

L'atome, au jour le jour.

**Les travailleurs face aux risques
de la technologie nucléaire**

—

Marie-Anne Mengeot, journaliste

Avec la contribution de Jean-Claude Zerbib, ingénieur en radioprotection

etui.

Remerciements

L'Institut syndical européen (ETUI) tient à remercier les auteurs de cette brochure pour leur investissement sans faille dans cet ambitieux projet de publication consacré à un sujet éminemment ardu. Nos plus vifs remerciements vont également à Marc Sapir, ancien directeur général de l'ETUI, qui a accompagné ce processus dans toutes ses étapes. Marc a permis aux auteurs de mettre au jour une riche et complexe documentation, ainsi que d'accéder à la précieuse analyse d'experts en radioprotection. Le long et fastidieux exercice de collecte de la littérature scientifique a également été facilité grâce à Jacqueline Rotty, du centre de documentation de l'ETUI.

Sommaire

| | |
|-----|--|
| 05 | Préambule |
| 07 | Chapitre 1 Fascination, destruction, régulation |
| 21 | Chapitre 2 Les radionucléides et leurs rayonnements |
| 41 | Chapitre 3 La protection des travailleurs dans la législation européenne |
| 53 | Chapitre 4 La maîtrise des rayonnements ionisants : un chemin semé d'accidents et de maladies |
| 65 | Chapitre 5 Les secteurs les plus concernés (hors énergie nucléaire) |
| 83 | Chapitre 6 Les risques de l'énergie nucléaire, de la mine aux centrales |
| 97 | Conclusion |
| 101 | Bibliographie |
| 109 | Annexes |
| 113 | Table des matières |

Préambule

La découverte des rayonnements ionisants et leur utilisation médicale et industrielle ont un peu plus d'un siècle. La prise de conscience du caractère cancérigène, mutagène et toxique pour la reproduction de ces rayonnements n'a pas empêché leur essor dans de nombreux secteurs, ni leur utilisation à des fins militaires et la fabrication d'armes nucléaires au pouvoir destructeur considérable.

Le XX^e siècle a connu de nombreuses catastrophes nucléaires dont les plus marquantes ont été les bombardements d'Hiroshima et Nagasaki, et l'explosion d'un réacteur nucléaire à Tchernobyl. Il existe aussi une catastrophe silencieuse qui a concerné, au jour le jour, des travailleurs amenés à côtoyer les rayonnements ionisants, souvent dans l'ignorance des risques qu'ils couraient. Combien en sont morts prématurément ? Des monuments rappellent, ici ou là, le souvenir de quelques centaines d'entre eux. Ils furent bien plus nombreux à supporter les risques et le fardeau des maladies liées à l'emploi des rayonnements ionisants.

Les graves conséquences de l'accident nucléaire de Fukushima, consécutives au tremblement de terre et au tsunami qui ont frappé le nord-est du Japon le 11 mars 2011, nous rappellent que les risques liés au nucléaire civil n'appartiennent pas au passé. Cet événement aura une influence sur la renaissance du nucléaire qui s'amorçait alors que persistent les dangers liés à la gestion des stocks d'armements nucléaires existants, que de nouvelles menaces apparaissent telles que l'acquisition de la puissance nucléaire par des États mis au ban de la communauté internationale ou de "bombes sales" par des groupes terroristes. L'utilisation pacifique de sources radioactives, hors énergie nucléaire, maintient sa discrète progression dans de nombreux secteurs et n'est plus l'exclusivité d'un club restreint de pays. De plus en plus de travailleurs sont et seront confrontés aux rayonnements ionisants dans des activités industrielles, médicales, militaires et, bien entendu, dans la filière de l'énergie nucléaire. L'exposition à des sources naturelles d'irradiation commence à être mieux prise en compte. Ainsi, la liste des secteurs concernés par une exposition potentielle au radon, un gaz radioactif issu de la décomposition de l'uranium naturel, s'allonge.

Un organisme des Nations unies a estimé, dans un rapport de 2010, à approximativement 23 millions le nombre de travailleurs exposés à des radiations ionisantes dans le monde. Environ 13 millions d'entre eux sont employés dans des activités les exposant à des sources naturelles d'irradiation et environ 10 millions à des sources d'irradiation liées aux activités humaines. Seuls 7,4 millions de ces travailleurs bénéficient d'un contrôle régulier de leur niveau d'exposition.

L'évaluation du rapport bénéfice-risque de l'utilisation de sources nucléaires, notamment à des fins médicales ou énergétiques, a été jusqu'à présent jugée politiquement et socialement favorable. Ce qui n'a évidemment pas contribué à une appréciation correcte des dangers liés à l'emploi pacifique des rayonnements ionisants. Et cependant, les risques sont bien réels, comme en témoignent les limites d'exposition recommandées qui n'ont cessé d'être revues à la baisse depuis qu'elles existent. Calculées d'abord en fonction des risques visibles à court terme, les limites de dose ont été plus tard adaptées suivant les résultats acquis au cours du suivi des milliers de Japonais exposés aux bombardements nucléaires de la Seconde Guerre mondiale. Des études épidémiologiques récentes mettent davantage l'accent sur les effets d'une exposition à de "faibles doses". Elles indiquent qu'on a probablement sous-estimé les effets à long terme d'une exposition aux rayonnements ionisants, faible mais continue au cours de la vie professionnelle. Ceci justifie de mettre en pratique avec opiniâtreté le principe ALARA, selon lequel l'exposition de l'homme aux rayonnements ionisants doit être aussi faible que raisonnablement possible.

Les effets sur la santé des faibles doses d'irradiation, qui concernent la grande majorité des travailleurs exposés, restent controversés. Leur prise en compte nécessite une culture de la prévention très rigoureuse que certains ne sont peut-être pas disposés à mettre en œuvre. Elle nécessite aussi d'admettre que si les rayonnements ionisants ont été et sont des facteurs de progrès, ils restent intrinsèquement une cause d'accidents et de maladies professionnelles. Un danger sournois pour la plupart des travailleurs qui n'en ressentent pas les effets ni à court ni à moyen terme, mais qui peuvent voir leur vie prématurément bouleversée par un cancer de la thyroïde, un cancer du poumon ou une leucémie.

Cette publication dresse un bref état des lieux de l'utilisation des rayonnements ionisants. Au moment où se discute au niveau européen une nouvelle directive sur les normes de base de la sécurité nucléaire, il est particulièrement important de comprendre le fonctionnement des organismes chargés de définir les règles, de tirer les leçons des accidents du passé, lointains et récents, et d'améliorer nos connaissances sur les travailleurs et les secteurs exposés. Dans un monde à l'économie globalisée, il est important également de prendre conscience du fait que les risques des rayonnements ionisants ne s'arrêtent pas aux frontières ni des usines, ni des États, et qu'aucun sanctuaire ne met à l'abri de leurs dangers.

La nécessaire vulgarisation de concepts scientifiques de plus en plus élaborés au fil du temps, et le champ très large couvert par cette publication nous ont inévitablement amenés à simplifier des notions parfois très complexes. De même, pour ne pas alourdir inutilement notre propos par des accumulations de données répétitives, notre regard s'est d'abord tourné vers des pays impliqués de longue date dans la technologie nucléaire tels que la Belgique, la France et le Royaume-Uni, au niveau européen, et à l'échelle mondiale les États-Unis, l'ex-Union soviétique et le Japon.

Chapitre 1

Fascination, destruction, régulation

Les rayonnements ionisants tirent leur nom de leur capacité lorsqu'ils entrent en contact avec les atomes d'en extraire des électrons, c'est-à-dire de les ioniser. Certains rayonnements ionisants sont émis artificiellement par des appareils électriques. C'est notamment le cas des rayons X. D'autres sont émis par la désintégration spontanée d'éléments naturels tels que l'uranium. La découverte de ces deux sources de rayonnements a été pratiquement simultanée.

1.1. De la découverte des rayons X à Hiroshima

En novembre 1895, le physicien allemand Wilhelm Conrad Röntgen parvient à mettre en évidence des rayonnements, inconnus jusqu'alors, qui ont la capacité de traverser de nombreux matériaux tout en étant invisibles. Il propose de les appeler "rayons X", en référence à la lettre généralement utilisée pour désigner une inconnue en mathématiques. Il en perçoit rapidement l'intérêt pour le diagnostic médical en réalisant une "photographie X" de la main de son épouse. Ce cliché fait immédiatement le tour du monde. Röntgen ne dépose pas de brevet, ce qui encourage l'utilisation de sa découverte.

L'enthousiasme des médecins et des physiciens pour ce procédé, qui permet de traverser le corps humain et d'en révéler l'ossature, est immédiat. Mais l'utilisation inconsidérée des rayons X entraîne rapidement des accidents, notamment des altérations de la peau appelées radiodermites. Plusieurs physiciens en feront l'amère expérience comme l'assistant de Thomas Edison, Clarence Dally, qui sera amputé d'un bras et en mourra en 1904. Le médecin américain Emil Herman Grubbe sera parmi les premiers à avoir l'idée de transformer cet effet toxique en

traitement thérapeutique. Il soumet aux rayons X une patiente de Chicago, souffrant d'un cancer du sein, en protégeant les tissus sains par un écran de plomb. La radiothérapie et la radioprotection étaient nées ensemble, mais elles n'iront pas forcément de pair, car l'engouement pour la première se fera souvent au détriment de la seconde.

Quelques mois après la découverte de Röntgen, le physicien français Henri Becquerel observe que les radiations émises par le sel d'uranium ont des effets semblables à ceux produits par les rayons X. Peu de temps après, un autre chercheur français, Marie Curie, confirme la nature ionisante du rayonnement du sel d'uranium et démontre que des composés de thorium ont les mêmes propriétés. Marie Curie donnera le nom de "radioactivité" à l'émission par différents éléments chimiques de rayonnements analogues à ceux de l'uranium.

En 1898, Marie Curie et son mari Pierre découvrent le polonium, puis le radium. Rapidement, ils constatent que l'exposition au radium entraîne des brûlures de la peau similaires à celles observées avec les appareils à rayons X. Le radium devient néanmoins rapidement très populaire. Il est considéré comme une sorte de panacée qu'on utilise pour des problèmes de santé aussi divers que le cancer, l'ulcère d'estomac ou l'impuissance. En 1934, Marie Curie mourra des suites d'une leucémie, attribuée aux effets du radium.

Les Radium girls

En 1915, le physicien Sabin von Sochocky développe une peinture phosphorescente à base de sulfure de zinc à laquelle est ajoutée une infime quantité de radium. Il crée dans le New Jersey une fabrique de montres et réveils lumineux, la Radium Luminous Materials Corporation. Ces produits sont très vite adoptés par les militaires engagés dans la Première Guerre mondiale, puis par les familles américaines. Les employés de la firme sont essentiellement de jeunes ouvrières heureuses de participer par leur travail à l'effort de guerre. Elles devront assez rapidement déchanter. Au début des années 1920, plusieurs d'entre elles décèdent, d'autres sont atteintes de nécroses des gencives, de fragilisation de la mâchoire ou perdent leurs dents. Un dentiste, Théodore Blum, découvre l'origine professionnelle de ces troubles : les ouvrières appliquent les peintures au radium à l'aide de pinceaux qu'elles affinent entre leurs lèvres. Ce faisant, elles avalent avec leur salive de petits fragments de peinture. En 1923, un premier cancer des os est diagnostiqué, il y en aura plusieurs dizaines.

Confrontée à un afflux de plaintes de ses ouvrières, l'entreprise fait pression sur les médecins et dentistes afin qu'ils ne révèlent pas leurs données médicales. Les employeurs mettent également en oeuvre une stratégie de diversion en accusant leurs ouvrières d'être, en fait,

victimes de la syphilis. Cinq ouvrières, bientôt surnommées les *Radium girls*, tiennent bon et portent plainte devant un tribunal. En 1928, un an après la fermeture de l'entreprise, elles obtiennent une indemnité de 10 000 dollars chacune (environ 100 000 dollars actuels). Leur action constituera une jurisprudence positive, car aux États-Unis le droit individuel des travailleurs à engager des poursuites en dommages et intérêts à l'encontre de leurs employeurs en raison d'un préjudice subi au travail s'est fondé sur ce précédent. L'année du jugement, l'inventeur de la peinture luminescente, victime de sa propre invention, décède d'une anémie aplasique.

Les peintures au radium ont eu un large succès. Elles ont été utilisées pour la production de cadrans de postes de conduite d'engins militaires (tanks, bateaux, avions), mais aussi dans des applications liées à la vie quotidienne comme les interrupteurs, les montres, les boussoles, la numérotation de maisons et de sièges de théâtre.

Aux États-Unis, un bilan publié en 1983 fait état d'un tiers de décès par cancers (leucémies, cancers des os et du sein*) parmi 3000 *dialpainters* (peintres de cadrans).

* Précisons que les cancers du sein n'ont pas été liés à l'ingestion de radium, mais bien à l'irradiation externe continue due au rayonnement gamma émis par le radium contenu dans le pot de peinture situé à une vingtaine de centimètres de la poitrine des ouvrières.

Deux ans plus tard, la société Röntgen fait ériger à Hambourg un monument à la mémoire des pionniers, "martyrs" des rayons X et du radium. Une liste de 360 noms, dont celui de Marie Curie, est aujourd'hui gravée sur le monument. La liste compte des médecins, des physiciens, des chimistes, des techniciens, des laborantins, etc. Ce ne sont malheureusement pas les seules professions frappées par le radium comme en témoigne l'histoire malheureuse des *Radium girls*, des ouvrières américaines exposées au radium (voir encadré p. 08). Malgré sa maladie et la demande que ces dernières lui adresseront de concentrer ses recherches sur la thérapie du cancer des os dont elles étaient victimes, Marie Curie ne reconnaîtra jamais les risques liés au développement de la technologie qu'elle a initiée. Et pourtant, les cancers provoqués par les rayonnements ionisants étaient connus des milieux scientifiques depuis le tout début du XX^e siècle.

Les premiers cas de cancer de la peau induits par les rayons X sur les mains des médecins et des techniciens sont observés en 1902. Entre 1900 et 1920, les décès de plus de 100 radiologues à la suite de leur exposition professionnelle seront rapportés. À cette époque, il n'y a pas de mesure de l'exposition, ni de la dose reçue, et donc pas de notion de seuil, pas plus que de limite à ne pas dépasser. Malgré les pathologies et les décès observés, la prise de conscience de la nécessité de limiter et de contrôler l'exposition aux rayonnements ionisants est lente à s'imposer, tant est grand l'enthousiasme pour cette découverte.

Des sociétés savantes allemandes puis britanniques, respectivement en 1913 et 1915, avaient pourtant reconnu officiellement les dangers des rayons X. Dans les années 1920, plusieurs rapports scientifiques insistent sur la nécessité de limiter l'exposition. Les spécialistes utilisent alors le terme de dose "supportable". Ainsi, en 1925, un physicien américain suggère que soit considérée comme telle une fraction de la dose susceptible de provoquer un érythème cutané (congestion de la peau qui provoque une rougeur), qu'il appelle SED (pour Skin Erythema Dose). Il fixe cette dose supportable à un centième de SED par mois, ce qui équivaut à environ 35 fois la norme annuelle actuelle pour les travailleurs (Lambert 2001)¹.

À l'époque, cette limite à ne pas dépasser avait été fixée en fonction des dégâts à court terme (quelques semaines), visibles, provoqués par les radiations. L'idée qu'un cancer puisse survenir après un certain temps de latence n'était pas encore intégrée.

Il faut attendre 1928, et le second Congrès international de radiologie, pour voir adoptée une véritable unité de mesure de l'irradiation, le röntgen. Le röntgen mesure la charge électrique, c'est-à-dire une quantité d'électricité produite par l'exposition de l'air aux rayonnements (cette unité n'est plus utilisée aujourd'hui). La même année, le Comité international de protection contre les rayons X et le radium voit le jour. Il prendra plus tard le nom de Commission internationale de protection radiologique (CIPR), qui est toujours le sien aujourd'hui. Les premières recommandations générales de cet organisme concernent la protection de la profession médicale. Elles limitent les heures de travail avec des sources médicales.

En 1934, un comité d'experts américains, représentant les fabricants de matériels à rayons X, exprime pour la première fois le concept de *tolerance dose* ou dose tolérable d'irradiation que le comité propose de fixer à 0,1 röntgen par jour pour le corps entier. L'année suivante, le Comité international de protection contre les rayons X et le radium reprend à son compte l'idée d'une dose seuil tolérable, en dessous de laquelle le niveau d'irradiation ne devrait pas apporter de dommages à la moyenne de la population. Cette philosophie prédomine jusqu'au début des années 1940, époque à laquelle plusieurs scientifiques commencent à rejeter l'idée qu'une exposition en dessous d'un certain niveau soit sans conséquence.

1. La dose pour la peau est, depuis 1970, fixée à 500 mSv/an.

Dans les années 1930, la recherche perce les secrets des éléments radioactifs. Les physiciens Niels Bohr et Ernest Rutherford comprennent que les atomes qui composent la matière sont formés d'un noyau, lui-même constitué de protons et neutrons, autour duquel "tournent" des électrons. Certains noyaux sont instables et se désintègrent spontanément en émettant différents types de rayonnements, c'est l'origine de la radioactivité naturelle. En 1933, le couple de physiciens Joliot-Curie découvre que l'on peut transformer un élément naturel stable en un autre artificiel et instable (radioactif) en le bombardant de particules alpha. C'est la découverte de la radioactivité artificielle. À Rome, leur collègue Enrico Fermi mène une expérience consistant à bombarder systématiquement tous les éléments chimiques connus avec une source de neutrons, et arrive à créer des corps radioactifs.

À la suite des travaux d'Enrico Fermi, la scientifique allemande Ida Noddack énonce pour la première fois, en 1934, l'idée qu'un noyau atomique ayant absorbé un neutron peut subir la fission nucléaire. Mais son observation n'est pas prise au sérieux, ni en Italie ni en Allemagne. Quatre ans plus tard, d'autres physiciens allemands, Otto Hahn, Fritz Strassmann et Lise Meitner, arrivent pourtant à la même conclusion : un noyau d'uranium bombardé de neutrons se casse en deux en libérant des neutrons et en dégageant une énergie considérable, appelée "énergie nucléaire". Les neutrons libérés peuvent à leur tour heurter d'autres atomes d'uranium, c'est la réaction en chaîne.

Une certaine indifférence des régimes nazi et fasciste par rapport aux découvertes de leurs scientifiques a sans doute permis d'éviter qu'Hitler et Mussolini ne disposent à temps de la bombe atomique. Fin des années 30, plusieurs scientifiques et prix Nobel fuient l'Italie et l'Allemagne pour gagner les États-Unis. Certains d'entre eux sont convaincus que l'énergie dégagée par la fission nucléaire pourrait être utilisée par l'Allemagne pour la fabrication de bombes. Par l'intermédiaire d'Albert Einstein, ils pressent les autorités américaines de prendre les devants et lancent un vaste projet de recherche nucléaire, dont le nom de code est Projet Manhattan. Ce programme permettra aux Américains, aidés par les Anglais et les Canadiens, de mettre au point les deux bombes atomiques qui seront larguées sur le Japon (voir encadré p. 11).

Avec la recherche d'armes nucléaires, les effets des rayonnements et de la radioactivité ont définitivement échappé au monde scientifique et médical pour s'étendre au champ militaire, et l'innocence qui entourait les débuts de l'ère atomique va définitivement sombrer avec les explosions d'Hiroshima et de Nagasaki. Le contexte politique des années 1930 dans lequel les découvertes majeures sur l'énergie atomique ont eu lieu a encouragé au sein des milieux scientifiques, relativement à la technologie nucléaire, une culture du secret toujours palpable aujourd'hui.

Dans les années qui suivent le second conflit mondial, l'énergie nucléaire devient un symbole de puissance destructrice. Aux États-Unis, notamment, un groupe composé d'hommes politiques, de journalistes, de scientifiques et d'industriels va chercher à modifier cette image en donnant de l'"atome", comme on dit alors, une image positive. Ces défenseurs de l'atome répandent l'idée que les applications pacifiques de l'énergie nucléaire pourraient avoir des effets bénéfiques à la hauteur de son pouvoir destructeur. Cela prendra quelques années, car, avec les débuts de la guerre froide, les priorités vont d'abord au contrôle de la technologie nucléaire à des fins militaires.

Hiroshima et Nagasaki, le monde découvre l'enfer nucléaire

La première bombe atomique, *Little Boy*, lancée sur le centre d'Hiroshima le matin du 6 août 1945, à l'heure du marché, contenait de l'uranium fortement enrichi en isotope 235. Elle allait générer une énergie équivalente à l'explosion de 16 000 tonnes de TNT. La bombe lancée sur Nagasaki le 9 août, *Fat Man*, était à base de plutonium 239. Son explosion a dégagé une énergie plus forte encore, correspondant à environ 21 000 tonnes de TNT. Bien que plus puissante, elle a fait moins de victimes du fait de conditions géographiques qui ont protégé une partie des habitants de Nagasaki.

À Hiroshima, l'intense chaleur dégagée ainsi que les incendies, le souffle et les radiations ont fait 140 000 morts et 80 000 blessés sur une population d'environ 360 000 personnes. Pour la population de Nagasaki, qui comptait 250 000 habitants, l'estimation est de 70 000 morts et 80 000 blessés. Plusieurs hauts responsables américains, dont l'ancien secrétaire à la défense Robert Mac Namara, ont témoigné du fait que si les États-Unis n'avaient pas été vainqueurs, ces bombardements auraient été qualifiés de crimes de guerre. La quasi-totalité des victimes est civile. Parmi les 300 000 survivants, 280 000 ont été exposés aux radiations, a révélé un recensement japonais réalisé en 1950.

En janvier 2010, le journaliste américain Charles Pellegrino a présenté dans *The last train from Hiroshima*,

les témoignages des rescapés des explosions (Pellegrino 2010). L'un des témoins, Tsutomu Yamaguchi y déclare que les seules personnes autorisées à diriger un pays possédant l'arme nucléaire devraient être des mères allaitant leurs bébés.

Le 6 août 2010, à l'occasion de la commémoration du 65^e anniversaire de l'attaque nucléaire sur Hiroshima, un représentant des États-Unis, l'ambassadeur John Roos, et le secrétaire général des Nations unies Ban Ki-moon ont assisté pour la première fois à la cérémonie. Des Japonais ont appelé les États-Unis à présenter leurs excuses pour les bombardements atomiques, sans succès jusqu'à présent.

Quelques semaines après cette cérémonie du souvenir, les États-Unis ont effectué de nouveaux tests souterrains dits "subcritiques" (parce qu'ils n'entraînent pas de réaction en chaîne) dans leur centre d'expérimentation du Nevada. Les maires de Hiroshima et Nagasaki ont fait part de leur indignation et de leurs regrets, estimant ces essais contraires au souhait d'un monde sans arme nucléaire, exprimé par le président Obama lors de son discours de réception du prix Nobel de la paix.

En octobre 2011, les experts nucléaires américains ont achevé le démantèlement de la bombe la plus puissante de l'arsenal américain. La bombe B53 avait la capacité de libérer une énergie de 9 millions de tonnes de TNT, 500 fois la puissance de la bombe de Hiroshima.

1.2. Les essais nucléaires et la création des organismes de régulation

L'Atomic Energy Act, voté en 1946 par le Congrès américain, reflète l'état de tension avec l'Union soviétique. Cette législation crée un monopole gouvernemental virtuel sur l'énergie nucléaire en n'autorisant pas son usage pour des applications commerciales. Elle met l'accent sur les aspects militaires de l'énergie nucléaire, et souligne la nécessité du secret dans la recherche de nouvelles armes. Afin de gérer les programmes nationaux consacrés à l'énergie nucléaire, l'Atomic Energy Act établit la Commission américaine de l'énergie atomique.

Dans le même temps, un comité d'experts américains, le National Committee on Radiation Protection (NCRP), membre de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) abandonne l'ancien concept de *tolerance dose* pour adopter celui de dose maximale permmissible qui peut être définie, à la lumière des connaissances de l'époque, comme "une dose qui ne devrait pas causer un dommage corporel sensible au cours de la vie d'une personne" (USNRC 2010). La probabilité qu'un tel dommage

surviennne en dessous des limites autorisées n'est pas exclue, mais jugée tellement faible que le risque serait considéré comme acceptable par la moyenne des gens. En 1948, les experts du NCRP proposent, en accord avec le Comité international de protection contre les rayons X et le radium², de réduire la norme d'exposition pour le corps entier à 0,3 röntgen (R) pour six jours de travail par semaine, soit 15 R/an, ce qui représente la moitié de ce qu'elle était en 1934.

En 1949, l'Union soviétique procède à son premier essai nucléaire et, en 1952, c'est au tour du Royaume-Uni. Cette course à l'arme nucléaire provoquera dans ces deux pays des catastrophes longtemps cachées ou sous-estimées (voir encadré). Le monopole américain sur la technologie nucléaire a cessé et la montée des tensions liées à la guerre froide éteint définitivement l'espoir d'un monde sans armes nucléaires.

En décembre 1953, quelques mois après la mort de Staline, le président Eisenhower présente devant l'Assemblée générale des Nations unies le programme *Atoms for peace* qui marque un changement de cap radical de la politique américaine. La pièce maîtresse du discours d'Eisenhower est la proposition de création d'une organisation internationale pour promouvoir l'usage pacifique de l'énergie nucléaire, assurer sa régulation et vérifier qu'elle n'est pas utilisée à des fins militaires. Jusqu'alors, aucune autre nation, pas même en Europe, n'avait manifesté d'intérêt pour un contrôle international. Plusieurs pays étaient même plutôt soucieux d'acquérir "la bombe" au plus vite, plutôt que d'en prévenir la dissémination.

En décembre 1955, l'Assemblée générale des Nations unies crée le Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (*United Nations Scientific Commission of the Effects of Atomic Radiation*, en abrégé *Unscar*). Depuis sa création, l'Unscar, qui ne réunit que 21 des pays membres de l'ONU, a publié moins de 20 rapports, mais ceux-ci sont les témoins de l'évolution des connaissances en matière de rayonnements ionisants. Ils font autorité et influencent la politique d'organismes internationaux tels que l'Organisation internationale du travail (OIT), l'Organisation mondiale de la santé (OMS), et l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA).

L'AIEA, constituée en octobre 1956, est l'autre grand acteur international pour les questions nucléaires. Les objectifs assignés à l'AIEA consistaient principalement à :

- promouvoir l'utilisation de la science nucléaire dans les secteurs de la médecine, de l'agriculture et de l'énergie ;
- établir des normes de sécurité nucléaire, reconnues internationalement, en particulier pour le transport de matériels nucléaires ;
- assurer les échanges scientifiques et la formation des personnels appelés à travailler dans les installations nucléaires ;
- organiser une sorte de banque des matériels nucléaires ;
- mettre en place un corps de spécialistes et d'inspecteurs chargés du respect de la sécurité nucléaire.

Au sein de l'AIEA, un statut consultatif sera octroyé à 19 organisations non gouvernementales dont la Confédération internationale des syndicats libres et la Confédération mondiale du travail qui déclarent toutes deux leur intérêt à protéger les travailleurs contre l'exposition aux rayonnements.

2. Appelé Commission internationale de protection radiologique (CIPR) depuis 1950.

Le Kremlin dissimule, le Royaume-Uni minimise

En Union soviétique, la construction de grands réacteurs pour la production de plutonium à des fins militaires est lancée dans la plus grande discrétion dans le sud de l'Oural en 1947. Dix ans plus tard, le 29 septembre 1957, des nitrates et des acétates montés en température au fond d'une cuve de déchets hautement radioactifs provoquent une violente explosion dans le complexe nucléaire alors secret de Mayak. L'explosion, provoquée par un défaut du système de refroidissement du réservoir, contamine gravement toute la région. Dans les mois qui suivent, 11 000 personnes sont évacuées de manière définitive, plusieurs centaines de km² de terres deviennent inutilisables. La rivière Techa, proche du site, déjà très fortement contaminée depuis le début des années 1950 par les rejets radioactifs du complexe militaire (Degleva 2012), a été polluée encore davantage par les effluents radioactifs dus à l'accident. Environ 28 000 habitants des villages qui bordaient la rivière ont été contaminés. Les énormes rejets de 1950 et la catastrophe de Mayak, sept ans plus tard, ont été complètement étouffés par les autorités soviétiques jusqu'à ce qu'en 1976 le biologiste soviétique Jaurès Medvedev, réfugié à Londres, en révèle l'existence*.

Le président de l'Autorité britannique pour l'énergie nucléaire avait traité le récit de Medvedev de pure science-fiction. Et pourtant, c'est l'examen approfondi par Medvedev de nombreuses publications scientifiques consacrées à la contamination radioactive par du strontium 90 de lieux dont les noms étaient tus par leurs auteurs, qu'a pu être reconstitué ce qui s'était passé dans l'installation nucléaire soviétique au cours de l'automne 1957.

L'attitude sceptique des autorités britanniques vis-à-vis des révélations du dissident russe n'est guère étonnante, car le Royaume-Uni a lui aussi connu dans sa course à la bombe A un accident majeur. Le 9 octobre 1957, quelques jours après l'accident secret de Mayak, un incendie se déclare dans un réacteur de la filière à combustible en uranium naturel du site de Windscale (situé à Sellafield, nord-ouest de l'Angleterre), qui avait

été choisi par les autorités britanniques, dès la fin de la guerre, pour la fabrication des premières armes atomiques "made in UK". L'incendie durera plusieurs jours. Il a été estimé que 150 barres de combustible sur 1500 ont brûlé. En l'absence d'enceinte de confinement, de l'iode radioactif a été rejeté dans l'atmosphère, ainsi que du polonium et de petites quantités de plutonium. Heureusement, les filtres qui venaient d'être installés ont permis de réduire les rejets des radionucléides contenus dans le combustible. À la suite de ces rejets, les autorités décident d'interdire la consommation de certains aliments comme le lait. Deux millions de litres de lait seront jetés dans la mer d'Irlande.

Interrogées sur cet accident, couvert par le secret d'État, les autorités britanniques n'offrent que des réponses léni-fiantes. À l'époque, le gouvernement britannique d'Harold Macmillan est engagé dans des discussions délicates avec les États-Unis pour la reprise de la coopération sur la question des armes nucléaires. En janvier 1958, la United Kingdom Atomic Energy Authority publie un rapport qui affirme qu'"il est hautement improbable que l'accident ait eu des effets nuisibles sur la santé tant des travailleurs de Windscale que de la population des environs". Pendant plusieurs dizaines d'années, les conséquences de l'accident sont restées mal connues. En 2007, 50 ans après les faits, un rapport a estimé que la pollution avait été plus importante qu'admise à l'époque, et que le nuage radioactif avait pu être la cause de 240 cas de cancers supplémentaires par rapport au taux de cancer attendu parmi la population générale. Sur le site de Windscale, appelé aujourd'hui Sellafield, sont implantées plusieurs installations nucléaires (réacteurs nucléaires et plusieurs usines de retraitement du combustible) exploitées par le groupe BNG.

* Jusqu'à la fin des années 1980, les autorités soviétiques ont nié l'existence du désastre. Avec l'arrivée au pouvoir de Michaël Gorbatchev et la *glasnost*, et après l'accident de Tchernobyl, des scientifiques russes ont commencé à lever la chape du secret. En 1989, une réunion extraordinaire de l'AIEA est organisée à Vienne au cours de laquelle des physiciens russes apporteront des éclaircissements sur l'explosion de 1957 et la pollution de la rivière Techa (Vilanova 2007).

En mars 1957, les six pays fondateurs de l'Union européenne (Allemagne, Belgique, France, Italie, Luxembourg, Pays-Bas) signent à Rome deux traités instituant, d'une part, la Communauté économique européenne et, d'autre part, la Communauté européenne de l'énergie atomique ou Euratom. L'idée de base de l'Euratom est de "créer les conditions de développement d'une puissante industrie nucléaire, source de vastes possibilités d'énergie et d'une modernisation des techniques, ainsi que de multiples autres applications contribuant au bien-être de leurs peuples". Le traité met en place un système de contrôle destiné à garantir que les matières nucléaires civiles ne soient pas détournées à d'autres fins (militaires principalement). Un corps de 300 inspecteurs, appelés à se rendre dans les installations nucléaires des États membres, pour y faire constats et prélèvements, est constitué à cet effet. Le traité prévoit aussi la proposition de normes harmonisées pour la radioprotection (voir chapitre 3).

À la fin des années 1950, les institutions internationales, américaines et européennes chargées de la promotion et du contrôle de l'énergie nucléaire sont donc en place. Pour l'AIEA, le démarrage s'avère difficile. Installée à Vienne, dans une ville encore partiellement en ruines, l'agence est soupçonnée d'abriter des agents de plusieurs services secrets. La guerre froide sera parfois plus violente au sein de l'AIEA qu'à la tribune des Nations unies.

Pendant plusieurs années, l'attention de l'AIEA sera polarisée sur la polémique grandissante autour des retombées des essais atomiques et la non-prolifération des armements nucléaires. Les essais nucléaires effectués par les États-Unis, la France, le Royaume-Uni et l'Union soviétique produisent des retombées de fines poussières radioactives qui se dispersent parfois très loin des sites de tirs sur des zones peuplées. Des scientifiques font part publiquement de leurs craintes. Les retombées radioactives deviennent un sujet de débat dans la presse et dans le monde politique. L'attention de l'opinion est attirée sur les risques potentiels de faibles doses de radiation et sur l'ignorance des scientifiques quant à leurs effets sur la santé.

Un graphique réalisé par le Centre de l'énergie nucléaire de Mol, en Belgique, confirme l'augmentation de la radioactivité de l'air atmosphérique contaminé par les retombées d'éléments radioactifs et, avec un décalage dans le temps d'environ deux ans, celle de la charge corporelle en césium 137 parmi la population. La contamination des êtres humains se faisant progressivement via l'air, l'eau et la chaîne alimentaire. Cette contamination a atteint un pic au milieu des années 1960. Deux ans après la catastrophe de Tchernobyl, le centre nucléaire de Mol observera également une élévation de la contamination humaine par le césium 137.

À la fin des années 1950, en réponse aux inquiétudes du public, le NCRP américain et la CIPR entament une nouvelle révision de leurs normes et abaissent les niveaux d'exposition autorisés, tout en insistant sur le manque de preuve du risque représenté par les niveaux d'exposition préalablement recommandés. Le rad, équivalant à $1/100^{\text{ème}}$ de joule par kg de matière, devient l'unité de dose, et les nouvelles normes d'exposition sont exprimées en rem (rad équivalent man), une unité de mesure qui évalue les effets potentiels des doses de rayonnements sur l'homme. La dose moyenne limite d'exposition pour les travailleurs, sur une durée d'un an, est fixée à 5 rem, et pour la population à 0,5 rem, soit respectivement 2,5 et 5 fois supérieure aux doses maximales fixées aujourd'hui dans l'Union européenne (voir p. 44). Ces nouvelles normes ont été intégrées dans la législation des États-Unis à partir de janvier 1961. Par la suite, et pendant de nombreuses années, les autorités américaines ne modifieront pas leurs normes, ne montrant aucun empressement à suivre l'évolution des recommandations de la CIPR.

Les retombées des essais nucléaires

Les essais nucléaires réalisés dans l'atmosphère ont représenté pour la population mondiale la source la plus significative d'exposition environnementale aux radiations ionisantes créées par l'homme. Ils se sont déroulés de 1945 à 1980. Selon le Comité scientifique des Nations unies sur les effets des rayonnements atomiques (Unsear), 543 essais auraient été effectués dans l'atmosphère pendant cette période: 219 par l'Union soviétique, 197 par les États-Unis, 45 par la France, 22 par la Chine et 21 par le Royaume-Uni. Les explosions ont été réalisées à partir de sites les plus divers (montagnes, tours, barges, avions, ballons, etc.) pour une puissance de tir totale de 440 mégatonnes. Les 25 essais d'une puissance supérieure à quatre mégatonnes chacun représentent environ 66 % de la puissance totale des explosions: un essai chinois en 1976, 11 essais américains entre 1954 et 1956 au large de l'océan Pacifique, 13 essais soviétiques entre 1961 et 1962 en Nouvelle-Zemble (archipel de l'océan Arctique russe). L'Union soviétique détient le record de puissance avec une explosion de 50 mégatonnes, soit 2380 fois la puissance de la bombe de Nagasaki.

Les débris et poussières radioactives provoqués par ces tirs, une masse estimée à environ 160 000 tonnes, se sont déposés jusqu'à plusieurs milliers de kilomètres des sites d'explosion. Les poussières radioactives libérées par ces essais ont contaminé plus particulièrement l'hémisphère nord où pratiquement tous les tirs se sont déroulés. Parmi les éléments radioactifs dispersés, on

trouve notamment le césium 137 et le strontium 90, des éléments radioactifs très persistants. La radioactivité liée aux essais nucléaires a été maximale en 1963, mais elle est toujours mesurable. En ce qui concerne le césium 137, elle n'avait faibli que de la moitié en 2000.

L'hypothèse d'une augmentation des cancers à l'échelon mondial à la suite des essais nucléaires est l'objet d'intenses controverses. Autour du site de Semipalatinsk, au nord-est du Kazakhstan, où l'Union soviétique a effectué 118 tests atmosphériques (dont 26 à proximité du sol), une augmentation des cancers a été observée: d'abord des leucémies chez les enfants, puis plus tard des cancers dits solides (seins, thyroïde, poumon, système digestif, etc.). Aux États-Unis, après la prise en charge des maladies des militaires ayant participé aux essais nucléaires, les conséquences sanitaires (notamment la survenue de certains cancers) pour les populations concernées par les essais effectués au Nevada sont indemnisées depuis le début des années 1990. Les conséquences pour les personnes civiles et militaires présentes sur les sites des essais nucléaires effectués par la France, au Sahara et en Polynésie, commencent à être étudiées. En 2010, une loi a permis, à certaines conditions, l'indemnisation des victimes civiles et militaires des essais nucléaires français (voir annexe 3). Quant aux suites des essais britanniques dans les déserts australiens, elles n'ont pas fait l'objet d'une réglementation spécifique au Royaume-Uni. L'Australie, quant à elle, dispose depuis 2010 d'une proposition d'indemnisation qui concerne le personnel militaire australien, mais pas les résidents.

1.3. Le développement de l'énergie nucléaire et sa contestation

À la suite du programme Atoms for Peace, le Congrès américain vote, en août 1954, l'Atomic Energy Act qui met fin au monopole gouvernemental et fait du développement d'une industrie nucléaire privée, à des fins commerciales, un objectif national de première importance. La Commission de l'énergie atomique des États-Unis (AEC) est chargée d'encourager l'usage de l'énergie nucléaire et, simultanément, d'assurer les conditions de sa sécurité. Un rôle ambigu qui sera à l'origine des nombreuses critiques formulées plus tard contre l'AEC. D'autant que, dans les premiers temps, le développement des technologies nucléaires civiles se fait sous tutelle militaire.

Dans le cadre du programme Atoms for Peace, l'armée américaine développe un programme d'études sur la technique de l'irradiation des aliments et ses conséquences pour la santé, dont le but est de lutter contre la faim dans le monde en protégeant les récoltes des

parasites et de la germination. Ce programme sera ensuite repris par un comité conjoint de l'AIEA, de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), rejoint plus tard par Euratom. Le développement de l'énergie nucléaire civile se fera aussi en collaboration avec le secteur militaire : le premier réacteur nucléaire de production d'énergie, développé par la société Westinghouse, sera expérimenté dans les sous-marins de l'armée américaine (Eggermont 2011).

Au début des années 1960, aux États-Unis, un public sensibilisé marquera son opposition aux rejets en mer de déchets radioactifs de faibles activités, autorisés sous certaines conditions par l'AEC, ainsi qu'à la construction de centrales nucléaires à New York et sur la baie de Bodega en Californie. Malgré des opinions publiques plutôt hostiles au nucléaire, les années 1960 seront celles du boom de la construction des centrales. La contestation va monter aux États-Unis et les critiques à l'encontre de l'AEC finiront par avoir raison d'elle. Des scientifiques connus, notamment John Gofman et Arthur Tamplin, qui travaillent dans un laboratoire de recherche financé par l'AEC elle-même, interviennent dans le débat pour dénoncer la norme applicable pour la population générale. Ces scientifiques calculent que si toute la population américaine y était exposée, plusieurs dizaines de milliers de cancers supplémentaires surviendraient annuellement. Ils dénoncent la philosophie sous-jacente de l'AEC en des termes assez vifs : "l'AEC nous dit qu'il y a un risque, mais elle espère que les bénéfiques surpasseront le nombre des morts (...) c'est un meurtre légalisé, la seule question est : combien de meurtres ?" (USNRC 2010).

Les étapes dans la mise en œuvre de la radioprotection

1. Le Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (Unsecar) coordonne les débats de fond sur l'analyse des risques présentés par l'utilisation des rayonnements ionisants. Des comités d'experts participent également aux débats : pour les États-Unis, le comité sur les effets biologiques des radiations ionisantes (BEIR), pour l'Union européenne, le groupe d'experts prévu par l'article 31 du traité Euratom.
2. La Commission internationale de protection radiologique (CIPR) traduit les avancées scientifiques en recommandations sur les niveaux de doses et les pratiques à mettre en œuvre pour optimiser la prévention et minimiser les risques.
3. L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), à l'échelle planétaire, et l'organisation Euratom, au niveau européen, formulent les règles de base de la radioprotection et sont chargées de l'observation et du contrôle des règles édictées (voir chapitre 3). Dans chaque pays européen, des agences nationales sont responsables du suivi et du contrôle de l'activité nucléaire.

En 1974, le Congrès dissout l'AEC et crée la US Nuclear Regulatory Commission (NRC), dont la fonction se limite désormais à la sécurité et à la protection de la santé publique. Après l'accident survenu dans la centrale nucléaire de Three Mile Island (Pennsylvanie) le 28 mars 1979, la NRC décide de suivre les recommandations de la CIPR et divise par cinq la limite annuelle d'exposition de la population générale à des rayonnements ionisants due à des activités humaines qui est désormais fixée à 0,1 rem, soit 1 millisievert par an (voir encadré, p. 23), ce qui correspond à la limite adoptée par la directive Euratom sur la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants (JOCE 1996).

En Europe, la contestation de l'énergie nucléaire prendra forme au milieu des années 1970. Après l'accident de Three Mile Island en 1979, elle portera sur l'ensemble du cycle du combustible nucléaire. Elle se renforcera après la catastrophe de Tchernobyl de

1986. En 1997, des députés européens soutiennent la création du Comité européen sur le risque de l'irradiation (CERI)³ qui se veut un contrepoids à l'influence des organismes internationaux, comme l'Unsear et la CIPR, sur les décisions politiques. En 2003, le CERI rend publique une méthode alternative d'évaluation des risques liés à l'exposition aux rayonnements ionisants qui tiendrait mieux compte des données biologiques, épidémiologiques et environnementales.

Cette mise en question des modèles officiels d'évaluation des risques du nucléaire s'est déroulée en parallèle à l'introduction du principe de précaution et obligera les organismes internationaux à accepter la discussion.

