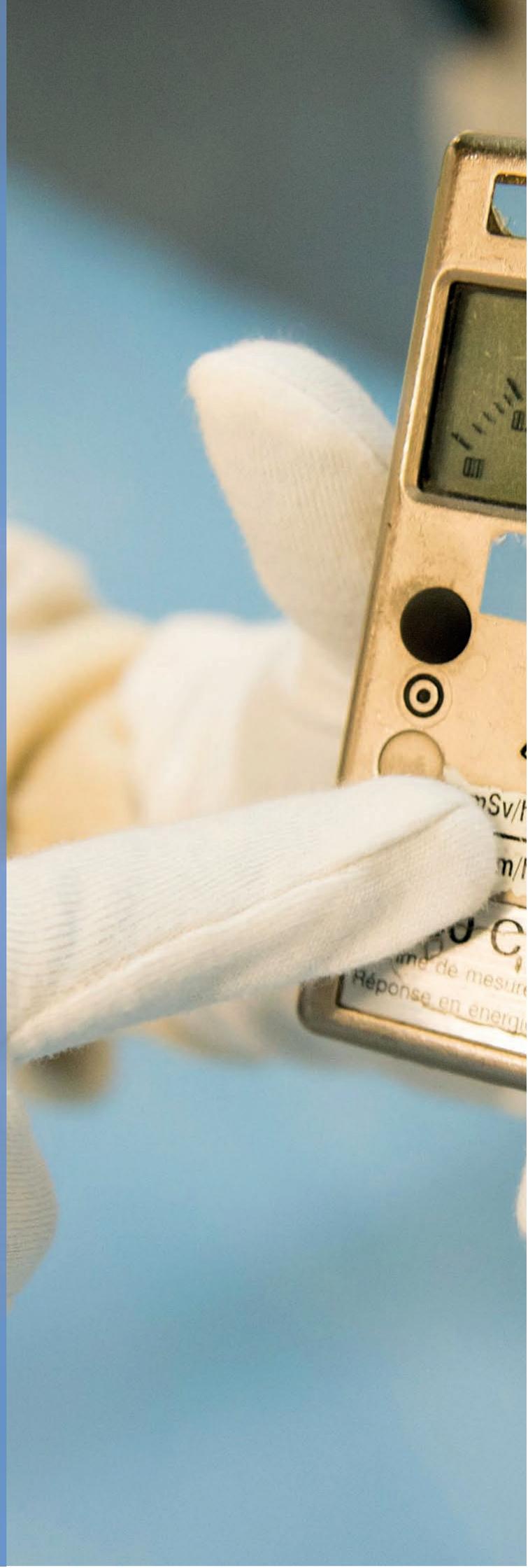


01

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 46

1.1 Les effets biologiques et les effets sanitaires

1.2 L'évaluation des risques liés aux rayonnements ionisants

1.3 Les incertitudes scientifiques et la vigilance

- 1.3.1 La radiosensibilité
- 1.3.2 Les effets des faibles doses
- 1.3.3 La signature radiologique des cancers

2. LES DIFFÉRENTES SOURCES DE RAYONNEMENTS IONISANTS 51

2.1 Les rayonnements d'origine naturelle

- 2.1.1 Les rayonnements d'origine naturelle 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 des 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 industrielles créant un renforcement des rayonnements ionisants d'origine naturelle

3. LA SURVEILLANCE DES EXPOSITIONS AUX RAYONNEMENTS IONISANTS 54

3.1 Les doses reçues par les travailleurs

- 3.1.1 L'exposition des travailleurs des activités nucléaires
- 3.1.2 L'exposition des travailleurs aux rayonnements naturels renforcés
- 3.1.3 L'exposition des personnels navigants aux rayonnements cosmiques

3.2 Les doses reçues par la population

- 3.2.1 Les doses reçues par la population du fait des activités nucléaires
- 3.2.2 L'exposition de la population aux rayonnements naturels

3.3 Les doses reçues par les patients

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

4. PERSPECTIVES 61

Les rayonnements ionisants peuvent être d'origine naturelle ou provenir d'activités humaines appelées activités nucléaires. 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 comme « les activités comportant un risque d'exposition des personnes aux rayonnements ionisants lié à la mise en œuvre soit d'une source artificielle, qu'il s'agisse de substances ou de dispositifs, soit d'une source naturelle, qu'il s'agisse de substances radioactives naturelles ou de matériaux contenant des radionucléides naturels... ». Ces activités nucléaires incluent celles qui sont menées dans les installations nucléaires de base (INB) et dans le cadre du transport des substances radioactives, ainsi que dans les domaines médical, vétérinaire, industriel et de recherche.

Les différents principes auxquels doivent répondre les activités nucléaires, notamment les principes de sûreté nucléaire et de radioprotection, sont présentés au chapitre 3.

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

1. L'ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR LES DANGERS ET LES RISQUES LIÉS AUX RAYONNEMENTS IONISANTS

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

1.1 Les effets biologiques et les effets sanitaires

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

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

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

Les cellules peuvent aussi réparer, mais de façon imparfaite ou erronée, les lésions ainsi provoquées. Parmi les lésions qui subsistent, celles de l'ADN revêtent un caractère particulier car des anomalies résiduelles d'ordre génétique 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.

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 broncho-pulmonaires (par inhalation de radon) et des ostéosarcomes de la mâchoire. Hors du domaine professionnel, le suivi pendant plus de soixante ans d'une cohorte d'environ 85 000 personnes irradiées à Hiroshima et Nagasaki a permis de faire régulièrement le point sur

la morbidité¹ et la mortalité par cancer après exposition aux rayonnements ionisants, et de décrire les relations dose-effets, souvent à la base de la réglementation actuelle. D'autres travaux épidémiologiques ont permis de mettre en évidence, chez les patients traités par radiothérapie, une augmentation statistiquement significative des cancers (effets secondaires) imputables aux rayonnements ionisants. Citons également l'accident de Tchernobyl qui, du fait de l'iode radioactif rejeté, a provoqué dans les régions proches du lieu de l'accident un excès de cancers de la thyroïde après irradiation pendant l'enfance.

Le risque de cancer radio-induit apparaît pour différents niveaux d'exposition et n'est pas lié à un dépassement de seuil. Il se manifeste par un accroissement de la probabilité de cancer pour une population d'âge et de sexe donnés. On parle alors d'effets probabilistes, stochastiques ou aléatoires.

