



**RADIOACTIVE II**

CONTENTS : *60Co Type A*

ACTIVITY : *1 MBq*

*0,1*  
TRANSPORT INDEX

**7**

FORM 1234 2015



# 01

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

**État des connaissances  
sur les dangers et les risques  
liés aux rayonnements  
ionisants**

■ **Les différentes sources de  
rayonnements ionisants**

■ **La surveillance  
des expositions aux  
rayonnements ionisants**

■ **Perspectives**

<b>1</b>	<b>État des connaissances sur les dangers et les risques liés aux rayonnements ionisants</b>	<b>51</b>
1-1	Les effets biologiques et les effets sanitaires	
1-2	L'évaluation des risques liés aux rayonnements ionisants	
1-3	Incertitudes scientifiques et vigilance	
1-3-1	Radiosensibilité	
1-3-2	Effets des faibles doses	
1-3-3	Signature radiologique des cancers	
<b>2</b>	<b>Les différentes sources de rayonnements ionisants</b>	<b>56</b>
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 générant un renforcement des rayonnements ionisants d'origine naturelle	
<b>3</b>	<b>La surveillance des expositions aux rayonnements ionisants</b>	<b>59</b>
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)	
<b>4</b>	<b>Perspectives</b>	<b>67</b>

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, émanant soit d'une source artificielle, qu'il s'agisse de substances ou de dispositifs, soit d'une source naturelle lorsque des radionucléides naturels sont traités ou l'ont été en raison de leurs propriétés radioactives, fissiles ou fertiles, ainsi que les interventions destinées à prévenir ou réduire un risque radiologique consécutif à un accident ou à une contamination de l'environnement ». 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. Les dispositions relatives à la protection de l'environnement sont présentées au chapitre 3.

## 1 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, tous caractérisés par des énergies et des pouvoirs de pénétration différents.

### 1-1 Les effets biologiques et les effets sanitaires

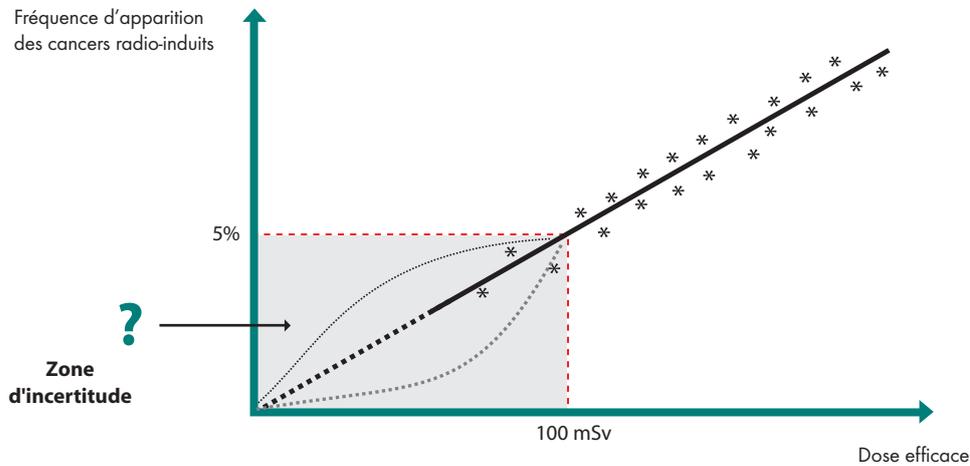
Qu'ils soient le fait de particules chargées, par exemple un électron (rayonnement bêta) ou un noyau d'hélium (rayonnement alpha), ou de photons du rayonnement électromagnétique (rayons X ou rayons gamma), les rayonnements ionisants interagissent avec les atomes et les molécules constitutifs des cellules 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 sanitaires 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 dès la découverte des rayons X par W. Röntgen (1895). Ils dépendent du type de tissus exposés 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 importants 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 les anomalies résiduelles d'ordre génétique peuvent être transmises par divisions cellulaires successives à de nouvelles cellules. Une mutation génétique est encore loin d'une transformation en cellule cancéreuse mais la lésion due aux rayonnements ionisants peut constituer une première étape vers la cancérisation.

Diagramme 1 : relation linéaire « dose-effets » (sans seuil)



La suspicion d'un lien de causalité entre une exposition aux rayonnements ionisants et la survenue d'un cancer remonte au début du XX<sup>e</sup> siècle (observation d'un cancer de la peau sur une radiodermite).

Depuis, 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 sarcomes osseux. Hors du domaine professionnel, le suivi d'une cohorte d'environ 85 000 personnes irradiées à Hiroshima et Nagasaki a permis de faire le point sur la morbidité<sup>1</sup> et la mortalité par cancer après exposition aux rayonnements ionisants. D'autres travaux épidémiologiques, par exemple, 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 des iodures radioactifs rejetés, a provoqué dans les régions proches du lieu de l'accident un excès de cancers de la thyroïde de l'enfant.

L'apparition des effets cancérogènes n'est pas conditionnée au dépassement d'un seuil de dose, seule une probabilité d'apparition peut être énoncée pour un individu donné. On parle alors d'effets probabilistes, stochastiques ou aléatoires.

Établis au plan international, les objectifs sanitaires de la radioprotection visent à éviter l'apparition des effets déterministes et à réduire les probabilités d'apparition de cancers liés à une exposition aux rayonnements ionisants, aussi appelés cancers radio-induits, la survenue des cancers radio-induits constituant 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 3 dans les DOM, auxquels s'ajoutent 12 registres spécialisés : 9 registres départementaux couvrant 16 départements métropolitains, 2 registres nationaux des cancers de l'enfant de moins de 15 ans qui concernent les hémopathies malignes et les tumeurs solides, et un registre multicentrique du mésothéliome France entière.

Dans une zone couverte par un registre, l'objectif est de mettre en évidence des différences spatiales d'incidence et de dégager les tendances en termes d'augmentation ou de diminution d'incidence des différentes localisations cancéreuses au cours du temps, 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 ces cancers, étant entendu que d'autres facteurs environnementaux peuvent être suspectés.

L'investigation épidémiologique est une tâche complémentaire de la surveillance. Les enquêtes 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. On retiendra cependant la difficulté de mener ces enquêtes ou de 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 caractérise les expositions aux rayonnements ionisants inférieures à 100 millisievert (mSv). Ainsi,

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

## UNSCEAR

Le Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) a été créé en 1955 lors de la 10<sup>e</sup> 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 :

- Mécanismes biologiques de l'action des radiations aux faibles doses (2012).
- Sources, effets et risques des rayonnements ionisants :
  - Vol. 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 (à paraître).
  - Vol. II - Annexe B – Effets des expositions aux radiations chez les enfants (2013).

des 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.