1.4. La CIPR, gardienne du temple nucléaire, forcée d'évoluer

La Commission internationale de protection radiologique (CIPR) est une association à but non lucratif, ayant son siège au Royaume-Uni. Son secrétariat scientifique est actuellement basé à Ottawa (Canada). Créée en 1928 par la Société internationale de radiologie, elle s'appelait à l'origine le Comité international de protection contre les rayons X et le radium. La CIPR est soutenue par plusieurs organisations internationales et de nombreux gouvernements. Elle est financée par des dons. Une partie des fonds provient des droits d'auteur liés à ses publications, ainsi qu'à des contrats. La CIPR a un rôle consultatif: elle établit notamment des "recommandations" sur les principes de la radioprotection et rédige des guides sur lesquels peut se fonder la pratique concrète de la radioprotection dans les différentes utilisations des rayonnements ionisants. Elle ne produit pas de lois ou de règlements, ceux-ci sont de la responsabilité des organisations internationales et nationales et des États. À intervalle régulier, tous les 15 ans environ, la Commission procède à une révision de ses recommandations.

En créant cet organisme, la profession médicale avait souhaité un organisme de conseil en matière de radioprotection, le secteur de la santé étant le domaine où, à l'époque, la plupart des expositions aux rayonnements ionisants pouvaient se produire. Après la guerre, la CIPR a eu d'autres objectifs, notamment celui d'évaluer les risques de l'utilisation militaire de l'énergie nucléaire. Lauriston Taylor qui a présidé au développement de la CIPR et l'a dirigée de 1953 à 1969 est aussi le créateur, en 1946, du NCRP américain qu'il présidera pendant plusieurs décennies. Cela vaudra à la CIPR le reproche d'être influencée par le lobby militaire nucléaire.

1.4.1. Le concept de la relation dose-effet linéaire sans seuil

Avant les années 1960, les recommandations de la CIPR avaient été élaborées en fonction de doses maximales permises. Dans ce contexte, la seule contrainte pour les opérateurs mettant en œuvre des rayonnements ionisants était de veiller à ce que l'exposition des personnes ne dépasse pas les limites définies par les autorités de régulation. Il ne leur était pas demandé de minimiser l'exposition. Sous la pression de scientifiques, notamment des prix Nobel Bertrand Russell et Joseph Rotblat, la CIPR est forcée de s'intéresser aux effets d'une contamination faible, mais diffuse. En 1966, pour la première fois, elle reconnaît officiellement le principe de la relation dose-effet linéaire sans seuil. Ce faisant, la CIPR admet

3. Le CERI a été constitué en 1997 à la suite d'une résolution adoptée lors d'une conférence organisée par le groupe des Verts au Parlement européen à Bruxelles. Sa première présidente était Alice Stewart, une scientifique de renom qui, la première, a mis en évidence les risques pour le fœtus présentés par les radiographies pratiquées sur des femmes enceintes.

qu'il n'existe pas de seuil connu en dessous duquel il n'y aurait pas d'effet lié aux radiations ionisantes. Elle admet également que les faibles doses entraînent un risque de cancer faible sans doute, mais proportionnel à la dose.

L'élaboration du concept de relation dose-effet linéaire sans seuil a amené la CIPR à mettre la recherche de la réduction de l'exposition au cœur de la radioprotection, et à définir le principe ALARA.

1.4.2. Le principe ALARA

Le terme ALARA vient de l'expression *As Low As Reasonably Achievable*, traduite en français par "aussi bas que raisonnablement possible".

En 1959, la CIPR écrivait : "L'attitude la plus prudente serait d'admettre qu'il n'y ait ni seuil ni restauration (des effets nocifs), auquel cas, même de faibles doses accumulées pourraient induire une leucémie chez certains individus prédisposés, et l'incidence pourrait être proportionnelle à la dose accumulée", et la Commission concluait : "(...) il est donc hautement recommandé de maintenir les doses d'exposition aussi bas qu'il est praticable et d'éviter toute exposition inutile" (ICRP 1959). S'il n'existe pas de seuil, et donc pas de dose sans danger, aussi petite soit-elle, et si ces doses s'accumulent, il faut réduire au niveau le plus bas les doses auxquelles la population est exposée, que ce soit dans le cadre d'une exposition environnementale ou d'une exposition professionnelle aux rayonnements ionisants.

En 1965, la CIPR avait arrêté la formule "aussi bas que possible", mais en 1977 la CIPR décida de nuancer ce concept pour recommander une réduction des doses individuelles et collectives à un niveau : "aussi bas que raisonnablement possible compte tenu des facteurs économiques et sociaux" (CIPR 1977). Cette formulation est restée inchangée. Elle indique un calcul utilitaire. Il s'agissait pour la CIPR de prendre en compte le coût économique et social des pratiques de réduction des doses et pas seulement le seul objectif de réduction des doses, quel qu'en soit le coût. ALARA admet le risque si ce risque est raisonnable, acceptable. Mais qu'entend exactement par acceptable ?

L'acceptabilité d'un risque est variable suivant les intérêts en jeu, selon les catégories de la population (le public versus les travailleurs, par exemple). Elle évolue dans le temps selon le jugement lié à la perception du risque. "Un risque négligeable n'est pas nécessairement acceptable. Un risque acceptable n'est pas nécessairement négligeable. En décider implique des jugements de valeur, des évaluations", écrivait en 1988 Bo Lindell, l'ancien président de l'Unsear (Lindell 2008). Et de poser des questions telles que : acceptable pour qui ? acceptable pour quoi ?

En ce sens, ALARA n'est pas qu'un concept utilitaire. Il permet de dépasser le seul calcul économique coût-bénéfice qui est insuffisant à résoudre deux problèmes fondamentaux : l'acceptation du risque par les personnes exposées, et leur implication dans une stratégie collective de sécurité (Eggermont 2008).

1.4.3. Les principes de justification et d'optimisation

Le principe ALARA adopté, la CIPR a progressivement élaboré des outils pour le mettre en place. En 1977, elle a introduit dans ses recommandations, à côté des limites de doses, les principes de justification et d'optimisation.

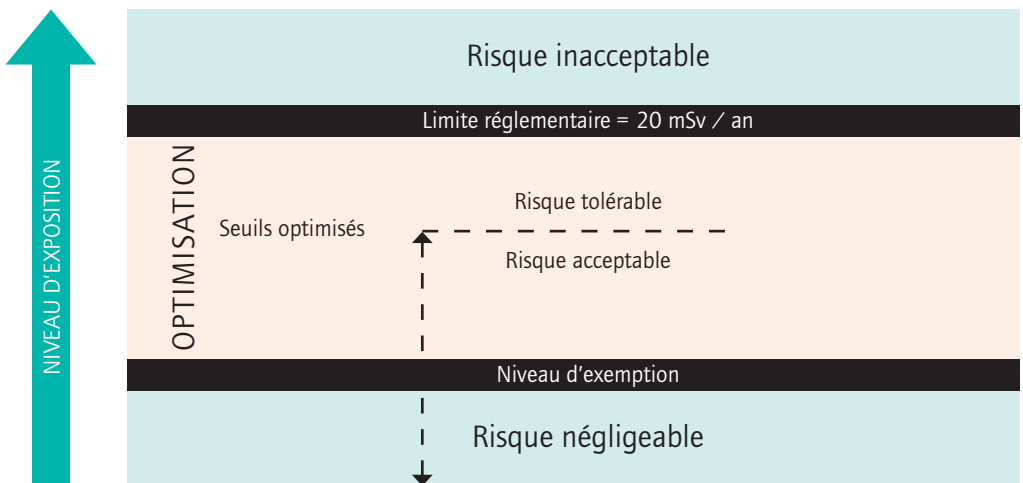
La justification signifie qu'avant toute exposition aux rayonnements ionisants, il faut en évaluer le bien attendu par rapport au risque encouru. Ce principe répond à la question de l'acceptation du risque par les personnes exposées.

L'optimisation signifie que le risque encouru doit être rendu le plus faible possible. Ce second principe répond à la demande d'amélioration de la sécurité (voir chapitre 2).

L'élaboration du concept ALARA a précédé la formulation du principe de précaution. Dans sa définition européenne actuelle, le principe de précaution oblige les autorités et le public à prendre en compte l'hypothèse du risque, sans attendre une confirmation scientifique absolue, pour adopter des mesures de prévention. Pour certains experts de la radioprotection, le concept ALARA va plus loin que le principe de précaution, car il donne une direction à l'action et indique le chemin à suivre.

Dans le but de développer et de répandre la culture ALARA, la Commission européenne a financé le lancement, en 1996, du Réseau européen ALARA (European ALARA Network), initié par une association française, le Centre d'étude sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire (CEPN), et l'organisation gouvernementale britannique du National Radiological Protection Board (NRPB). Ce réseau est aujourd'hui une association à but non lucratif dont les objectifs ne sont plus seulement l'amélioration des conditions de travail dans l'industrie, mais incluent d'autres secteurs tels que le secteur médical et celui des matériaux de construction⁴.

Figure 1 ALARA et le modèle de l'acceptabilité du risque



Source : CEPN

4. Pour en savoir plus, consultez www.eu-alara.net.

Ce qu'il faut retenir

Découverts presque simultanément à la fin du XIX^e siècle, les rayons X et la radioactivité vont connaître un essor fulgurant, débouchant très rapidement sur des applications médicales et industrielles. Aveuglés par cette véritable révolution scientifique, les médecins et chercheurs refuseront longtemps, à l'image de Marie Curie, de reconnaître, à côté des bienfaits qu'ils apportent, les conséquences sanitaires néfastes des rayons X, et plus généralement de la radioactivité. L'utilisation à des fins militaires des connaissances scientifiques sur les rayonnements ionisants, qui débouchera sur les bombardements de populations civiles à Hiroshima et Nagasaki, marque la fin de ce climat d'insouciance. Mais, dans le nouveau contexte créé par la guerre froide, le déploiement d'armes nucléaires au potentiel destructeur massif reprend rapidement.

La relance des développements à des fins civiles sera plus lente, mais connaîtra un engouement mondial lié aux immenses besoins énergétiques lors des Trente Glorieuses. Les risques sanitaires induits par l'essor du nucléaire civil ne seront abordés que dans le cadre feutré d'institutions internationales spécialisées. La contestation des technologies nucléaires, notamment après l'accident de Three Mile Island et la catastrophe de Tchernobyl, n'a pas ralenti le recours aux rayonnements ionisants. Elle a cependant obligé les institutions chargées de la radioprotection à progresser dans la voie d'une meilleure prise en compte des risques de leur utilisation. Les événements qui se sont produits dans la centrale nucléaire de Fukushima, à la suite du tsunami survenu au Japon en mars 2011, vont sans doute provoquer un réexamen des concepts actuels en matière d'évaluation et de maîtrise du risque nucléaire.

Chapitre 2

Les radionucléides et leurs rayonnements

Une participation crédible au débat sur les enjeux réglementaires et sanitaires liés aux applications industrielles des rayonnements ionisants requiert une vue précise du cadre théorique général dans lequel ces technologies s'inscrivent. Le rappel de quelques notions élémentaires de physique nucléaire s'avère donc indispensable.

2.1. Les rayonnements ionisants et la mesure de leurs effets

Tous les corps sont composés d'atomes. Un atome est constitué d'un noyau autour duquel gravitent des électrons. Le noyau est formé de deux types de particules : les protons et les neutrons. Les atomes sont électriquement neutres : il y a autant d'électrons (charge négative) qu'il y a de protons (charge positive) dans le noyau. Certains noyaux sont instables et se désintègrent spontanément en émettant des particules dont le flux constitue un rayonnement porteur d'énergie. Les éléments chimiques dont le noyau se désintègre spontanément sont dits radioactifs. On les appelle radioéléments (nom réservé aux éléments naturels radioactifs) ou radionucléides (isotopes radioactifs artificiels ou naturels).

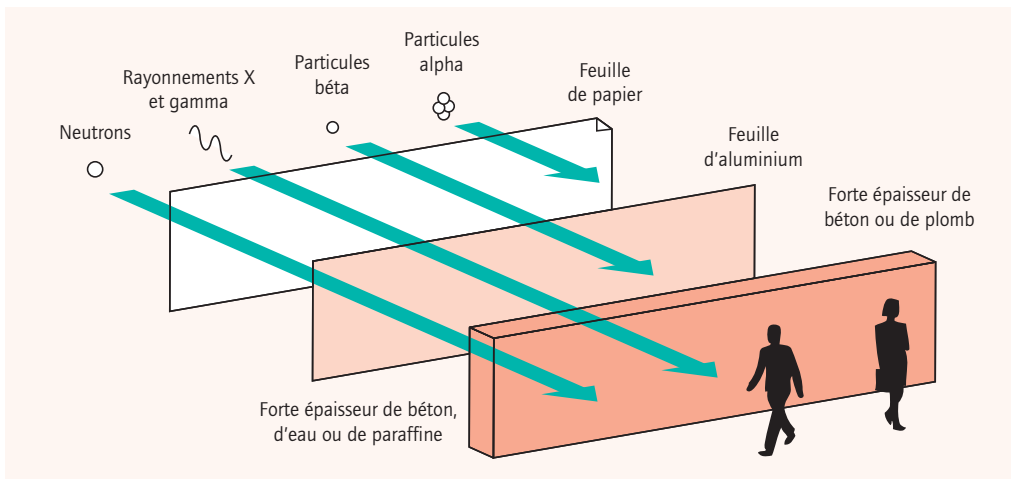
Un atome est caractérisé par son numéro atomique (qui correspond au nombre de protons dans le noyau) et par son nombre de masse (somme des neutrons et des protons du noyau). Des atomes ayant le même numéro atomique mais un nombre de masse différent sont appelés isotopes. Ainsi, l'uranium naturel est composé de trois isotopes qui sont tous trois radioactifs : l'uranium 238, l'uranium 235, et l'uranium 234. Certains éléments chimiques naturels comme le carbone, le sodium ou le potassium comportent en plus de leurs isotopes stables, un isotope radioactif (le carbone 14, le sodium 22 et le potassium 40).

Les radionucléides sont créés artificiellement (il en existe plus de 3 000 connus), soit en irradiant des éléments naturels avec des faisceaux de particules ou des rayonnements électromagnétiques, soit lors de la fission de l'uranium 235, du plutonium 239 ou du curium 244 par exemple. Il existe également des radionucléides créés lors du bombardement d'éléments stables par le rayonnement cosmique émis par la galaxie et le soleil, comme le tritium, le béryllium 7, le carbone 14 et le sodium 22.

Les rayonnements chargés électriquement, rayonnements alpha et bêta, sont dits directement ionisants, car ils arrachent des électrons à la matière dans laquelle ils se propagent. Ils ont un parcours relativement court et sont arrêtés par une feuille de papier pour les rayonnements alpha et par quelques millimètres de métal pour les rayonnements bêta les plus énergétiques. Les premiers traversent les couches superficielles de la peau, les seconds pénètrent les tissus vivants avec des parcours qui se mesurent en millimètres. Dans le cas où les radionucléides émetteurs alpha ou bêta sont incorporés dans l'organisme, par inhalation ou ingestion, ils abandonnent la totalité de leur énergie dans l'organe ou le tissu où ils se sont déposés.

Les rayonnements non chargés électriquement sont soit des rayonnements corpusculaires, comme les neutrons, soit des rayonnements électromagnétiques X et gamma émis au cours de désintégrations radioactives ou produits par des appareils électriques générateurs de rayonnements⁵. Ils sont dits "indirectement ionisants" car ils agissent, lors de leurs interactions avec la matière, en cédant tout ou partie de leur énergie à des particules chargées qu'ils mettent en mouvement. Ils sont très pénétrants et peuvent traverser le corps humain. Des écrans protecteurs constitués par des épaisseurs de béton, de verres au plomb, d'acier ou de plomb sont utilisés pour arrêter les rayons X et gamma, des écrans en paraffine ou en bore pour les neutrons. Les épaisseurs d'écrans requises dépendent notamment de l'énergie des rayonnements et de la nature de l'écran.

Figure 2 Les différents types de rayonnements ionisants et leur pouvoir pénétrant



Source : www.developpement-durable.gouv.fr

5. Pour des raisons historiques, les photons du rayonnement ionisant (de nature électromagnétique) émis par un noyau excité sont appelés rayonnement gamma et ceux émis par des appareils électriques sont appelés rayonnement X (en hommage à Röntgen).

L'exposition aux rayonnements est externe lorsqu'elle provient d'une source extérieure à l'organisme. Le niveau d'irradiation est alors en rapport avec le pouvoir de pénétration dans le corps des rayonnements émis par la source. Sont à prendre en compte, les rayonnements X, bêta, gamma et neutroniques. L'exposition est interne lorsque des éléments radioactifs ont pénétré l'organisme par inhalation ou ingestion, notamment sous forme de gaz ou d'aérosols. Les rayonnements alpha, peu dangereux en exposition externe, sont très nocifs en exposition interne (à dose délivrée égale, ils sont alors 20 fois plus nocifs que les rayonnements bêta ou gamma).

Les principales unités de mesure utilisées en radioprotection

Les unités utilisées en radioprotection font appel à des rapports de grandeurs usuelles mesurables comme le temps, la masse ou l'énergie, mais également à des concepts qui conduisent à des unités non directement mesurables comme "la dose efficace" qui est un indicateur du risque potentiel de survenue d'un cancer.

Le becquerel (Bq) sert à mesurer l'activité d'une source radioactive. Quand un atome radioactif se désintègre, il émet des rayonnements ionisants. L'activité représente le nombre de désintégrations nucléaires spontanées qui ont lieu dans une quantité de matière donnée, dans un laps de temps déterminé. Un becquerel est égal à une désintégration par seconde. Le becquerel est utilisé pour désigner l'activité d'une source, mais aussi une activité volumique (Bq par mètre cube), de surface (Bq par mètre carré), ou de masse (Bq par litre ou par kilogramme suivant le type de contamination, air ou eau, surface, matière). Le becquerel remplace le curie (Ci) qui était défini comme l'activité d'un gramme de radium soit 37 milliards de désintégrations à la seconde. Un curie équivaut donc à 37 milliards de becquerels.

Le gray (Gy) est l'unité de mesure de la dose absorbée. Toute substance ou personne exposée à une source radioactive absorbe une partie de l'énergie associée à ce rayonnement. Le gray correspond à une quantité d'énergie égale à un joule absorbée par une unité de masse d'un kilogramme. Un gray (Gy) est égal à 1 joule/kilogramme (J/kg). Lorsqu'on exprime une dose en gray, il est nécessaire de préciser le milieu dans lequel l'énergie est cédée (air, tissus humains, fer, etc.). Le gray par heure (Gy/h) permet de mesurer le débit de dose absorbée par

unité de temps. Le gray remplace le rad. Comme le rad est égal à 1/100ème de joule par kg, 1 gray est égal à 100 rads.

Le sievert (Sv) est l'unité de la dose équivalente, c'est à dire de la dose absorbée (gray) multipliée par un facteur de pondération radiologique (WR). Car les matières radioactives, les générateurs électriques et les réacteurs nucléaires produisent différents types de rayonnements (alpha, bêta, X ou gamma) qui à dose absorbée égale produisent, à l'échelle microscopique, des effets biologiques différents. Selon le type de rayonnement, on obtient la dose équivalente à l'organe ou au tissu considéré pour ce type de rayonnement. Le sievert est également utilisé pour mesurer la dose efficace (ou effective). Celle-ci est définie comme la somme des doses équivalentes des principaux organes du corps humain. À chaque organe important est en effet attribué un facteur de pondération différent, le *tissue weighting factor* (WT). Ce facteur de pondération prend en compte la probabilité de développer notamment un cancer mortel induit par des rayonnements ionisants (et la réduction moyenne de la durée de vie due à ce cancer). La dose efficace correspond à l'évaluation d'une dose pour le corps entier. Ce n'est pas une grandeur physique mesurable: elle résulte d'un calcul. En radioprotection, c'est d'abord la dose efficace qui est utilisée pour fixer des limites de dose et pour évaluer les risques pour la santé d'une personne. Il existe également des limites de doses spécifiques à certains organes. Le sievert remplace le rem, un sievert (Sv) est égal à 100 rems. Les facteurs de pondération WR et WT sont définis par des commissions de la CIPR. Le sievert est l'unité utilisée pour la mesure des expositions subies par la population générale, les travailleurs ou les patients. Ces expositions sont habituellement de l'ordre de quelques millisieverts (mSv).

Les expositions d'origine professionnelle sont souvent des expositions externes, mais certains travailleurs sont potentiellement soumis à une exposition interne par l'absorption de particules radioactives comme dans le cas d'une exposition au radon (voir encadré p. 25). L'exposition reçue dépend de la nature du rayonnement, de la distance de la source, de la durée d'exposition et de l'efficacité de la protection.

Les unités de mesure utilisées dans le domaine de la radioactivité sont principalement : le becquerel (Bq) pour l'intensité de la source radioactive elle-même ; le gray (Gy), pour l'énergie communiquée par les rayonnements émis par la source radioactive ; le sievert (Sv) pour les effets qui peuvent résulter de l'exposition à ces rayons. Ces unités sont reconnues internationalement et remplacent les anciennes unités dénommées respectivement curie, rad, rem (voir encadré p. 23).

2.2. Les effets biologiques et sanitaires

2.2.1. Les expositions

L'exposition aux rayonnements ionisants peut être d'origine naturelle, artificielle (industrielle ou médicale) ou environnementale (du fait des essais atomiques, des rejets liquides et gazeux des installations nucléaires, etc.).

L'exposition aux rayonnements naturels est d'origine cosmique ou tellurique. Le soleil, qui est le siège de réactions de fusion et de fission nucléaire, émet des rayonnements de très haute énergie, très pénétrants, qui vont interagir avec la couche d'air, d'épaisseur variable, qui entoure la terre. Ce rayonnement primaire émis par le soleil et le rayonnement secondaire, qui résulte du choc des particules de haute énergie avec les atomes de l'atmosphère (l'oxygène et l'azote), constitue une des deux composantes du rayonnement cosmique. La deuxième composante vient de la galaxie et provient d'explosions d'étoiles arrivées en fin de vie. Le flux de particules du rayonnement cosmique varie selon l'altitude (il double tous les 1 500 mètres environ) et la latitude (il est plus élevé aux pôles, où la couche d'air est la plus faible, qu'à l'équateur).

Le rayonnement tellurique provient des radionucléides à vie très longue, particulièrement émis par les radionucléides de l'uranium, du thorium et du potassium, présents dans la croûte terrestre depuis la formation de la terre, il y a environ 4,5 milliards d'années, et dans certains matériaux de construction.

L'exposition d'origine tellurique peut être externe. Dans ce cas, il s'agit de rayonnement gamma émis par la désintégration des radionucléides de la croûte terrestre (principalement par le potassium 40). L'intensité est variable suivant les régions, elle est plus élevée dans les régions granitiques comme le Massif Central en France. Parmi les régions du monde où l'irradiation naturelle est la plus importante, citons le Kerala en Inde, le Guangdong en Chine, Ramsar en Iran ou encore en Europe, le sud de la Toscane et les Alpes suisses (UNSCEAR 2000).

L'exposition d'origine tellurique peut également être interne par l'absorption de petites quantités de radionucléides via les aliments (carbone 14 et potassium 40) ou l'eau, mais surtout par inhalation de radon ou de thoron, gaz radioactifs provenant de la désintégration respectivement de l'uranium et du thorium (voir encadré p. 25). En Europe, les Ardennes belges, la République tchèque, la Suède et la Finlande sont particulièrement concernées par le risque radon.

Selon le Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (Unsear), l'exposition moyenne de la population mondiale due à l'irradiation

naturelle est de 2,4 millisieverts par an (mSv/an). Elle peut varier de 1 à 10 mSv/an, et parfois plus, suivant le lieu où l'on habite. On estime qu'environ 65 % des personnes ont un niveau d'exposition à l'irradiation naturelle se situant entre 1 et 3 mSv/an, 25 % ont un niveau d'exposition inférieur à 1mSv/an, et 10 % un niveau d'exposition supérieur à 3 mSv/an. Plus de la moitié de l'irradiation naturelle serait due au radon.

L'exposition aux rayonnements artificiels liée aux activités humaines vient s'ajouter à l'irradiation naturelle. Jusqu'il y a peu, on considérait que la dose d'irradiation moyenne subie par l'ensemble de la population mondiale était constituée à environ 82 % par l'irradiation naturelle et à 18 % par l'irradiation due aux activités humaines. Ce qui correspondait à une irradiation supplémentaire de 0,6 mSv/an en moyenne pour l'ensemble de la population mondiale, dont la plus grande partie à la suite d'actes médicaux.

Le radon, un gaz radioactif davantage pris en compte

Partout sous la terre, on trouve de l'uranium en quantité variable, généralement très faible. Dans une roche normale, on trouve en moyenne trois grammes d'uranium par tonne. L'uranium se concentre préférentiellement dans les granites, les schistes, les craies phosphatées. C'est un élément radioactif qui n'arrête pas de se transformer depuis la formation de la planète. Le radon est un gaz radioactif issu de la désintégration de l'uranium. Le radon lui-même se transforme. Son produit de décroissance le radon 222 a une période radioactive suffisamment longue (près de 4 jours) pour lui permettre de migrer à l'air libre par des fractures, des fissures, des cours d'eau, au travers de la porosité des roches et du sol. Le radon en se désintégrant donne naissance à de très fines particules solides radioactives respirables. Celles-ci se déposent dans les poumons où elles poursuivent leur désintégration en délivrant des particules alpha d'énergie élevée qui irradient les cellules constitutives des bronches.

Le radon a été classé cancérigène par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) en 1987. Le radon est évidemment présent dans l'atmosphère des mines d'uranium, mais certains bâtiments, certaines maisons mal ventilées, peuvent être des pièges à radon. Le radon fait partie des huit cancérigènes les plus souvent rencontrés dans le milieu de travail. Les mineurs sont particulièrement concernés, mais ils ne sont pas les seuls. Selon la base de données Carex (Carcinogen Exposure), dans l'Europe des Quinze, 2,7 millions de travailleurs étaient exposés au radon entre 1990 et 1993. Dans

un rapport publié en 2010, le Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (Unsear) estime que 13 millions de travailleurs dans le monde sont exposés professionnellement à des sources naturelles d'irradiation, essentiellement dans les mines.

L'Organisation mondiale de la santé (OMS) recommande des niveaux de référence de radon de 100 Bq/m³ et, en tout cas, de ne pas dépasser 300 Bq/m³. L'OMS estime que le risque de cancer du poumon augmente de 16% par tranche supplémentaire de 100 Bq/m³. La CIPR considère désormais qu'une contamination par le radon de l'ordre de 300 Bq/m³ correspond à une dose annuelle subie de 10 mSv. Le facteur de conversion utilisé par la CIPR est remis en cause par certains experts et la dose réellement subie pourrait être supérieure.

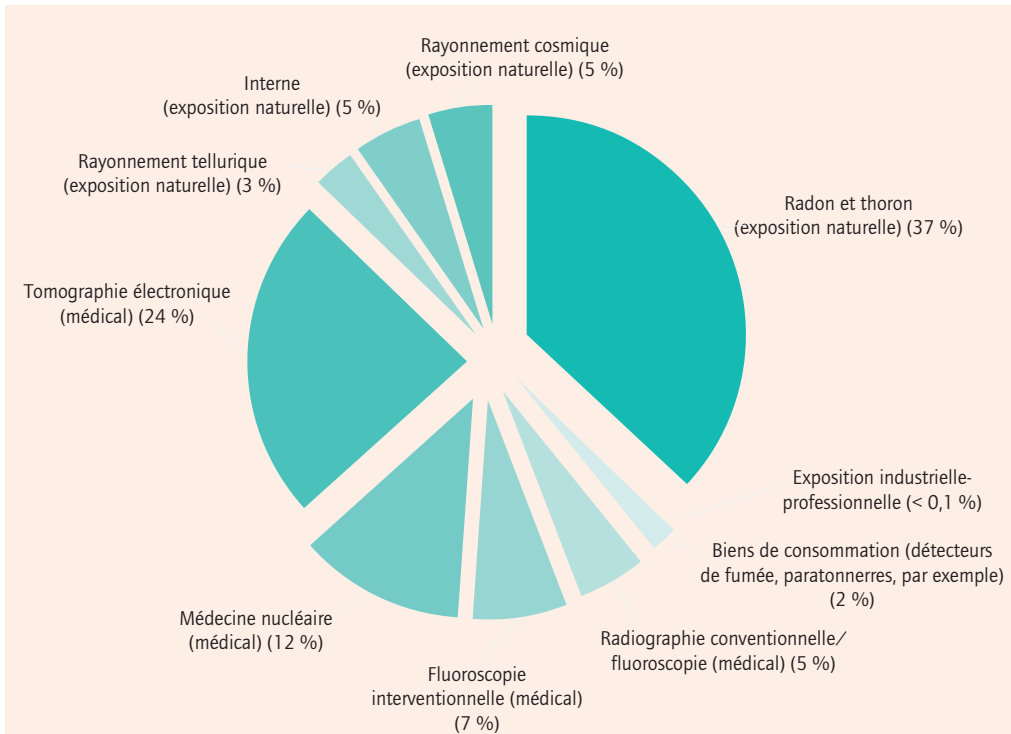
En Europe, l'exposition au radon domestique serait responsable d'environ 9% des décès par cancers du poumon et d'environ 2% de l'ensemble des décès par cancer. Le radon serait la première cause de cancer du poumon chez les non-fumeurs, et il aggraverait le risque chez les fumeurs. Une étude danoise, publiée en 2008, suggère que l'exposition domestique des enfants au radon augmenterait leur risque de développer une leucémie (Raaschou-Nielsen 2008). L'Union européenne sera sans doute amenée à revoir ses normes. Début 2011, elle recommandait encore d'agir à des concentrations dépassant 400 Bq/m³ pour les maisons existantes et 200 Bq/m³ pour les nouvelles habitations. La proposition de nouvelle directive, rendue publique en octobre 2011, propose d'abaisser la norme pour les logements existants à 300 Bq/m³.

En 2000, l'Unscar estimait que, dans les pays développés, l'exposition aux rayonnements ionisants à des fins de radiologie médicale était en moyenne par habitant d'environ 1 mSv/an, contre 0,02 mSv/an dans les pays les plus démunis.

Des données plus récentes indiquent qu'aux États-Unis la dose moyenne individuelle d'irradiation subie par la population a fortement augmenté du fait du recours de plus en plus important au scanner et à la médecine nucléaire. En 2006, l'exposition médicale aux radiations ionisantes y aurait rejoint le niveau d'exposition d'origine naturelle, soit 3 mSv. En près de 25 ans, la dose individuelle moyenne d'un habitant des États-Unis aurait ainsi presque doublé, passant de 3,6 à 6,2 mSv.

L'augmentation de l'exposition aux rayonnements ionisants d'origine médicale est aussi observée dans d'autres pays industrialisés. Ainsi, en Belgique, l'irradiation médicale est en passe de rejoindre le niveau de l'irradiation naturelle. Pour l'année 2006, l'exposition totale moyenne a été évaluée à 4,6 mSv, dont 2,5 mSv dus à l'irradiation naturelle et 2 mSv d'origine médicale (Vanmarcke 2010).

Figure 3 Répartition des différentes sources d'exposition de la population des États-Unis



Source: *Ionizing radiation exposure of the population of the United States*, National Council on Radiation Protection report no. 160, Bethesda, 2009

Dans son rapport 2008, l'Unscar confirme l'augmentation de la dose annuelle moyenne due aux irradiations d'origine médicale qui est passée de 0,35 mSv en 1988 à 0,62 mSv en 2008 par personne dans le monde. La dose moyenne est de 1,91 mSv pour la population des pays développés, contre 0,03 mSv pour les habitants des pays en voie de développement. Le nombre annuel d'examen radiologiques est passé, pendant cette période, de 280 à 488 pour 1000 habitants. Les 24 % de la population mondiale appartenant

aux pays développés ont bénéficié des deux tiers des examens réalisés, soit 1 332 examens pour 1000 personnes. À l'échelon mondial, les examens radiologiques représentent 21 % de l'exposition totale du public aux rayonnements ionisants (UNSCEAR 2008).

Les moyennes citées plus haut ne reflètent en rien l'exposition aux rayonnements ionisants que subissent ou ont subi les habitants de la région de Tchernobyl ou des zones où se sont déroulés des essais atomiques, d'un patient traité par radiothérapie, d'un mineur d'uranium ou de certains travailleurs qui interviennent dans les réacteurs nucléaires.

L'exposition supplémentaire de personnes du public due à des activités humaines (hors secteur médical) est soumise à une limite internationalement reconnue de 1 mSv/an, qui est comparable au niveau mondial moyen d'irradiation naturelle. La limite annuelle d'exposition professionnelle, elle aussi internationalement reconnue, est vingt fois supérieure (20 mSv/an). Un certain nombre de travailleurs atteignent ou même dépassent cette limite, mais le niveau moyen de radioexposition au travail est généralement comparable à celui de l'exposition au rayonnement naturel et à l'exposition médicale moyenne subie par un patient.

Une même personne peut cumuler plusieurs types d'exposition (naturelle, médicale, professionnelle), et ceci devrait être davantage pris en compte dans la surveillance médicale du travailleur.

2.2.2. Les effets des rayonnements ionisants

Le transfert d'énergie qui se produit dans le corps d'un être vivant exposé à des rayonnements ionisants affecte les cellules des tissus et des organes exposés, modifiant leurs propriétés et altérant leur ADN⁶. Les lésions de l'ADN sont essentiellement des ruptures, d'un ou des deux brins. En cas de rupture double, le système de réparation de l'ADN peut être dépassé et la réparation incomplète. Ces lésions d'ADN mal réparées peuvent empêcher ou modifier la reproduction de la cellule ou entraîner sa mort. La mortalité cellulaire dépend du mode d'exposition (interne ou externe), de la nature des rayonnements, du débit de la dose reçue, et du type de cellules lésées (certaines étant plus radiosensibles comme celles de la moelle osseuse). Une cellule blessée peut ne pas mourir, mais survivre et reproduire une cellule anormale.

Les effets des rayonnements ionisants sur les humains sont répartis en deux classes : les effets à court terme, dits déterministes, qui surviennent nécessairement chez l'ensemble des personnes exposées dès que la dose de rayonnement dépasse une certaine valeur, comme dans le cas d'une brûlure ; et les effets à long terme, dits aléatoires ou stochastiques, qui n'apparaissent que chez certaines personnes, sous la forme de cancers et d'anomalies génétiques.

Effets déterministes

Les effets déterministes sont liés à la dose d'irradiation. En cas d'exposition à des rayonnements X et gamma, ils apparaissent à partir d'une dose d'irradiation de 0,15 gray (Gy). Les organes les plus sensibles sont les organes reproducteurs, les cellules sanguines (rate, moelle osseuse, etc.), le cristallin de l'œil, la peau. En cas d'irradiation globale du corps humain, le pronostic vital est lié à l'importance de l'atteinte de la moelle osseuse, du tube digestif et des

6. A côté des effets sur les cellules irradiées, des recherches et observations relativement récentes indiquent que l'irradiation a également des effets sur des cellules non irradiées, effets dits non ciblés (voir p. 33).

poumons. À partir d'une dose efficace de 4,5 Gy, et en l'absence de prise en charge médicale rapide, la moitié des personnes exposées décèderont. Entre 6 et 8 Gy, il n'y a pas de survivant.

Les effets déterministes, tels que vomissements ou élévation de la température, ne sont cliniquement observables, dans les heures ou les jours qui suivent l'irradiation, que si la dose suffisante pour les provoquer a été délivrée dans un laps de temps relativement court.

Tableau 1 Effets déterministes décrits pour des expositions à des rayonnements gamma ou X

| Effets déterministes recensés | Dose d'irradiation |
|---|---------------------|
| Stérilité masculine temporaire | à partir de 0,15 Gy |
| Diminution temporaire des leucocytes (famille de globules blancs) | de 0,2 à 1 Gy |
| Nausée, asthénie Modification de la formule sanguine Effet immunodépresseur (risques d'infections) (Sous surveillance médicale, le retour à la normale se produit rapidement.) | de 1 à 2 Gy |
| Risque de stérilité féminine | à partir de 2,5 Gy |
| Stérilité masculine définitive | de 3,5 à 6 Gy |
| Aplasia (arrêt ou insuffisance du développement d'un tissu ou d'un organe) (En l'absence de traitement, au moins la moitié des personnes irradiées meurent et il existe des risques de séquelles.) | à partir de 4,5 Gy |
| Atteinte oculaire (survenue possible de cataracte de 1 à 10 ans après l'irradiation) | à partir de 5 Gy* |
| Atteinte gastro-intestinale | 6 Gy |
| Atteinte pulmonaire | 8 Gy |
| Coma, mort cérébrale Mort inévitable | au-delà de 10 Gy |

* Ce tableau ne tient pas encore compte des nouvelles estimations concernant l'augmentation du risque de cataracte qui pourrait intervenir à partir de 0,7 Gy.

Source: INRS, tiré du dossier "Rayonnements ionisants" du site web <http://www.inrs.fr>

Effets aléatoires ou stochastiques

Dans ce cas, ce n'est pas la survenue des effets, mais la probabilité de leur survenue qui est liée à la dose.

– Les cancers solides et les leucémies

L'évaluation du risque de survenue de cancers mortels dus aux rayonnements ionisants en fonction des doses d'irradiation subies repose principalement sur les résultats de la *Life Span Study* qui, depuis 1950, suit la santé des survivants des explosions nucléaires d'Hiroshima et de Nagasaki (voir encadré p. 32). Cette étude a permis d'identifier un risque de cancer statistiquement significatif pour les organes suivants : moelle rouge sanguino-formatrice (première atteinte identifiée), cavité buccale, colon, estomac, foie, œsophage, ovaire, peau, poumons, sein, système nerveux, thyroïde et vessie.

Des études entreprises sur des groupes de travailleurs exposés aux rayonnements ionisants ont également révélé un excès de cancers pour certaines localisations. Un excès de leucémies parmi les radiologues et de cancers du sein parmi des techniciennes en radiologie a été observé, notamment pour ceux et celles qui avaient travaillé avant les années 1950 (Mohan 2002).

Des ingestions de radium, volontaires dans le cas de traitements médicaux, ou accidentelles (voir encadré p. 8) ont provoqué un excès de cancers des os proportionnel à la dose reçue.

Des études se sont attachées à analyser les effets d'une irradiation interne due à une contamination par des radionucléides comme le radon (mineurs d'uranium), le plutonium (site de Mayak en Russie) ou les iodes radioactifs (Tchernobyl). Elles ont révélé une augmentation de cancers du poumon, de leucémies et de cancers de la thyroïde.

Il est désormais scientifiquement admis que les rayonnements peuvent provoquer des cancers mortels dans presque n'importe quel tissu ou organe humain, même si certaines localisations sont plus fréquentes que d'autres.

L'Unsear a considéré, dans son rapport 2006, que pour une exposition aiguë à une dose de 1 Sv, soit 1 000 mSv, le risque de décéder d'un cancer solide (autre que leucémie) au cours de la vie serait de 4,3 à 7,2 %. En ce qui concerne les leucémies, le risque serait de 0,6 à 1 %. Ces chiffres varient selon les populations et les différents modèles de risque, notamment pour les cancers solides. Le risque est multiplié par deux ou trois lorsque l'exposition a eu lieu dans l'enfance⁷.

Parmi les survivants des bombardements atomiques, l'excès de leucémies apparaît significatif à partir d'une exposition de 100 mSv. En ce qui concerne les cancers solides, on observe une augmentation significative du risque au-delà de 50 mSv et une augmentation significative de l'incidence de ces cancers au-delà de 200 à 500 mSv (UNSCEAR 2000). L'Unsear reconnaît cependant que l'excès de risques de cancers solides augmente de manière linéaire en fonction de la dose, même pour des doses se situant dans la zone de 0 à 150 mSv (UNSCEAR 2006).

– Les anomalies génétiques

La *Life Span Study* n'a pas observé d'augmentation des anomalies génétiques chez les survivants d'Hiroshima et Nagasaki et dans leur descendance. Ce qui ne signifie pas que ce risque soit nul.

Un excès de cas de leucémies a été mis en évidence chez les enfants vivant dans la région de Sellafield (Royaume-Uni), à proximité de l'usine de retraitement de Seascale. Entre 1955 et 1984, cinq cas de leucémies ont été observés chez les moins de 25 ans, quand moins d'un cas était attendu. Cet excès a été attribué, dans une étude publiée au début des années 1990, à l'exposition des pères avant la conception à des doses de rayonnement égales ou supérieures à 10 mSv (100 mSv en dose cumulée) (Gardner 1990). Cette publication a suscité une intense polémique. Des données plus récentes ont conclu à un excès significatif de cas de leucémies chez les enfants de moins de 15 ans dans un rayon de 25 km autour de Sellafield.

L'hypothèse d'une origine infectieuse liée au brassage de populations autour des chantiers de construction des sites nucléaires a également été avancée par plusieurs épidémiologistes. Cependant, le ou les agents infectieux impliqués n'ont pas été identifiés. L'excès de leucémies aux environs de Seascale est à ce jour inexplicable, comme reste inexplicable l'excès de leucémies infantiles observé en Allemagne à proximité des installations nucléaires, notamment près du centre nucléaire d'Elbmarsch (Spix 2008, Hoffmann 2007). Une étude française, publiée début 2012, a également observé un excès significatif de l'incidence des leucémies aiguës chez les enfants habitant dans un rayon de 5 km autour des centrales nucléaires pour la période 2002-2007. L'étude ne fournit pas d'hypothèses sur les causes de cette augmentation (Sermage-Faure 2012).

7. Un cancer lié à l'irradiation qui frappe particulièrement les enfants est le cancer de la thyroïde. Le risque d'apparition de ce cancer diminue avec l'augmentation de l'âge au moment de l'exposition. Il est nettement plus élevé chez l'enfant de moins de 15 ans que chez l'adulte (UNSCEAR 2000).

Sur base de leurs indicateurs de risque, l'Unscar et la CIPR considèrent qu'il n'existe toujours pas de preuve directe qu'une exposition des parents aux rayonnements ionisants conduit à un excès de maladies héréditaires dans leur descendance. Aussi, les normes proposées par la CIPR ne prennent en compte le risque d'anomalies génétiques que sur deux générations, en s'appuyant sur une estimation théorique fondée sur les connaissances en génétique humaine et les résultats d'expériences réalisées chez l'animal.

La toxicité prénatale

L'embryon et le fœtus sont très vulnérables à l'exposition aux rayonnements ionisants. Au cours des trois premières semaines qui suivent la conception, l'exposition de la mère à ces rayonnements peut provoquer une fausse-couche. Pendant les périodes de l'embryogenèse et de l'organogénèse, c'est-à-dire de la conception à deux mois de grossesse, elle peut entraîner des malformations. Une exposition du fœtus in utero peut être responsable de microcéphalies et de retards mentaux. Elle pourrait également être responsable de cancers de l'enfant, notamment de leucémies. En 1956, une étude du médecin anglais Alice Stewart indiquait que les radiographies pratiquées sur des femmes enceintes étaient responsables de la survenue de cancers et de l'élévation du risque de leucémie chez leurs enfants. Ces résultats ont été contestés, notamment parce que de tels effets n'ont pas été clairement observés dans la population des survivants des explosions atomiques.

