

LES ACTIVITÉS NUCLÉAIRES : RAYONNEMENTS IONISANTS ET RISQUES POUR LA SANTÉ ET L'ENVIRONNEMENT

1	ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR LES DANGERS ET RISQUES LIÉS AUX RAYONNEMENTS IONISANTS	43
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	
2	LES ACTIVITÉS NUCLÉAIRES CONTRÔLÉES PAR L'ASN	48
2 1	Les installations nucléaires de base	
2 1 1	Définition	
2 1 2	La prévention des risques accidentels et la sûreté nucléaire	
2 1 3	La prévention des risques pour les travailleurs	
2 1 4	L'impact des installations nucléaires de base sur l'environnement et la population	
2 2	Le transport des matières radioactives et fissiles à usage civil	
2 3	Les activités nucléaires de proximité	
2 4	L'élimination des déchets radioactifs	
2 5	Les sites contaminés	
2 6	Les activités générant un renforcement des rayonnements ionisants d'origine naturelle	
3	LA SURVEILLANCE DES EXPOSITIONS AUX RAYONNEMENTS IONISANTS	52
3 1	Les expositions de la population aux rayonnements d'origine naturelle	
3 2	Les doses reçues par les travailleurs	
3 2 1	L'exposition des travailleurs des activités nucléaires	
3 2 2	L'exposition des travailleurs aux rayonnements naturels renforcés	
3 2 3	L'exposition des personnels navigants aux rayonnements cosmiques	
3 3	Les doses reçues par la population du fait des activités nucléaires	
3 4	Les doses reçues par les patients	
3 5	La protection des espèces non-humaines	
4	PERSPECTIVES	62

LES ACTIVITÉS NUCLÉAIRES : RAYONNEMENTS IONISANTS ET RISQUES POUR LA SANTÉ ET L'ENVIRONNEMENT

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 matières radioactives, mais aussi dans toutes les installations industrielles et de recherche et les installations hospitalières où sont utilisés les rayonnements ionisants.

La sûreté nucléaire et la radioprotection ont comme objectif commun la protection des personnes et des biens contre les dangers, nuisances ou gênes de toute nature résultant du fonctionnement des installations nucléaires et radiologiques, du transport, de l'utilisation et de la transformation des substances radioactives ou fissiles, ainsi que de l'exposition aux rayonnements naturels.

La sûreté nucléaire est définie comme l'ensemble des dispositions techniques et des mesures d'organisation relatives à la conception, à la construction, au fonctionnement, à l'arrêt et au démantèlement des installations comportant une source de rayonnements ionisants, ainsi qu'au transport des matières radioactives, et destinées à prévenir les accidents et à en limiter les effets.

La radioprotection est définie comme l'ensemble des règles, des procédures et des moyens de prévention et de surveillance visant à empêcher ou à réduire les effets nocifs des rayonnements ionisants produits sur les personnes directement ou indirectement, y compris lors des atteintes portées à l'environnement.

Au-delà des effets des rayonnements ionisants, les installations nucléaires de base sont, comme toute installation industrielle, à l'origine de risques et de nuisances non radiologiques telles que les rejets de substances chimiques dans l'environnement ou l'émission de bruit. Les dispositions relatives à la protection de l'environnement, qui sont contrôlées par l'ASN, sont présentées au chapitre 3.

L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), créée par la loi n° 2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire, assure le contrôle de la sûreté nucléaire et de la radioprotection dans tous les domaines où sont utilisées des sources de rayonnements ionisants ainsi que lors du transport des matières radioactives. Dans le domaine de la radioprotection, d'autres organismes tels que l'inspection du travail, l'inspection des installations classées et l'inspection des dispositifs médicaux disposent également de compétences spécifiques en termes de contrôle.

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

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 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.

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 Röntgen. Ils apparaissent de façon certaine dès que la quantité de rayonnements absorbée dépasse, selon le type de tissu exposé, un certain niveau de dose (exemples : érythème, radiodermite, radionécrose, cataractes, syndrome hématopoïétique, syndrome gastro-intestinal et syndrome nerveux) ; 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.

Leucémies de l'enfant

Après la publication de l'étude allemande sur la survenue de leucémies de l'enfant autour des centrales nucléaires fin 2007 et la synthèse de l'IRSN des études épidémiologiques déjà publiées sur ce sujet, l'ASN a mis en place fin 2008 un groupe de réflexion chargé de porter une appréciation sur les connaissances disponibles sur le risque de leucémies pour les enfants vivant au voisinage des installations nucléaires de base. À partir d'un état des lieux des causes possibles de leucémies chez l'enfant, le groupe est également chargé de proposer les études et recherches nécessaires pour améliorer l'état des connaissances disponibles. Le groupe à caractère pluraliste associe des experts scientifiques notamment dans les domaines de la médecine, de l'épidémiologie et de la radioprotection et des personnalités susceptibles d'enrichir les débats de par leur expérience personnelle. La participation d'experts et de personnalités étrangères est également acquise. Un rapport d'étape est attendu début 2010.

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.

La suspicion d'un lien de causalité entre la survenue d'un cancer et une exposition aux rayonnements ionisants

remonte au début du XX^e siècle (observation d'un cancer de la peau sur radiodermite).

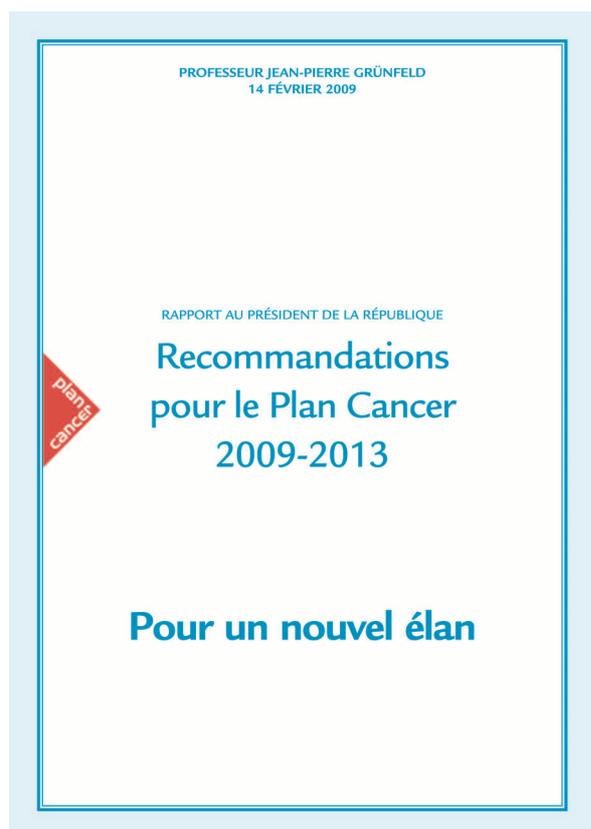
Depuis, plusieurs types de cancers ont été observés en milieu professionnel, dont les leucémies, les cancers broncho-pulmonaires primitifs par inhalation de radon et les sarcomes osseux. Hors du domaine professionnel, le suivi d'une cohorte d'environ 85 000 personnes irradiées à Hiroshima et Nagasaki a permis de faire le point sur l'induction et la mortalité par cancer après exposition aux rayonnements ionisants. D'autres travaux épidémiologiques, en radiothérapie notamment, ont permis de mettre en évidence chez les patients traités par radiothérapie une augmentation statistiquement significative des cancers 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 liée à un seuil de dose, et seule une probabilité d'apparition peut être énoncée pour un individu donné. C'est le cas de la survenue des cancers radio induits. 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, mais aussi à réduire les probabilités d'apparition de cancers radio-induits.

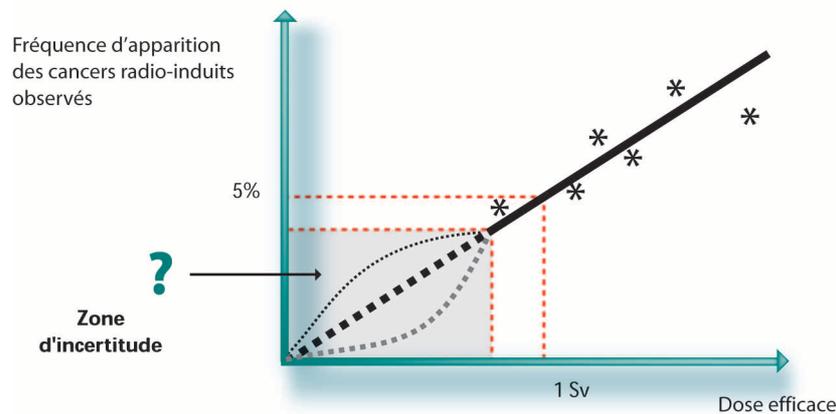
1 | 2 L'évaluation des risques liés aux rayonnements ionisants

La surveillance des cancers est organisée autour de plusieurs registres départementaux (10 registres départementaux qualifiés couvrant 11 départements soit environ 15 %



Plan cancer 2009-2013 établi par le Professeur Jean-Pierre Grünfeld

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



de la population générale) et de registres spécialisés (12 registres spécialisés dont 2 registres nationaux des cancers de l'enfant de moins de 15 ans concernant les hémopathies malignes et les tumeurs solides de l'enfant).