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

1.2 L'évaluation des risques liés aux rayonnements ionisants

La surveillance des cancers en France est fondée sur 14 registres généraux situés en métropole (couvrant 18 départements et l'agglomération lilloise) et trois dans les départements d'outre-mer. Il faut y ajouter 12 registres spécialisés : neuf registres départementaux couvrant 16 départements métropolitains, deux registres nationaux des cancers de l'enfant de moins de quinze ans concernant les hémopathies malignes et les tumeurs solides et un registre multicentrique du mésothéliome pour la France entière.

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 d'incidence des différentes localisations cancéreuses, ou encore de repérer un agrégat de cas.

À vocation descriptive, ce mode de surveillance ne permet pas toutefois de mettre en évidence un lien de cause à effet entre une exposition aux rayonnements ionisants et des cancers, étant entendu que d'autres facteurs environnementaux peuvent être suspectés. D'autre part, il est à noter que les registres départementaux ne couvrent pas nécessairement les régions proches des installations nucléaires.

1. Nombre de personnes souffrant d'une maladie donnée pendant un temps donné, en général une année, dans une population.



À NOTER

Les conclusions du séminaire ASN sur les risques de leucémies liées à une exposition aux rayonnements ionisants

Dans le cadre des groupes permanents d'experts en radioprotection de l'ASN, un séminaire, intitulé « Risques de leucémies et exposition aux rayonnements ionisants », a été organisé par l'ASN le 9 juin 2015. Il a réuni environ 60 personnes, membres des GPRADE* et GPMED**, représentants d'organismes de recherche nationaux et internationaux, médecins, représentants des institutions concernées ou associations de patients et membres du comité scientifique de l'ASN. L'objectif était de faire le point sur les connaissances actuelles sur le risque de leucémies chez l'enfant et l'adulte vis-à-vis des expositions aux rayonnements ionisants, en tenant compte des caractéristiques de l'exposition aux radiations (aiguë ou chronique, externe ou interne, âge au moment de l'exposition...) et en faisant la synthèse des facteurs de risque autres que les radiations, connus ou suspectés.

Parmi les conclusions du séminaire, on peut noter :

- l'existence de preuves solides que l'exposition aux rayonnements ionisants est un des facteurs de risque de leucémie ;
- l'importance de poursuivre l'étude du taux d'incidence de la leucémie infantile à proximité des installations nucléaires avec une attention particulière pour la tranche d'âge 0-4 ans, en y associant une meilleure description de la population locale (mode de vie et exposition) ;
- la nécessité de renforcer l'interdisciplinarité (épidémiologie, médecine, dosimétrie, statistique) et le partage de compétences a été également souligné. Le développement d'une couverture nationale par les registres de cancers a fait progresser la solidité des études épidémiologiques. Il conviendrait maintenant de compléter ces informations par une caractérisation des différents types de leucémies et par des données dosimétriques robustes ;
- enfin, la poursuite de l'harmonisation des protocoles des études aux niveaux national et international en vue d'études conjointes doit être poursuivie afin de disposer d'une plus grande puissance statistique pour accroître la confiance dans les résultats.

* Groupe permanent d'experts en radioprotection, pour les applications industrielles et de recherche des rayonnements ionisants, et en environnement.

** Groupe permanent d'experts en radioprotection pour les applications médicales et médico-légales des rayonnements ionisants.

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



À NOTER

La dernière publication du Centre international de recherche contre le cancer – CIRC (2015) sur la mortalité par cancer des travailleurs employés dans l'industrie nucléaire*

La publication en 2015 par l'OMS (CIRC, Lyon, www.iarc.fr) de la mortalité par cancer de travailleurs français, américains et britanniques employés dans l'industrie nucléaire (préparation du combustible, recherche, production d'électricité, retraitement des combustibles irradiés) et ayant porté des dosimètres individuels, a permis de mieux connaître les risques pour des irradiations externes, certes faibles mais qui se cumulent sur la durée de vie professionnelle. La population étudiée inclut plus de 300 000 travailleurs, la cohorte française étant constituée de 59 000 travailleurs d'Areva NC, du CEA et d'EDF.

La durée de suivi moyenne de ces travailleurs est de vingt-sept ans. La dose moyenne est de 25 mSv cumulés sur la durée de vie professionnelle (en moyenne quinze ans). La dose annuelle moyenne est inférieure à 2 mSv. 94 % des individus ont cumulé moins de 100 mSv. Parmi les 6 % d'individus dont la dose cumulée dépasse 100 mSv, 75 % ont commencé à travailler avant les années 1970 et leur dose cumulée moyenne est de 223 mSv.

Une première publication en juin 2015 a montré une augmentation du risque de leucémies en fonction de la dose cumulée. Une deuxième publication en octobre 2015 montre que le risque de cancers autres que les leucémies augmente également en fonction de la dose cumulée, soit d'environ 4 % pour une augmentation de 100 mSv.

Ces résultats ont été observés sur un total de 66 600 décès dont 19 064 par cancers à l'exception des leucémies. À partir de la relation dose-risque estimée, il apparaît que la proportion de décès attribuable à l'exposition externe aux rayonnements au sein de cette population de travailleurs est de l'ordre de 1 % de l'ensemble des 19 064 décès par cancer hors leucémie observés.

La relation observée est stable (peu d'hétérogénéité entre les pays, variations de faible ampleur dans les analyses de sensibilité). Pour évaluer l'existence d'un biais potentiel dû au tabac, les cancers du poumon ont été exclus de l'analyse ; cette exclusion a eu peu d'impact sur l'estimation du risque.

La relation dose-risque observée dans cette étude est cohérente avec celles observées dans d'autres études, en particulier chez les survivants de Hiroshima et Nagasaki et montre que le risque aux faibles doses étalées dans le temps n'est pas différent de celui observé pour la même dose d'irradiation reçue en quelques secondes.

* Les nouveaux résultats concernant le risque de décès par cancer autre que leucémie ont été publiés dans la revue *British Medical Journal*, ceux sur le risque leucémie dans le journal *Lancet*.

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

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 diagnostique...).

Dans une optique de gestion du risque aux faibles doses, l'évaluation des risques est faite en extrapolant les risques observés aux plus fortes doses. Ce calcul donne une estimation des risques encourus lors d'une exposition aux faibles doses de rayonnements ionisants. Pour ces estimations, l'hypothèse prudente d'une relation linéaire sans seuil entre l'exposition et le nombre de décès par cancer a été adoptée à l'échelle internationale. Cette hypothèse implique qu'il n'existe pas de seuil de dose en dessous duquel on pourrait affirmer qu'il n'y a pas d'effet. La légitimité de ces estimations et de cette hypothèse reste cependant controversée au plan scientifique, des études à très grande échelle étant nécessaires pour étoffer cette hypothèse.