Dans une optique de gestion du risque aux faibles doses, il est fait appel à la technique de l'évaluation des risques qui, au moyen de calculs, permet, en extrapolant les risques observés aux plus fortes doses, d'estimer les 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 (voir diagramme 1) a été adoptée à l'échelle internationale. Avec cette hypothèse, il est considéré 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.

Sur la base des travaux scientifiques de l'UNSCEAR (voir encadré), 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'utilisation de ce modèle conduirait à estimer à environ 7 000 le nombre de décès annuels par cancer en France attribuables aux rayonnements naturels.

L'évaluation du risque de cancer du poumon dû au radon, gaz radioactif d'origine naturelle (descendant de l'uranium et du thorium) susceptible de s'accumuler dans les bâtiments, repose sur des études épidémiologiques, réalisées directement dans l'habitat, en France et à l'échelle internationale. L'OMS en a fait une synthèse et recommande, pour le public, des niveaux d'exposition annuelle maximale situés entre 100 et 300 becquerel (Bq) par m<sup>3</sup>. 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 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.

## 1-3 Incertitudes scientifiques et 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'incertitude concernant la radiosensibilité, les radiopathologies à forte dose, les effets des faibles doses et la signature radiologique des cancers.

### 1-3-1 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.

Une hypersensibilité individuelle aux fortes doses de rayonnements ionisants a été bien documentée par les radiothérapeutes et les radiobiologistes. C'est le cas pour des anomalies génétiques de la réparation de l'ADN et de la signalisation cellulaire qui font que certains patients pourront présenter une hypersensibilité extrême pouvant conduire à des « brûlures radiologiques ».

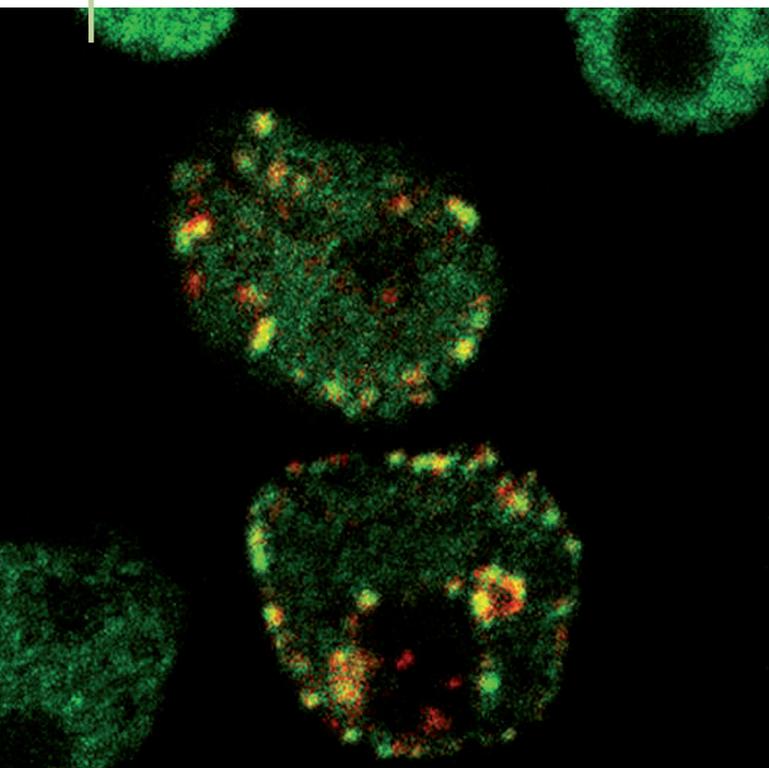
Aux faibles doses, il existe une radiosensibilité cellulaire et une radiosensibilité individuelle qui pourrait concerner environ 5 à 10 % de la population. Les méthodes récentes d'immunofluorescence de cibles moléculaires de la signalisation et de la réparation des lésions de l'ADN permettent de documenter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

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

- si des tests de mise en évidence de l'hyper-radiosensibilité individuelle sont rendus disponibles, le dépistage avant toute radiothérapie ou des examens répétés de scanographie doit-il être recommandé ?
- doit-on rechercher l'hypersensibilité éventuelle 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 hypersensibilité 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).

**Cassures double brin (en orange) par irradiation alpha de l'ADN (en vert) de kératinocytes**



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 devant faire l'objet d'une attention particulière lors d'expositions aux rayonnements ionisants à des fins médicales.

### 1-3-2 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 permet de progresser, 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 des méthodes utilisées par l'épidémiologie, des incertitudes demeurent et la précaution s'impose pour les pouvoirs 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 l'irradiation externe (exposition externe) 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 pu, elles aussi, faire avancer la connaissance 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, actuellement en cours, permettront de mieux préciser le risque aux faibles doses chroniques.

**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 d'un chromosome restera invisible 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 question de la manière pratique de traiter la protection de la nature au nom de l'intérêt propre des espèces animales et

### Radiosensibilité individuelle : une notion ancienne et son avenir

Un séminaire intitulé « Radiosensibilité individuelle : une notion ancienne et son avenir » a été organisé par l'ASN le 16 décembre 2013. Il a réuni environ 60 personnes, chercheurs, médecins concernés par l'utilisation des radiations ionisantes à faible dose ou à fortes doses (radiologues, médecins nucléaires, radiothérapeutes) et représentants des institutions concernées et des associations de patients.

L'objectif était de faire le point sur la variabilité de la réponse individuelle aux rayonnements ionisants autant aux fortes doses, avec les effets secondaires et les complications de la radiothérapie, qu'aux faibles doses avec les risques potentiels notamment de cancer des expositions aux rayonnements ionisants dans le domaine médical.

Les exposés ont porté successivement sur les avancées fondamentales récentes (en radiobiologie notamment) sur les mécanismes de l'action des radiations ionisantes, sur la notion de sous-populations hypersensibles (marqueurs génétiques) et sur la possibilité de détection prédictive des réactivités anormales à la radiothérapie.

Le débat de la table ronde, avec la présence d'épidémiologistes, de philosophes et de juristes, a été riche, justifiant les interrogations de l'ASN devant l'émergence de ces groupes de populations à risques devant les faibles doses et les fortes doses, et les difficultés de leur identification et de leur protection.

Les conclusions de ce séminaire et les diapositives des présentations seront disponibles début 2014 sur le site [www.asn.fr](http://www.asn.fr).

végétales reste posée (voir point 3-4), la protection des espèces non humaines faisant désormais partie des recommandations de la CIPR (CIPR 103).

### 1-3-3 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 anatomopathologique ni la recherche de mutations spécifiques n'ont permis de différencier jusqu'à présent une tumeur radio-induite d'une tumeur sporadique.

On sait qu'aux premières étapes de la carcinogenèse, il y a la création d'une cellule 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 mais l'approche est toutefois certainement plus complexe, un cancer résultant certainement, dans certains cas, d'une accumulation de lésions provenant de facteurs de risques différents. 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 multirisque 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 hyper-radiosensibilité individuelle et pour les organes les plus sensibles comme le sein 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).

