

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 moléculaire dans les cancers radio-induits

2. Les différentes sources de rayonnements ionisants 50

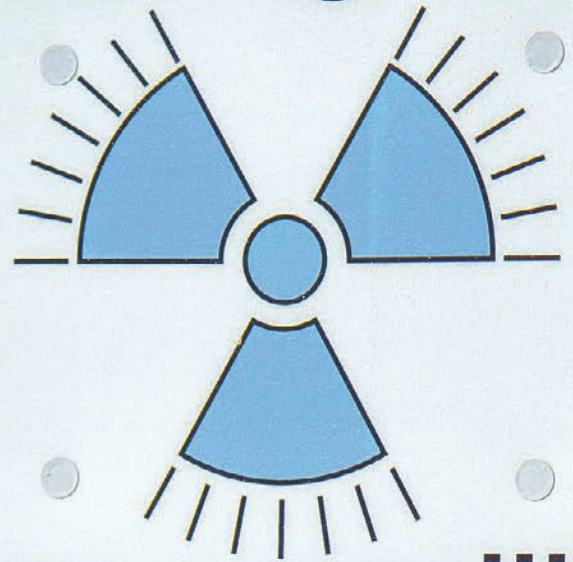
- 2.1 Les rayonnements d'origine naturelle
 - 2.1.1 Les rayonnements d'origine terrestre (hors radon)
 - 2.1.2 Le radon
 - 2.1.3 Les rayonnements cosmiques
- 2.2 Les rayonnements ionisants liés aux activités humaines
 - 2.2.1 Les installations nucléaires de base
 - 2.2.2 Le transport de substances radioactives
 - 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 53

- 3.1 Les doses reçues par les travailleurs
 - 3.1.1 L'exposition des personnes travaillant dans les installations nucléaires
 - 3.1.2 L'exposition des travailleurs aux rayonnements naturels renforcés
 - 3.1.3 L'exposition des personnels navigants aux rayonnements cosmiques
- 3.2 Les doses reçues par la population
 - 3.2.1 Les doses reçues par la population du fait des activités nucléaires
 - 3.2.2 L'exposition de la population aux rayonnements naturels
- 3.3 Les doses reçues par les patients
- 3.4 L'exposition des espèces non humaines (animales et végétales)

4. Perspectives 59

Travaux réglementés



Zone surveillée

s et transit

age toléré dans cette zone

ux

ation de la consigne

illeur classé A ou B : EDP et dosimètre pas

illeur non classé : travaux soumis à avis du
étent en Radioprotection

tés .

ée

ssif

Service

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

01



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 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.



COMPRENDRE

UNSCEAR

Le rapport 2016 de l'UNSCEAR *Sources, effets et risques des rayonnements ionisants* dresse en particulier un état des connaissances sur l'exposition aux rayonnements ionisants du public résultant des industries produisant de l'électricité. La première partie du rapport présente les évolutions de la méthodologie permettant d'estimer l'exposition du public due aux rejets de l'industrie produisant l'électricité. Il compare l'exposition aux rayonnements ionisants résultant des différentes industries productrices d'électricité: nucléaire, charbon, gaz, pétrole, géothermie, solaire et vent. La contribution des industries produisant de l'électricité à partir de l'énergie nucléaire et du charbon a été particulièrement étudiée. Les résultats montrent que l'industrie du cycle du charbon contribue à plus de la moitié de la dose collective reçue par le public pour un an de production d'électricité. Pour une même quantité d'électricité produite, le cycle du charbon participe majoritairement à la dose collective du public suivi par le nucléaire et de façon plus faible les autres industries, à l'exception de la géothermie.

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).



| 150^e anniversaire de la naissance de Marie Curie.

Par la suite, plusieurs types de cancer ont été observés en milieu professionnel, dont certains types de leucémie, des cancers bronchopulmonaires (par inhalation de radon) et des ostéosarcomes de la mâchoire. Hors du domaine professionnel, le suivi pendant plus de soixante ans d'une cohorte d'environ 85 000 personnes irradiées à Hiroshima et Nagasaki a permis de faire régulièrement le point sur la 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 chez des sujets jeunes exposés pendant leur enfance. Les conséquences sanitaires de l'accident de Fukushima pour les populations avoisinantes ne sont pas encore suffisamment connues et analysées pour en tirer les enseignements au plan épidémiologique.

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

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

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

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.

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

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

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 du Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR, *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*), la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) a publié les coefficients de risque de décès par cancer 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 (voir publication CIPR 103, chapitre 3, point 1.1.1).

