

CHAPITRE

01

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 P.102

- 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 réponse individuelle aux rayonnements ionisants
 - 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 P.106

- 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 P.109

- 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 Cas de l'exposition des travailleurs à la radioactivité naturelle
- 3.2 Les doses reçues par la population
 - 3.2.1 L'exposition de 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 de 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 (extérieures à l'organisme) 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 décrits 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 60 ans d'une cohorte⁽¹⁾ d'environ 85 000 personnes irradiées à Hiroshima et Nagasaki (Japon) 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](#) (Ukraine) qui, du fait de l'iode radioactif rejeté, a provoqué dans les régions

1. Cohorte : groupe d'individus considérés comme un ensemble et participant à une étude statistique des circonstances d'apparition des maladies.

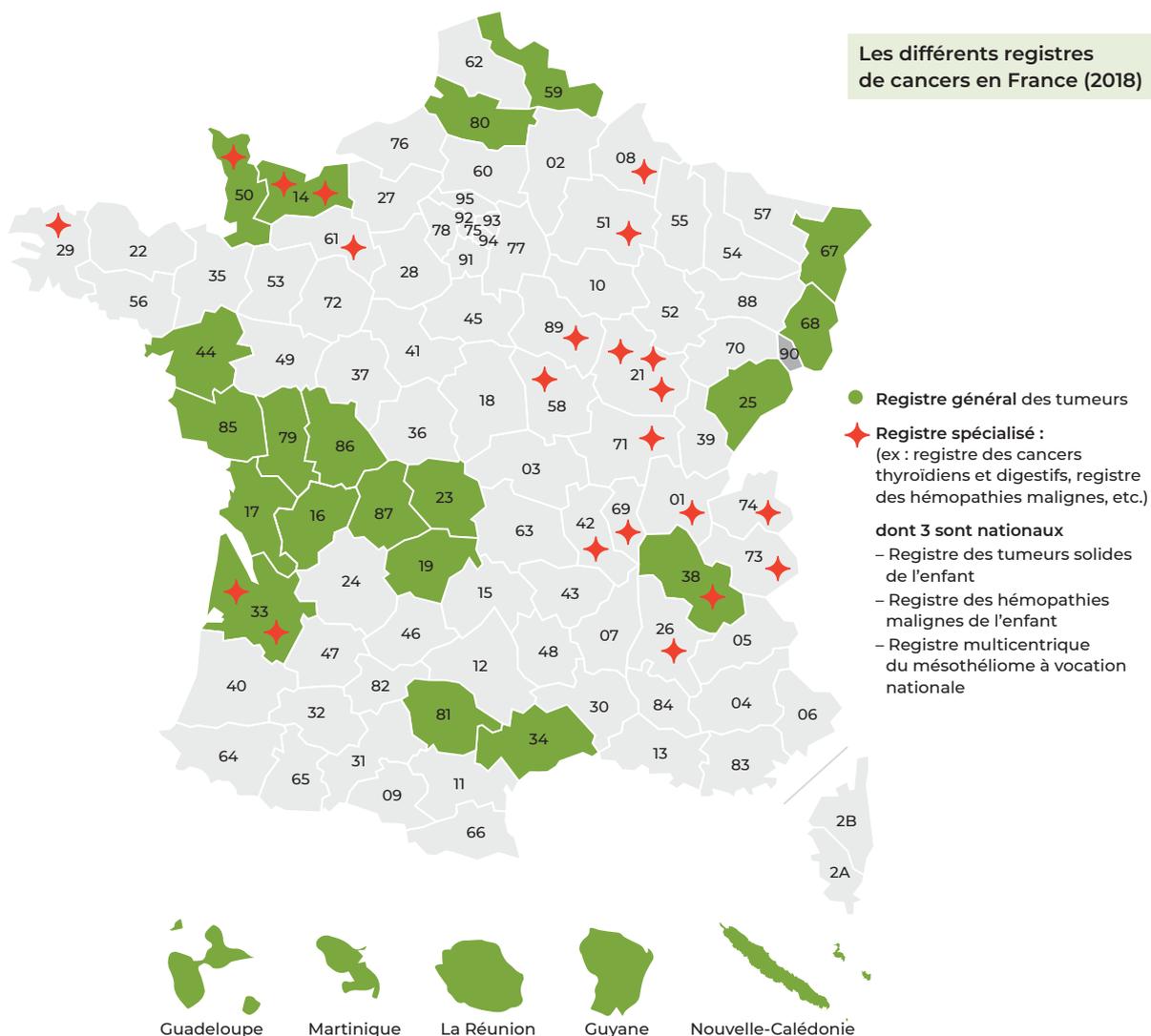
proches du lieu de l'accident un excès de cancers de la thyroïde chez des sujets jeunes exposés pendant leur enfance. Les conséquences sanitaires de l'[accident de Fukushima](#) (Japon) pour les populations avoisinantes ne sont pas encore suffisamment connues et analysées pour en tirer les enseignements 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 (produits par l'effet du hasard) 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

En France, la surveillance de l'épidémiologie des cancers est fondée sur des registres de maladies, sur la surveillance des causes de décès et, plus récemment, s'appuie également sur l'exploitation des données du programme médicalisé des systèmes d'information des établissements de santé et sur les déclarations d'affection de longue durée. 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 cancers en France](#). Certains dits « généraux » s'intéressent à tous les types de cancer, leur périmètre est départemental ou interdépartemental; 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 pour le premier 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.

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 de 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 celles de Hiroshima et de 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 de l'industrie 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, etc.).

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 et 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 (*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* – [UNSCEAR](#)), 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 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⁽²⁾ 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 becquerels par mètre cube – Bq/m³) sur une durée de 20 à 30 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.

Les recommandations de la Commission internationale de protection radiologique

La CIPR, qui a émis de nouvelles recommandations pour le calcul des doses efficaces et équivalentes ([publication 103](#)) en 2007, actualise progressivement les valeurs des coefficients de dose efficace pour l'exposition interne et externe. Sa [publication 137](#) (2017), intitulée *Incorporation de radionucléides en milieu du travail – Partie 3*, porte sur 14 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⁽³⁾ 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 GPRADE a remis son avis à l'ASN en 2020. L'ASN prendra position sur cet avis début 2021 avec la publication du rapport et de l'avis du GPRADE.

^{*}[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.

2. 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.

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 cancer du poumon attribuables au radon en France métropolitaine est estimé à environ 4 000 par an, loin derrière celui dû au tabac (le nombre de nouveaux cas de cancer du poumon en France métropolitaine est estimé à 46 363 en 2018). À l'initiative de l'ASN, un [plan national d'action pour la gestion du risque lié au radon](#) a été mis en place depuis 2004, il est périodiquement réactualisé. Le 4^e plan (2020-2024) a été publié début 2021 (voir point 3.2.2).

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 installations nucléaires de base (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 réponse individuelle aux rayonnements ionisants

Les effets des rayonnements ionisants sur la santé varient d'un individu à l'autre. On sait, par exemple, depuis que cela a été énoncé pour la première fois par Bergonié et Tribondeau en 1906, qu'une 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 ». De telles réponses anormales sont également observées chez des personnes souffrant de maladies neurodégénératives.

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. Ces recherches indiquent qu'une réponse anormale aux rayonnements ionisants peut s'exprimer cliniquement sous trois formes : la radiosensibilité aux fortes doses de radiothérapie, la radiosusceptibilité au cancer radio-induit, et la radiodégénérescence (par exemple la cataracte ou les effets cardiovasculaires radio-induits).