Sur la base des synthèses scientifiques de l'UNSCEAR (voir encadré ci-contre), la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) (voir publication CIPR 103, chapitre 3, point 1.1.1) a publié les coefficients de risque de décès par cancer dû aux rayonnements ionisants, soit 4,1 % d'excès de risque par sievert (Sv) pour les travailleurs et 5,5 % par sievert pour la population générale.

L'évaluation du risque de cancer du poumon dû au radon (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 CIRC) 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 des expositions faibles (200 becquerels par mètre cube (Bq/m^3)) sur une durée de vingt à trente ans. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) en a fait une synthèse et recommande, pour le public, un niveau d'exposition annuelle maximale situé entre 100 et 300 Bq/m^3 . La CIPR (publication 115) 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, après le tabac, le plus grand facteur de risque de cancer du poumon.

En France métropolitaine, environ 19 millions de personnes, réparties dans près de 9 400 communes, sont potentiellement exposées au radon. Selon l'Institut de veille sanitaire (InVS) (2007), entre 1 200 et 2 900 décès

par cancer du poumon seraient attribuables chaque année à l'exposition domestique au radon, soit entre 4 et 10 % des décès par cancer (environ 30 000 par an en 2012). À l'initiative de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), un plan national d'action pour la gestion des risques liés au radon a été mis en place depuis 2004, il est périodiquement réactualisé (voir point 3.2.2).

1.3 Les incertitudes scientifiques et la vigilance

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

On peut citer, par exemple, plusieurs zones d'incertitudes concernant la radiosensibilité, les effets des faibles doses, la signature radiologique des cancers et certaines maladies non cancéreuses observées dans les suites de radiothérapie.

1.3.1 La radiosensibilité

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

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 pourront conduire à des « brûlures radiologiques ».

Aux faibles doses, il existe une radiosensibilité cellulaire et individuelle qui pourrait concerner environ 5 à 10 % de la population. Les méthodes récentes d'immunofluorescence de cibles moléculaires de la signalisation et de la réparation des lésions de l'ADN permettent de documenter les effets des rayonnements ionisants aux faibles doses, en abaissant d'un facteur 100 les seuils de détection. 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 confirmés en clinique avant d'être intégrés dans les pratiques médicales.



Première radiographie de la main de Madame Roentgen, décembre 1895.



COMPRENDRE

UNSCEAR

Le Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR, *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*) a été créé en 1955 lors de la 10^e session de l'Assemblée générale des Nations unies. Il rassemble 21 pays et rend compte à l'Assemblée générale des Nations unies. C'est un organisme à caractère scientifique qui étudie et évalue, à l'échelle mondiale et régionale, les expositions aux rayonnements et leurs effets sur la santé des groupes exposés. Le comité étudie également les progrès réalisés dans la compréhension des mécanismes biologiques par lesquels les rayonnements influent sur la santé ou l'environnement.

Dernières publications depuis 2013 :

- Sources, effets et risques des rayonnements ionisants :
 - Volume I - Annexe A - Niveaux et effets des expositions aux radiations dues à l'accident nucléaire consécutif au grand tremblement de terre et au tsunami de 2011 à l'est du Japon (2013).
 - Volume II - Annexe B - Effets des expositions aux radiations chez les enfants (2013).
- Développement depuis le rapport UNSCEAR 2013 relatif aux niveaux et effets des expositions aux radiations dues à l'accident nucléaire au Japon en mars 2011 (Fukushima).

Dès lors, des questions délicates, dont certaines dépassent le cadre de la radioprotection, peuvent se poser :

- si des tests permettant d'évaluer le niveau de la radiosensibilité individuelle sont rendus disponibles, le dépistage avant toute radiothérapie ou des examens répétés de scanographie doit-il être recommandé ?
- doit-on rechercher le niveau de radiosensibilité d'un travailleur susceptible d'être exposé aux rayonnements ionisants ?
- la réglementation générale devra-t-elle prévoir une protection particulière pour les personnes concernées par une radiosensibilité élevée aux rayonnements ionisants ?

Ces interrogations soulèvent notamment des questions d'éthique en raison de l'utilisation qui pourrait être faite des résultats de tests de radiosensibilité individuelle (discrimination au niveau de l'emploi par exemple).

Quoi qu'il en soit, il convient de ne pas exposer inutilement, c'est-à-dire sans justification, des personnes aux rayonnements ionisants. Les enfants doivent faire l'objet d'une attention particulière lors d'expositions aux rayonnements ionisants à des fins médicales.

Après la publication en 2014 des conclusions du séminaire organisé par l'ASN le 16 décembre 2013, l'ASN reste attentive aux avancées des connaissances et des réflexions menées au niveau international (CIPR notamment) pour anticiper les décisions réglementaires qui pourront ou devront être prises.

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 contamination chronique. Les études épidémiologiques réalisées sur les personnes exposées aux bombardements d'Hiroshima et de Nagasaki ont permis de mieux connaître les effets des rayonnements sur la santé, pour des expositions dues à une irradiation externe (exposition externe) en quelques fractions de seconde, à forte dose et fort débit de dose de rayonnements ionisants. Les études menées dans les pays les plus touchés par l'accident de Tchernobyl (la Biélorussie, l'Ukraine et la Russie) ont aussi fait avancer les

connaissances sur l'effet des rayonnements sur la santé pour des expositions dues à la contamination interne (exposition interne) notamment à l'iode radioactif. Les études sur les travailleurs du nucléaire ont permis de mieux préciser le risque pour des expositions chroniques 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 d'Hiroshima et de Nagasaki. Cependant, les effets héréditaires ont été bien documentés dans des travaux expérimentaux chez l'animal : les mutations induites par les rayonnements ionisants dans les cellules germinales sont transmissibles à la descendance. La mutation récessive d'un gène sur un chromosome ne donnera aucun signe clinique ou biologique tant que le même gène porté par l'autre chromosome homologue ne sera pas atteint ; si elle n'est pas nulle, la probabilité de ce type d'événement reste cependant faible.

La protection de l'environnement. La radioprotection a pour but d'empêcher ou de réduire les effets nocifs des rayonnements ionisants sur les personnes, directement ou indirectement, y compris par l'effet des atteintes portées à l'environnement. Au-delà de la protection de l'environnement orientée vers la protection de l'homme et des générations présentes ou futures, la protection des espèces non humaines fait partie en tant que telle de la protection de l'environnement prescrite en France par la charte constitutionnelle de l'environnement. Ce sujet



Irradiateur de cellules sanguines.

est maintenant pris en compte par la CIPR depuis 2007 (CIPR 103) et la manière pratique de traiter 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 radiologique des cancers

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 anatomo-pathologique 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, une cellule apparaît présentant une combinaison particulière de lésions de l'ADN lui permettant d'échapper au contrôle habituel de la division cellulaire et qu'il faut une dizaine à une centaine de lésions de l'ADN (mutations, cassures...) en des points névralgiques pour franchir ces étapes. Tous les agents capables de léser l'ADN cellulaire (tabac, alcool, produits chimiques variés, rayonnements ionisants, température élevée, autres facteurs d'environnement notamment nutritionnels, radicaux libres du métabolisme cellulaire normal...) contribuent au vieillissement cellulaire et *in fine* 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, mais l'approche est certainement plus complexe, un cancer résultant, dans certains cas, d'une accumulation de lésions provenant de facteurs de risques différents. 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.

