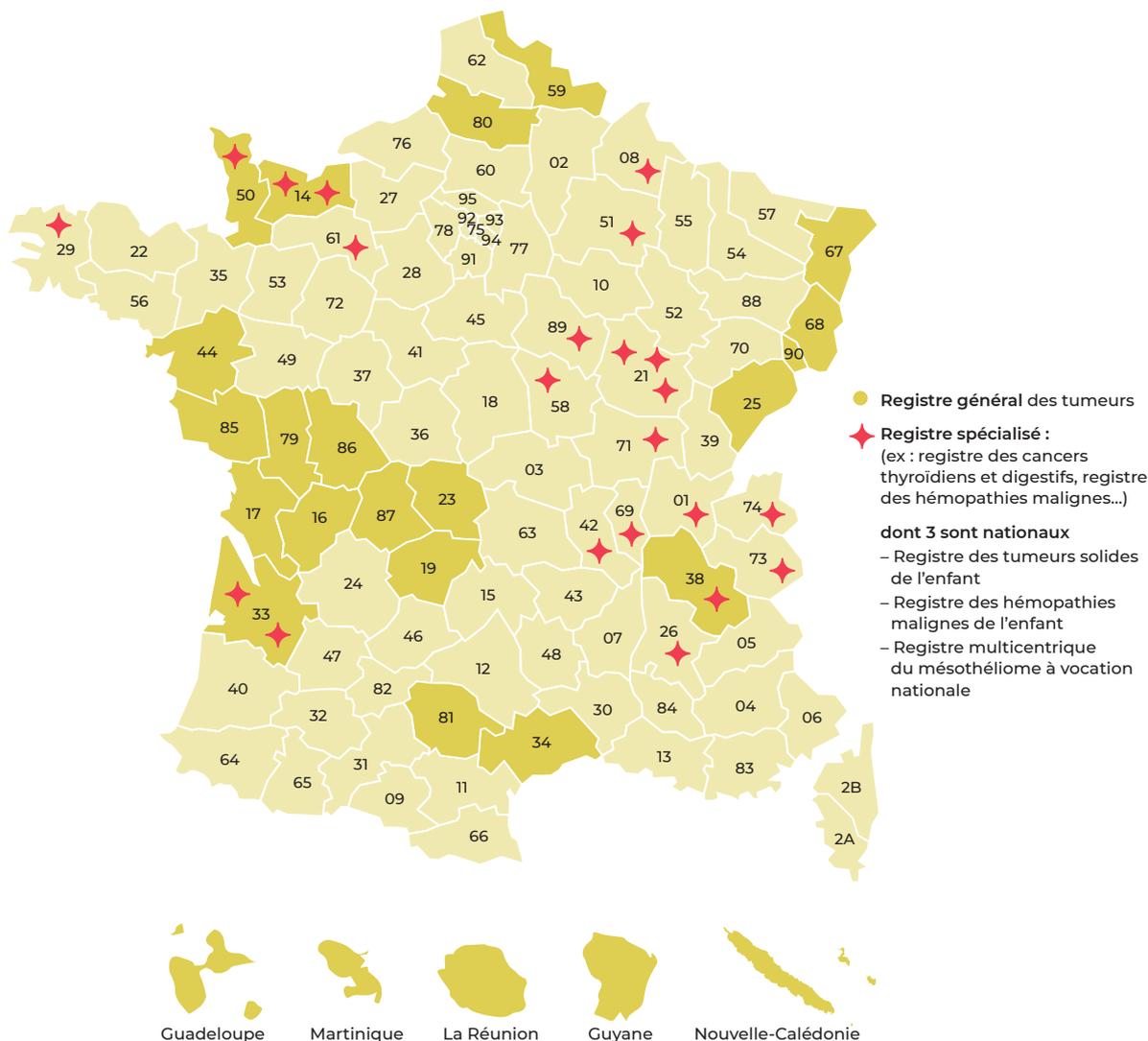
La surveillance de l'épidémiologie des cancers est fondée en France sur des registres de maladies, sur la surveillance des causes de décès et s'appuie, plus récemment, également sur l'exploitation des données du Programme médicalisé des systèmes d'information des établissements de santé (PMSI) et sur les déclarations d'affection de longue durée (ALD). Les registres sont des structures qui réalisent « un recueil continu et exhaustif de données nominatives intéressant un ou plusieurs événements de santé dans une population géographiquement définie, à des fins

de recherche et de santé publique, par une équipe ayant les compétences appropriées ». On dénombre actuellement 32 registres de cancer en France. Certains dits généraux s'intéressent à tous les types de cancer, leur périmètre est départemental ou inter-départemental ; d'autres, dits spécialisés, se focalisent sur un cancer particulier. Leur portée est un périmètre géographique variable (agglomération, département, région, voire national). Les trois registres nationaux concernent l'un le mésothéliome de la plèvre dans le cadre d'exposition principalement aux fibres d'amiante, les deux autres couvrent l'ensemble des pathologies cancéreuses de l'enfant et de l'adolescent jusqu'à 18 ans (source : INCa).

Dans une zone couverte par un registre, l'objectif est de mettre en évidence des différences de répartition spatiale, de dégager des évolutions temporelles en termes d'augmentation ou de diminution du taux d'incidence des différentes localisations cancéreuses, ou encore de repérer un agrégat de cas.

En fonction de la qualité de leur base de données populationnelle et de leur ancienneté, certains registres participent à de nombreuses études explorant les facteurs de risque des cancers (dont les risques environnementaux). Cependant, les registres ne couvrent pas nécessairement les régions proches des installations nucléaires.

Les différents registres de cancer en France (2018)



L'investigation épidémiologique est une tâche complémentaire de la surveillance. Elle a pour vocation de mettre en évidence une association entre un facteur de risque et la survenue d'une maladie, entre une cause possible et un effet, ou tout au moins à permettre d'affirmer que l'existence d'une telle relation causale présente une très forte probabilité. La difficulté intrinsèque à mener ces études est à rappeler, de même que la difficulté à conclure de façon convaincante lorsque le délai d'apparition de la maladie est long ou encore lorsque le nombre de cas attendus est faible, ce qui est notamment constaté pour des expositions faibles de quelques dizaines de millisieverts (mSv).

Les cohortes comme celle de Hiroshima et Nagasaki ont clairement mis en évidence un excès de cancers, alors que l'exposition moyenne est de l'ordre de 200 mSv; des études sur des travailleurs du nucléaire, publiées durant ces dernières années, suggèrent des risques de cancer à des doses plus faibles (doses cumulées sur plusieurs années).

Ces résultats soutiennent la justification d'une protection radiologique des populations exposées aux faibles doses de rayonnements ionisants (travailleurs de l'industrie nucléaire, personnels médicaux, exposition médicale à finalité diagnostique...).

En l'absence de données sur l'impact des faibles doses sur l'apparition d'un cancer, des estimations sont fournies en extrapolant de façon linéaire, sans seuil, les effets observés décrits aux fortes doses. Ces modélisations donnent des estimations des risques encourus lors d'une exposition aux faibles doses de rayonnements ionisants qui restent cependant controversées au niveau scientifique. Des études sur de très larges populations sont actuellement en cours pour étoffer ces modélisations.

Sur la base des synthèses scientifiques du Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants ([UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation](#)), la Commission internationale de protection radiologique ([CIPR](#)) a publié les coefficients de

risque de décès par cancer dus aux rayonnements ionisants, soit 4,1 % d'excès de risque par sievert (Sv) pour les travailleurs et 5,5 % par sievert pour la population générale (voir [publication CIPR 103](#)).

L'évaluation du risque de cancer du poumon dû au radon⁽¹⁾ repose sur un grand nombre d'études épidémiologiques, réalisées directement dans l'habitat, en France et à l'échelle internationale. Elles ont permis de décrire une relation linéaire, même pour une exposition faible (200 Bq/m³) sur une durée de vingt à trente ans. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) en a fait une synthèse et recommande, pour le public, un niveau d'exposition annuelle maximale situé entre 100 et 300 Bq/m³. La [publication 115](#) de la CIPR a comparé les risques de cancer du poumon observés dans le cadre des études sur les mineurs d'uranium avec ceux observés en population générale et a conclu à une très bonne concordance des risques observés dans ces deux conditions d'exposition au radon. Les recommandations de la CIPR confortent celles émises par l'OMS, qui considère que le radon constitue, loin après le tabac, le facteur le plus important de risque de cancer du poumon. Par ailleurs, pour des expositions au radon égales, le risque de cancer du poumon est beaucoup plus élevé chez les fumeurs, trois quarts des décès par cancer du poumon attribuables au radon surviendraient chez des fumeurs.

En France métropolitaine, environ 12 millions de personnes, réparties dans près de 7 000 communes, sont potentiellement exposées à des concentrations élevées en radon. Selon l'Agence nationale de santé publique (2018), le nombre de nouveaux cas de cancers du poumon attribuables au radon en France métropolitaine est estimé à environ 4 000 par an, loin derrière celui dû au tabac (près de 69 000). À l'initiative de l'ASN, un plan national d'action pour la gestion des risques liés au radon a été mis en place depuis 2004, il est périodiquement réactualisé (voir point 3.2.2).