L'évaluation du risque de cancer du poumon dû au radon² 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 Bq/m³) sur une durée de vingt à trente ans. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) en a fait une synthèse et recommande, pour le public, un niveau d'exposition annuelle maximale situé entre 100 et 300 Bq/m³. La publication 115 de la CIPR a comparé les risques de cancer du poumon observés dans le cadre des études sur les mineurs d'uranium avec ceux observés en population générale et a conclu à une très bonne concordance des risques observés dans ces deux conditions d'exposition au radon. Les recommandations de la CIPR confortent celles émises par l'OMS, qui considère que le radon constitue, après le tabac, le facteur le plus important de risque de cancer du poumon.

En France métropolitaine, environ 19 millions de personnes, réparties dans près de 9 400 communes, sont potentiellement exposées à des concentrations élevées en radon. Selon l'Institut de veille sanitaire (2007), entre 1 200 et 2 900 décès par cancer du poumon seraient attribuables chaque année en France à l'exposition domestique au radon, soit entre 4 et 10 % des décès par cancer du poumon (30 555 décès, Institut national du cancer – INCa – 2015). À l'initiative de l'ASN, un plan national d'action pour la gestion des risques liés au radon a été mis en place depuis 2004, il est périodiquement réactualisé (voir point 3.2.2).

1.3 Les incertitudes scientifiques et la vigilance

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

On peut citer, par exemple, plusieurs zones d'incertitudes concernant la radiosensibilité, les effets des faibles doses, 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.

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).

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 peuvent chez ces personnes conduire à des « brûlures radiologiques ».

Aux faibles doses, il existe une radiosensibilité cellulaire et individuelle qui pourrait concerner environ 5 à 10 % de la population. 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 validés en clinique avant d'être intégrés dans les pratiques médicales.

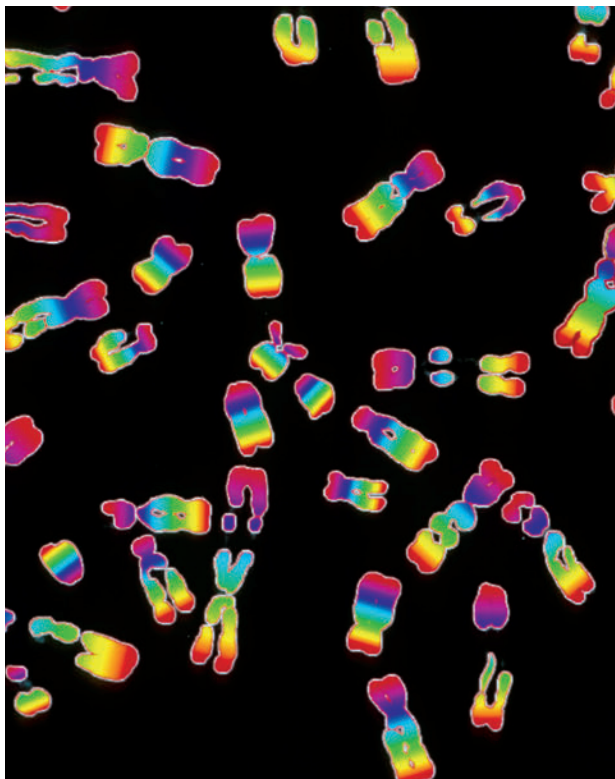
La surveillance de la radiosensibilité individuelle dans le cadre d'une prise en charge médicale, par des tests validés, n'est pas encore pleinement opérationnelle malgré les progrès de la recherche en cours.

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.

À ce stade, 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.

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.



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

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

Les effets héréditaires. La survenue d'éventuels effets héréditaires des rayonnements ionisants chez l'homme reste incertaine. De tels effets n'ont pas été observés chez les survivants des bombardements de Hiroshima et de Nagasaki. Cependant, 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 est maintenant pris en compte par la CIPR depuis 2007 (CIPR 103), et la manière 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 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. Toutefois, un travail récent (Behjati *et al.* 2016) semble indiquer que deux types de mutations seraient plus fréquents ; néanmoins, la faible taille de l'échantillon demande que ces données soient validées par des travaux plus importants.

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 terrestre (hors radon)

Les radionucléides naturels d'origine terrestre sont présents à des teneurs diverses dans tous les milieux constitutifs de notre environnement et de l'organisme humain. Ils conduisent à une exposition externe de la population du fait des rayonnements gamma émis par les produits de filiation de l'uranium-238 et du thorium-232, et par le potassium-40 présents dans les sols, mais aussi à une exposition interne par inhalation de particules remises en suspension, par ingestion de denrées alimentaires ou d'eau de consommation.