Salle de radiographie du dispensaire Léon Bourgeois (Paris) en 1916

Les progrès de la recherche et la validation des résultats en clinique devraient permettre de définir rapidement les conditions optimales de mise en évidence de la réponse individuelle aux rayonnements ionisants chez les patients et de sa prise en compte dans le cadre d'une prise en charge médicale personnalisée.

À la suite des travaux du Groupe de recherche européen sur les faibles doses ([MELODI](#), *Multidisciplinary European Low Dose Initiative*) et des documents de revue publiés en 2019 sur les aspects cliniques et épidémiologiques de la réponse individuelle aux rayonnements ionisants et des tests de dépistage disponibles et de leur robustesse, le groupe de travail ([TG111](#)) de la CIPR dédié à ce sujet poursuit ses travaux de synthèse des connaissances au sujet de la réponse individuelle aux rayonnements ionisants en vue d'élaborer des recommandations internationales de radioprotection.

La réponse individuelle aux rayonnements ionisants s'impose ainsi progressivement comme un sujet important de recherche et d'application en radiobiologie et en radioprotection, tout en suscitant des questions éthiques et sociétales.

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 dose³⁾ 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 une contamination interne (exposition interne), notamment à l'iode radioactif. Les études sur les travailleurs de l'industrie 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 des effets délétères portés 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 carcinogenèse (processus de formation du cancer) 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, etc.) 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, etc.) contribuent au vieillissement cellulaire et à la carcinogenèse.

Dans une approche multirisque de la carcinogenèse, 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 carcinogenèse plaide pour une approche de précaution vis-à-vis de tous les facteurs de risque, puisque chacun d'entre eux est susceptible de contribuer à une altération de l'ADN. Ceci 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 par heure (nSv/h) et 100 nSv/h.

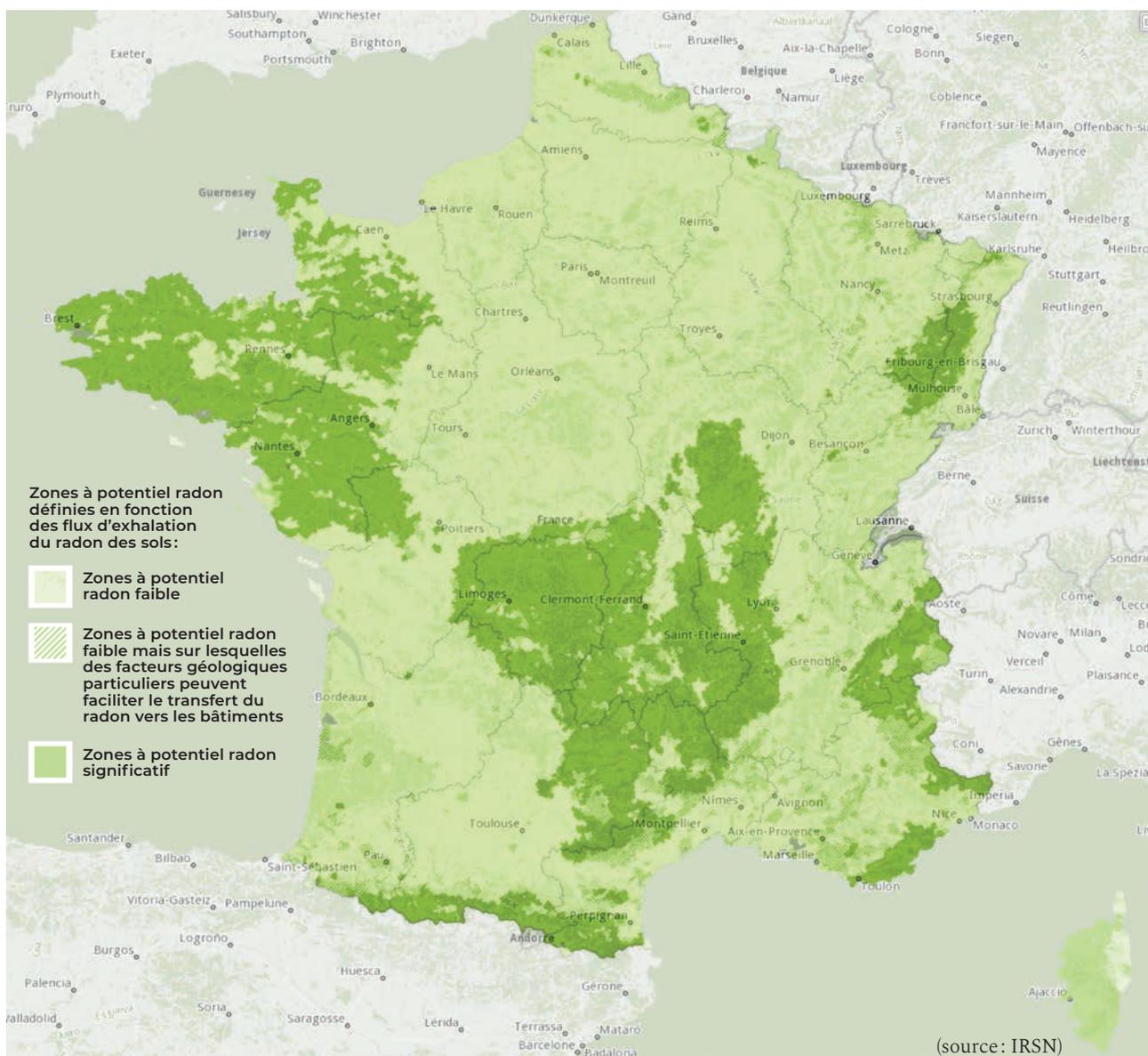
Les valeurs de débit de dose à l'intérieur des habitations sont généralement plus élevées du fait de la contribution des matériaux de construction (environ 20% en plus, en moyenne).

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.

Selon l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN 2015) la moyenne de l'exposition interne due à l'incorporation de radionucléides d'origine naturelle est estimée à 0,55 millisieverts par an (mSv/an). Les deux principales

3. Le débit de dose radioactive détermine la dose absorbée (énergie absorbée par la matière) par unité de masse et de temps. Il se mesure en Gray par seconde (Gy/s) dans le système international. Il est utilisé en physique et en radioprotection.

Zones à potentiel radon en France métropolitaine définies par l'arrêté du 27 juin 2018



composantes de cette exposition sont l'incorporation par l'alimentation et les eaux de boisson de potassium-40 (0,18 mSv) et des descendants des chaînes de l'uranium et du thorium (0,33 mSv). 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.

Les eaux destinées à la consommation humaine, 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 (μ Sv).

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), de la ventilation des pièces et du mode de vie des occupants.

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 68 Bq/m³.

Ces mesures avaient permis de classer les départements en fonction du potentiel d'exhalation de radon des terrains. 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. Sur cette base, une classification plus fine, par commune, a été publiée par l'[arrêté interministériel du 27 juin 2018](#) (voir moteur de recherche par commune et cartographie disponibles sur [asn.fr](#) et [irsn.fr](#)).

À partir de 2021, la nouvelle obligation faite aux laboratoires d'analyse des détecteurs radon de transmettre à l'IRSN les résultats des mesurages permettra d'améliorer la connaissance des expositions au radon en France (voir le [bilan du 3^e plan national d'action 2016-2019 pour la gestion du risque lié au radon](#) 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 atténue 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 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 du code de l'environnement](#).

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 2020 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, etc.).

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'incident ou d'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.