Les recommandations de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR)

En 2007, la CIPR a publié de nouvelles recommandations pour le calcul des doses efficaces et équivalentes ([publication 103](#)). Depuis, la CIPR actualise les valeurs des coefficients de dose efficace pour l'exposition interne et externe qui tiennent compte de ces dernières recommandations. Sa dernière [publication 137](#) (2017), intitulée « Incorporation de radionucléides en milieu du travail – Partie 3 », porte sur quatorze radioéléments, dont le radon.

Les doses délivrées par le radon et ses descendants dépendent de nombreux paramètres (variabilité des situations d'exposition, des individus, etc.).

Les précédents coefficients de dose pour l'exposition au radon et à ses descendants, recommandés par la CIPR ([publication 65](#) – 1993), reposaient sur une approche épidémiologique. La publication 115 de la CIPR (2010) a permis une mise à jour du risque de cancer du poumon lié à l'exposition au radon sur la base de nouvelles études épidémiologiques. La CIPR avait conclu que le risque de décès par cancer du poumon chez les adultes ayant été exposés de façon chronique à de faibles concentrations

de radon était près de deux fois plus élevé que celui estimé sur la base des connaissances disponibles en 1993.

Les coefficients de dose pour le radon issus de la publication 137 de la CIPR (2017) reposent sur une approche dosimétrique, comme pour les autres radionucléides. Ils conduisent, à exposition égale au radon et à ses descendants, à augmenter de façon significative la dose efficace annuelle reçue par les travailleurs exposés au radon (près de deux fois plus élevée).

Compte tenu de ces évolutions et dans l'attente d'une mise à jour de la réglementation^(*) pour actualiser les coefficients de dose à mettre en œuvre pour le radon et ses descendants, l'ASN a saisi le Groupe permanent d'experts en radioprotection, pour les applications industrielles et de recherche des rayonnements ionisants, et en environnement ([GPRADE](#)) afin d'identifier les difficultés que pourrait soulever l'application des nouveaux coefficients de la CIPR (publication 137 - 2017). Le rapport du GPRADE est attendu en 2019.

(*) [Arrêté du 1^{er} septembre 2003 définissant les modalités de calcul des doses efficaces et des doses équivalentes résultant de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants.](#)

1. Le radon est un gaz radioactif naturel, descendant de l'uranium et du thorium, émetteur de particules alpha et classé cancérigène pulmonaire certain par le Centre international de recherche contre le cancer (CIRC) depuis 1987.

1.3 – Les incertitudes scientifiques et la vigilance

Les actions menées dans les domaines de la sûreté nucléaire et de la radioprotection pour prévenir les accidents et limiter les nuisances ont permis de réduire les risques sans toutefois les supprimer, qu'il s'agisse par exemple des doses reçues par les travailleurs ou de celles associées aux rejets des INB. De nombreuses incertitudes subsistent ; elles conduisent l'ASN à rester attentive aux résultats des travaux scientifiques en cours, en radiobiologie et en radiopathologie par exemple, avec des retombées possibles en radioprotection, notamment en ce qui concerne la gestion des risques liés aux faibles doses.

On peut citer, en particulier, plusieurs zones d'incertitudes concernant la radiosensibilité, les effets des faibles doses en fonction de l'âge, l'existence de signatures (mutations spécifiques de l'ADN) qui pourraient être observées dans des cancers radio-induits et certaines maladies non cancéreuses observées dans les suites de radiothérapie.

1.3.1 – La radiosensibilité

Les effets des rayonnements ionisants sur la santé des personnes varient d'un individu à l'autre. On sait par exemple, depuis que cela a été énoncé pour la première fois par Bergonie et Tribondeau en 1906, que la même dose n'a pas le même effet selon qu'elle est reçue par un enfant en période de croissance ou par un adulte.

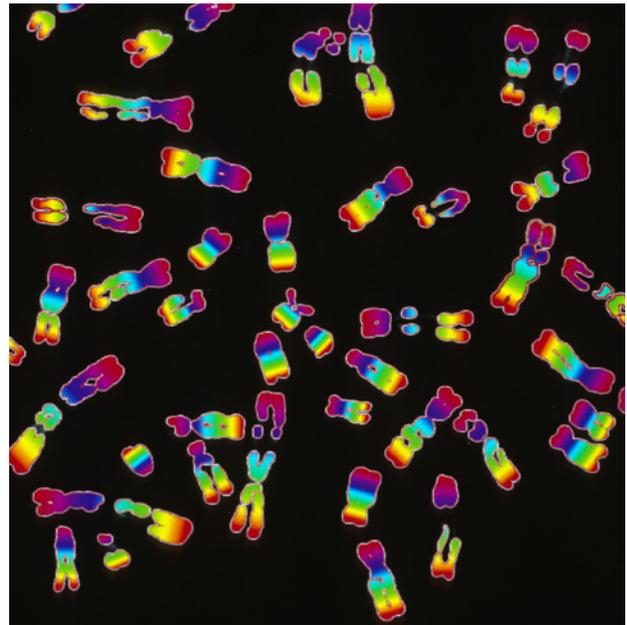
Par ailleurs, la variabilité de la radiosensibilité individuelle aux fortes doses de rayonnements ionisants a été bien documentée par les radiothérapeutes et les radiobiologistes. Des niveaux de radiosensibilité élevés ont été constatés dans le cas de sujets souffrant de maladies génétiques de la réparation de l'ADN et de la signalisation cellulaire, ils peuvent chez ces personnes conduire à des « brûlures radiologiques ».

Aux faibles doses, il existe une radiosensibilité cellulaire et individuelle qui pourrait concerner environ 5 à 10% de la population. Grâce à l'abaissement des seuils de détection, les méthodes récentes d'immunofluorescence de cibles moléculaires de la signalisation et de la réparation des lésions de l'ADN permettent de mieux documenter les effets des rayonnements ionisants aux faibles doses. Les effets biochimiques et moléculaires d'une simple radiographie deviennent visibles et mesurables. Les recherches effectuées avec ces nouvelles méthodes d'investigation apportent des résultats qui doivent encore être validés en clinique avant d'être intégrés dans les pratiques médicales.

La surveillance de la radiosensibilité individuelle dans le cadre d'une prise en charge médicale, par des tests validés, n'est pas encore pleinement opérationnelle malgré les progrès de la recherche en cours.

La variabilité de la réponse individuelle aux rayonnements ionisants a fait l'objet en 2018 de plusieurs avancées :

- un nombre croissant de publications à ce sujet tant sur les aspects cliniques où elle se manifeste, notamment les complications de la radiothérapie du fait d'une radiosensibilité accrue ou l'apparition précoce de cancers du fait d'une radiosusceptibilité accrue, que sur les mécanismes cellulaires et tissulaires sous-jacents ;
- la tenue d'un séminaire international dédié du groupe de recherche européen MELODI à Malte en mai 2018 dont les travaux sont en cours de publication ;
- la création en octobre 2018 par la CIPR d'un groupe de travail (TG111) dédié à ce sujet avec pour objectif de produire des recommandations de radioprotection sur la base des connaissances acquises.



Les chromosomes, par paires, possèdent des bandes de coloration caractéristiques (Inserm)

La réponse individuelle aux rayonnements ionisants s'impose ainsi progressivement comme un sujet important de recherche et d'application en radiobiologie et en radioprotection.

1.3.2 – Les effets des faibles doses

• La relation linéaire sans seuil

L'hypothèse de cette relation, retenue pour modéliser l'effet des faibles doses sur la santé (voir point 1.2), aussi commode soit-elle sur un plan réglementaire, aussi prudente soit-elle sur un plan sanitaire, n'a pas toute l'assise voulue sur un plan scientifique. Certains estiment que les effets des faibles doses pourraient être supérieurs, d'autres pensent que ces doses pourraient n'avoir aucun effet en deçà d'un certain seuil ; certains affirment même que des faibles doses ont un effet bénéfique. La recherche en biologie moléculaire et cellulaire progresse, les études épidémiologiques menées sur des cohortes importantes aussi. Mais, face à la complexité des phénomènes de réparation et de mutation de l'ADN, face aux limites méthodologiques de l'épidémiologie, des incertitudes demeurent et la précaution s'impose pour les décideurs publics.

• La dose, le débit de dose et la durée de l'exposition

Les études épidémiologiques réalisées sur les personnes exposées aux bombardements de Hiroshima et de Nagasaki ont permis de mieux connaître les effets des rayonnements sur la santé, pour des expositions dues à une irradiation externe (exposition externe) en quelques fractions de seconde, à forte dose et fort débit de dose de rayonnements ionisants. Les études menées dans les pays les plus touchés par l'accident de Tchernobyl (la Biélorussie, l'Ukraine et la Russie) ont aussi fait avancer les connaissances sur l'effet des rayonnements sur la santé pour des expositions dues à la contamination interne (exposition interne), notamment à l'iode radioactif. Les études sur les travailleurs du nucléaire ont permis de mieux préciser le risque pour des expositions chroniques à faibles doses établies sur de nombreuses années, que ce soit le résultat d'expositions externes ou de contaminations internes.

• Les effets héréditaires

La survenue d'éventuels effets héréditaires des rayonnements ionisants chez l'homme reste incertaine. De tels effets n'ont pas été observés chez les survivants des bombardements de

Hiroshima et de Nagasaki. Cependant, des effets héréditaires ont été bien documentés dans des travaux expérimentaux chez l'animal: les mutations induites par les rayonnements ionisants dans les cellules germinales sont transmissibles à la descendance. La mutation récessive d'un gène sur un chromosome ne donnera aucun signe clinique ou biologique tant que le même gène porté par l'autre chromosome homologue ne sera pas atteint; si elle n'est pas nulle, la probabilité de ce type d'événement reste cependant faible.