### 2-1 Les rayonnements d'origine naturelle

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 émissions de rayonnement gamma produites par les chaînes 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 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 Bq par kg; 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 (2 litres par habitant et par jour) peut atteindre quelques dizaines ou centaines de microsieverts ( $\mu\text{Sv}$ ).

#### 2-1-2 Le radon

Certaines zones géographiques présentent un potentiel élevé d'exhalation de radon du fait des caractéristiques géologiques des terrains en place (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 par des campagnes de mesures qui ont donné lieu ensuite à des interprétations statistiques (voir [www.irsn.fr](http://www.irsn.fr)). La valeur moyenne des activités mesurées en radon a ainsi été estimée en France à 63 Bq/m<sup>3</sup>, avec environ la moitié des résultats inférieurs à 50 Bq/m<sup>3</sup>, 9 % supérieurs à 200 Bq/m<sup>3</sup> et 2,3 % au-dessus de 400 Bq/m<sup>3</sup>.

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

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

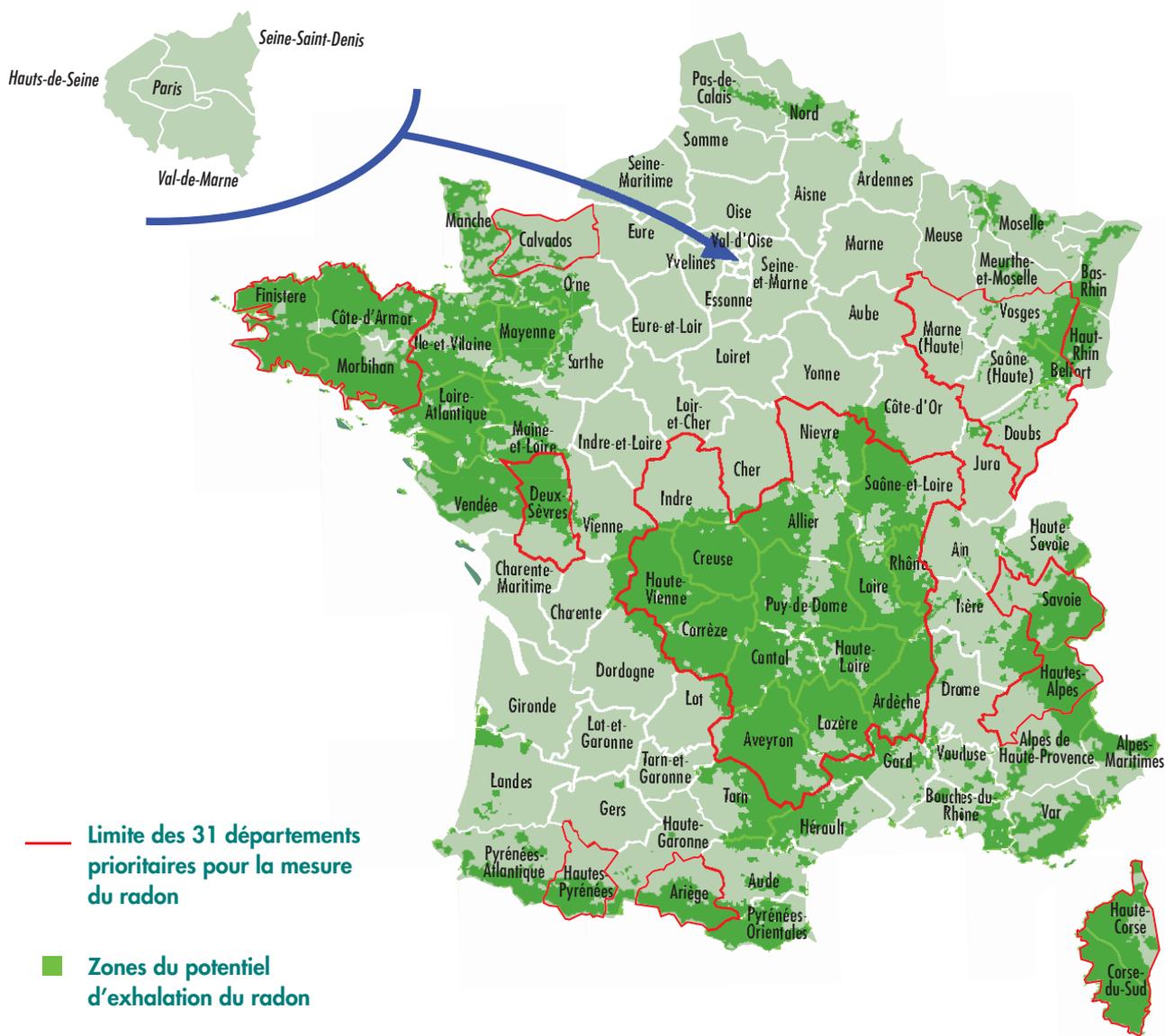
#### 2-1-3 Les rayonnements cosmiques

Les rayonnements cosmiques sont de deux natures, une composante ionique et une composante neutronique. Au niveau de la mer, le débit de dose résultant de la composante ionique est estimé à 32 nSv par heure et celui résultant de la composante neutronique à 3,6 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 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.

Enfin, l'exposition des personnels navigants aux rayonnements cosmiques, renforcée du fait de séjours prolongés en altitude, mérite également une surveillance dosimétrique (voir point 3-2-2).

Carte du potentiel d'exhalation du radon (source IRSN)



## 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 2013 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 première 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 face à 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), la biologie humaine, 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 générer des déchets. 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 appréhendé 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 :

- d'optimiser les filières de gestion de déchets ;
- 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).

### 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 généré des dépôts de radionucléides naturels justifie des actions spécifiques de radioprotection, notamment dans le cas où une réhabilitation est envisagée.

Compte tenu des usages du site, actuels ou futurs, des objectifs de décontamination doivent être établis, et 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 générant 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

généraliser un risque pour les travailleurs exposés et, le cas échéant, la population.

Ainsi, certaines activités professionnelles qui n'entrent pas dans la définition des « activités nucléaires », 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 dans le cas de rejets d'effluents ou d'élimination de déchets faiblement radioactifs. 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.

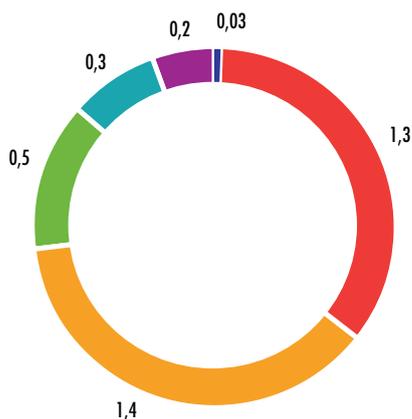
Les actions de radioprotection à mener dans ce domaine reposent sur l'identification précise des activités, l'estimation de l'impact des expositions pour les personnes concernées, la mise en place d'actions correctives pour réduire, si nécessaire, ces expositions, et leur contrôle.