L'objectif est, comme pour tout système de surveillance, de mettre en évidence des différences spatiales d'incidence dans les zones couvertes 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 dans une zone couverte. À vocation descriptive, ce mode de surveillance ne

permet pas d'identifier les cancers radio-induits, leur forme n'étant pas spécifique des rayonnements ionisants.

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 qu'une telle relation causale avec une très forte probabilité existe. On retiendra cependant la difficulté à mener ces enquêtes ou à conclure de façon convaincante lorsque le délai d'apparition de la maladie

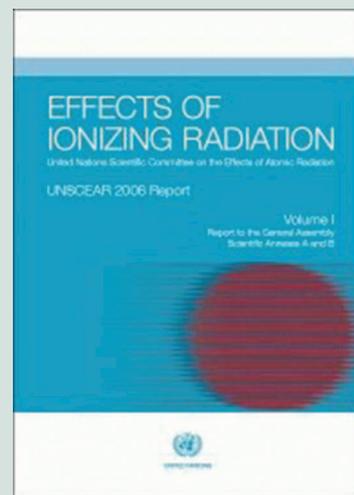
UNSCEAR

Le comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) a été créé en 1955 lors de la 10^e session de l'Assemblée générale des Nations unies. Il rassemble 21 pays et rend compte à l'Assemblée générale des Nations unies. C'est un organisme à caractère scientifique qui valide et cautionne les résultats d'études nationales ou internationales relatives aux effets des rayonnements ionisants sur l'homme.

Dernières publications - Effets des rayonnements ionisants (2006).

Volume 1 – annexe A (Épidémiologie des cancers radio-induits) et annexe B (Épidémiologie des maladies cardiovasculaires et des maladies autres que les cancers causés par les rayonnements).

Volume 2 – annexe C (effets non ciblés et retardés des rayonnements ionisants), annexe D (leurs effets sur le système immunitaire) et annexe E (bilan des relations source-effets pour le radon domestique et professionnel).



Rapport UNSCEAR 2006 « Effects of ionizing radiation »

est long ou encore lorsque le nombre de cas attendus est faible, ce qui caractérise les expositions aux rayonnements ionisants inférieures à 100 mSv. Ainsi, les études épidémiologiques n'ont pu mettre en évidence des pathologies liées aux rayonnements ionisants que pour des doses de rayonnements relativement élevées, avec des débits de dose élevés (exemple : suivi des populations exposées lors des bombardements d'Hiroshima et de Nagasaki).

Dans une optique de gestion du risque, il est alors 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, a été adoptée sur le plan international l'hypothèse prudente d'une relation linéaire sans seuil entre l'exposition et le nombre de décès par cancer. Ainsi, une estimation du nombre de cancers attribuables aux expositions aux rayonnements ionisants peut être calculée, en utilisant une extrapolation linéaire sans seuil de la relation observée à des doses élevées (voir diagramme 1). La légitimité de ces estimations reste cependant controversée au niveau scientifique.

Sur la base des travaux scientifiques de l'UNSCEAR, la Commission internationale de protection radiologique (voir publication CIPR 103) 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, par exemple, conduirait à estimer à environ 7 000 le nombre de décès annuels par cancer en France dus aux rayonnements naturels.

L'évaluation du risque de cancer du poumon dû au radon fait l'objet d'une modélisation spécifique, fondée sur l'observation des données épidémiologiques chez les travailleurs des mines. En retenant l'hypothèse d'une relation linéaire sans seuil pour les expositions à faible dose, le risque relatif lié à l'exposition au radon, pour une concentration de radon égale à 230 Bq/m³, serait du même ordre que celui lié au tabagisme passif (Académie des sciences USA, 1999).

L'objectif sanitaire de réduction du risque de cancer lié aux rayonnements ionisants ne peut être directement observé par l'épidémiologie ; le risque peut être calculé si l'on prend pour hypothèse l'existence d'une relation linéaire sans seuil entre les expositions et les risques de décès par cancer.

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

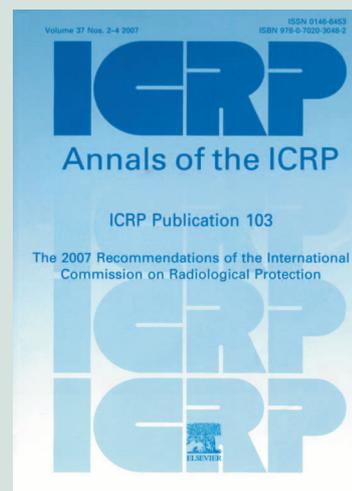
Les recommandations 103 de la CIPR

La Commission internationale de protection radiologique (CIPR) diffuse, depuis de nombreuses décennies, des recommandations pour la radioprotection dont s'inspirent le plus souvent les standards internationaux (en particulier ceux diffusés par l'AIEA) et les directives communautaires.

Le principe d'optimisation apparaît au cœur des nouvelles recommandations publiées fin 2007 (CIPR 103), les principes de justification et de limitation étant cependant conservés. En effet, la CIPR recommande, quel que soit le type de situation d'expositions (expositions planifiées, expositions d'urgence ou expositions existantes), de réduire les doses individuelles à un niveau aussi bas que raisonnablement possible. Pour une bonne application du principe d'optimisation, la CIPR propose d'établir, pour chaque situation d'exposition, des valeurs de référence exprimées en termes de dose. Les valeurs de limites de dose individuelles, applicables à l'exposition résultant de l'ensemble des sources auxquelles un individu peut être exposé, demeurent inchangées. Enfin, les catégories d'exposition (au travail, du public et médicales) sont également conservées.

La CIPR a ainsi mis à jour l'ancien système (CIPR 60) sans le bouleverser afin de tenir compte de la demande de stabilité exprimée par les professionnels et les autorités réglementaires.

Les recommandations de la CIPR 103 – Décembre 2007



risques mais pas d'atteindre le risque zéro ni l'impact zéro, qu'il s'agisse des doses reçues par les travailleurs des domaines médical ou industriel, ou de celles associées aux rejets des INB. De nombreuses incertitudes et inconnues persistent ; 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, en particulier, plusieurs exemples de zones d'incertitudes, concernant les radiopathologies à forte dose, les effets des faibles doses et la protection de l'environnement.

Radiopathologies à forte dose

- *L'hypersensibilité aux rayonnements ionisants* – 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 (par exemple, l'ataxie télangiectasie) : les patients homozygotes de ces mutations présentent une hypersensibilité extrême qui conduit à des « brûlures radiologiques » tandis que les porteurs hétérozygotes ont une hypersensibilité moins importante. Enfin, des patients sont plus sensibles pour développer des cancers. Au total, environ 5 % de la population est concerné par une hypersensibilité aux rayonnements ionisants.

Dès lors se posent des questions délicates dont certaines dépassent le cadre de la radioprotection et ont un caractère éthique :

- les enfants doivent faire l'objet d'une attention particulière en matière de radioprotection lors d'expositions aux rayonnements ionisants d'origine médicale ;
- dès lors que les radiobiologistes ont développé des tests de mise en évidence de l'hyper-radiosensibilité individuelle, le dépistage individuel avant toute radiothérapie doit-il être prôné ?
- 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 ?

Effets des faibles doses

- *La relation linéaire sans seuil* – L'hypothèse de cette relation, retenue pour modéliser l'effet des faibles doses sur la



Conférence internationale sur la radiothérapie organisée par l'ASN à Versailles – Décembre 2009

santé (voir point 1 | 2), aussi pratique 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 imaginent même que des faibles doses pourraient avoir 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, les 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 externes à forte dose et fort débit de dose. Les études entamées dans les pays les plus touchés par l'accident de Tchernobyl, la Biélorussie, l'Ukraine et la Russie, pourraient, elles aussi, faire avancer la connaissance sur l'effet des rayonnements sur la santé pour des expositions internes à plus faible dose et plus faible débit de dose, ainsi que sur les conséquences d'une exposition chronique aux rayonnements ionisants (par exposition externe et par contamination par la voie alimentaire), du fait de l'état de contamination durable de l'environnement.

- *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 allèle restera invisible tant que l'allèle porté par l'autre chromosome ne sera pas atteint ; si elle n'est pas nulle, la probabilité de ce type d'événement reste cependant faible.