Selon les données de l'étude qui a porté sur plus de 15 000 cas d'enfants atteints de cancers, recensés dans la région d'Oxford de 1955 à 1981, des doses d'irradiation de l'ordre de 10 à 20 milligrays reçues in utero (des doses similaires aux doses moyennes reçues lors d'un examen radiologique dans les années 1950) entraîneraient une augmentation du risque de leucémie avant l'âge de 15 ans de 40 % (UNSCEAR 2000).

En 2011, une étude britannique portant sur des enfants nés entre 1976 et 1996 a pu établir une augmentation du risque de cancers et de leucémies chez des enfants dont la mère avait été radiographiée pendant la grossesse, mais sans signification statistique. Cette étude a observé une augmentation du risque de lymphome chez les enfants ayant été radiographiés au cours des 100 premiers jours de vie. Bien que ce risque demande à être confirmé, les auteurs recommandent la plus grande prudence dans l'utilisation du scanner tant chez les femmes enceintes que chez les nourrissons (Rajaraman 2011).

Selon l'Unscar, le risque de développer un cancer avant l'âge de 15 ans à la suite d'une exposition prénatale aux rayonnements ionisants est d'environ 5 % par Sv. La CIPR considère qu'il est "prudent de supposer que le risque de cancer (solide) sur la vie entière après une exposition in utero est similaire à celui qui existe après une irradiation dans la jeune enfance, c'est-à-dire de l'ordre de trois fois, au plus, celui de la population dans son ensemble" (CIPR 2007).

Les affections cardiovasculaires

À partir des années 1990, le suivi des survivants des explosions atomiques — *Life Span Study* — a montré une augmentation statistiquement significative de la mortalité due à l'irradiation pour des pathologies non cancéreuses. Selon le rapport 2006 de l'Unscar, l'excès de risque apparaît significatif essentiellement pour le système cardiovasculaire. Cette augmentation a été observée à des niveaux d'exposition inférieurs à 2 Gy.

Bien avant la publication de ces données, des radiothérapeutes avaient remarqué que certains de leurs patients ayant subi une irradiation thérapeutique de la tête et du cou avaient rencontré des problèmes vasculaires. Des pathologies cardiaques avaient aussi été observées à

la suite d'une radiothérapie consécutive à un cancer des ganglions (maladie de Hodgkin). Les risques accrus de maladies cardiovasculaires chez les personnes recevant une radiothérapie thoracique étaient attribués aux doses très importantes — de l'ordre de 30 à 35 Gy en doses cumulées — reçues au niveau du cœur (Metz-Flamant 2009, European Commission 2008).

L'augmentation de la fréquence des maladies cardiovasculaires observée parmi les survivants des bombardements atomiques a stimulé les recherches. Mais la réelle dimension du problème n'a été appréhendée que tout récemment par les oncologues et les radiothérapeutes, après la publication de deux importantes études signalant une augmentation du risque d'infarctus et de maladies cardiovasculaires parmi les femmes ayant subi une radiothérapie après opération d'un cancer du sein. Particulièrement troublant est le fait que si le pourcentage de récurrence du cancer du sein est le même, quelle que soit la localisation (droite ou gauche) du cancer primitif, le risque de décéder d'une maladie cardiaque est supérieur de 44 % après radiothérapie en cas de localisation du cancer au sein gauche par rapport à une localisation au sein droit. Cette augmentation a été attribuée à la dose plus élevée reçue au niveau du cœur en cas de tumeur du sein gauche (European Commission 2008).

Le risque de maladie cardiovasculaire après radiothérapie varie selon l'âge au moment de l'exposition et peut persister durant plusieurs décennies. La radiothérapie a aussi été utilisée pour traiter des affections non cancéreuses, tels des ulcères gastriques. Chez ces patients, une augmentation de la mortalité pour des maladies cardiovasculaires a été observée pour des doses reçues au niveau du cœur de l'ordre de 2 à 4 Gy.

Les données concernant les travailleurs du site russe de Mayak suggèrent que des maladies radioinduites de l'appareil circulatoire peuvent survenir à la suite d'expositions chroniques (et pas seulement aiguës) et à partir de doses cumulées de l'ordre de 500 mSv.

Une augmentation même légère des maladies cardiovasculaires à la suite d'une exposition à de faibles doses d'irradiation pourrait avoir un impact sanitaire important étant donné la fréquence de ces affections. Aussi les experts de l'article 31 du traité Euratom estiment que ce problème doit être pris en compte non seulement en radiothérapie, mais également dans le domaine de la radioprotection en général.

Les cataractes

Le cristallin de l'œil est sensible aux rayonnements ionisants. À la suite d'une irradiation, la survenue de cataracte est considérée comme la complication majeure pour l'œil. La cataracte est une opacité du cristallin qui entraîne une atteinte visuelle plus ou moins prononcée. Le seuil d'exposition susceptible de produire une cataracte est mal connu. En 1990, la CIPR avait estimé que le niveau d'exposition pour produire une cataracte détectable était d'environ 2 Gy pour une seule exposition, et de 5 Gy pour une dose cumulée en cas d'exposition fractionnée. Cette affirmation était déduite de l'étude des survivants des bombardements atomiques chez qui la survenue de cataracte n'avait été observée qu'à une exposition supérieure à 1,5 Gy.

Les analyses les plus récentes indiquent cependant que le cristallin est plus radiosensible que ce qui avait été estimé auparavant. En 2008, une étude américaine de grande ampleur est venue le confirmer (Chodick 2008). Cette étude a suivi 35 705 techniciens en radiologie. Elle montre que la dose cumulée la plus basse pouvant produire une cataracte est d'environ 2 Gy (et non 5 Gy comme estimé précédemment), et que l'excès de risque progresse avec la durée de l'exposition, sans seuil apparent. La cataracte peut survenir de nombreuses années après l'exposition, le temps de latence étant fonction de la dose reçue.

Depuis lors, d'autres études ont encore abaissé le seuil. Selon une synthèse du groupe des experts de l'article 31 de l'Euratom, la limite d'exposition entraînant une augmentation du risque de développer une cataracte pourrait se situer autour de 0,5 Gy. La limite annuelle de dose actuellement recommandée pour le cristallin, fixée à 0,15 Gy, devrait entraîner au bout de 20 ans une dose cumulée de 3 Gy, soit six fois la dose suffisante pour entraîner une augmentation du nombre de cataractes (Report GoE meeting).

Les survivants des explosions atomiques, des cobayes malgré eux

Depuis 1950, la santé des survivants des bombardements de Hiroshima et Nagasaki fait l'objet d'une étude longitudinale, la *Life Span Study*, menée par une fondation américano-japonaise créée à la suite d'un accord entre les gouvernements des deux pays (RERF). Ce programme de recherche a beaucoup influencé, et continue d'influencer l'appréciation des risques des radiations ionisantes, notamment des faibles doses, et la constitution des normes d'exposition aux rayonnements ionisants à l'échelon mondial.

La dose d'irradiation de chacun des 86 572 survivants inclus dans l'étude a été estimée en fonction du lieu où ils se trouvaient au moment de l'explosion. Environ 65 % d'entre eux ont subi une exposition inférieure à 100 mSv.

Une publication de 2003 a fait le point sur les causes des décès survenus de 1950 à 1997. Pendant cette période, 9335 décès pour des pathologies cancéreuses solides (autres que leucémies) ont été observés. Parmi ces décès, 440 cancers solides (5 %), ont été attribués à l'effet de l'irradiation. Les dernières observations indiquent que si le risque de cancers liés à l'irradiation a augmenté au cours de la période 1950-1997, il semble avoir atteint un pic et décline avec le vieillissement de la population. Le risque le plus élevé concerne ceux qui ont été exposés alors qu'ils étaient enfants.

Les leucémies ont été le premier cancer relié à l'irradiation subie par les survivants de Hiroshima et de Nagasaki. Pendant la période 1950-1990, 176 cas de décès dus à une leucémie ont été observés dans le groupe dont

l'exposition a été supérieure à 5 mSv, 89 ont été attribués à l'irradiation subie au moment de l'explosion atomique, soit 51 % des cas. L'importance du risque est fonction de la dose subie, elle-même fonction de la distance par rapport à l'épicentre de l'explosion. Le risque de leucémie s'est avéré plus grand pour ceux qui ont été exposés enfant. Il a été maximum dans les dix premières années du suivi, puis a diminué progressivement.

De 1950 à 1997, 31 881 décès ont été comptabilisés parmi les survivants pour des pathologies non cancéreuses. Parmi ces décès, 250 (0,8 %) ont été attribués à l'irradiation due aux explosions. Au cours du temps, le lien entre l'exposition et la mortalité pour des maladies non cancéreuses se renforce. Le risque est significativement plus élevé pour les maladies cardiovasculaires, ainsi que pour les affections de l'appareil digestif et pulmonaire. Une estimation, publiée en janvier 2010, confirme le risque plus élevé de maladies cardiovasculaires même à des doses inférieures à 1 Gy. Le nombre de cataractes et de nodules de la thyroïde est également plus élevé parmi les survivants des explosions atomiques.

Selon le bilan arrêté fin 1997, 779 décès ont été attribués à l'irradiation subie, dont 440 cancers solides, 89 leucémies, 250 pathologies non cancéreuses.

Cela peut paraître peu au regard de l'énormité des explosions atomiques. Rappelons que l'étude ne prend en compte qu'une partie des 280 000 survivants considérés comme exposés aux radiations. Les personnes les plus fragiles sont peut-être mortes des suites de l'irradiation entre l'explosion (août 1945) et le début de l'étude épidémiologique (octobre 1950). Par ailleurs, l'étude de la seule mortalité a pour effet de ne pas prendre en compte les cancers traités avec succès.

2.3. Nouvelles inquiétudes : les effets non ciblés et à retardement

L'appellation "effets non ciblés" regroupe des effets dont les mécanismes semblent être différents les uns des autres, mais présentent une caractéristique commune : ils ne sont pas une conséquence directe de l'irradiation. Ces effets sont l'objet d'un intérêt croissant des scientifiques sans que des conclusions définitives puissent déjà être tirées. Les connaissances actuelles concernant ces effets proviennent essentiellement de résultats obtenus en laboratoire ou lors d'expérimentations animales, mais aussi d'observations chez des personnes victimes d'accidents d'irradiation ou ayant subi une radiothérapie. Ils mettent en cause l'idée qui prévalait auparavant que les effets délétères d'une irradiation étaient dus aux seules cellules irradiées ou, en cas d'effets héréditaires, aux cellules directement issues des cellules irradiées. Les principaux effets non ciblés observés sont de différents types.

2.3.1. L'instabilité génomique

Le terme d'instabilité génomique⁸ recouvre toute élévation dans le génome du niveau des altérations acquises, c'est-à-dire provoquées par des causes extérieures à l'organisme. L'instabilité se marque par une altération des chromosomes, la formation de micronoyaux, une mutation des gènes, etc. Certaines observations tendent à démontrer que l'instabilité génomique joue un rôle dans le développement des maladies cancéreuses, et qu'une instabilité persistante pourrait entraîner le développement de leucémies chez l'homme. L'instabilité génomique due à une irradiation est observée dans les cellules longtemps après l'irradiation. Elle est présente dans des cellules qui n'ont pas été irradiées, mais qui sont issues de cellules exposées, parfois de multiples générations après l'irradiation.

2.3.2. Les effets de proximité et les effets abscopaux

L'effet de proximité est défini comme "la capacité des cellules affectées par un agent extérieur de transmettre les manifestations du dommage à d'autres cellules qui n'étaient pas la cible de l'agent ou n'étaient pas susceptibles d'en être la cible" (UNSCEAR 2006). Cela signifie que les dommages causés par une irradiation peuvent se manifester dans des cellules qui n'ont pas été directement irradiées ou qui n'en sont pas issues, mais qui ont réceptionné un signal produit par une cellule irradiée.

En 2008, une équipe italienne a montré la réalité de cet effet de proximité en observant des dommages à l'ADN de cellules cérébrales non irradiées de souris par un effet de voisinage avec des cellules irradiées. Les chercheurs considèrent que leur étude réclame une réévaluation des effets associés aux rayonnements ionisants (Mancuso 2008).

Par ailleurs, des effets dits abscopaux ont également été observés chez l'animal et chez l'homme. Les effets abscopaux sont des effets qui se produisent dans des tissus distincts des tissus irradiés et à distance de la zone d'irradiation.

D'autres effets non ciblés ont été observés tels des facteurs clastogéniques (qui génèrent des brisures) mis en évidence lors d'expériences qui ont démontré que le plasma d'animaux et d'humains irradiés contenait des facteurs capables d'induire des effets

8. Le génome est l'ensemble des gènes portés par les chromosomes d'une espèce.

délétères dans des cellules non irradiées. Les effets héréditaires sont les effets observés dans la descendance de parents irradiés avant la conception. Cette question, déjà évoquée plus haut, reste sujette à controverse. Cependant, de tels effets sont bien documentés en ce qui concerne certaines espèces animales, et ont été constatés dans une étude sur les retombées de l'accident de Tchernobyl.

La recherche sur les effets non ciblés et à retardement des rayonnements ionisants en est à ses premiers développements. Néanmoins, s'il se confirmait que ces effets sont fréquents, liés à tous les types de rayonnements ionisants, et qu'ils se manifestent à de faibles doses, il faudrait admettre que les hypothèses qui sous-tendent actuellement les principes fondateurs de la radioprotection minimisent les risques.

2.4. La controverse sur les effets des faibles doses

Sont considérées comme faibles doses, les doses inférieures à 100 mSv et comme très faibles doses, les doses inférieures à 10 mSv. Les expositions de la vie courante ou de la vie professionnelle sont généralement des expositions, continues ou occasionnelles, à de faibles ou très faibles doses.

De nombreux obstacles concourent à la difficulté d'apprécier les effets des faibles doses générées par les activités humaines. D'une part, l'existence de l'irradiation naturelle dont les doses varient en moyenne entre 1 et 10 mSv/an. Aucun effet sur la santé n'a jusqu'à présent été attribué à l'irradiation dans des conditions de radioactivité naturelle élevée. D'autre part, les cancers induits par les rayonnements ionisants ne peuvent être médicalement distingués des autres cancers.

L'Unsear et la CIPR ont depuis longtemps considéré que la radioprotection dans sa gestion du risque devait être fondée sur une relation dose-effet linéaire sans seuil en assumant que toute exposition peut générer un risque. Leur modèle s'appuie sur l'hypothèse que le risque reste présent aux faibles doses, mais qu'il décroît proportionnellement à la dose. Pour évaluer les effets des faibles doses à long terme, notamment le risque de cancer, la CIPR procède par extrapolation des effets constatés aux doses plus élevées. Dans cette hypothèse, une division par deux de la dose signifie une division par deux des effets.

Le concept de relation dose-effet linéaire sans seuil et son application font l'objet d'un débat récurrent. Le Comité européen sur le risque de l'irradiation (CERI) approuve le principe de la relation dose-effet linéaire sans seuil, mais il conteste l'hypothèse de diminution proportionnelle du risque appliquée par la CIPR parce qu'elle sous-estimerait les risques des faibles doses. Pour le CERI, le "modèle CIPR" ne parvient pas à expliquer ou à prévoir les augmentations réelles de problèmes de santé chez un grand nombre de groupes exposés aux rayonnements ionisants de faibles doses" (Busby 2004). Le CERI fait remarquer que le nombre des cancers observés dans de nombreuses études est supérieur à ce qu'il aurait dû être en suivant les calculs théoriques de risque utilisés par la CIPR. Cette discordance amène le CERI à considérer qu'une exposition à de faibles doses induit des mécanismes d'action spécifiques qui entraînent des effets plus nombreux et plus variés que ceux observés aux doses élevées. Une cellule lésée par une faible dose pourrait être plus dommageable pour l'organisme humain qu'une cellule tuée par une dose plus élevée.

Le CERI en conclut que les limites annuelles d'exposition aux rayonnements ionisants dus aux activités humaines devraient être abaissées à 0,1 mSv pour la population générale (contre 1 mSv actuellement) et à 5 mSv pour les travailleurs.

Les limites de doses :**évolution au cours du XX^e siècle**

- 1928 : environ 1000 mSv/an
- 1934 : environ 200 mSv/an
- 1951 : environ 150 mSv/an (3 mSv par semaine)
- 1956 : 50 mSv/an pour les travailleurs

- potentiellement exposés ; 5 mSv/an pour le public, y compris les autres travailleurs
- 1977 : 50 mSv et 5 mSv/an confirmés
- 1990 : 20 mSv/an en moyenne (sur 5 ans) pour les travailleurs potentiellement exposés ; 1 mSv/an pour le public, y compris les autres travailleurs

À l'opposé des réflexions du CERI, des scientifiques français, appartenant notamment à l'Académie nationale de médecine et à l'Académie des sciences, estiment que le risque de cancer aux faibles doses n'est pas fondé. Les partisans de cette thèse avancent l'existence d'un phénomène d'hormésis. Ils définissent ce phénomène comme "l'effet d'un agent, physique ou chimique, qui provoque un effet à forte dose et un effet inverse à faible dose. C'est le cas pour de nombreux agents, toxiques à fortes doses, mais qui à faible dose ont un effet favorable protecteur". Pour ces scientifiques, le principe de la relation dose-effet linéaire sans seuil appliqué par la CIPR ne convient pas pour estimer le risque cancérigène des faibles doses, inférieures à 100 mSv, et à fortiori pour des très faibles doses, inférieures à 10 mSv. Ils considèrent que son application pourrait être dommageable particulièrement en médecine où il ferait renoncer à des examens "susceptibles d'apporter au malade des informations utiles" (Tubiana 2005).

Cette discussion ne relève pas d'une polémique purement académique. L'exposition aux rayonnements ionisants est particulièrement critique en médecine. Au début des années 2000, les examens radiologiques entraînent pour les patients une irradiation de l'ordre de 0,1 à 5 mSv, mais qui peut aller jusqu'à 20 mSv et au-delà pour certains examens. Par ailleurs, le secteur médical est celui où la proportion de travailleurs susceptibles d'être exposés est la plus importante et où les dépassements de doses sont les plus fréquents (voir chapitre 5).

En 2006, l'Académie des sciences des États-Unis a fait le point sur la question des faibles doses et a réexaminé les données disponibles (BEIR 2006). Elle a confirmé la validité du modèle linéaire sans seuil et a estimé qu'il n'y avait pas de raison de penser que les faibles doses étaient, comparativement aux doses plus élevées, plus dangereuses ou moins dangereuses. Même s'il est petit aux faibles doses, le risque est fonction de la dose. Selon le modèle développé par l'Académie américaine des sciences, une exposition à une dose unique de 100 mSv entraînerait le risque de développer un cancer au cours de la vie chez une personne sur 100, une exposition de 10 mSv chez une personne sur 1 000. Le débat n'est pas clos.

2.4.1. Les faibles doses, un risque confirmé

Le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a conduit une étude sur la mortalité des travailleurs exposés professionnellement aux radiations ionisantes dans 15 pays industrialisés⁹. L'objectif de l'étude était d'apporter des précisions sur les

9. Cette étude s'est limitée aux travailleurs qui portaient un dosimètre et qui ont travaillé au moins une année dans des centrales nucléaires, la recherche, la gestion de déchets nucléaires, la production de carburant, d'isotopes ou d'armement nucléaire. Les pays suivants y ont participé : Australie, Belgique, Canada, Corée, Finlande, France, Hongrie, Japon, Lituanie, Slovaquie, Espagne, Suède, Suisse, Royaume-Uni et États-Unis.

risques encourus lors d'une exposition prolongée à de faibles doses. L'étude du CIRC a fait l'objet de deux publications. La première a concerné les cancers, la seconde les maladies non cancéreuses.

L'étude sur les cancers a inclus les données de 407 391 travailleurs (Cardis 2005). L'exposition moyenne (cumulée sur une vie professionnelle) était de 19 mSv/an : 90 % des travailleurs avaient eu une exposition dose cumulée inférieure à 50 mSv/an (limite professionnelle annuelle antérieure), 5 % une dose cumulée de l'ordre de 100 mSv/an, et 0,1 % une dose cumulée supérieure à 500 mSv/an.

L'analyse des résultats montre une augmentation significative du risque de cancers, y compris les leucémies, par rapport à une population non exposée. L'augmentation constatée est supérieure à celle qui était estimée à ce niveau d'exposition par extrapolation des observations de la *Life Span Study* : six fois plus pour les cancers solides et près de trois fois plus pour les leucémies (RERF).

Les chercheurs ont calculé que 1 à 2 % des décès par cancers (y compris les leucémies) observés dans l'étude pouvaient être attribués à l'exposition des travailleurs aux radiations ionisantes. Sur cette base, ils estiment qu'une dose cumulée de 100 mSv/an devrait entraîner une augmentation de la mortalité de 9,7 % par cancers autres que leucémies, et de 19 % par leucémies (autres que les leucémies lymphocytaires chroniques).

Ces projections sont nettement supérieures aux hypothèses formulées par l'Unsclear dans son rapport 2006. En effet, l'Unsclear considèrerait qu'une exposition aiguë de 1000 mSv/an correspondait à un risque de décéder d'un cancer solide (autre que leucémie) au cours de sa vie se situant dans une fourchette de 4,3 à 7,2 % et celui de décéder d'une leucémie de 0,6 à 1 %.

Et pourtant, les résultats alarmants du volet cancer de l'étude du CIRC sous-estiment sans doute la réalité. Par exemple, pour la France, l'étude n'a pas inclus les personnels intérimaires et travailleurs des entreprises extérieures engagés dans des opérations de maintenance dans les zones les plus proches des réacteurs nucléaires (ETUI 2006).

Le volet de l'étude sur les pathologies non cancéreuses a concerné 275 312 travailleurs dont l'exposition moyenne était de 21 mSv/an sur l'ensemble de la vie professionnelle (Cardis 2007). Une très légère augmentation des décès dans la population exposée par rapport à une population non exposée a été mise en évidence. Le risque le plus élevé a été observé pour les maladies de l'appareil respiratoire et digestif. Cependant, les chercheurs n'ont pu établir une échelle du risque corrélée à l'exposition.

2.4.2. La CIPR confirme l'hypothèse de la relation dose-effet linéaire sans seuil

En 2007, la CIPR a approuvé son projet de nouvelles recommandations sur la protection de l'homme et de l'environnement contre les rayonnements ionisants, aboutissement d'un travail mené pendant neuf ans (CIPR 2007). Elle a maintenu la validité de l'hypothèse de la relation dose-effet linéaire sans seuil. La CIPR a considéré que l'option d'un seuil en dessous duquel le risque serait nul n'était pas valable. Car, pour les effets aléatoires ou stochastiques, il est impossible de faire une distinction claire entre une dose sûre et une dose dangereuse. Pour la CIPR, le concept de la relation dose-effet linéaire sans seuil permet d'optimiser la radioprotection en minimisant la prise de risque, en maximisant la marge de sécurité, et en assurant une meilleure évaluation de l'exposition totale d'une personne puisque toutes les expositions peuvent être prises en compte quel que soit leur niveau.

Pour la CIPR, ce concept a conduit à l'élaboration d'une philosophie cohérente : le recours au nucléaire n'est permis que s'il est justifié et autorisé, la protection étant optimisée,

ce qui implique à tout le moins le respect des doses limites admises. La CIPR semble ainsi rester fidèle au principe ALARA ("aussi bas que raisonnablement possible") qu'elle-même avait contribué à développer dans les années 1970.

Les trois piliers de la radioprotection, issus du principe ALARA, sont maintenus :

- le principe de justification : toute décision qui modifie la situation d'exposition aux rayonnements doit faire plus de bien que de mal¹⁰ ;
- le principe d'optimisation : la probabilité d'être exposé, le nombre de personnes exposées et le niveau de leurs doses individuelles doivent tous rester aussi faibles qu'il est raisonnablement possible, compte tenu des facteurs économiques et sociétaux ;
- le principe d'application des limites de dose : la dose totale reçue par une personne due aux sources réglementées dans les situations d'exposition planifiées, autres que l'exposition médicale de patients, ne doit pas dépasser les limites appropriées indiquées par la Commission.

La CIPR reconnaît trois types de situation d'exposition (qui remplacent la précédente catégorisation en pratiques et interventions). Ces trois catégories sont censées couvrir l'éventail complet des situations d'exposition :

- situations d'exposition planifiée : situations impliquant l'introduction et l'utilisation planifiées de sources (ce type de situation comprend les situations classées auparavant comme des pratiques) ;
- situations d'exposition d'urgence : situations imprévues, notamment celles qui peuvent se produire pendant le déroulement d'une situation planifiée, nécessitant une réponse urgente ;
- situations d'exposition existante : situations d'exposition qui existent déjà lorsqu'une décision de contrôle doit être prise, notamment celles provoquées par le rayonnement naturel (Publication 103 de la CIPR 2007)¹¹.

Les principes de justification et d'optimisation s'appliquent dans l'ensemble des situations d'exposition. Le principe d'application des limites de doses s'applique uniquement aux doses qui vont être reçues avec certitude dans le cadre des situations d'exposition planifiée.

La CIPR prend en compte trois catégories d'exposition : l'exposition professionnelle, l'exposition médicale des patients et l'exposition du public (c'est-à-dire les expositions autres que les deux premières, y compris les travailleurs non professionnellement exposés).

2.5. Les limites d'exposition de la CIPR critiquées

Les valeurs proposées par la CIPR en vue d'optimiser la radioprotection s'appliquent à l'exposition d'une personne à une source donnée. Elles sont appelées contraintes de doses dans les situations planifiées (situation d'exposition anticipée telle qu'un examen radiographique ou un travail dans une zone à risques, etc.), et niveau de référence dans les autres situations (situation d'urgence et situation existante comme l'exposition naturelle). La contrainte de dose est une anticipation de ce que doit être la dose supérieure subie prévue dans le cadre

10. Ce qui signifie qu'une pratique entraînant des expositions aux rayonnements ionisants ne devrait être adoptée que si elle produit suffisamment d'avantages pour les personnes exposées ou pour la société. La justification consiste, par exemple, en une comparaison des avantages et inconvénients d'une pratique industrielle ou médicale qui met en œuvre des rayonnements avec une autre technique qui ne les utilise pas.

11. Ce découpage est nouveau et pourrait poser des problèmes d'interprétation. Doit-on par exemple considérer comme une situation d'exposition existante les expositions provoquées par les dépôts radioactifs d'une ancienne activité industrielle ?

de l'optimisation de la protection à une source donnée. En cas de dépassement de la dose prévue, il y a lieu de s'interroger sur la validité des précautions mises en oeuvre. Dans les situations d'urgence ou d'exposition existante, les niveaux de référence représentent le niveau de dose au-delà duquel il n'est pas jugé opportun de prévoir d'autoriser une exposition.

Dans sa publication 103, la CIPR a redéfini les limites de doses individuelles comme des doses maximales acceptables dans des situations d'exposition planifiée. La limite d'exposition recommandée pour les travailleurs est de 20 mSv/an sur une période de cinq ans (soit 100 mSv sur cinq ans). Elle ne peut dépasser 50 mSv en une seule année. En ce qui concerne l'exposition du public, la CIPR a estimé que la limite de 1 mSv devait être conservée.

Il faut préciser que ces niveaux de référence correspondent à l'évaluation d'une dose pour le corps entier, résultat d'un calcul qui prend en compte les doses reçues aux différents organes, assorties d'un facteur de pondération (voir encadré p. 23). Pour les travailleurs, la limite de dose annuelle aux mains et aux pieds, ainsi que pour la peau, est de 500 mSv. Elle est de 150 mSv pour le cristallin. Rappelons que ces limites ne s'appliquent pas aux expositions médicales de patients.

Le docteur Patrick Smeesters, président du comité des experts de l'article 31 du traité Euratom et porte-parole du groupe de travail sur les implications pour la santé des normes de sécurité (Research Implications on Health Safety Standards, RIHSS) a jugé décevantes les dernières recommandations de la CIPR sur plusieurs points. Il estime que la CIPR n'a pas tenu compte des informations acquises au cours de la dernière décennie et qui auraient dû entraîner une meilleure prise en compte de certains risques notamment en ce qui concerne : les cataractes et les maladies de l'appareil circulatoire radioinduites ; l'exposition in utero ; le rapport entre la dose d'exposition et la dose effective ; l'exposition au radon à l'intérieur des bâtiments ; la plus grande susceptibilité des enfants par rapport aux adultes, des femmes par rapport aux hommes ; l'incertitude sur les risques génétiques à long terme (Smeesters 2009).

Signalons enfin un paradoxe dans les recommandations de la CIPR : les normes relatives à la protection des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants naturels, comme les travailleurs de l'industrie des phosphates, sont moins exigeantes que celles appliquées aux travailleurs exposés aux rayonnements ionisants artificiels. Le niveau de référence radon, établi par la CIPR pour le milieu de travail à 1000 Bq par m³, correspond à une exposition d'environ 10 mSv/an ce qui est bien au-dessus de la limite de 6 mSv utilisée pour définir un travailleur de catégorie A qui bénéficie de mesures de surveillance renforcées (Janssens 2010).

Les nouvelles recommandations de la CIPR commencent à prendre en compte les exigences accrues en matière de protection de l'environnement. La CIPR accepte donc de remettre en question le postulat selon lequel "le niveau de maîtrise de l'environnement nécessaire pour protéger l'homme, à un degré estimé aujourd'hui comme valable, permettra aux autres espèces de ne pas être en danger". Jusqu'en 2000, la CIPR ne considérait les éléments de la nature que comme de simples vecteurs transportant une pollution radioactive vers l'homme et non comme des espèces vivantes à protéger.

En dépit de cette évolution récente, certains experts estiment que l'approche environnementale de la CIPR est encore très centrée sur l'homme et ne s'inscrit pas dans un écosystème global. Selon eux, admettre que la protection de l'environnement nécessite des normes de radioprotection spécifiques revient à remettre en cause la méthodologie suivie par la CIPR pour définir toutes les normes de radioprotection. Ces experts considèrent que la CIPR n'a pas encore fait sienne une approche basée sur le principe de précaution en relation avec les données scientifiques récentes (Smeesters 2009).

Ce qu'il faut retenir

Il est désormais scientifiquement admis que l'exposition aux rayonnements ionisants entraîne des pathologies cancéreuses et non cancéreuses, et des effets toxiques pour l'embryon et le fœtus. Elle pourrait être également la source d'anomalies génétiques héréditaires. Le risque de survenue de ces pathologies est lié à la dose et augmente proportionnellement avec celle-ci. Les organismes scientifiques internationaux spécialisés en radioprotection admettent qu'il est impossible de définir un seuil en dessous duquel l'exposition aux rayonnements ionisants serait sans aucun risque pour la santé humaine. La question des conséquences sanitaires d'une exposition à des doses dites faibles (moins de 100 mSv/an) continue à susciter d'âpres débats entre experts. Une étude du Centre international de recherche sur le cancer, rattaché à l'OMS, tend à confirmer les effets des faibles doses sur la santé des travailleurs exposés, notamment en ce qui concerne le risque de cancer.

Chapitre 3

La protection des travailleurs dans la législation européenne

Dans l'Union européenne, plusieurs millions de travailleurs sont fortement exposés au radon, gaz radioactif d'origine naturelle. Des centaines de milliers sont exposés à des rayonnements ionisants d'origine artificielle, principalement dans les secteurs médicaux, industriels et de l'énergie nucléaire. L'Union européenne est la région du monde où l'énergie nucléaire civile est la plus développée : au début 2011, 143 réacteurs nucléaires étaient exploités dans 14 États membres.

La sûreté des installations nucléaires et la protection du public et des travailleurs contre les dangers présentés par les rayonnements ionisants sont assurées par un ensemble de directives qui repose sur un traité fondateur, le traité Euratom de 1957. Les directives européennes sont élaborées en conformité avec les conventions adoptées dans le cadre de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) et en s'appuyant sur les recommandations et avis de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), du Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (Unscar) et de l'Organisation mondiale de la santé (OMS).

Au fil des années, les directives se sont empilées et le cadre juridique européen applicable en matière de radioprotection est devenu très complexe. Une proposition de directive, rassemblant les textes existants et tenant compte des recommandations 2007 de la CIPR, a été rendue publique par la Commission européenne le 29 septembre 2011.

3.1. Le traité Euratom et les normes de base de la radioprotection

Après la mise en place de la Communauté européenne du charbon et de l'acier (CECA) en juillet 1952, les six États membres de cette organisation (Belgique, France, Grand duché de Luxembourg, Italie, Pays-Bas et République fédérale d'Allemagne) décident de s'engager dans la création d'un marché commun européen. En mars 1957, ils signent à Rome deux traités, dits traités de Rome. Le premier instituait la Communauté économique européenne (CEE) devenue depuis l'Union européenne, le second créait une Communauté européenne de l'énergie atomique, dénommée Euratom. Les deux traités sont entrés en vigueur le 1^{er} janvier 1958.

Le traité Euratom avait pour objectif principal de "créer les conditions de développement d'une puissante industrie nucléaire, source de vastes disponibilités d'énergie et une modernisation des techniques, ainsi que de multiples autres applications contribuant au bien-être de leurs peuples". Les signataires se montraient néanmoins "soucieux d'établir les conditions de sécurité qui écarteront les périls pour la vie et la santé des populations". Pour accomplir cette mission, la Commission doit "établir des normes de sécurité uniformes pour la protection sanitaire de la population des travailleurs et veiller à leur application". Parmi les articles du chapitre 3 du traité, relatifs à la protection sanitaire, deux sont particulièrement importants.

L'article 30 stipule que la Communauté européenne institue "des normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultants des radiations ionisantes". Par normes de base, le texte entend : "les doses maxima admissibles avec une sécurité suffisante ; les expositions et contaminations maxima admissibles ; les principes fondamentaux de surveillance médicale des travailleurs".

L'article 31 détermine que les normes de base sont élaborées par la Commission européenne après avoir pris connaissance de l'avis d'un groupe de personnalités désignées par le Comité scientifique et technique établi auprès de la Commission européenne (article 134 du traité Euratom) parmi les experts scientifiques des États membres, appelé communément "groupe d'experts article 31". Les experts de l'article 31 sont indépendants. Ils ne représentent ni les États membres – mais sont néanmoins désignés et remplacés par ceux-ci – ni des organisations spécifiques. Leur priorité doit être la protection de la santé publique par le développement de la meilleure radioprotection possible. Les experts peuvent exprimer des avis sur les aspects politiques, économiques et financiers de la radioprotection, mais la santé et la sécurité doivent toujours en être le fil conducteur. Un code éthique les guide dans leur travail (Euratom 2007). En général, les nouveaux actes législatifs sont rédigés conjointement par les services de la Commission et les experts.

Les normes de base ainsi définies sont ensuite soumises par la Commission à l'avis du Comité économique et social européen (CESE). Les membres du CESE sont issus des milieux socio-économiques de l'Europe. Ils sont organisés en trois groupes : le groupe Employeurs, le groupe Salariés, et le groupe Activités diverses qui représente des organisations sociales, professionnelles, économiques et culturelles. Dans le groupe des Salariés, plus de 80 organisations syndicales sont représentées dont la plupart sont membres de la Confédération européenne des syndicats (CES). C'est donc uniquement à travers le CESE que les travailleurs peuvent exprimer leur avis sur les normes de base de la radioprotection.

Depuis 1957, le traité Euratom n'a pas connu de grands changements et reste en vigueur. En vertu de ce traité, un ensemble de directives, règlements, recommandations et décisions a été élaboré et adopté. Il constitue un instrument juridique à l'intention des États membres de l'Union européenne qui se voient dans l'obligation de transposer les directives dans leur législation nationale. Ces directives impliquent une obligation de résultats et non une obligation de moyens. Cela signifie que les autorités nationales ont

la liberté de déterminer la forme juridique et les moyens à mettre en œuvre qu'ils estiment les plus adéquats pour atteindre les objectifs fixés dans la directive. Si la législation d'un État membre ne se conforme pas aux objectifs de la directive, la Commission européenne peut traduire cet État membre devant la Cour de justice de l'Union européenne pour "transposition incorrecte ou insuffisante".

3.2. Le contexte international de l'élaboration des normes européennes

Les directives édictées dans le cadre du traité Euratom s'inscrivent dans un contexte international plus vaste. Nous avons examiné au chapitre 2 le rôle du Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (Unsear), et celui de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) qui créent le cadre scientifique de référence en matière de radioprotection. L'Unsear propose des estimations du risque radio-induit (probabilité de décès en fonction de la dose reçue, rapport entre la contamination moyenne de l'air en radon et la dose efficace annuelle, etc.) qui sont généralement¹² prises en compte par la CIPR pour en déduire des limites de dose individuelles pour les professionnels et le public.

Il revient ensuite aux institutions internationales et nationales de traduire les avancées scientifiques en normes et recommandations et, dans le cas de l'Europe, en directives. Les instances de l'Union européenne travaillent en interaction régulière avec plusieurs organismes internationaux, tels que l'Organisation internationale du travail (OIT), l'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'Agence internationale de l'énergie nucléaire (AIEA) qui préparent, souvent en commun, des textes qu'ils proposeront à leurs États membres et, pour consultation, l'Association internationale de radioprotection (International Radiation Protection Association, IRPA) qui regroupe les associations professionnelles de radioprotection.

Le traité du 26 octobre 1956 relatif au statut de l'AIEA charge tout particulièrement cette agence d'établir ou d'adopter des normes de sécurité destinées à protéger les personnes et les biens des dangers présentés par les rayonnements ionisants. Les normes de base de l'AIEA font l'objet d'un consensus international et sont publiées dans un document qui s'intitule *Normes fondamentales internationales de protection contre les rayonnements ionisants et de sûreté des sources de rayonnements*. Elles énoncent les prescriptions fondamentales en matière de protection et de sûreté nucléaire. Elles n'engagent pas vraiment les États et ne visent pas à se substituer aux dispositions des législations, réglementations ou normes nationales. Leur intention est de donner des indications pratiques aux autorités, aux employeurs et aux travailleurs ainsi qu'aux services spécialisés de radioprotection. Les normes de base ne sont pas destinées à être appliquées telles quelles dans tous les pays et toutes les régions du monde. Étant très générales, elles doivent souvent être modulées selon des utilisations et des risques particuliers (Gonzalvez 1994).

Les premières normes AIEA remontent à 1962 et ont été révisées à plusieurs reprises. La version du 12 septembre 1994 avait été adoptée à la suite de la publication, en 1990, de nouvelles recommandations par la CIPR, après la réévaluation des résultats des études sur les survivants des bombardements atomiques et les accidents de Three Mile Island en 1979 et de Tchernobyl en 1986.

12. Dans le cas de la dose efficace occasionnée par l'inhalation du radon, les évaluations de dose de l'Unsear et de la CIPR étaient différentes. Elles sont proches depuis la nouvelle estimation de la CIPR (novembre 2009).

Après la publication de la CIPR 103 en 2007, une nouvelle révision des normes a été entreprise par les responsables de l'AIEA. Fin 2011, cette révision était en cours d'approbation par les institutions internationales parties prenantes de cette révision.

Si l'Union européenne coopère étroitement avec les institutions internationales, la directive Euratom sur les normes de base se veut plus ambitieuse. Les normes de base Euratom doivent être uniformes dans toute l'Union, et sont contraignantes pour les États membres.

La première directive européenne sur les normes de base de radioprotection date de 1959. Régulièrement mise à jour, cette directive est entièrement refondue en 1980¹³ afin d'intégrer les nouvelles normes de radioprotection proposées par la CIPR en 1977. Elle sera complétée en 1984 et 1990. Cependant, très rapidement le chantier reprend pour aboutir le 13 mai 1996, à la publication d'une nouvelle directive, qui était toujours en vigueur en 2012¹⁴.

3.3. Les directives européennes en vigueur en 2011

Début 2012, la législation européenne sur la radioprotection comptait pas moins d'une douzaine de directives. L'axe principal est la directive 96/29 Euratom du Conseil du 13 mai 1996 qui fixe les normes de base relative à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants. Trois autres directives lui sont étroitement associées : la directive Protection des travailleurs extérieurs (directive 90/143/Euratom), la directive Information de la population (directive 89/618/Euratom) et la directive Contrôle des sources scellées de haute activité et des sources orphelines (directive 2003/122/Euratom).

Depuis 1984, la protection sanitaire des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants lors d'expositions à des fins médicales fait l'objet d'une directive spécifique (directive 97/43/Euratom).

D'autres textes européens sont des textes généraux de nature politique ou traitent d'aspects particuliers comme l'exposition au radon à l'intérieur des bâtiments (recommandation non obligatoire 90/143/Euratom), les déchets radioactifs (directive 2006/117/Euratom), la sûreté nucléaire des installations nucléaires (directive 2009/71/Euratom), etc.

3.3.1. La directive Normes de base de 1996

De manière générale, la directive Normes de base de 1996, toujours en vigueur fin 2011, se fonde sur les principes de justification, d'optimisation et de limitation des doses définies par la CIPR (voir p. 19). Le titre VI de la directive concerne plus précisément la protection des travailleurs.

13. Directive 80/836/Euratom du Conseil du 15 juillet 1980 portant modification des directives fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants.

14. Directive 96/29/Euratom du Conseil du 13 mai 1996 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants.

Limites de l'exposition

La dose efficace pour les travailleurs exposés est limitée à 100 mSv pour une période de cinq années consécutives (soit 20 mSv/an en moyenne) à condition que la dose efficace ne dépasse pas 50 mSv au cours d'une année. La limite de dose équivalente pour le cristallin est de 150 mSv/an. Elle est fixée à 500 mSv/an pour la peau, quelle que soit la surface exposée, les mains, les avant-bras, les pieds et les chevilles. Pour les apprentis et les étudiants âgés d'au moins 18 ans qui dans leurs études sont amenés à employer des sources, les limites sont les mêmes que pour l'ensemble des travailleurs.

La législation européenne assure une protection supplémentaire pour certaines catégories de travailleurs.

Pour les apprentis et les étudiants âgés de 16 à 18 ans, les limites de doses sont inférieures : la limite de dose efficace est de 6 mSv/an ; de 50 mSv au cristallin par an ; de 150 mSv pour les autres parties du corps.

La législation européenne a également prévu de protéger les travailleuses enceintes. Dès qu'une femme enceinte informe l'employeur de son état, l'entreprise est tenue d'assurer à l'enfant à naître une protection comparable à celle offerte au citoyen, c'est-à-dire qu'elle ne devrait pas dépasser 1 mSv pendant le reste de la grossesse. La femme allaitante ne peut être affectée à des travaux comportant un risque de contamination radioactive corporelle et donc d'absorption de radionucléides.

Pour les personnes du public, la limite de dose efficace est de 1 mSv/an, la limite de dose équivalente pour le cristallin est de 15 mSv/an, pour la peau de 50 mSv/an.

Surveillance des travailleurs

La directive de 1996 distingue deux catégories de travailleurs exposés : la catégorie A comprend les travailleurs susceptibles de recevoir une dose efficace supérieure à 6 mSv/an ou une dose équivalente à 3/10 des limites de doses prévues pour le cristallin, la peau et les extrémités ; la catégorie B comprend les travailleurs exposés ne relevant pas de la catégorie A.