• La protection de l'environnement

La radioprotection a pour but d'empêcher ou de réduire les effets nocifs des rayonnements ionisants sur les personnes, directement ou indirectement, y compris par l'effet des atteintes portées à l'environnement. Au-delà de la protection de l'environnement orientée vers la protection de l'homme et des générations présentes ou futures, la protection des espèces non humaines fait partie en tant que telle de la protection de l'environnement prescrite en France par la Charte constitutionnelle de l'environnement. La protection de la nature au nom de l'intérêt propre des espèces animales et végétales a fait l'objet de plusieurs publications depuis 2008 (CIPR [108](#), [114](#) et [124](#)).

1.3.3 — La signature moléculaire dans les cancers radio-induits

Il n'est actuellement pas possible de faire la différence entre un cancer radio-induit et un cancer qui ne le serait pas. En effet, les lésions provoquées par les rayonnements ionisants au niveau moléculaire ne semblent pas différentes de celles qui résultent du métabolisme cellulaire normal, avec l'implication dans les deux cas de radicaux libres, en particulier oxygénés. De plus, ni l'examen anatomopathologique ni la recherche de mutations spécifiques n'ont permis de différencier jusqu'à présent une tumeur radio-induite d'une tumeur sporadique.

On sait qu'aux premières étapes de la carcinogénèse une cellule apparaît présentant une combinaison particulière de lésions de l'ADN lui permettant d'échapper au contrôle habituel de la division cellulaire et qu'il faut une dizaine à une centaine de lésions de l'ADN (mutations, cassures...) en des points névralgiques pour franchir ces étapes. Tous les agents capables de léser l'ADN cellulaire (tabac, alcool, produits chimiques variés, rayonnements ionisants, température élevée, autres facteurs d'environnement notamment nutritionnels, radicaux libres du métabolisme cellulaire normal...) contribuent au vieillissement cellulaire et à la carcinogénèse.

Dans une approche multirisque de la carcinogénèse, peut-on alors continuer à parler de cancers radio-induits? Oui, compte tenu des nombreuses données épidémiologiques qui indiquent que la fréquence des cancers augmente lorsque la dose augmente, une fois tenu compte des autres principaux facteurs de risque. Cependant, l'événement radio-induit peut aussi être le seul en cause dans certains cas (cancers radio-induits chez les enfants).

La mise en évidence d'une signature radiologique des cancers, c'est-à-dire la découverte de marqueurs permettant de signer l'éventuelle composante radio-induite d'une tumeur, serait d'un apport considérable dans l'évaluation des risques liés aux expositions aux rayonnements ionisants, mais reste à ce jour non démontrée.

Le caractère multifactoriel de la carcinogénèse plaide pour une approche de précaution vis-à-vis de tous les facteurs de risque, puisque chacun d'eux est susceptible de contribuer à une altération de l'ADN. C'est particulièrement important chez les personnes présentant une radiosensibilité individuelle élevée et pour les organes les plus sensibles comme le sein et la moelle osseuse, et ce d'autant plus que les personnes sont jeunes. Les principes de justification et d'optimisation trouvent là toute leur place (voir chapitre 2).

2 — Les différentes sources de rayonnements ionisants

2.1 — Les rayonnements d'origine naturelle

En France, l'exposition à la radioactivité naturelle, sous ses différents modes (cosmique ou tellurique), représente en moyenne environ 65% de l'exposition totale annuelle.

2.1.1 — Les rayonnements d'origine terrestre (hors radon)

Les radionucléides naturels d'origine terrestre sont présents à des teneurs diverses dans tous les milieux constitutifs de notre environnement et de l'organisme humain. Ils conduisent à une exposition externe de la population du fait des rayonnements gamma émis par les produits de filiation de l'uranium-238 et du thorium-232, et par le potassium-40 présents dans les sols, mais aussi à une exposition interne par inhalation de particules remises en suspension, par ingestion de denrées alimentaires ou d'eau de consommation. Les teneurs en radionucléides naturels dans les sols sont extrêmement variables. Les valeurs des débits de dose d'exposition externe, à l'air libre, s'échelonnent en France, selon les régions, entre quelques nanosieverts/heure (nSv/h) et 100 nSv/h.

Les valeurs de débit de dose à l'intérieur des habitations sont généralement plus élevées du fait de la contribution des matériaux de construction (environ 20% en plus, en moyenne).

À partir d'hypothèses sur les temps de présence des individus à l'intérieur et à l'extérieur des habitations (respectivement 90%

et 10%), la dose efficace annuelle moyenne due à l'exposition externe aux rayonnements gamma d'origine tellurique est estimée en France à environ 0,5 mSv par personne et par an.

Les doses dues à l'exposition interne d'origine naturelle varient selon les quantités incorporées de radionucléides des familles de l'uranium et du thorium de la chaîne alimentaire, lesquelles dépendent des habitudes alimentaires de chacun. Selon l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN, 2015), la dose moyenne par individu serait de l'ordre de 0,32 mSv par an. La concentration moyenne du potassium-40 dans l'organisme représente environ 55 Bq par kg de masse corporelle; il en résulte une dose efficace annuelle moyenne de l'ordre de 0,18 mSv.

Les eaux destinées à la consommation humaine (EDCH), notamment celles d'origine souterraine, ainsi que les eaux minérales, se chargent en radionucléides naturels du fait de la nature des couches géologiques dans lesquelles elles séjournent. La concentration en descendants de l'uranium et du thorium mais aussi en potassium-40 varie selon les ressources exploitées, compte tenu de la nature géologique du sous-sol. Pour les eaux présentant une radioactivité élevée, la dose efficace annuelle résultant d'une consommation quotidienne (deux litres par habitant et par jour) peut atteindre quelques dizaines ou centaines de microsieverts (µSv).

Potentiel d'exhalation du radon en France métropolitaine (source IRSN)



2.1.2 _ Le radon

Certaines zones géographiques présentent un potentiel élevé d'exhalation de radon du fait des caractéristiques géologiques des terrains (sous-sol granitique par exemple). La concentration mesurée à l'intérieur des habitations dépend également de l'étanchéité du bâtiment (soubassements) et de la ventilation des pièces.

L'exposition au radon dit « domestique » (radon dans les habitations) a été estimée par l'IRSN lors de campagnes de mesures qui ont donné lieu ensuite à des analyses statistiques (voir irsn.fr). La valeur moyenne des activités mesurées en radon a ainsi été estimée en France à 63 Bq/m³, avec environ la moitié des résultats inférieurs à 50 Bq/m³, 9% supérieurs à 200 Bq/m³ et 2,3% au-dessus de 400 Bq/m³.

Ces mesures ont permis de classer les départements en fonction du potentiel d'exhalation de radon des terrains (voir carte). En 2011, l'IRSN a publié une cartographie du territoire national en considérant le potentiel d'exhalation de radon dans le sol, à partir des données du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM). Sur cette base, une classification plus fine, par commune, a été publiée par [arrêté interministériel du 27 juin 2018](#).

À terme, la nouvelle obligation faite aux laboratoires de dosimétrie de transmettre à l'IRSN les résultats des dosimètres devra permettre d'améliorer la connaissance des expositions au radon en France (voir le [3^e plan national d'action 2016-2019 pour la gestion du risque lié au radon](#) publié en janvier 2017 et accessible sur asn.fr).

2.1.3 _ Les rayonnements cosmiques

Les rayonnements cosmiques de composantes ionique et neutronique sont aussi accompagnés de rayonnement électromagnétique. Au niveau de la mer, le débit de dose résultant du rayonnement électromagnétique est estimé à 32 nSv/h et celui résultant de la composante neutronique à 3,6 nSv/h.

En prenant en compte le temps moyen passé à l'intérieur des habitations (l'habitat atténué la composante ionique des rayonnements cosmiques), la dose efficace individuelle moyenne dans une commune située au niveau de la mer, en France, est de 0,27 mSv/an, alors qu'elle peut dépasser 1,1 mSv/an dans une commune qui serait située à environ 2 800 m d'altitude. En moyenne, la dose efficace annuelle par individu en France est de 0,32 mSv. Elle est inférieure à la valeur moyenne mondiale de 0,38 mSv par an publiée par l'UNSCEAR.

Du fait d'une exposition accrue aux rayonnements cosmiques en raison de séjours prolongés en altitude, une surveillance dosimétrique s'impose pour le personnel navigant (voir point 3.1.3).

2.2 — Les rayonnements ionisants liés aux activités humaines

Les activités humaines impliquant des risques d'exposition aux rayonnements ionisants, appelées activités nucléaires, peuvent être regroupées selon la nomenclature suivante :

- l'exploitation des INB;
- le transport de substances radioactives;
- les activités nucléaires de proximité;
- l'élimination des déchets radioactifs;
- la gestion des sites contaminés;
- les activités générant un renforcement des rayonnements ionisants d'origine naturelle.