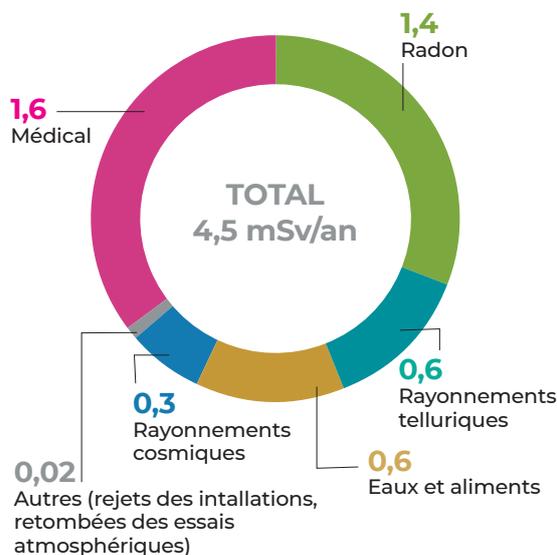
3. La surveillance des expositions aux rayonnements ionisants

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

DIAGRAMME 1

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



Source : IRSN, 2015.

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.

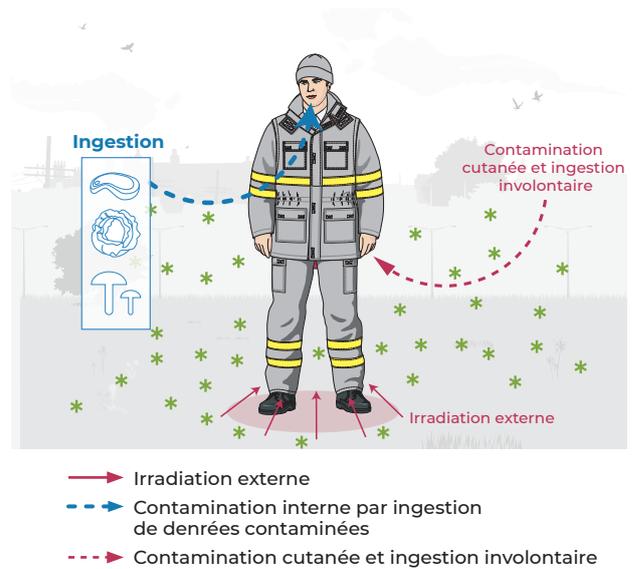
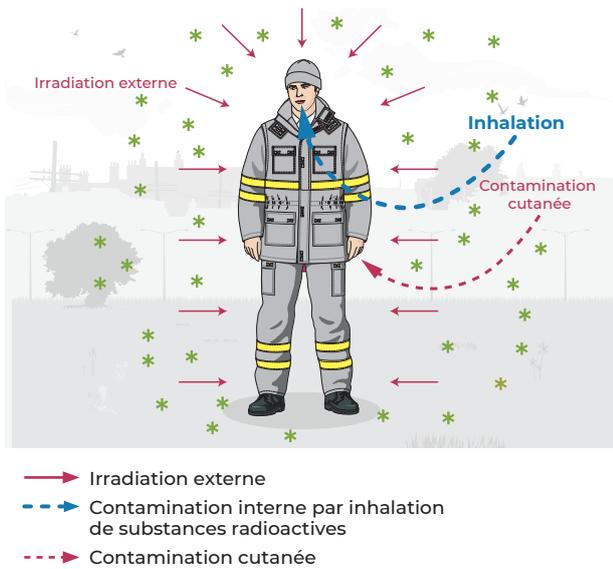
Les familles naturelles de l'uranium et du thorium sont les principaux radionucléides rencontrés dans ces industries ; on peut citer :

- 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, de plomb ou de 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.

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'examen radiologiques réalisés (IRSN 2015). La dose efficace individuelle annuelle moyenne peut ainsi varier selon les départements d'un facteur pouvant atteindre 5. Le diagramme 1 représente une estimation des contributions respectives des différentes sources d'exposition aux rayonnements ionisants pour la population française.

Sources et voies d'exposition aux rayonnements ionisants



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 à lecture différée](#) 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 travailleur, y compris ceux 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.

Les résultats de l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants présentés ci-après sont issus du bilan IRSN 2019 – *La radioprotection des travailleurs – exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France*. Sur le plan méthodologique, comme pour les deux années précédentes, le bilan IRSN 2019 a été exclusivement réalisé à partir des données de la surveillance individuelle de l'exposition externe des travailleurs enregistrées dans la base Siseri. Le bilan des années précédentes était, quant à lui, exclusivement élaboré par agrégation des synthèses annuelles demandées aux organismes de dosimétrie. En conséquence, les résultats de 2019 ne sont directement comparables à ceux de 2018 et 2017. Afin de pouvoir néanmoins établir des tendances, 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 2019, 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 disparité 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 (58%), ne représente que 8% de la dose collective ; par contre, le secteur de l'industrie du nucléaire civil qui ne représente que 22% des effectifs, comptabilise 40% de la dose collective et le secteur concerné par une exposition à la radioactivité naturelle qui ne représente que 6,4% de l'effectif total, comptabilise 47,7% de la dose collective. Le secteur industriel, quant à lui, représente 4% des effectifs et comptabilise 2,3% de la dose collective.

Le tableau 3 montre que le nombre total de travailleurs suivis par dosimétrie externe à lecture différée est en augmentation d'environ 1% par an depuis 2015.

En 2019, la dose collective (tous domaines confondus) atteint 112,31 homme.Sv, valeur en hausse de près de 8% par rapport à 2018 alors que la dose individuelle moyenne augmente de 7%. Ces augmentations sont principalement liées à l'augmentation du volume de travaux de maintenance dans le domaine nucléaire et à l'augmentation des doses reçues par le personnel navigant.

En 2019, cinq dépassements de la limite réglementaire de 20 mSv pour la dose efficace ont été enregistrés (voir diagramme 2).

Quatre dépassements concernent des professionnels du domaine médical et un dépassement concerne un travailleur du domaine « autres : secteur des organismes privés d'inspection et de contrôle ». Il convient de noter toutefois que, sur ces cinq cas de dépassements de la limite de dose efficace, trois ont été retenus par défaut en l'absence de retour du médecin du travail sur les conclusions de l'enquête.

Concernant la dosimétrie des extrémités (doigts et poignets), le nombre de travailleurs suivis en 2019 est de 28 623 (soit 7% de l'effectif suivi). Sur l'ensemble des effectifs suivis, il y a eu un cas

de dépassement de la limite réglementaire de la dose équivalente aux extrémités de 500 mSv, dans le domaine médical (552,17 mSv).

Par ailleurs, 4 830 travailleurs ont fait l'objet d'une surveillance de l'exposition au cristallin. Cette surveillance est en progression de plus de 38% par rapport à 2018. Cette forte augmentation est à rapprocher de l'arrivée sur le marché de plusieurs dosimètres adaptés à ce type de mesure. Huit travailleurs (secteur de la radiologie du domaine médical) ont reçu une dose équivalente supérieure à 20 mSv. La dose maximale enregistrée est de 34,74 mSv. Cette valeur est à mettre en regard de la future limite réglementaire de dose au cristallin de 20 mSv/an à partir de 2023.

En conclusion, comme les années précédentes, le *Bilan de la surveillance dosimétrique de l'exposition externe des travailleurs en 2019*, publié par l'IRSN en octobre 2020, montre globalement l'efficacité du système de prévention mis en place dans les établissements où sont utilisées les sources de rayonnements ionisants puisque, pour 91% 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 (cinq dépassements de la limite annuelle de 20 mSv).

La surveillance de l'exposition du cristallin avec, pour ce tissu, le respect de la nouvelle limite constitue le principal objectif de la radioprotection dans les toutes prochaines années et notamment dans le domaine des [pratiques médicales interventionnelles radioguidées](#).