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

2. LES DIFFÉRENTES SOURCES DE RAYONNEMENTS IONISANTS

2.1 Les rayonnements d'origine naturelle

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

2.1.1 Les rayonnements d'origine naturelle 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 présent 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 les plus élevées des débits de dose d'exposition externe, à l'air libre, s'échelonnent en France, selon les régions, entre quelques nanosieverts/heure (nSv/h) et 100 nSv/h.

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

À partir d'hypothèses sur les taux de présence des individus à l'intérieur et à l'extérieur des habitations (respectivement 90 % et 10 %), la dose efficace annuelle moyenne due à l'exposition externe aux rayonnements gamma d'origine tellurique est estimée en France à environ 0,5 mSv par personne et par an.

Les doses dues à l'exposition interne d'origine naturelle varient selon les quantités incorporées de radionucléides des familles de l'uranium et du thorium *via* la chaîne alimentaire, lesquelles dépendent des habitudes alimentaires de chacun. Selon l'UNSCEAR (2000), la dose moyenne par individu serait de l'ordre de 0,23 mSv par an. La concentration moyenne du potassium-40 dans l'organisme représente environ 55 becquerels par kilogramme ; il en résulte une dose efficace annuelle moyenne de l'ordre de 0,18 mSv.

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 (μSv).

2.1.2 Le radon

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

L'exposition au radon dit « domestique » (radon dans les habitations) a été estimée par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) par des campagnes de mesures qui ont donné lieu ensuite à des analyses statistiques (voir www.irsn.fr). La valeur moyenne des activités mesurées en radon a ainsi été estimée en France à 63 Bq/m^3 , avec environ la moitié des résultats inférieurs à

50 Bq/m^3 , 9 % supérieurs à 200 Bq/m^3 et 2,3 % au-dessus de 400 Bq/m^3 .

Ces mesures ont permis de classer les départements en fonction du potentiel d'exhalation de radon des terrains (voir carte ci-dessous).

En 2011, l'IRSN a publié une nouvelle cartographie du territoire national en considérant le potentiel d'exhalation de radon dans le sol, à partir des données du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM).

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 par heure et celui résultant de la composante neutronique à $3,6 \text{ nSv}$ par heure.

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

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



moyenne dans une commune située au niveau de la mer, en France, est de 0,27 mSv par an, alors qu'elle peut dépasser 1,1 mSv par 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 0,33 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 installations nucléaires de base ;
- 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 installations nucléaires, appelées installations nucléaires de base (INB), sont réglementairement classées dans différentes catégories correspondant à des procédures plus ou moins contraignantes selon l'importance des risques potentiels (voir chapitre 3, point 3).

Les principales catégories d'INB sont :

- les réacteurs nucléaires ;
- certains accélérateurs de particules ;
- les usines de préparation, d'enrichissement ou de transformation de substances radioactives, notamment les usines de fabrication de combustibles nucléaires, de traitement de combustibles irradiés et les installations de traitement et d'entreposage des déchets radioactifs qu'elles produisent ;
- les installations destinées au traitement, au stockage, au dépôt ou à l'utilisation de substances radioactives, y compris les déchets, lorsque les quantités mises en œuvre sont supérieures à des seuils fixés par voie réglementaire.

La liste des INB au 31 décembre 2015 figure à l'annexe A.

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 et, plus particulièrement, pour respecter les 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...) (voir chapitre 3).

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 4).

2.2.2 Le transport des substances radioactives

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

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

2.2.3 Les activités nucléaires de proximité

Les rayonnements ionisants, qu'ils soient émis par des radionucléides ou générés par des appareils électriques, sont utilisés dans de très nombreux domaines dont la médecine (radiologie, radiothérapie, médecine nucléaire, irradiateurs de cellules), la biologie, la recherche, l'industrie, mais aussi les applications vétérinaires, médico-légales 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 (voir chapitre 3).

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 industrielles créant un renforcement des rayonnements ionisants d'origine naturelle

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

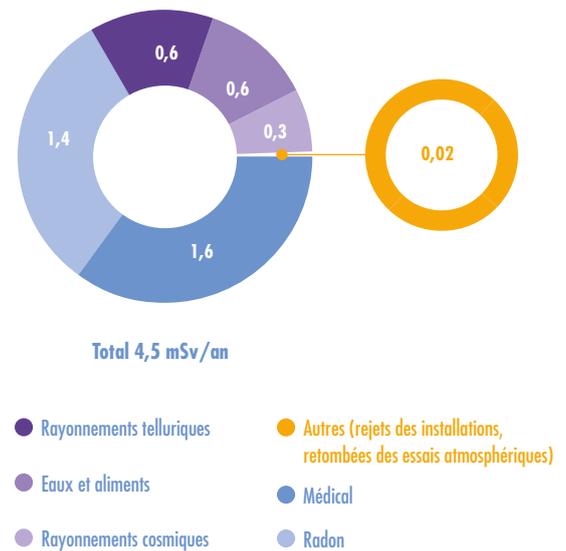
Ainsi, certaines activités professionnelles maintenant incluses dans la définition des « activités nucléaires » (chapitre 3), peuvent accroître, de manière significative, l'exposition aux rayonnements ionisants des travailleurs et, dans une moindre mesure, des populations proches des lieux où

sont exercées ces activités, par exemple dans le cas de rejets d'effluents dans l'environnement. Il s'agit en particulier d'activités qui font appel à des matières premières ou à des résidus industriels contenant des radionucléides naturels non utilisés pour leurs propriétés radioactives, fissiles ou fertiles.

Les familles naturelles de l'uranium et du thorium sont les principaux radionucléides rencontrés. Parmi les industries concernées, on peut citer les industries d'extraction du phosphate et de fabrication des engrais phosphatés, les industries des pigments de coloration, notamment celles utilisant de l'oxyde de titane et celles exploitant les minerais de terres rares dont la monazite.