2.2.1 — Les installations nucléaires de base

Les activités nucléaires sont de nature très diverse et couvrent toute activité touchant à la mise en œuvre ou à l'utilisation de substances radioactives ou de rayonnements ionisants. Ces activités sont soumises à des dispositions générales du code de la santé publique et, selon leur nature et les risques qu'elles présentent, à un régime juridique spécifique. Les installations nucléaires de base (INB) sont définies à l'article L. 593-2 du code de l'environnement :

- 1° les réacteurs nucléaires;
- 2° les installations, répondant à des caractéristiques définies par décret en Conseil d'État, de préparation, d'enrichissement, de fabrication, de traitement ou d'entreposage de combustibles nucléaires ou de traitement, d'entreposage ou de stockage de déchets radioactifs;
- 3° les installations contenant des substances radioactives ou fissiles et répondant à des caractéristiques définies par décret en Conseil d'État;
- 4° les accélérateurs de particules répondant à des caractéristiques définies par décret en Conseil d'État;
- 5° les centres de stockage en couche géologique profonde de déchets radioactifs mentionnés à l'article L. 542-10-1.

Les installations relèvent du régime des INB, régi par les chapitres III et VI du titre IX du livre V du [code de l'environnement](#) et les textes pris pour leur application.

La liste des INB au 31 décembre 2018 figure en annexe de ce rapport.

• La prévention des risques accidentels et la sûreté nucléaire

Le principe fondamental adopté internationalement sur lequel repose le système d'organisation et de réglementation spécifique de la sûreté nucléaire est celui de la responsabilité de l'exploitant (voir chapitre 2). Les pouvoirs publics veillent à ce que cette responsabilité soit pleinement assumée dans le respect des prescriptions réglementaires. Pour ce qui concerne la prévention des risques pour les travailleurs, l'exploitant d'une INB est tenu de mettre en œuvre tous les moyens nécessaires pour assurer la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants. Il doit en particulier s'assurer du respect des règles générales applicables à l'ensemble des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants (organisation du travail, prévention des accidents, suivi médical des travailleurs, y compris ceux des entreprises extérieures...).

Pour les questions relevant de la protection de la population et de l'environnement, l'exploitant de l'INB doit également mettre en œuvre les moyens nécessaires pour atteindre et maintenir un niveau optimal de protection. Plus particulièrement, les rejets d'effluents liquides et gazeux, radioactifs ou non radioactifs, sont strictement limités (voir chapitre 3).

2.2.2 — Le transport de substances radioactives

Lors du transport de substances radioactives, les risques essentiels sont ceux d'exposition interne ou externe, de criticité ainsi que ceux de nature chimique. La sûreté du transport de substances radioactives s'appuie sur une logique de défense en profondeur :

- la robustesse de l'emballage est la première ligne de défense. L'emballage joue un rôle essentiel et doit résister aux conditions de transport envisageables;
- la fiabilité des opérations de transport constitue la deuxième ligne de défense;
- enfin, la troisième ligne de défense est constituée par les moyens d'intervention mis en œuvre en cas d'un incident ou d'un accident.

2.2.3 — Les activités nucléaires de proximité

Les rayonnements ionisants, qu'ils soient émis par des radionucléides ou générés par des appareils électriques, sont utilisés dans de très nombreux domaines dont la médecine (radiologie, radiothérapie, médecine nucléaire et pratiques interventionnelles radioguidées), la biologie, la recherche, l'industrie, mais aussi les applications vétérinaires ou la conservation des denrées alimentaires.

L'employeur est tenu de mettre en œuvre tous les moyens nécessaires pour assurer la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants. L'exploitant de l'installation doit également mettre en place les dispositions prévues par le code de la santé publique pour assurer la gestion des sources de rayonnements ionisants qu'il détient (notamment les sources radioactives), assurer, le cas échéant, la gestion des déchets produits et limiter les rejets des effluents liquides et gazeux. Dans le cas d'utilisation à des fins médicales, les questions concernant la protection des patients sont également prises en compte.

2.2.4 — La gestion des déchets radioactifs

Comme toutes les activités industrielles, les activités nucléaires peuvent créer des déchets dont certains sont radioactifs. Les trois principes fondamentaux sur lesquels s'appuie une gestion rigoureuse des déchets radioactifs sont la responsabilité du producteur de déchets, la traçabilité des déchets et l'information du public.

Les dispositions techniques de gestion à mettre en œuvre doivent être adaptées au risque présenté par les déchets radioactifs. Ce risque peut être estimé principalement au travers de deux paramètres : l'activité, qui contribue à la toxicité du déchet, et la période, durée au bout de laquelle l'activité est divisée par deux.

Enfin, la gestion des déchets radioactifs doit être déterminée préalablement à toute création d'activité nouvelle ou modification d'activité existante afin :

- de s'assurer de la disponibilité de filières de traitement des différentes catégories de déchets susceptibles d'être produits, depuis la phase amont (production de déchets et conditionnement sous forme de colis) jusqu'à la phase aval (entreposage, transport, stockage);
- d'optimiser les filières de gestion de déchets.

2.2.5 — La gestion des sites contaminés

La gestion des sites contaminés du fait d'une radioactivité résiduelle résultant d'une activité nucléaire passée ou d'une activité ayant produit des dépôts de radionucléides naturels justifie des actions spécifiques de radioprotection, notamment dans le cas où une réhabilitation est envisagée.

Compte tenu des usages actuels ou futurs du site, des objectifs de décontamination doivent être établis. L'élimination des déchets produits lors de l'assainissement des locaux ainsi que des terres contaminées doit être maîtrisée, depuis le site jusqu'à l'entreposage ou le stockage. La gestion des objets contaminés obéit également à ces principes.

2.2.6 — Les activités utilisant des substances radioactives d'origine naturelle

Les expositions aux rayonnements ionisants d'origine naturelle, lorsqu'elles sont renforcées du fait des activités humaines, justifient des actions de contrôle, si elles sont susceptibles de générer un risque pour les travailleurs exposés et, le cas échéant, pour la population.

Ainsi, certaines activités incluses dans la définition des « activités nucléaires » peuvent avoir recours à l'utilisation de matériaux contenant des substances radioactives d'origine naturelle à des niveaux de concentrations susceptibles d'accroître, de manière

significative, l'exposition aux rayonnements ionisants des travailleurs et, dans une moindre mesure, des populations proches des lieux où sont exercées ces activités.

Les familles naturelles de l'uranium et du thorium sont les principaux radionucléides rencontrés dans ces industries; on peut citer:

- la production pétrolière et gazière, d'énergie géothermique, de dioxyde de titane, d'engrais phosphatés et de ciment;
- l'extraction de terres rares et de granits;
- les activités de fonderie d'étain, du plomb ou du cuivre.

Les actions de radioprotection à mener dans ce domaine visent les travailleurs (risque d'irradiation externe et de contamination interne, radon) mais aussi la population, par exemple, dans le cas de rejets d'effluents dans l'environnement ou de production de résidus susceptibles d'être réutilisés, notamment, dans les matériaux de construction. Ces activités sont considérées, depuis juin 2018, comme des installations classées pour la protection de l'environnement.

3 — La surveillance des expositions aux rayonnements ionisants

Du fait de la difficulté d'attribuer un cancer au seul facteur de risque rayonnements ionisants, pour prévenir les cancers dans la population, une « surveillance du risque » est réalisée par la mesure d'indicateurs de la radioactivité ambiante (mesure des débits de dose par exemple), de la contamination interne ou, à défaut, par la mesure de grandeurs (activités dans les rejets d'effluents radioactifs) qui peuvent permettre ensuite de procéder, par la modélisation et le calcul, à une estimation des doses reçues par les populations exposées.

La totalité de la population française est exposée à des rayonnements ionisants d'origine naturelle ou ayant pour origine des activités humaines, mais de façon inégale sur le territoire. L'exposition moyenne de la population française est estimée à 4,5 mSv (voir diagramme 1) par personne et par an, mais cette exposition présente une grande variabilité individuelle, notamment selon le lieu d'habitation et le nombre d'exams radiologiques réalisés (source: [IRSN 2015](#)). La dose efficace individuelle annuelle moyenne peut ainsi varier selon les départements d'un facteur

pouvant atteindre cinq. Le diagramme 1 représente une estimation des contributions respectives des différentes sources d'exposition aux rayonnements ionisants pour la population française.

Ces données restent cependant trop imprécises pour identifier, pour chaque catégorie de sources d'exposition, les catégories ou groupes de personnes les plus exposés à l'exception du risque radon.

3.1 — Les doses reçues par les travailleurs

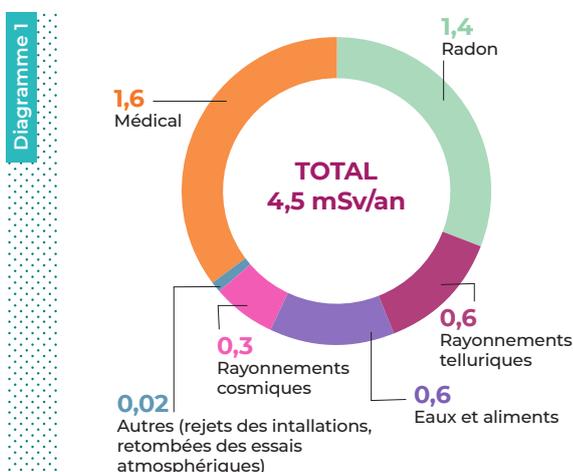
3.1.1 — La surveillance de l'exposition des personnes travaillant dans les installations nucléaires

Le système de surveillance des expositions des personnes susceptibles d'être exposées aux rayonnements ionisants, travaillant notamment dans les INB ou dans les installations relevant du nucléaire de proximité, est en place depuis plusieurs décennies. Fondé principalement sur le port obligatoire du dosimètre passif pour les travailleurs susceptibles d'être exposés, il permet de vérifier le respect des limites réglementaires applicables aux travailleurs. Ces limites visent l'exposition totale (depuis 2003, la limite annuelle, exprimée en termes de dose efficace, est de 20 mSv sur 12 mois consécutifs), obtenue en ajoutant la dose due à l'exposition externe et celle résultant d'une éventuelle contamination interne; d'autres limites, appelées limites de dose équivalente, sont définies pour l'exposition externe de certaines parties du corps telles que les mains et le cristallin (voir rubrique « [Réglementer](#) » sur [asn.fr](#)).