### 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 (concentration

de radionucléides 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.

Diagramme 2: exposition aux rayonnements ionisants de la population en France



Total = 3,7 mSv/an

- Médical
- Radon
- Rayonnements telluriques
- Rayonnements cosmiques
- Eaux et aliments
- Autres (Rejets des installations, retombées des essais atmosphériques)

Source : IRSN 2010

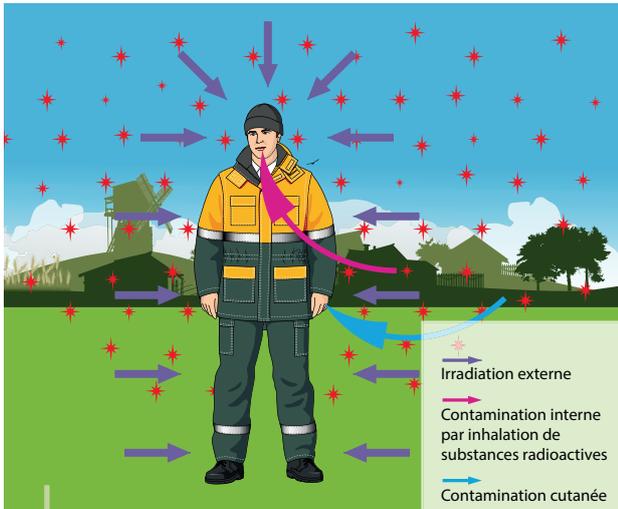
La totalité de la population française est exposée à des rayonnements ionisants d'origine naturelle ou ayant pour origine des activités humaines, mais de façon inégale sur le territoire. L'exposition de la population française est estimée à 3,7 mSv par personne et par an, mais cette exposition présente une grande variabilité individuelle, notamment selon la localisation du lieu d'habitation et le nombre d'examen radiologiques reçus (source : IRSN 2010) ; la dose efficace individuelle annuelle moyenne peut ainsi varier selon les départements d'un facteur 2 à 5. Le diagramme 2 représente une estimation des contributions respectives des différentes sources d'exposition de la population française aux rayonnements ionisants.

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

#### 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 relevant



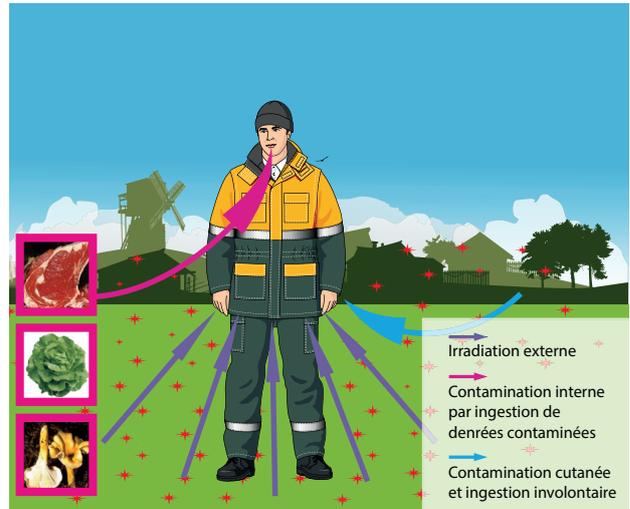
### Les voies d'exposition aux rayonnements ionisants

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, d'une part, 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, et, d'autre part, l'exposition externe de certaines parties du corps telles que les mains et le cristallin (voir chapitre 3).

Les données enregistrées permettent de connaître la dose d'exposition cumulée sur une période déterminée (mensuelle ou trimestrielle) ; elles sont rassemblées dans le système SISERI géré par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) et font l'objet d'une publication annuelle.

Le bilan de la surveillance dosimétrique de l'exposition externe des travailleurs en 2012, publié par l'IRSN en juillet 2013, 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 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 (plus de 62 %), ne représente qu'environ 29 % de la dose collective ; en revanche, le secteur des activités médicales comptabilise 12 dépassements de la limite annuelle de 20 mSv (sur 14), dont 3 au-dessus de 50 mSv (sur 4).



Les dernières statistiques montrent une progression légère mais régulière des effectifs faisant l'objet d'une surveillance dosimétrique depuis 2005 (voir diagramme 3), le cap des 350 000 personnes est dépassé en 2012, cette évolution étant due pour une part importante à l'augmentation des effectifs surveillés dans le domaine des activités médicales et vétérinaires. La dose collective, somme des doses individuelles, est en régression (de 46 %) depuis 1996 alors que les effectifs surveillés ont progressé d'environ 50 %.

Le nombre de travailleurs surveillés dont la dose annuelle a dépassé 20 mSv est également en nette diminution (voir diagramme 4).

Concernant la dosimétrie des extrémités (doigts et poignet), le nombre de travailleurs suivis est de 25 532 et la dose totale est de 123,4 homme.Sv. Une dose annuelle aux extrémités supérieure à la limite réglementaire de 500 mSv a été enregistrée pour un travailleur dans le secteur de la radiologie interventionnelle.

### 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.

Tableau 1 : dosimétrie des travailleurs dans le domaine nucléaire (année 2012 – source IRSN)

	Nombre de personnes surveillées	Dose collective (homme.Sv)	Dose > 20 mSv
Réacteurs et production d'énergie (EDF)	23 673	6,78	0
Cycle du combustible ; démantèlement	9 159	2,48	0
Transport	903	0,07	0
Logistique et maintenance (prestataires)	9 736	6,85	1
Autres	21 838	8,4	0

Tableau 2 : dosimétrie des travailleurs dans les activités nucléaires de proximité (année 2012 – source IRSN)

	Nombre de personnes surveillées	Dose collective (homme.Sv)	Dose > 20 mSv
Médecine	134 685	14,49	10
Dentaire	46 239	1,95	1
Vétérinaire	19 236	0,56	1
Industrie	34 597	14,44	1
Recherche	14 620	0,46	0
Divers	20 478	1,30	0

### Bilan de la surveillance dosimétrique de l'exposition externe des travailleurs aux rayonnements ionisants en 2012

(source : Exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France – bilan 2012, IRSN, juillet 2013)

Effectif total surveillé : 354 665 travailleurs

Effectif surveillé pour lequel la dose est restée inférieure au seuil d'enregistrement : 281 621 travailleurs, soit environ 79 %

Effectif surveillé pour lequel la dose est restée comprise entre le seuil d'enregistrement et 1 mSv : 59 049 travailleurs, soit environ 17 %

Effectif surveillé pour lequel la dose est restée comprise entre 1 mSv et 20 mSv : 13 981 travailleurs, soit environ 3,9 %