Les teneurs en radionucléides naturels dans les sols sont extrêmement variables. Les valeurs des débits de dose d'exposition externe, à l'air libre, s'échelonnent en France, selon les régions, entre quelques nanosieverts/heure (nSv/h) et 100 nSv/h.

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

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

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

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



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'IRSN lors de 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-contre).

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). Sur cette base, une classification plus fine, par commune, sera disponible en 2018.

À terme, la nouvelle obligation faite aux laboratoires de dosimétrie de transmettre à l'IRSN les résultats des dosimètres devra permettre d'améliorer la connaissance des expositions au radon en France (voir le 3^e plan national de gestion des risques liés au radon publié en janvier 2017 et accessible sur www.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 par heure et celui résultant de la composante neutronique à $3,6 \text{ nSv}$ par heure.



Thomas Pesquet, astronaute.

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 $0,27 \text{ mSv}$ par an, alors qu'elle peut dépasser $1,1 \text{ mSv}$ par an dans une commune qui serait située à environ $2\,800 \text{ m}$ d'altitude. En moyenne, la dose efficace annuelle par individu en France est de $0,32 \text{ mSv}$. Elle est inférieure à la valeur moyenne mondiale de $0,38 \text{ mSv}$ 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 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 2017 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.

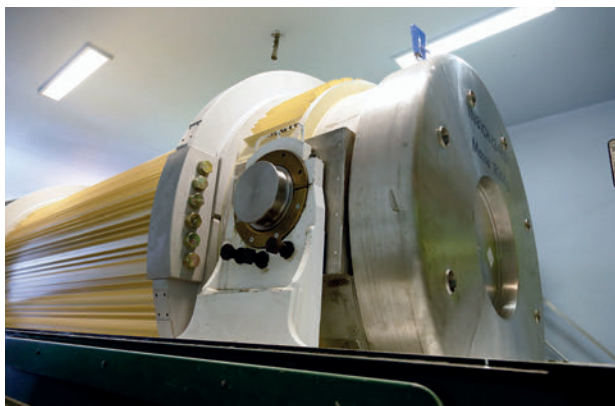
Pour ce qui concerne la prévention des risques pour les travailleurs, l'exploitant d'une INB est tenu de mettre en œuvre tous les moyens nécessaires pour assurer la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants. Il doit en particulier s'assurer du respect des règles générales 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...) (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 de substances radioactives

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

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



| Emballage de transport.

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), 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 (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 utilisant des substances radioactives d'origine naturelle

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

Ainsi, certaines activités incluses dans la définition des « activités nucléaires » peuvent avoir recours à l'utilisation de matériaux contenant des substances radioactives d'origine naturelle (SRON, voir définition chapitre 3, point 1.2.2) 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.

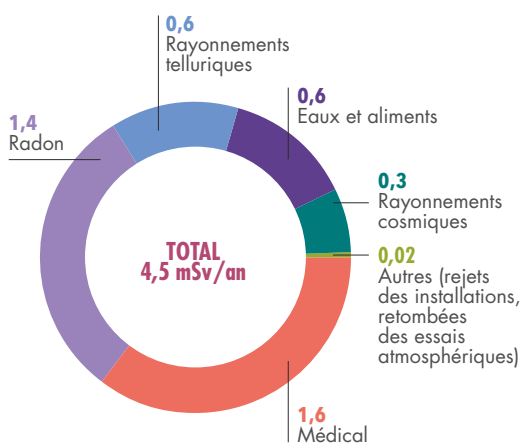
Les familles naturelles de l'uranium et du thorium sont les principaux radionucléides rencontrés. Parmi les industries concernées, on peut citer :

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

Les actions de radioprotection à mener dans ce domaine visent les travailleurs (risque d'irradiation externe et de contamination interne, radon) mais aussi la population, par exemple, dans le cas de rejets d'effluents dans l'environnement ou de production de résidus susceptibles d'être réutilisés, par exemple, dans les matériaux de construction.

3. La surveillance des expositions aux rayonnements ionisants

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



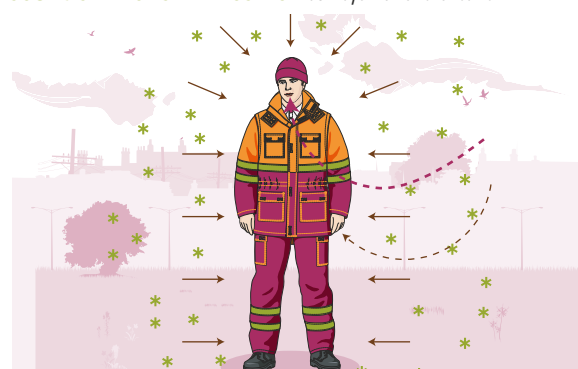
Source : IRSN 2015

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

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.