Les actions de radioprotection à mener dans ce domaine reposent sur l'identification précise des activités, l'estimation de l'impact des expositions pour les personnes concernées, la mise en place d'actions correctives pour réduire, si nécessaire, ces expositions, et leur contrôle.

DIAGRAMME 1 : exposition aux rayonnements ionisants de la population en France (mSv/an)

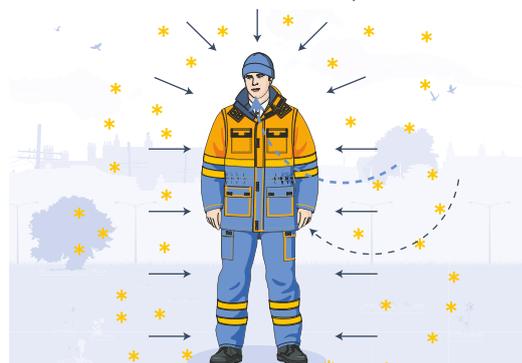


Source : IRSN 2015.

3. LA SURVEILLANCE DES EXPOSITIONS AUX RAYONNEMENTS IONISANTS

Du fait de la difficulté d'attribuer un cancer au seul facteur de risque rayonnements ionisants, la « 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.

SOURCES ET VOIES D'EXPOSITION aux rayonnements ionisants



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



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

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

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

3.1 Les doses reçues par les travailleurs

3.1.1 L'exposition des travailleurs des activités nucléaires

Le système de surveillance des expositions externes des personnes susceptibles d'être exposées aux rayonnements ionisants, travaillant dans les INB ou dans les installations

TABLEAU 1 : surveillance de l'exposition externe des travailleurs dans le domaine nucléaire (année 2014)

Source : IRSN.

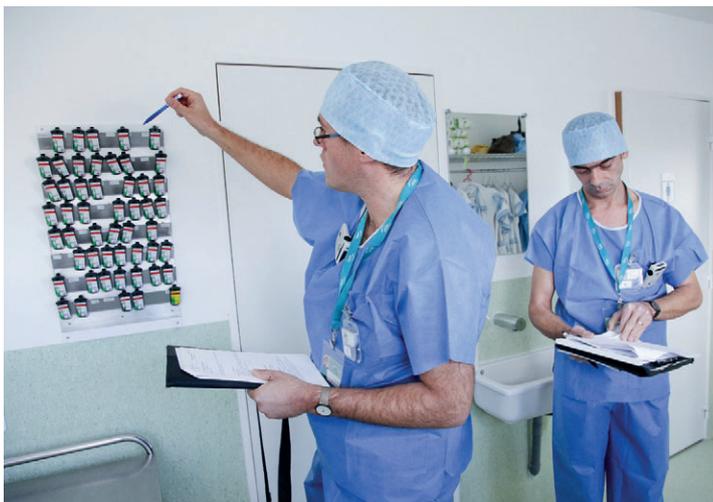
	NOMBRE DE PERSONNES SURVEILLÉES	DOSE COLLECTIVE (homme.Sv*)	DOSE INDIVIDUELLE > 20 mSv
Réacteurs et production d'énergie (EDF)	25 179	6,57	0
Cycle du combustible ; démantèlement	8 934	2,28	0
Transport	602	0,09	0
Logistique et maintenance (prestataires)	12 219	8,52	0
Autres	20 949	6,85	0

TABLEAU 2 : surveillance de l'exposition externe des travailleurs dans les activités nucléaires de proximité (année 2014)

Source : IRSN.

	NOMBRE DE PERSONNES SURVEILLÉES	DOSE COLLECTIVE (homme.Sv*)	DOSE INDIVIDUELLE > 20 mSv
Médecine	132 144	11,68	6
Dentaire	49 668	2,1	1
Vétérinaire	20 051	0,44	0
Industrie	33 631	14,71	1
Recherche	13 122	0,40	0
Divers	24 150	1,42	0

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



Contrôle par les inspecteurs de l'ASN des dosimètres du personnel médical du centre hospitalier de Guingamp.

relevant du nucléaire de proximité, est en place depuis plusieurs décennies. Fondé principalement sur le port obligatoire du dosimètre passif pour les travailleurs susceptibles d'être exposés, il permet de vérifier le respect des limites réglementaires applicables aux travailleurs. Ces limites visent l'exposition totale (depuis 2003, la limite annuelle, exprimée en termes de dose efficace, est de 20 mSv sur 12 mois consécutifs), obtenue en ajoutant la dose due à l'exposition externe et celle résultant d'une éventuelle contamination interne ; d'autres limites, appelées limite de dose équivalente, sont définies pour l'exposition externe de certaines parties du corps telles que les mains et le cristallin (voir chapitre 3).

Les données enregistrées permettent de connaître, pour chaque travailleur des activités nucléaires, 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. L'exposition des travailleurs au radon n'est pas intégrée dans le dispositif de surveillance.

Les tableaux 1 et 2 présentent, par domaine d'activité, la répartition des effectifs surveillés, de la dose collective et du nombre de dépassements de la limite annuelle de 20 mSv. Ils témoignent d'une grande inégalité de la répartition des doses selon les secteurs. Par exemple, le secteur des activités médicales et vétérinaires, qui regroupe une part importante des effectifs surveillés (près des deux tiers de l'effectif total), ne représente qu'environ 28 % de la dose collective ; en revanche, ce secteur comptabilise sept dépassements de la limite annuelle de 20 mSv (sur les huit rapportés), dont un dépassement proche de 96 mSv, un entre 20 et 25 mSv et cinq entre 30 et 50 mSv).

Les dernières statistiques montrent une progression légère mais régulière des effectifs faisant l'objet d'une surveillance dosimétrique depuis 2005 (voir diagramme 2), le

À NOTER

Bilan de la surveillance dosimétrique de l'exposition externe des travailleurs aux rayonnements ionisants en 2014

(source : exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France – bilan 2014, IRSN, juillet 2015)

- Effectif total surveillé : 359 646 travailleurs
- Effectif surveillé pour lequel la dose est restée inférieure au seuil d'enregistrement : 283 143 travailleurs, soit environ 79 %
- Effectif surveillé pour lequel la dose est restée comprise entre le seuil d'enregistrement et 1 mSv : 63 431 travailleurs, soit environ 18 %
- Effectif surveillé pour lequel la dose est restée comprise entre 1 mSv et 20 mSv : 13 072 travailleurs, soit environ 3,6 %
- Effectif surveillé pour lequel la dose efficace annuelle a dépassé 20 mSv : 9 travailleurs dont 1 au-dessus de 50 mSv
- Dose collective (somme des doses individuelles) : 56,3 homme.Sv
- Dose individuelle annuelle moyenne sur l'effectif ayant enregistré une dose supérieure au seuil d'enregistrement : 0,74 mSv