Les données enregistrées permettent de connaître, pour chaque personne travaillant dans les installations nucléaires, y compris celles des entreprises extérieures, la dose d'exposition cumulée sur une période déterminée (mensuelle ou trimestrielle). Elles sont rassemblées dans le Système d'information de la surveillance de l'exposition aux rayonnements ionisants ([Siseri](#)) géré par l'IRSN et font l'objet d'une publication annuelle. L'exposition des travailleurs au radon n'est pour le moment pas intégrée dans le dispositif de surveillance.

Les résultats de l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants présentés ci-après sont issus du [bilan IRSN 2017](#) relatif à l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France. Sur le plan méthodologique, le bilan IRSN de l'année 2017 marque une évolution importante. En effet, le bilan 2017 de l'exposition externe a été exclusivement élaboré

Exposition moyenne aux rayonnements ionisants de la population en France (mSv/an)*



Source: IRSN 2015.

* Ce diagramme ne prend pas en compte les données publiées dans la CIPR 167 de janvier 2018.

Sources et voies d'exposition aux rayonnements ionisants



- > Irradiation externe
- - -> Contamination interne par inhalation de substances radioactives
- - -> Contamination cutanée



- > Irradiation externe
- - -> Contamination interne par ingestion de denrées contaminées
- - -> Contamination cutanée et ingestion involontaire

à partir des données enregistrées dans Siseri contrairement aux années précédentes où le bilan était établi par agrégation des synthèses annuelles demandées aux organismes de dosimétrie. En conséquence, les résultats 2017 ne sont pas directement comparables à ceux publiés dans les rapports précédents. Néanmoins, à des fins de comparaison, les résultats des années 2015 et 2016 ont été réévalués rétroactivement avec la nouvelle approche méthodologique (voir tableau 3).

Les tableaux 1 et 2 présentent, par domaine d'activité et pour l'année 2017, la répartition des effectifs surveillés, de la dose collective (la dose collective est la somme des doses individuelles reçues par un groupe de personnes donné) et du nombre de dépassements de la limite annuelle de 20 mSv. Ils témoignent d'une grande inégalité de la répartition des doses selon les secteurs. Par exemple, le secteur des activités médicales et vétérinaires, qui regroupe une part importante des effectifs surveillés (proche de 58%), ne représente que 18% de la dose collective; par contre, le secteur de l'industrie du nucléaire civil qui ne représente que 20% des effectifs, comptabilise plus de 70% de la dose collective. Le secteur industriel quant à lui représente 4% des effectifs et comptabilise 5% de la dose collective.

Le tableau 3 montre que le nombre total de travailleurs suivis par dosimétrie externe passive est en augmentation de 1% par an depuis 2015.

En 2017, la dose collective atteint 53,5 homme.Sv, valeur en baisse d'environ 20% par rapport à l'année 2016. Cette diminution est liée majoritairement à une baisse d'activité dans le domaine du nucléaire. En particulier, le volume des activités de maintenance chez EDF est moindre que celui de 2016.

Le nombre de travailleurs surveillés dont la dose efficace annuelle a dépassé 20 mSv, est stable (1 à 2 dépassements

annuels) depuis 2015; deux dépassements de la limite de dose efficace annuelle ont été observés en 2017 (dose efficace de 40,7 mSv pour un travailleur du secteur du contrôle non destructif et une dose efficace de 43,7 mSv pour un travailleur du secteur médical) (voir diagramme 2).

Concernant la dosimétrie des extrémités (doigts et poignets), le nombre de travailleurs suivis en 2017 est de 27 949 (soit 8% de l'effectif suivi). Sur l'ensemble des effectifs suivis, il y a eu quatre cas de dépassement de la limite réglementaire de la dose équivalente aux extrémités de 500 mSv, tous dans le secteur de la radiologie interventionnelle (les dépassements se situent entre 510 mSv et 1 270 mSv).

Pour la deuxième année consécutive, des données relatives à la surveillance de l'exposition du cristallin sont disponibles. Deux mille cinq cent cinquante personnes ont fait l'objet d'une surveillance de l'exposition au cristallin. La dose maximale enregistrée est de 44,1 mSv et concerne le domaine des utilisations médicales. Cette valeur est à mettre en regard de la nouvelle limite réglementaire de dose au cristallin : valeur cumulée de 100 mSv sur cinq ans, sans excéder 50 mSv la même année (20 mSv/an à partir de 2023).

Le bilan de la surveillance dosimétrique de l'exposition externe des travailleurs en 2017, publié par l'IRSN en juin 2018, montre globalement l'efficacité du système de prévention mis en place dans les établissements où sont utilisées les sources de rayonnements ionisants puisque, pour 96% des effectifs surveillés, la dose annuelle est restée inférieure à 1 mSv (limite de dose efficace annuelle pour le public du fait des activités nucléaires). Les dépassements des valeurs limites réglementaires restent exceptionnels.

Surveillance de l'exposition externe des travailleurs dans le domaine nucléaire civil (année 2017)

Tableau 1		NOMBRE DE PERSONNES SURVEILLÉES	DOSE COLLECTIVE (HOMME.SV*)	DOSE INDIVIDUELLE > 20 MSV
	Réacteurs et production d'énergie (EDF)	24 961	5,73	0
	Cycle du combustible; démantèlement	12 579	3,65	0
	Transport	800	0,07	0
	Logistique et maintenance (prestataires)	29 794	26,56	0
	Effluents, déchets	608	0,07	0
	Autres	6 313	1,05	0
	Total nucléaire civil	75 055	37,13	0

(Source : exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France – bilan IRSN, juin 2018)

* Homme.Sv : unité de grandeur de dose collective. Pour mémoire, la dose collective est la somme des doses individuelles reçues par un groupe de personnes données.

Surveillance de l'exposition externe des travailleurs dans les activités nucléaires de proximité (année 2017)

Tableau 2		NOMBRE DE PERSONNES SURVEILLÉES	DOSE COLLECTIVE (HOMME.SV*)	DOSE INDIVIDUELLE > 20 MSV
	Médecine	154 264	8,07	1
	Dentaire	35 506	1,41	0
	Vétérinaire	19 151	0,33	0
	Industrie	14 426	2,64	1
	Recherche	12 117	0,28	0
	Autres	40 837	1,95	0

(Source : exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France – bilan IRSN, juin 2018)

* Homme.Sv : unité de grandeur de dose collective.

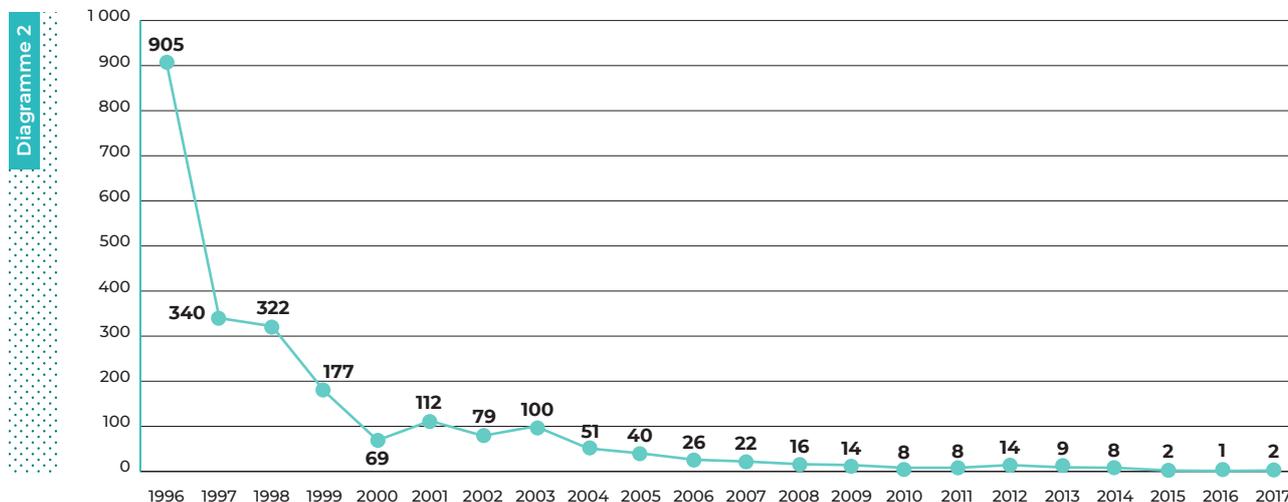
Évolution des effectifs suivis tous domaines confondus et de la dose collective de 2015 à 2017(*)