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,

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

notamment selon le lieu d'habitation et le nombre d'exams radiologiques réalisés (source : IRSN 2015). La dose efficace individuelle annuelle moyenne peut ainsi varier selon les départements d'un facteur pouvant atteindre cinq. Le diagramme 1 représente une estimation des contributions respectives des différentes sources d'exposition aux rayonnements ionisants pour la population française.

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

3.1 Les doses reçues par les travailleurs

3.1.1 L'exposition des personnes travaillant dans les installations nucléaires

Le système de surveillance des expositions externes des personnes susceptibles d'être exposées aux rayonnements ionisants, travaillant notamment dans les INB ou dans les installations relevant du nucléaire de proximité, est en place depuis plusieurs décennies. Fondé principalement sur le port obligatoire du dosimètre passif pour les travailleurs susceptibles d'être exposés, il permet de vérifier le respect des limites réglementaires applicables aux travailleurs. Ces limites visent l'exposition totale (depuis 2003, la limite annuelle, exprimée en termes de dose efficace, est de 20 mSv sur 12 mois consécutifs), obtenue

en ajoutant la dose due à l'exposition externe et celle résultant d'une éventuelle contamination interne ; d'autres limites, appelées limites de dose équivalente, sont définies pour l'exposition externe de certaines parties du corps telles que les mains et le cristallin (voir chapitre 3).

Les données enregistrées permettent de connaître, pour chaque personne travaillant dans les installations nucléaires, y compris celles des entreprises extérieures, la dose d'exposition cumulée sur une période déterminée (mensuelle ou trimestrielle). Elles sont rassemblées dans le Système d'information de la surveillance de l'exposition aux rayonnements ionisants (Siseri) géré par l'IRSN et font l'objet d'une publication annuelle. L'exposition des travailleurs au radon n'est 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 25 % de la dose collective ; par contre, le secteur de l'industrie nucléaire qui représente environ 20 % des effectifs, comptabilise plus de 45 % de la dose collective. Le secteur industriel qui ne représente que 10 % des effectifs, comptabilise 28 % de la dose collective.

Les dernières statistiques montrent une progression légère mais régulière des effectifs faisant l'objet d'une surveillance dosimétrique depuis 2005 (voir diagramme 2), le cap des 350 000 personnes avait 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, les années 2014, 2015 et 2016 voient à nouveau l'effectif suivi progresser légèrement.

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 60 %). À noter, toutefois, une tendance à l'augmentation de la dose collective entre 2006 et 2009, suivie d'une stagnation sur la période 2009-2012. Après une évolution singulière en 2013, la dose collective (63,2 homme.Sv en 2016), est revenue depuis 2015 à des valeurs proches de celles observées sur la période 2009-2012.

Le nombre de travailleurs surveillés dont la dose efficace annuelle a dépassé 20 mSv, a diminué depuis 2015 ; seul, un dépassement de la limite de dose efficace annuelle a été observé en 2016 (dose efficace de 65,2 mSv pour un travailleur du secteur du contrôle non destructif) (voir diagramme 3).

Concernant la dosimétrie des extrémités (doigts et poignets), le nombre de travailleurs suivis en 2016 est de 28 672 (soit 7,7 % de l'effectif suivi). Sur l'ensemble des effectifs suivis, il y a eu deux cas de dépassement de la limite réglementaire de la dose équivalente aux extrémités de 500 mSv (568 mSv et 800 mSv pour deux travailleurs du secteur de l'imagerie médicale).

Pour la deuxième année consécutive, des données relatives à la surveillance de l'exposition du cristallin sont disponibles. Quatre mille quatre cent trente et une personnes ont fait l'objet d'une surveillance de l'exposition au cristallin. La dose maximale enregistrée est de 21,8 mSv et concerne le domaine des utilisations

TABEAU 1 : surveillance de l'exposition externe des travailleurs dans le domaine nucléaire civil (année 2016)

Source : IRSN

| | NOMBRE DE PERSONNES SURVEILLÉES | DOSE COLLECTIVE (homme.Sv*) | DOSE INDIVIDUELLE > 20 mSv |
|--|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Réacteurs et production d'énergie (EDF) | 25 483 | 7,83 | 0 |
| Cycle du combustible ; démantèlement | 7 690 | 2,25 | 0 |
| Transport | 853 | 0,12 | 0 |
| Logistique et maintenance (prestataires) | 15 574 | 11,15 | 0 |
| Effluents, déchets | 84 | 0 | 0 |
| Autres | 20 725 | 6,75 | 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.