3.1.2 Cas de l'exposition des travailleurs à la radioactivité naturelle

Exposition aux substances radioactives d'origine naturelle et au radon d'origine géologique

L'exposition des travailleurs aux substances radioactives d'origine naturelle résulte de l'ingestion de poussières de matières riches en radionucléides (phosphates, minerais métallifères), 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 industriels (tartre se formant dans les tuyauteries par exemple).

Le [bilan des études réalisées en France entre 2005 et 2009](#), publié par l'ASN en janvier 2010, et les études publiées jusqu'en 2018 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.

Concernant l'exposition au radon d'origine géologique, les résultats issus de la surveillance de l'exposition des travailleurs au radon ne sont pas encore remontés de façon exhaustive dans Siseri. Par conséquent, toutes les entreprises présentant une activité volumique de radon dans l'air nécessitant la mise en œuvre d'une surveillance individuelle ne sont pas incluses dans le bilan IRSN 2019 publié en octobre 2020.

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, l'IRSN 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 2019, *SievertPN* avait transmis la totalité des doses des personnels navigants à Siseri pour 15 compagnies aériennes civiles ayant adhéré au dispositif, conduisant à un total

Bilan de la surveillance dosimétrique de l'exposition externe des travailleurs aux rayonnements ionisants (exposition à la radioactivité naturelle incluse) en 2019

(Source : Bilan 2019 IRSN, octobre 2020 – « *La radioprotection des travailleurs : exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France* »)

- Effectif total surveillé : 395 040 travailleurs
- Effectif surveillé pour lequel la dose efficace annuelle est restée inférieure au seuil d'enregistrement : 301 493 travailleurs, soit plus de 76%
- Effectif surveillé pour lequel la dose efficace annuelle est restée comprise entre le seuil d'enregistrement et 1 mSv : 59 468 travailleurs, soit environ 15%
- Effectif surveillé pour lequel la dose efficace annuelle est restée comprise entre 1 mSv et 20 mSv : 34 074 travailleurs, soit plus de 8,6%
- Effectif surveillé pour lequel la dose efficace annuelle a dépassé 20 mSv : 5 travailleurs
- Effectif surveillé pour lequel la dose équivalente aux extrémités a dépassé 500 mSv : 1 travailleur
- Dose collective (somme des doses efficaces annuelles individuelles) : 112,3 homme.Sv
- Dose efficace individuelle annuelle moyenne sur l'effectif ayant enregistré une dose supérieure au seuil d'enregistrement : 1,2 mSv

Bilan de la surveillance de l'exposition interne en 2019 (hors radioactivité naturelle)

- Nombre d'examens de routine réalisés : 228 808 (dont 0,5% considérés positifs)
- Effectif ayant fait l'objet d'une estimation dosimétrique : 217 travailleurs
- Nombre d'examens de surveillance spéciale ou de contrôle réalisés : 10 053 (dont 15% sont supérieurs au seuil d'enregistrement)
- Effectif ayant enregistré une dose efficace engagée supérieure à 1 mSv : 9 travailleurs

Bilan de la surveillance de l'exposition interne aux radionucléides naturels des chaînes de l'uranium et du thorium en 2019

- Exposition interne :
 - dose collective pour 363 travailleurs : 126,5 homme.mSv
 - dose individuelle annuelle moyenne sur l'effectif ayant enregistré une dose supérieure au seuil d'enregistrement : 0,52 mSv

de 24 429 personnels navigants suivis par ce dispositif. En 2018, 16,8% des doses individuelles annuelles sont inférieures à 1 mSv et 83% des doses individuelles annuelles sont comprises entre 1 mSv et 5 mSv. La dose individuelle maximale annuelle est de 6,2 mSv.

3.2 Les doses reçues par la population

3.2.1 L'exposition de 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

TABLEAU 1

Surveillance de l'exposition externe des travailleurs dans le domaine nucléaire civil (année 2019)

	NOMBRE DE PERSONNES SURVEILLÉES	DOSE COLLECTIVE (homme.Sv ^(*))	DOSE INDIVIDUELLE > 20 mSv
Réacteurs et production d'énergie (EDF)	24 467	6	0
« Cycle du combustible » ; démantèlement	12 552	3,41	0
Transport	686	0,08	0
Logistique et maintenance (prestataires)	31 891	31,43	0
Effluents, déchets	768	0,14	0
Autres	7 010	1,27	0
Total nucléaire civil	77 374	42,33	0

* 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.

(Source : Bilan IRSN, octobre 2020 – « La radioprotection des travailleurs : exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France »)

TABLEAU 2

Surveillance de l'exposition externe des travailleurs dans les activités nucléaires de proximité (année 2019)

	NOMBRE DE PERSONNES SURVEILLÉES	DOSE COLLECTIVE (homme.Sv ^(*))	DOSE INDIVIDUELLE > 20 mSv
Médecine	166 059	7,38	4
Dentaire	42 530	1,45	0
Vétérinaire	20 583	0,29	0
Industrie	15 827	2,67	0
Recherche et enseignement	11 973	0,4	0
Naturel (**)	25 328	53,58	0
Total nucléaire de proximité	282 300	65,77	4

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

** Le naturel recouvre le personnel navigant ainsi que les travailleurs exposés aux radionucléides naturels des chaînes de l'uranium et du thorium.

(Source : Bilan IRSN, octobre 2020 – « La radioprotection des travailleurs : exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France »)

TABLEAU 3

Évolution des effectifs suivis et de la dose collective et individuelle moyenne sur l'effectif exposé de 2015 à 2019^(*) tous domaines confondus (A) ou sans le domaine « naturel » (B)

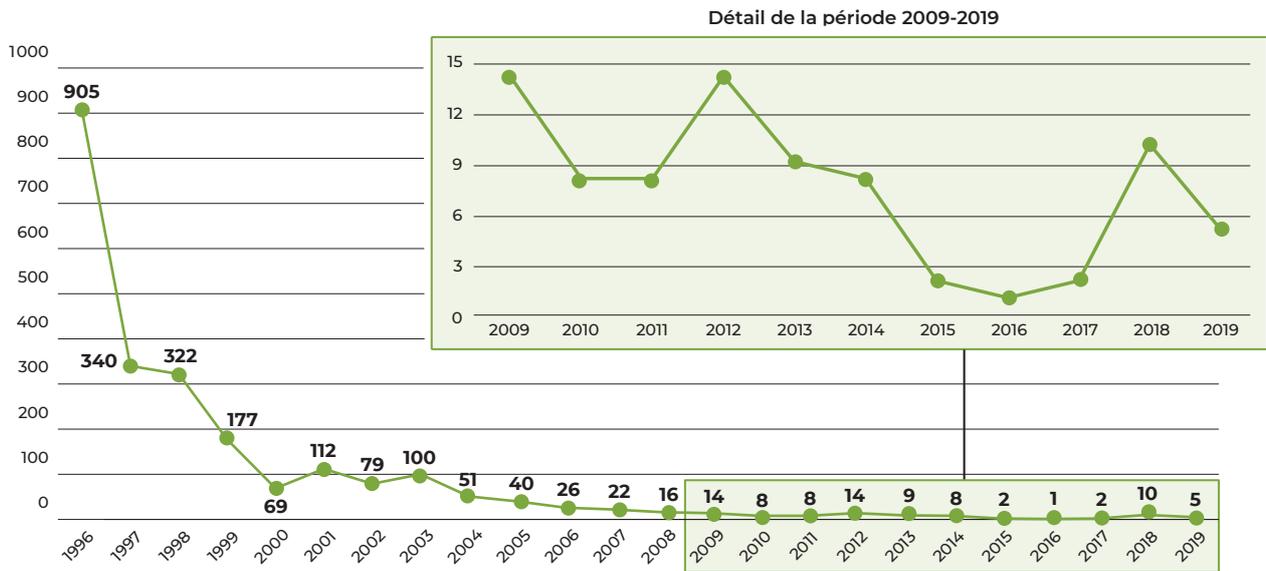
ANNÉE	EFFECTIF SUIVI		DOSE COLLECTIVE (homme.Sv)		DOSE INDIVIDUELLE MOYENNE (mSv)	
	(A)	(B)	(A)	(B)	(A)	(B)
2015	372 881	352 641	104,41	65,61	0,98	0,76
2016	378 304	357 527	107,53	66,71	0,96	0,73
2017	384 198	360 694	100,58	53,52	1,03	0,72
2018	390 363	365 980	104,14	55,24	1,12	0,80
2019	395 040	369 712	112,31	58,73	1,20	0,85