Tableau 3	ANNÉE	EFFECTIF SUIVI	DOSE COLLECTIVE (HOMME.SV)	DOSE INDIVIDUELLE MOYENNE (MSV)
	2015	352 641	65,61	0,76
	2016	357 527	66,71	0,73
	2017	360 694	53,52	0,72

(Source : exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France – bilan IRSN, juin 2018)

* À des fins de comparaison, les résultats des années 2015 et 2016 ont été réévalués rétroactivement avec la nouvelle approche méthodologique

Évolution du nombre de travailleurs surveillés dont la dose annuelle est supérieure à 20 mSv, de 1996 à 2017



Source : IRSN

Bilan de la surveillance dosimétrique de l'exposition externe des travailleurs aux rayonnements ionisants (hors radioactivité naturelle) en 2017

(Source : exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France – bilan IRSN, juin 2018)

- Effectif total surveillé : 360 694 travailleurs
- Effectif surveillé pour lequel la dose est restée inférieure au seuil d'enregistrement : 285 856 travailleurs, soit plus de 79 %
- Effectif surveillé pour lequel la dose est restée comprise entre le seuil d'enregistrement et 1 mSv : 61 927 travailleurs, soit environ 17 %
- Effectif surveillé pour lequel la dose est restée comprise entre 1 mSv et 20 mSv : 12 911 travailleurs, soit plus de 3,6 %
- Effectif surveillé pour lequel la dose efficace annuelle a dépassé 20 mSv : 2 travailleurs
- Effectif surveillé pour lequel la dose aux extrémités a dépassé 500 mSv : 4 travailleurs
- Dose collective (somme des doses individuelles) : 53,5 homme.Sv
- Dose individuelle annuelle moyenne sur l'effectif ayant enregistré une dose supérieure au seuil d'enregistrement : 0,72 mSv

Bilan de la surveillance de l'exposition interne (hors radioactivité naturelle) en 2017

- Nombre d'examens de routine réalisés : 243 871 (dont moins de 0,7 % considérés positifs)

- Effectif ayant fait l'objet d'une estimation dosimétrique : 439 travailleurs
- Nombre d'examens de surveillance spéciale ou de contrôle réalisés : 9 159 (dont 12 % sont supérieurs au seuil d'enregistrement)
- Effectif ayant enregistré une dose efficace engagée supérieure à 1 mSv : 3 travailleurs

Bilan de la surveillance de l'exposition aux rayonnements cosmiques en 2017 (aviation civile)

- Dose collective pour 22 600 personnels navigants : 46,9 homme.Sv
- Dose individuelle annuelle moyenne : 2,1 mSv

Bilan de la surveillance de l'exposition aux radionucléides naturels des chaînes de l'uranium et du thorium en 2017

- Exposition externe :
 - dose collective pour 1 425 travailleurs : 61 homme.mSv
 - dose individuelle annuelle moyenne sur l'effectif ayant enregistré une dose supérieure au seuil d'enregistrement : 0,22 mSv
- Exposition interne :
 - dose collective pour 375 travailleurs : 76 homme.mSv
 - dose individuelle annuelle moyenne sur l'effectif ayant enregistré une dose supérieure au seuil d'enregistrement : 0,60 mSv

En conclusion, comme les années précédentes, le bilan des doses reçues par les travailleurs en 2017 est resté stable, la dose annuelle reçue est restée inférieure à 1 mSv pour environ 96 % des travailleurs susceptibles d'être exposés, et deux dépassements de la limite annuelle de 20 mSv sont à noter. La surveillance de l'exposition du cristallin avec, pour ce tissu, le respect de la nouvelle limite constitue les principaux objectifs de la radioprotection dans les toutes prochaines années et notamment dans le domaine des pratiques médicales interventionnelles radioguidées.

3.1.2 _ L'exposition des travailleurs aux rayonnements naturels renforcés

L'exposition des travailleurs aux rayonnements naturels renforcés résulte de l'ingestion de poussières de matières riches en radionucléides (phosphates, minerais métallifères) ou de l'inhalation de radon, formé par la désintégration de l'uranium (entrepôts mal ventilés, thermes) ou, encore, de l'exposition externe due aux dépôts dans des procédés (tartre se formant dans les tuyauteries par exemple).

Le [bilan des études réalisées en France depuis 2005](#), publié par l'ASN en janvier 2010, et les études plus récentes, montrent que 85 % des doses reçues par les travailleurs des industries concernées restent inférieures à 1 mSv/an. Les secteurs industriels où l'exposition des travailleurs est susceptible de dépasser 1 mSv/an sont les suivants : traitement du minerai de titane, fumisterie et recyclage de céramiques réfractaires, maintenance de pièces composées d'alliages au thorium dans l'aéronautique, traitement chimique du minerai de zircon, transformation mécanique et utilisation de zircon et traitement des terres rares. Les tendances observées et publiées en 2010 demeurent toujours valides au regard des dossiers reçus jusqu'en 2017. Une seule étude a été produite en 2017 (secteur des centrales thermiques au charbon). Les doses estimées sont toutes inférieures à 0,05 mSv/an.

3.1.3 _ L'exposition des personnels navigants aux rayonnements cosmiques

Les personnels navigants de compagnies aériennes ainsi que certains grands voyageurs sont exposés à des doses significatives du fait de l'altitude et de l'intensité des rayonnements cosmiques à haute altitude. Ces doses peuvent dépasser 1 mSv/an.

Depuis le 1^{er} juillet 2014, date d'entrée en vigueur de l'[arrêté du 17 juillet 2013](#) relatif à la carte de suivi médical et de suivi dosimétrique des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants, le dispositif Sievert permettant de calculer la dose de rayonnements cosmiques reçue par le personnel navigant lors d'un vol (système mis en place par la Direction générale de l'aviation civile (DGAC), l'IRSN, l'Observatoire de Paris et l'Institut polaire français Paul-Émile Victor (www.sievert-system.org), a évolué. C'est l'IRSN qui réalise le calcul des doses individuelles avec l'application *SievertPN*, à partir des données de vol et de présence des personnels fournies par les compagnies aériennes. Ces données sont ensuite transmises dans le registre national de dosimétrie des travailleurs Siseri.

Au 31 décembre 2017, *SievertPN* avait transmis la totalité des doses des personnels navigants à Siseri pour dix compagnies aériennes civiles ayant adhéré au dispositif, conduisant à un total de 22 600 personnels navigants suivis par ce dispositif. En 2017, 19 % des doses individuelles annuelles sont inférieures à 1 mSv et 81 % des doses individuelles annuelles sont comprises entre 1 mSv et 5 mSv. La dose individuelle maximale annuelle est de 5,5 mSv.

3.2 _ Les doses reçues par la population

3.2.1 _ Les doses reçues par la population du fait des activités nucléaires

Les réseaux de surveillance automatisés gérés par l'IRSN sur l'ensemble du territoire (réseaux Téléray, Hydrotéléray et Téléhydro) permettent de surveiller en temps réel la radioactivité dans l'environnement et de mettre en évidence toute

variation anormale. Ces réseaux de mesure joueraient un rôle prépondérant, en cas d'incident ou d'accident conduisant à des rejets de substances radioactives, pour éclairer les décisions à prendre par les autorités et pour informer la population. En situation normale, ils participent à l'évaluation de l'impact des INB (voir chapitre 3).

Par contre, il n'existe pas de méthode globale de surveillance permettant de reconstituer de façon exhaustive les doses reçues par la population du fait des activités nucléaires. De ce fait, le respect de la limite d'exposition de la population (dose efficace fixée à 1 mSv par an) n'est pas directement contrôlable. Cependant, pour les INB, les rejets d'effluents radioactifs font l'objet d'une comptabilité précise, et une surveillance radiologique de l'environnement est mise en place autour des installations. À partir des données recueillies, l'impact dosimétrique de ces rejets sur les populations vivant au voisinage immédiat des installations est ensuite calculé en utilisant des modèles permettant de simuler les transferts vers l'environnement. Les impacts dosimétriques varient, selon le type d'installation et les habitudes de vie des groupes de référence retenus, de quelques microsieverts à quelques dizaines de microsieverts par an.

Ces estimations ne sont pas connues pour les activités nucléaires autres que les INB, du fait des difficultés méthodologiques pour mieux connaître l'impact de ces installations et, notamment, l'impact des rejets contenant des faibles quantités de radionucléides artificiels provenant de l'utilisation des sources radioactives non scellées dans les laboratoires de recherche ou de biologie, ou dans les services de médecine nucléaire. À titre d'exemple, l'impact des rejets hospitaliers pourrait conduire à des doses de quelques dizaines de microsieverts par an pour les personnes les plus exposées, notamment pour certains postes de travail dans les réseaux d'assainissement et stations d'épuration (études IRSN 2005 et 2015).

Des situations héritées du passé telles que les essais nucléaires aériens et l'accident de Tchernobyl (Ukraine) peuvent contribuer, de manière très faible, à l'exposition de la population. Ainsi, la dose efficace individuelle moyenne reçue actuellement due aux retombées de l'accident de Tchernobyl en France métropolitaine est estimée entre 0,01 mSv et 0,03 mSv/an (IRSN 2001). Celles dues aux retombées des tirs atmosphériques avaient été estimées, en 1980, à environ 0,02 mSv; du fait d'un facteur de décroissance d'environ 2 en dix ans, les doses actuelles sont estimées inférieures à 0,01 mSv/an (IRSN 2015). En ce qui concerne les retombées en France de l'accident de Fukushima (Japon), les résultats publiés en France par l'IRSN en 2011 ont montré la présence d'iode radioactif à des niveaux très faibles, conduisant pour les populations à des doses très inférieures à celles estimées pour l'accident de Tchernobyl et d'impact négligeable.