Bilan de la surveillance de l'exposition interne en 2014

- Nombre d'exams de routine réalisés : 306 220 (dont moins de 1 % considérés positifs)
- Effectif ayant fait l'objet d'une estimation dosimétrique : 553 travailleurs
- Nombre d'exams de surveillance spéciale ou de contrôle réalisés : 5 524 (dont 16 % sont supérieurs au seuil d'enregistrement)
- Effectif ayant enregistré une dose efficace engagée supérieure à 1 mSv : 5 travailleurs

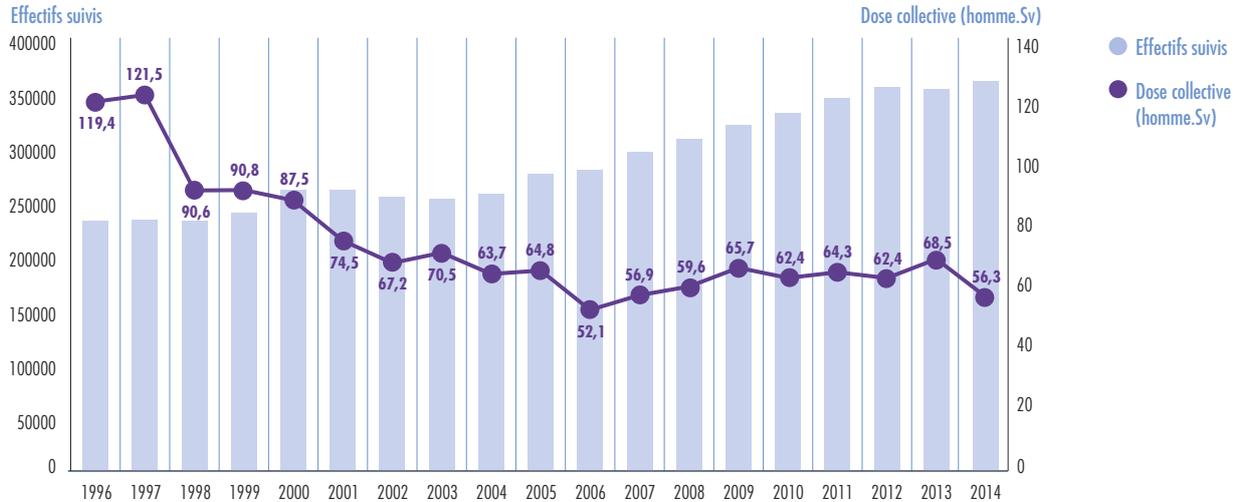
Bilan de la surveillance de l'exposition aux rayonnements cosmiques en 2014 (aviation civile)

- Dose collective pour 18 110 personnels navigants : 32,6 homme.Sv
- Dose individuelle annuelle moyenne : 1,8 mSv

cap des 350 000 personnes a été dépassé en 2012. Cette évolution est due pour une part importante à l'augmentation des effectifs surveillés dans le domaine des activités médicales et vétérinaires. Après une légère diminution en 2013 pour la première fois depuis 2001, l'année 2014 voit à nouveau l'effectif suivi progresser légèrement ; il semblerait donc qu'un plateau soit atteint, cette tendance restant à confirmer sur les années à venir.

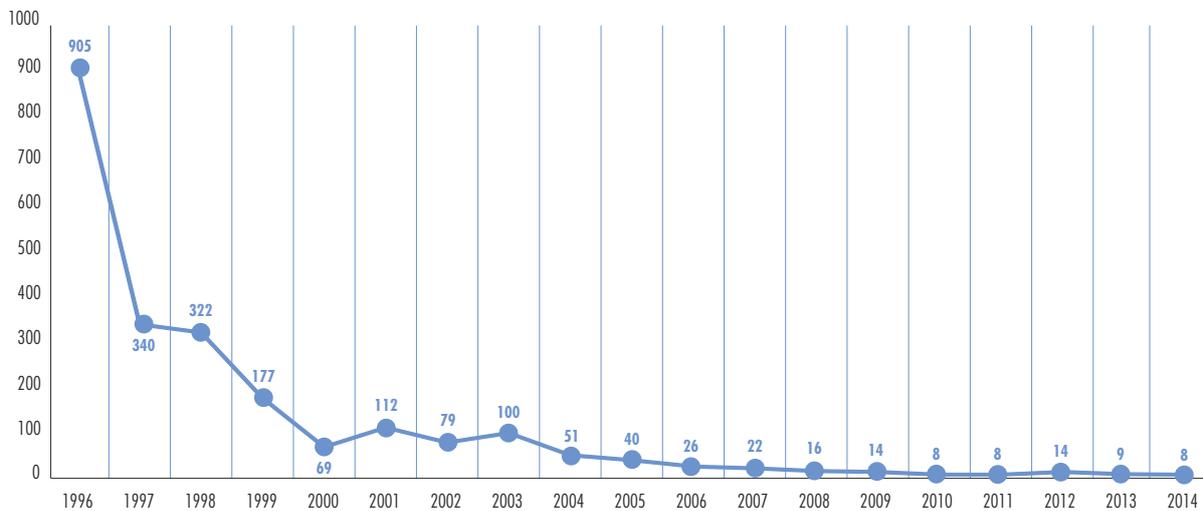
Dans le même temps, la dose collective annuelle a globalement diminué (régression d'environ 50 % depuis 1996 alors que les effectifs surveillés ont progressé d'environ 50 %). À noter toutefois, une tendance à l'augmentation de la dose collective entre 2006 et 2009, suivie d'une stagnation sur la période 2009-2013 puis d'une baisse observée en 2014 pour atteindre 56,3 homme.Sv.

DIAGRAMME 2 : évolution de l'effectif surveillé et de la dose collective de 1996 à 2014



Source : IRSN.

DIAGRAMME 3 : évolution du nombre de travailleurs surveillés dont la dose annuelle est supérieure à 20 mSv, de 1996 à 2014



Source : IRSN.

Le nombre de travailleurs surveillés dont la dose efficace annuelle a dépassé 20 mSv reste stable depuis 2013 (neuf dépassements de limite de dose efficace) (voir diagramme 3).

Concernant la dosimétrie des extrémités (doigts et poignet), le nombre de travailleurs suivis en 2014 est de 27 068 (soit 7,5 % de l'effectif suivi) et la dose totale est de 129 homme.Sv. Sur l'ensemble des effectifs suivis, il y a eu un dépassement de la limite réglementaire de dose équivalente aux extrémités de 500 mSv (1 373 mSv environ pour un travailleur du secteur médical).