La surveillance individuelle est systématique pour les travailleurs exposés de catégorie A. Pour une exposition externe, elle repose sur des mesures individuelles établies par un service de dosimétrie agréé. Lorsque les travailleurs de catégorie A sont susceptibles de subir une contamination interne, un système de surveillance adéquat doit être mis en place. Le contrôle des travailleurs exposés de la catégorie B doit au minimum servir à démontrer que c'est à juste titre qu'ils sont classés dans cette catégorie en s'appuyant notamment sur la surveillance radiologique du milieu de travail.

La surveillance médicale s'inscrit dans le cadre de la médecine du travail. Elle doit comporter un examen approfondi d'aptitude préalable à l'embauche pour les travailleurs de catégorie A, ainsi que des examens de santé périodiques au minimum une fois par an. Un dossier médical est créé pour chaque travailleur de la catégorie A, il est tenu à jour aussi longtemps que le travailleur reste dans cette catégorie. Il est ensuite conservé au moins jusqu'à ce que le travailleur atteigne l'âge de 75 ans, et en tout cas pendant une période d'au moins 30 ans. Le dossier contient notamment le relevé des doses contrôlées.

Sur les lieux de travail, là où existe une possibilité d'exposition à des rayonnements ionisants susceptibles de dépasser les limites de dose admises pour le public, des mesures de classification et de délimitation des zones doivent être prises en fonction du niveau de risque.

La directive de 1996 confie aux États membres la surveillance des travailleurs et des personnes du public vis-à-vis d'une augmentation potentielle de l'exposition aux sources naturelles de rayonnement.

Retards et différences d'approche dans la transposition de la directive de 1996

La rédaction de la directive de 1996 a été laborieuse. En 1993, une première version, soumise pour avis préalable au Comité économique et social européen (CESE), avait fait l'objet de critiques des représentants de la Confédération européenne des syndicats, notamment sur les normes proposées qui, bien qu'abaissées, leur paraissaient encore trop élevées¹⁵.

Si l'avis rendu au final par le CESE se préoccupait de la protection de la santé des travailleurs, il exprimait aussi de fortes préoccupations économiques. Les débats qui ont dû agiter le CESE se reflètent dans son avis comme en témoigne l'exemple suivant où le CESE traite des installations qui ne satisferaient pas aux nouvelles normes et estime : "Il conviendra de trouver des solutions si l'on ne veut pas que l'installation concernée soit fermée. La solution pourrait consister à réaliser des investissements en vue d'une protection accrue. De cette manière le risque de cancer pourrait être réduit. Toutefois, la solution pourrait consister à employer davantage de personnes et à raccourcir la durée des roulements. Dans cette hypothèse, le nombre de cancers pourrait ne pas être réduit, la dose collective restant inchangée. Toutefois, le risque individuel sera diminué si la dose individuelle est réduite." (JOCE 1993).

De même, si le CESE approuve l'inclusion de l'exposition aux sources naturelles de rayonnement sur le lieu de travail, il réclame un délai dans l'application des nouvelles normes, notamment dans les mines d'uranium existantes.

En 1996, un nouveau texte sera finalement adopté par le Conseil de l'Union européenne, après accord du Parlement européen, mais sans solliciter une seconde fois l'avis du CESE.

La directive devait être transposée avant le 13 mai 2000. Plusieurs États membres, qui disposaient pourtant de quatre ans pour effectuer la transposition, ne s'y sont conformés qu'après la date d'échéance. Il est vrai que d'autres directives, comme celle relative aux expositions aux rayonnements ionisants à des fins médicales (directive 97/43/Euratom) ou au contrôle des sources radioactives scellées de haute activité (directive 2003/122/Euratom) ont, dans certains cas, ralenti la procédure de transposition, rendue plus complexe, car visant plusieurs secteurs du droit national des États (travail, santé, transports, etc.).

Globalement, les États européens ont transposé la directive selon deux conceptions bien distinctes. La première, choisie par l'Allemagne et la Belgique, consiste à privilégier une "loi nucléaire" dans laquelle se trouvent rassemblées toutes les dispositions concernant le travail, la médecine, les transports, l'environnement, la gestion des déchets radioactifs, etc. La seconde option, suivie par la France, consiste à insérer dans chacun des codes juridiques existants dans le système juridique national (codes du travail, de la santé, de l'environnement, etc.), les dispositions transposées des diverses directives européennes. Dans l'Hexagone, la transposition a été particulièrement complexe, car elle a entraîné une profonde restructuration du système juridique.

La complexité juridique n'explique cependant que partiellement les retards constatés dans le processus de transposition en France. La réduction des limites de dose annuelle pour le public (de 5 à 1 mSv/an) et pour les travailleurs (de 50 à 20 mSv/an) n'a pas été acceptée facilement, notamment par les employeurs.

Il faut cependant épinglez un point positif : le législateur français a prévu un mécanisme qui lie la limite de dose à la durée du contrat de travail. Ce dispositif, qui est une

15. La limite d'exposition des travailleurs aurait dû être ramenée de 50mSv/an à 16mSv/an et non à 20. La nouvelle relation dose-effet déduite des dernières données sur Hiroshima et Nagasaki étant 3,2 fois plus pénalisante pour la tranche d'âge 18-65 ans et 4 fois pour la population entière (radiosensibilité des enfants).

garantie sociale originale, vise à empêcher qu'un travailleur sous contrat à durée déterminée ou sous contrat de travail temporaire (intérimaires) reçoive au cours de ses contrats successifs une dose supérieure à la limite annuelle. Ainsi, pour un contrat de trois mois, la limite de dose maximale est donc égale au quart de la limite annuelle.

La forme choisie pour opérer la transposition des directives Euratom a indéniablement des conséquences en termes d'accès de la population aux informations en matière de radioprotection. Il est en effet plus aisé pour un travailleur qui souhaite faire respecter sur son lieu de travail les mesures de protection prévue dans la législation de disposer de toutes les dispositions du droit nucléaire dans un texte unique que de rechercher dans plusieurs codes juridiques les moyens de sa défense, comme c'est le cas en France.

3.3.2. La directive Travailleurs extérieurs

Dès ses débuts, le développement du nucléaire s'est accompagné d'un transfert du risque des grandes entreprises du nucléaire vers un grand nombre de petites et moyennes entreprises (PME) (Zerbib 1979). Dans certains cas, la spécialisation technique, la maîtrise d'une technologie ou les demandes importantes d'interventions ponctuelles (arrêts programmés de réacteur) pouvaient légitimer ce transfert. Mais dans la majorité des cas, il s'agissait bien d'un transfert du risque d'exposition aux rayonnements ionisants. Ces transferts, depuis les entreprises nationales vers les PME, se sont opérés également au moyen de passages transfrontaliers d'équipes spécialisées (dans la décontamination radioactive, par exemple). Ces transferts sont devenus significatifs dès les années 1970.

En 1975, pour les 13 réacteurs qui fonctionnaient dans l'Europe des six, la dose collective des entreprises extérieures intervenantes représentait déjà 56 % de la dose totale. Dans le retraitement du combustible, si entre 1970 et 1977, à Eurochemic¹⁶ les entreprises extérieures (8,5 % du personnel) cumulaient 8,2 % de la dose collective, dans l'usine de retraitement française de La Hague (Manche), pour cette même période de huit ans, les personnels extérieurs représentaient 40 % des travailleurs exposés (sur un total moyen de 1338 salariés) et la dose collective moyenne les concernant était de 42 % de la dose totale. En France, la part des entreprises extérieures exposées en 2009 dans l'industrie nucléaire représentait 22 721 travailleurs (36 % de l'ensemble) et leur dose collective était de 40 % (IRSN 2010).

En 1990, une directive a visé à réduire l'écart qui séparait la protection des travailleurs extérieurs de celle des travailleurs permanents¹⁷. Les domaines visés concernent des points importants comme la qualité du système de surveillance radiologique, la délivrance d'un document individuel de surveillance radiologique, l'enregistrement des doses reçues, l'évaluation de la dose efficace, la surveillance médicale, la formation spécifique, etc., afin de protéger les travailleurs extérieurs de manière équivalente aux travailleurs de l'opérateur nucléaire.

La directive mentionne également l'établissement d'un système uniforme de surveillance radiologique au niveau communautaire. En attendant sa réalisation, le Conseil prévoyait la mise en place par les États membres soit d'un réseau national centralisé, soit la délivrance d'un document individuel, le passeport nucléaire.

16. La société Eurochemic fut la première entreprise commune de l'Agence européenne pour l'énergie nucléaire, créée en décembre 1957 par les gouvernements de 13 pays européens pour développer la coopération internationale dans le domaine du recyclage des combustibles brûlés dans les centrales nucléaires, en vue d'en extraire l'uranium résiduel et le plutonium.

17. Directive 90/641/Euratom du Conseil, du 4 décembre 1990, concernant la protection opérationnelle des travailleurs extérieurs exposés à un risque de rayonnements ionisants au cours de leur intervention en zone contrôlée.

Ces dispositions devaient être transposées au plus tard le 31 décembre 1993, mais l'évaluation de la mise en œuvre de la directive montre que plusieurs des États membres au moment de l'adoption de la directive n'ont transposé cette directive qu'après l'an 2000. Par ailleurs, certains pays ont officiellement transposé le texte, mais n'ont toujours pas à ce jour adopté l'ensemble des dispositions de mise en œuvre.

Dans le rapport d'évaluation de la mise en œuvre de la directive publié fin 2010, qui s'appuie sur les données fournies par 24 États membres et non membres de l'Union européenne, il apparaît que 19 États ont indiqué qu'ils disposaient d'un document individuel de suivi de l'exposition aux rayonnements ionisants des travailleurs extérieurs (European Commission 2010). Sur les 19 opérateurs (appartenant à neuf pays) qui ont participé à l'évaluation, six ont estimé que les travailleurs extérieurs bénéficiaient de la même couverture de sécurité sociale que les travailleurs permanents, et deux entreprises extérieures sur cinq. Le nombre estimé de travailleurs extérieurs concernés est de l'ordre de 100 000¹⁸.

En juin 2010, l'association des responsables des autorités de contrôle européennes de la radioprotection (Head of Radioprotection Authorities, Herca) a adopté le contenu d'un passeport radiologique harmonisé et l'a transmis à la Commission européenne en vue de son intégration dans les normes de base en cours de révision. Cependant, l'application de ce dispositif restera difficile, car les États membres ne sont pas favorables au développement d'une autorité européenne qui serait en mesure de gérer un réseau d'échange et de consolidation des données pour chaque travailleur. De plus, il faut tenir compte de l'absence d'un cadre juridique établissant les règles de protection des données personnelles des travailleurs.

3.4. Vers une nouvelle directive définissant les normes de base

La publication en 2007 des nouvelles recommandations de la CIPR en matière de radioprotection (voir chapitre 2), a amené les instances internationales et européennes à entreprendre un travail considérable de révision des concepts et des normes. Les nouvelles normes de base développées dans la CIPR 103, et notamment la nouvelle estimation de la dose efficace due à l'inhalation de radon 222, devaient être prises en compte¹⁹. Il fallait aussi intégrer la rupture opérée par la CIPR qui distingue désormais protection des humains et protection de l'environnement. Auparavant la CIPR estimait que la protection de l'homme assurait par ricochet la protection des autres espèces vivant dans l'environnement. La procédure de révision de la législation européenne, entreprise par la Commission, est aussi partie du constat que le cadre juridique de la radioprotection dans l'Union était devenu trop complexe.

Le 29 septembre 2011, la Commission a déposé, au nom du Conseil, sa proposition de nouvelle directive devant le Comité économique et social européen. Le nouveau texte est une fusion de cinq directives révisées et consolidées : la directive Normes de base, la directive Exposition médicale, la directive Travailleurs extérieurs, la directive Information de la population, et la directive Sources scellées de haute activité.

18. En sachant que souvent, en particulier dans le secteur médical, ces travailleurs ne sont pas classés comme tel et que ces dernières années le nombre de travailleurs indépendants augmente dans certains pays et qu'ils ne sont pas couverts par la législation nationale dans six pays.

19. Le "Statement radon" de la CIPR (novembre 2009) estime qu'une teneur moyenne de 300 Bq/m³ de radon dans l'air occasionne, en un an, une dose efficace de 10 mSv/an. Il faut noter que la CIPR retient ainsi une relation deux fois plus pénalisante que la précédente qui estimait qu'il fallait une moyenne de 600 Bq/m³ pour occasionner une dose de 10 mSv/an.

3.4.1. Champ d'application de la proposition de nouvelle directive

La proposition de directive s'applique à toute situation d'exposition planifiée, d'exposition existante ou d'exposition d'urgence comportant un risque résultant d'une exposition aux rayonnements ionisants qui ne puisse être négligé pour la protection des travailleurs, des personnes du public ou des patients. Le champ d'application de la directive inclut les sources naturelles de rayonnement pouvant entraîner une augmentation notable de l'exposition des travailleurs et des personnes du public : exposition des équipages (aéronefs et engins spatiaux) aux rayonnements cosmiques ; exposition domestique au radon dans l'air à l'intérieur des bâtiments et sur les lieux de travail ; exposition externe au rayonnement gamma provenant des matériaux de construction. L'intégration des matériaux de construction dans la directive devrait permettre d'élargir le champ de la radioprotection à de nombreuses pratiques industrielles qui n'étaient jusqu'à présent pas concernées. L'annexe V de la proposition de directive énumère une liste de 16 pratiques industrielles qui font appel à des matières radioactives naturelles, dont la production d'engrais phosphaté, la production de ciment, les mines et les activités de fonderie d'étain, plomb et cuivre, les centrales thermiques au charbon.

Les approbations de pratiques autorisées, entraînant une exposition aux rayonnements ionisants, doivent être listées et régulièrement révisées. Tout nouveau type de pratique doit être justifié avant d'être approuvé, notamment l'exposition délibérée de personnes à des fins d'imagerie non médicale : évaluation radiologique à des fins sanitaires dans le cadre des assurances, d'une immigration ou pour détecter des objets dissimulés dans le corps, etc. Désormais, la protection de l'environnement dépasse le seul aspect des expositions humaines.

3.4.2. La protection des travailleurs dans la proposition de nouvelle directive

La directive respecte le concept d'une approche graduée du contrôle du risque radioactif proportionné au risque. Des dispositions de radioprotection doivent être prises dès qu'existe une possibilité d'exposition à des rayonnements ionisants supérieure à une dose efficace de 1 mSv/an.

Lorsque la dose efficace annuelle reçue est inférieure à 6 mSv (travailleurs de catégorie B), les entreprises doivent au minimum exercer un contrôle strict des niveaux d'exposition. Le contrôle des travailleurs de catégorie B doit être assuré au besoin par des mesures individuelles. Et en ce qui concerne le personnel navigant, les entreprises doivent évaluer l'exposition des équipages et tenir compte de cette évaluation pour l'organisation des programmes de vol.

Les règles du contrôle des travailleurs dont la dose efficace annuelle est supérieure à 6 mSv (travailleurs de catégorie A), à savoir un contrôle radiologique systématique fondé sur des mesures individuelles et une surveillance médicale, s'appliquent aussi dans le cas d'une exposition à des matières radioactives naturelles (radon, certains phosphates, etc.) mais dans une catégorie séparée d'expositions existantes avec des normes plus souples.

Pour les situations d'exposition existantes (voir p. 37), des niveaux de référence sont fournis pour les concentrations de radon à l'intérieur des bâtiments et pour l'exposition externe aux rayonnements provenant des matériaux de construction. En ce qui concerne le radon, les niveaux de référence ne doivent pas excéder une moyenne annuelle de 1000 Bq/m³ sur les lieux de travail.

Dans le cadre d'une exposition professionnelle, la limite de dose efficace de 20 mSv est appliquée à chaque année d'exposition. Elle n'est plus le résultat d'une moyenne sur

cinq ans. Cependant, une dose efficace supérieure pouvant atteindre 50 mSv/an peut être autorisée par les États membres au cours d'une année pour autant que la moyenne reçue sur une période de cinq années consécutives ne dépasse pas 20 mSv/an. La limite de dose équivalente pour le cristallin est abaissée à 20 mSv/an. La dose équivalente pour la peau et les extrémités reste inchangée, soit 500 mSv/an.

La nouvelle directive inclut les exigences spécifiques de la directive Travailleurs extérieurs. Elle instaure une répartition plus claire des responsabilités entre l'employeur et l'entreprise où le travail est exercé. Le système de données pour le contrôle radiologique individuel des travailleurs exposés et l'ensemble minimal de données à communiquer pour les travailleurs ont été actualisés à la lumière des recommandations de l'HERCA.

La nouvelle directive accorde une attention particulière à l'information et à la formation des travailleurs, notamment en ce qui concerne une exposition potentielle à des sources orphelines, en particulier dans les grands parcs à ferraille et les grandes installations de recyclage des métaux. Elle insiste sur le niveau de qualification des responsables et des experts en physique médicale et en radioprotection.

La proposition de directive ne mentionne pas, dans le cadre de l'optimisation de la radioprotection, la notion de dose collective, mais le groupe d'experts de l'article 31 a insisté pour que ce concept opérationnel soit conservé. La directive préfère mettre l'accent sur l'application du principe ALARA dans toutes les situations et catégories d'exposition par le biais de contraintes de dose par source, développées en particulier pour le secteur médical avec la notion de "niveau de référence dérivé" (derived reference level, DRL).

3.4.3. Limites de la proposition de directive

En février 2010, les experts de l'article 31 avaient émis un avis sur une première proposition de texte²⁰. Leurs remarques ont généralement été rencontrées dans le projet de directive déposé au CESE le 29 septembre 2011, mais il reste des éléments d'incertitude.

La proposition de directive n'englobe pas le transport des matières radioactives, ni la sécurité nucléaire, ni non plus l'échange d'information en cas d'accident. Ces matières feront toujours l'objet de législations séparées.

L'approche de la directive est traditionnelle. Les expositions restent classées selon les personnes exposées : travailleurs, patients, public contrairement à l'approche des normes de base internationale de l'AIEA. La Commission européenne préfère définir des sous catégories classées sur base du type d'exposition : planifiée, d'urgence, naturelle. L'exposition professionnelle pourrait se situer alors dans trois catégories avec des normes différentes par nature d'exposition.

La directive ne prévoit pas l'instauration d'un passeport radiologique européen, seule garantie que toutes les expositions des travailleurs, subies parfois dans des pays différents, soient comptabilisées. Des discussions sont en cours pour évaluer la faisabilité d'un système électronique d'information entre pays. La problématique des équipes de secours (*emergency workers*) devrait, après l'accident de Fukushima, recevoir plus d'attention.

La réduction de la limite de dose pour le cristallin, de 150 mSv à 20 mSv, devrait bénéficier à certains groupes professionnels, tels les cardiologues et ceux qui pratiquent la

²⁰. Opinion of the Group of experts established under Article 31 of the Euratom treaty on the Revised basic safety standards for the protection of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionising radiation, 24 February 2010.

radiologie interventionnelle, et leur éviter de contracter une cataracte radioinduite. Cependant, pour le public, la limite de 15 mSv reste inchangée. Ceci constitue un mauvais signal envoyé aux médecins qui pourraient être enclin à ne pas prendre davantage de précautions pour le risque lié au cristallin des patients exposés à des doses intermédiaires, même en cas d'examens diagnostics répétés.

La sécurité des limites de dose appliquées pour le radon dépend fortement du facteur de conversion qui sera choisi. La CIPR, dans sa publication 103, a estimé qu'une exposition au radon 24 heures sur 24 à un niveau moyen de 300 Bq/m³ occasionne une dose efficace reçue d'environ 10 mSv/an. Est-ce ce facteur de conversion qui sera utilisé? Nous pouvons le supposer car il est adopté également par l'OMS et l'Unsear. Dans ce cas, étant entendu que le travailleur est exposé 8 heures par jour, la limite annuelle d'exposition au radon retenue dans la directive, 1 000 Bq/m³, correspondrait à une dose efficace de 10 mSv/an. Un niveau nettement supérieur au seuil de 6 mSv qui définit les travailleurs de catégorie A et qui paraît très élevé dans le cadre d'une exposition professionnelle planifiable. Ce problème montre le paradoxe qui existe dans la prise en compte des limites d'exposition pour les travailleurs exposés à des sources naturelles de rayonnement. La même idée de catégorisation et de normes différentes est appliquée pour la survie dans des zones contaminées (situations existantes).

Pour les matériaux de construction, la proposition de directive ne tient compte que des niveaux de radioactivité qui entraîneraient une exposition excédentaire à 1 mSv/an, s'ajoutant à l'exposition naturelle. Dans leur avis, les experts de l'article 31 avaient souhaité de manière générale pour la gestion des résidus de l'industrie²¹ que l'exposition ne dépasse pas 0,3 mSv/an. Cette dose limite risque d'être dépassée dans les maisons fortement isolées, notamment dans celles respectant le standard "maison passive". Dans ces cas, des mesures de prévention devraient être mises en place afin de limiter l'exposition interne au gaz radon, dont l'impact sur la santé a été souligné par l'OMS et la CIPR (voir encadré sur le radon, p. 25). Cette tâche difficile de protéger le public contre des doses non négligeables émises par les matériaux de construction recyclés reviendra, comme nombre d'autres, aux Etats membres.

La réduction des coûts des déchets nucléaires et des matériaux naturellement radioactifs, sous condition de limiter certains risques, pourrait être considérée comme l'objectif utilitaire majeur de la proposition de directive.

Les matériaux qui contiendraient des déchets et résidus d'exploitation doivent respecter la limite de 1 mSv. Mais pour les déchets et résidus en tant que tels, il n'existe pas de norme. La gestion des zones contaminées existantes est laissée à l'appréciation des États membres. C'est notamment le cas pour les décharges contenant des déchets phosphatés dont l'activité pourrait provoquer un dépassement de la limite par exposition au radon en cas de construction de maisons sur ces terrains, même dans un futur lointain. Ce problème se pose aussi dans les zones où la contamination résiduelle est ancienne et où l'installation et la reprise des activités économiques seraient autorisées. De même que dans les environs des mines d'uranium où les "stériles"²² pourraient être utilisés pour faire des routes ou produire du béton.

21. Certaines branches de l'industrie des matériaux de construction utilisent des matières premières relativement riches en substances radioactives naturelles, comme l'uranium et le thorium. Ces matériaux présentant une radioactivité naturelle renforcée sont souvent désignés sous l'acronyme "NORM" (Naturally Occuring Radioactive Materials).

22. Roches extraites qui ne contiennent que très peu d'uranium et qui, par conséquent, ne sont pas traitées.

Ce qu'il faut retenir

Les premières directives européennes relatives à la protection des travailleurs et du public contre les rayonnements ionisants ont vu le jour en 1959. Elles sont depuis révisées environ tous les 15 ans (1980, 1996 et probablement 2012).

Le temps qui sépare chacune de ces étapes conduit à disposer d'une nouvelle législation nationale que tous les 15 ans environ, du fait de l'empilement des délais associés à ces différentes étapes, et notamment le fait que les États nationaux disposent d'un délai de quatre années, réduit pour le dernier projet de directive à deux ans, pour transposer la directive européenne, délai très souvent non respecté par les États membres.

Suivant leur culture juridique propre et des particularités de leur droit national, les États produiront un système juridique complet regroupant tous les aspects du problème (protection des travailleurs, transports, usages médicaux, gestion des déchets, autorisations de rejets radioactifs, etc.) ou intégreront les dispositions de la directive dans des codes juridiques distincts.

La prochaine directive européenne sera publiée au plus tôt en 2012, ce qui entraînera pour les États membres de l'Union européenne des modifications de la réglementation sur les rayonnements ionisants vers environ 2014-2016.

Le changement majeur du nouveau texte sera l'extension du champ d'application à davantage de secteurs (notamment les secteurs concernés par la radioactivité naturelle, telle la navigation aérienne) et par conséquent la mise sous contrôle de l'exposition d'un nombre plus élevé de travailleurs. Le principe de justification incluant la prise de responsabilité professionnelle est élargi et accentué, notamment pour le secteur médical. Le principe d'optimisation est développé avec une attention particulière pour le principe de "conscience du risque" qui est crucial pour justifier le travail à risque. La proposition de directive met également l'accent sur l'information (également des patients), la formation (continue) et le rôle de support et de contrôle des experts compétents.

Chapitre 4

La maîtrise des rayonnements ionisants : un chemin semé d'accidents et de maladies

En ce début du XXI^e siècle, on assiste à une progression de l'utilisation des rayonnements ionisants. Le secteur de l'énergie nucléaire connaît un regain d'intérêt au moment où le réchauffement climatique se précise et où de nombreux États souhaitent réduire leur dépendance vis-à-vis du pétrole. Dans le secteur médical, l'utilisation des rayonnements ionisants en radiothérapie, et le recours à des appareils de radiologie de plus en plus sophistiqués pour le diagnostic ne cessent de progresser. Dans le secteur industriel, on assiste à un usage croissant de sources de rayonnements ionisants pour de nombreuses applications.

L'utilisation des rayonnements ionisants a été et reste source d'accidents et d'incidents graves, comme nous l'a malheureusement rappelé l'accident de Fukushima de mars 2011. Elle représente un risque d'exposition pour des millions de travailleurs dans le monde et cause de maladies professionnelles.

4.1. L'alerte de Three Mile Island et le traumatisme de Tchernobyl

La mise en œuvre de la filière nucléaire civile a connu des incidents, et un accident grave survenu le 28 mars 1979 sur le site de Three Mile Island, dans l'État de Pennsylvanie (États-Unis). À la suite d'une chaîne d'événements mal compris et d'erreurs, le cœur d'un des réacteurs a en partie fondu. L'enceinte de confinement a résisté, seul un rejet radioactif limité a été déploré. L'accident n'a fait aucune victime parmi les membres du personnel, ni dans la population vivant aux alentours. La contamination due au rejet s'est révélée très faible. Mais on venait d'éviter de peu une véritable catastrophe. Cet accident a eu de profondes répercussions

et les exploitants de centrales nucléaires ont été amenés à modifier la conception des centrales du même type et à réviser les procédures de sécurité (USNRC 2009). L'accident de Tchernobyl est d'une toute autre nature.

Le 26 avril 1986, à 1 h 24 du matin, le réacteur n° 4 de la centrale de Tchernobyl, située en Ukraine, à proximité de la frontière avec la Biélorussie, explose et prend feu. L'accident s'est produit à l'occasion d'un test. Dans le rapport présenté à l'AIEA, les autorités soviétiques ont insisté sur les violations des procédures et des règles de sécurité. S'il y a eu des négligences inadmissibles et des erreurs de jugement particulièrement graves, il est également vrai que l'ampleur prise par l'accident est la conséquence des caractéristiques techniques des réacteurs du type de celui de Tchernobyl. Ce type de réacteur, destiné à la production d'électricité et qui aurait pu également être utilisé pour produire du plutonium à des fins militaires, ne disposait pas d'un système d'arrêt d'urgence suffisamment rapide, ni d'une enceinte étanche de grande dimension.

La destruction du réacteur et l'incendie qui a duré dix jours ont entraîné le rejet dans l'atmosphère de grandes quantités de substances radioactives, principalement de l'iode 131, du césium 137 et du césium 134. L'iode 131 a une demi-vie relativement courte (huit jours), mais peut être très rapidement absorbé via l'air et la consommation de lait et de légumes contaminés. Le césium 137 a une demi-vie d'environ 30 ans. Il constitue un risque à long terme.

Les plus fortes doses ont été reçues par les 600 personnes présentes sur le site aux premières heures du 26 avril. Il s'agissait principalement de membres du personnel d'exploitation de la centrale, des pompiers qui ont combattu les incendies et des sauveteurs. Parmi ces personnes, 134 ont présenté rapidement les signes aigus d'irradiation, 28 sont décédées dans les trois mois suivant l'accident, et 19 entre 1987 et 2004. Les séquelles principales dont souffrent les personnes ayant survécu au syndrome d'irradiation aiguë sont des atteintes de la peau et des cataractes. Ceux qu'on a appelés "les liquidateurs" forment un groupe évalué entre 600 000 personnes selon l'Unsclear et 830 000 personnes selon d'autres sources (Yablokov 2009). Les liquidateurs sont intervenus sur le site et ses environs dans les opérations d'évacuation des déchets radioactifs, de construction du sarcophage de béton, de décontamination, de restauration du site dans un périmètre de 30 km, etc. Les doses reçues par les liquidateurs ont été estimées entre 0,01 Gy et 1 Gy, la dose moyenne efficace qu'ils ont reçue serait de l'ordre de 120 mSv. Les intervenants des premiers jours ont reçu des doses plus élevées que ceux qui les ont relayés, pour certains des doses supérieures à 250 mSv (Cardis 2011). La cohorte des liquidateurs présente un risque potentiel de développer les pathologies à long terme dues aux radiations. Parmi les liquidateurs, une augmentation des cas de leucémie et des affections sanguines malignes ainsi que des cataractes est observée (Cardis 2011).

Le lendemain de la catastrophe, les autorités militaires soviétiques commencent à évacuer la ville de Prypiat voisine de la centrale et, à partir du 2 mai, les localités situées dans un rayon de 30 km autour du lieu de l'accident. Selon l'Unsclear, 116 000 personnes auraient été évacuées en 1986, 135 000 selon d'autres sources. Elles auraient subi une dose moyenne de 30 mSv.

Après 1986, environ 220 000 autres personnes auraient été évacuées de zones, contaminées par des éléments radioactifs, situées sur des territoires actuels de Biélorussie, d'Ukraine et de la Fédération de Russie. Au final, c'est près de 350 000 personnes qui ont dû quitter leur domicile (Yablokov 2009). Certaines évacuations se sont déroulées dans le chaos et avec retard. Ceux qui ont continué à résider dans les zones contaminées pendant les deux décennies suivantes auraient subi une dose supplémentaire moyenne de 20 mSv (UNSCEAR 2008).

Dès 1989, des spécialistes biélorusses ont révélé l'émergence de cancers de la thyroïde dus à l'accident. Après l'accident de Tchernobyl, alors qu'on ne relevait auparavant que de deux à trois cas de cancer de la thyroïde par an en Biélorussie, 29 cas étaient dénombrés en 1990, 55 en 1991 et une moyenne de 70 cas par an pour la période 1991-1998. Dans les pays et régions proches de Tchernobyl, on comptabilisait, en 1998, environ 1800 cas de cancer de la thyroïde parmi les enfants (UNSCEAR 2008). Ces cancers ont eu chez les enfants une rapidité de développement et une gravité inhabituelles. En 2011, 25 ans après la catastrophe, le risque de développer un cancer de la thyroïde était toujours très élevé parmi les personnes jeunes exposées (Cardis 2011).

Le rapport 2008 de l'Unscear sur les conséquences de la catastrophe de Tchernobyl, publié début 2011, fait état pour la période de 1991 à 2005 de 6848 cas de cancer de la thyroïde diagnostiqués parmi les enfants et adolescents, âgés de moins de 18 ans en 1986, résidant dans les régions contaminées par la catastrophe. Dans ce groupe, l'incidence des cancers de la thyroïde continue de progresser. En 2005, ces cancers étaient à l'origine de 15 décès. La quasi-totalité de ces cancers est attribuable à l'absorption de lait contaminé par de l'iode radioactif, mais certains considèrent que l'inhalation directe par les enfants habitant autour du réacteur a joué aussi un rôle important. Le matin du 26 avril, les enfants sont allés à l'école. Beaucoup ont joué dehors. Les marchés étaient ouverts. La décision de distribuer les pastilles d'iode destinées à empêcher l'iode radioactif de se fixer sur la thyroïde, n'avait pas encore été prise. L'évacuation des habitants autour de la centrale ne sera réalisée que le 27 avril après-midi (Molitor 2011).

Des atteintes cardiaques sont aussi apparues, notamment chez les enfants qui souffrent d'affections frappant habituellement les adultes à un âge avancé. Un programme franco-russe d'évaluation des pathologies induites par le césium, baptisé Epice, est en cours (UNSCEAR 2008). Il est possible qu'il révèle de nouvelles pathologies parmi la population.

Le bilan officiel de l'explosion de Tchernobyl est vivement contesté par de nombreux scientifiques, parmi lesquels des spécialistes russes qui ont enquêté sur les conséquences de la catastrophe. Ces scientifiques se basent sur l'augmentation des taux de mortalité observés dans les régions les plus touchées pour arriver au chiffre de 237 500 décès liés à la catastrophe en Biélorussie, Ukraine et Russie pour des affections cancéreuses et non cancéreuses, au cours de la période allant de 1986 à 2004 (Yablokov 2009).

En extrapolant ces résultats aux territoires contaminés à l'extérieur de l'ex-Union soviétique, tenant compte des différents niveaux de retombées radioactives, et en les ajoutant aux victimes "soviétiques", ils estiment qu'au cours de la même période un total de 985 000 décès serait à mettre au compte de l'accident de Tchernobyl car des radionucléides ont été dispersés dans tous les pays de l'hémisphère nord²³.

Les prévisions pour le futur sont sombres étant donné la longue durée d'activité des éléments radioactifs dispersés dans l'environnement et les dégâts continus provoqués par leur absorption et leur accumulation par les organismes vivants. Les spécialistes russes attirent tout particulièrement l'attention sur la plus grande fragilité de la population exposée, sa plus grande sensibilité aux maladies et son état de santé très dégradé, notamment parmi les enfants.

23. Les doses de radionucléides dispersés n'ont en fait pas été mesurées, mais reconstituées en utilisant des modèles de diffusion de la contamination atmosphérique et en posant diverses hypothèses simplificatrices. C'est le cas des doses délivrées par les rejets de césiums 134 et 137 (dont l'activité persiste encore aujourd'hui), de strontium 90, des émetteurs alpha et des iodes radioactifs.

4.2. Le dénombrement approximatif des accidents nucléaires

Nombreux ont été les accidents radiologiques ou nucléaires dont on ne sait rien, car couverts par le secret d'État, ou restés non identifiés parce qu'ils sont survenus dans des pays démunis. Le partage de l'information pour tirer les leçons de ces accidents a été mis en place très tardivement et reste très imparfait.

Le rapport 2008 du Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (Unsear) présente une synthèse des accidents connus et une estimation du nombre de victimes qu'ils ont occasionnées depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, en les classant par grands secteurs (UNSCEAR 2008).

L'Unsear répertorie 38 accidents sérieux survenus de 1945 à 2007 dans des installations nucléaires, dont 26 dans des centres de développement d'armes nucléaires. Sur ces 38 accidents, 34 ont fait des victimes et 7 ont été à l'origine d'une pollution radioactive.

À l'exclusion de l'accident de Tchernobyl, les accidents du secteur du combustible nucléaire ont causé 29 décès et 68 cas d'irradiation ayant nécessité des soins médicaux.

Dans le secteur industriel, où des sources radioactives sont largement utilisées, l'Unsear dénombre 85 accidents ayant entraîné des niveaux d'irradiation élevés. Ces accidents ont été à l'origine de 25 décès et ont contaminé 164 travailleurs.

Les accidents survenus dans le secteur médical sont généralement dus à des erreurs dans la dosimétrie ou à des erreurs de réglage des appareils de radiothérapie. Ils ne sont souvent détectés que lorsqu'un nombre important de patients sont impliqués. L'Unsear n'a répertorié dans ce secteur que 29 accidents dont le bilan humain s'élève à 45 décès et 613 blessés. Selon le comité d'experts onusien, de nombreux accidents de radiothérapie ne sont pas déclarés. Malgré tout, les accidents médicaux répertoriés ont fait plus de victimes que les accidents survenus dans les autres secteurs d'activité.

Nous trouvons la preuve du côté très fragmentaire des accidents répertoriés par l'Unsear dans les chiffres de victimes d'une irradiation prises en charge par l'Institut Curie à Paris, spécialisé dans les soins aux irradiés. Entre 1951 et 1997, l'Institut Curie a traité 602 victimes d'incidents radiologiques, dont 478 victimes professionnelles (204 provenant de l'industrie non nucléaire, 153 des installations de recherche, 62 de l'industrie nucléaire et 59 des installations médicales). Les autres victimes étaient 88 patients et 36 personnes du public (CEPN 2006).

L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire français (IRSN) a estimé, dans un rapport publié en 2007, à 500 000 le nombre de sources radioactives en Europe dont certaines sont hors d'usage, mal identifiées, ou tout simplement perdues de vue ; ce que les spécialistes appellent les sources orphelines (Nénot 2007).

Les sources orphelines sont à l'origine de plusieurs accidents et contaminations graves. Les 29 accidents graves impliquant des sources orphelines répertoriés par l'Unsear ont été à l'origine de la contamination de populations. Ils ont fait 33 morts, dont des enfants. Un des accidents les plus connus est celui de Goiânia, au Brésil, qui a causé plusieurs décès et contaminé des centaines de personnes (voir encadré p. 57).

Selon l'AIEA, plus d'une centaine de pays dans le monde n'ont pas de contrôle adéquat ni de programme de suivi pour prévenir ou même détecter le vol, ou la perte, d'une source radioactive. Ces sources (cobalt 60, strontium 90, césium 137, iridium 192) ont été produites et utilisées par millions depuis les années 1950. Les sources orphelines échappant aux contrôles officiels seraient monnaie courante dans les pays de l'ancien bloc soviétique. Le déclin économique rapide de la Géorgie, après sa séparation de l'Union soviétique, a favorisé la perte de contrôle des sources radioactives utilisées dans l'industrie. Depuis le milieu des années 1990, plus de 300 sources radioactives ont été récupérées.

Elles ont fait au moins un mort et de nombreux blessés. En Moldavie, plusieurs sources radioactives relativement importantes ont été retrouvées à l'abandon ou conservées dans des conditions précaires.

Les sources orphelines ne sont pas l'apanage des pays de l'ex-bloc soviétique. Ainsi, aux États-Unis, les compagnies industrielles auraient perdu, depuis 1996, près de 1500 sources radioactives, dont la moitié n'aurait jamais été retrouvée. L'Union européenne estime pour sa part que, chaque année, plus de 70 sources sortent du système de contrôle. On les retrouve parfois dans les ferrailles et les ateliers de récupération de métaux comme en Inde (voir p. 73). Beaucoup de ces sources sont heureusement faiblement radioactives, mais pourraient être utilisées pour fabriquer des bombes sales ou mélangées à des matériaux qui à leur tour deviendraient radioactifs.

Au Brésil, une source orpheline provoque quatre décès

En 1985, une clinique privée installée dans l'un des quartiers les plus pauvres de la ville brésilienne de Goiânia, emménage dans de nouvelles installations. Lors du déménagement, elle laisse derrière elle un irradiateur équipé d'une source de césium 137. Les anciens locaux laissés à l'abandon tombent en ruine. Les anciennes salles de radiothérapie deviennent très vite un lieu de refuge pour des personnes sans ressources.

En septembre 1987, deux personnes démontent l'appareil de radiothérapie pour en revendre certaines parties. Elles ignorent tout du risque radiologique qu'elles encourent. Après avoir retiré le barillet en acier inoxydable qui renferme la source radioactive, elles l'emportent dans une brouette. Les deux personnes sont prises de vomissements, puis pour l'une d'elles de diarrhées, de vertiges et d'un œdème à la main. Un médecin consulté attribue les symptômes à une allergie.

La personne la moins touchée tente quelques jours plus tard d'extraire la source du barillet et la perce avec

un tournevis. Puis il revend le barillet à un ferrailleur. Celui-ci observant une lueur bleue émanant de la source l'emporte chez lui et en distribue les fragments à ses amis. Certains d'entre eux s'enduisent de cette poudre scintillante. Les jours suivants, plusieurs personnes se plaignent de troubles intestinaux. L'épouse du ferrailleur, soupçonnant la poudre mystérieuse, l'apporte à l'unité sanitaire locale qui la dirige vers un l'hôpital où se trouvent déjà d'autres personnes contaminées. Un physicien confirme la contamination à l'aide d'une sonde gamma utilisée pour la recherche des gisements d'uranium. Par sa conviction et son courage, il réussira à réduire l'impact sanitaire de l'accident.

Mais 249 personnes auront subi une contamination, dont 129 à la fois interne et externe, et 49 personnes seront hospitalisées, dont dix dans un état critique. Quatre personnes décèdent un mois plus tard, dont la femme du ferrailleur et sa nièce de six ans. Des dizaines de maisons ont été détruites et plus de 200 personnes évacuées. La ville et ses environs n'ont été considérés comme assainis que six mois plus tard. Et il a fallu dix années pour traiter les déchets. L'économie de toute la région s'en est trouvée affectée.

4.2.1. Tirer les leçons des événements nucléaires et radiologiques

À partir de 1999, l'AIEA a développé une base de données portant sur les incidents radiologiques survenus dans les secteurs autres que l'industrie nucléaire. Le système Radev (RADiation Events database) n'est accessible qu'à certaines organisations des pays membres de l'AIEA, qui en échange s'engagent à l'alimenter régulièrement. Une analyse de 179 événements rapportés au réseau Radev indique que 50 % étaient liés au secteur industriel non nucléaire, 37 % au secteur médical. 24 événements étaient dus à des sources orphelines

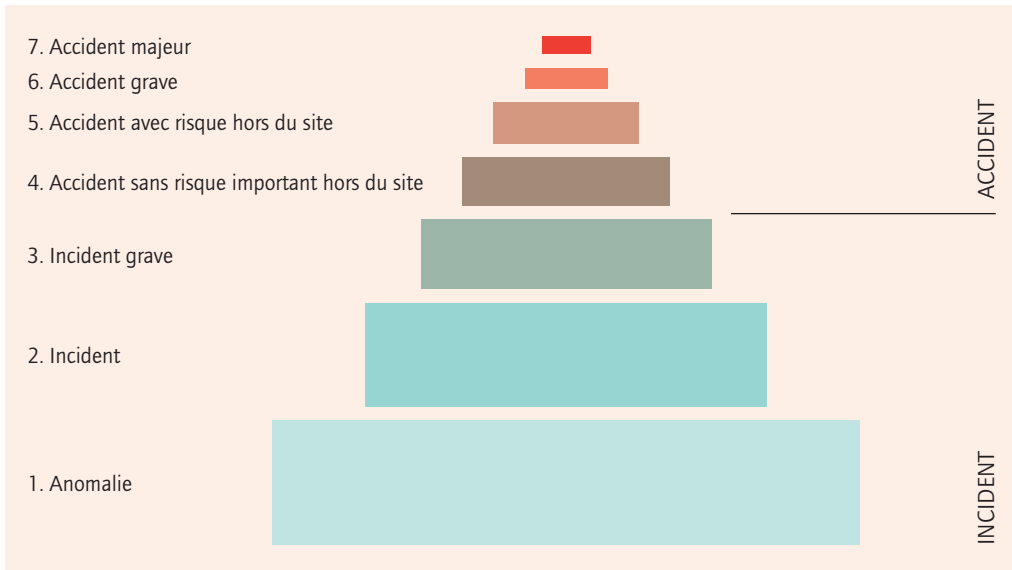
(Croft 2002). Dans le secteur industriel, la radiographie était l'activité la plus souvent citée comme source d'incidents, et la cause la plus fréquente était une déficience des procédures de sécurité. Ces événements ont eu pour conséquence l'irradiation de 205 personnes en dessous des doses limites ; l'irradiation de 44 personnes au-dessus des doses limites ; 14 cas de brûlures radio-induites ; 8 cas d'amputations et 5 décès (Croft 2002).