Environnement

• *Protection des espèces non humaines* – La radioprotection a pour but d'empêcher ou de réduire les effets nocifs des

rayonnements ionisants sur les personnes, directement ou indirectement, y compris lors des atteintes portées à l'environnement : la protection des personnes passe par la protection de l'environnement, comme l'illustrent les études d'impact déposées dans le cadre des enquêtes publiques pour les autorisations de rejets des INB. Mais, au-delà de cette protection de l'environnement tournée vers la protection de l'homme et des générations présentes ou futures, on peut aussi envisager la protection de la nature, au nom de l'intérêt propre des espèces animales ou des droits de la nature (voir point 3 | 5).

2 LES ACTIVITÉS NUCLÉAIRES CONTRÔLÉES PAR L'ASN

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

- les installations nucléaires de base ;
- le transport des matières radioactives et fissiles à usage civil ;
- les activités nucléaires de proximité ;
- l'élimination des déchets radioactifs ;
- les sites contaminés ;
- les activités générant un renforcement des rayonnements ionisants d'origine naturelle.

2 | 1 Les installations nucléaires de base

2 | 1 | 1 Définition

Les installations nucléaires sont réglementairement classées dans différentes catégories correspondant à des procédures plus ou moins contraignantes selon l'importance des risques potentiels. Les principales installations nucléaires fixes, dénommées « installations nucléaires de base » (INB), sont définies par l'article 28 de la loi n° 2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité nucléaire. Le décret n° 2007-830 du 11 mai 2007 relatif à la nomenclature des installations nucléaires de base définit plus précisément les catégories d'INB :

- les réacteurs nucléaires, à l'exception de ceux qui font partie d'un moyen de transport ;
- les accélérateurs de particules ;
- les usines de séparation, de fabrication ou de transformation de substances radioactives, notamment les

usines de fabrication de combustibles nucléaires, de traitement de combustibles irradiés ou de conditionnement de déchets radioactifs ;

- les installations destinées au stockage, au dépôt ou à l'utilisation de substances radioactives, y compris les déchets.

Les trois derniers types d'installations ne relèvent toutefois de la réglementation des INB que lorsque la quantité ou l'activité totale des substances radioactives est supérieure à un seuil fixé, selon le type d'installation et le radionucléide considéré, par arrêté conjoint des ministres chargés de l'environnement, de l'industrie et de la santé.

Les installations nucléaires qui ne sont pas considérées comme des INB peuvent être soumises aux dispositions du livre V du code de l'environnement (régime des installations classées pour la protection de l'environnement).

L'état des INB au 31 décembre 2009 figure à l'annexe A.

2 | 1 | 2 La prévention des risques accidentels et la sûreté nucléaire

La sûreté nucléaire est l'ensemble des dispositions techniques et des mesures d'organisation relatives à la conception, à la construction, au fonctionnement, à l'arrêt et au démantèlement des installations nucléaires de base, ainsi qu'au transport des substances radioactives, prises en vue de prévenir les accidents ou d'en limiter les effets.



Contrôle radiologique en sortie du bâtiment réacteur pour l'inspectrice de la division de Lyon, lors de la visite décennale de la centrale nucléaire du Tricastin – Mai 2009

L'option fondamentale sur laquelle repose le système d'organisation et de réglementation spécifique de la sûreté nucléaire est celle de la responsabilité première de l'exploitant. Les pouvoirs publics veillent à ce que cette responsabilité soit pleinement assumée dans le respect des prescriptions réglementaires. L'articulation des rôles respectifs des pouvoirs publics et de l'exploitant peut se résumer ainsi :

- les pouvoirs publics définissent des objectifs généraux de sûreté ;
- l'exploitant propose des modalités techniques pour les atteindre, et les justifie ;
- les pouvoirs publics s'assurent de l'adéquation de ces modalités aux objectifs fixés ;
- l'exploitant met en œuvre les dispositions approuvées ;
- les pouvoirs publics vérifient, lors de leurs contrôles, la bonne mise en œuvre de ces dispositions, et en tirent les conséquences.

2 | 1 | 3 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 mêmes règles générales que celles qui sont applicables à l'ensemble des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants (limites annuelles de dose, catégories de travailleurs exposés, définition de zones surveillées et de zones contrôlées...), ainsi que des dispositions propres aux INB, d'ordre technique ou administratif (organisation du travail, prévention des

accidents, tenue de registres, suivi médical des travailleurs des entreprises extérieures...).

2 | 1 | 4 L'impact des installations nucléaires de base sur l'environnement et la population

L'exploitant de l'INB doit également mettre en œuvre les moyens nécessaires pour atteindre et maintenir un niveau optimal de protection de la population.

Plus particulièrement, les installations nucléaires, en fonctionnement normal, sont à l'origine de rejets d'effluents liquides et gazeux, radioactifs ou non radioactifs. L'impact de ces rejets sur l'environnement et la santé des populations vivant au voisinage des installations doit être strictement limité.

À cet effet, les installations doivent être conçues, exploitées et entretenues de façon à limiter la production de tels effluents. Ces effluents doivent être traités afin que les rejets correspondants soient maintenus à un niveau aussi faible que raisonnablement possible. Ces rejets ne peuvent dépasser les valeurs limites fixées au cas par cas par les pouvoirs publics sur la base des meilleures technologies disponibles à un coût économiquement acceptable et des caractéristiques particulières du site. Enfin, ces rejets doivent être mesurés et leur impact effectif régulièrement évalué, en particulier pour les rejets radioactifs qui constituent la véritable spécificité des installations nucléaires.

2 | 2 Le transport des matières radioactives et fissiles à usage civil

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

- le colis, constitué par l'emballage et son contenu, est la première ligne de défense. Il joue un rôle essentiel et doit résister aux conditions de transport envisageables ;
- le moyen de transport et sa fiabilité constituent 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.

La responsabilité première de la mise en œuvre de ces lignes de défense repose sur l'expéditeur.

2 | 3 Les activités nucléaires de proximité

Les rayonnements ionisants, qu'ils soient générés par des radionucléides ou par des appareils électriques (rayons X), sont utilisés dans de très nombreux domaines dont la médecine (radiologie, radiothérapie, médecine nucléaire), la biologie humaine, la recherche, l'industrie, mais aussi pour des applications vétérinaires, médico-légales ou destinées à la conservation des denrées alimentaires.

Ces activités, également considérées comme des activités nucléaires, relèvent pour la plupart, au titre de la radioprotection, des procédures d'autorisation ou de déclaration prévues par le code de la santé publique ou, selon le cas, de régime de procédures particulières (cas des ICPE) où sont examinés, à partir des informations transmises par l'exploitant, les différents aspects relatifs à la radioprotection, tant pour ce qui concerne la protection des travailleurs que celle



Contrôle radiologique d'un camion à l'aide d'un radiomètre dans le bâtiment logistique du centre de stockage pour les déchets de très faible activité (CSTFA) de l'ANDRA dans l'Aube

de la population. La protection est également prise en compte au travers des prescriptions appliquées aux rejets des effluents liquides et gazeux. Dans le cas d'utilisation à des fins médicales, les questions concernant la protection des patients sont également étudiées.

Pour les activités autres que les ICPE, les autorisations sont délivrées aux personnes en charge de l'utilisation des rayonnements ionisants. Cette responsabilité ciblée sur l'utilisateur ne dispense pas le chef d'établissement de mettre à la disposition du détenteur de sources tous les moyens nécessaires à la radioprotection, moyens humains (personne compétente en radioprotection, personne spécialisée en radiophysique médicale) et moyens techniques (locaux et appareils répondant aux normes en vigueur), organisationnels et de mesure (dosimétrie et appareils de mesure). Certaines activités (ex. : installations de radiologie médicale ou dentaire) sont simplement soumises à déclaration.

Dans le cas d'utilisation de sources radioactives non scellées, les activités nucléaires de proximité génèrent également des déchets radioactifs qu'il convient de gérer selon les principes décrits au point 2 | 4.

2 | 4 L'élimination des déchets radioactifs

Comme toutes les activités industrielles, les activités nucléaires génèrent des déchets. Certains de ceux-ci 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. Pour les déchets très faiblement radioactifs, l'application d'une gestion fondée sur ces principes exclut, pour être pleinement efficace, toute fixation d'un seuil universel de libération du contrôle réglementaire.

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 durée de vie définie par 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 maîtrise des 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).



Tri de déchets FMA dans un laboratoire de chimie, EDF, Chinon (Indre-et-Loire)

2 | 5 Les sites contaminés

La gestion des sites contaminés du fait d'une radioactivité résiduelle résultant soit d'une activité nucléaire passée soit 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 et des terres contaminées doit être maîtrisée, depuis le site jusqu'à l'entreposage ou le stockage.

2 | 6 Les activités 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 générer 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

L'impact du tritium : l'approche prospective de l'ASN

Isotope radioactif de l'hydrogène, le tritium est connu sous trois formes dans l'environnement : une forme liquide (eau tritiée ou HTO), une forme gazeuse dite HT et une forme organique dite OBT. Naturellement présent dans l'environnement par l'action des rayonnements cosmiques sur les atomes d'azote, le tritium est également l'un des principaux radionucléides émis par les réacteurs nucléaires, des installations de traitement du combustible nucléaire usé, les industries ou laboratoires utilisant ce radionucléide et les installations de gestion des déchets.