Effectif surveillé pour lequel la dose efficace annuelle a dépassé 20 mSv : 14 travailleurs dont 4 au-dessus de 50 mSv

Dose collective (somme des doses individuelles) : 62 homme.Sv

Dose individuelle annuelle moyenne sur l'effectif ayant enregistré une dose supérieure au seuil d'enregistrement : 0,85 mSv

### Bilan de la surveillance de l'exposition interne en 2012

Nombre d'examens de routine réalisés : 349 995 (dont moins de 1% considérés positifs)

Effectif ayant fait l'objet d'une estimation dosimétrique : 358 travailleurs

Nombre d'examens de surveillance spéciale ou de contrôle réalisés : 11 383 (dont 9 % sont supérieurs au seuil d'enregistrement)

Effectif ayant enregistré une dose efficace engagée supérieure à 1 mSv : 11 travailleurs

### Bilan de la surveillance de l'exposition aux rayonnements cosmiques en 2012 (aviation civile)

Dose collective pour 20 823 personnels navigants : 39 homme.Sv

Dose individuelle annuelle moyenne : 1,9 mSv

Diagramme 3 : évolution de l'effectif surveillé et de la dose collective de 1996 à 2012 (source IRSN)

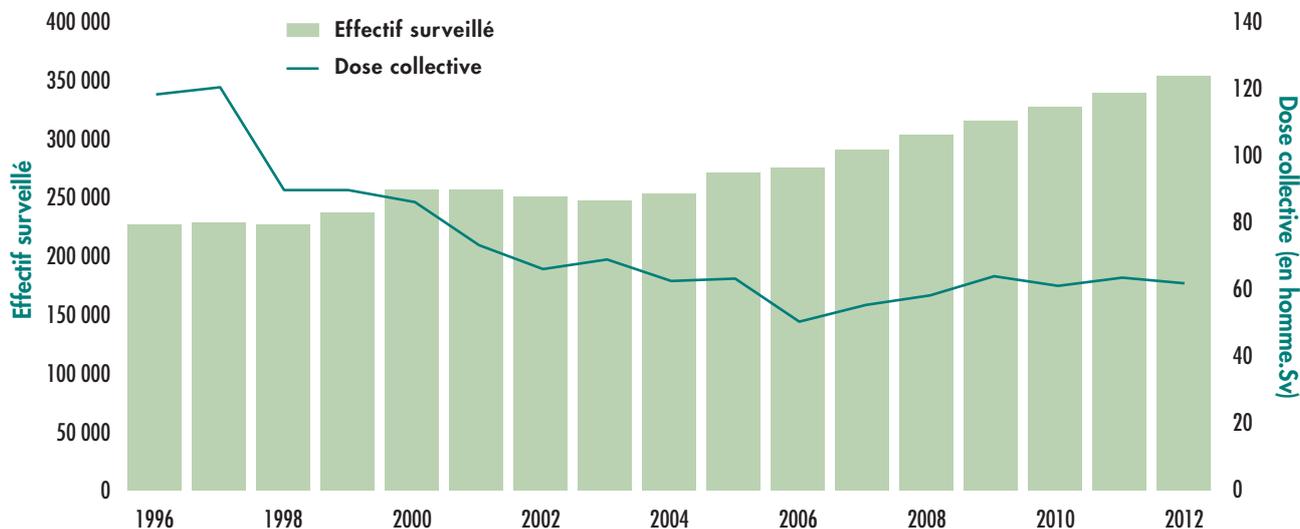
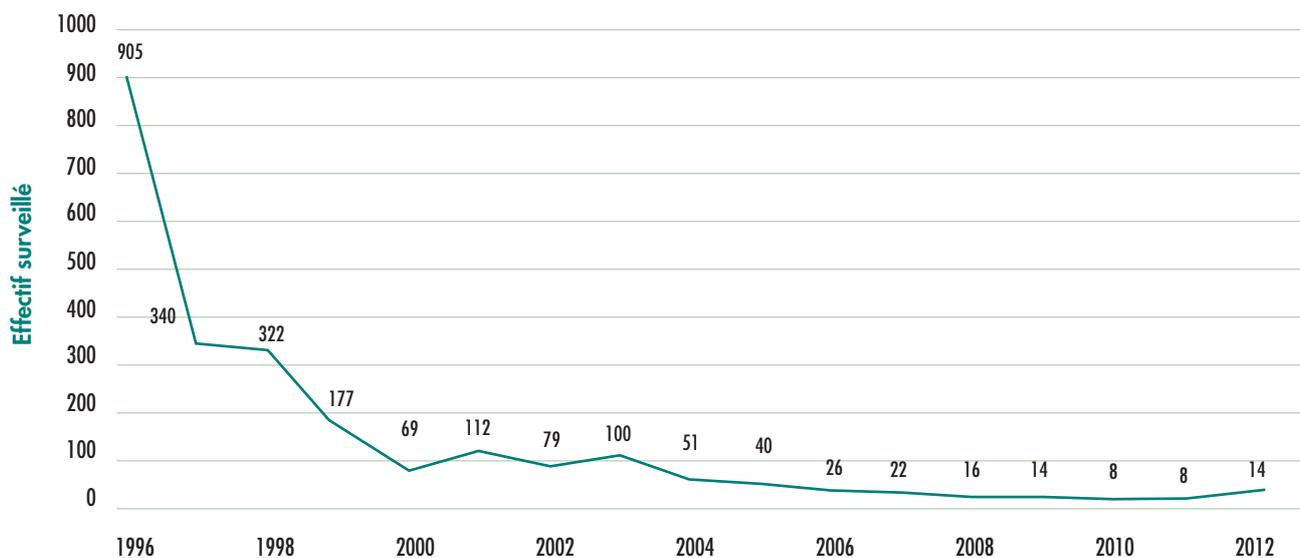


Diagramme 4 : évolution du nombre de travailleurs surveillés dont la dose annuelle est supérieure à 20 mSv, de 1996 à 2012 (source IRSN)



### 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](http://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 2012, 20 823 personnels navigants avaient leurs doses enregistrées dans SISERI. 19 % des doses individuelles annuelles sont inférieures à 1 mSv, et 81 % des doses sont comprises entre 1 mSv et 5 mSv.

## 3-2 Les doses reçues par la population

### 3-2-1 Les doses reçues par la population du fait des activités nucléaires

Les réseaux de surveillance automatisés gérés par l'IRSN sur l'ensemble du territoire (réseaux Téléray, Hydrotéléray et Télhydro) 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 conduit à des doses de quelques microsieverts par an pour les personnes les plus exposées, notamment les égoutiers travaillant dans les réseaux d'assainissement (étude IRSN 2005).

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 10 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'iodes

radioactifs à des niveaux très faibles, sans impact sanitaire pour les populations ou l'environnement.