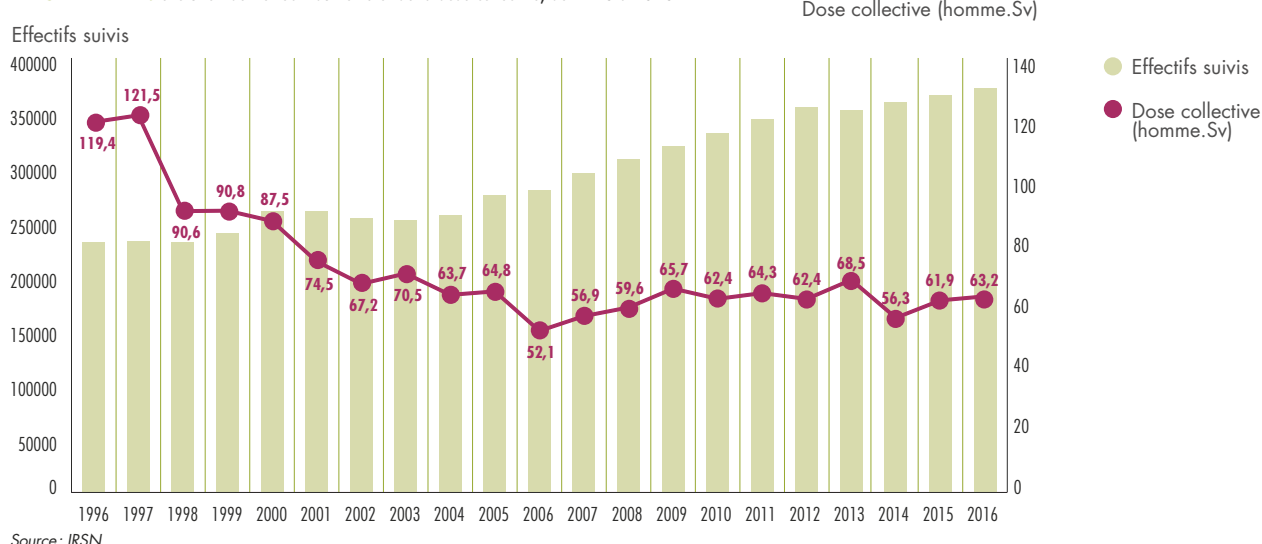
TABEAU 2 : surveillance de l'exposition externe des travailleurs dans les activités nucléaires de proximité (année 2016)

Source : IRSN

| | NOMBRE DE PERSONNES SURVEILLÉES | DOSE COLLECTIVE (homme.Sv*) | DOSE INDIVIDUELLE > 20 mSv |
|-------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Médecine | 129 541 | 11,43 | 0 |
| Dentaire | 51 238 | 2,13 | 0 |
| Vétérinaire | 21 490 | 0,6 | 0 |
| Industrie | 38 127 | 17,8 | 1 |
| Recherche | 11 635 | 0,41 | 0 |
| Divers | 25 711 | 1,36 | 0 |

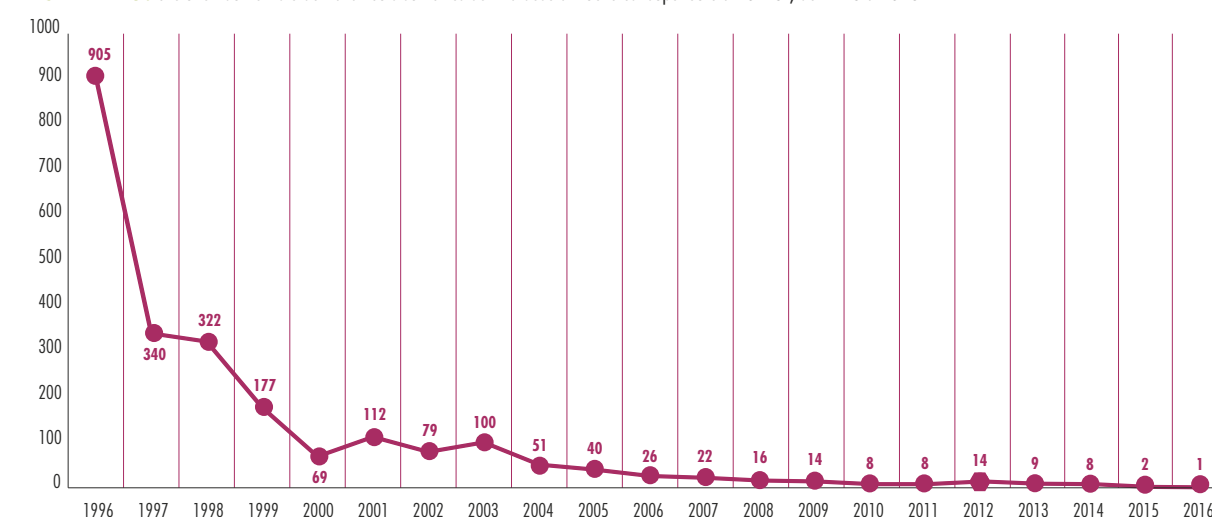
* Homme.Sv : unité de grandeur de dose collective. Pour mémoire, la dose collective est la somme des doses individuelles reçues par un groupe de personnes données.