Les autorités médicales, en France et à l'étranger, et les organismes internationaux de santé s'accordent pour considérer que le tritium a une radiotoxicité faible. Il était également admis qu'il ne se concentre pas dans les chaînes alimentaires (absence de bioaccumulation).

Toutefois, des observations récentes pourraient modifier ces appréciations : des mesures réalisées au Royaume-Uni (rapports Rife) ont relevé dans des poissons et crustacés des concentrations en tritium supérieures à celles attendues. Parallèlement, des études sur la biocinétique du tritium (modélisation du comportement du tritium dans les organismes vivants) pourraient conduire à une réévaluation des paramètres de caractérisation de sa radiotoxicité.

À la suite des interrogations soulevées par ces travaux, l'ASN a souhaité disposer d'une analyse précise des études existant sur le sujet. Aussi l'ASN a-t-elle décidé, au début de l'année 2008, la création de deux groupes de réflexion indépendants, rassemblant des scientifiques, des exploitants et des associations :

- un groupe « impact du tritium » chargé d'établir un état des lieux des connaissances scientifiques relatif à l'impact sanitaire du tritium et à la réalité scientifique de la bioaccumulation du tritium ;
- un groupe « défense en profondeur » chargé d'anticiper les évolutions de rejets liées à la mise en place de nouvelles gestions de combustible et à la construction de nouvelles installations (EPR et ITER), d'examiner les possibilités techniques de traitement du tritium et d'établir un état des lieux des connaissances sur son impact environnemental.

Chacun des deux groupes de réflexion se sont réunis cinq fois depuis 2008. Les travaux vont s'achever début 2010. Les conclusions et les recommandations de ces travaux feront l'objet d'une publication de l'ASN en 2010.

d'élimination de déchets faiblement radioactifs. Il s'agit en particulier d'activités qui font appel à des matières premières, à des matériaux de construction 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

Les systèmes de surveillance des pathologies mis en place (registres du cancer par exemple) ne permettent pas de distinguer celles qui pourraient être attribuées aux rayonnements ionisants. Nous ne disposons pas non plus d'indicateurs biologiques, fiables et faciles à mesurer, qui permettraient de reconstituer aisément les doses de rayonnements auxquels ont été soumises les personnes. Dans ce contexte, la « surveillance du risque » est réalisée par la mesure d'indicateurs de la radioactivité ambiante, au mieux par la mesure des débits de dose liés à l'exposition externe des personnes aux rayonnements ionisants ou 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 le calcul, à une estimation des doses reçues par les populations exposées.

La totalité de la population française est potentiellement exposée, mais de façon inégale sur le territoire, à des rayonnements ionisants d'origine naturelle et à des rayonnements ayant pour origine des activités humaines. L'exposition de la population française est estimée, en moyenne et par habitant, à 3,3 mSv par an, mais cette exposition présente une grande variabilité individuelle, notamment selon la localisation du lieu d'habitation et le nombre d'examens radiologiques reçus (source : IRSN 2006). Selon les lieux, la dose efficace individuelle

Ciblée sur le risque pour la population générale mais aussi pour les travailleurs, la surveillance de l'exposition des personnes au radon dans les lieux ouverts au public constitue également une action prioritaire de radioprotection dans les zones géographiques présentant un potentiel élevé d'exhalaison de radon, du fait des caractéristiques géologiques des terrains en place. Une stratégie de réduction de ces expositions est nécessaire dans le cas où les mesures réalisées dépassent les niveaux d'actions réglementaires. Les établissements d'enseignement, les établissements à caractère sanitaire et social, les établissements thermaux et les établissements pénitentiaires sont principalement concernés par les mesures de surveillance du radon.

Depuis août 2008, cette surveillance a été étendue aux lieux de travail situés dans les zones géographiques prioritaires. 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|3).

annuelle moyenne peut varier d'un facteur 2 à 5. Le graphique 1 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, dans chaque catégorie de sources d'expositions, les catégories ou groupes de personnes les plus exposés.

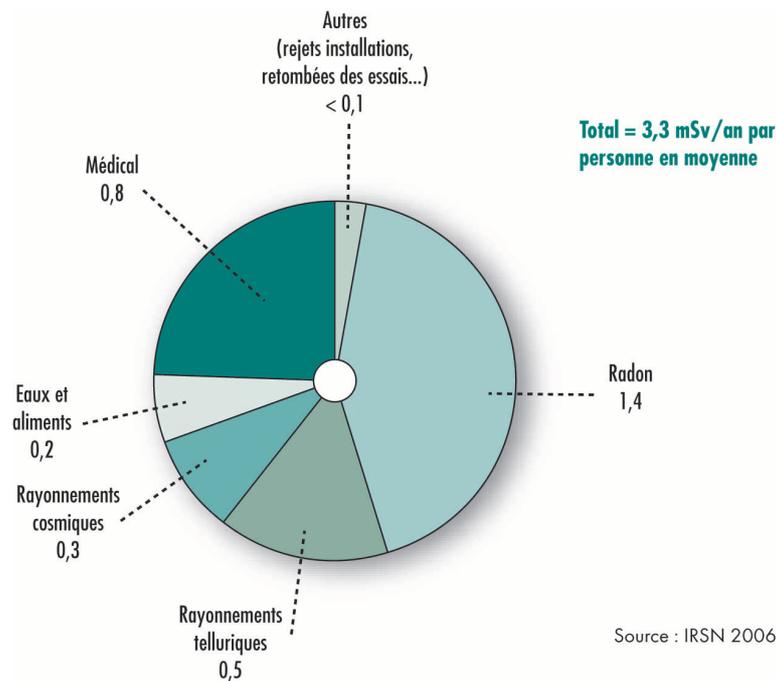
3 | 1 Les expositions de la population aux rayonnements d'origine naturelle

Les expositions de la population aux rayonnements ionisants d'origine naturelle résultent depuis toujours 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 rayonnements terrestres (hors radon)

Les radionucléides naturels d'origine terrestre sont présents à des teneurs diverses dans tous les milieux de notre environnement, y compris dans 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

Graphique 1 : les sources d'exposition aux rayonnements ionisants de la population française (moyennes annuelles)



potassium 40 présents dans les sols, mais aussi à une exposition interne par inhalation de radon ou 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 nSv.h⁻¹ et 100 nSv.h⁻¹.

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 à environ 0,47 mSv (IRSN 2006), à comparer avec la moyenne mondiale de 0,46 mSv estimée par l'UNSCEAR (2000).

La composante de l'exposition interne par inhalation, du fait de la remise en suspension dans l'air de particules du sol, est estimée à 0,002 mSv par an, celle due aux descendants à vie longue du radon à environ 0,01 mSv 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 qui 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/hab/jour) peut atteindre quelques dizaines ou centaines de µSv.

L'exposition au radon

L'exposition au radon dit « domestique » (radon dans les habitations) a été estimée par des campagnes de mesures qui ont donné lieu ensuite à des interprétations statistiques (voir atlas IRSN). La valeur moyenne des activités mesurées en radon a ainsi été estimée en France à

Bilan national de la qualité radiologique des eaux distribuées par les réseaux publics

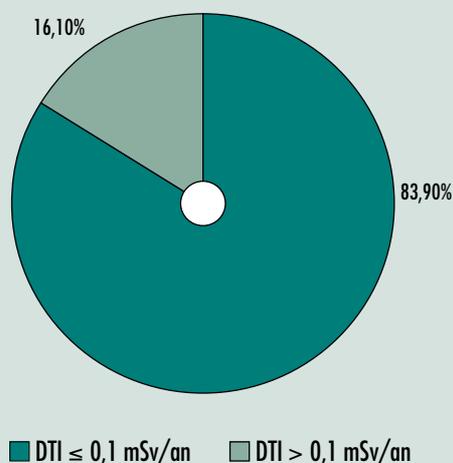
L'ASN, la DGS et l'IRSN ont publié en 2009 un premier bilan national sur la qualité radiologique des eaux distribuées par les réseaux publics réalisé à partir des résultats d'analyses du contrôle sanitaire piloté par les directions départementales des affaires sanitaires et sociales (DDASS).

Ces contrôles sont basés sur la mesure de quatre indicateurs : le tritium, l'activité des radioéléments émetteurs alpha et bêta et la dose totale indicative (la dose d'exposition aux rayonnements ionisants attribuable à l'ingestion d'eau pendant une année). Ces indicateurs permettent de connaître le « profil radiologique » des eaux, lié à la présence des radionucléides naturels caractéristiques des terrains géologiques dans lesquels l'eau a séjourné (bruit de fond naturel), ainsi que la présence anormale de radionucléides, artificiels ou naturels.