### 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 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 5. Les pourcentages de résultats de mesures supérieurs aux niveaux d'action (400 et 1000 Bq/m<sup>3</sup>) restent comparables d'une année sur l'autre. Depuis 2009, un nouveau cycle décennal de dépistage a été entamé.

Pour des raisons d'ordre méthodologique mais aussi du fait de l'absence de données représentant l'exposition au radon dans l'habitat, les résultats des contrôles ne peuvent être exploités pour évaluer précisément les doses liées à l'exposition à laquelle la population est réellement soumise.

## 3-3 Les doses reçues par les patients

Les expositions médicales aux rayonnements ionisants (en particulier celles résultant des examens de scanographie, de tomographie par émission de positons (TEP) et de la radiologie interventionnelle) représentent la part la plus importante des expositions artificielles dans les pays développés. Elles sont en constante augmentation dans la plupart des pays.

Ainsi, aux États-Unis, la moyenne de la dose efficace annuelle par personne est passée de 0,53 mSv en 1983 à 3 mSv en 2006. Dans le monde :

- le nombre d'examen radiologiques a progressé de 1,6 à 4 milliards entre 1993 et 2008, soit une augmentation de 150 %. En médecine nucléaire, environ 17 millions d'examen étaient réalisés chaque année dans les années 1970, avec un saut à 35 millions (+100 %) au début des années 2000 ;

## Le plan d'action national 2011-2015 pour la gestion du risque lié au radon

La gestion du risque lié au radon a été inscrite dans de nombreux plans nationaux dont les premier et deuxième plans santé environnement (PNSE 2004-2008 et PNSE 2009-2013), le deuxième plan cancer (2009-2013) et le plan santé-travail (2010-2014).

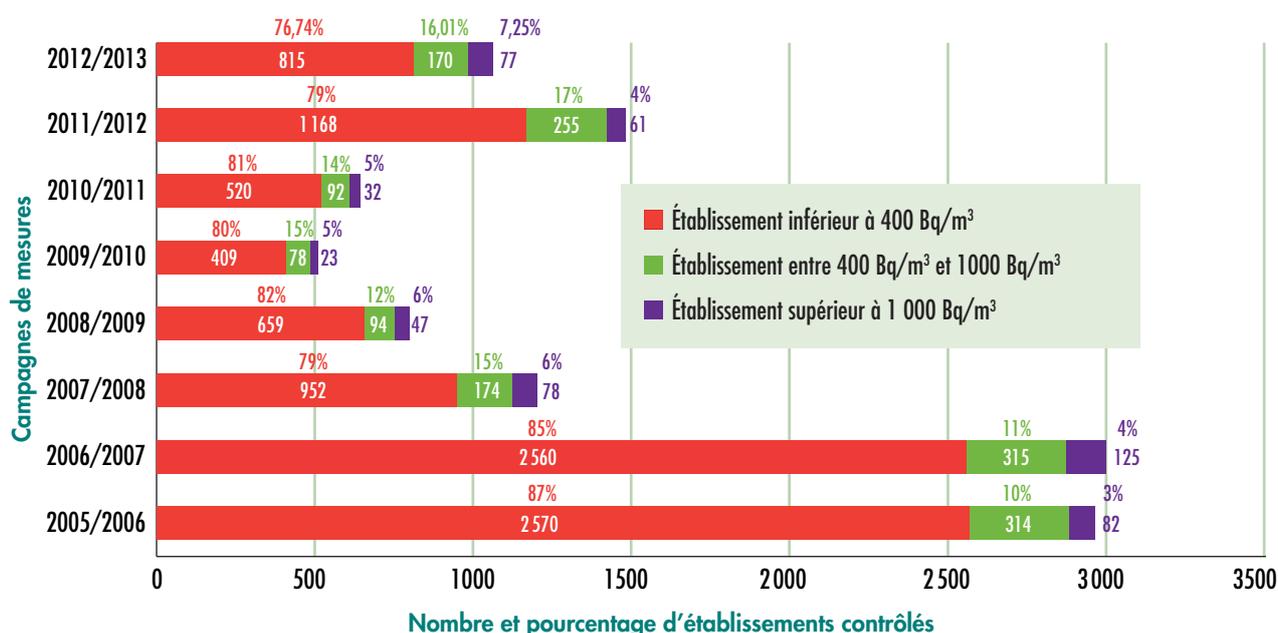
Le 1<sup>er</sup> plan national d'action 2005-2008 relatif à la gestion du risque lié au radon avait été élaboré par l'ASN, en 2005, en collaboration avec la Direction de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages (DHUP), l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), l'Institut de veille sanitaire (InVS) et le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB). Il avait permis, d'une part, la réalisation d'actions en matière de prévention du risque « radon » et, d'autre part, une collaboration étroite entre les différents acteurs impliqués dans la problématique radon. Le bilan de ce premier plan est accessible sur [www.asn.fr](http://www.asn.fr).

Le 2<sup>e</sup> plan national d'action 2011-2015, soutenu par la direction générale de la santé (DGS), la direction générale du travail (DGT) et la DHUP a été mis en place par l'ASN, en collaboration avec les partenaires déjà impliqués, et en associant le milieu associatif et les professionnels de la métrologie du radon. L'ASN est toujours chargée d'animer le comité national de suivi de ce plan accessible sur le site internet de l'ASN. Il est structuré autour de 5 grands axes :

1. mettre en place une politique en matière de gestion du risque lié au radon dans les bâtiments existants à usage d'habitation ;
2. mettre en place une réglementation pour les bâtiments neufs à usage d'habitation ;
3. assurer le suivi de la réglementation pour les lieux ouverts au public et en milieu de travail ;
4. développer de nouveaux outils de gestion et un dispositif opérationnel de réalisation des diagnostics des bâtiments et de réalisation des travaux par les professionnels du bâtiment ;
5. coordonner la politique en matière d'études et de recherche.

Sur les 30 actions prioritaires identifiées, 12 sont achevées, 12 sont en cours de réalisation et 6 n'ont pas encore été engagées. À noter tout particulièrement, la publication attendue de la nouvelle cartographie des zones prioritaires pour la mesure du radon dans les lieux publics et en milieu de travail, établie sur la base des travaux réalisés par l'IRSN ; elle sera établie à l'échelle de la commune et non plus sur la base actuelle des 31 départements prioritaires. (voir carte p. 57)

Diagramme 5 : bilan des campagnes de mesures du radon réalisées depuis 2005



– la part de la dose due à la scanographie représente 42 % des expositions médicales en 2008, contre 34 % en 2000 et, dans les pays développés, la part des examens de scanographie est de 8 % alors que la dose associée représente 47 % des expositions médicales.