L'AIEA est également l'initiatrice de l'échelle INES (International Nuclear Event Scale), une échelle internationale de mesure de la gravité des événements (mot préféré à accident) nucléaires et radiologiques. Cette échelle, qui varie de 0 à 7, vise à parler un langage commun, comme c'est le cas pour l'échelle de Richter qui caractérise la magnitude des tremblements de terre. Le système INES fonctionne depuis 1990. D'abord cantonnée au secteur de l'énergie nucléaire, son utilisation a été, en 2006, adaptée pour s'appliquer à toute utilisation des sources de rayonnement ionisant. L'échelle INES doit permettre de saisir l'importance des événements résultant de diverses activités, dont l'utilisation des sources de rayonnements ionisants dans l'industrie et en médecine, le fonctionnement des installations nucléaires et le transport des matières radioactives.

Les événements sont classés selon sept niveaux. Les niveaux 1 à 3 correspondent aux incidents, les niveaux 4 à 7 aux accidents. Entre chaque niveau, la gravité d'un événement est décuplée. La gravité est évaluée en fonction de trois niveaux d'impact : impact sur la population et l'environnement ; impact confiné à l'entreprise ; dysfonctionnement de la sécurité sans impact sur la population et l'environnement.

Rétrospectivement, le rejet de matières radioactives dans l'environnement, en octobre 1957 à Windscale, a été classé de niveau 5 (voir p. 13). Le rejet important de matières radioactives dans l'environnement à la suite d'un incendie survenu, en septembre 1957, dans un stockage de déchets de haute activité à Mayak (Russie) a été classé de niveau 6 (voir p. 13), et l'accident de Tchernobyl (1986) au niveau 7. L'échelle INES s'est cependant révélée insuffisante à Fukushima pour caractériser un accident combiné de plusieurs réacteurs sur le même site.

Figure 4 Echelle internationale des événements nucléaires et radiologiques (INES)



Source: <http://www.fanc.fgov.be>

L'échelle INES ne concerne pas les incidents et les accidents survenus dans les applications médicales des rayonnements ionisants. En France, après une série de dysfonctionnements graves dans des services de radiothérapie, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et la Société française de radiothérapie oncologie (SFRO) ont engagé une réflexion qui a conduit à l'élaboration d'une échelle de classement, l'échelle ASN-SFRO. Opérationnelle depuis juillet 2008, cette échelle permet de hiérarchiser en huit niveaux les événements affectant des patients dans le cadre d'une procédure médicale de radiothérapie. Les effets pris en compte dans la déclaration faite à l'ASN sont des effets inattendus ou imprévisibles dus à des doses ou à des volumes irradiés inappropriés. Les éventuels effets secondaires résultant de la stratégie de traitement ne sont pas pris en compte, et cela quel que soit leur niveau de gravité.

Aux États-Unis et dans les pays européens, des organismes sont chargés de contrôler la sécurité nucléaire et de recenser les événements et incidents de radioprotection. En France, ce rôle est rempli par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). Au Royaume-Uni, la radioprotection relève, depuis avril 2011, d'un nouvel organisme, l'Office for Nuclear Regulation (ONR), qui prend en charge des domaines auparavant gérés par le ministère de la Santé et le ministère des Transports. Ces deux derniers pays ont élaboré, en plus, un système d'information sur les événements nucléaires pour éviter leur renouvellement.

L'un des moyens les plus efficaces pour réduire le nombre et la gravité des incidents radiologiques est de faire partager aux travailleurs concernés le retour d'expérience des incidents passés. C'est en partant de ce constat que le Royaume-Uni a créé, en 1996, le système IRID (Ionising Radiation Incident Database). Ce système a débouché sur la publication en 1999 d'un rapport contenant une centaine de fiches analysant les incidents survenus (Walker 1999). À l'issue de chaque analyse de cas, des recommandations à l'attention des utilisateurs sont établies. Les incidents sont séparés en deux grands groupes : les incidents survenus dans l'industrie non nucléaire et les incidents liés au transport de matières nucléaires.

Depuis 2001, la France a mis en place le système Relir (Retours d'expériences sur les incidents radiologiques) dont la base de données est accessible sur l'Internet²⁴. L'objectif de Relir n'est pas d'établir un inventaire exhaustif des incidents, mais de sélectionner les événements les plus utiles pour la formation des travailleurs et la prévention des incidents. Tout incident, quelles qu'en soient la gravité et les conséquences, est retenu dès lors qu'il permet d'enrichir l'expérience.

De tels instruments n'existent pour l'instant pas au niveau européen. Une étude pilote a été menée au début des années 2000 dans la foulée d'un séminaire du réseau européen ALARA²⁵ où il avait été souligné que le nombre des incidents radiologiques et les expositions moyennes associées étaient plus élevés dans les secteurs industriels non nucléaires. L'étude visait à encourager la création d'un système européen de retour d'expérience en matière d'incidents radiologiques baptisé Euraide (European Accident and Incident Data Exchange). Financée par la Commission européenne, cette étude, publiée en 2004, a permis de dresser un panorama de la situation dans les pays membres et candidats (CEPN 2006)²⁶.

On peut s'étonner qu'il ait pratiquement fallu un siècle avant que des outils d'analyse des accidents radiologiques et nucléaires ne soient créés, et encore ne sont-ils qu'une

24. Pour en savoir plus : <http://relir.cepn.asso.fr>

25. Réseau créé afin de contribuer à la mise en œuvre et à la diffusion du principe ALARA.

26. 5 pays ne disposaient pas d'un système d'information sur les événements radiologiques (Autriche, Belgique, Chypre, Portugal, Irlande) ; 12 pays disposaient d'un tel système (Allemagne, Espagne, Finlande, France, Lituanie, Luxembourg, Pays-Bas, République Tchèque, Roumanie, Royaume-Uni, Slovénie, Suède) ; 3 pays étaient en train de développer un tel système (Islande, Suisse, Turquie) ; 5 pays ne disposaient pas d'un tel système, mais s'appuyaient sur le système INES (Grèce, Italie, Pologne, Slovaquie) ou sur le système Radev (Norvège).

poignée et pas toujours accessibles à tous. Les obstacles étaient sans doute nombreux : économiques, politiques, et peut-être également culturels. Admettre les accidents ou les incidents, c'était reconnaître les failles d'une technique qui "devait faire le bien de l'humanité". Et quand on ne pouvait pas éluder l'information sur l'accident, on préférait mettre l'accent sur le facteur humain. Comme le souligne Jean-Claude Zerbib, ex-ingénieur de radioprotection du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) : "Analyser un accident, c'est souvent remonter loin en amont pour être sûr que des éléments initiateurs ou promoteurs n'échappent pas à l'analyse. Cette mise à plat qui nécessite la coopération de tous les acteurs, ne peut être acquise que s'ils ont la conviction que l'analyse sera impartiale, n'occultera aucune cause, que la recherche d'un coupable ne se substituera pas à la quête patiente de tous les éléments susceptibles d'expliquer la genèse de l'accident."

4.3. L'exposition planifiée

Les travailleurs engagés quotidiennement dans les secteurs où l'on utilise des sources radioactives subissent une exposition dite planifiée, ou situation d'exposition anticipée, car prévisible. L'exposition est soit externe, personnes exposées dans un champ de rayonnement (rayons X, gamma, bêta, neutrons), soit interne à la suite d'une incorporation de matières radioactives (manipulation de sources non scellées, opération de décontamination). Dans l'Union européenne notamment, les activités nucléaires sont soumises à un régime d'autorisation ou de déclaration. Lorsque le travailleur est soumis à un risque d'exposition externe, il est suivi en dosimétrie externe passive, corps entier et/ou extrémités. La mesure de rayonnements de nature différente nécessite parfois le port de plusieurs dosimètres. Lorsque le travailleur est exposé à un risque d'exposition interne, le suivi est effectué par des examens qui permettent de mesurer *in vivo* l'activité des radionucléides présents dans l'organisme ou par des analyses radiotoxicologiques, c'est-à-dire des dosages de l'activité des radionucléides présents dans des échantillons d'urine, de fèces ou des prélèvements nasaux. Ces mesures servent d'abord à s'assurer de l'absence de contamination plutôt qu'à calculer une dose interne, appelée dose engagée. Celle-ci est le résultat d'un calcul complexe qui tient compte des mesures effectuées et du devenir des radionucléides dans l'organisme. Aussi les données connues relatives à l'exposition des travailleurs sont généralement les résultats de la surveillance de l'exposition externe.

Parmi les 23 millions de travailleurs exposés dans le monde à des radiations ionisantes d'origine naturelle et artificielle, 7,4 millions verraient leur exposition contrôlée (UNSCEAR 2008). De nombreux organismes collectent les données aux niveaux international, européen et national. Une gestion européenne de ces données fait jusqu'à présent défaut.

À l'échelon mondial, le système international d'information sur les expositions professionnelles aux rayonnements ionisants (Information System on Occupational Exposure, ISOE) constitue depuis 1992 un réseau de communication entre les exploitants de réacteurs nucléaires. Il réunit également les autorités de sûreté et de radioprotection de plus de 25 pays, dont 16 États membres de l'Union européenne²⁷. Les données recueillies par le réseau ISOE permettent notamment de comparer la dose subie par l'ensemble des travailleurs employés au fonctionnement d'un réacteur nucléaire par rapport à la dose subie par les travailleurs d'un autre réacteur (voir chapitre 6).

27. Le secrétariat de l'ISOE est assuré conjointement par l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) et par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). Quatre centres techniques assurent le recueil des données. Pour en savoir plus : www.isoe-network.net.

À l'échelon européen, le programme Esorex (European Study of Occupational Radiation Exposure)²⁸, initié par les autorités européennes en 1997, a cherché à déterminer l'impact des réglementations, principalement de la directive Euratom, sur les doses subies par les travailleurs exposés à des sources de rayonnements ionisants. À cette fin, en 2000, un million de travailleurs ont été considérés professionnellement exposés²⁹ et les résultats de leur surveillance ont été intégrés dans l'étude.

Pour les travailleurs ayant subi une dose d'exposition mesurable (35 % des travailleurs surveillés), la dose moyenne annuelle était de 1,3 mSv. Dans les secteurs de l'industrie et dans celui de l'énergie nucléaire, les moyennes d'irradiation sont légèrement supérieures (respectivement 1,8 mSv et 1,5 mSv). Dans le secteur industriel, 12 travailleurs sur 10 000 ont reçu une dose supérieure à 20 mSv. Ils étaient 11 sur 10 000 dans le secteur de l'énergie nucléaire et 4 sur 10 000 dans le secteur médical.

Les travailleurs exposés à une irradiation d'origine naturelle ont reçu une dose moyenne de 3 mSv, et 100 travailleurs sur 10 000 ont reçu une dose supérieure à 20 mSv.

De 1996 à 2000, l'irradiation d'origine naturelle des travailleurs a baissé de moitié. L'irradiation des travailleurs a également diminué dans le secteur de l'énergie nucléaire de manière significative et, dans une moindre mesure, dans les autres secteurs. Les auteurs de l'étude concluent à un impact favorable indéniable de la directive Euratom sur l'exposition moyenne des travailleurs.

Les données du réseau Esorex indiquent un ordre de grandeur et une tendance. Certains pays fournissent des données plus complètes et plus récentes sur la population des travailleurs exposés aux radiations ionisantes.

En France, le bilan de la surveillance 2010 indique que la dose externe moyenne des 330 618 travailleurs surveillés a été de 0,19 mSv. 61 959 travailleurs ont reçu une dose supérieure au seuil d'enregistrement dont 12 207 une dose supérieure à 1 mSv, 1598 une dose supérieure à 6 mSv, et 46 une dose supérieure à 15 mSv. La recherche, le secteur industriel non nucléaire et le secteur médical sont les seuls secteurs où l'on a observé un dépassement de la limite de 20 mSv, dans respectivement un, trois et quatre cas (IRSN 2010).

En Allemagne, 317 000 personnes étaient équipées d'un dosimètre personnel en 2007, dont 77 % dans le secteur médical. Pour les 57 000 personnes dont la dose dépassait le seuil mesurable de 0,05 mSv, soit 18 % du total, cette moyenne était de 0,79 mSv.

Au Royaume-Uni, les données relatives à l'année 2004, font état de la surveillance de 38 869 travailleurs considérés comme "classified persons". La moyenne d'exposition pour l'année a été de 0,5 mSv tous secteurs confondus, de 0,3 mSv dans le secteur de la maintenance des centrales nucléaires, 1,9 mSv pour les infirmières, 2,3 mSv pour les médecins, 4,7 mSv pour les transporteurs de radionucléides, et 5,1 mSv pour les mineurs. En 2004, 12 travailleurs ont reçu une dose supérieure à 15 mSv, dont neuf dans les opérations de radiographie industrielle sur site.

Aux États-Unis, pour ce qui concerne le secteur non médical, la moitié des 126 869 travailleurs surveillés en 2007 avaient reçu une dose mesurable dont la moyenne s'établissait à 1,9 mSv. Les travailleurs les plus exposés étaient ceux de la radiologie industrielle dont la dose moyenne était de 5,9 mSv.

28. Le projet Esorex rassemble les données de la surveillance effectuée dans les pays européens. L'information recueillie doit permettre d'établir les bases d'un système de protection radiologique harmonisé. Outre les 27 pays de l'Union européenne, l'Islande, la Norvège et la Suisse participent au projet Esorex.

29. Esorex distingue deux catégories de travailleurs en fonction de la dose reçue. La catégorie A représente les travailleurs exposés à des doses supérieures à 6 mSv et la catégorie B les travailleurs exposés à des doses se situant entre 1 et 6 mSv.

Ces données sont à interpréter avec précaution, car elles ne reflètent pas nécessairement la réalité du terrain qui n'échappe pas à certaines pratiques pour le moins irrégulières. Selon certaines révélations recueillies auprès de travailleurs, le port du dosimètre est loin d'être systématiquement respecté, y compris dans un secteur aussi contrôlé que celui de l'industrie nucléaire. La lourdeur des procédures de sécurité, la crainte d'un écartement du travail en cas de dépassement prématuré de la dose annuelle maximale de 20 mSv ou la simple négligence par manque de culture de sécurité sont autant de facteurs qui encouragent certains à ne pas porter leur dosimètre (lire le témoignage p. 91).

La manipulation des dosimètres peut aussi être en cause comme en témoigne cet exemple révélé par une action en justice des travailleurs. Ainsi, une entreprise américaine qui traite les déchets nucléaires a accepté, en décembre 2009, de dédommager 23 employés noirs qui avaient été exposés à des niveaux élevés de rayonnements ionisants. Les dosimètres de ces ouvriers avaient été trafiqués afin qu'ils indiquent des niveaux inférieurs à l'exposition réellement subie. Les employés noirs étaient exposés à des niveaux de rayonnements ionisants plus élevés que leurs collègues blancs (USEEEOC 2009).

Il faut également noter que les données citées plus haut sont des expositions corps entier. Les doses au niveau des extrémités ou du cristallin sont peu contrôlées. Nous verrons au chapitre consacré au secteur médical qu'elles peuvent être très élevées. Ne pas en tenir compte revient à sous-estimer la dose réellement reçue.

Conscientes de la nécessité de mettre en place un outil de suivi des travailleurs commun à l'ensemble de ses États membres, l'UE réfléchit à l'élaboration d'un passeport dosimétrique européen. En juin 2010, l'Association des responsables des autorités européennes de contrôle de la radioprotection (Herca), a fait une proposition de passeport radiologique harmonisé et l'a transmise à la Commission européenne en vue de son intégration dans les normes de base. Le passeport proposé par Herca a pour objectif de garantir aux travailleurs dits externes un niveau de protection identique à celui valable pour les travailleurs actifs au sein d'une exploitation. Des problèmes techniques empêchent toujours la mise en œuvre de cet outil au niveau européen (voir chapitre 3).

4.4. Les maladies professionnelles

Les premières maladies professionnelles provoquées par les rayonnements ont suivi de près la découverte des rayons X. Il s'agissait d'atteintes de l'organisme provoquées par des irradiations aiguës et uniques ou par des expositions chroniques à des niveaux variables avec dépassement des limites à certains moments. Elles concernaient particulièrement les mains et les avant-bras. Les lésions provoquées consistaient en des brûlures de la peau qui allaient parfois jusqu'à la nécrose de la base de l'épiderme entraînant même des nécroses osseuses. Les premières brûlures radiologiques puis les cancers de la peau radio-induits ont concerné d'abord les fabricants d'appareils à rayons X et les chercheurs qui les utilisaient. Puis, le développement de l'utilisation des rayonnements pour le diagnostic et la thérapie a entraîné l'exposition des professionnels de santé, radiologues, personnel infirmier et chirurgiens. Les dentistes et les vétérinaires se sont ensuite ajoutés à la liste des professions exposées qui en compte aujourd'hui bien d'autres.

La liste des maladies professionnelles dues aux rayonnements ionisants, reconnues et indemnisées, a évolué au cours du temps. Elle varie selon les pays, même au sein de l'Union européenne (voir annexe 1). En 2010, il n'existait toujours pas dans l'UE de textes juridiques contraignants (directive ou règlement) assurant l'harmonisation des systèmes de reconnaissance des maladies professionnelles. Une liste européenne des maladies professionnelles

existe, mais elle repose sur une recommandation de la Commission européenne, un texte qui n'a pas force de loi et n'est donc pas contraignant pour les États membres (Commission européenne 2003). Cette liste de maladies scientifiquement reconnues comme étant d'origine professionnelle, et susceptibles d'indemnisation, reprend les "maladies provoquées par les radiations ionisantes", sans plus de précision³⁰. Chaque État membre remplit donc cette rubrique comme il le souhaite. Par conséquent, la liste des maladies professionnelles indemnifiables dues aux radiations ionisantes varie suivant les États membres. Par exemple, sur la liste allemande figurent les cancers du foie, du larynx, de la peau, de la plèvre et de la thyroïde que la France ne reconnaît pas (voir annexe 1). Ces disparités entraînent une inégalité flagrante entre les travailleurs européens.

Dans sa recommandation de 2003, la Commission européenne incitait les États membres à assurer la déclaration de tous les cas de maladies professionnelles et de rendre leurs statistiques compatibles avec la liste européenne. Cependant, la collecte des informations est assez rudimentaire. La dernière publication d'Eurostat sur les maladies professionnelles date de 2004. Elle se rapporte aux cas de maladies professionnelles reconnues en 2001 dans 12 États membres³¹. D'après ces statistiques partielles, les rayonnements ionisants sont responsables de 12 cas de maladie et de cinq décès. On peut raisonnablement se poser la question de la valeur à accorder à ces données au regard des chiffres disponibles dans certains pays européens tels l'Allemagne et la France.

En France, les tableaux de maladies professionnelles établissent les maladies professionnelles indemnifiables, leur délai de prise en charge et une liste indicative des principaux travaux susceptibles de provoquer ces affections. Le tableau n° 6, consacré aux affections provoquées par les rayonnements ionisants, a été créé en 1931. Il n'a plus été mis à jour depuis 1984. En 2006, 27 cas de maladies professionnelles avaient été reconnus au titre du tableau 6, dont neuf leucémies, 14 cancers broncho-pulmonaires primitifs et deux cataractes. Pour l'année 2007, 33 cas de maladies professionnelles ont été reconnus au titre du tableau 6 dont 13 leucémies, sept cancers broncho-pulmonaires primitifs, trois cancers des os et huit cataractes.

En Allemagne, de 1978 à 2003, 3531 cancers ont été reconnus liés aux rayonnements ionisants : 3498 cancers du poumon, 18 leucémies, 13 cancers de la peau et deux cancers de la plèvre³². Le nombre élevé des cancers du poumon serait lié à l'exploitation de l'uranium dans les années 1950-1960, notamment dans les Länders de l'ancienne Allemagne de l'Est. L'Allemagne a reconnu 125 cas de cancers professionnels dus aux rayonnements ionisants en 2009, 104 en 2010 (www.dguv.de).

Un rapport d'Eurogip, daté d'avril 2010, apporte quelques informations sur les cancers professionnels reconnus dans d'autres pays européens (EUROGIP 2010)³³. Pour certains pays, l'agent causal est connu, mais pas forcément le type de cancer. Entre 2000 et 2008, la Belgique a indemnisé deux leucémies et 16 cancers de la thyroïde dus aux radiations ionisantes ; l'Espagne sept cancers ; la République tchèque 27 cancers de la peau et

30. La recommandation 194 de l'OIT sur la liste des maladies professionnelles n'est pas plus explicite.

31. Belgique, Danemark, Espagne, Irlande, Italie, Luxembourg, Pays-Bas, Autriche, Portugal, Finlande, Suède et Royaume-Uni.

32. La question de savoir si le mésothéliome, cancer de la plèvre typique d'une exposition à l'amiante, pouvait être la conséquence d'une irradiation de la plèvre lors d'une radiothérapie s'est posée. Cette relation a été observée chez l'animal et était considérée comme anecdotique chez l'homme. Mais deux études publiées en 2005 et 2006 ont observé un risque plus élevé, faible, mais statistiquement significatif, de développer un mésothéliome pour les patients traités antérieurement par radiothérapie pour certains cancers.

33. Eurogip est un organisme créé en 1991 par la branche Accidents du travail-Maladies professionnelles (AT-MP) de la sécurité sociale française. Ses activités se concentrent sur les aspects européens de l'assurance et de la prévention des AT-MP.

202 cancers du poumon (sans doute causés, comme en France, par l'exploitation de mines d'uranium). De 2001 à 2008, l'Italie a indemnisé 57 cancers dus aux radiations ionisantes, la Suisse en a indemnisé trois de 2000 à 2007.

Comme beaucoup de maladies et de cancers professionnels, le nombre des maladies et de cancers dus à une exposition professionnelle aux rayonnements ionisants est certainement sous-estimé. De manière générale, cela s'explique par deux raisons principales : la liste des maladies donnant droit à une indemnisation est restrictive, les maladies liées au travail sont souvent méconnues et donc sous-déclarées.

Ce qu'il faut retenir

L'utilisation pacifique des rayonnements ionisants est à l'origine d'accidents et de catastrophes. Tchernobyl est dans toutes les mémoires et Fukushima survenu 25 ans plus tard est venu rappeler les risques intrinsèques du développement de l'énergie nucléaire. Depuis 1999, l'échelle INES, développée par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) permet de mesurer à l'échelon international la gravité des accidents et incidents. Parmi les 23 millions de travailleurs exposés aux rayonnements ionisants d'origine naturelle ou artificielle, 7,4 millions voient leur exposition contrôlée. De nombreux organismes collectent les informations issues de ces contrôles. Une gestion européenne manque encore.

Une baisse de l'exposition des travailleurs est observée partout dans le monde. Cependant, elle est à interpréter avec précaution, car elle ne reflète pas nécessairement la réalité du terrain. Le nombre des maladies professionnelles dues aux rayonnements ionisants est mal connu. Certains pays disposent de données sur les cas de maladies professionnelles qu'ils reconnaissent. En Europe, la liste des maladies professionnelles indemnisables dues aux radiations ionisantes varie suivant les États membres.

Chapitre 5

Les secteurs les plus concernés (hors énergie nucléaire)

Le grand public et les médias généralistes associent traditionnellement la question des risques sanitaires liés aux rayonnements ionisants au secteur de l'énergie nucléaire. Les nombreux ouvrages, dont des romans, articles de presse et autres reportages de télévision diffusés ces dernières années en témoignent. Si l'on ne peut nier les risques pris par les travailleurs de ce secteur, la focalisation du débat sur la filière nucléaire a pour effet d'obérer presque totalement les risques encourus par les travailleurs de nombreux autres secteurs recourant de manière régulière, voire au quotidien, à des rayonnements ionisants naturels ou artificiels. Cet effet de masquage est d'autant plus regrettable que les mesures de prévention des risques et la sensibilisation des personnels concernés y sont généralement beaucoup moins développées que dans la filière nucléaire traditionnelle.

5.1. Le secteur de la santé

Le secteur médical est le premier à avoir utilisé les rayonnements ionisants à grande échelle pour diagnostiquer des maladies et pour tenter de les traiter. Paradoxalement, la prise de conscience des risques y a été très lente. En 1944, un médecin américain, Herman C. March, a démontré que les radiologues font plus de leucémies que les autres médecins. Une étude, publiée en 1956, viendra le confirmer : de 1930 à 1954, la mortalité par leucémie a été de 3,7 % chez les radiologues, contre 0,6 % chez les autres médecins, soit un risque multiplié par six (Shields 1956). La perte d'espérance de vie durant cette période a été égale à 5,2 années pour les radiologues, par rapport à leurs confrères médecins non-radiologues. En 1936, la dose annuelle d'un radiologue a été évaluée à 36 mSv/an, ce qui

représente une dose-vie supérieure à 1 Sv. Dans les années 1940-1950, la manipulation de sources radioactives non scellées (radium et radio-isotopes) a provoqué des contaminations répétées du personnel médical.

Une étude américaine de 2002 a analysé la mortalité par cancers du sein dans une population de près de 70 000 techniciennes en radiologie (Mohan 2002). Le risque de décéder d'un cancer du sein était augmenté pour celles qui avaient commencé à travailler jeunes, avant l'âge de 24 ans, et pour toutes celles qui avaient travaillé avant 1950. Il était multiplié par trois pour celles qui avaient commencé à travailler avant 1940 par rapport à celles qui avaient travaillé après 1960. Les chercheurs attribuent cette différence à l'abaissement des limites d'exposition qui étaient en 1960 six fois moins élevées que pendant la période 1934-1949.

En 2010, le secteur de la santé reste, et de loin, le secteur où le plus grand nombre de travailleurs (médecins, infirmières et techniciens) sont concernés, mais la dose moyenne subie y est relativement basse. Pour la période 2000-2002, l'Unscear a estimé que 6,7 millions de travailleurs dans le monde ont été contrôlés en radiologie et 120 000 en médecine nucléaire. La dose moyenne subie par ces travailleurs a été de 0,5 mSv/an en radiologie et de 0,7 mSv/an en médecine nucléaire (UNSCEAR 2008). La dose de contamination interne et la dose externe subie au niveau de la peau sont rarement mesurées.

Selon les données du projet Esorex, qui datent de 2000, la dose d'irradiation moyenne des travailleurs du secteur médical de 20 pays européens était de 0,9 mSv/an. Dans Esorex, le nombre de cas ayant dépassé la dose de 20 mSv/an dans le secteur médical était de 4,4 pour 10 000 travailleurs.

Dans les hôpitaux, les sources de rayonnements sont très diverses : rayonnements gamma du cobalt 60, du césium 137 et de l'iridium 192, appareils à rayons X, électrons et gamma produits par des accélérateurs linéaires, émetteurs utilisés en médecine nucléaire, etc. Les services concernés sont nombreux : radiologie classique et interventionnelle, radiothérapie, service de médecine nucléaire et curiethérapie où les malades deviennent des "sources radioactives ambulantes". Pour toutes les activités planifiées, des procédures codifiées sont élaborées, et les moyens de protection existent tels les tabliers et les paravents de plomb. En France, dans un grand nombre d'hôpitaux, les personnes exposées ne portent pas toujours leur dosimètre. Dans la plupart des cas, seul le dosimètre placé sous le tablier est pris en compte, ce qui sous-évalue d'un facteur supérieur à 2 la dose efficace. La Belgique a évolué en radiologie interventionnelle vers la double dosimétrie (au-dessus et en dessous du tablier de plomb).

5.1.1. La radiologie interventionnelle

De toutes les activités médicales impliquant des rayonnements ionisants, c'est la radiologie interventionnelle (coronarographie, cathétérisme cardiaque³⁴ et chirurgie) qui présente le risque d'exposition le plus élevé pour les professionnels de la santé. Cette technique est en pleine expansion. En raison de la longueur et de la difficulté des procédures qui demandent un examen prolongé et de nombreuses acquisitions d'images, elle entraîne souvent des expositions aux rayons X à des doses élevées. Les expositions peuvent être parfois si importantes qu'elles occasionnent, chez les patients, des lésions radiologiques

34. La radiologie interventionnelle consiste, dans ce cas, à suivre le trajet d'un cathéter, introduit au niveau de l'aîne, jusqu'à ce qu'il arrive au voisinage du cœur. Le suivi se fait en prenant, à intervalle régulier, des clichés X.

en particulier au niveau de la peau. Les cardiologues, chirurgiens, radiologues et anesthésistes effectuant des actes de radiologie interventionnelle, contraints de rester à proximité des patients, peuvent recevoir eux-mêmes des doses nettement plus élevées qu'en radiologie classique.

Peu de pays fournissent des données permettant de différencier les expositions des personnels employés en radiologie classique, des personnels travaillant en radiologie interventionnelle. Sur la base des données existantes, l'exposition annuelle moyenne serait de 0,5 mSv à 1,2 mSv en radiologie classique et de 1,6 mSv à 3,1 mSv en radiologie interventionnelle avec un maximum se situant à environ 30 mSv. La Grèce a fourni des données pour différentes professions (infirmières, médecins, cardiologues, orthopédistes, etc.) impliquées dans la radiologie interventionnelle. Les données grecques indiquent que les cardiologues sont ceux qui reçoivent la dose la plus forte, avec une dose moyenne de 4 mSv, six fois supérieure à celles des autres spécialistes et des infirmières (UNSCEAR 2008).

Pour le personnel soignant féminin, la possibilité d'une grossesse est une inquiétude supplémentaire (voir encadré ci-dessous).

Les inquiétudes des infirmières du cathétérisme cardiaque

Dans les pays de l'UE, une directive oblige l'employeur à prendre des mesures afin d'éviter l'exposition des femmes enceintes de tout travail les exposant aux rayonnements ionisants (JOCE 2002). Les infirmières enceintes doivent donc être écartées des services où existe un risque potentiel d'exposition à des rayonnements ionisants. Mais cette mesure de précaution ne s'applique pas à la période se situant entre la conception et la confirmation de la grossesse, ce qui ne manque pas de susciter beaucoup d'inquiétude au sein de la profession.

"C'est sûr que les premiers petits retards, je ferai trois fois plus attention (...). Normalement, quand on est dans la salle, on a un tablier de plomb, etc. Mais il arrive qu'on doive parfois vite aller chercher quelque chose en catastrophe dans une salle ou bien quelqu'un pose son pied malencontreusement sur la scopie. Bon alors on a peur. Sans doute que juste appuyer sur la scopie, ce n'est pas assez pour qu'il y ait vraiment un risque, mais cela fait quant même peur. Une fois que l'on sait qu'on est enceinte, on est mise en disponibilité, mise à l'étage ou ailleurs. Mais, c'est le petit laps de temps avant qui fait peur...", déclarait en 1992 à la télévision publique belge une infirmière affectée au cathétérisme cardiaque (Nay 1992).

La dose reçue au niveau des extrémités, comme celle délivrée au niveau du cristallin, est peu contrôlée. Les doses effectivement reçues par les médecins et le personnel assistant aux niveaux des mains et des bras peuvent excéder 500 mSv (UNSCEAR 2008). Plus grave encore est la sous-estimation de leur dose à l'organisme entier qui n'est souvent évaluée que par le seul dosimètre porté sous le tablier de plomb. Cette pratique revient à occulter la dose reçue par toutes les parties non protégées du corps. Des mesures faites en France, à la fin des années 1990, prenant en compte la dose reçue par les parties découvertes, ont montré que l'irradiation réellement subie était sous-estimée d'un facteur 3 à 5 (Mol 1999).

Une attention toute particulière devrait être accordée aux doses reçues par les opérateurs aux mains, à la thyroïde et au cristallin. Le port de lunettes munies de verres au plomb, de protège-thyroïde et de tablier au plomb adapté à la morphologie du porteur, permettrait une première réduction des expositions. La seconde réduction pourrait s'opérer en étudiant les postes de travail, afin de placer des écrans, transparents ou non, destinés à réduire l'intensité du rayonnement diffusé.

5.1.2. La médecine nucléaire

La médecine nucléaire recouvre l'utilisation de sources radioactives à des fins de diagnostic. Des radionucléides (appelés aussi radio-isotopes) ajoutés à d'autres substances forment des solutions radiopharmaceutiques qui peuvent être administrées sous forme injectable ou buvable, et dont les propriétés chimiques et physiques diffèrent suivant la cible fixée (os, cerveau, etc.). Les radiations émises par le corps du patient sont ensuite analysées et fournissent des informations sur l'anatomie de la personne et sur le fonctionnement de certains organes spécifiques. L'usage de cette technique diagnostique est en augmentation dans les pays les plus développés.

Les radionucléides utilisés émettent des rayonnements gamma très pénétrants qui sont potentiellement source d'une augmentation de l'exposition pour les personnels de radiologie, notamment lors de l'administration des solutions radiopharmaceutiques et lors du positionnement du patient et de la caméra. L'irradiation interne est généralement inférieure à l'irradiation externe et peut être contrôlée par une surveillance des concentrations de particules radioactives sur les surfaces de travail et dans l'air. Le niveau d'exposition dépend des procédures et de l'utilisation de moyens de protection. Les personnes affectées à la préparation de ces solutions radiopharmaceutiques sont les plus concernées. La dose annuelle qu'elles subissent peut s'élever au-delà de 5 mSv et les doses aux mains et aux doigts jusqu'à 500 mSv. Dans ce cas de figure, des écrans protecteurs peuvent réduire les doses subies. Une évaluation de la dose moyenne reçue par les équipes impliquées dans cette technique a montré que les moyennes d'irradiation annuelle se situaient entre 0,4 mSv et 3,3 mSv (UNSCEAR 2008).

Depuis les années 1990, la tomographie par émissions de positrons (ou positons) — en anglais Positron emission tomography (PET) —, plus familièrement appelée "PET scan", a connu un succès grandissant. Cette technique associe un nouveau processus d'acquisition des images et le développement de nouveaux traceurs émettant un rayonnement bêta qui a l'avantage d'être entièrement absorbé dans un petit volume de tissu. Elle permet d'observer en trois dimensions l'activité d'un organe grâce aux émissions produites par les positons issus de la désintégration du produit radioactif injecté. La dose externe moyenne subie par les médecins utilisant cette technique est d'environ 2 mSv/an, celle des techniciens se situe entre 4,6 et 8 mSv/an, plus du double. Des évaluations, réalisées en France, ont indiqué que la dose interne annuelle subie par les travailleurs impliqués dans l'utilisation du PET scan était de l'ordre de 2 mSv, soit cent fois plus importante que la dose subie par les travailleurs d'un service de médecine nucléaire classique. La préparation des solutions et la manipulation des déchets peut occasionner une contamination de la peau de courte durée, mais élevée et répétée, qui pourrait dans certains cas dépasser la limite de dose annuelle de 500 mSv.

Cette utilisation de solutions bêta émettrices ne se limite pas à la médecine nucléaire, elle concerne également la radiothérapie, notamment le traitement d'affections rhumatismales inflammatoires, ce qui multiplie le nombre de travailleurs concernés.

5.1.3. L'exposition médicale des patients

L'exposition médicale des patients aux rayonnements ionisants n'est pas le sujet central de cette publication. Néanmoins, les travailleurs étant aussi des patients, il s'agit d'un aspect que nous ne saurions passer sous silence.

Les rayons X ont été utilisés pour soigner des affections aussi bénignes que l'acné, un usage qui se prolongera jusqu'aux années 1950. Ils ont également été employés pour traiter des malades souffrant de tuberculose ou de troubles ostéo-articulaires. En Angleterre, on observera plus tard chez les personnes atteintes d'une maladie invalidante de la colonne vertébrale, et traitées aux rayons X, à raison de dix séances par mois, un taux de leucémies multiplié par dix (Boyle 1979). L'utilisation du thorium 232 comme produit de contraste dans les angiographies s'est soldée par un excès de cancers du foie, des os et de la plèvre. Des cancers du sein dus aux rayonnements ionisants ont été observés chez des patientes atteintes de tuberculose traitées par pneumothorax et suivies par radiosopies de la cage thoracique. Ces traitements ont été heureusement abandonnés. D'autres risques sont apparus depuis lors.

Depuis les années 1990, l'augmentation de l'exposition médicale aux rayonnements ionisants, avec le recours croissant à la radiographie et aux scanners, concerne les travailleurs et leurs familles. En outre, les accidents radiologiques en milieu hospitalier, notamment en radiothérapie et en médecine nucléaire, concernent aujourd'hui davantage les patients que les soignants³⁵.

Les patients doivent être conscients que les médecins confrontés quotidiennement à la maladie et à la mort ne sont pas toujours réceptifs aux risques liés aux faibles doses de radiation. En général, le public manifeste des réticences à l'égard des activités nucléaires, civiles ou militaires. Mais il s'inquiète peu de l'exposition naturelle et de l'exposition médicale aux rayonnements ionisants alors que ces expositions représentent la part la plus importante de la dose collective reçue. Les examens radiologiques entraînent actuellement une irradiation annuelle de l'ordre de 0,1 à 5 mSv, mais peuvent aller jusqu'à 20 mSv et au-delà pour certains examens (radiologie interventionnelle) (Tubiana 2005).

Plusieurs pays, la Commission européenne et l'AIEA ont organisé des colloques pour accélérer la prise de conscience, et entrepris des programmes d'information et de formation pour améliorer la protection des patients et celle du personnel soignant. La CIPR, dans ses recommandations de 2007, insiste sur le fait que dans le domaine médical aussi l'accent doit être mis sur la justification des procédures — qui relève généralement des médecins plutôt que du gouvernement ou des autorités de réglementation —, et l'optimisation de la protection, ce qui signifie que l'exposition doit rester aussi faible que raisonnablement possible.

Afin d'appliquer ces recommandations, des médecins d'un service de radiologie de la Katholieke Universiteit Leuven (Belgique) ont, dans le cadre d'un doctorat, cherché à réduire le niveau de l'irradiation lors des examens radiologiques répétés pratiqués sur les bébés prématurés. Ils ont développé des stratégies pour optimiser des aspects tels que le spectre des rayons X, les paramètres d'acquisition des images et les doses (Smans 2009).

35. Sur les bénéfices et les risques du recours croissant à des techniques utilisant les rayonnements ionisants, lire les investigations du journaliste américain Walt Bogdanich, regroupées sur le site du New York Times : http://topics.nytimes.com/top/news/us/series/radiation_boom/index.html.

5.2. Le secteur industriel non nucléaire

Les sources de rayonnements ionisants, comprenant des sources scellées, des appareils à rayons X et des accélérateurs de particules, sont employées dans diverses applications industrielles. Anciennement très répandue, l'utilisation de matériaux radioactifs, notamment du radium, pour fabriquer des peintures, des objets phosphorescents ou des paratonnerres, fait désormais partie du passé (voir encadré p. 8). Mais, cette époque a laissé un peu partout dans le monde de nombreux objets à l'abandon et des sites contaminés.

Dans l'industrie, les rayonnements ionisants sont principalement utilisés pour l'irradiation, la radiographie, les jauges destinées à évaluer le niveau, l'épaisseur ou la densité d'un matériau, la production et la distribution de radio-isotopes. Au début des années 2000, le nombre des travailleurs contrôlés dans les activités du secteur industriel était de l'ordre de 870 000 au niveau mondial (UNSCEAR 2008).

En Europe, selon les données Esorex, la dose moyenne annuelle d'irradiation reçue par les travailleurs du secteur industriel non nucléaire est de 1,8 mSv/an³⁶. Le nombre de personnes exposées à des doses supérieures à 20 mSv/an est de 13 pour 10 000 travailleurs. Il est à nouveau essentiel de préciser que ces moyennes ne reflètent pas l'irradiation forte que peuvent subir certains travailleurs, notamment lors d'incidents ou d'accidents. Selon les données de l'AIEA, c'est dans les secteurs de l'irradiation et de la radiologie industrielle que les accidents sont les plus nombreux.

5.2.1. L'irradiation industrielle

Au début des années 2000, 160 installations industrielles d'irradiation fonctionnaient dans le monde avec des sources de rayons gamma (cobalt 60 ou de césium 137), et 600 avec des appareils électriques générateurs de rayons X. Il existe également des installations avec accélérateurs de particules. Les usages les plus fréquents sont la stérilisation de matériel médical et de médicaments préemballés ; l'irradiation d'aliments ou de récoltes pour leur stérilisation — par l'éradication des moisissures, des parasites et des insectes — et afin d'empêcher leur germination ; et la synthèse des polymères.

Les hauts niveaux d'irradiation que peuvent générer de telles installations nécessitent d'examiner leur sécurité en profondeur. En fonctionnement normal, l'exposition des travailleurs devrait être très faible, mais des expositions significatives peuvent résulter d'une perte de contrôle de la source radioactive ou d'une entrée intempestive en salle d'irradiation en court-circuitant des sécurités (voir encadré p. 71). Dans certains cas, ces situations accidentelles ont provoqué des irradiations graves voire mortelles.

Les accélérateurs de particules représentent également un risque important d'exposition aux rayonnements ionisants. Ils sont employés principalement dans les laboratoires de recherche nucléaire et ont de plus en plus souvent des applications médicales. Ils servent à la fabrication de radionucléides de faibles périodes, des radio-isotopes utilisés pour des examens de scintigraphie cardiaque ou osseuse, ou d'imagerie du cerveau. Ils sont utilisés également pour l'irradiation d'aliments et de médicaments. L'exposition aux rayonnements ionisants due aux accélérateurs de particules peut survenir lors des activités de

36. Ce chiffre est supérieur aux moyennes relevées dans l'étude du CIRC, dite des 15 pays, ainsi qu'aux données françaises, allemandes, britanniques ou encore américaines. Ceci indiquerait que parmi les 30 pays du réseau Esorex (27 pays de l'Union européenne, plus l'Islande, la Norvège et la Suisse) des travailleurs subissent des doses nettement plus élevées que dans les pays cités plus haut.

maintenance, de modification ou de réparation des équipements. C'est dans ces circonstances que trois travailleurs ont été gravement irradiés à Forbach, dans l'est de la France, en 1991. La victime la plus irradiée, aujourd'hui décédée, a reçu une dose totale estimée à 1000 mSv. L'équipement en cause, un accélérateur d'électrons, initialement destiné à la stérilisation de produits pharmaceutiques et de matériels chirurgicaux, servait au moment de l'accident à l'ionisation de granulés ou de copeaux de téflon. L'entreprise qui avait racheté l'accélérateur avait, pour gagner du temps, pris l'habitude lors des opérations de maintenance de couper la source d'électrons, mais de laisser l'appareil sous tension. Les dirigeants de cette société ignoraient que la dose d'irradiation résiduelle restait très importante autour du scanner (Zerbib 1993, 1994).