Le bilan montre qu'entre 2005 et 2007, sur plus de 50 000 analyses réalisées au captage ou sur les eaux mises en distribution, les références réglementaires de qualité radiologique ont été respectées, à l'exception de quelques dépassements ponctuels de très faible ampleur et dus à la présence de radionucléides naturels liée à la nature géologique du sous-sol.

Pour 2007, la qualité radiologique de l'eau distribuée au robinet des consommateurs a pu être évaluée pour près de 87% de la population française. Il en ressort que la dose d'exposition aux rayonnements ionisants attribuable à l'ingestion d'eau pendant une année est restée inférieure à la valeur de référence de qualité fixée par la réglementation, dans 99,9 % des cas.

Le bilan apporte par ailleurs des premiers résultats sur la concentration en uranium naturel des eaux mises en distribution. L'uranium naturel n'est aujourd'hui pas intégré dans le contrôle sanitaire. Compte tenu de la toxicité chimique de l'uranium naturel, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a proposé une valeur guide provisoire au-delà de laquelle il conviendrait de prendre des mesures correctives. Pour 455 échantillons sur les 472 qui présentaient une radioactivité naturelle élevée sur la période 2005-2007, cette valeur guide est respectée.



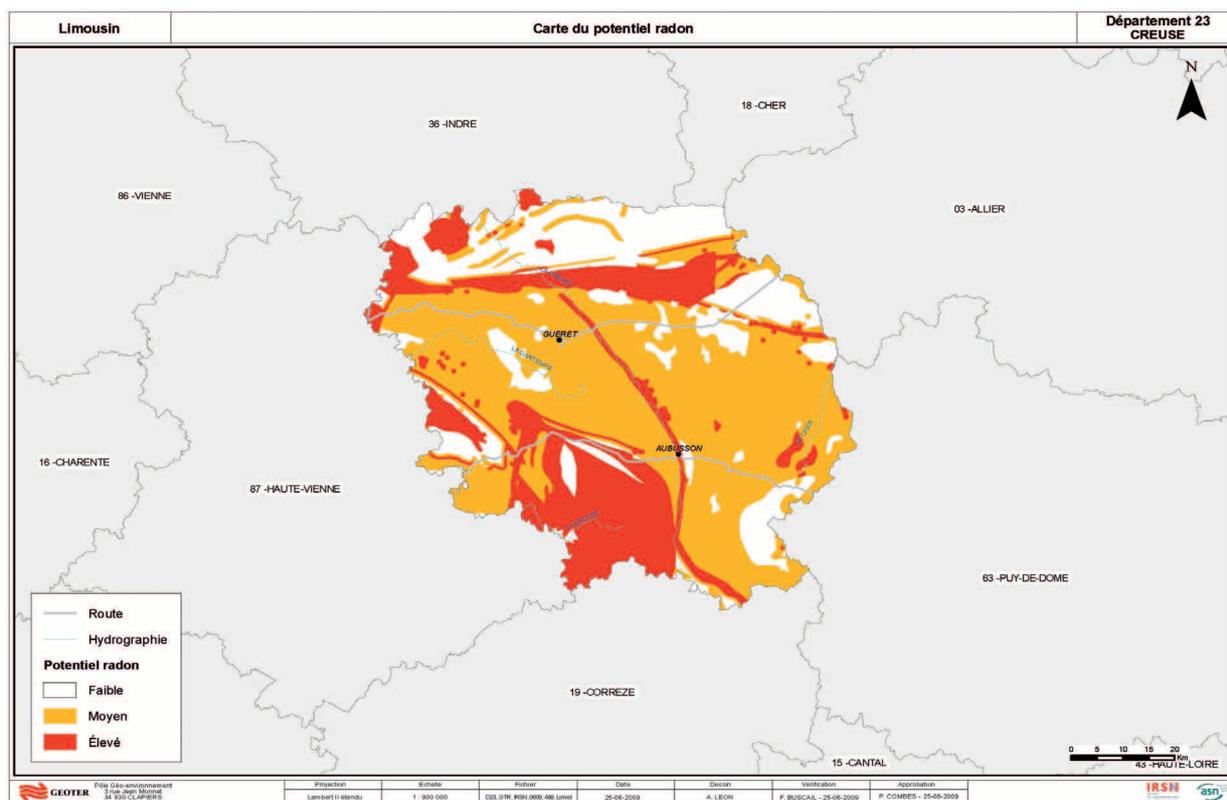
Pourcentage de résultats inférieurs ou supérieurs à la valeur de la dose totale indicative (DTI) fixée par la réglementation (0,1 mSv/an) pour les eaux souterraines – Données 2005-2007

63 Bq/m³, avec environ la moitié des résultats inférieurs à 50 Bq/m³, 9 % supérieurs à 200 Bq/m³ et 2,3 % au-dessus de 400 Bq/m³.

Ces mesures ont permis de classer les départements en fonction du potentiel d'exhalaison du radon des terrains (voir chapitre 3). Pour des raisons d'ordre méthodologique,

Tableau 1 : bilan des campagnes de mesures du radon réalisées depuis 2005

Campagne de mesures	Nombre d'établissements contrôlés	Établissements classés inférieur à 400 Bq/m ³		Établissements classés entre 400 Bq/m ³ et 1000 Bq/m ³		Établissements classés supérieur à 1000 Bq/m ³	
		nombre	%	nombre	%	nombre	%
2005/2006	2970	2570	87	314	10	82	3
2006/2007	3000	2560	85	315	11	125	4
2007/2008	1204	952	79	174	15	78	6
2008/2009	800	659	82	94	12	47	6



Cartographie du potentiel d'exhalation du radon dans le département de la Creuse en 2009

les résultats de cette surveillance restent, toutefois, trop imprécis pour évaluer précisément les doses liées à l'exposition à laquelle les particuliers sont réellement soumis.

Dans les lieux ouverts au public, et notamment dans les établissements d'enseignement et dans les établissements sanitaires et sociaux, des mesures de radon sont réalisées depuis 1999.

Le bilan des campagnes réalisées depuis 2005 par les organismes agréés par l'ASN est présenté dans le tableau 1.

Les pourcentages de résultats de mesures supérieures aux niveaux d'action (400 et 1000 Bq/m³) restent comparables d'une année sur l'autre. La diminution du nombre de mesures lors de la dernière campagne indique que le dépistage des établissements, initié en 1999, est pratiquement achevé. À partir de 2009, un nouveau cycle de dépistage (10 ans) sera entamé.

L'exposition externe due aux rayonnements cosmiques

Les rayonnements cosmiques sont de deux natures, une composante ionique et une composante neutronique. Au niveau de la mer, la composante ionique est estimée à 32 nSv par heure et 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 1,1mSv par an dans la commune de Cervières située à 2836 m d'altitude. En moyenne, la dose efficace annuelle par individu en France est de 0,33 mSv par an. Elle est inférieure à la valeur moyenne mondiale de 0,38 mSv par an publiée par l'UNSCEAR.

3 | 2 Les doses reçues par les travailleurs

3 | 2 | 1 L'exposition des travailleurs des activités nucléaires

Le système de surveillance des expositions externes des personnes travaillant dans les installations où sont utilisés les rayonnements ionisants a été mis en place depuis plusieurs décennies. Fondé sur le port obligatoire du film dosimétrique pour les travailleurs susceptibles d'être exposés, il permet de vérifier le respect des limites réglementaires applicables aux travailleurs; les données enregistrées permettent de connaître la dose d'exposition

Bilan de la surveillance dosimétrique de l'exposition externe des travailleurs aux rayonnements ionisants en 2008 (source: IRSN novembre 2009)

Effectif total surveillé : 306 629 travailleurs

Effectif surveillé ayant enregistré une dose inférieure au seuil de détection : 240 518 soit environ 78,4 %

Effectif surveillé ayant enregistré une dose comprise entre le seuil de détection et 1 mSv : 53 070 soit environ 17,3 %

Effectif surveillé ayant enregistré une dose comprise entre 1 mSv et 20 mSv : 13 025 travailleurs soit environ 4,2 %

Effectif surveillé ayant dépassé la dose efficace annuelle de 20 mSv : 16 dont 4 au-dessus de 50 mSv

Dose collective (somme des doses individuelles) : 52,36 Homme.Sv

Dose individuelle annuelle moyenne sur l'effectif ayant enregistré une dose non nulle : 0,79 mSv

cumulée sur une période déterminée (mensuelle ou trimestrielle) ; elles sont rassemblées dans le système SISERI géré par l'IRSN et font l'objet d'une publication annuelle. À terme, le système SISERI permettra de recueillir, en plus, les données fournies par la « dosimétrie opérationnelle », c'est-à-dire la mesure en temps réel des doses d'exposition externe, ainsi que les résultats dosimétriques d'éventuelles contaminations internes.