En France, la dose efficace moyenne par habitant du fait des examens radiologiques à visée diagnostique a été réévaluée : elle a augmenté entre 2002 et 2007 de 0,83 à 1,3 mSv par an et par habitant (la dernière mise à jour des données d'exposition, publiée en avril 2010 par l'IRSN et l'Institut de veille sanitaire (InVS), est fondée sur des informations portant sur l'année 2007).

La radiologie conventionnelle regroupe le plus grand nombre d'examen (63 %) mais, en termes d'exposition, le scanner regroupe près de 58 % des doses délivrées aux patients (diagramme 8).

Les scanographies contribuent plus à la dose efficace individuelle moyenne que les actes de radiologie conventionnelle. Les actes de scanographie délivrant le plus de dose sont les scanners abdomino-pelviens et thoraciques. À titre d'exemple, à 50 ans, les doses efficaces individuelles attribuables en moyenne aux examens de radiologie conventionnelle et de scanographie sont respectivement égales à 0,5 et 1 mSv par an chez la femme et 0,3 et 1 mSv par an chez l'homme.

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, 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 millisievert ; à ce niveau d'exposition, certaines études épidémiologiques ont pu mettre en évidence la survenue de cancer radio-induits.

A 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).

### 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.

Tableau 3 : nombre moyen d'actes d'imagerie médicale et dose efficace moyenne en France en 2002 et 2007 (source IRSN)

	Nombre moyen d'actes		Dose efficace moyenne par habitant et par an
	Total	Par habitant	
2002 • (61,4 millions d'habitants)	73,3 millions	1,2	0,83 mSv
2007 • (63,7 millions d'habitants)	74,6 millions	1,2	1,3 mSv

Diagramme 6 : répartition des actes et des doses associées par domaine

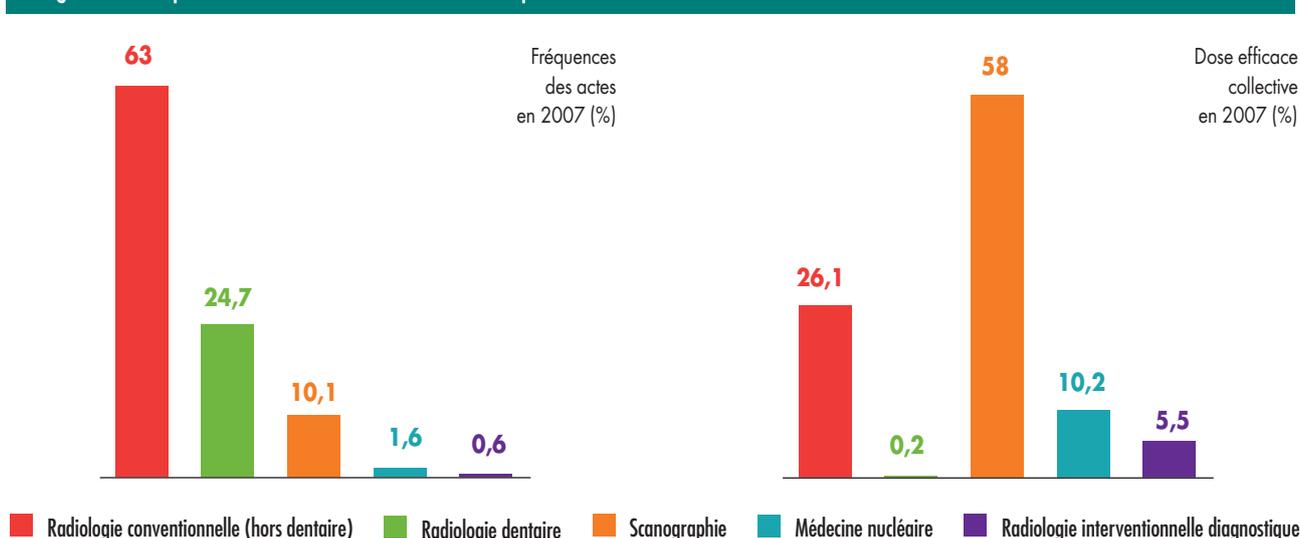


Diagramme 7 : nombre moyen par individu d'actes de radiologie conventionnelle (hors dentaire endo-buccale) et de scanographie, selon le sexe et l'âge en 2007 (source IRSN/InVS)

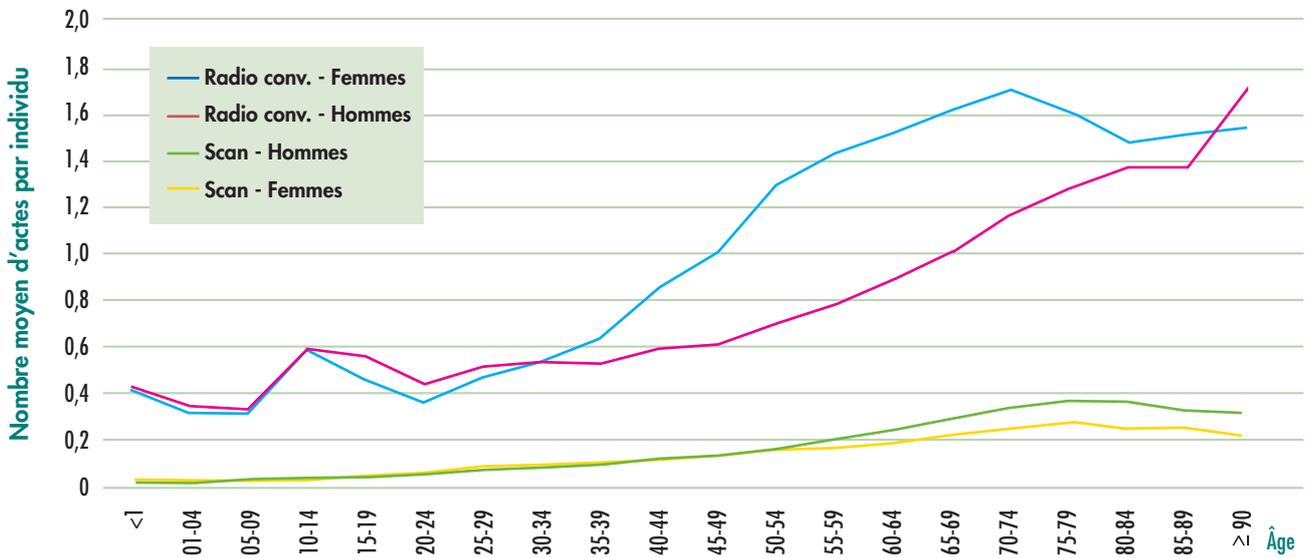
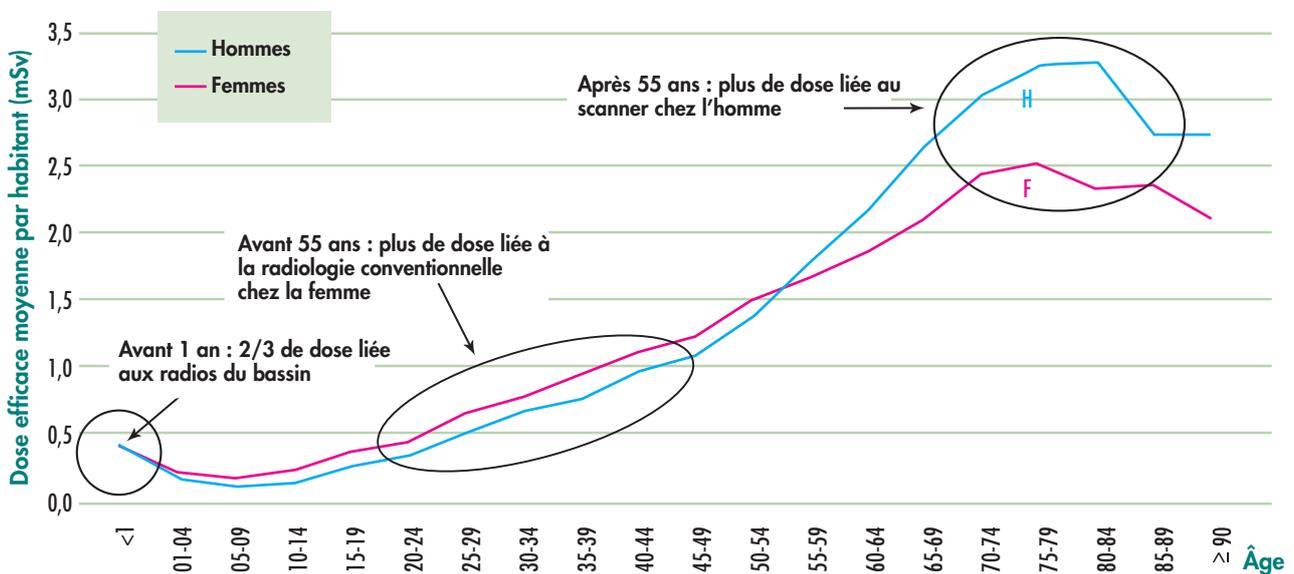