DIAGRAMME 2 : évolution de l'effectif surveillé et de la dose collective, de 1996 à 2016



Source : IRSN

DIAGRAMME 3 : évolution du nombre de travailleurs surveillés dont la dose annuelle est supérieure à 20 mSv, de 1996 à 2016



Source : IRSN

médicales. Cette valeur est à mettre en regard de la nouvelle limite réglementaire de dose au cristallin : valeur cumulée de 100 mSv sur cinq ans, sans excéder 50 mSv la même année (20 mSv/an à partir de 2023).

Le bilan de la surveillance dosimétrique de l'exposition externe des travailleurs en 2016, publié par l'IRSN en juin 2017, montre globalement l'efficacité du système de prévention mis en place dans les établissements où sont utilisées les sources de rayonnements ionisants puisque, pour 96 % des effectifs surveillés, la dose annuelle est restée inférieure à 1 mSv (limite de dose efficace annuelle pour le public du fait des activités nucléaires). Les dépassements des valeurs limites réglementaires restent exceptionnels.

3.1.2 L'exposition des travailleurs aux rayonnements naturels renforcés

L'exposition des travailleurs aux rayonnements naturels renforcés résulte de l'ingestion de poussières de matières riches en

radionucléides (phosphates, minerais métallifères) ou de l'inhalation de radon, formé par la désintégration de l'uranium (entrepôts mal ventilés, thermes) ou, encore, de l'exposition externe due aux dépôts dans des procédés (tartre se formant dans les tuyauteries par exemple).

Le bilan des études réalisées en France depuis 2005, publié par l'ASN en janvier 2010, et les études 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. Les tendances observées et publiées en 2010 demeurent toujours valides au regard des dossiers reçus jusqu'en 2015. Aucune nouvelle étude n'a été transmise en 2016.



À NOTER

Bilan de la surveillance dosimétrique de l'exposition externe des travailleurs aux rayonnements ionisants en 2016

(Source : exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France – bilan IRSN, juin 2017)

- Effectif total surveillé : 372 262 travailleurs.
- Effectif surveillé pour lequel la dose est restée inférieure au seuil d'enregistrement : 283 195 travailleurs, soit près de 76 %.
- Effectif surveillé pour lequel la dose est restée comprise entre le seuil d'enregistrement et 1 mSv : 74 849 travailleurs, soit environ 20 %.
- Effectif surveillé pour lequel la dose est restée comprise entre 1 mSv et 20 mSv : 14 217 travailleurs, soit près de 4 %.
- Effectif surveillé pour lequel la dose efficace annuelle a dépassé 20 mSv : 1 travailleur au-dessus de 50 mSv.
- Dose collective (somme des doses individuelles) : 63,2 homme.Sv.
- Dose individuelle annuelle moyenne sur l'effectif ayant enregistré une dose supérieure au seuil d'enregistrement : 0,71 mSv.

Bilan de la surveillance de l'exposition interne en 2016

- Nombre d'exams de routine réalisés : 275 659 (dont moins de 0,5 % considérés positifs).
- Effectif ayant fait l'objet d'une estimation dosimétrique : 497 travailleurs.
- Nombre d'exams de surveillance spéciale ou de contrôle réalisés : 10 660 (dont 15 % 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 2015 (aviation civile)

- Dose collective pour 19 875 personnels navigants : 40,7 homme.Sv.
- Dose individuelle annuelle moyenne : 2 mSv.

3.1.3 L'exposition des personnels navigants aux rayonnements cosmiques

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

Depuis le 1^{er} juillet 2014, date d'entrée en vigueur de l'arrêté du 17 juillet 2013 relatif à la carte de suivi médical et de suivi dosimétrique des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants, le dispositif Sievert (système 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), a évolué. C'est l'IRSN qui réalise le calcul des doses individuelles via 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.

L'année 2016, première année de plein fonctionnement de SievertPN, constitue une période de consolidation de ce dispositif. Au 31 décembre 2016, SievertPN avait transmis la totalité des doses des personnels navigants à Siseri pour dix compagnies aériennes ayant adhéré au dispositif, conduisant à un total de 19 875 personnels navigants suivis par ce nouveau dispositif.