3.2.2 – L'exposition de la population aux rayonnements naturels

• L'exposition due à la radioactivité naturelle des eaux de consommation

Les résultats de la surveillance de la qualité radiologique des eaux distribuées au robinet, exercée par les agences régionales de santé en 2008 et 2009 ([rapport DGS/ASN/IRSN](#) publié en 2011) ont montré que 99,83% de la population bénéficie d'une eau dont la qualité respecte en permanence la dose indicative de 0,1 mSv/an, fixée par la réglementation. Cette appréciation globalement satisfaisante s'applique également à la qualité radiologique des eaux conditionnées produites en France ([rapport DGS/ASN/IRSN](#) publié en 2013).

À partir de 2019, la mesure du radon contenue dans les eaux du robinet et dans les eaux embouteillées sera obligatoire. Pour

accompagner cette nouvelle disposition, une instruction a été établie en concertation avec l'ASN, et diffusée en 2018 aux agences régionales de santé par la Direction générale de la santé ([avis n°2018-AV-0302](#) de l'ASN du 6 mars 2018 sur les modalités de gestion du radon dans le cadre du contrôle sanitaire des EDCH).

• L'exposition due au radon

Depuis 1999, du fait du risque de cancer du poumon attribuable aux expositions prolongées au radon, des mesures obligatoires de radon doivent être réalisées périodiquement dans les lieux ouverts au public et notamment dans les établissements d'enseignements et dans les établissements sanitaires et sociaux. Depuis août 2008, cette surveillance obligatoire a été étendue aux lieux de travail situés dans les zones géographiques prioritaires.

Sur la base des résultats transmis par les organismes agréés par l'ASN pour la campagne 2017/2018, plus de 95% des dépistages ont été réalisés dans des établissements d'enseignement et des établissements sanitaires et médico-sociaux (respectivement 48% et 46% des dépistages). La concentration volumique en radon est inférieure au seuil d'action de 400 Bq/m³ pour 79% des établissements d'enseignement et 87% des établissements sanitaires et médico-sociaux dépistés.

Pour les établissements dont la concentration volumique en radon est supérieure à 400 Bq/m³, des actions simples de remédiation ou des travaux doivent être réalisés en vue d'abaisser la concentration volumique de radon en deçà de ce seuil. Ce seuil, réduit en juin 2018, est maintenant fixé à 300 Bq/m³. Près de 50% des contrôles après travaux réalisés par les organismes agréés par l'ASN ont permis de vérifier que la concentration volumique en radon était abaissée en dessous du seuil de 400 Bq/m³.

Les résultats des contrôles dans les lieux ouverts au public ne sont pas pertinents pour évaluer précisément les doses liées à l'exposition de la population du fait que l'exposition dans l'habitat constitue la part la plus importante des doses reçues au cours de la vie.

L'information et la sensibilisation du public et des principaux acteurs concernés par le risque radon (collectivités territoriales, employeurs...) sont donc essentielles et sont désormais inscrites en orientation stratégique de première priorité au sein du [3^e plan national d'action pour la gestion du risque lié au radon](#). Ce plan national, pour la période 2016-2019, est piloté par l'ASN. Il a été publié en janvier 2017.

Dans ce nouveau plan, la stratégie d'information et de sensibilisation s'appuie sur les mesures législatives nouvelles adoptées en 2016. Parmi elles se distinguent en particulier l'information obligatoire des acquéreurs et des locataires de biens immobiliers sur les risques sanitaires liés au radon dans l'habitat.

Le déploiement du 3^e plan national d'action 2016-2019 pour la gestion du risque lié au radon, qui accompagne la mise à jour de la réglementation dans ce domaine (voir rubrique « [Réglementer](#) » sur [asn.fr](#)) et la publication en juin 2018 de la nouvelle cartographie des communes considérées comme prioritaires vis-à-vis de ce risque, doit permettre d'intensifier la communication en direction du public afin de mieux le sensibiliser à ce risque. En concertation avec les administrations concernées (Agences régionales de santé (ARS), Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (Dreal), Directions régionales des entreprises, de la concurrence, de la consommation, du travail et de l'emploi (Dreccet)), les divisions territoriales de l'ASN sont engagées pour participer aux actions d'information mais aussi pour procéder à des contrôles, notamment dans les établissements recevant du public.

Les divisions territoriales de l'ASN en première ligne pour participer à la prévention du risque lié au radon dans les territoires

S'agissant de sa mission de contrôle des concentrations en radon dans les Établissements recevant du public (ERP), l'ASN a mené en Bourgogne-Franche-Comté trois inspections auprès des plus importants gestionnaires d'établissements d'enseignement. Ces inspections (auprès des conseils départementaux de la Nièvre et de Saône-et-Loire, respectivement gestionnaires de 30 et 51 collèges, et de la ville d'Autun, qui gère 7 écoles primaires) ont permis de vérifier que les demandes formulées par l'ASN en 2016 ont été prises en compte et que l'ensemble des établissements a fait l'objet d'un dépistage du radon. Des actions de remédiation sont en cours dans les 10% d'établissements de la région qui présentaient une concentration en radon supérieure au seuil d'action réglementaire.

En Auvergne-Rhône-Alpes, la division de Lyon de l'ASN a exercé son contrôle dans les ERP de 8 départements classés prioritaires pour la gestion du risque radon : le bilan de l'enquête à distance lancée en 2014 auprès des 80 plus importantes communes de la région chargées des écoles publiques a conduit l'ASN à relancer plus d'une dizaine de communes où la situation vis-à-vis de la gestion du risque radon n'était pas satisfaisante (absence de dépistage, absence d'action de remédiation en cas de dépassement en radon, absence de nouvelles mesures pour vérifier l'efficacité des travaux, etc.). En région PACA et en Occitanie, à noter également deux inspections dans les conseils départementaux des Hautes-Alpes et Lozère.

L'ASN a fait également porter ses efforts sur l'information des parties prenantes et du public. Aux côtés d'administrations (Dreal, ARS, Cerema) ou d'organisations partenaires (associations professionnelles, collectivités locales, etc.), elle sensibilise élus, professionnels du bâtiment, employeurs, responsables d'ERP et grand public au risque lié au radon et aux évolutions de la réglementation : c'est le cas en région Bourgogne-Franche-Comté où l'ASN participe depuis 2011 aux actions conduites par les partenaires de la « démarche pluraliste radon », qui a pour but de sensibiliser les collectivités territoriales, les professionnels du bâtiment et les particuliers aux risques induits par l'exposition au radon. La division de Dijon de l'ASN contribue également, depuis 2016, au projet franco-suisse Jurad-Bat qui vise à établir en 2019 une plateforme informatique transfrontalière

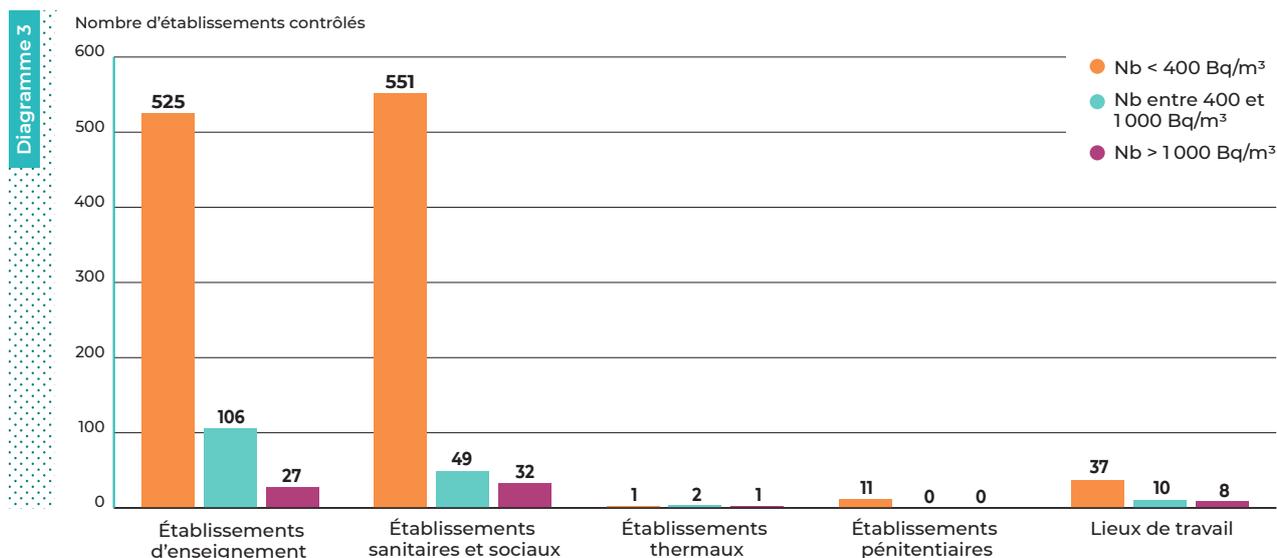
concourant notamment à intégrer le radon à la formation des professionnels du bâtiment.