Un travailleur gravement irradié dans une entreprise de stérilisation

Le 11 mars 2006, un grave incident est survenu dans une installation industrielle de stérilisation de matériels médicaux et de produits alimentaires. Un travailleur de la société Sterigenics, située à Fleurus, près de la ville belge de Charleroi, a été fortement irradié. La culture propre à l'entreprise permettait de stopper les alarmes d'une cellule d'irradiation lorsque la cellule n'était pas en phase d'irradiation et que la porte d'accès était en position ouverte. Avant de refermer la porte de la cellule, le technicien s'est assuré, comme le prévoit la procédure, de l'absence de personnel dans la cellule d'irradiation. Pensant que la source de cobalt 60 était en position de sécurité, il a pénétré jusqu'au fond de la cellule puis a actionné le bouton validant son contrôle. C'est lors de cette opération, qui a duré une vingtaine de secondes,

que le technicien a été exposé à la source de cobalt 60 qui n'était pas complètement descendue dans sa piscine de stockage. Des symptômes sont rapidement apparus, mais leur véritable cause n'a été mise en évidence que trois semaines plus tard quand le médecin du travail a diagnostiqué un début d'alopécie (chute partielle ou généralisée des cheveux ou des poils). La victime a été transférée en France dans une unité spécialisée où une aplasie (arrêt du développement de la moelle osseuse) profonde a été diagnostiquée.

Les spécialistes de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire français (IRSN) ont estimé l'exposition à 4 Gy. L'accident a été classé au niveau 4 de l'échelle INES (accident sans risque important hors du site). L'exploitant s'est vu imposer un programme d'actions qui comprenait notamment la mise en place de systèmes de sauvegarde multiples, hydrauliques, électriques et mécaniques.

5.2.2. La radiographie industrielle

La radiographie industrielle se pratique dans des installations fixes ou sur site à l'aide d'installations mobiles. Les installations fixes sont censées présenter de meilleures conditions de sécurité que les installations mobiles. Une maintenance négligée et une dégradation du système peuvent néanmoins entraîner, si les défaillances ne sont pas repérées à temps, des expositions parfois élevées.

Les sources radioactives les plus fréquemment utilisées étant l'iridium 192, le sélénium 75, ou le cobalt 60, émetteurs de rayonnements gamma, on utilise également le terme de gammagraphie pour ces opérations. La gammagraphie industrielle est utilisée en métallurgie afin de contrôler la qualité des pièces métalliques.

La radiographie sur chantier présente par nature plus de risques. Le travail doit être accompli dans des lieux éloignés, difficiles d'accès, et à des heures où il n'y a personne dans le voisinage immédiat (donc souvent de nuit). En général, la source radioactive, qui glisse dans un fourreau, se trouve dans un porte-source fixé au bout d'un câble mobile qui permet

d'en commander la sortie et la rentrée à distance, au moyen d'une manivelle. Au moment de la radiographie proprement dite, la source est projetée hors de son conteneur, dans le fourreau, jusqu'à atteindre la position préréglée. Un des accidents les plus fréquents est la perte de la source radioactive (si le porte-source se désolidarise du câble). Si l'opérateur ne contrôle pas le retour effectif de la source dans son conteneur, l'anomalie peut ne pas être détectée immédiatement et se révéler très grave.

Dans des opérations de radiographie sur site, indépendamment d'accidents ou d'incidents, il n'est pas rare que des opérateurs reçoivent des doses de l'ordre de 10 à 15 mSv et même au-delà. En 2004, au France, sur les 12 travailleurs contrôlés ayant reçu une dose annuelle supérieure à 15 mSv, neuf étaient employés dans des opérations de radiographie industrielles sur site. Les opérations de radiographie sur chantier sont parfois très régulières, en particulier lors de la construction de centrales nucléaires, de pipeline ou d'entreprises pétrochimiques qui occasionnent un surcroît d'activités et une hâte préjudiciable à la sécurité.

5.2.3. Le recyclage des métaux, un secteur sensible

La perte de sources radioactives médicales ou industrielles peut concerner des travailleurs qui ne sont pas considérés comme professionnellement exposés et qui ne sont donc pas contrôlés pour le risque nucléaire, tels les travailleurs employés dans l'industrie du recyclage des métaux. Ce problème est si sérieux que les entreprises de ce secteur investissent dans des systèmes de détection. Elles ne devraient pas être les seules. La problématique de ces sources radioactives égarées, appelées aussi sources orphelines, nécessite une approche globale pour identifier les flux de déchets dans lesquels elles peuvent se retrouver et les secteurs susceptibles d'être concernés. Plusieurs incidents démontrent le danger potentiel que représente la non-détection de sources orphelines et illustrent la défaillance des mécanismes de traçabilité de ces produits pourtant très sensibles.

Des boutons d'ascenseur radioactifs

En octobre 2008, l'Autorité de sûreté nucléaire française (ASN) est informée que les autorités américaines ont détecté de la radioactivité sur un colis envoyé par la société française Mafelec. Cette entreprise produit notamment des boutons pour ascenseurs. L'enquête permet d'établir qu'un chargement d'acier en provenance d'Inde est à l'origine du problème. Contaminé au cobalt 60, il avait servi à la fabrication des boutons d'ascenseur. La reconstitution des doses susceptibles d'avoir été reçues sur les différents postes de travail a établi qu'une vingtaine de travailleurs avaient été exposés à des doses allant jusqu'à 3 mSv, trois fois la dose annuelle maximale admise pour le public, valable aussi pour les travailleurs non professionnellement exposés.

Une inspection conduite à l'aéroport de Roissy devait révéler que le colis radioactif avait fait l'objet d'une détection de radioactivité, mais le déclenchement du portique de détection n'avait pas été signalé (ASN 2008). Le colis avait été ensuite acheminé aux États-Unis où sa radioactivité avait été décelée à son arrivée. En Inde, pas moins de cinq sociétés seraient à l'origine d'envois de produits contaminés au cobalt 60 vers plusieurs pays.

Un des responsables de Mafelec a indiqué que l'enquête de suivi effectuée avait révélé que l'acier transformé en Inde était lui-même composé de produits de radiologie européens (Metzger 2009). Il s'interrogeait sur la traçabilité et le contrôle des produits entrant et sortant de France. D'autres entreprises qui n'exportent pas vers les États-Unis peuvent être concernées sans le savoir. Mafelec s'est doté de quatre appareils pour

contrôler désormais tout ce qui entre dans l'entreprise. Encore faut-il que les portiques de détection de la radioactivité fonctionnent correctement.

En 2011, un incident a concerné la production d'une entreprise métallurgique située à La Louvière, en Belgique. La présence de radioactivité dans un chargement en provenance de cette usine a été détectée à son arrivée dans un établissement français. L'enquête a révélé une contamination au césium 137, non détectée malgré la présence de portiques de mesure de la radioactivité à l'entrée de l'entreprise belge. La production a été arrêtée par les autorités de contrôle après que des poussières radioactives ont été détectées dans le système de dépoussiérage du four. Une décontamination a été entreprise et l'incident a été classé au niveau 1 de l'échelle INES.

En Inde, des travailleurs du recyclage hospitalisés

En 2009, plusieurs conteneurs d'acier indien auraient été arrêtés dans des ports européens après détection d'un niveau élevé de radioactivité (Yardlev 2010). En Inde même, la contamination des ferrailles par des sources radioactives est particulièrement critique, comme en témoigne un accident survenu en 2010.

À Mayapuri, à l'ouest de Delhi, des dizaines de milliers de travailleurs sont employés dans des ateliers, souvent très petits, de récupération des métaux. Ils trient des ferrailles venues du monde entier qui sont ensuite revendues à des fonderies. En avril 2010, huit personnes appartenant toutes à un même atelier ont été hospitalisées à la suite de diarrhées et d'une coloration anormale de la peau et des ongles. Après quelques hésitations, les médecins attribuent ces troubles à une irradiation. L'autorité de sûreté nucléaire indienne est alertée. La police ferme les ateliers. Les inspecteurs découvrent dans l'atelier des travailleurs hospitalisés pas moins de huit éléments radioactifs et deux autres dans un atelier voisin.

L'origine de la contamination était un irradiateur appartenant à un laboratoire de chimie de l'université de New Delhi importé en 1969, mais qui n'était plus utilisé depuis 1985. Il n'avait jamais été enregistré auprès des autorités de régulation et avait été vendu comme ferraille en février 2010. Il contenait au départ 16 sources radioactives. L'accident a été classé au niveau 4 de l'échelle INES (accident sans risque important hors du site). Une des personnes irradiées est décédée.

Le gouvernement indien a programmé un plan pour installer des détecteurs de radioactivité dans les ports et les aéroports. Cependant, selon certaines sources, le gouvernement indien serait réticent à renforcer la réglementation et les contrôles en raison de l'importance du secteur du recyclage des métaux, car il fournit de nombreux emplois et contribue à satisfaire les énormes besoins d'acier du pays.

Des fers à béton contaminés

En 1992, un journaliste du *Liberty Times* de Taiwan a révélé que des fers à béton contaminés par du cobalt 60 avaient été utilisés pour construire un immeuble à Taipei. L'enquête officielle indiquera que la moitié des appartements de l'immeuble étaient concernés et que leurs occupants avaient subi une contamination moyenne de 15 mSv/an. L'immeuble ayant été construit en 1983, la dose délivrée à un locataire résidant depuis le début aura été d'au moins 240 mSv! La Commission de l'énergie atomique de Taiwan évaluera à 50 le nombre d'immeubles construits en 1983 avec un ferrailage irradiant. En septembre 1997, une publication dans *Health Physics* montrait qu'un total de 100 bâtiments publics et privés étaient concernés. Plus de 4000 personnes vivaient dans ces immeubles, dont de jeunes étudiants, et recevaient des doses supérieures à 1 mSv/an (Chang 1997).

Attention aux paratonnerres et aux détecteurs de fumée

Dans un petit pays comme la Belgique, plusieurs milliers de paratonnerres pourvus d'une ou plusieurs sources de rayonnement radioactif (radium 226, américium 241, krypton 85, notamment) ont été placés jusqu'à leur interdiction en 1985. En 2003, une campagne a été lancée pour procéder à leur enlèvement. Fin 2010, l'Agence belge en charge du contrôle nucléaire signalait qu'environ 3500 appareils, soit 95 % des paratonnerres répertoriés par les autorités, avaient été enlevés (EE 2010).

En France, une étude de la Commission de recherche et d'information indépendante sur la radioactivité (CRIIRAD) a attiré l'attention des pouvoirs publics sur les risques, qualifiés de "non négligeables", pour les agents de France Télécom occasionnés par les paratonnerres radioactifs installés sur les lignes téléphoniques en France jusqu'à la fin des années 1970. D'après un inventaire préliminaire, réalisé en 2002 par France Télécom, il restait à cette date en France entre 700 000 et un million de paratonnerres contenant des matières radioactives (AFP 2010).

Toujours en France, le président de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a estimé en avril 2010 à au moins 7 millions le nombre de détecteurs de fumée radioactifs, dits ioniques, dans les locaux professionnels et les logements. Ces détecteurs de fumée contiennent de l'américium 241, un matériau émetteur de rayonnements alpha et gamma. En France, comme dans de nombreux pays européens, leur retrait progressif est prévu et les filières d'évacuation se mettent en place.

5.3. Le transport aérien

Pendant leurs heures de vol, les équipages du transport aérien peuvent être exposés à des doses élevées de rayonnements cosmiques, car en haute altitude ils ne sont plus protégés par le champ magnétique et l'atmosphère terrestre. Ce fait est connu de longue date, mais n'a suscité une véritable attention que depuis un peu plus de 20 ans, à la suite de la réévaluation en 1990 des effets biologiques de l'exposition des équipages par la CIPR. Cet organisme scientifique a alors recommandé de considérer l'exposition des équipages des avions volant à des altitudes très élevées (jusqu'à 20 km) comme une exposition professionnelle. Selon l'Unsear, environ 300 000 personnes employées dans le transport aérien mondial seraient concernées (UNSCEAR 2008). L'exposition est plus forte pour les personnels navigants des vols empruntant des couloirs aériens proches des pôles Nord et Sud³⁷.

5.3.1. Exposition moyenne plus élevée que dans d'autres secteurs

La dose d'irradiation que subissent les équipages varie en fonction de l'altitude, de la latitude, du champ magnétique terrestre (concentration des particules chargées) et aussi de l'activité solaire. La dose effective reçue par les équipages est classiquement d'environ 3 microsieverts par heure ($\mu\text{Sv/h}$) dans les latitudes tempérées à une altitude de 8 km. Un programme de mesures réalisé en 1993 par la Lufthansa a montré qu'à une altitude oscillant entre 10 et 12 km, la dose effective moyenne reçue était de l'ordre de 5 μSv à 8 $\mu\text{Sv/h}$. Un rapport du Groupe

37. Dès 1994, le personnel d'Alitalia avait pu imposer l'abandon de la route du pôle et les vols vers l'Extrême Orient passaient par Moscou (Der Spiegel 1994).

européen de dosimétrie des rayonnements ionisants (European Dosimetry Group, Eurados) signale qu'à la fin des années 1990, à l'altitude de 16 km, la dose d'irradiation était d'environ 12 $\mu\text{Sv/h}$ et supérieure à 13 $\mu\text{Sv/h}$ à partir d'une altitude de 20 km (EURADOS 2004).

Sur base des données de vol des équipages britanniques, l'Unsclear a calculé qu'un équipage de vols longs courriers, faisant environ 600 heures de navigation par an, recevait une dose effective annuelle moyenne de 3 millisieverts (mSv). Pour les équipages de vols moyen-courriers, ayant un nombre d'heures de vol équivalent, la dose annuelle moyenne était de 2 mSv. Mais certains équipages, notamment d'avions-cargos, peuvent effectuer jusqu'à 1200 heures de vol par an, ce qui implique une dose moyenne effective reçue pouvant aller jusqu'à 10 mSv par an. Ces doses moyennes d'irradiation sont nettement supérieures à celles mesurées chez les travailleurs du secteur médical ou industriel.

5.3.2. Effets sur la santé en cours d'évaluation

En 1994, à l'occasion d'examen sanguins pratiqués sur une douzaine de pilotes et hôtesses de l'air navigant depuis longtemps, le radiobiologiste allemand Horst Traut découvrait certaines anomalies chromosomiques typiques d'une irradiation (Der Spiegel 1994).

Un an plus tard, une étude finlandaise a étudié l'incidence du cancer dans une population de 1577 femmes et 187 hommes membres du personnel de bord des compagnies aériennes finlandaises de 1967 à 1992 (Pukkala 1995). La dose annuelle de radiation reçue a été estimée à entre 2 et 3 mSv. Pour le personnel de bord féminin ayant plus de 15 années de vol, il existerait un doublement du risque de développer un cancer du sein. Le rôle de l'irradiation cosmique reçue est suspecté. L'année suivante, une responsable du registre du cancer danois fait savoir qu'au Danemark le risque de cancer du sein est plus élevé parmi le personnel de bord féminin que parmi des femmes de même milieu social, mais ne travaillant pas dans le secteur du transport aérien (Lyng 1996). En 1998, une publication américaine confirmait un risque de cancer du sein multiplié par deux parmi le personnel féminin retraité d'une compagnie aérienne des États-Unis (Lyng 1996).

Une étude de 2003 a examiné les statistiques de mortalité de plus de 40 000 employés navigants (pilotes et personnels de cabine) de huit pays européens (Zeeb 2003)³⁸. Parmi le personnel féminin, aucune hausse de la mortalité n'était notée, ni par cancer ni pour une autre cause. Parmi le personnel masculin de cabine, un excès de la mortalité, notamment par cancers de la peau (mélanomes), était observé, mais ne pouvait être attribué aux rayonnements cosmiques.

En 2007, un article de synthèse conclut que le risque d'anomalies ou de maladies dues aux radiations cosmiques pour les personnels navigants ou les voyageurs est très faible. Le risque potentiel de développer un cancer dû aux radiations telles que subies par le personnel navigant, d'un niveau équivalent à une dose reçue de 5 mSv/an, serait de l'ordre de 0,4 % après 20 ans de carrière et de 0,6 % après 30 ans (Bagshaw 2008). Un excès de risque de développer une cataracte radioinduite liée aux radiations cosmiques est possible, mais n'est observé que pour les astronautes qui subissent une exposition d'une magnitude nettement plus élevée que celles des pilotes de ligne.

En 2008, une étude américaine constate une plus grande fréquence de modifications biologiques chez les pilotes qui totalisaient un nombre d'heures de vol plus grand que leurs collègues (Yong 2009).

38. Allemagne, Italie, Danemark, Norvège, Suède, Grèce, Finlande et Islande.

5.4. Le secteur militaire

Au niveau mondial, le nombre des personnes employées dans des activités militaires régulières et dont l'exposition aux rayonnements ionisants serait contrôlée se situerait dans une fourchette de 300 000 à 400 000 (UNSCEAR 2008). De tous les secteurs où les rayonnements ionisants sont utilisés, le secteur militaire est celui où la balance bénéfice-risque du recours à la technologie nucléaire est la plus problématique, la plus polémique et la plus politique. Son histoire est lourde et douloureuse : bombardements de Hiroshima et de Nagasaki, accidents lors de la course aux armements, personnel militaire et population civile contaminés lors des essais nucléaires, usage récent des armes à uranium appauvri. Sans parler des arsenaux constitués dans plusieurs pays et la menace toujours réelle de leur utilisation. Nous n'examinerons ici que quelques aspects de cette problématique.

5.4.1. La santé des personnels impliqués dans les essais nucléaires

Plusieurs études de suivi des personnels militaires impliqués dans les essais nucléaires ont été menées aux États-Unis et en Grande-Bretagne. Elles n'ont pas montré une augmentation statistiquement significative de la mortalité par cancers et leucémies. Cependant, en 1988, le Congrès américain a voté le Radiation-Exposed Veterans Compensation Act qui permet l'indemnisation des militaires victimes de maladies radioinduites ayant participé aux opérations de guerre au Japon et aux essais nucléaires ultérieurs. Et, en 1990, le Congrès décidait également la création d'un programme d'indemnisation pour les victimes de maladies liées aux essais nucléaires effectués aux États-Unis (voir annexe 2). D'abord prévu pour les résidents concernés par les retombées dans certaines zones des États du Nevada, de l'Utah et de l'Arizona, le personnel ayant participé aux essais, les travailleurs des mines d'uranium situées sur le territoire américain, le programme a été, en 2000, élargi aux travailleurs des installations de raffinage (uranium mills) et aux transporteurs du minerai. En février 2011, 23 447 personnes avaient été indemnisées au titre de ce programme, dont 14 856 résidents, 1526 participants et 7065 travailleurs de la filière de l'uranium.

En France, le Parlement a finalement adopté, le 5 janvier 2010, une loi relative à la reconnaissance et à l'indemnisation des victimes des essais nucléaires (JORF 2010). Un décret d'application fixe la liste des maladies indemnisables, et les périmètres où les personnes souffrant d'une pathologie radio-induite doivent avoir résidé ou séjourné pendant la période des essais. La liste française des cancers indemnisables est plus restrictive que la liste américaine (voir annexe 2).

Au début octobre 2011, l'Association des vétérans des essais nucléaires français (AVEN) s'indignait du fait que sur 129 dossiers déposés auprès de la commission d'indemnisation, 127 avaient été refusés. Selon l'AVEN, une quarantaine de décès par an serait liée aux irradiations subies lors des 210 essais nucléaires français, 150 000 militaires ou civils sont concernés.

5.4.2. Le syndrome de la guerre du Golfe

Environ 697 000 soldats américains ont participé aux opérations de la première guerre du Golfe qui se sont déroulées entre janvier et juin 1991. À leur retour, les vétérans se plaignent de symptômes divers : fatigue, maux de tête, troubles du sommeil et de la mémoire, douleurs dans les articulations. Les journaux commencent à parler du syndrome de la guerre du Golfe. Plus tard, la presse évoque également une augmentation de la mortalité parmi les vétérans, ainsi qu'une augmentation des malformations parmi les enfants qu'ils avaient conçus après la guerre.

Mais de quoi souffrent les vétérans de la guerre du Golfe ? À la fin des années 1990, plusieurs études ont essayé de percer le mystère. Deux études américaines, portant sur près de 9000 militaires, ont comparé l'état de santé des soldats déployés dans le Golfe à celui de leurs collègues qui n'avaient pas été sur le théâtre des opérations (Fukuda 1998, JAMA 1997). Les résultats n'ont pas mis en évidence de pathologies ou des paramètres cliniques ou biologiques anormaux significatifs dans la population des vétérans. Mais ceux-ci ont rapporté de deux à quatre fois plus souvent des symptômes et des plaintes concernant leur santé. Une étude britannique a comparé trois groupes de soldats : un groupe déployé dans le Golfe, un groupe non déployé et un groupe déployé en Bosnie (Unwin 1999). Les trois groupes ont rapporté les mêmes symptômes, mais avec une fréquence multipliée par trois pour les vétérans du Golfe. Une autre étude n'a pas permis de mettre en évidence d'excès de mortalité, ou de naissance d'enfants malformés parmi les vétérans du Golfe (Bolton 2002).

En 2001, le Parlement américain a voté une loi accordant une indemnisation aux vétérans du Golfe souffrant de fatigue chronique, du syndrome de l'intestin irritable et de fibromyalgie. Une indemnisation est aussi accordée aux militaires souffrant de plusieurs symptômes parmi lesquels : fatigue, perte de poids, maux de tête, troubles gastro-intestinaux, neurologiques, respiratoires, douleurs articulaires, etc.

Les causes du syndrome de la guerre du Golfe ne sont toujours pas identifiées. Les vétérans ont été exposés à de nombreux risques chimiques et bactériologiques lors des opérations militaires de la guerre du Golfe. L'attention de beaucoup de chercheurs et d'observateurs s'est focalisée sur l'uranium appauvri.

5.4.3. L'utilisation d'armes à uranium appauvri

L'uranium appauvri est ce qui reste lorsqu'une fraction des isotopes les plus radioactifs de l'uranium naturel, en particulier l'uranium 235, a été extraite pour produire un uranium enrichi qui sert de combustible dans les réacteurs nucléaires. Il existe donc d'importantes quantités d'uranium appauvri sur le marché.

L'expression "uranium appauvri" est également utilisée, de manière abusive selon certains experts, pour désigner le sous-produit issu du retraitement du combustible usé. Dans ce cas, il comporte, outre les trois isotopes de l'uranium naturel, des uraniums 232 et 236, ainsi que des traces de produits de fission (plutonium, américium et curium), radionucléides formés lors des réactions nucléaires de fission et d'activation qui se produisent dans les réacteurs électronucléaires.

La très haute densité de l'uranium appauvri (plus d'une fois et demi celle du plomb), son point de fusion relativement bas et sa capacité à s'autoaiguiser lors d'un impact sont des qualités qui ont été utilisées pour la production d'armes et de munitions capables de pénétrer rapidement des matériaux moins denses (béton, métal). L'uranium

appauvri a également été employé pour renforcer l'armature des tanks de l'armée américaine de type Abrams³⁹.

La guerre du Golfe de 1991 est le premier conflit armé au cours duquel des armes à uranium appauvri ont été employées. Ce type d'armes a été ensuite utilisé par l'armée américaine lors du conflit des Balkans, en Bosnie en 1994 et 1995, et au Kosovo en 1999, et lors de la guerre en Irak en 2003. Au cours de la première guerre du Golfe, environ 800 000 projectiles de ce type ont été largués par les avions américains et britanniques, ce qui représente une masse d'uranium appauvri de l'ordre de 250 tonnes. Cinquante autres tonnes ont été projetées par les tirs des tanks.

Lorsqu'un projectile frappe une cible particulièrement solide, il se fragmente et s'enflamme. La combustion de gouttelettes d'uranium en fusion s'accompagne d'un jaillissement d'étincelles et de projections qui forment un aérosol de vapeurs et de fines poussières d'oxydes d'uranium dont 80 % sont insolubles. Les fines poussières peuvent être inhalées, ingérées, et contaminer les blessures. Dans toute la chaîne de production et d'utilisation d'armes à uranium appauvri, ces modes de contamination ont été identifiés comme présentant les risques les plus significatifs. Le danger peut également venir d'éclats (shrapnel) enfoncés dans le corps et qui ne peuvent être extraits. Si les tanks américains n'ont jamais été pénétrés par des tirs irakiens, lors de la guerre du Golfe, ils ont été victimes de quelques tirs "amis".

L'uranium naturel et l'uranium appauvri ont des propriétés chimiques identiques. L'uranium naturel est la seule substance radioactive pour laquelle la toxicité chimique l'emporte sur la toxicité radioactive. Il faut atteindre un taux d'enrichissement d'environ 7 % en uranium 235 pour que la toxicité radioactive devienne prépondérante.

Selon les manuels de toxicologie, les sels solubles d'uranium sont en partie absorbés. L'élimination de l'uranium s'effectue essentiellement par voie rénale. La fraction retenue dans l'organisme se stocke préférentiellement dans les os et les reins. Le risque toxique principal est une atteinte rénale. Un excès d'aberrations chromosomiques a été observé dans les lymphocytes (variété de globules blancs) des personnes exposées, une action indépendante du risque radioactif, mais résultant de l'action chimique toxique du métal. Le contrôle biologique de la contamination interne des personnes qui travaillent avec de l'uranium est assuré par l'évaluation de la quantité d'uranium absorbée par voie respiratoire ou digestive, en le dosant dans les urines (Lauwerys 2003).

Les sels insolubles d'uranium inhalés, de type oxydes d'uranium, sont retenus dans le tissu pulmonaire où ils provoquent une irradiation locale qui pourrait être source de cancers. Les études épidémiologiques disponibles chez des personnes professionnellement exposées ne l'ont pas montré. L'incertitude demeure pour les personnes, civils ou militaires, contaminées lors des bombardements massifs.

En 1993, le département de la Défense des États-Unis a proposé un suivi à 160 vétérans présumés fortement contaminés par des poussières d'uranium. En 1999, les vétérans les plus contaminés, notamment ceux dans le corps desquels ont été identifiés des fragments d'uranium, avaient toujours un taux élevé de cet élément dans leurs urines. Aucune anomalie n'a jusqu'à présent été constatée et aucune malformation n'a été signalée chez les enfants conçus entre 1991 et 1997. Mais il a été jugé prudent de continuer à surveiller leur santé, particulièrement leur fonction rénale. Désormais, les soldats américains qui ont été

39. L'uranium appauvri a également des applications civiles : dans la recherche, en médecine dans la composition d'écrans protecteurs contre les rayonnements (cas des gammagraphies) et l'armature de conteneurs pour le transport de matériaux radioactifs, comme catalyseur dans l'industrie pétrolière, comme contrepoids et ballast dans les avions et les navires.

exposés à l'uranium figurent parmi les catégories de vétérans susceptibles de bénéficier de compensations en cas de maladies liées à une exposition aux radiations ionisantes.

En octobre 2007, le ministère de la Défense italien révélait qu'entre 1996 et 2006, 37 soldats italiens étaient probablement décédés du fait de l'exposition aux armes à l'uranium lors de leurs missions en Irak et dans les Balkans. À l'inverse, des études menées en Finlande, en Espagne et en Allemagne sur les personnels envoyés au Kosovo dans le cadre d'opérations de maintien de la paix, n'ont pas révélé d'exposition significative à l'uranium (United Nations 2008).

Quel a été et sera l'impact de l'uranium sur les populations civiles vivant dans les villes et les sites bombardés? Les tonnes de poussières d'uranium ingérées, inhalées, ne pourraient-elles pas devenir des armes de destruction? En 1999, les États-Unis ont officiellement reconnu avoir utilisé des armes à uranium appauvri en Bosnie Herzégovine. Un total de 10 800 pièces de munition y ont été lancées, correspondant à environ trois tonnes d'uranium. Les armes à uranium ont à nouveau été utilisées en 1999 au Kosovo et dans le sud de la Serbie. Des dizaines de sites ont été contaminés, certains restent inaccessibles en raison de la présence de mines. Différentes études et inspections ont été menées par les Nations unies et l'AIEA pour évaluer l'impact de l'uranium appauvri sur les personnes et l'environnement. Tous ces travaux se sont déroulés après les conflits. Aucun n'a évalué l'effet de ce type d'armes sur les troupes et les populations au moment des combats. Leurs conclusions: les résidus d'uranium dispersés dans l'environnement ne représentent pas un risque radiologique pour les populations, les lieux où les fragments d'armes et les armes non explosées subsistent devraient être rendus inaccessibles et les débris rassemblés dans des endroits appropriés.

En 2008, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) conclut que l'irradiation consécutive à l'exposition à l'uranium des militaires et des civils n'a, de manière générale, pas atteint des doses supérieures au niveau naturel. L'OMS recommande que les militaires les plus contaminés fassent l'objet d'une surveillance de la fonction rénale. Les sites pollués devraient être surveillés et des travaux de nettoyage entrepris là où les spécialistes jugeraient le niveau de contamination inacceptable (remise en suspension de poussières inhalables ou pollution des nappes phréatiques). Une attention toute particulière devrait être accordée aux enfants susceptibles d'être les plus exposés, et une information fournie aux populations concernées.

Le 22 mai 2008, le Parlement européen a voté une résolution appelant les États membres de l'Union européenne et les pays membres de l'OTAN à réclamer un moratoire sur l'emploi d'armes contenant de l'uranium, et de redoubler d'efforts pour leur interdiction mondiale. La résolution du Parlement demandait également à la Commission européenne d'entreprendre une évaluation scientifique de l'utilisation de l'uranium appauvri. Le Comité scientifique européen sur les risques sanitaires et environnementaux a rendu ses premières conclusions au printemps 2010 (SCHER 2010). Celles-ci confirment les évaluations précédentes de l'OMS et de l'AIEA.

5.4.4. Secrets et dénis

L'uranium n'est pas le seul toxique auquel les soldats ont été confrontés sur les champs de bataille du Golfe et des Balkans. D'autres hypothèses ont été avancées pour expliquer les malaises des vétérans: l'emploi d'armes biologiques ou chimiques, les vaccins et traitements qui devaient protéger les militaires contre le présumé arsenal chimique de Saddam Hussein, les insecticides et pesticides utilisés, etc. (Teugels 2003). Dans

plusieurs pays engagés dans la guerre du Golfe ou dans les conflits en ex-Yougoslavie, des associations de vétérans ont vu le jour, car les vétérans semblent frappés d'affections qui s'apparentent au syndrome de fatigue chronique, et ils se plaignent de ne pas voir leurs maladies reconnues.

L'histoire du nucléaire militaire est riche en secrets et dénis. En 1994, à l'occasion de la levée du secret militaire sur des archives, les Américains découvraient, horrifiés, que plusieurs milliers d'entre eux avaient servi de cobayes pour des expériences nucléaires. Une étude, publiée en 1995, répertorie 47 de ces expériences conduites sur plus de 3200 personnes, entre 1940 et 1970, avec l'aide de financements fédéraux, principalement fournis par la Commission de l'énergie atomique des États-Unis (AEC) (Samei 1995). On apprend ainsi que certaines expériences visaient à observer les effets biologiques de radionucléides administrés de différentes manières (ingestion, inhalation, injection) à des patients âgés ou incurables ou en phase terminale. D'autres expériences avaient pour but d'étudier les conséquences des rayonnements sur la peau, sur la facilitation de l'accouchement ou la stérilisation. Dans certains cas, les expériences ont été menées sur des volontaires ou des prisonniers consentants, contre rétribution. Souvent les études ne mentionnent pas la manière dont le consentement a été obtenu. Ce qui a plus particulièrement déclenché la colère du public est le fait qu'à l'époque de ces expériences l'essentiel des règles éthiques pour encadrer les essais et les recherches cliniques sur des êtres humains étaient déjà en place (Mossman 1995)⁴⁰.

La tempête médiatique soulevée à cette occasion a mis les scientifiques sur la défensive. Les essais connus ont été passés au crible. Tous les essais ne seront pas jugés contraires aux règles d'éthique. Mais certains, qui avaient été pratiqués sur des mourants, des prisonniers et des enfants handicapés, ont conduit à reformuler la notion de consentement éclairé des patients ainsi que l'adaptation des règles de protection des personnes participant à des essais cliniques.

Les habitants des îles Marshall et des atolls, tels que celui de Bikini, où les Américains ont réalisé jusqu'en 1958 des essais nucléaires de grande ampleur, estiment également avoir servi de cobayes. Pour "le bien de l'humanité", leur avait-on dit ! (Lips-Dumas 2009).

Le territoire de l'ex-Union soviétique serait parsemé de plusieurs dizaines de petits monuments discrets rappelant le souvenir des victimes des accidents nucléaires, et pas seulement à Tchernobyl et Mayak.

Les conséquences environnementales et humaines des essais nucléaires que la France a menés dans le Sahara, de 1960 à 1966, connus sous le nom de code Gerboise, sont largement ignorées. Il y a peu de données connues ni sur les retombées radioactives dans la zone des tests, ni sur les doses reçues par les populations résidant dans les villages situés à 50 km et à 150 km de ces zones. Le personnel militaire et les appelés du contingent impliqués dans ces essais ont également été exposés aux radiations et semblent même avoir servi de cobayes, selon la presse française qui a eu accès en février 2010 à un rapport confidentiel du ministère de la Défense (Touati 2010).

40. En 1947 à Nuremberg, à l'occasion du procès des médecins allemands qui avaient conduit des expériences dans les camps de concentration, les membres du ministère public (l'accusation) avaient été amenés à formuler un cadre conceptuel pour juger les actes commis par les accusés et à rédiger un texte connu sous le nom de Code de Nuremberg.

Ce qu'il faut retenir

Dans l'esprit du public, le risque d'une exposition aux rayonnements ionisants est généralement associé au secteur de l'énergie nucléaire. Des sources de rayonnements ionisants sont pourtant présentes dans bien d'autres secteurs d'activité où les mesures de contrôle de la dose reçue par les travailleurs ne sont pas nécessairement observées avec la même rigueur que dans le "nucléaire". Le secteur de la santé occupe très nettement la tête du classement des secteurs comptant le plus grand nombre de travailleurs exposés à des sources de rayonnements ionisants. Ce phénomène tend à se renforcer avec la banalisation des examens de radiologie dans les hôpitaux et le recours accru à des solutions radiopharmaceutiques.

Un autre secteur fortement touché est celui du transport aérien. La source d'exposition est dans ce cas de figure naturelle. Le personnel navigant est en effet exposé au rayonnement cosmique, ce qui représente au bout de plusieurs années de travail une exposition à une dose de rayonnements particulièrement élevée. L'industrie traditionnelle n'est pas épargnée, en particulier dans la métallurgie où la gamme de risque est étendue, allant de l'utilisation d'équipements émetteurs de rayonnements ionisants à l'exposition à de la ferraille contenant des éléments radioactifs.

Enfin, malgré les accords internationaux de démantèlement des arsenaux nucléaires, l'atome est loin d'avoir déserté les champs de bataille. Les vétérans, tant du côté de l'US Army que des armées de pays européens, se plaignent de maladies mystérieuses qui pourraient être, entre autres causes, liées à l'utilisation d'armes à uranium appauvri.

Chapitre 6

Les risques de l'énergie nucléaire, de la mine aux centrales

En avril 2011, 30 pays possédaient des centrales nucléaires, et 437 réacteurs étaient en fonctionnement dans le monde (Schneider 2011). La production d'électricité à partir de l'énergie nucléaire a démarré en 1956 et a connu une rapide expansion entre 1970 et 1985, notamment à la suite de la crise pétrolière de 1974. Cette expansion est contestée dans certains pays après l'accident survenu, en 1979, dans la centrale américaine de Three Mile Island (Pennsylvanie). Le président Jimmy Carter va jusqu'à proposer la suspension de la construction de centrales nucléaires aux États-Unis, mais cette menace ne sera jamais mise à exécution. En Suède, par contre, un gel de tout nouveau projet nucléaire est décrété à la suite d'un referendum organisé en 1980⁴¹.

Le véritable coup d'arrêt à la construction de nouvelles centrales nucléaires interviendra sept ans plus tard, en 1986, à la suite du terrible accident de Tchernobyl. En 1987, l'Italie décide par referendum de ne plus recourir à l'énergie nucléaire. Au début des années 2000, l'Allemagne (2001) et la Belgique (2003) votent des plans de sortie du nucléaire.

À la fin des années 2000, la tendance s'était nettement inversée. L'idée de recourir à l'électricité nucléaire pour couvrir nos besoins énergétiques a connu un regain d'intérêt dû en particulier aux inquiétudes suscitées par la diminution prévisible des ressources pétrolières, les incertitudes concernant la fourniture et le prix du gaz (en Europe notamment), par la dépendance vis-à-vis du pétrole importé (surtout aux États-Unis) et les engagements internationaux pris afin de lutter

41. En février 2009, le gouvernement de centre-droit, dirigé par le premier ministre conservateur Fredrik Reinfeldt, a décidé de lever le moratoire.

contre le réchauffement climatique. Début 2011, 64 réacteurs étaient en construction, et 35 projets étaient en attente du feu vert de l'AIEA (Schneider 2011).

Les événements survenus dans la centrale nucléaire japonaise de Fukushima à la suite du tsunami du 11 mars 2011 pourraient contrecarrer les plans des plus ardents défenseurs du nucléaire et remettre au centre du débat la question de la sécurité des populations civiles et, espérons-le, également des travailleurs. En effet, la production d'électricité d'origine nucléaire comprend de très nombreuses étapes qui toutes comportent des risques d'exposition et de contamination des travailleurs. Nous aborderons quelques aspects des étapes clés du processus : l'extraction de l'uranium, la transformation du minerai en combustible nucléaire et l'exploitation des centrales nucléaires. Pour l'ensemble de la filière, l'Unscar estime à environ 660 000 le nombre des personnes contrôlées de par le monde pour une exposition aux rayonnements ionisants (UNSCEAR 2008).

6.1. L'extraction du minerai d'uranium

Dans les monts de Bohême et dans le sud de l'Allemagne, on a extrait dès le Moyen Âge des métaux parmi lesquels l'or et surtout l'argent. Il y a 400 ans, le médecin allemand Georg Bauer, dit Agricola, véritable pionnier de la prévention au travail, décrit l'épidémie d'affections pulmonaires et de morts prématurées qui frappe les mineurs. Et pour cause, dans les mines d'argent, on trouve également un autre minerai noir et très dense, la pechblende appelée aussi "pierre de malheur". C'est, en 1789, que le chimiste allemand Martin Klaproth identifie dans la pechblende un métal qu'il dénomme uranium, du nom de la planète Uranus qui venait d'être découverte. Pendant tout le XIX^e siècle, l'uranium est utilisé pour colorer le cristal, pour réaliser des glaçures pour la céramique et des décors sur la porcelaine. En 1879, des médecins allemands identifient la maladie des mineurs, appelée "mal des montagnes", comme étant un cancer du poumon. Mais, c'est seulement en 1951 que des spécialistes américains de la Commission de l'énergie atomique démontrent que les particules alpha émises par la désintégration du radon, essentiellement du polonium 218 et du polonium 214, fixées sur des poussières et inhalées peuvent contaminer les poumons.

De nombreuses études épidémiologiques confirmeront ultérieurement ce risque. Un risque d'autant plus grand que les mines n'étaient pas ventilées. Une étude australienne sur 2574 travailleurs d'une mine d'uranium, suivis de 1952 à 1987, a montré pour ceux qui travaillaient dans la mine une mortalité par cancer du poumon cinq fois supérieure à ceux qui travaillaient en surface (Woodward 1991). Une étude de 1993 sur 4320 mineurs d'uranium de Bohême montre un risque de cancer du poumon multiplié par quatre par rapport à la population générale (Tomasek 1993). Plus récemment, une étude portant sur 48 000 travailleurs de la mine de Příbram pendant la période où elle était en activité, de 1949 à 1991, a montré que les travailleurs les plus exposés au radon avaient un risque de leucémie plus élevé que les travailleurs moins exposés (Rericha 2006).

La région de Bohême, qui fait aujourd'hui partie de la République tchèque, compte encore de nos jours la plus grosse mine d'uranium en activité de l'Union européenne. À Rozna, environ 300 tonnes d'uranium sont extraites chaque année. Ouverte en 1957, la mine a longtemps contribué à fournir le précieux métal nécessaire à l'arsenal nucléaire soviétique. Elle alimente aujourd'hui en combustible les deux centrales nucléaires tchèques. Les 350 mineurs de fond portent des dosimètres individuels et ne peuvent travailler plus de dix ans sous terre.

Après la découverte de la radioactivité et des propriétés du radium, la recherche de minerais d'uranium a parfois ressemblé à la ruée vers l'or ! Aux États-Unis notamment, où sur le plateau du Colorado on dénombrait quelque 2500 mines entre 1940 et 1960. Comme

d'autres pays européens, la France a connu aussi un boom dans la prospection et l'extraction de l'uranium après la Seconde Guerre mondiale. Une étude sur la mortalité de 5086 travailleurs ayant exercé, au moins un an, le métier de mineur d'uranium entre 1946 et 1990, a montré un excès de décès par cancers du poumon en lien avec l'exposition au radon, mais également un excès de cancers du rein (Vacquier 2008). Les activités d'exploration, de production, de traitement et de stockage du minerai d'uranium ont concerné plus de 210 sites en France. La dernière mine a fermé ses portes en 2001. En Allemagne, une centaine de cas de cancers dus aux rayonnements ionisants sont indemnisés chaque année. Selon un responsable de l'assurance sociale contre les accidents du travail et les maladies professionnelles (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung), ce chiffre particulièrement élevé est la conséquence de l'exploitation de mines d'uranium sur le territoire de l'ancienne Allemagne de l'Est au cours des années 1950 et 1960.

L'Afrique riche en uranium, les Africains mal protégés

Une association française, la Commission de recherche et d'information indépendante sur la radioactivité (Criirad), a dénoncé les conditions d'exploitation de l'uranium au Niger par des filiales des sociétés françaises Areva et Cogema (aujourd'hui fusionnées). Pour la Criirad, l'exploitation minière entraîne une exposition des populations et des travailleurs à des rayonnements ionisants à travers l'eau, l'air et les objets contaminés de la vie quotidienne. Dans un document publié en 2005, la Criirad cite un rapport d'Areva-Cogema, dans lequel le géant français du nucléaire aurait admis que plusieurs dizaines de salariés de la mine souterraine d'Arlit (Niger) avaient été exposés à des doses annuelles supérieures à la limite européenne (CRIIRAD 2005).

Toujours en Afrique, au Katanga, ce n'est pas la radioactivité qui est en cause, mais la contamination résultant de la toxicité chimique des minerais exploités*. La province du Katanga dans le sud-est de la République démocratique du Congo est l'objet depuis des siècles d'une intense activité minière. Pendant la période coloniale, l'extraction du cuivre, du cobalt et de l'uranium était la

principale source de revenus de la colonie belge. Après la période coloniale, l'activité minière s'est poursuivie et, depuis le début des années 2000, l'activité s'est même accentuée avec la hausse de la demande en minerais de la part des économies émergentes d'Asie. L'extraction des minerais s'est développée de manière artisanale à travers tout le Katanga et des dizaines de milliers de jeunes, dont des enfants, travaillent comme "creuseurs" dans des conditions particulièrement dangereuses.