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

(Source : Bilan IRSN, octobre 2020 – « La radioprotection des travailleurs : exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France »)

DIAGRAMME 2

Évolution du nombre de travailleurs surveillés dont la dose annuelle est supérieure à 20 mSv de 1996 à 2019



Source : IRSN.

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. L'évaluation des doses dues aux INB est présentée dans le tableau 4 dans lequel figurent, pour chaque site et par année, les doses efficaces estimées pour les groupes de population de référence les plus exposés.

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 (Rapport 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 10 ans, les doses actuelles sont estimées inférieures à 0,01 mSv/an (Rapport IRSN 2015). En ce qui concerne les retombées en France de l'accident de Fukushima, 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 par 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).

Depuis 2019, la mesure du radon contenue dans les eaux du robinet et dans les eaux embouteillées est 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 (DGS) ([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 eaux destinées à la consommation humaine).

L'exposition due au radon

En France, la réglementation relative à la gestion du risque lié au radon, mise en place à partir du début des années 2000 pour certains établissements recevant du public, a été étendue en 2008 à certains lieux de travail. En 2016, le radon a été introduit dans la politique de la qualité de l'air intérieur.

La transposition de la [directive n°2013/59/Euratom du Conseil du 5 décembre 2013](#) fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants a conduit à modifier les dispositions applicables au radon depuis le 1^{er} juillet 2018. Un niveau de référence à 300 Bq/m³ a été introduit. Il est applicable à toutes les situations, ce qui permet de gérer le risque sanitaire lié au radon par une approche globale. La réglementation s'est étoffée avec des dispositions concernant les trois secteurs principaux :

- pour le grand public, une avancée significative a été introduite : le radon est désormais intégré dans l'information des acquéreurs et locataires de biens immobiliers situés dans

TABLEAU 4

Impact radiologique des INB depuis 2014 calculé par les exploitants à partir des rejets réels des installations et pour les groupes de référence les plus exposés (données fournies par les exploitants nucléaires)

EXPLOITANT/SITE	GROUPE DE RÉFÉRENCE LE PLUS EXPOSÉ EN 2019	DISTANCE AU SITE EN km	ESTIMATION DES DOSES REÇUES, EN mSv ^(a) (les valeurs, calculées par l'exploitant, sont arrondies à l'unité supérieure)					
			2014	2015	2016	2017	2018	2019
Andra / CSA	Groupe multi-activité Ville-aux-Bois	1,7	2.10 ⁻⁶	2.10 ⁻⁶	2.10 ⁻⁶	2.10 ⁻⁶	3.10 ⁻⁷	3.10 ⁻⁷
Andra / Centre de stockage de la Manche	Hameau de La Fosse	2,5	3.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴
Framatome Romans	Ferme Riffard	0,2	3.10 ⁻⁴	3.10 ⁻⁴	3.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁵	2.10 ⁻⁵	3.10 ⁻⁵
Orano Cycle / La Hague	Digulleville	2,8	2.10 ⁻²	2.10 ⁻²	2.10 ⁻²	2.10 ⁻²	2.10 ⁻²	2.10 ⁻²
Orano / Tricastin (Areva NC, Comurhex, Eurodif, Socatri, SET)	Les Girardes	1,2	3.10 ⁻⁴	3.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	9.10 ⁻⁵	8.10 ⁻⁵
CEA / Cadarache ^(b)	Saint-Paul-lez-Durance	5	2.10 ⁻³	1.10 ⁻³	<2.10 ⁻³	<2.10 ⁻³	<3.10 ⁻³	<2.10 ⁻³
CEA / Fontenay-aux-Roses ^(b)	Achères	30	1.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	<2.10 ⁻⁴	<2.10 ⁻⁴	<2.10 ⁻⁴	<2.10 ⁻⁴
CEA / Grenoble ^(c)	-	-	(c)	(c)	(c)	(c)	(c)	(c)
CEA / Marcoule ^(b) (Atalante, Centraco, Phénix, Melox, CIS bio)	Codolet	2	2.10 ⁻³	2.10 ⁻⁵	<2.10 ⁻³	<2.10 ⁻³	<2.10 ⁻³	<2.10 ⁻³
CEA / Saclay ^(b)	Le Christ de Saclay	1	2.10 ⁻³	2.10 ⁻³	<2.10 ⁻³	<2.10 ⁻³	<2.10 ⁻³	<4.10 ⁻³
EDF / Belleville-sur-Loire	Beaulieu-sur-Loire	1,8	4.10 ⁻⁴	5.10 ⁻⁴	4.10 ⁻⁴	3.10 ⁻⁴	4.10 ⁻⁴	4.10 ⁻⁴
EDF / Blayais	Braud et Saint-Louis	2,5	6.10 ⁻⁴	5.10 ⁻⁴	5.10 ⁻⁴	4.10 ⁻⁴	5.10 ⁻⁴	4.10 ⁻⁴
EDF / Bugey	Vernas	1,8	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	9.10 ⁻⁵	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴
EDF / Cattenom	Koenigsmacker	4,8	8.10 ⁻³	7.10 ⁻³	9.10 ⁻³	8.10 ⁻³	9.10 ⁻³	1.10 ⁻²
EDF / Chinon	La Chapelle-sur-Loire	1,6	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴
EDF / Chooz	Chooz	1,5	7.10 ⁻⁴	6.10 ⁻⁴	6.10 ⁻⁴	4.10 ⁻⁴	5.10 ⁻⁴	5.10 ⁻⁴
EDF / Civaux	Valdivienne	1,9	8.10 ⁻⁴	9.10 ⁻⁴	2.10 ⁻³	8.10 ⁻⁴	8.10 ⁻⁴	2.10 ⁻³
EDF / Creys-Malville	Creys-Mépieu	0,95	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁶	3.10 ⁻⁴	1.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁵	2.10 ⁻⁵
EDF / Cruas-Meyssse	Savasse	2,4	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	4.10 ⁻⁴	3.10 ⁻³	3.10 ⁻⁴
EDF / Dampierre-en-Burly	Lion-en-Sulias	1,6	4.10 ⁻⁴	5.10 ⁻⁴	5.10 ⁻⁴	5.10 ⁻⁴	5.10 ⁻⁴	5.10 ⁻⁴
EDF / Fessenheim	Rheinwartenhaus	1,3	4.10 ⁻⁵	4.10 ⁻⁵	3.10 ⁻⁵	2.10 ⁻⁵	5.10 ⁻⁵	4.10 ⁻⁵
EDF / Flamanville	Flamanville	0,8	5.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	7.10 ⁻⁵
EDF / Golfech	Valence	3,4	2.10 ⁻⁴	3.10 ⁻⁴	3.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴
EDF / Gravelines	Grand-Fort-Philippe	2,5	8.10 ⁻⁴	4.10 ⁻⁴	4.10 ⁻⁴	5.10 ⁻⁴	8.10 ⁻⁴	1.10 ⁻³
EDF / Nogent-sur-Seine	Saint-Nicolas-la-Chapelle	2,3	5.10 ⁻⁴	4.10 ⁻⁴	7.10 ⁻⁴	5.10 ⁻⁴	5.10 ⁻⁴	4.10 ⁻⁴
EDF / Paluel	Paluel	1,1	9.10 ⁻⁴	4.10 ⁻⁴	3.10 ⁻⁴	3.10 ⁻⁴	4.10 ⁻⁴	3.10 ⁻⁴
EDF / Penly	Berneval-le-Grand	3,1	4.10 ⁻⁴	4.10 ⁻⁴	4.10 ⁻⁴	5.10 ⁻⁴	5.10 ⁻⁴	4.10 ⁻⁴
EDF / Saint-Alban	Saint-Maurice-l'Exil	1,7	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	3.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	3.10 ⁻⁴
EDF / Saint-Laurent-des-Eaux	Lestiou	1,7	2.10 ⁻⁴	1.10 ⁻⁴	1.10 ⁻⁴	1.10 ⁻⁴	1.10 ⁻⁴	1.10 ⁻⁴
EDF / Tricastin	Bollène	1,3	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴
Ganil / Caen	IUT	0,6	<2.10 ⁻³	<2.10 ⁻³	<2.10 ⁻³	8.10 ⁻³	8.10 ⁻³	7.10 ⁻³
ILL / Grenoble	Fontaine (rejets gazeux) et Saint-Égrève (rejets liquides)	1 et 1,4	3.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	5.10 ⁻⁵	2.10 ⁻⁵	3.10 ⁻⁵