En 2016, 18 % des doses individuelles sont inférieures à 1 mSv et 82 % des doses individuelles sont comprises entre 1 mSv et 5 mSv par an.

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).

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

Ces estimations ne sont pas connues pour les activités nucléaires autres que les INB, du fait des difficultés méthodologiques pour mieux connaître l'impact de ces installations et, notamment, l'impact des rejets contenant des faibles quantités de radionucléides artificiels provenant de l'utilisation des sources radioactives non scellées dans les laboratoires

de recherche ou de biologie, ou dans les services de médecine nucléaire. À titre d'exemple, l'impact des rejets hospitaliers pourrait conduire à des doses de quelques dizaines de microsieverts par an pour les personnes les plus exposées, notamment pour certains postes de travail dans les réseaux d'assainissement et stations d'épuration (études IRSN 2005 et 2015).

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

3.2.2 L'exposition de la population aux rayonnements naturels

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

L'exposition due au radon. Depuis 1999, du fait du risque de cancer du poumon attribuable aux expositions prolongées au radon, des mesures obligatoires de radon doivent être réalisées périodiquement dans les lieux ouverts au public et notamment dans les établissements d'enseignements et dans les établissements

À NOTER

Le 3^e plan national de gestion des risques liés au radon

L'ASN a publié en janvier 2017 le plan national d'action 2016-2019 pour la gestion du risque lié au radon.

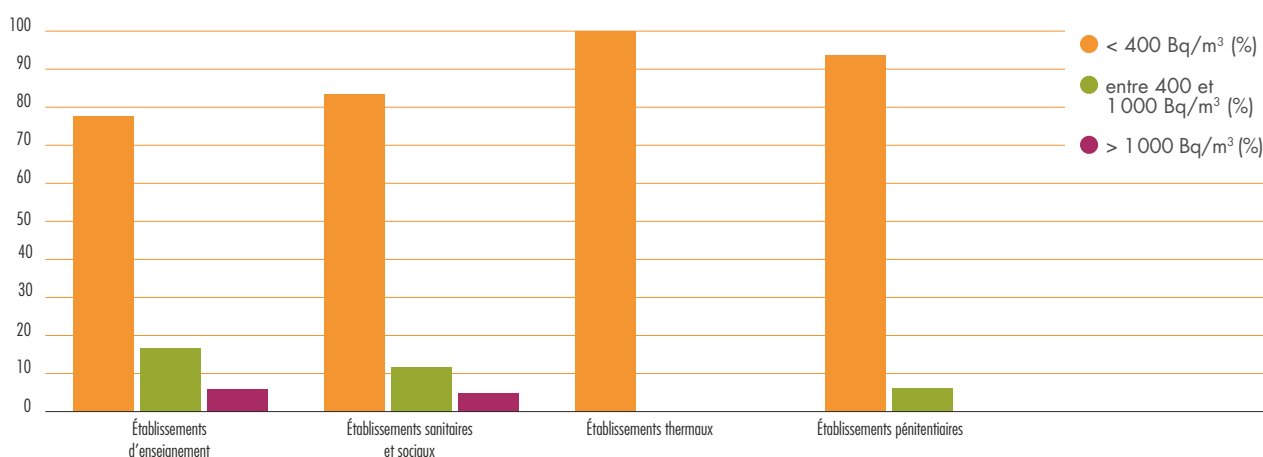
Dans cette nouvelle édition, l'information et la sensibilisation du public et des principaux acteurs concernés par le risque radon (collectivités territoriales, employeurs...) sont désormais inscrites en orientation stratégique de première priorité. Cette stratégie d'information et de sensibilisation s'appuie sur les mesures législatives nouvelles adoptées en 2016. Parmi elles se distinguent deux mesures phares : l'information obligatoire des acquéreurs et des locataires de biens immobiliers sur les risques sanitaires liés au radon dans l'habitat et la prise en compte du radon dans le dispositif de gestion de la qualité de l'air intérieur.

sanitaires et sociaux. Depuis août 2008, cette surveillance obligatoire a été étendue aux lieux de travail situés dans les zones géographiques prioritaires.

Sur la base des résultats transmis par les organismes agréés par l'ASN pour la campagne 2016/2017 plus de 95 % des dépistages ont été réalisés dans des établissements d'enseignement et des établissements sanitaires et médico-sociaux (respectivement 45 % et 51 % des dépistages). La concentration volumique en radon est inférieure au seuil d'action de 400 Bq/m³ pour 78 % des établissements d'enseignement et 84 % des établissements sanitaires et médico-sociaux dépistés.