Le bilan de la surveillance dosimétrique de l'exposition externe des travailleurs en 2008 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 95 % des effectifs surveillés la dose annuelle est restée inférieure à 1 mSv (limite de dose efficace annuelle pour le public). Toutefois, ces statistiques ne traduisent pas totalement la réalité puisque dans

Tableau 2 : dosimétrie des travailleurs dans les INB, hors défense (année 2008-source IRSN)

	Nombre de personnes surveillées	Doses collectives (homme.Sv)	Doses > 20 mSv
EDF	19 705	5,76	0
AREVA	11 764	5,64	0
CEA	6 370	0,27	0
IPN Orsay	2 751	0,08	0
Entreprises extérieures	17 020	11,01	1
Autres	475	0,03	0

Tableau 3 : dosimétrie des travailleurs dans les activités nucléaires de proximité (année 2008-source IRSN)

	Nombre de personnes surveillées	Doses collectives (homme.Sv)	Doses > 20 mSv
Médecine	122 674	13,00	8
Dentaire	32 073	0,93	0
Vétérinaires	15 137	0,34	0
Industrie	34 374	10,79	7
Recherche	4 866	0,25	0
Divers	28 593	1,88	0

LES ACTIVITÉS NUCLÉAIRES : RAYONNEMENTS IONISANTS ET RISQUES POUR LA SANTÉ ET L'ENVIRONNEMENT

quelques cas l'exposition du dosimètre ne correspond pas nécessairement à l'exposition du travailleur (dosimètres non portés mais exposés) et il se peut qu'occasionnellement, certains travailleurs ne portent pas leur dosimètre.

Les tableaux 2 et 3 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 très 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 55 %), ne représente qu'environ 27 % de la dose collective ; en revanche, il comptabilise 8 dépassements de la limite annuelle (sur 16), dont 2 au-dessus de 50 mSv.

Les dernières statistiques publiées par l'IRSN en novembre 2009 montrent une relative stabilité des effectifs faisant l'objet d'une surveillance dosimétrique depuis 2000 (voir diagrammes 2 et 3), le cap des 300 000 personnes étant

Diagramme 2 : évolution des effectifs surveillés et des doses collectives, de 1996 à 2008 (source IRSN)

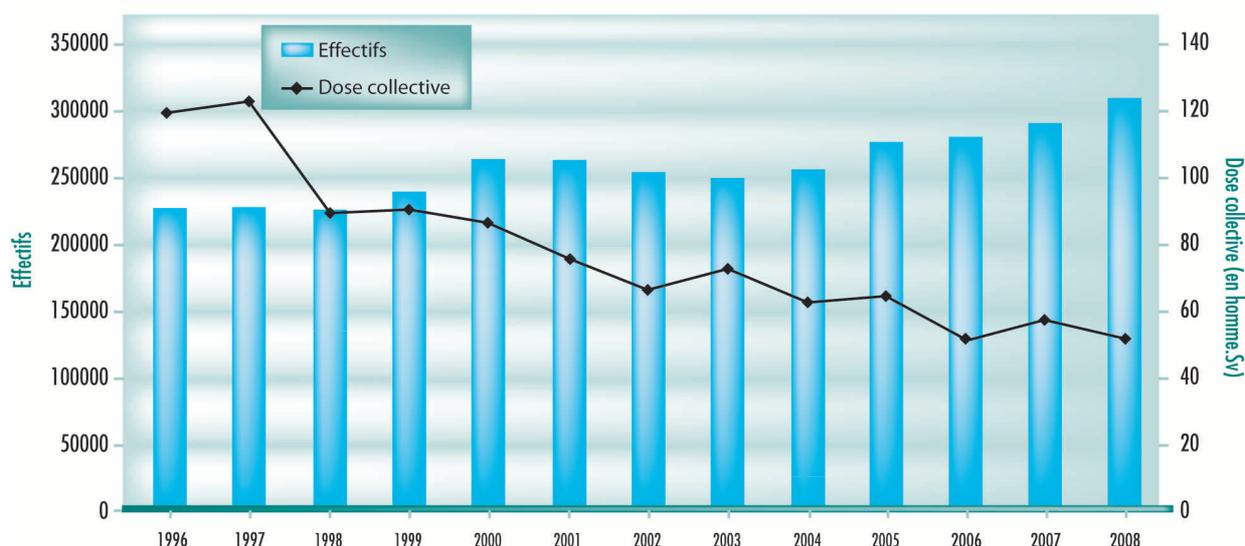


Diagramme 3 : évolution des effectifs surveillés, par domaine d'activité, de 1996 à 2008 (source IRSN)

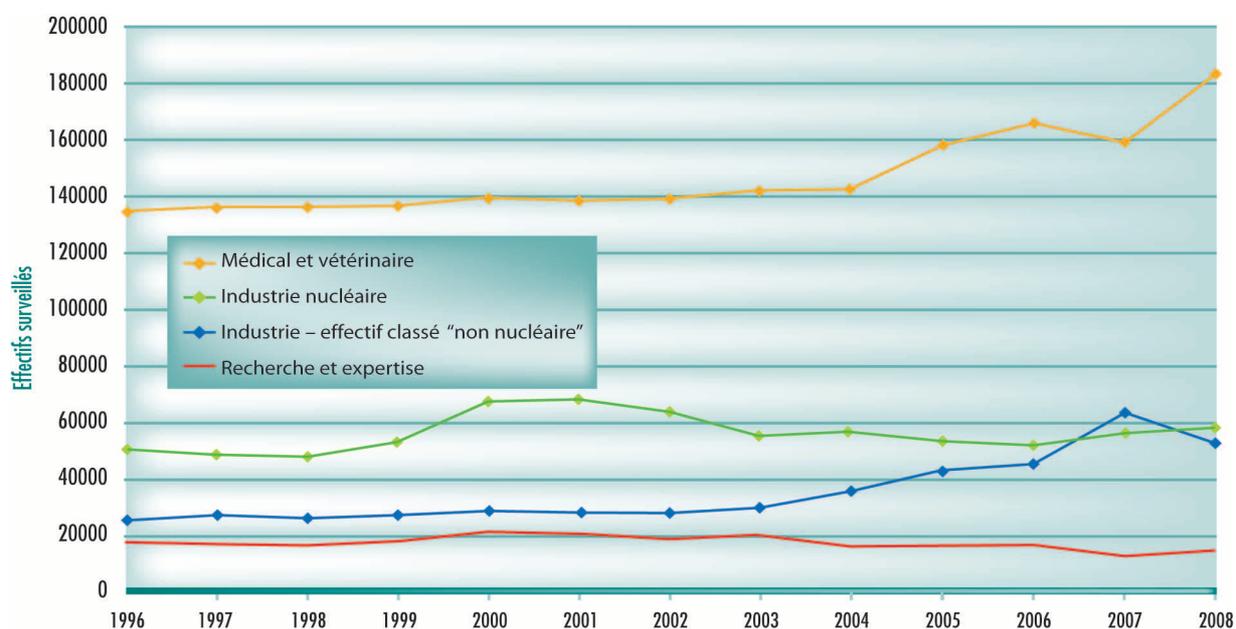


Diagramme 4 : évolution des doses collectives par domaine d'activité, de 1996 à 2008 (source IRSN)

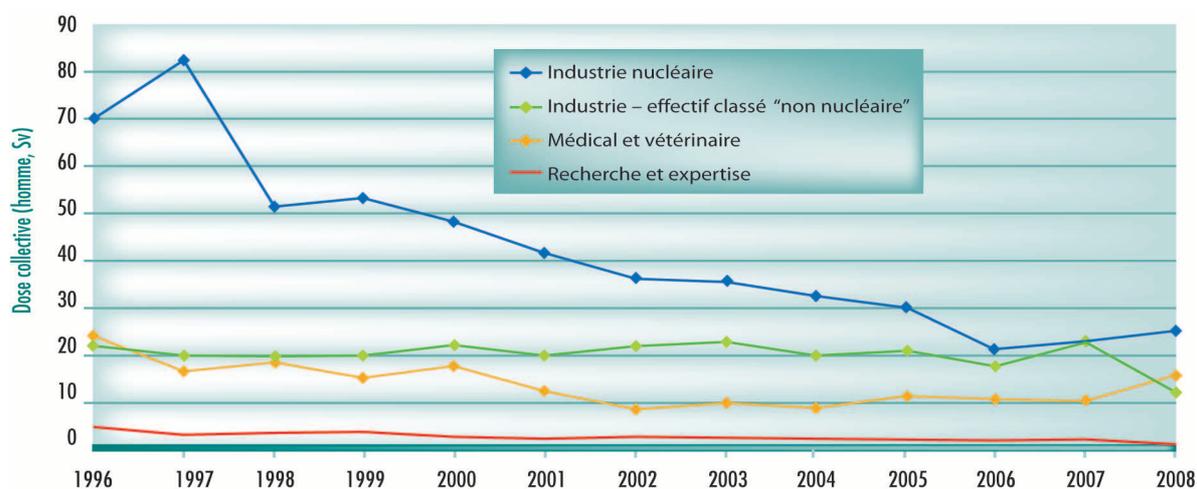


Diagramme 5 : évolution du nombre de travailleurs surveillés dont la dose annuelle est supérieure à 20 mSv, de 1996 à 2008 (source IRSN)