(a) Pour les installations exploitées par EDF, jusqu'en 2008, seules les valeurs « adultes » étaient calculées. De 2010 à 2012, la dose du groupe de référence le plus exposé de chaque site parmi deux classes d'âge (adulte ou nourrisson) est mentionnée. À partir de 2013, la dose du groupe de référence est réalisée sur trois classes d'âge (adulte, enfant, nourrisson) pour toutes les INB. La valeur de dose indiquée est la valeur la plus contraignante des classes d'âge.

(b) Pour les sites de Cadarache, Saclay, Fontenay-aux-Roses et Marcoule, les estimations de dose renseignées dans le tableau résultent d'une somme des estimations de dose transmises par le CEA. Ces estimations comportant au moins un terme inférieur à 0,01 microsievert, les valeurs indiquées sont précédées du signe « inférieur à (<) ».

(c) Le site n'ayant plus de rejets radioactifs depuis 2014, l'impact radiologique induit par les rejets radioactifs est donc nul depuis 2014.

les zones où le potentiel radon est susceptible d'être le plus important ;

- dans les lieux de travail, la réglementation a été étendue aux activités professionnelles exercées au rez-de-chaussée ainsi que dans certains lieux spécifiques de travail. Quelle que soit la zone à potentiel radon où se situe le lieu de travail, l'évaluation des risques doit prendre en compte le radon. Au besoin, un mesurage peut être réalisé dans ce cadre. S'il y a un risque d'atteinte ou de dépassement du niveau de référence

de 300 Bq/m³, l'employeur doit agir pour réduire l'activité volumique en radon. Si les actions se révèlent inefficaces, il doit identifier d'éventuelles « zones radon », puis mettre en œuvre des mesures de radioprotection, si nécessaire en fonction de l'exposition des travailleurs ;

- dans certains établissements recevant du public, des ajustements ont été apportés aux modalités de gestion du radon avec notamment l'ajout des établissements d'accueil d'enfants de moins de 6 ans dans le dispositif et une obligation d'informer

Le 4^e plan national d'action pour la gestion du risque lié au radon pour la période 2020-2024

Le 4^e plan national d'action pour la gestion du risque lié au radon pour la période 2020-2024 a été publié début 2021. Il s'inscrit dans le cadre du 4^e plan national santé environnement qui coordonne désormais tous les plans sectoriels portant sur la santé ou l'environnement, lui-même porté par la stratégie nationale de santé publique 2018-2022, dont l'une des actions vise à réduire l'exposition aux pollutions intérieures. Cette action vise explicitement les effets du radon dans l'habitat : « *au-delà de l'insalubrité, il s'agit de promouvoir les conditions d'un habitat favorable à la santé et de réduire les effets des expositions dans l'habitat (pollution chimique, radon, etc.)* ».

Dans la continuité des plans précédents, il se décline en 13 actions, regroupées autour de trois axes :

Axe 1: Mettre en place une stratégie d'information et de sensibilisation

L'enjeu sanitaire que représente le radon nécessite de poursuivre les actions de sensibilisation et d'information en direction de l'ensemble des acteurs (collectivités territoriales, employeurs, professionnels du bâtiment, professionnels de santé, enseignants, etc.) et du grand public, tant au niveau national que local, avec la promotion et l'accompagnement des actions territoriales de gestion intégrée du risque lié au radon dans l'habitat.

Les fumeurs feront l'objet d'une communication spécifique, car ils constituent la population la plus à risque de développer un cancer du poumon lié à une exposition cumulée au radon et au tabac.

La mise en œuvre opérationnelle du système d'information regroupant l'ensemble des résultats de mesures de radon, ainsi que la consolidation et la centralisation des mesures existantes, apparaissent essentielles pour l'information de la population.

L'ensemble de ces actions s'inscrit également dans un cadre réglementaire complété, pour l'habitat, par la mise en place de mesures d'information du public, notamment des acquéreurs et locataires. La bonne mise en œuvre de ces nouvelles dispositions réglementaires par les acteurs concernés constitue un des enjeux prioritaires du 4^e plan radon.

Axe 2: Poursuivre l'amélioration des connaissances

La publication en 2018 d'une nouvelle cartographie à l'échelle communale, fondée sur trois zones à potentiel radon, a permis la mise en œuvre d'une approche graduée de la gestion du risque radon. Cette cartographie doit toutefois être améliorée de manière à mieux prendre en compte certains facteurs géologiques particuliers pouvant faciliter le transfert du radon vers les bâtiments (zones karstiques en particulier). De plus, le 4^e plan radon prévoit d'actualiser la connaissance de l'exposition de la population en France en organisant la collecte des données de mesures réalisées, notamment, dans le cadre des opérations locales de sensibilisation. L'objectif

dans un premier temps sera d'orienter, si possible, les mesures réalisées lors de ces opérations de sensibilisation du public organisées par les agences régionales de santé (ARS) et les collectivités territoriales pour couvrir les zones où les données sont insuffisantes. Ces opérations consistent à proposer des kits de dépistage aux habitants d'un territoire donné pour les sensibiliser au risque radon. Un accompagnement est ensuite prévu si la concentration en radon dans l'air intérieur de l'habitat dépasse le niveau de référence. Plusieurs opérations de ce type sont menées chaque année en France.

Axe 3: Mieux prendre en compte la gestion du risque radon dans les bâtiments

Les organisations de professionnels du bâtiment prennent conscience de l'enjeu sanitaire lié au radon. Afin d'accompagner la montée en compétence de leurs adhérents, elles ont récemment développé des formations abordant les méthodes de prévention et de réduction de la concentration et différents supports pour répondre aux besoins. Les différents outils francophones ont été recensés. Pour compléter l'offre, un guide destiné aux professionnels et aux particuliers va établir des recommandations en matière de prévention dans les constructions neuves et de réduction de la concentration du radon dans les bâtiments existants. Les avancées dans la connaissance de l'efficacité des normes de construction sur la réduction de la concentration en radon dans l'air intérieur doivent être consolidées.