En Bourgogne-Franche-Comté en 2018, l'ASN, l'Agence régionale de santé (ARS) et la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (Dreal) ont en outre constitué un Comité d'orientation régional pour la gestion du risque radon (Comor) afin d'analyser le retour d'expérience des différentes initiatives conduites et en tirer un plan d'action coordonné couvrant l'ensemble de la région.

Dans le Grand Est, en lien avec l'ARS et ATMO – association de surveillance agréée pour la qualité de l'air –, l'ASN a participé à un séminaire d'information des élus locaux qui s'est tenu le 16 mai 2018 à Holtzwihr (Haut-Rhin). Environ 30 maires y ont participé. L'occasion pour l'ASN de leur présenter les nouvelles obligations incombant aux collectivités à la suite de la transposition en droit français de la Directive Euratom 2013/59. Action d'information également aux thermes de Niederbronn-les Bains et Morsbronn-les-Bains (Bas-Rhin) le 27 juillet 2018 avec l'ARS, la direction de deux établissements ayant décidé d'évaluer le risque lié au radon au niveau des postes de travail situés en sous-sol.

Enfin, en Pays de la Loire – dont les départements de la Loire-Atlantique, du Maine-et-Loire, de la Mayenne et de la Vendée ont entre 65% et 80% de leurs communes situées dans des zones à fort potentiel radon –, la division de Nantes de l'ASN a participé le 6 novembre 2018 à la première « Matinale du radon », qui a rassemblé plus de 80 représentants de collectivités locales, d'établissements d'enseignement, d'établissements sanitaires et sociaux, d'associations et de bureaux d'études. L'objectif de cette matinée, qui s'inscrivait dans le cadre du troisième plan régional santé environnement (PRSE3), était de présenter les nouvelles obligations réglementaires en matière de gestion du risque radon dans les ERP. Une présentation des nouvelles obligations en matière de droit du travail a aussi été réalisée. Enfin, cet événement a permis de décrire les nouvelles obligations dans le domaine de l'immobilier (information de l'acheteur et du locataire) et d'inciter les collectivités locales à mener des campagnes de mesure du radon dans l'habitat privé afin de sensibiliser le grand public.

Répartition des concentrations volumiques de radon selon les types d'établissements dépistés (en %), campagne 2017/2018



3.3 — Les doses reçues par les patients

En France, l'exposition à des fins médicales représente la part la plus importante des expositions artificielles de la population aux rayonnements ionisants. Elle progresse depuis une trentaine d'années du fait de l'augmentation du nombre d'examens radiologiques, notamment d'examens scanographiques, du vieillissement de la population, des stratégies déployées pour une meilleure prise en charge de patients, en particulier dans le cadre de la surveillance après traitement d'un cancer et des maladies coronariennes. Elle fait l'objet depuis 2002 d'un bilan régulier par l'IRSN.

La dose efficace moyenne par habitant du fait des examens radiologiques à visée diagnostique a été évaluée à 1,6 mSv pour l'année 2012 (rapport IRSN 2014) pour un volume d'actes diagnostiques de l'ordre de 81,8 millions (74,6 millions en 2007), soit 1247 actes pour 1000 habitants et par an. Il faut noter que l'exposition individuelle en 2012 est très hétérogène. Ainsi, si environ un tiers de la population française a bénéficié d'au moins un acte (hors actes dentaires), 85% de cette population n'a pas été exposée ou a reçu moins de 1 mSv. La dose efficace individuelle moyenne a augmenté de 23% entre 2007 et 2012 (elle était de 1,3 mSv en 2007).

La radiologie conventionnelle (54%), la scanographie (10,5%) et la radiologie dentaire (34%) regroupent le plus grand nombre d'actes. C'est la contribution de la scanographie à la dose efficace collective qui reste prépondérante et plus significative en 2012 (71%) qu'en 2007 (58%), alors que celle de la radiologie dentaire reste très faible (0,2%).

Chez les adolescents, les actes de radiologie conventionnelle et dentaire sont les plus nombreux (1 020 et 1 220 actes pour 1 000 individus en 2012). Malgré leur fréquence, les actes de radiologie dentaire dans cette population ne représentent que 0,5% de la dose collective.

À noter enfin :

- dans un échantillon d'environ 600 000 personnes bénéficiaires de l'assurance maladie, l'analyse des doses efficaces pour ces personnes, ayant effectivement eu un examen, montre que 70% d'entre elles ont reçu moins d'1 mSv, 18% entre 1 et 10 mSv, 11% entre 10 et 50 mSv et 1% plus de 50 mSv;

Le second plan d'action pour la maîtrise des doses de rayonnements ionisants délivrées aux personnes en imagerie médicale

La maîtrise des doses délivrées aux patients à des fins de diagnostic ou à visée thérapeutique conduit à agir sur l'appropriation des principes de justification et d'optimisation dans l'exercice des pratiques médicales faisant appel aux rayonnements ionisants.

Le [second plan d'action de l'ASN](#), publié en juillet 2018, vise à poursuivre la promotion d'une culture de radioprotection des professionnels avec le renforcement des compétences et l'harmonisation des pratiques, dans un cadre réglementaire mis à jour. Les actions visent plusieurs domaines dont celui des ressources humaines et de la formation, celui de la qualité et de la sécurité des pratiques professionnelles et celui des équipements.

- à partir d'un échantillon de 120 000 enfants nés entre 2000 et 2015, l'IRSN (rapport 2015) rapporte qu'en 2015, 31,3% des enfants de l'échantillon ont été exposés aux rayonnements ionisants à des fins diagnostiques (en hausse de 2% par rapport à l'année 2010). La dose efficace moyenne est estimée à 0,43 mSv et la médiane à 0,02 mSv (en baisse pour la moyenne mais équivalente pour la valeur médiane). Il est noté une grande disparité en fonction de l'âge ; avant 1 an la valeur médiane est à 0,55 mSv (valeur la plus haute) et entre 6-10 ans, la valeur médiane est égale à 0,012 mSv (valeur médiane la plus basse).

Il faut cependant tenir compte dans ces études des incertitudes importantes sur les valeurs de dose efficace moyenne par type d'acte, ce qui justifie de progresser dans les estimations de doses lors de la prochaine étude d'exposition de la population générale.

Nombre total d'actes et dose efficace collective associée pour chaque modalité d'imagerie (valeurs arrondies) en France en 2012

Tableau 4	MODALITÉ D'IMAGERIE	ACTES		DOSE EFFICACE COLLECTIVE	
		NOMBRE	%	mSv	%
	Radiologie conventionnelle (hors dentaire)	44 175 500	54,0	18 069 200	17,7
	Radiologie dentaire	27 616 000	33,8	165 700	0,2
	Scanographie	8 484 000	10,4	72 838 900	71,2
	Radiologie interventionnelle diagnostique	377 000	0,5	3 196 400	3,1
	Médecine nucléaire	1 103 000	1,3	7 928 300	7,8
	Total	81 755 500	100,0	102 198 500	100,0

Source: IRSN 2014

Une attention particulière doit être exercée pour contrôler et réduire les doses liées à l'imagerie médicale, notamment lorsque des techniques alternatives peuvent être utilisées pour une même indication, car la multiplication des examens les plus irradiants, pour une même personne, pourrait conduire à atteindre une valeur de dose efficace de plusieurs dizaines de millisieverts ; à ce niveau d'exposition, certaines études épidémiologiques ont pu mettre en évidence la survenue de cancers radio-induits.

La maîtrise des doses de rayonnements ionisants délivrées aux personnes lors d'un examen médical reste une priorité pour l'ASN. Un second plan d'action, qui prolonge le précédent (2011-2017), établi en liaison avec les parties prenantes (institutionnelles et professionnelles), a été publié en juillet 2018. Un nouveau bilan de l'IRSN, permettant de porter une appréciation sur l'évolution des doses délivrées aux patients, est attendu en 2019.

3.4 — L'exposition des espèces non humaines (animales et végétales)

Le système international de radioprotection a été construit en vue d'assurer la protection de l'homme vis-à-vis des effets des rayonnements ionisants. La prise en compte de la radioactivité dans l'environnement est ainsi évaluée par rapport à son impact sur les êtres humains et, en l'absence d'élément contraire, il est aujourd'hui considéré que les normes actuelles garantissent la protection des autres espèces.

La protection de l'environnement vis-à-vis du risque radiologique, et notamment la protection des espèces non humaines, doit toutefois pouvoir être garantie indépendamment des effets sur l'homme. Rappelant que cet objectif est déjà intégré dans la législation nationale, l'ASN veillera à ce que l'impact des rayonnements ionisants sur les espèces non humaines soit effectivement pris en compte dans la réglementation et dans les autorisations des activités nucléaires, dès que les méthodes d'évaluation seront disponibles. À partir du rapport d'expertise de l'IRSN, le Groupe permanent d'experts en radioprotection, pour les applications industrielles et de recherche des rayonnements ionisants, et en environnement (GPRADE) a adopté un avis en septembre 2015. Suivant les recommandations de cet avis, l'ASN a mis en place à la fin de l'année 2017 un groupe de travail pluraliste et pluridisciplinaire piloté par l'IRSN pour élaborer un guide méthodologique de l'évaluation de l'impact des rayonnements ionisants sur la faune et la flore. Le projet de guide doit être remis à l'ASN au premier trimestre 2020.