Publiée en 2009, une étude menée par des scientifiques belges et katangais a mesuré l'imprégnation de 311 personnes, âgées de 2 à 74 ans, habitant la zone des mines. Les résultats ont montré une forte imprégnation de la population vivant à proximité des mines, et tout spécialement des enfants. Dans ce groupe, les concentrations de cadmium, de cobalt, de plomb et d'uranium dans les urines étaient respectivement 4, 43, 5 et 4 fois supérieures à celles de la population américaine (Banza 2009).

* La toxicité chimique de l'uranium est considérée supérieure à sa toxicité radiologique (toxicité rénale). Quant au cobalt, son action toxique en milieu professionnel se manifeste surtout au niveau du cœur, de la thyroïde et des poumons (Lauwerys 2003).

La quête de l'uranium laissera des traces. Les anciens sites miniers et sites de stockage posent des problèmes de radioprotection des populations. Un document de la Commission européenne de mars 2011 indique que 12 États membres sont concernés (Commission européenne 2011). Pour l'ensemble de ces pays, les quantités de déchets et résidus sont estimées à 314 millions de mètres cubes couvrant une surface d'environ 2530 hectares. Le devenir à long terme de ces dépôts apparaît souvent flou, notamment en Europe centrale et orientale. Le traité Euratom impose d'établir un inventaire des sites abandonnés pour

2012. Les États membres sont tenus de mettre en place des programmes de gestion. La Commission européenne envisage de donner des instructions plus précises pour une meilleure coordination du contrôle de la radioactivité des anciens sites d'exploitation des mines d'uranium. La Commission souhaite aussi éviter à l'avenir de tels héritages, dont la gestion et son coût incombent in fine à la collectivité.

Dans le passé, la réutilisation de stériles (minerais à trop faibles teneurs en uranium pour être économiquement exploitables) dans des soubassements de routes ou de parkings s'est souvent faite sans que la trace de cette utilisation ait été enregistrée.

En 2010, les premiers producteurs mondiaux d'uranium étaient le Canada (30 %), l'Australie (14 %) et le Niger (10 %). Le minerai est également exploité au Kazakhstan, en Namibie, dans la Fédération de Russie, en Afrique du Sud, en Ukraine, aux États-Unis et en Ouzbékistan. Au début des années 2000, dans le monde, environ 12 000 travailleurs étaient employés à l'extraction et au broyage du minerai. Ils étaient plus de 300 000 au début des années 1980.

6.2. La filière nucléaire

Une fois extrait, le minerai d'uranium est purifié et concentré sous forme de *Yellow cake*⁴². Pour devenir un combustible nucléaire, cet uranium doit être enrichi en uranium 235, car c'est le seul des trois isotopes de l'uranium naturel qui peut se fragmenter sous le choc d'un neutron⁴³. C'est pourquoi il est dit fissile. Cette fission s'accompagne d'une émission d'énergie. L'uranium naturel contient environ 0,71 % d'uranium 235. La filière des réacteurs à eau sous pression, qui représente la majorité du parc nucléaire mondial, requiert un uranium contenant de 3 à 4,5 % d'uranium 235. Dans les réacteurs destinés à la recherche scientifique, l'uranium moyennement enrichi (jusqu'à 20 % en isotope 235) tend à supplanter l'uranium hautement enrichi (jusqu'à 93,5 % en isotope 235). En effet, le gouvernement des États-Unis par crainte d'un détournement de l'uranium à des fins militaires fait pression sur ses alliés afin qu'ils renoncent à utiliser de l'uranium hautement enrichi.

En 2003, 50 unités de transformation et d'enrichissement d'uranium étaient en activité dans le monde. L'exposition d'environ 18 000 personnes était contrôlée dans ce secteur de la filière nucléaire, auxquelles il faut ajouter les 20 000 travailleurs contrôlés dans la fabrication du combustible proprement dit.

6.2.1. Vie et survie du combustible nucléaire

Pour être enrichi, l'uranium naturel doit d'abord être converti, par traitement chimique, en hexafluorure d'uranium gazeux au cours d'une opération dite de conversion. Une fois mis en phase gazeuse, l'enrichissement de l'uranium peut se réaliser selon plusieurs techniques, notamment par diffusion gazeuse et par ultracentrifugation. À l'issue du processus d'enrichissement, l'hexafluorure d'uranium est, par traitement chimique, retransformé en poudre d'oxyde d'uranium compactée sous forme de pastilles qui seront placées dans de longs tubes en alliage de zirconium, les crayons combustibles. Ces "crayons" seront ensuite réunis sous

42. "Gâteau jaune", du fait de sa couleur et sa texture pâteuse en fin de procédé, contenant environ 75 % d'uranium, soit 750 kg par tonne. Le Yellow cake est par la suite conditionné et enfuté, puis expédié jusqu'aux usines de conversion pour y subir de nouveaux traitements chimiques. Source : <http://www.aveva.com>.

43. Pour fabriquer 1 kg d'uranium enrichi, il faut plus de 8 kg d'uranium naturel.

la forme d'assemblages destinés à constituer le cœur des réacteurs des centrales nucléaires. Suivant la puissance du réacteur, le nombre d'assemblages varie.

Lors du démarrage d'une centrale, tous les assemblages sont neufs. Une fraction du cœur (un tiers ou un quart) sera renouvelée lors des arrêts de la centrale, soit tous les 12 à 18 mois. Après quatre ans environ d'exploitation, le combustible utilisé d'un cœur entier aura été extrait des réacteurs et mis à refroidir, un an au minimum sur le site même des centrales nucléaires, et souvent beaucoup plus. Le combustible utilisé peut être recyclé après retraitement. À cette fin, il est envoyé dans une usine de retraitement comme celles de La Hague en France et de Sellafield au Royaume-Uni et, de manière marginale, à Tokai Mura au Japon. Certains pays n'envisagent pas de procéder au retraitement et préfèrent procéder au stockage définitif du combustible utilisé, après la cinquantaine d'années nécessaire pour permettre un refroidissement suffisant du combustible. Il faut souligner que de 1976 à 2009, seulement 15 % du combustible sorti du parc mondial des réacteurs électronucléaires ont été retraités. Et donc, depuis 1976, 85 % du combustible utilisé provenant des centrales nucléaires sont actuellement entreposés en l'état en attendant un stockage définitif. Même en France, pays précurseur dans les techniques de retraitement, de 1976 à 2009, 54 % des combustibles sortis des réacteurs n'ont pas été retraités (Guillemette 2011).

Le combustible utilisé contient toujours de l'uranium et notamment les isotopes 238 et 235, environ 93 % du poids initial pour le premier et 0,7 % pour le second. Mais il contient désormais d'autres substances dont des uraniums 232 et 236, des isotopes artificiels de l'uranium non fissiles. Ces deux isotopes sont des "poisons" qui réduisent fortement les performances de l'uranium de retraitement. Le combustible usagé contient également du plutonium (environ 1 % du poids initial du combustible), des émetteurs alpha comme le neptunium, des américiums et des curiums et des produits de fission très radioactifs (4,8 % du poids initial). Le plutonium n'est pas un élément naturel, c'est un sous-produit inévitable de la production d'énergie nucléaire.

À l'usine de retraitement, l'uranium et le plutonium sont séparés. L'uranium issu du retraitement est à peine économiquement recyclable. Par contre, une partie du plutonium est recyclée dans la fabrication de nouveaux combustibles et notamment du MOX (pour Mixed Oxyde), un combustible nucléaire à base d'oxyde d'uranium et de plutonium.

Au cours des années 1950, le Centre d'étude de l'énergie nucléaire de Mol (Belgique) a mené des recherches sur le retraitement des combustibles irradiés qui déboucheront, à la fin des années 1960, sur la production de MOX. Le MOX sera par la suite produit en Allemagne, puis en Suisse, et en France à partir de 1985.

Tous les isotopes du plutonium sont émetteurs de rayonnements alpha qu'une simple feuille de papier arrête. C'est ainsi que la manipulation du plutonium et des objets qu'il a contaminés se fait dans ce qu'on appelle des boîtes à gants où les opérateurs sont protégés par des vitres, par le recours à des systèmes robotisés et, le cas échéant, par des gants. Le plutonium n'en est pas moins un élément radioactif particulièrement dangereux en raison de sa durée de vie très longue (il a une demi-vie de 24 000 ans) et de sa grande toxicité. En cas de contamination interne, sa forte radiotoxicité se concentre sur quelques organes (poumons, foie, squelette). Il a également une importante toxicité chimique à l'égard de certains organes (reins et système nerveux, notamment).

Le plutonium présente aussi un risque de criticité (risque d'une réaction nucléaire en chaîne) qui réclame des précautions supplémentaires pour protéger les travailleurs dans les installations où il est mis en œuvre (retraitement, transport de l'oxyde de plutonium, fabrication des pastilles combustibles et transport du combustible vers le réacteur ainsi que les entreposages intermédiaires pour chaque étape industrielle). Tout le plutonium issu du retraitement des combustibles utilisés n'est pas recyclé. Selon l'AIEA, 20 % du combustible utilisé serait recyclé. Des centaines de milliers de tonnes de matières radioactives sont ainsi stockées.

6.2.2. Les risques pour les travailleurs de la filière nucléaire

Les centaines de milliers de travailleurs engagés dans la filière nucléaire ont été exposés à de faibles ou de très faibles doses de rayonnements ionisants. Il est donc particulièrement intéressant d'analyser les données des études épidémiologiques les concernant.

Une étude portant sur les causes de décès, entre 1946 et 1988, de 75 000 travailleurs de trois complexes nucléaires britanniques n'a pas montré d'excès de la mortalité chez les travailleurs exposés par rapport à la moyenne nationale, sauf pour les leucémies (Carpenter 1994). Même conclusion dans une étude de 1995 consacrée à des travailleurs britanniques, canadiens et américains de six sites nucléaires (Cardis 1995). Une étude américaine a étudié la mortalité d'une cohorte de 4 000 travailleurs employés dans une entreprise de transformation de l'uranium pendant toute sa durée d'exploitation, soit de 1951 à 1989 (Ritz 1999). Les résultats montrent un taux de mortalité des travailleurs inférieur à celui de l'ensemble de la population, mais un taux de mortalité par cancer de tout type légèrement plus élevé. Ce taux augmente avec la dose de radiation subie et la durée d'exposition. L'auteur de cette étude souligne l'importance de suivre les travailleurs sur une longue période.

Beaucoup d'études en effet portent sur un trop petit nombre de travailleurs, ou sur de trop courtes périodes, pour que des maladies telles que les pathologies cancéreuses se manifestent. Par ailleurs, certains travaux sont entachés de nombreux biais comme celui de comparer un groupe de travailleurs à la population générale ce qui entraînera une sous-estimation du risque des personnes exposées à cause de l'"effet du travailleur sain". L'industrie nucléaire a pour habitude de recruter ses employés (techniciens et cadres), non seulement sur base de leurs compétences, mais également sur base d'un profil de santé particulier. Les candidats retenus ont donc un meilleur état de santé que la population générale.

Des études épidémiologiques de plus grande ampleur aboutissent à des résultats bien moins rassurants. En rassemblant les données d'une dizaine d'études sur des travailleurs de sites nucléaires aux États-Unis, au Canada et au Royaume-Uni, des auteurs sont arrivés à la conclusion que le risque de cancers et de leucémies était augmenté pour les travailleurs ayant une exposition cumulée supérieure à 10 mSv par rapport à ceux dont l'exposition cumulée était inférieure à 10 mSv. Le risque augmentait avec la dose d'exposition cumulée. Ces chercheurs considèrent la leucémie comme le "cancer sentinelle" pour l'évaluation des effets des faibles doses de rayonnements ionisants, car il a un temps de latence inférieur à d'autres pathologies et est donc le premier à se déclarer (Dodic-Fikfak 1999).

L'étude du Centre international de recherche sur le cancer (CIRC), dite étude des 15 pays, va dans le même sens. Cette étude prend en compte des expositions survenues entre les années 1960 et le milieu des années 1990 parmi plus de 400 000 travailleurs du nucléaire de 15 pays. D'après les résultats de cette étude, le risque de cancer est accru, même en cas d'exposition à de faibles doses de radiations, c'est-à-dire à des doses communément absorbées par les travailleurs du nucléaire (Cardis 2005).

Outre les données épidémiologiques, le contrôle de la dose reçue constitue un autre poste d'observation de l'exposition des travailleurs aux risques liés aux rayonnements ionisants sur le lieu de travail. Depuis une vingtaine d'années, les données de la surveillance des travailleurs montrent une diminution des doses moyennes. Ainsi, dans l'usine de retraitement des déchets nucléaires de Sellafield (Royaume-Uni), la dose annuelle moyenne d'exposition était en 1980 de 10 mSv et environ 1200 travailleurs dépassaient la dose de 15 mSv. En 1998, la moyenne d'exposition n'était plus que de 1,4 mSv, et aucun travailleur n'avait dépassé la dose de 15 mSv.

Centrales nucléaires : plusieurs types de réacteurs

Il existe plusieurs types de réacteurs dans les centrales nucléaires de production d'électricité. La majorité des réacteurs en fonctionnement dans le monde sont des réacteurs dits de deuxième génération. Environ un cinquième du parc mondial en exploitation est constitué de réacteurs à eau bouillante BWR (Boiling Water Reactor), tandis que 60 % sont à eau pressurisée du type PWR (Pressurised Water Reactor). En Europe 80 % des réacteurs sont de type PWR. La technologie utilisée pour les deux types de réacteurs est d'origine américaine. Celle des PWR a d'abord été développée par l'entreprise Westinghouse pour la propulsion des sous-marins de l'armée américaine. La technologie des BWR a été développée par General Electric. À l'origine, la première génération des réacteurs utilisait de l'uranium naturel comme combustible, l'uranium enrichi n'étant pas commercialisé. Les réacteurs de seconde génération utilisent un uranium faiblement enrichi et ont besoin de beaucoup d'eau à la fois pour refroidir le réacteur et créer la force motrice. C'est pour cette raison qu'ils sont installés au bord d'un fleuve ou à proximité de la mer.

Dans le cas des réacteurs PWR, l'eau du circuit primaire qui refroidit le cœur du réacteur est sous haute pression et ne bout pas. Elle passe à travers un échangeur de chaleur et communique sa chaleur à un réseau d'eau secondaire. Deux à quatre générateurs de vapeur, raccordés à la cuve du réacteur, transfèrent la chaleur du circuit primaire vers le circuit secondaire. Cette eau secondaire portée à ébullition actionne la turbine à vapeur qui entraîne un alternateur. Le panache de fumée qui s'échappe de la tour centrale provient d'un troisième circuit d'eau tertiaire qui refroidit le condensateur. En cas d'accident, la sécurité est assurée par les trois barrières qui séparent les matières radioactives de l'environnement (la gaine, la cuve et l'enceinte de confinement). L'accident le plus grave survenu à un réacteur de ce type est celui de Three Mile Island en 1979 (voir p. 53).

Dans le cas des réacteurs BWR, la chaleur dégagée par la fission fait bouillir l'eau du circuit primaire qui traverse, de bas en haut, les assemblages de crayons combustibles. À la sortie du cœur, le mélange eau-vapeur

est séparé. Il y a dans ce second type de réacteur une barrière de moins entre la radioactivité du combustible et l'environnement, mais il dispose généralement d'une enceinte de confinement. Ce sont des réacteurs BWR qui étaient en fonctionnement à la centrale japonaise de Fukushima Daiichi.

De leur côté, les Soviétiques ont développé leur propre filière de réacteurs, dits RBMK, à uranium enrichi. Ces réacteurs sont modérés au graphite et refroidis à l'eau. Ils ne comportaient pas d'enceinte de confinement. C'est un réacteur de ce type qui a explosé à Tchernobyl. Les réacteurs RBMK disposaient de systèmes de sécurité qui auraient pu jouer leur rôle, mais à Tchernobyl ils avaient été volontairement désactivés pour procéder à des essais.

Avec l'émergence de nouveaux critères de sécurité et d'efficacité, une nouvelle génération de réacteurs a été développée. Ils sont dits de troisième génération. Plusieurs types de réacteurs sont en concurrence : réacteurs avancés à eau pressurisée EPR (European Pressurised Reactor) du consortium européen Siemens-Areva, l'AP-1000 à eau pressurisée du consortium américano-japonais Westinghouse-Toshiba et réacteurs avancés à eau bouillante ABWR (Advanced Boiling Water Reactor) et ESBWR (Economic Simplified Boiling Water Reactor) de General Electric-Hitachi. Sans compter les nouveaux réacteurs russes et canadiens.

Jusqu'aux événements de Fukushima, l'énergie nucléaire semblait connaître un net regain d'intérêt comme en témoignait le lancement de programmes destinés à développer d'autres types de réacteurs, dits de quatrième génération.

Enfin, signalons le démarrage, en 2010, de la construction à Cadarache (France) d'un prototype de réacteur, baptisé ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), utilisant non plus la fission nucléaire comme actuellement, mais la fusion nucléaire. Ce projet rassemble sept partenaires (Euratom, Chine, Inde, Japon, Corée du Sud, Russie, États-Unis). Il s'agit ni plus ni moins de reproduire l'activité du soleil. Mais si la fusion nucléaire fournit un jour de l'électricité, ce ne devrait pas être avant la fin du siècle.

En ce début de XXI^e siècle, l'exposition moyenne subie par les travailleurs dans le secteur de l'énergie nucléaire a encore diminué. Selon les données du programme d'étude des expositions professionnelles aux rayonnements en Europe (Esorex), portant sur 16 pays européens, la dose moyenne annuelle subie par les travailleurs est passée de 2,23 mSv en 1996 à 1,51 mSv en 2000. Les dépassements de la dose annuelle de 20 mSv étaient de 40 pour 10 000 travailleurs en 1996, et n'étaient plus que de 11 pour 10 000 travailleurs en 2000. Depuis, certains pays font mieux.

Au Royaume-Uni, l'exposition moyenne dans le secteur de l'énergie nucléaire se situait en 2004 à entre 0,3 mSv et 0,6 mSv. Sur 18 969 travailleurs britanniques contrôlés, un seul travailleur, appartenant au secteur de la maintenance, a eu une dose supérieure à 15 mSv. En 2007, en Allemagne, la dose moyenne dans le secteur de l'énergie nucléaire était comprise entre 0,5 mSv et 1 mSv. Cependant, tout n'est pas toujours pour le mieux dans le monde des centrales nucléaires, comme en témoigne la situation des travailleurs de la sous-traitance du nucléaire.

6.3. Maintenance et démantèlement des centrales : un souci récurrent en France

La France est le pays européen qui compte le plus grand nombre de réacteurs nucléaires en activité (58 en 2010). Près de 200 000 emplois directs et indirects sont concernés. Le seul secteur de la filière nucléaire regroupait, en 2008, près de 58 000 travailleurs faisant l'objet d'une surveillance dosimétrique.

6.3.1. "Sous-traitance et servitude"

La maintenance des centrales nucléaires françaises est assurée à 80 % par des personnels d'entreprises dites extérieures par rapport à l'entreprise gestionnaire EDF (Électricité de France). Le tableau des expositions des travailleurs du nucléaire contrôlés montre que l'essentiel de la dose collective subie par le personnel amené à travailler sur les réacteurs nucléaires est supporté par les travailleurs de la sous-traitance.

Tableau 2 Surveillance des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants en France – secteur de l'énergie nucléaire (2009)

| Société | Nombre de salariés | Dose collective homme – sievert/an* | Dose individuelle moyenne mSv/an** |
|-------------------------|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| EDF | 19 647 | 6,70*** | 0,34 |
| Areva | 13 333 | 5,89 | 0,44 |
| Entreprises extérieures | 17 743 | 11,83 | 0,67 |

*La dose collective subie par l'ensemble des travailleurs exposés ou par un groupe de travailleurs est la somme des doses individuelles. Elle est exprimée en homme-sievert par an. Elle indique l'exposition totale subie par un groupe de travailleurs pris dans son ensemble qui peut être comparée à celle d'un autre groupe de travailleurs, et suivie dans le temps.

** La dose moyenne se calcule en divisant la dose collective par le nombre des travailleurs exposés.

*** Cette valeur ne tient compte que de l'exposition aux photons, le résultat de la dosimétrie neutron n'étant pas fourni par le laboratoire de dosimétrie.

Source: Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2010), p. 32

Les doses subies par les personnels des entreprises extérieures sont majoritairement enregistrées lors des arrêts de tranche des centrales nucléaires, c'est-à-dire lorsque les réacteurs nucléaires sont arrêtés pour le remplacement du combustible et les opérations de maintenance et de réparation. Ainsi, les personnes qui interviennent dans les générateurs de vapeur (de deux à quatre par réacteur), pour mettre en place le robot d'inspection qui permet d'ausculter les tubulures internes, reçoivent en général une dose de 4 à 6 mSv pour une exposition d'environ deux minutes. Le débit de dose en cet endroit est voisin de 150 à 200 mSv/h. Il faut également souligner le fait que des entreprises extérieures intervenantes font parfois pression sur leurs salariés afin de ne pas accumuler des doses importantes pour effectuer une opération donnée et prendre le risque de l'exclusion ou de la perte d'un contrat. Ceci conduit certains salariés à ne pas porter leur dosimètre personnel au cours des opérations pénalisantes en dose, voire même à porter celui d'un autre collègue, selon des sources syndicales.

Dans les années 1990, la précarisation du travail, les risques professionnels et de santé courus par les travailleurs de la sous-traitance de l'industrie nucléaire française ont été dénoncés à de nombreuses reprises, notamment par le responsable syndical CGT Michel Lallier et par la sociologue du travail Annie Thébaud-Mony. Dans un ouvrage paru en 2000, celle-ci utilise le terme servitude pour qualifier les conditions de travail des travailleurs sous-traitants du nucléaire (Thébaud-Mony 2000, Lallier 1995).

Dans un ouvrage plus récent, *Travailler peut nuire gravement à votre santé*, la sociologue donne la parole à plusieurs "travailleurs extérieurs" du nucléaire (Thébaud-Mony 2007).

Éric est robinetier saisonnier, il lui arrive d'ouvrir les trappes (trous d'homme) des générateurs de vapeur, un travail qu'il n'aime pas. Il dit : "Tu rentres, tu sors... trois minutes... et tu as déjà pris 1 ou 2 mSv ! Il s'agit du circuit primaire, là où passe l'eau radioactive, ça dépose des particules radioactives sur le métal. Il faut travailler vite. (...) On nous dit que si on respecte les limites, il ne nous arrivera rien ! Mais nous, nous avons travaillé pendant plus de 10 ans bien au-dessus de 20 mSv par an."

Martial est contrôleur, il ausculte les tubes et tuyaux des centrales pour repérer les fissures et les corrosions. Il supporte une double exposition : celle de la centrale si la structure sur laquelle il travaille est radioactive ; celle provenant de son appareil de contrôle qui fonctionne avec une source de cobalt. Il dit : "J'ai travaillé en radiographie sur un chantier de l'aérospatiale, mais en milieu protégé, c'est à dire dans une cabine où on ne reçoit aucune irradiation, sauf en cas de fuite. Les conditions de travail en centrale nucléaire sont complètement différentes des autres secteurs parce qu'on travaille dans des lieux où les protections ne s'installent pas facilement, par manque d'espace : il n'y a pas de cabine."

Antonio a été agent "des servitudes du nucléaire", un ensemble de services réalisé dans l'industrie nucléaire par des prestataires extérieurs, comme la décontamination, et diverses tâches de radioprotection. Il raconte : "Une fois, je travaillais la nuit. Il n'y avait pas d'agents de radioprotection. Mon chef m'a demandé de jeter mon Saphymo (dosimètre) et d'aller prendre le double de la dose. J'ai refusé et j'ai été viré. C'est comme ça !"

En 2008, la journaliste Alexandra Colineau a consacré un article aux "nomades du nucléaire" qui parcourent la France de centrale en centrale pour effectuer les travaux de maintenance dans les zones les plus radioactives et qui se nomment "les esclaves du nucléaire"⁴⁴. Ils sont payés au salaire minimum, mais sont employés par de grands groupes industriels (Vinci, Areva, Suez), dont chacun dispose de plusieurs dizaines de filiales. Les sociétés sous-traitantes, mises en concurrence, sont sous pression. Des travailleurs témoignent qu'un arrêt de tranche, au début des années 1990, durait de deux à trois mois,

44. Plus récemment, un roman leur a même été consacré. Voir : Filhol, E., *La centrale*, P.O.L, Paris, 2010, 140 p.

en 2008 les plus longs dureraient un mois et demi. "Le problème, c'est que les prestataires changent constamment de centrale et de société. Du coup, il y a une énorme confusion sur l'attribution des attestations d'exposition que les entreprises doivent fournir à leurs salariés. On s'aperçoit aujourd'hui que la plupart des gars qui partent à la retraite n'ont pas d'attestation sur la dose toxique qu'ils ont reçue dans leur carrière (...) quand les premiers cancers apparaîtront, ces employés ne pourront pas faire reconnaître leur pathologie en maladie professionnelle", confie le responsable syndical Michel Lallier (Colineau 2008).

Dans une enquête réalisée en juillet 2011, le site d'information Mediapart dénonçait le fait que les travailleurs de la maintenance étaient poussés à entrer dans les bâtiments des réacteurs alors que ceux-ci sont en fonctionnement, parfois à 100 % de leur puissance⁴⁵. Ces interventions feraient courir aux agents des risques d'exposition à un rayonnement de neutrons. Les neutrons produisent des effets biologiques 5 à 20 fois plus importants que les rayons X ou gamma, en fonction de leur énergie. Normalement, ces neutrons sont contenus dans l'enceinte du réacteur, mais il peut arriver que des gaines de combustibles présentent des fuites au niveau du circuit primaire. Ces interventions dans les enceintes de réacteurs en fonctionnement, en principe exceptionnelles, se dérouleraient en fait relativement souvent, au point que des inspecteurs de l'autorité de sûreté nucléaire s'en sont alarmés. L'article de Mediapart soulignait qu'un arrêt de tranche pour permettre aux agents d'y travailler sans trop de risque est très coûteux, plusieurs centaines de milliers d'euros pour quelques heures.

Depuis quelques années les travailleurs du nucléaire ne sont pas seulement inquiets pour leur santé, ils s'interrogent sur la sûreté même des centrales nucléaires. Dans un documentaire diffusé, au printemps 2009, sur la télévision belge francophone RTBF et sur la chaîne franco-allemande Arte, l'un d'entre eux témoigne : "Je me rappelle de mon directeur qui me disait : *maintenant, on va passer d'un risque zéro à un risque calculé. Je pense qu'ils oublient qu'on travaille dans une société nucléaire et que le risque calculé ne peut pas exister*" (de Halleux 2009).

En septembre 2009, c'est au tour de l'*International Herald Tribune* de se faire l'écho des inquiétudes des sous-traitants du nucléaire français sur le raccourcissement dramatique de la durée de maintenance des arrêts de tranche. Yves Marignac, un spécialiste de l'association Wise-Paris, y confirme la parole des travailleurs⁴⁶. Selon lui, la marge de sécurité des centrales nucléaires françaises se réduit du fait de l'ancienneté des réacteurs, des pressions économiques et du départ à la retraite des travailleurs expérimentés. Si un accident lui semble hautement improbable, la probabilité qu'il puisse survenir augmente et cette évolution est en elle-même inquiétante.

6.3.2. Les opérations de démantèlement

Les propriétaires de centrales nucléaires en fin de fonctionnement ont le choix entre trois options : un prompt démantèlement et l'acheminement des matériaux contaminés vers des sites spécialisés (stockage, enfouissement), une sécurisation de l'installation dans l'attente d'une réduction de la radioactivité des matériaux contaminés avant démantèlement ou un coffrage contrôlé des parties radioactives des installations sur le lieu d'exploitation.

45. Pour en savoir plus : <http://www.mediapart.fr/journal/france/240711/edf-banalise-l-exposition-l-atome-de-ses-travailleurs>.

46. Yves Marignac est directeur de Wise-Paris, service mondial d'information sur l'énergie. Wise travaille aussi bien pour des associations environnementales comme Greenpeace que pour des agences gouvernementales. Pour en savoir plus : www.wise-paris.org.

En France, un démantèlement risqué

Le 12 octobre 2009, l'Autorité française de sûreté nucléaire (ASN) a dressé procès-verbal et interrompu les opérations de démantèlement de l'Atelier de technologie du plutonium (ATPu) sur le site du centre d'études nucléaires de Cadarache (sud de la France). Alors que les dépôts de plutonium dans les boîtes à gants de l'installation avaient été estimés à environ 8 kg pendant la période d'exploitation. Les enquêteurs ont estimé à 39 kg les dépôts à récupérer. L'ASN considère que cette absence de détection de la sous-estimation des dépôts de plutonium pendant la période d'exploitation de l'installation, de même que sa déclaration tardive – elle était connue depuis cinq mois par l'entreprise qui en aurait informé oralement les autorités de contrôle – révèlent des lacunes dans la culture de sûreté de l'exploitant. L'ATPu a produit le combustible MOX pour des réacteurs nucléaires pendant 40 ans. Son démantèlement a été autorisé en mars 2009. Selon l'ASN, "la sous-estimation de

la quantité de plutonium a conduit à réduire fortement les marges de sécurité prévues à la conception pour prévenir un accident de criticité* dont les conséquences potentielles pour les travailleurs peuvent être importantes". Une seconde anomalie a été aussi constatée sur le site de l'ATPu. Dix kilos de poudre servant à la fabrication des pastilles de combustible MOX se trouvaient dans une cellule de l'installation, une quantité proche de la limite critique qui se situe à 11 kg. Les consignes de sécurité limitent habituellement la quantité maximale à 4 kg.

En général, avant de s'attaquer au démantèlement d'une installation, il est procédé au retrait de toutes les substances radioactives. Dans le cas de Cadarache, les deux opérations ont été regroupées.

* Le risque de criticité est défini comme le risque de démarrage spontané d'une réaction en chaîne lorsqu'une quantité de matière fissile dépassant une certaine valeur seuil est rassemblée au même endroit, et en présence d'une matière comme l'eau par exemple.

Les travailleurs employés dans les opérations de démantèlement sont exposés à un risque potentiellement plus élevé d'irradiation. Ils sont également exposés à d'autres toxiques comme l'amiante, la silice, le béryllium et autres métaux lourds.

Les données concernant le démantèlement d'installations nucléaires anciennes sont rares. L'Unsclear dispose d'informations concernant la surveillance de 2000 travailleurs occupés dans des opérations de démantèlement de 13 sites nucléaires américains pour la période 1995-2002. L'exposition annuelle moyenne de ces travailleurs a été d'environ 2 mSv. En France, EDF a inscrit neuf réacteurs dans un programme de déconstruction (IRSN 2008). En 2009, le site de Cadarache (sud de la France) a été le théâtre de dysfonctionnements au cours des opérations de démantèlement d'une unité de production de MOX⁴⁷ (voir encadré ci-dessus).

6.4. La renaissance de l'énergie nucléaire et son possible arrêt après Fukushima

Selon l'AIEA, plus de 60 pays, en majorité des pays en développement, étaient en 2009 intéressés à démarrer un programme d'énergie nucléaire et 250 nouvelles centrales nucléaires devaient voir le jour à l'horizon 2030 (AIEA 2009). Jusqu'à l'accident de la centrale de Fukushima, les partisans de l'énergie nucléaire semblaient avoir à nouveau le vent en poupe, en particulier en Europe.

47. Cadarache a été choisi pour accueillir un prototype de réacteur nucléaire de fusion, baptisé Iter. Ce projet rassemble sept partenaires (Euratom, Chine, Inde, Japon, Corée du sud, Russie, États-Unis). À ses côtés, devraient prendre place un nouveau réacteur de fission de haut flux destiné à la recherche.

Pour preuve, le Parlement européen avait approuvé en 2007 un rapport sur les ressources énergétiques dont une des conclusions était que "l'énergie nucléaire est indispensable pour que les besoins énergétiques de base soient rencontrés en Europe à moyen terme" (European Parliament 2007). Malgré des voix discordantes, le renouveau du nucléaire semblait bien en marche. Deux nouveaux réacteurs, dits de troisième génération, de type EPR (European pressurised reactor) sont en construction, l'un à Olkiluoto (Finlande), l'autre à Flamanville (France). Au Royaume-Uni, il était prévu que la nouvelle génération de réacteurs commence à être opérationnelle à partir de 2018.

La Suède avait décidé en 2009 un changement de cap radical en mettant un terme à son moratoire sur le nucléaire. La construction de nouveaux réacteurs était donc à nouveau autorisée à condition qu'ils soient construits sur des sites déjà exploités et qu'ils remplacent des réacteurs en fin de vie. L'Italie avait également mis fin à son refus du nucléaire. La France et l'Italie avaient signé en 2009 un accord de coopération sur l'énergie nucléaire prévoyant la construction par la France de quatre centrales nucléaires sur le territoire italien. Début 2011, la Pologne avait décidé de se doter de l'énergie nucléaire. La première centrale polonaise devrait être opérationnelle vers 2022. En février 2011, le Parlement espagnol avait repoussé la limite de vie de ses centrales au-delà de 40 ans. Au même moment, la France et la Belgique se préparaient également à prolonger la vie de leurs centrales actuelles au-delà de 40 ans. La chambre basse du Parlement allemand avait de son côté approuvé en octobre 2010 le projet d'extension de la durée de vie de ses 12 centrales nucléaires présenté par le gouvernement d'Angela Merkel.

Tout cela, c'était évidemment avant Fukushima. Le gouvernement allemand est le premier à avoir réagi vigoureusement à la tragédie japonaise. Le 15 mars 2011, deux jours à peine après l'annonce des problèmes à la centrale de Fukushima, la chancelière Angela Merkel déclare d'abord un moratoire de trois mois, puis l'arrêt des réacteurs ayant plus de 30 années d'activité. Enfin, le 30 mai 2011, le gouvernement allemand décide l'arrêt de la filière de l'énergie nucléaire à l'horizon 2020.

Dans un référendum organisé les 12 et 13 juin 2011, les Italiens se sont prononcés à 94 % contre le retour du nucléaire dans leur pays. Il semble qu'aucune région italienne ne soit disposée à accueillir une centrale nucléaire, d'autant plus que les risques sismiques sont en Italie plus réels que dans le reste de l'Europe.

En septembre 2011, le Parlement suisse a approuvé la sortie progressive du nucléaire. Les 5 réacteurs suisses seront découplés du réseau sur une période qui s'étalera de 2019 à 2034. En octobre 2011, l'accord pour la formation d'un gouvernement en Belgique a prévu l'arrêt des trois plus vieux réacteurs pour 2015 et l'abandon du nucléaire pour 2025.

Au niveau européen, les chefs d'État des pays membres ont décidé le 25 mars 2011 de soumettre les 143 réacteurs nucléaires présents sur son territoire à des tests de résistance pour évaluer leur sécurité (stress tests). Après d'âpres discussions sur la portée de ces tests, celle-ci a été définie à la fin du mois de mai. Seules les conséquences de tremblements de terre, d'inondations ou de variations climatiques importantes seront examinées à l'échelon européen. Les scénarios impliquant le crash d'un avion, une attaque terroriste ou de mauvaises manipulations humaines, souhaités par la Commission européenne, n'ont pas été retenus devant l'opposition de certains pays. En novembre 2011, la Commission a annoncé que le bilan des tests de résistance des centrales nucléaires était prévu pour 2012, mais un renforcement de la politique de sûreté était d'ores et déjà envisagé.

Aux États-Unis, l'autorité de sûreté nucléaire, la NRC, a demandé aux exploitants des 104 réacteurs américains de revoir leur plan de gestion des accidents, en attendant une vérification par les inspecteurs de la NRC.

Y aura-t-il un avant et un après-Fukushima ? Au moment de mettre sous presse (février 2012), il est trop tôt pour répondre à cette question. Une chose est sûre, malgré la crainte du nucléaire ravivée par les événements du Japon parmi la population, il y a fort à parier que l'industrie du nucléaire, son puissant lobby et les gouvernements les plus favorables à cette technologie, au premier rang desquels figure la France, ne vont pas abandonner la partie. Beaucoup d'argent a déjà été investi et les enjeux politiques, économiques, sociaux et environnementaux sont colossaux. D'autant plus qu'il s'agit pour l'industrie européenne de défendre son savoir-faire sur un marché de plus en plus concurrentiel. La construction des nouvelles centrales se réalise de plus en plus dans le cadre d'appels d'offres internationaux et la bataille est rude. Les firmes privées, soutenues dans certains cas par des États, évoluent dans un marché très concurrentiel. L'industrie européenne, française en particulier, est mise à rude épreuve. D'autant que la demande pour des réacteurs de plus petite puissance que l'EPR, moins coûteux et moins longs à construire, se développe. Aux États-Unis, l'industrie de la production des réacteurs nucléaires s'oriente vers le développement de réacteurs de dimension plus réduite réclamant moins d'investissements. La Russie s'est engagée de son côté dans la réalisation de réacteurs flottants de très petite dimension destinés à alimenter en électricité des régions éloignées comme celle de l'Arctique.

Certains analystes des questions énergétiques sont cependant convaincus que l'énergie nucléaire est vouée à un lent déclin qui a déjà démarré bien avant Fukushima (Schneider 2011). Dans l'Union européenne, selon un rapport de l'industrie nucléaire transmis à la Commission européenne en février 2011, pour maintenir à l'horizon 2050 la part de l'énergie nucléaire à son niveau actuel, soit 30 % de la production d'électricité, le secteur espère déployer 160 à 170 gigawatts (GW) (Foratom 2011a). Un niveau nettement supérieur à la production d'énergie d'origine nucléaire en 2011, 134 GW, qui nécessiterait de construire cinq nouveaux réacteurs par an. Même si la volonté politique et populaire soutenait cet objectif, ce qui est loin d'être acquis, même en France, les retards et les coûts supplémentaires des réacteurs actuellement en construction le compromettraient grandement. Sans même tenir compte de la part grandissante que les énergies alternatives devraient prendre à l'avenir.

Cependant, à la fin de l'année 2011, l'émotion suscitée par l'accident de Fukushima était retombée. Selon Foratom, le lobby de l'industrie nucléaire européenne, 13 pays de l'Union européenne continuaient à considérer que l'énergie d'origine nucléaire ferait partie intégrante de leur approvisionnement en énergie, et que des centrales nucléaires seraient encore en activité sur leur territoire à l'horizon 2050. Les Polonais, qui avaient un moment envisagé de reconsidérer la question de la construction de nouvelles centrales, de même que les Finlandais et les Britanniques, auraient depuis confirmé leurs choix antérieurs (Foratom 2011b).

Le 9 février 2012, près d'un an après Fukushima, la Commission américaine de régulation du nucléaire (USNRC) a autorisé la construction de deux nouveaux réacteurs sur le site de la centrale de Vogtle (en Géorgie). La dernière autorisation remontait à 1978.

Si Fukushima, dont les conséquences humaines et environnementales sont encore mal connues au moment d'écrire ces lignes, ne devait représenter qu'un temps d'arrêt dans l'histoire du développement du nucléaire civil, les citoyens seraient en droit de réclamer de la transparence dans un domaine particulièrement opaque et d'interpeller les gouvernants sur de nombreuses inconnues. Parmi une longue liste de points d'interrogation, le débat devrait porter prioritairement sur les risques sanitaires que fait courir l'allongement de la durée de vie des installations nucléaires existantes, le nombre croissant d'êtres humains et de territoires soumis au risque d'un accident nucléaire, les inquiétudes sur le développement de réacteurs à bas prix offrant une moindre sécurité, les luttes pour l'approvisionnement en uranium, le problème des déchets laissés en héritage aux

générations futures. Sans oublier, le montant de la facture payée sous forme de maladies par les personnels employés à la maintenance des centrales nucléaires en activité et au démantèlement des réacteurs en fin de vie.

Ce qu'il faut retenir

Une vaste étude épidémiologique de l'OMS portant sur plus de 400 000 travailleurs du nucléaire a montré un excès de mortalité par rapport à la population générale, même à de faibles doses, confirmant ainsi l'hypothèse de la relation linéaire sans seuil. Même si l'exposition moyenne aux rayonnements ionisants subie par les travailleurs de ce secteur tend à diminuer, cette tendance n'est rassurante qu'en apparence. En effet, les relevés dosimétriques ne reflètent pas nécessairement l'exposition réelle de tous les travailleurs, en particulier parmi les travailleurs de sociétés extérieures intervenant dans les centrales pour des opérations de maintenance. Le secteur de l'énergie nucléaire reste un secteur à très haut risque, comme l'a prouvé l'accident survenu à la centrale de Fukushima le 11 mars 2011. Son expansion, qui semblait prometteuse au début 2011, sera-t-elle réellement remise en cause, malgré les décisions de plusieurs pays nucléarisés de mettre à l'arrêt leurs réacteurs au cours de la prochaine décennie ?

Conclusion

Pour les travailleurs de nombreux secteurs, l'exposition aux rayonnements ionisants de faible dose sur les lieux de travail présente une plus grande complexité, pose une série d'incertitudes quant à leurs effets sur la santé et suscite des autorités compétentes des réponses pour le moins ambiguës. Dans ce contexte, le mouvement syndical européen se doit, plus que jamais, de rappeler la prééminence d'une approche de protection collective et individuelle basée sur le principe de précaution.

L'exposition aux rayonnements ionisants s'est banalisée avec l'essor des industries utilisant des matériaux radioactifs naturels, les succès de l'aviation, du cycle du combustible nucléaire et le recours accru à des sources radioactives dans le secteur du génie civil et surtout dans le secteur médical. Dans ce dernier secteur, la digitalisation de l'imagerie médicale et sa commercialisation ont entraîné l'augmentation des doses pour les travailleurs et les patients, et même des risques d'expositions accidentelles pour ces derniers.

Les connaissances scientifiques actuelles montrent la diversité des réactions physiologiques des personnes exposées aux rayonnements ionisants. L'évolution des connaissances en biologie moléculaire devrait permettre à l'avenir de clarifier leurs effets sur la santé. Une amélioration des connaissances des mécanismes biologiques entraînera probablement une remise en cause du concept abstrait de la dose comme unique indicateur du risque, fondement actuel de la législation communautaire en matière de radioprotection.

Une meilleure connaissance des risques posés par les faibles doses de rayonnements ionisants ne saurait toutefois remettre en question le principe de précaution et la prééminence des mesures de prévention collectives.

Dans le contexte pour le moins tendu du débat autour de l'avenir du secteur de l'énergie nucléaire, certains milieux traditionnellement favorables à l'énergie atomique mènent une campagne sur la scène internationale afin de

minimiser les effets sur la santé humaine des expositions aux faibles doses de rayonnements ionisants.

Après Fukushima, et compte tenu des enjeux colossaux pour les secteurs de l'électricité et des assurances médicales, ce courant pourrait tenter d'instiller dans l'esprit des populations une espèce d'acceptation des situations accidentelles majeures.