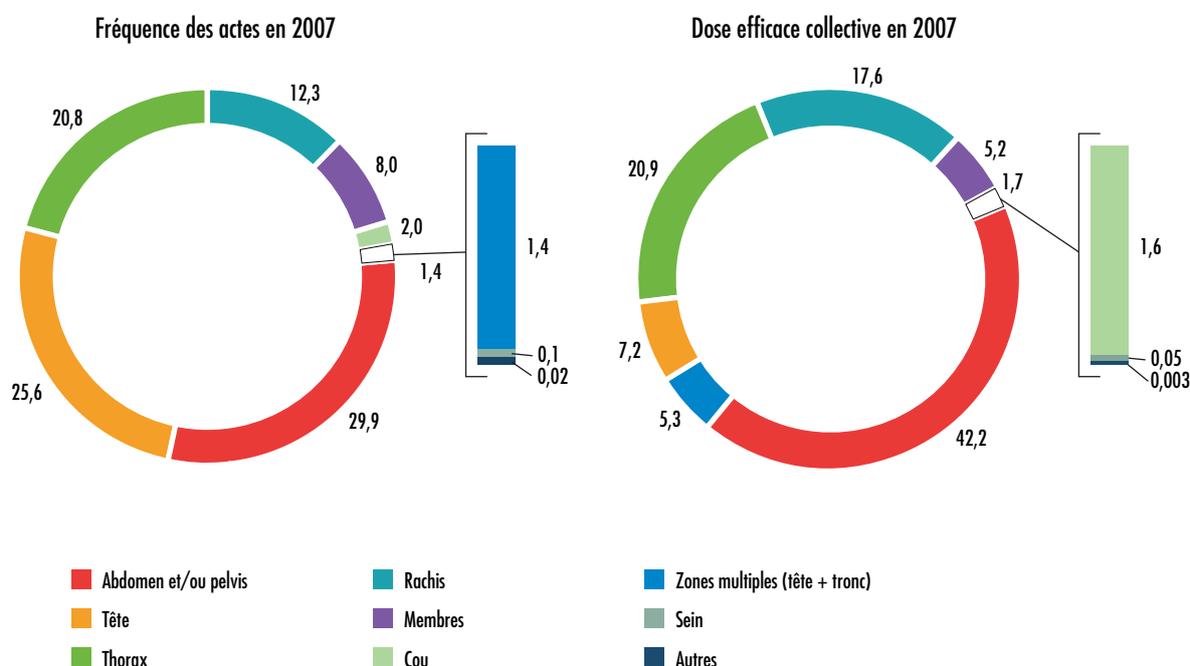
Diagramme 8 : dose efficace moyenne par habitant en 2007 liée aux actes radiologiques (source IRSN/InVS)



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 (voir la publication 103 de la CIPR). Rappelant que cet objectif est déjà pris en compte 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'ASN a saisi l'IRSN de cette question (résultats attendus fin 2014).

Diagramme 9 : répartition de la fréquence des actes et de la dose efficace collective par zone anatomique explorée, en scanographie, France entière – en %



## 4 Perspectives

Comme les années précédentes, le bilan des doses reçues par les travailleurs en 2012, publié par l'IRSN, confirme la stabilisation, autour 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 initiée à partir de 1996.

L'ASN restera particulièrement attentive aux évolutions qui seront apportées à SISERI à la suite des réflexions approfondies, engagées en 2013, sur les dispositions réglementaires encadrant la surveillance individuelle de l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants, dans le cadre d'un groupe de travail pluraliste placé sous l'égide de la Direction générale du travail.

Le second plan national d'action sur les risques liés au radon, publié en novembre 2011, met l'accent sur la nécessité de développer le dépistage des expositions au radon dans l'habitat. L'ASN apportera un appui au Gouvernement pour permettre la mise en place effective d'un cadre réglementaire nouveau concernant le dépistage du radon dans l'habitat.

Sur la question de l'augmentation des doses délivrées aux patients lors des examens d'imagerie médicale, mise en évidence ces dernières années, l'ASN poursuivra les actions qu'elle a engagées depuis 2011 pour maintenir la mobilisation, à tous les niveaux, des autorités sanitaires et des professionnels de santé. Un bilan des actions réalisées ou restant à réaliser sera publié début 2014.

La question de l'hypersensibilité individuelle aux rayonnements ionisants mérite toujours une attention particulière en termes de recherche appliquée, à l'échelle nationale et internationale, afin de pouvoir disposer rapidement d'un test de radiosensibilité pour les patients, en particulier avant une radiothérapie. Dans le domaine des faibles doses, cette question doit également continuer à être explorée du fait notamment de l'utilisation à grande échelle des examens de dépistage du cancer du sein avec la mammographie.