Afin de suivre l'efficacité de la stratégie nationale mise en œuvre dans le cadre du plan national d'action, un système d'indicateurs spécifiques a été mis en place, choisis en fonction de leur pertinence et des données disponibles permettant leur suivi. L'évolution des indicateurs sera analysée annuellement par le comité de pilotage du suivi du nouveau plan d'action.

La mise en œuvre du plan national d'action permettra d'améliorer l'information du grand public et des acteurs concernés, de progresser dans la connaissance de l'exposition au radon dans l'habitat et son évolution.

TABLEAU 5

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

MODALITÉ D'IMAGERIE	ACTES		DOSE EFFICACE COLLECTIVE TOTALE : 102 198 Sv
	NOMBRE	%	%
Radiologie conventionnelle (hors dentaire)	44 175 500	54,0	17,7
Radiologie dentaire	27 616 000	33,8	0,2
Scanographie	8 484 000	10,4	71,2
Radiologie interventionnelle diagnostique	377 000	0,5	3,1
Médecine nucléaire	1 103 000	1,3	7,8
Total	81 755 500	100,0	100,0

Source : IRSN 2014.

le public par affichage des résultats de mesurage⁽⁴⁾. La nature des actions à mettre en œuvre en cas de dépassement du niveau de référence de 300 Bq/m³ est graduée en fonction des résultats des mesurages⁽⁴⁾ : actions correctives simples en cas de concentration de radon comprise entre 300 et 1 000 Bq/m³, expertise et travaux si les actions correctives ne permettent pas d'abaisser la concentration de radon en deçà du niveau de référence ou si les résultats de mesurage sont supérieurs ou égaux à 1 000 Bq/m³.

Les résultats transmis par les organismes agréés par l'ASN pour les campagnes 2018/2019 et 2019/2020 montrent que la majorité des dépistages a été réalisée dans des établissements d'enseignement et des établissements sanitaires et médico-sociaux (respectivement 61 % et 28 % des dépistages). Les établissements d'accueil collectif des enfants de moins de 6 ans, qui constituent une nouvelle catégorie d'établissements recevant du public (ERP) soumis à la gestion du risque lié au radon représentent 11% des mesurages réalisés pendant la campagne 2019/2020. La concentration volumique en radon est inférieure au niveau de référence de 300 Bq/m³ pour 77 % des établissements d'enseignement et 87 % des établissements sanitaires et médico-sociaux dépistés.

Les données recueillies dans 306 ERP montrent que les actions correctives ou les travaux destinés à réduire la concentration du radon ont permis d'abaisser la concentration en dessous de 300 Bq/m³ dans seulement 41 % des ERP.

Bilan du 3^e plan national d'action radon (2016-2019)

Le [3^e plan radon](#) couvrait la période 2016-2019. Bien que la transposition de la directive n° 2013/59/Euratom du Conseil du 5 décembre 2013 (en 2016 pour la partie législative et en 2018 et 2019 pour la partie réglementaire) ait eu un impact important sur la mise en œuvre, la plupart des actions concernées sont terminées ou en cours de réalisation. Son bilan fait apparaître les points principaux suivants :

- la publication en juin 2018 d'une cartographie du risque radon⁽⁵⁾ définie à l'échelle plus précise de la commune et incluant désormais les territoires d'outre-mer. Elle constitue un outil commun à toutes les stratégies de gestion, fondé sur une division du territoire en trois zones à potentiel radon ;
- la mise en œuvre de nombreuses actions de communication sur le risque lié au radon et sur les nouvelles dispositions réglementaires introduites en droit français depuis le 1^{er} juillet 2018. En particulier, les opérations locales de sensibilisation des particuliers se sont poursuivies et des sessions d'information ont été organisées au niveau national ou local à destination des différents acteurs : gestionnaires d'établissements recevant

du public, préventeurs de risques, professionnels du bâtiment, organismes agréés par l'ASN pour la mesure de l'activité volumique du radon ;

- la définition progressive de bonnes pratiques en matière de méthodes de prévention pour les constructions neuves et de réduction de la concentration de radon pour les constructions existantes. Cela a été rendu possible grâce à la capitalisation d'exemples de constructions et de travaux, du retour d'expérience des professionnels du bâtiment et de la publication d'études françaises et étrangères ;
- le développement de formations des professionnels du bâtiment, le radon étant désormais inclus dans des thématiques plus larges, soit de la qualité de l'air intérieur, soit de la rénovation énergétique.

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 1,53 mSv pour l'année 2017 (Étude expri IRSN 2020) pour un volume d'actes diagnostiques de l'ordre de 85 millions en 2017 (81,6 millions en 2012), soit 1187 actes pour 1 000 bénéficiaires et par an. Il faut noter que l'exposition individuelle en 2017 comme auparavant est très hétérogène. Ainsi, si environ 32,7% de la population française a bénéficié d'au moins un acte (hors actes dentaires), la moitié des patients reçoit une dose inférieure ou égale à 0,1 mSv, 75 % reçoit 1,5 mSv ou moins, tandis que les 5 % des patients les plus exposés reçoivent une dose supérieure à 18,1 mSv.

La radiologie conventionnelle (55,1%), la scanographie (12,8%) et la radiologie dentaire (29,6%) 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 2017 (75%) qu'en 2012 (71%), alors que celle de la radiologie dentaire reste très faible (0,3%).

4. Arrêté du 26 février 2019 relatif aux modalités de gestion du radon dans certains établissements recevant du public et de diffusion de l'information auprès des personnes qui fréquentent ces établissements.

5. Arrêté du 27 juin 2018 portant délimitation des zones à potentiel radon du territoire français.

Actions des divisions territoriales de l'ASN pour la prévention du risque lié au radon dans les territoires

En 2020, les divisions de l'ASN, avec les administrations (Dreal, ARS, Direccte) et les organisations partenaires (Cerema, associations professionnelles, collectivités locales, etc.), ont poursuivi les **actions de sensibilisation** des élus, professionnels du bâtiment, employeurs, responsables d'établissement recevant du public (ERP) et grand public aux évolutions réglementaires intervenues depuis 2018 (voir point 3.2.2).

À titre d'illustration :

- En **Pays de la Loire** et **Bretagne**, dont les départements (à l'exception de la Sarthe) ont entre 65 % et 93 % de leurs communes situées dans des zones à potentiel radon significatif (catégorie 3), la division de Nantes a organisé avec les ARS, Dreal et Direccte deux « Matinales du radon », l'une à Rennes (35) et l'autre en webinaire pour le département de la Vendée (85). Entre 50 et 80 représentants de collectivités locales, d'établissements d'enseignement, d'établissements sanitaires et sociaux, d'associations et d'organismes agréés ont participé à chaque édition. Chacune d'entre elles a présenté les nouvelles obligations réglementaires dans les ERP, dans les lieux de travail et dans l'habitat privé (information de l'acheteur et du locataire) pour inciter les collectivités locales à mener des campagnes de mesure du radon dans l'habitat privé et de sensibilisation du grand public. L'ASN a également financé dans ces régions quatre actions portées par des centres permanents d'initiatives pour l'environnement ou des collectivités, notamment des campagnes de mesures volontaires du radon dans l'habitat privé et l'accompagnement des personnes concernées par des teneurs élevées dans le cadre du plan régional santé environnement en Pays de la Loire. À ce titre, la division de Nantes en collaboration avec l'ARS a également participé aux réunions de lancement de campagne radon dans l'habitat privé.
- En **Bourgogne-Franche-Comté**, l'aboutissement de la première étape du projet franco-suisse JURADBAT a conduit au lancement d'un site internet dédié au radon et à la qualité de l'air intérieur dans l'arc jurassien en 2019, l'année 2020 a été consacrée à des actions de pérennisation de ce site internet. Celui-ci constitue une boîte à outils en ligne pour l'information de la population, des collectivités territoriales, ainsi que des professionnels de la construction. Ce site intègre des informations générales, réglementaires, des fiches pratiques et techniques, des cartes interactives des mesures de radon en Suisse et en Franche-Comté, ainsi que des modules de formation.
- En région **Centre-Val de Loire**, la division d'Orléans a participé à l'information des élus des quatre communes concernées par la mise en place d'une campagne de dépistage, situées en zone 3 (fort potentiel de radon), du département du Cher.
- En **Nouvelle-Aquitaine**, la division de Bordeaux a mis en place, conjointement avec l'ARS, la Direccte et la Dreal, un plan de communication à destination des élus et des responsables d'ERP