Le bilan de la surveillance dosimétrique de l'exposition externe des travailleurs en 2014, publié par l'IRSN en juillet 2015, montre globalement l'efficacité du système de prévention mis en place dans les établissements où sont utilisées les sources de rayonnements ionisants puisque, pour plus de 96 % des effectifs surveillés, la

dose annuelle est restée inférieure à 1 mSv (limite de dose efficace annuelle pour le public du fait des activités nucléaires). Les dépassements des valeurs limites réglementaires restent exceptionnels.

3.1.2 L'exposition des travailleurs aux rayonnements naturels renforcés

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

Le bilan des études réalisées en France depuis 2005, publié par l'ASN en janvier 2010, et les études reçues depuis 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.

3.1.3 L'exposition des personnels navigants

aux rayonnements cosmiques

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

Le système d'observation appelé SIEVERT, mis en place par la Direction générale de l'aviation civile, l'IRSN, l'Observatoire de Paris et l'Institut français pour la recherche polaire Paul-Émile Victor (www.sievert-system.com), permet d'estimer l'exposition du personnel navigant aux rayonnements cosmiques, compte tenu des vols réalisés en cours d'année.

En 2014, 18 110 personnels navigants avaient leurs doses enregistrées dans Siseri. Les doses individuelles sont inférieures à 1 mSv dans 15,3 % des cas, et comprises entre 1 mSv et 4 mSv dans 84,7 % des cas.

3.2 Les doses reçues par la population

3.2.1 Les doses reçues par la population

du fait des activités nucléaires

Les réseaux de surveillance automatisés gérés par l'IRSN sur l'ensemble du territoire (réseaux Téléray, Hydrotéléray et Téléhydro) permettent de surveiller en temps réel la radioactivité dans l'environnement et de mettre en évidence toute variation anormale. Ces réseaux de mesure joueraient un rôle prépondérant, en cas d'incident ou d'accident conduisant à des rejets de substances radioactives, pour éclairer les décisions à prendre par les autorités et pour informer la population. En situation normale, ils participent à l'évaluation de l'impact des INB (voir chapitre 4).

En revanche, il n'existe pas de méthode globale de surveillance permettant de reconstituer de façon exhaustive les doses reçues par la population du fait des activités nucléaires. De ce fait, le respect de la limite d'exposition

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

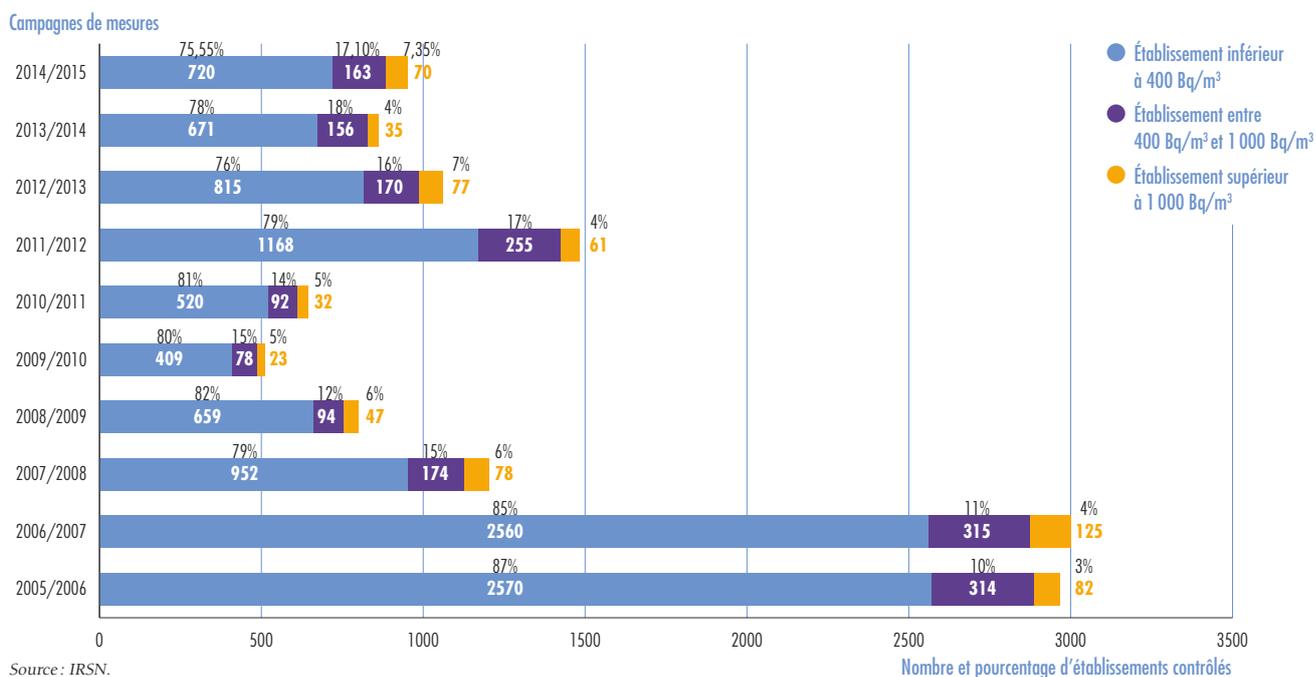
Ces estimations ne sont pas connues pour les activités nucléaires autres que les INB, du fait des difficultés méthodologiques pour mieux connaître l'impact de ces installations et, notamment, l'impact des rejets contenant des faibles quantités de radionucléides artificiels provenant de l'utilisation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

Des situations héritées du passé telles que les essais nucléaires aériens et l'accident de Tchernobyl 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 0,010 mSv et 0,030 mSv/an (IRSN 2001). Celles dues aux retombées des tirs atmosphériques avaient été estimées, en 1980, à environ 0,020 mSv ; du fait d'un facteur de décroissance d'environ 2 en dix ans, les doses actuelles sont estimées largement inférieures à 0,010 mSv par an (IRSN 2006). En ce qui concerne les retombées en France de l'accident de Fukushima (Japon), les résultats publiés en France par l'IRSN en 2011 ont montré la présence d'iode radioactif à des niveaux très faibles, conduisant pour les populations à des doses très inférieures à celles estimées pour l'accident de Tchernobyl et d'impact négligeable.

3.2.2 L'exposition de la population

aux rayonnements naturels

L'exposition due à la radioactivité naturelle des eaux de consommation. Les résultats de la surveillance de la qualité radiologique des eaux distribuées au robinet exercée par les agences régionales de santé entre 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 totale indicative de 0,1 mSv/an fixée par la réglementation. Cette appréciation globale peut également être appliquée à la qualité radiologique des eaux minérales et des eaux de sources

DIAGRAMME 4 : bilan des campagnes de mesures de radon


produites en France sous forme conditionnée (rapport DGS/ASN/IRSN publié en 2013).