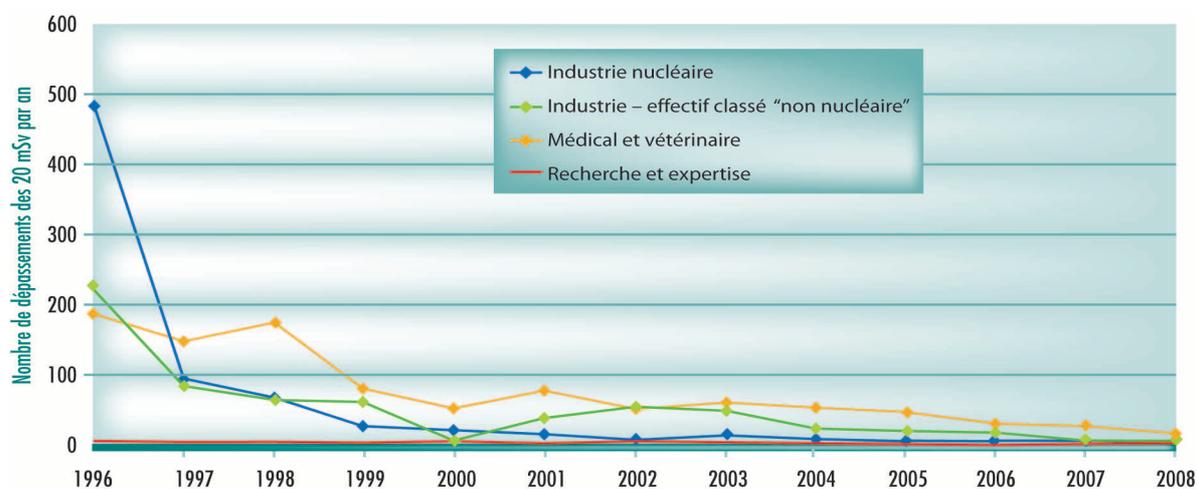
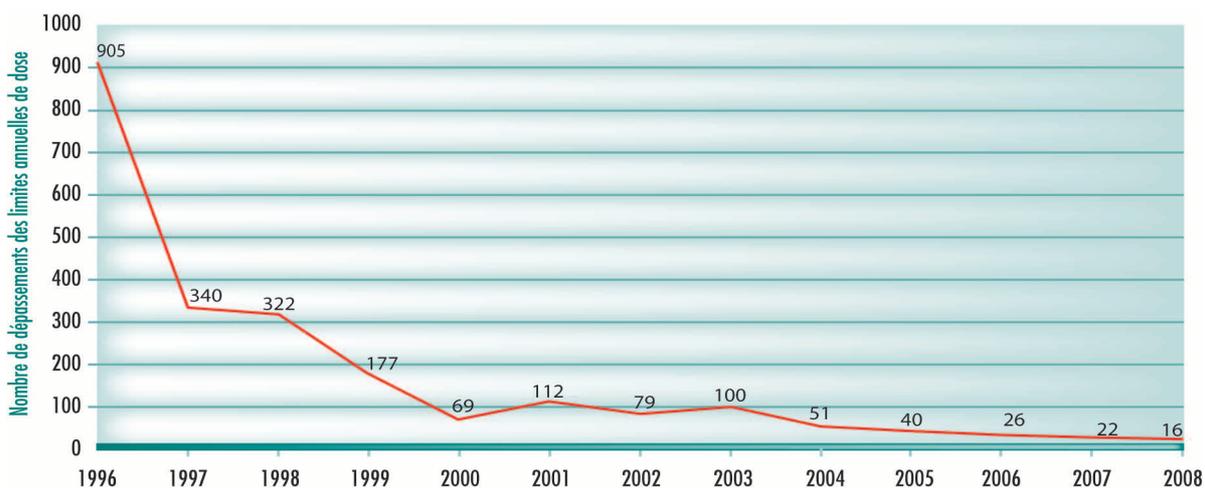


Diagramme 6 : évolution du nombre de travailleurs surveillés dont la dose annuelle est supérieure à 20 mSv, de 1996 à 2008 (source IRSN)



pour la première fois franchi en 2008. La dose collective, composée de la somme des doses individuelles, est en régression (environ - 55 %) depuis 1996 alors que les effectifs surveillés ont progressé d'environ 30 %. La démarche d'optimisation mise en place par les exploitants nucléaires au cours des années '90 explique cette évolution positive (voir diagrammes 4 et 5).

Le nombre de travailleurs surveillés dont la dose annuelle a dépassé 20 mSv est également en nette diminution (voir diagramme 6). Chaque cas de dépassement doit donner lieu à une déclaration d'événement significatif par le responsable de l'activité nucléaire à l'ASN et fait l'objet d'une investigation particulière, en relation avec le médecin du travail, en collaboration éventuellement avec l'inspection du travail, conformément à la circulaire du 16 novembre 2007 relative à la coordination de l'action des inspecteurs de la radioprotection et des inspecteurs et contrôleurs du travail en matière de prévention des risques liés aux rayonnements ionisants.

L'exposition des travailleurs aux rayonnements naturels renforcés résulte soit de l'ingestion de poussières de matières riches en radionucléides (phosphates, minerais métallifères), soit de l'inhalation de radon, formé par la décroissance 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, montre que 83 % des doses reçues par les travailleurs des industries concernées (voir chapitre 3) sont restées inférieures à 1 mSv/an. Les secteurs industriels où l'exposition des travailleurs est susceptible de dépasser 1 mSv/an sont les suivants : traitement du minerai de titane, fumisterie et recyclage de céramiques réfractaires, maintenance de pièces composées d'alliages au thorium dans l'aéronautique, traitement chimique du minerai de zircon, transformation mécanique et utilisation de zircon et traitement des terres rares.

3 | 2 | 2 L'exposition des travailleurs aux rayonnements naturels renforcés

Il n'existe pas de système de surveillance des expositions pour les personnes travaillant dans des activités engendrant un renforcement de l'exposition aux rayonnements naturels. Les études publiées au niveau international montrent cependant des expositions pouvant aller de quelques millisieverts à quelques dizaines de millisieverts par an.

3 | 2 | 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. On estime ainsi que la dose annuelle moyenne pour des personnels de « court-courrier » serait de 1 à 2 mSv, de 3 à 5 mSv pour les personnels de « long-courrier », et jusqu'à 10 mSv pour certains personnels de services de livraison postale.

Site Internet SIEVERT www.sievert-system.com

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

3 | 3 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 installations nucléaires de base.

En revanche, pour des raisons d'ordre méthodologique, il n'existe pas de système global de surveillance permettant de reconstituer de façon exhaustive les doses reçues par la population du fait des activités nucléaires. De ce fait, le respect



Prélèvements d'eau de nappes phréatiques autour de la centrale nucléaire de Gravelines (Nord) – Septembre 2008

de la limite d'exposition de la population (voir chapitre 3) n'est pas directement contrôlable. Cependant, pour les installations nucléaires de base, 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 installations nucléaires de base. Des études méthodologiques sont nécessaires, en préalable, 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 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).

3 | 4 Les doses reçues par les patients

Les expositions dues aux rayonnements ionisants d'origine médicale sont en augmentation dans la plupart des pays (source UNSCEAR).

- Dans le monde, le nombre d'examen radiologiques a progressé de 1.6 à 4 milliards depuis 1993 à 2008, soit une augmentation de 250 %. En médecine nucléaire, environ 17 millions d'examen étaient réalisés chaque année dans les années 1970, avec un saut à 35 millions (+200 %) au début des années 2000.

- Aux USA, la moyenne de la dose efficace annuelle par personne est passée de 0.53 mSv en 1983 à 3 mSv en 2006.

Tableau 4 : nombre d'actes en France, par secteur d'activité, utilisant les rayonnements ionisants

Type d'actes	Établissements de santé	Pratique libérale
Radiologie conventionnelle (dentaire compris)	14,5 à 25 millions	40,9 millions
Scanner	2 à 3,8 millions	2,2 millions
Médecine nucléaire	850 000	nd*
Radiologie interventionnelle	892 000	nd*
Total	61,3 à 73,6 millions	

*nd = non disponible

- Une part importante de cette augmentation est due au développement de la scanographie et aux pratiques de radiologie interventionnelle. Dans le monde, la part de la dose due à la scanographie représente 42 % des expositions médicales en 2008, contre 34 % en 2000.