afin de les accompagner dans la mise en œuvre des nouvelles dispositions réglementaires.

- En **Provence-Alpes-Côte d'Azur** et en **Occitanie**, les divisions de l'ASN ont cosigné des courriers d'information à l'attention de gestionnaires d'ERP.

En outre, les inspections de la radioprotection conduites en 2020 dans des établissements médicaux ou industriels situés sur des communes en zone 3 de potentiel radon ont été mises à profit par certaines divisions pour expliciter les obligations réglementaires des gestionnaires d'établissements recevant du public et des employeurs sur les lieux de travail.

Cette sensibilisation s'accompagne **en parallèle d'actions de contrôle** ciblées des ERP : des collèges et lycées publics, gérés respectivement par les conseils départementaux et conseils régionaux, ainsi que des établissements thermaux.

Ainsi, la division de Marseille a réalisé avec l'ARS une inspection du conseil régional de Provence-Alpes-Côte d'Azur. La division de Lyon a réalisé une inspection des conseils départementaux de l'Isère, de la Haute-Loire et du Rhône. Elle a également inspecté un établissement thermal pour lequel une forte concentration en radon a été mesurée. Ces inspections ont confirmé le besoin de réaliser un suivi dans le temps des actions mises en œuvre par ces établissements pour réduire les expositions au radon.

La division de Nantes a réalisé deux inspections auprès du conseil départemental de la Sarthe (dernier conseil départemental qui n'avait pas été inspecté les années précédentes pour les régions Pays de la Loire et Bretagne) et de la ville de Laval afin de s'assurer de la mise en œuvre des campagnes de mesure de radon dans les établissements scolaires (collèges, écoles) et des mesures prises en cas de dépassement. Ces inspections ont mis en évidence un dépassement des échéances réglementaires pour la réalisation des mesurages et la nécessité d'actualiser les évaluations des risques professionnels sur ce sujet.

La division de Dijon a priorisé le contrôle de stations thermales. Deux inspections ont été conduites au sein des thermes de Salin-les-bains et de Luxeuil-les-bains. Ces inspections ont permis de constater la bonne sensibilisation de ces établissements aux enjeux de radioprotection et une bonne prise en compte des exigences du code de la santé publique et du code du travail. Ainsi, des campagnes de dépistage du radon avaient été réalisées, bien que les communes ne soient pas classées en zone 3 de potentiel radon, dans les locaux accueillants du public comme dans ceux réservés aux travailleurs. Toutefois, quelques contrôles complémentaires devront être réalisés afin de compléter les évaluations de l'exposition pour les travailleurs.

Plusieurs autres actions de sensibilisation ou de contrôle, prévues en 2020, ont été reportées en raison de la crise sanitaire.

Chez les adolescents, les actes de radiologie conventionnelle et dentaire sont les plus nombreux (environ 1000 actes pour 1 000 individus en 2017). Malgré leur fréquence, les actes de radiologie conventionnelle et dentaire dans cette population ne représentent que 0,5% de la dose collective.

À noter enfin :

- un effectif national estimé à plus de 30 000 patients a été exposé à une dose efficace cumulée de plus de 100 mSv en 2017 en raison d'exams scanners multiples. Ce chiffre atteint 500 000 si une durée de cumul de 6 ans est considérée. Cette population fortement exposée semble être en augmentation régulière et relativement rapide depuis 2012. L'essentiel de cette population est âgée, cependant un quart a moins de 55 ans. La question des éventuels effets radio-induits à long terme se pose donc pour cette population spécifique. Il est utile de rappeler que ces patients sont très vraisemblablement suivis pour des pathologies lourdes et que les examens scanner sont probablement indispensables à leur prise en charge ;
- à partir d'un échantillon de 120 000 enfants nés entre 2000 et 2015, l'IRSN 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). Selon la catégorie d'âge, cette valeur médiane varie fortement. Pour les moins d'un an, elle est de 0,55 mSv (valeur la plus haute) et entre 6-10 ans elle est égale à 0,012 mSv.

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.

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 [2^e plan d'action](#) a été publié en juillet 2018. Celui-ci prolonge le premier plan (2011-2017), établi en liaison avec les parties prenantes (institutionnelles et professionnelles).

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 jusqu'à présent 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.

Le 2^e plan d'action pour la maîtrise des doses de rayonnements ionisants délivrés aux personnes en imagerie médicale

En France, l'exposition à des fins médicales représente la première source d'expositions artificielles de la population aux rayonnements ionisants. Cette exposition est en augmentation du fait principalement de l'accroissement du nombre d'exams de scanographie. Les examens d'imagerie ont prouvé leur intérêt et leur apport tant pour le diagnostic que pour le traitement. L'enjeu est toutefois d'éviter les examens qui ne sont pas vraiment nécessaires, ou sans réel bénéfice pour les patients, et dont le résultat est susceptible d'être obtenu par d'autres techniques disponibles non irradiantes.

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 [2^e 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 : la responsabilisation et la sensibilisation des professionnels, la formation, les nouvelles pratiques et techniques, les équipements. En 2020, les actions se sont poursuivies.

Concernant la responsabilisation et la sensibilisation des professionnels en matière de justification des

examens et d'optimisation des doses délivrées, l'ASN a travaillé en lien étroit avec le ministère des Solidarités et de la Santé afin d'assurer la continuité des actions d'amélioration de la radioprotection des patients mises en œuvre grâce aux plans d'organisation de la physique médicale (POPM) mis en place dans les établissements. De même, l'ASN a travaillé en lien étroit avec la Haute Autorité de santé (HAS) afin de renouveler l'accord-cadre entre les deux institutions et poursuivre la collaboration sur les thématiques d'assurance de la qualité, d'analyse des pratiques, de gestion des risques et de recommandations de bonnes pratiques.

Concernant la formation, deux nouveaux guides professionnels élaborés par les sociétés savantes ont été approuvés par l'ASN, à destination des médecins qualifiés en cardiologie interventionnelle (chez l'adulte ou l'enfant) et des professionnels réalisant l'installation, la maintenance des dispositifs médicaux émetteurs de rayonnements ionisants.

Concernant la mise en place de nouvelles techniques et pratiques, le comité d'analyse des nouvelles techniques et pratiques médicales utilisant des rayonnements ionisants s'est réuni afin d'examiner un nouveau dispositif d'accélérateur de particules récemment mis en service aux États-Unis et de recueillir des informations relatives à la radioprotection des travailleurs et des patients lors de l'utilisation.

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 [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 a été remis à l'ASN et présenté au GPRADE à la fin de l'année 2020.