Au moment de boucler la présente publication (février 2012), la législation européenne en matière de radioprotection était toujours en cours de révision. Une proposition de directive de la Commission venait d'être présentée à différentes parties prenantes, dont le Comité économique et social européen où les syndicats siègent. Pour le mouvement syndical européen, il est essentiel que les normes de base restent fondées sur le principe ALARA ("As Low as Reasonably Achievable"), selon lequel toutes les expositions doivent être maintenues au niveau le plus faible raisonnablement possible compte tenu de facteurs économiques et sociaux. Dans cette perspective, il est nécessaire de renforcer les concepts sous-jacents au principe ALARA, à savoir la "justification" des pratiques, avec responsabilisation accrue des différents acteurs impliqués, et l'"optimisation" de la protection.

La dosimétrie des travailleurs pour le corps entier et pour certaines parties du corps (extrémités, cristallin) requiert un meilleur suivi qui tienne compte de l'internationalisation croissante du marché du travail et de la multiplication de la sous-traitance dans le secteur de l'énergie nucléaire.

L'accident de Fukushima a montré le besoin pour le mouvement syndical international de porter une attention particulière aux normes de protection en situation de crise et d'urgence. Celles-ci doivent être clarifiées, notamment en définissant les rôles des services de prévention, en améliorant la surveillance médicale et en étendant leur champ d'application afin de couvrir les travailleurs temporaires ou externes.

C'est dans l'industrie de l'énergie nucléaire que la dose des travailleurs externes, disposant souvent d'un statut précaire, domine la distribution des doses. Il est donc indispensable d'enfin mettre en place non seulement un système d'enregistrement dosimétrique au niveau européen, mais aussi une meilleure protection de ces travailleurs vulnérables. Des limites plus strictes et des contraintes de dose élaborées devraient être envisagées.

L'optimisation de la protection basée sur le principe ALARA devrait être étendue à tous les secteurs et renforcée en pratique. Cela s'avère particulièrement urgent dans le secteur médical où, avec l'essor de la médecine nucléaire, les sources de rayonnements ionisants se sont multipliées ces dernières années. Le nombre croissant de travailleurs exposés dans certaines industries, considérées jusque dans un passé proche comme non nucléaires, requiert d'étendre la protection à des secteurs tels que les mines, l'industrie des phosphates et des produits réfractaires, l'aéronautique, etc.

Une bonne optimisation nécessite une formation adéquate et une information actualisée sur les risques. L'expérience a montré qu'une culture de sécurité doit être intégrée précocement dans l'organisation du travail.

En ce qui concerne l'environnement du travail, des mesures de prévention efficaces doivent être prises afin d'éviter la dispersion de la radioactivité. Un enregistrement des contaminations devrait accompagner le suivi des doses et être pris en compte dans les études épidémiologiques. La responsabilité de l'employeur et des assurances privées et publiques en cas d'accident et de maladies professionnelles

devrait reconnaître le risque stochastique (effets possibles à long terme sur la santé, notamment le risque de cancer).

À l'occasion de l'accident de Fukushima, la Commission européenne a à nouveau montré sa faible présence en matière de sûreté nucléaire, notamment lors du débat sur les "stress-tests" dominé par les intérêts particuliers des États membres. Les syndicats européens espèrent que la révision du traité Euratom permettra d'élargir ses compétences aussi bien en radioprotection qu'en matière de déchets nucléaires et de portique de sûreté, entre autres, et garantir la gestion des risques combinés (métaux lourds, substances chimiques, UV, etc.).

Il est également nécessaire d'assurer une meilleure intégration de la réglementation nucléaire dans la prévention des risques liés au travail qui est couverte par la directive-cadre de 1989 sur la santé et la sécurité au travail. Cela nécessitera une intégration du traité Euratom dans le fonctionnement du cadre législatif européen et la reconnaissance du rôle des partenaires sociaux.

Aujourd'hui, l'initiative et la responsabilité de la mise en œuvre sont laissées sans beaucoup de transparence aux organes de collaboration multilatérale et aux autorités compétentes des 27 pays membres. Il faudrait que l'Union européenne crée une autorité d'envergure intégrant les services compétents.

Bibliographie

- Agence fédérale de contrôle nucléaire (AFCN) (2009) *Rapport annuel 2008*.
- Agence fédérale de contrôle nucléaire (AFCN) (2010) *Paratonnerres radioactifs : l'AFCN clôture la 1ère phase de la campagne d'élimination*, Communiqué de presse.
- Agence France Presse (AFP) (2010) *Paratonnerres radioactifs : risques non négligeables selon la Criirad*, dépêche du 16 mars 2010.
- Arfsten DP *et al.* (2001) "A review of the effects of uranium and depleted uranium exposure on reproduction and foetal development", *Toxicology and Industrial Health*, 17(5-10), 180-191.
- Assemblée générale des Nations unies (2000) *Rapport du Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants*, 55e session.
- Assemblée nationale et sénat de la République française (2001) *Les incidences environnementales et sanitaires des essais nucléaires effectués par la France entre 1960 et 1996. Eléments de comparaison avec les essais des autres puissances nucléaires*, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.
- Autorité de sûreté nucléaire (ASN) (2008) *Incident de radioprotection à la société Mafelec (Isère). L'ASN reclassé l'événement au niveau 2 sur l'échelle INES*, Communiqué de presse.
- Avenir de la filière française du nucléaire civil, synthèse du rapport de François Roussely (président honoraire d'EDF) au président de la République française*, 16 juin 2010.
- Bagshaw, M. (2008) "Cosmic radiation in commercial aviation", *Travel Medicine and Infectious Disease*, 6(3), 125-127.
- Banza CLN *et al.* (2009) "High human exposure to cobalt and other metals in Katanga, a mining area of the Democratic Republic of Congo", *Environmental Research*, 109(6), 745-752.
- BEIR VII report (2006) *Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation : BEIR VII - phase 2*, Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, National Research Council of the National Academies, Washington: The National Academies Press.
- Boice DJ and JH Lubin (1997) "Occupational and environmental radiation and cancer", *Cancer Causes and Control*, 8, 309-322.
- Boice JD and CE Land (1980) "Ionizing Radiation", in *The causes of cancer*.
- Bolton JPG and CRM Foster (2002) "Battelfield use of depleted uranium and the health of veterans", *Trauma*, 4, 1-10.
- Boselli, M. (2009) "Workers contend nuclear safety is sliding", *International Herald Tribune*, 1 September 2009.
- Boyle RH and JH Highland (1979) *Malignant Neglect*, New-York:Environmental Defense Fund-Knopf.
- Busby C. (ed) (2003) *ECRR 2003 Recommendations of the European Committee on Radiation Risk: Health Effects of Exposure to Ionizing Radiation at Low Doses for Radiation Protection Purposes*, Green Audit Books.
- Busby, C. (ed.) (2004) *Recommandations 2003 du Comité Européen sur de Risque de l'Irradiation, étude des effets sanitaires de l'exposition aux faibles doses de radiation ionisante à des fins de radioprotection*, publié au nom du Comité européen sur le risque de l'irradiation (CERI), éditions Frison-Roche.
- Cardis E. *et al.* (1995) "Combined analyses of cancer mortality among nuclear industry workers in Canada, the United Kingdom and the United States of America", IARC technical Report n° 25.
- Cardis E., Vrijheid M. *et al.* (2005) "Risk of cancer low doses of ionising radiation-retrospective cohort study in 15 countries", *British Medical Journal*, 331, 77-80.
- Cardis E., Vrijheid M. *et al.* (2007) "Mortality from diseases other than cancer following low doses of ionizing radiation: results from the 15-country study of nuclear industry workers", *International Journal of Epidemiology*, 36 (5), 1126-1135.

- Cardis E. et Hatch M. (2011) "The chernobyl accident – An epidemiological perspective" *Clinical Oncology*, 23, 251-260.
- Carpenter L. *et al.* (1994) "Combined analysis of mortality in three United Kingdom nuclear industry work forces, 1946-1988", *Radiation Research*, 138, 224-228.
- Centre d'études sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire (CEPN) (2006) *Retour d'expérience sur les incidents radiologiques. Le système RELIR*, rapport n° 297.
- Chang WP. *et al.* (1997) "60Co contamination in recycled steel resulting in elevated civilian radiation doses: causes and challenges", *Health Physics*, 73(3), 465-472.
- Chodick G. *et al.* (2008) "Risk of cataract after exposure to low doses of ionizing radiation: a 20-year prospective cohort study among US radiologic technologists", *American Journal of Epidemiology*, 168(6), 620-31.
- Clark, C. (1997) *Radium girls, women and industrial health reform 1910-1935*, University of North Carolina Press.
- Colineau, A. (2008) *Les nomades du nucléaire*, Association des journalistes de l'information sociale.
- Commission de recherche et d'information indépendantes sur la radioactivité (CRIIRAD) (2005) *Impact de l'exploitation de l'uranium par les filiales COGEMA-AREVA au Niger*.
- Commission européenne (2002) *Vers une approche communautaire de la sûreté nucléaire dans l'UE*, IP/02/1616, Bruxelles, le 6 novembre 2002.
- Commission européenne (2003) "Recommandation 2003/670/CE de la Commission du 19 septembre 2003 concernant la liste européenne des maladies professionnelles", *Journal officiel des Communautés européennes*, 238, 28-34.
- Commission européenne (2009) *Emerging evidence for radiation induced circulatory diseases*, Proceedings of a scientific seminar held in Luxembourg on 25 November 2008, Working Party on Research Implications on Health and Safety Standards of the Article 31 Group of Experts, Radiation Protection n°158.
- Commission européenne (2011) *Situation concerning uranium mine and mill tailings in the European Union*, Commission staff working paper SEC(2011) 340 final.
- Commission européenne (2011) *Proposition de Directive du Conseil fixant les normes de base relatives à la protection contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants*, 29 septembre 2011 COM (2011) 593 final.
- Commission internationale de protection radiologique (CIPR) (1955) "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", *British Journal of Radiology*, 6.
- Commission internationale de protection radiologique (CIPR) (1959) *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, Oxford : Pergamon Press ; Publication CIPR 1.
- Commission internationale de protection radiologique (CIPR) (1977) *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, Oxford : Pergamon Press ; Publication CIPR 26.
- Commission internationale de protection radiologique (CIPR) (2007) *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection* ; Publication CIPR 103.
- Croft JR, P. Crouail and JS Wheatley (2002) *Review of the development of incidents databases and feedback mechanism: IRID, RELIR, EURAIDE and RADEV*.
- Degleva *et al.* (2012) Reevaluation of waterborne releases of radioactive materials from the Mayak Production Association in the Techa river in 1949-1951, *Health Physics*, 102(1), 25-38.
- de Halleux A. (2009) *RAS, nucléaire : rien à signaler*, coproduction Arte France / RTBF, diffusé le 2 mai 2009 sur la RTBF et le 12 mai 2009 sur Arte.
- de Vathaire F *et al.* (2010), "Thyroid cancer following nuclear tests in French Polynesia", *British Journal of Cancer*, 103, 1115-1121.
- Dodic-Fikfak M. *et al.* (1999) "The health risks of decommissioning nuclear facilities", *New Solutions*, 9(2), 153-161.
- Eggermont G. et JC Zerbib (1982) "Nouvelles normes de base pour la radioprotection", *Annales de l'Association belge de Radioprotection*, vol 7, n°2, p. 79-101.

- Eggermont G. *et al.* (2006) "Les effets sur la santé de faibles doses de radiations ionisantes", *Newsletter du BTS*, Institut syndical européen pour la recherche, la formation et la santé-sécurité, 29, 22-27.
- Eggermont G. and B. Feltz (2008) *Ethics and Radiological Protection*, Louvain-la-Neuve: Academia-Bruylant.
- Eggermont G. and J. Hugé (2011) *Nuclear Energy Governance*, deliverable 4.1, SEPIA project, Research Programme Science for a Sustainable Development, Brussels: Belgian Science Policy 102 p.
- EUROGIP (2010) *Cancers d'origine professionnelle: quelle reconnaissance en Europe?*, Rapport d'enquête.
- European Atomic Energy Community (Euratom) (2007) *Article 31 Rules of Procedure approved by the Group of Experts at the meeting 13-14 November 2007*, Annex I – Code of Ethics, 18 p.
- European Commission (2008) Emerging evidence for radiation induced circulatory diseases, Radio Protection no. 158, Working Party on Research Implications on Health and safety Standards of the Article 31 Group of experts.
- European Commission (2010) Evaluation of the operational implementation of the outside workers directive, Radiation Protection n°166, DG Energy, Report prepared by the Centre d'étude sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire.
- European Parliament (2007) Resolution of 24 October 2007 on Conventional energy sources and energy technology (2007/2091(INI)).
- European Radiation Dosimetry Group (EURADOS) (2004), Radiation Protection 140, Eurados WG 5 to the Group of experts established under article 31 of the Euratom treaty.
- European Trade Union Institute (ETUI) (2006) "France : la situation des sous-traitants du nucléaire reste préoccupante", *HESA Newsletter*, 29, 29-30.
- Foratom (2011a) *Energy 2050 roadmap. Contribution of Nuclear Energy*, February 2011.
- Foratom (2011b) *Energy 2050 roadmap. Contribution of Nuclear Energy. Post Fukushima update*, October 2011.
- Frasch G. and K. Petrová (2007) "Dose trends in occupational radiation exposure in Europe results from the ESOREX project", *Radiation Protection Dosimetry*, 125(1-4), 121-126.
- Fukuda K. *et al.* (1998) "Chronic multisymptom illness affecting Air Force veterans of the Gulf War", *Journal of the American Medical Association*, 280(11), 981-988.
- Gardner, MJ. *et al.* (1990) "Results of case-control study of leukaemia and lymphoma among young people in Sellafield nuclear plant in West Cumbria", *British Medical Journal*, 300, 423-429.
- Gauron C., N. Guillemet et J-P Servent (2009) *Les rayonnements ionisants. Paysage institutionnel et réglementation applicable*, Institut national de recherche et sécurité (INRS).
- Gennaro V. and L. Tomatis (2005) "Business bias: How epidemiologic studies may underestimate or fail to detect increased risks of cancer and other diseases", *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 11 (4), 356-359.
- Godard O. et J. Lochard (2005) *L'histoire de la radioprotection, un antécédent du principe de précaution*, Paris: Laboratoire d'économétrie de l'école polytechnique, 15 p.
- Godard O. (2006) "Le principe de précaution", *Projet*, Centre de recherche et d'action sociales, 293.
- Gonzalvez A J, (1994) "Sûreté radiologique : les nouvelles normes internationales", *AIEA Bulletin*, 2/1994.
- Guillemette, A. (2011) *Retraitement des combustibles usés : mythe et réalité*, notes de lectures, (non publié).
- Hazle, A. (1987) "Colorado, the legacy of uranium mining", *Environment*, 1987, 29 (1).
- Heads of European Radiation Control Authorities (HERCA) (2010) *Outside Workers & Dose Passbook. Report on the progress to draft a European Radiation Passbook for Outside Workers to meet the requirements of Council Directive 90/641 Euratom*.
- Hindin R. *et al.* (2005), "Teratogenicity of depleted uranium aerosols: a review from an epidemiological perspective", *Environmental Health*, 4, 17-36.
- Hoel, GH (1995) "Ionizing radiation and cancer prevention", *Environmental Health Perspectives*, 103 (8), 241-243.
- Hoffmann W. *et al.* (2007), "Childhood leukemia in the vicinity of the Geesthacht Nuclear Establishments near Hamburg", *Environmental Health Perspectives*, 115 (6), 947-952.

- Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2006), *Synthèse par l'IRSN des rapports de l'UNSC-CEAR (période 2003-2007)*.
- Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2009) *Recommandations 2007 de la Commission internationale de protection radiologique, ICRP*, éditions TEC et DOC.
- Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) (2010) *La radioprotection des travailleurs. Exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France : bilan 2009*, 108 p.
- Institut national de recherche et de sécurité (INRS) (1992) "Exposition aux rayonnements ionisants et radioprotection", *Documents pour le médecin du travail*, 51, 304-393.
- Institut national de recherche et de sécurité (INRS) (2007) "Optimisation de la radioprotection dans les domaines électronucléaire, industriel et médical", *Documents pour le médecin du travail*, 109, 67-71.
- International Agency for Research on Cancer (IARC) (2000) "Ionizing radiation, part 1: X-and Gamma – radiation, and neutrons", IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to human, 75.
- Janssens A. "Progress with the revision of the Euratom Basic Safety Standards and consolidation with other community legislation", *Association belge de Radioprotection*, 35 (3), 171-182.
- Journal officiel de la République française (JORF) (2010) Loi n° 2010-2 du 5 janvier 2010 relative à la reconnaissance et à l'indemnisation des victimes des essais nucléaires français.
- Journal officiel des Communautés européennes (JOCE) (1992) Directive européenne 92/85/CEE du Conseil du 19 octobre 1992 concernant la mise en oeuvre de mesures visant à promouvoir l'amélioration de la sécurité et de la santé des travailleuses enceintes, accouchées ou allaitantes au travail.
- Journal officiel des Communautés européennes (JOCE) (1996) Directive 96/29/Euratom du Conseil du 13 mai 1996 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants.
- Journal officiel de l'Union européenne (2010) Version consolidée du traité instituant la Communauté européenne de l'énergie atomique 30.3.2010 C 84/1- C 84/112.
- Journal of the American Medical Association (JAMA) (1997) "Self-reported illness and health status among Gulf War veterans. A population-based study", *JAMA*, 277(3), 238-45.
- Lallier, M. (1995) *Sous-traitance, le cas du nucléaire. Etude réalisée au Centre nucléaire de Chinon*, éditions CGT-CNPE.
- Lambert, B. (2001) "Radiation: early warnings ; late effects", in *Late lessons from early warnings: the precautionary principle 1896-2000*, European Environmental Agency: Luxembourg, p. 31-36.
- Lauwerys, R. (2003) *Toxicologie industrielle et intoxications professionnelles*, 4ème édition, éd. Masson.
- Lazo, E. (2009) *Les systèmes internationaux de protection radiologique : Principales structures et défis actuels*, European NAvigator (ENA).
- Lips-Dumas, F. (2009) "7.000 Hiroshima", *Revue XXI*, 7.
- Lynge, E. (1996) "Risk of breast cancer is also increased among Danish female airline cabin attendants", *British Medical Journal*, 316(7025), 253.
- Mann, CC (1994) "Radiation : balancing the record", *Science*, n°263, 470-473.
- Mancuso, M. *et al.* (2008) "Oncogenic bystander radiation effects in patched heterozygous mouse cerebellum", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(34), 12445-12450.
- Mengeot, MA, T. Musu et L. Vogel *Les cancers professionnels, une plaie sociale trop souvent ignorée*, Bruxelles: Institut syndical européen pour la recherche, la formation et la santé au travail (ETUI-REHS).
- Mengeot MA et L. Vogel (2008) *Produire reproduire, quand le travail menace les générations futures*, Bruxelles: Institut syndical européen pour la recherche, la formation et la santé-sécurité.
- Metz-Flamant C. *et al.* (2009) "Low doses of ionizing radiation and risk of cardiovascular disease: a review of epidemiological studies", *Revue d'Epidémiologie et de Santé Publique*, 57(5), 347-59.
- Metzger, A-G (2009) "Mafelec : reprise réussie pour l'expert en boutons", *Le journal des entreprises*.

- Mohan AK. *et al.* (2002) "Breast cancer mortality among female radiologic technologists in the United States", *Journal of the National Cancer Institute*, 94, 943-948.
- Mol, H., A Wambersie and G Eggermont (1999) "Dosimetry of workers in radiology", *Journal belge de radiologie*, 82(3), 104-106.
- Molitor, M. (2011) *Tchernobyl. Déni passé, menace future?*, Bruxelles: éd. Racine-RTBF, 275.
- Mossman, KL (1995) "The human radiation experiments: the real issues", *Health Physics*, 68(6), 757-760.
- Mulloy KB *et al.* (2001) "Lung cancer in a non smoking underground uranium miner", *Environmental Health Perspectives*, 109, 305-330.
- Nay S. et M-A Mengeot (1992) *Produire Reproduire*, Reportage diffusée par la radio-télévision belge francophone RTBF le 3 décembre 1992.
- Nénot, JC. et P. Gourmelon (2007) *Les accidents dus aux rayonnements ionisants, le bilan d'un demi-siècle*, Rapport IRSN.
- Palm, M. (2001) "Le nouveau décret allemand relatif à la radioprotection", *Bulletin de droit nucléaire*, 68, 41-49.
- Pellegrino, C. (2010) *The Last Train from Hiroshima: The Survivors Look Back*, New-York: Henry Holt and Co.
- Pukkala E. *et al.* (1995) "Incidence of cancer among Finnish airline cabin attendants, 1967-1992", *British Medical Journal*, 311, 649-652.
- Raaschou-Nielsen O. *et al.* (2008) "Domestic radon and childhood cancer in Denmark", *Epidemiology*, 19 (4), 536-543.
- Radiation Effects Research Foundation (RERF), *Life Span Study (LSS) Report Series*, consultables sur <http://www.rerf.or.jp>
- Rafnsson V. *et al.* (2001) "Risk of breast cancer in female flight attendants: a population-based study (Iceland)", *Cancer Causes and Control*, 12, 95-101.
- Rafnsson V. *et al.* (2005) "Cosmic radiation increases the risk of nuclear cataract in airline pilots, a population-based case control study", *Archives of Ophthalmology*, 123, 1102-1105.
- Rajaraman P. *et al.* (2011) "Early life exposure to diagnostic radiation and ultrasound scans and risk of childhood cancer : case-control study", *British Medical Journal*, 342.
- Report GoE meeting (2010), European Commission-DG Energy, *Radiation induced cataracts and basic safety standards : evolutions since the EU scientific seminar 2006*, Annex 2, November 2009-January 2010.
- Revue Prescrire (La) (2005) "L'irradiation des aliments. Première partie : une technique de conservation débattue", *La Revue Prescrire*, 25(261), 382-387.
- Revue Prescrire (La) (2007) "Les risques liés à l'exposition domestique au radon", *La Revue Prescrire*, 281, 224-228.
- Ritz, B. (1999) "Radiation exposure and cancer mortality in uranium processing workers", *Epidemiology*, 10, 531-538.
- Ritz B., *et al.* (2000) "The effects of internal radiations exposure on cancer mortality in nuclear workers at Rocketdyne/Atomics International", *Environmental Health Perspectives*, 108(8), 743-751.
- Samei E. and KJ Kearfott (1995) "A limited bibliography of the federal government-funded human radiation experiments", *Health Physics*, 69(6), 885-891.
- Sapir, M. (2006) "Radiations ionisantes : quels enjeux pour la santé des travailleurs? ", *Hesa Newsletter*, 29, 20-21.
- Schneider M, Froggatt A, Thomas S (2011) *Nuclear Power in a post-Fukushima World. 25 Years After the Chernobyl Accident*, World Nuclear Industry Status Report 2010-2011, Washington : Worldwatch Institute.
- Scientific Committee on Health and Environmental Risks (SCHER) (2010) European Commission-DG Health & Consumer Protection, *Preliminary opinion on the environmental and health risks posed by depleted uranium*.

- Sermage-Faure C *et al.* (2012) "Childhood leukemia around french nuclear power plants - the Geocap study, 2002-2007", *International Journal of Cancer*. Téléchargeable gratuitement sur : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ijc.27425/pdf>
- Servent J-P *et al.* (2005) *Les rayonnements ionisants, prévention et maîtrise du risque*, Institut national de recherche et de sécurité (INRS).
- Shields Warren, MD (1956) "Longevity and causes of death from irradiation in physicians", *JAMA*, 162(5), 464-468.
- Smans, K. (2009) *The development of dose optimisation strategies for X-ray examinations of newborns*, Leuven : Katholieke Universiteit Leuven.
- Smeesters, P. (2009) "Revision process of the BSS and the directives of the European union. Going beyond ICRP 103 ?", *Annales de l'Association belge de radioprotection*, 34 (4), 225-248.
- Spiegel (Der), (1994) "Gewaltiges Knattern", 25 April.1994.
- Spira, A. et O. Boutou (1999) „Rayonnements ionisants et santé : mesure des expositions à la radioactivité et surveillance des effets sur la santé“, Rapport aux ministres de l'environnement et de la santé, La Documentation française.
- Spix C. *et al.* (2008) *Epidemiological study and childhood cancer in the vicinity of nuclear power stations (KIKK)*, German childhood cancer registry.
- Telle-Lamberton, M. (2008) "Données épidémiologiques sur le cancer du sein radio-induit", *Revue d'épidémiologie et de santé Publique*, 56, 235-243.
- Teugels, M. (2003) *Armes sales, guerre propre?*, Bruxelles : éditions Labor.
- Thébaud-Mony, A. (2000), *L'industrie nucléaire : sous-traitance et servitude*, EDK/Inserm, coll. Questions en santé publique.
- Thébaud-Mony, A. (2007) *Travailler peut nuire gravement à votre santé. Sous-traitance des risques, mise en danger d'autrui, atteintes à la dignité, violences physiques et morales, cancers professionnels*, Paris : La Découverte, coll. Cahiers libres, 2007.
- Touati M. (2010) "Les cobayes de l'armée coloniale", *Courrier international*, 17 février 2010.
- Tomasek L. *et al.* (1993) "Radon exposure and cancers other than lung cancer among uranium miners in West Bohemia", *The Lancet*, 341, 919-923.
- Travis LB *et al.* (2005) "Second cancers among 40 576 testicular cancer patient: focus on long term survivors", *Journal of the National Cancer Institute*, 97 (18), 1354-1365.
- Tubiana M. et A. Aurengo (2005) *La relation dose-effet et l'estimation des effets cancérogènes des faibles doses de rayonnements ionisants*, Paris: Académie nationale de médecine.
- Tward JD *et al.* (2006) "The risk of secondary malignancies over 30 years after treatment of Non- Hodgkin lymphoma", *Cancer*, 107(1), 108-115.
- Union des exploitations électriques de Belgique, *Tchernobyl, bilan et enseignements*, 1987.
- United Nations General Assembly (2008) "Effects of the use of armaments and ammunitions containing depleted uranium", document A/63/170.
- United Nations Scientific Commission of the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) (2000) *Report, Sources and effects of ionizing radiation*, vol. I, Sources, vol. II, Effects.
- United Nations Scientific Commission of the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) (2006) *Report, Sources and effects of ionizing radiation*, Vol. I, Sources, Vol. II, Effects.
- United Nations Scientific Commission of the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) (2008) *Report, Sources and effects of ionizing radiation*, vol. I Sources.
- United States Nuclear Regulatory Commission (USNRC) (2007) "Occupational radiation exposure at commercial nuclear power reactors and other facilities", Fortieth annual report NUREG-0713.
- United States Nuclear Regulatory Commission (USNRC) (2009) *Backgrounder on the Three Mile island accident*. <http://www.nrc.gov>
- United States Nuclear Regulatory Commission (USNRC) (2010) *A short history of nuclear regulation, 1946-1999*. <http://www.nrc.gov>

- Unwin C. *et al.* (1999) "Health of UK servicemen who served in Persian Gulf war", *Lancet*, 353, 169-178.
- US Equal Employment Opportunity Commission (EEOC) (2009) *Race, LLC / Studsvik to Pay \$650,000 to Settle EEOC Racial Harassment & Retaliation Suit*.
- Vacquier B. *et al.* (2008) "Mortality risk in the French cohort of uranium miners: extended follow-up 1946-1999", *Occupational and Environmental Medicine*, 65, 597-604.
- Vanmarcke H. *et al.* (2010) *Ionizing radiation exposure of the Belgian population in 2006* Proceedings of Third European IRPA Congress 2010 June 14-16, Helsinki.
- Viel, JF. (1998) *La santé publique atomisée*, éditions La Découverte.
- Vilanova, G. (2007) *Le complexe nucléaire de Mayak et le désastre radiologique de l'Oural : Histoire d'une catastrophe occultée*, mémoire d'histoire, Université Paris I.
- Wakeford, R. (2007) "The windscale reactor accident-50 years on", *Journal of Radiological Protection*, 27, 211-215.
- Walker S. *et al.* (1999) *IRID: Ionising Radiations Incident Database. First Review of cases reported and operation of the database*, NRPB/HSE/EA: Chilton.
- Wartenberg, D. et CP Stapleton (1998) "Risk of breast cancer is also increased among retired US female airline cabin attendants", *British Medical Journal*, 316(7148), 1902.
- White, R. (2008) "Depleted uranium, state crime and the politics of knowing?", *Theoretical Criminology*, 12(1), 31-54.
- Woodward, A. *et al.* (1991) "Radon daughter exposures at the Radium Hill uranium mine and lung cancer among former workers, 1952-1987", *Cancer Causes and Control*, 2, 213-220.
- Yablokov, A. *et al.* (2009) "Chernobyl, consequences of the catastrophe for people and the environment", Boston: Blackwell.
- Yardlev, J. (2010) "Radiation scare hits India's scrap metal dealers", *International Herald Tribune*, 26 April 2010.
- Yong LC *et al.* (2009) "Increased frequency of chromosome translocations in airline pilots with long-term flying experience", *Occupational Environmental Medicine*, 66, 56-62.
- Zeeb H. *et al.* (2003) "Mortality from cancer and other causes among airline cabin attendants in Europe: a collaborative cohort study in eight countries", *American Journal of Epidemiology*, 158, 35-46.
- Zerbib, JC. (1979) *Les recommandations de la CIPR et les travailleurs*, Proc. Application of the dose limitation system for radiation protection, IAEA: Vienna, S-SR-36/39, 387-423.
- Zerbib, JC. (1993) "Forbach : Une certaine logique industrielle?", *Revue Préventive*, 6, août-septembre 1993.
- Zerbib, JC. (1994) "Accident d'irradiation survenu en août 1991 auprès d'un accélérateur d'électrons de 2,3 MV implanté dans l'installation industrielle de la société EBS à Forbach", *La Gazette nucléaire*, 133-134.
- Zerbib, JC. (1997) "La nouvelle directive concernant les rayonnements ionisants assure-t-elle une meilleure protection des travailleurs et de la population? ", *Newsletter du BTS*, 6, 16-18.
- Zerbib, JC. (1997) *Les accidents radiologiques : les retours d'expérience*, Commissariat à l'énergie atomique.
- Zerbib JC, (2002) *Les affections professionnelles provoquées par les rayonnements ionisants*, CFDT Energie.

Sur Internet

Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA),

www.iaea.org

Centre d'étude sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire (CEPN),

<http://www.cepn.asso.fr>

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, Unité Protection sanitaire contre les rayonnements ionisants et toxiques nucléaires (Prositon),

www.prositon.cea.fr

Commission de recherche et d'information indépendante sur la radioactivité (CRII-RAD),

www.crii-rad.org

Communauté européenne de l'énergie atomique (Euratom),

www.euratom.org

Database of Radiological Incidents and Related Events,

www.johnstonsarchive.net/nuclear/radevents/index.html

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung,

www.dguv.de

European Nuclear Society,

www.euronuclear.org

Health and Safety Executive (HSE),

www.hse.uk

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN),

www.irsn.org

Institut national de recherche et de sécurité (INRS),

www.inrs.fr

International Commission on Radiological Protection (ICRP),

www.icrp.org

National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP),

www.ncrponline.org

Radiation Effects Research Foundation,

www.ref.or.jp

Radiation Exposure Compensation Program,

www.usdoj.gov/civil/torts/const/reca/about.htm

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR),

www.unscear.org

United States Nuclear Regulatory Commission (NRC), "A short history of nuclear regulation, 1946-1999",

www.nrc.gov

Annexes

Les maladies professionnelles reconnues en France, au Royaume-Uni et en Allemagne

France

En France, en 2010, le Tableau n° 6 des maladies professionnelles comprend les maladies suivantes :

- anémie, leucopénie, thrombopénie ou syndrome hémorragique consécutifs à une irradiation aiguë ;
- anémie, leucopénie, thrombopénie ou syndrome hémorragique consécutifs à une irradiation chronique ;
- blépharite ou conjonctivite ;
- kératite ;
- cataracte ;
- radiodermites aiguës et chroniques ;
- radio-épithélites aiguës des muqueuses ;
- radiolésions chroniques des muqueuses ;
- radionécrose osseuse ;
- leucémies ;
- cancer broncho-pulmonaire primitif *par inhalation* ;
- sarcome osseux.

Royaume-Uni

Au Royaume-Uni, la rubrique A1 de la liste des maladies professionnelles indemnisables couvre les pathologies cancéreuses dues aux rayonnements ionisants suivantes: leucémies (autres que leucémies lymphatiques chroniques), cancers des os, cancers du sein chez la femme, cancers des testicules et cancers de la thyroïde.

Les secteurs de travail concernés sont ceux où l'exposition aux rayonnements ionisants pourrait entraîner un doublement du risque de développer ces pathologies. La législation britannique sur les maladies professionnelles ne prend pas en compte les cataractes et les dermatites radioinduites. La philosophie sous-jacente serait que le niveau d'irradiation nécessaire pour provoquer ces pathologies serait si élevé qu'il constituerait "un accident de travail" dont les conséquences seraient couvertes par la législation sur les accidents de travail.

À la question du nombre de pathologies dues aux rayonnements ionisants indemnisées au Royaume-Uni, le ministère du travail anglais a répondu dans un mail à la CES: "Les seules plaintes dans cette catégorie concerneraient des leucémies, des cancers des os, du sein, des testicules et de la thyroïde dans des secteurs d'exposition élevée aux rayonnements électromagnétique ou aux particules radioactives. Le nombre de ces plaintes est trop petit pour être statistiquement significatif et n'est pas publié" (DWP Press Office).

Au Royaume-Uni, une partie importante des indemnisations pour maladies professionnelles sont obtenues à travers des recours devant les tribunaux.

Allemagne

Maladies professionnelles dues aux rayonnements ionisants indemnisées en Allemagne

| | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|
| Foie sans précision | 4 | 0 | 3 | 7 |
| Tumeur maligne du larynx | 5 | 2 | 1 | 8 |
| Lobe supérieur, bronches ou poumon | 45 | 27 | 30 | 102 |
| Lobe moyen, bronches ou poumon | 5 | 2 | 2 | 9 |
| Lobe inférieur, bronches ou poumon | 29 | 14 | 17 | 60 |
| Bronches ou poumon sans précision | 74 | 64 | 56 | 194 |
| Tumeurs malignes de la peau (autres que mélanome) | 2 | 4 | 1 | 7 |
| Tumeur de la thyroïde | 8 | 2 | 0 | 10 |
| Leucémie lymphoïde | 0 | 0 | 2 | 2 |
| Leucémie myéloïde | 1 | 1 | 1 | 3 |
| Autres maladies du sang et des organes hématopoïétiques | 1 | 3 | 1 | 5 |
| Cataractes précisées | 1 | 0 | 1 | 2 |
| Affections pulmonaires aiguës dues à une irradiation | 10 | 9 | 6 | 25 |
| Radiodermites | 1 | 2 | 0 | 3 |
| Autre/Indéterminé | 0 | 2 | 3 | 5 |
| Totaux | 186 | 132 | 124 | 442 |

Traduction tirée du site officiel de codification des maladies au niveau mondial. Voir: www.icd10.ch

Source: DGUV Referat BK-Statistik/ZIGUV D-53757 Sankt Augustin; erstellt am 22 Oct 09

Listes des maladies des vétérans indemnisées en France et aux États-Unis à la suite des essais nucléaires

France

Pour les victimes des essais nucléaires français, militaires ou civils, la liste des maladies radio-induites susceptibles d'être reconnues et indemnisées (à certaines conditions de périodes et de résidence) a été publiée le 13 juin 2010.

Cette liste comporte :

- leucémies (sauf leucémie lymphoïde chronique);
- cancer du sein (chez la femme);
- cancer du corps thyroïde pour une exposition pendant la période de croissance;
- cancer cutané sauf mélanome malin;
- cancer du poumon;
- cancer du côlon;
- cancer des glandes salivaires;
- cancer de l'œsophage;
- cancer de l'estomac;
- cancer du foie;
- cancer de la vessie;
- cancer de l'ovaire;
- cancer du cerveau et système nerveux central;
- cancer des os et du tissu conjonctif;
- cancer de l'utérus;
- cancer de l'intestin grêle;
- cancer du rectum;
- cancer du rein.

Source: Décret n° 2010_653 du 11 juin 2010 pris en application de la loi relative à la reconnaissance et à l'indemnisation des victimes des essais nucléaires français, Journal officiel de la République française du 13 juin 2010, texte 10 sur 42.

États-Unis

Le Radiation-Exposed Veterans Compensation Act de 1988 concerne les militaires, appelés vétérans, ayant été exposés aux radiations ionisantes alors qu'ils étaient en service. Les vétérans peuvent bénéficier d'une allocation d'invalidité mensuelle, modulée en fonction du handicap, s'ils sont atteints d'une des pathologies de la liste des maladies présumées liées à une exposition aux rayonnements ionisants durant leur service. Cette liste comprend, outre les pathologies de la liste française, les cancers du système urinaires autre que les cancers du rein, les lymphomes non hodgkinien et le myélome multiple. Les cancers de la thyroïde et du sein ne sont assortis d'aucune condition de sexe ou d'âge. D'autres pathologies, non reprises sur la liste, mais potentiellement liées à une exposition aux rayonnements ionisants, peuvent aussi être indemnisées à certaines conditions de niveau d'exposition et de période de latence de l'affection.

Le Radiation Exposure Compensation Act de 1990 (RECA) concerne les travailleurs employés, pendant la période des essais, dans les mines d'uranium, les installations de transformation du minerai et son transport, ainsi que les personnes présentes sur les sites des essais ou dans les zones touchées par les retombées des essais atmosphériques effectués au Nevada. Le RECA octroie une indemnité forfaitaire (de 50 000 \$ à 100 000 \$) pour une liste de pathologies qui varient selon la catégorie de personnes concernées. Pour les

mineurs, seuls sont pris en compte le cancer du poumon et certaines pathologies pulmonaires non malignes. Pour les employés des installations de transformation du minerai et les transporteurs s'y ajoutent les cancers du rein et plusieurs pathologies rénales. Pour les personnes exposées sur site ou dans les zones de retombées des essais, la liste est comparable à la liste française, mais ne comporte pas de restriction ni pour le cancer du sein ni pour le cancer de la thyroïde. Au 13 février 2011, 23 557 personnes avaient été indemnisées au titre du RECA, dont près de 15 000 présentes dans les zones géographiques contaminées.

Sources : www.publichealth.va.gov et www.va.gov

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Préambule | 05 |
| Chapitre 1 Fascination, destruction, régulation | 07 |
| 1.1. De la découverte des rayons X à Hiroshima | 07 |
| 1.2. Les essais nucléaires et la création des organismes de régulation | 11 |
| 1.3. Le développement de l'énergie nucléaire et sa contestation | 15 |
| 1.4. La CIPR, gardienne du temple nucléaire, forcée d'évoluer | 17 |
| 1.4.1. Le concept de la relation dose-effet linéaire sans seuil | 17 |
| 1.4.2. Le principe ALARA | 18 |
| 1.4.3. Les principes de justification et d'optimisation | 18 |
| Chapitre 2 Les radionucléides et leurs rayonnements | 21 |
| 2.1. Les rayonnements ionisants et la mesure de leurs effets | 21 |
| 2.2. Les effets biologiques et sanitaires | 24 |
| 2.2.1. Les expositions | 24 |
| 2.2.2. Les effets des rayonnements ionisants | 27 |
| 2.3. Nouvelles inquiétudes: les effets non ciblés et à retardement | 33 |
| 2.3.1. L'instabilité génomique | 33 |
| 2.3.2. Les effets de proximité et les effets abscopaux | 33 |
| 2.4. La controverse sur les effets des faibles doses | 34 |
| 2.4.1. Les faibles doses, un risque confirmé | 35 |
| 2.4.2. La CIPR confirme l'hypothèse de la relation dose-effet linéaire sans seuil | 36 |
| 2.5. Les limites d'exposition de la CIPR critiquées | 37 |
| Chapitre 3 La protection des travailleurs dans la législation européenne | 41 |
| 3.1. Le traité Euratom et les normes de base de la radioprotection | 42 |
| 3.2. Le contexte international de l'élaboration des normes européennes | 43 |
| 3.3. Les directives européennes en vigueur en 2012 | 44 |
| 3.3.1. La directive Normes de base de 1996 | 44 |
| 3.3.2. La directive Travailleurs extérieurs | 47 |
| 3.4. Vers une nouvelle directive définissant les normes de base | 48 |
| 3.4.1. Champ d'application de la proposition de nouvelle directive | 49 |
| 3.4.2. La protection des travailleurs dans la proposition de nouvelle directive | 49 |
| 3.4.3. Limites de la proposition de directive | 50 |
| Chapitre 4 La maîtrise des rayonnements ionisants: un chemin semé d'accidents et de maladies | 53 |
| 4.1. L'alerte de Three Mile Island et le traumatisme de Tchernobyl | 53 |
| 4.2. Le dénombrement approximatif des accidents nucléaires | 56 |
| 4.2.1. Tirer les leçons des événements nucléaires et radiologiques | 57 |
| 4.3. L'exposition planifiée | 60 |
| 4.4. Les maladies professionnelles | 62 |

| | | |
|----------------------|---|------------|
| Chapitre 5 | Les secteurs les plus concernés (hors énergie nucléaire) | 65 |
| 5.1. | Le secteur de la santé | 65 |
| 5.1.1. | La radiologie interventionnelle | 66 |
| 5.1.2. | La médecine nucléaire | 68 |
| 5.1.3. | L'exposition médicale des patients | 69 |
| 5.2. | Le secteur industriel non nucléaire | 70 |
| 5.2.1. | L'irradiation industrielle | 70 |
| 5.2.2. | La radiographie industrielle | 71 |
| 5.2.3. | Le recyclage des métaux, un secteur sensible | 72 |
| 5.3. | Le transport aérien | 74 |
| 5.3.1. | Exposition moyenne plus élevée que dans d'autres secteurs | 74 |
| 5.3.2. | Effets sur la santé en cours d'évaluation | 75 |
| 5.4. | Le secteur militaire | 76 |
| 5.4.1. | La santé des personnels impliqués dans les essais nucléaires | 76 |
| 5.4.2. | Le syndrome de la guerre du Golfe | 77 |
| 5.4.3. | L'utilisation d'armes à uranium appauvri | 77 |
| 5.4.4. | Secrets et dénis | 79 |
| Chapitre 6 | Les risques de l'énergie nucléaire, de la mine aux centrales | 83 |
| 6.1. | L'extraction du minerai d'uranium | 84 |
| 6.2. | La filière nucléaire | 86 |
| 6.2.1. | Vie et survie du combustible nucléaire | 86 |
| 6.2.2. | Les risques pour les travailleurs de la filière nucléaire | 88 |
| 6.3. | Maintenance et démantèlement des centrales: un souci récurrent en France | 90 |
| 6.3.1. | "Sous-traitance et servitude" | 90 |
| 6.3.2. | Les opérations de démantèlement | 92 |
| 6.4. | La renaissance de l'énergie nucléaire et son possible arrêt après Fukushima | 93 |
| Conclusion | | 97 |
| Bibliographie | | 101 |
| Annexes | | 109 |
| Annexe 1 | Les maladies professionnelles reconnues en France, au Royaume-Uni et en Allemagne | 109 |
| Annexe 2 | Listes des maladies des vétérans indemnisées en France et aux États-Unis à la suite des essais nucléaires | 111 |