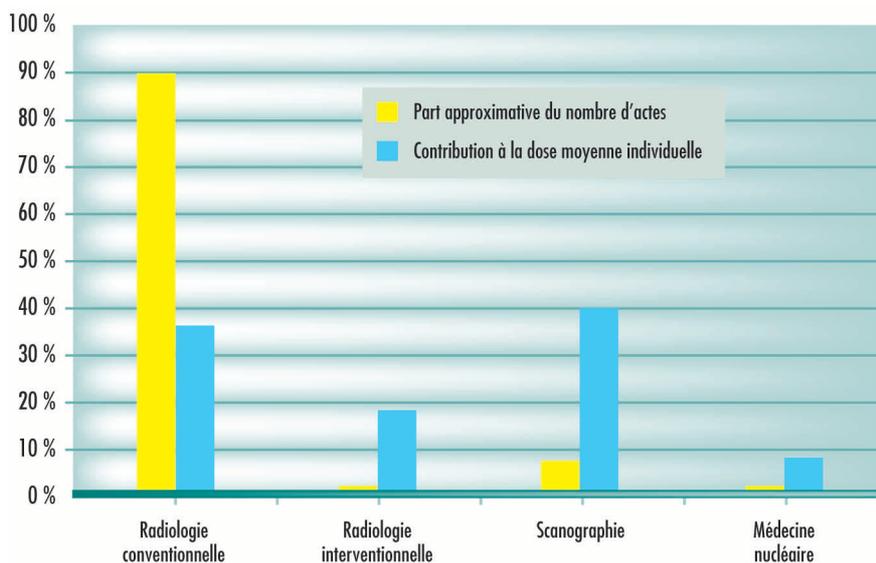
- Dans les pays développés, la part des examens de scanographie est de 8 % alors que la dose associée représente 47 % des expositions médicales.

- En ce qui concerne le nombre de scanners, ils étaient de 11 050 au Japon en 2000 (soit 88 par million d'habitants) et une dose efficace moyenne associée de 2,3 mSv. Aux USA, le nombre était de 3956 en 2006 (13,2 par million d'habitants) avec une dose efficace moyenne associée de 1,5 mSv. En France, le nombre de scanners est de 754 en 2008 (soit 11,6 par million d'habitants) mais la dose moyenne n'est pas connue (estimation IRSN attendue en 2010).

La tendance à l'augmentation de la dose moyenne en imagerie médicale est due à plusieurs facteurs :

- l'augmentation des équipements qui délivrent des doses de plus en plus élevées (scanner et PET), en améliorant le diagnostic ;
- l'augmentation du nombre d'examen qui délivrent des doses de plus en plus élevées (scanner du corps entier, colonoscopie virtuelle, coroscanner...);
- l'augmentation due aux pratiques médicales :
 - l'imagerie médicale combinée avec les analyses de laboratoire pour le diagnostic des maladies ;
 - l'imagerie médicale, associée aux pratiques interventionnelles, devient un outil de traitement, pouvant remplacer la chirurgie (neurologie, cardiologie...);
 - l'imagerie médicale est décisive pour guider la stratégie thérapeutique (cancérologie) et suivre l'efficacité des traitements.

Diagramme 7 : répartition du nombre d'actes médicaux et des doses associées



Les expositions médicales aux rayonnements ionisants (scannographie, PET, radiologie interventionnelle) représentent la part la plus importante des expositions artificielles dans les pays développés. Ces pratiques sont en constante augmentation et inévitables sauf lorsque des techniques alternatives peuvent être utilisées.

Une attention particulière doit être exercée pour contrôler et réduire les doses liées à l'imagerie médicale car la multiplication des examens les plus irradiants, pour une même personne, pourrait conduire à atteindre la valeur de 100 mSv, au-dessus de laquelle les études ont montré que la probabilité de développer un cancer radio-induit devient significative.

Le contrôle de l'application des principes de justification et d'optimisation en imagerie médicale doit s'inscrire dans les priorités de l'ASN pour les prochaines années.

En France, les quatre examens de radiologie conventionnelle les plus nombreux sont la radiographie des membres inférieurs et supérieurs (32 %), du rachis (16 %), du thorax (12 %) et du sein (11 %); les radiographies buccales représentent 85 % des examens dentaires; les examens par scanner de la tête et du rachis représentent respectivement 38 % et 26 % du nombre total des examens par scanner. À partir des valeurs de dose estimée par examen (données nationales ou à défaut européennes), la dose efficace annuelle moyenne estimée par personne est comprise entre 0,66 mSv et 0,83 mSv.

4 PERSPECTIVES

La surveillance des expositions mérite un effort particulier dans le but de mieux identifier les catégories ou groupes de populations les plus exposés. L'intérêt est triple : cette connaissance doit permettre de mieux cibler les efforts de réduction des risques (optimisation), de disposer d'indicateurs fiables pour évaluer l'efficacité de la politique publique et de développer des enquêtes épidémiologiques pour mieux approcher le risque. Ainsi :

– comme les années précédentes, le bilan des doses reçues par les travailleurs en 2008, publié par l'IRSN, confirme la diminution du nombre de travailleurs surveillés dont la dose annuelle a dépassé 20mSv, ainsi que la diminution de la dose collective initiée à partir de 1996. Cependant, ce bilan ne prend pas en compte la dosimétrie interne et la dosimétrie des extrémités qui ne sont actuellement pas comptabilisées par l'IRSN. L'ASN, chargée d'organiser la veille permanente en radioprotection, reste particulièrement attentive au bon fonctionnement du système de surveillance des expositions mis en place par l'IRSN (SISERI) dans la mesure où les statistiques

Le diagramme 7 présente les parts respectives du nombre d'actes et des doses associées, pour la radiologie conventionnelle, la scanographie, la médecine nucléaire et la radiologie interventionnelle.

3 | 5 La protection des espèces non-humaines

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 doit toutefois pouvoir être garantie indépendamment des effets sur l'homme (voir CIPR 103). L'ASN est favorable à ce que l'impact des rayonnements ionisants sur les espèces non-humaines soit mieux pris en compte dans la réglementation et dans les autorisations des activités nucléaires. Toutefois les connaissances scientifiques sur les effets des rayonnements ionisants sur les espèces non-humaines sont limitées et l'ASN considère que des recherches doivent encore être menées avant de pouvoir être en mesure de proposer des dispositions spécifiques pour leur protection.

fournies constituent des indicateurs nationaux de premier ordre sur l'évolution de l'exposition des travailleurs et l'évaluation de l'efficacité des mesures prises par les exploitants pour l'application du principe d'optimisation ;

- l'exposition de la population française au radon demeure encore insuffisamment documentée puisque les estimations réalisées par l'IRSN en 1997 n'ont jamais été réactualisées et qu'elles ne prennent pas en compte les mesures réalisées depuis 1999 dans les lieux ouverts au public. Dans le cadre de la préparation du nouveau plan national d'actions sur les risques liés au radon, l'ASN a demandé que soit étudiée l'opportunité de créer une base de données regroupant toutes les données disponibles sur l'exposition au radon du public et des travailleurs, ce qui constituerait pour l'ASN une étape nécessaire pour mieux appréhender le risque ;
- enfin, l'ASN souligne l'intérêt des travaux à venir dans le cadre de l'observatoire national de l'exposition des patients piloté par l'InVs et l'IRSN qui devrait bénéficier

prochainement de la nouvelle nomenclature de l'assurance maladie et permettre ainsi de suivre une cohorte de 600 000 patients pris en charge en secteur libéral pendant 20 ans.

La Conférence internationale de Versailles sur la radiothérapie, organisée en décembre 2009 par l'ASN, a souligné la nécessité d'intensifier les efforts, tant au niveau local qu'au niveau international, dans le domaine de l'enregistrement et de l'analyse des effets indésirables et des complications des traitements ainsi que de développer des systèmes de déclaration des événements significatifs dans un but d'analyse et de retour d'expérience. La mise en place du système de déclaration des événements indésirables graves par l'InVS, articulé avec le système de déclaration des événements en radioprotection mis en place par l'ASN, constituera un véritable progrès dès lorsque ces effets pourront être analysés aux plans médical et scientifique.

En complément des actions de réglementation et de contrôle qui lui sont confiées, l'ASN suit de façon attentive l'évolution des recherches et des connaissances dans le domaine de la santé et des rayonnements ionisants et de la doctrine internationale en matière de radioprotection. La question de l'hypersensibilité aux rayonnements ionisants, examinée lors de la Conférence internationale de Versailles, mérite une attention particulière en termes de recherche appliquée afin de pouvoir disposer rapidement d'un test de radiosensibilité pour les patients.

Plus précisément, en 2010, l'ASN :

- procédera à une évaluation des programmes de recherche en cours dont les résultats pourraient avoir une incidence sur le système de radioprotection et sur son contrôle ;
- examinera les conclusions des expertises qu'elle a sollicitées sur la survenue de leucémies de l'enfant autour des installations nucléaires de base et sur l'impact environnemental des rejets de tritium.