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

DIAGRAMME 4 : répartition des concentrations volumiques de radon selon les types d'établissements dépistés (en %), campagne 2016/2017



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

L'information et la sensibilisation du public et des principaux acteurs concernés par le risque radon (collectivités territoriales, employeurs...) sont donc essentielles et sont désormais inscrites en orientation stratégique de première priorité au sein du 3^e plan national de gestion des risques liés au radon. Ce plan national, pour la période 2016-2019, est piloté par l'ASN.

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'examen radiologiques notamment d'examen 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 bilan régulier par l'IRSN.

La dose efficace moyenne par habitant du fait des examens radiologiques à visée diagnostique a été évaluée à 1,6 mSv pour l'année 2012 (rapport IRSN 2014) pour un volume d'actes diagnostiques de l'ordre de 81,8 millions (74,6 millions en 2007), soit 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 exposée ou a reçu moins de 1 mSv. La dose efficace individuelle moyenne a augmenté de 23 % entre 2007 et 2012 (elle était de 1,3 mSv en 2007).

La radiologie conventionnelle (54 %), la scanographie (10,5 %) et la radiologie dentaire (34 %) regroupent le plus grand nombre d'actes. 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 %).



Inspection de l'ASN en radiologie interventionnelle à l'IHU de Strasbourg, mai 2017.

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

À noter enfin :

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

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.

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 | 71,2 |
| Radiologie interventionnelle diagnostique | 377 000 | 0,5 | 3 196 400 | 3,1 |
| Médecine nucléaire | 1 103 000 | 1,3 | 7 928 300 | 7,8 |
| TOTAL | 81 755 500 | 100,0 | 102 198 500 | 100,0 |

Source : IRSN 2014



À NOTER

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

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

Un second plan d'action de l'ASN pour la maîtrise des doses de rayonnements ionisants délivrées aux personnes en imagerie médicale sera publié début 2018. Il 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 tenant compte de la transposition de la directive 2013/59/Euratom du 5 décembre 2013 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants [voir chapitre 3].

Ce nouveau plan d'action prolonge le précédent (2011-2017), pour agir dans différents domaines, dont celui des ressources humaines et de la formation, celui de la qualité et de la sécurité des pratiques professionnelles et celui des équipements.

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.

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

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

La protection de l'environnement vis-à-vis du risque radiologique, et notamment la protection des espèces non humaines, doit toutefois pouvoir être garantie indépendamment des effets sur l'homme. Rappelant que cet objectif est déjà intégré dans la législation nationale, l'ASN veillera à ce que l'impact des rayonnements ionisants sur les espèces non humaines soit effectivement pris en compte dans la réglementation et dans les autorisations des activités nucléaires, dès que les méthodes d'évaluation seront disponibles. À partir du rapport d'expertise de l'IRSN, le Groupe permanent d'experts en radioprotection, pour les applications industrielles et de recherche des rayonnements ionisants, et en environnement, a adopté un avis en

septembre 2015. En 2016, l'ASN a débuté les travaux en vue d'une prise de position sur ce thème qui devrait être publiée sous forme d'un avis mi-2017.

4. Perspectives

Comme les années précédentes, le bilan des doses reçues par les travailleurs en 2016 est resté stable, la dose annuelle reçue étant restée inférieure à 1 mSv pour environ 96 % des travailleurs susceptibles d'être exposés, et un seul dépassement de la limite annuelle de 20 mSv est à noter. La surveillance de l'exposition du cristallin avec, pour ce tissu, le respect de la nouvelle limite, constitue les principaux objectifs de la radioprotection dans les toutes prochaines années et notamment dans le domaine des pratiques médicales interventionnelles radioguidées.

La maîtrise des doses de rayonnements ionisants délivrées aux personnes lors d'un examen médical reste une priorité pour l'ASN. Un second plan d'action, qui prolonge le précédent (2011-2017), établi en liaison avec les parties prenantes (institutionnelles et professionnelles), sera publié au premier trimestre 2018.

Le déploiement du troisième plan national de gestion du risque lié au radon, qui accompagne la mise à jour de la réglementation dans ce domaine et la publication de la nouvelle cartographie des communes considérées comme prioritaires vis-à-vis de ce risque, doit permettre d'intensifier la communication en direction du public. Dans l'habitat existant, en particulier dans le cadre de la mise en œuvre des nouvelles dispositions concernant l'information obligatoire des acquéreurs et locataires, la mise en place de dispositifs de mesure sera encouragée. Une organisation progressive de la collecte et de l'analyse des résultats pourra ensuite être déployée.