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

Le bilan des campagnes réalisées depuis 2005 par les organismes agréés par l'ASN est présenté dans le diagramme 4. Les pourcentages de résultats de mesures supérieurs aux niveaux d'action (400 et 1 000 Bq/m³) restent comparables d'une année sur l'autre. Depuis 2009, un nouveau cycle décennal de dépistage a été entamé.

Les résultats des contrôles dans les lieux ouverts au public ne sont pas pertinents pour évaluer précisément les doses liées à l'exposition de la population du fait que l'exposition dans l'habitat constitue la part la plus importante des doses reçues au cours de la vie. Il faut noter que, s'agissant de la moyenne des activités volumiques du radon dans l'habitat, les données disponibles datent de la campagne nationale de mesures de l'exposition au radon réalisée dans les années 1980-1990.

Au-delà des aspects réglementaires (voir chapitre 3), la gestion des risques liés au radon a fait l'objet d'un plan national d'action à caractère interministériel pour la période 2011-2015, piloté par l'ASN. Ce bilan et le nouveau plan d'action seront publiés en 2016, pour la période 2016-2019.

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, notamment dans le cadre de la surveillance après traitement d'un cancer et des maladies coronariennes. Elle fait l'objet depuis 2002 d'un examen régulier par l'IRSN.

La dose efficace moyenne par habitant du fait des examens radiologiques à visée diagnostique a été évaluée à 1,6 mSv pour l'année 2012 (rapport IRSN 2014) pour un volume d'actes diagnostiques de l'ordre de 81,8 millions (74,6 millions en 2007), soit 1 247 actes pour 1 000 habitants et par an. Il faut noter que l'exposition individuelle en 2012 est très hétérogène. Ainsi, si environ un tiers de la population française a bénéficié d'au moins un acte (hors actes dentaires), 85 % de cette population n'a pas été exposé ou a reçu moins de 1 mSv.

La dose efficace individuelle moyenne a augmenté de 23 % entre 2007 et 2012 (elle était de 1,3 mSv en 2007) ; elle avait déjà augmenté de 50 % entre 2002 et 2007 (rapport IRSN/InVS 2010). Il faut souligner, toutefois, que les méthodologies utilisées pour la période 2002-2007 et pour la période 2007-2012 ne sont pas identiques.

TABLEAU 3 : 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	
	NOMBRES	%	MSV	%
Radiologie conventionnelle (hors dentaire)	44 175 500	54,0	18 069 200	17,7
Radiologie dentaire	27 616 000	33,8	165 700	0,2
Scanographie	8 484 000	10,4	72 838 900	71,3
Radiologie interventionnelle diagnostique	377 000	0,5	3 196 400	3,1
Médecine nucléaire	1 103 000	1,3	7 928 300	7,8
TOTAL	81 755 500	100,0	102 198 500	100,0

Source : IRSN.

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

À titre d'exemple, les scanners thoraciques et abdominaux pelviens restent les plus fréquents (50 % en 2012 vs 30 % en 2007), plus particulièrement chez l'homme au-delà de 50 ans (4,2 % en 2012 vs 1,4 % en 2007). Les femmes ont bénéficié de plus d'actes en radiologie conventionnelle (mammographies et examens des membres) que les hommes.

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

Il faut noter enfin que, dans un échantillon d'environ 600 000 personnes bénéficiaires de l'assurance maladie, 44 % d'entre elles ont bénéficié en 2012 d'au moins un acte diagnostique. L'analyse des doses efficaces pour ces personnes, ayant effectivement eu un examen, montre que 70 % d'entre elles ont reçu moins d'1 mSv, 18 % entre 1 et 10 mSv, 11 % entre 10 et 50 mSv et 1 % plus de 50 mSv. Il faut cependant tenir compte dans cette étude 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 la 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.

À partir d'un échantillon de 100 000 enfants (1 % de la population française), l'IRSN (rapport 2013) a estimé qu'en 2010 un enfant sur trois a été exposé aux rayonnements ionisants à des fins diagnostiques. Les valeurs moyenne et médiane de la dose efficace sont estimées respectivement à 0,65 mSv et 0,025 mSv pour l'ensemble des enfants exposés. Elles sont respectivement de 5,7 mSv et 1,7 mSv pour les enfants ayant bénéficié d'au moins un acte scanographique (1 % de la population étudiée).

La maîtrise des doses délivrées aux patients reste une priorité pour l'ASN qui a engagé, en liaison avec les parties prenantes (institutionnels et professionnels), un programme d'actions dans différents domaines (qualité et sécurité des pratiques/assurance qualité, ressources humaines/formation...).

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

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

La protection de l'environnement vis-à-vis du risque radiologique, et notamment la protection des espèces non humaines, doit toutefois pouvoir être garantie indépendamment des effets sur l'homme. Rappelant que cet objectif est déjà intégré dans la législation nationale, l'ASN veillera à ce que l'impact des rayonnements ionisants sur les espèces non humaines soit effectivement pris en compte dans la réglementation et dans les autorisations des activités nucléaires, dès que les méthodes d'évaluation seront disponibles. L'avis adopté par le GPRADE en septembre 2015, établi à partir du rapport d'expertise de l'IRSN, doit être publié en 2016.

4. PERSPECTIVES

Comme les années précédentes, le bilan des doses reçues par les travailleurs en 2014, publié par l'IRSN, confirme la stabilisation, moins d'une dizaine de cas, du nombre de travailleurs surveillés dont la dose annuelle a dépassé 20 mSv, ainsi que la stabilisation à un niveau bas de la dose collective après une diminution commencée à partir de 1996.

La transposition par ordonnance des nouvelles exigences relatives aux expositions au radon, contenues dans la directive européenne 2013/59 définissant les normes de base en radioprotection, devra permettre d'intensifier la communication sur les risques liés au radon en direction du public, et d'organiser la collecte et l'analyse des résultats des mesures réalisées dans l'habitat. Tels sont les principaux enjeux du troisième plan national d'action 2016-2019 en cours de finalisation.

Sur la question de l'augmentation régulière des doses délivrées aux patients lors des examens d'imagerie médicale depuis 2002, et confirmée par les résultats de l'enquête de 2012 publiée en 2014, l'ASN poursuit les actions qu'elle a engagées depuis 2011 pour maintenir la mobilisation, à tous les niveaux, des autorités sanitaires et des professionnels de santé. La sensibilisation des médecins demandeurs d'examens constitue un nouvel objectif pour les prochaines années.