

Chez le même éditeur

Dans la même collection

TDM des tumeurs abdominales, Éric Delabrousse, Séverine Valmary-Degano, Sébastien Aubry, Emmanuel Dietsch, Nicolas Badet, 2013, 360 pages.

Traitement de l'image, de la numérisation à l'archivage et la communication, Olivier Hélénon, Joël Chabriaux, Bernard Gibaud, Denis Mariano-Goulart, 2013, 224 pages.

Scanner et rayons X, Denis Régent, Albert Lisbona, François Masson, Alain NOEL, 2013, 200 pages.

Radiologie de l'appareil locomoteur, 3ème édition, Michel Runge, 2011, 424 pages.

Dans la collection Imagerie médicale - Diagnostic

Imagerie post thérapeutique en oncologie, Société Française de Radiologie, Société Française de Médecine Nucléaire (SFMN), Société Française de Radiothérapie Oncologique, Centre Antoine Bécère, Alain Luciani, Frédéric Courbon, Fabrice Denis, Yoann Pointreau, 2013, 332 pages.

Imagerie du sein, Joseph Stinès, 2012, 352 pages.

Comprendre l'IRM, 7ème édition, Manuel d'auto-apprentissage avec compléments en ligne, Bruno Kastler, Daniel Vetter, 2011, 408 pages.

Imagerie cardiaque : scanner et IRM, 2ème édition, Olivier Vignaux, 2011, 344 pages.

Dans la collection Imagerie médicale - Pratique

IRM pratique en neuroradiologie, 2ème édition, Françoise Héran, François Lafitte, 2013, 496 pages.

IRM pratique, 2ème édition Lionel Arrivé, 2012, 448 pages.

Dans la collection Imagerie médicale - Précis

Imagerie thoracique de l'adulte et de l'enfant, 2ème édition avec compléments en ligne, Bernard Padovani, Liliane Metge, Catherine Meunier, Pietro Scillia, Arnaud Resten, Sophie Maitre, Denis Tack, Antoine Khalil, Christiane Baunin, Catherine Beigelman, Michel W. Brauner, Marie-France Carette, Marie-Pierre Debray, Hubert Ducou Le Pointe, Chantal Durand, Gérard Durand, Mostafa El Hajjam, Pierre Fajadet, Gilbert Ferretti, Pierre Alain Gevenois, Benoît Ghaye, Jacques Giron, Maxime Hackx, Daniel Jeanbourquin, Pascal Lacombe, Alexis Lacout, Afarine Madani, 2013, 1056 pages.

Imagerie musculosquelettique : pathologies générales, 2ème édition, Anne Cotton, 2013, 1064 pages.

Neuro imagerie diagnostique, 2ème édition, Jean-Louis Dietemann, 2012, 844 pages.

Autres ouvrages

Guide des positions et incidences en radiologie ostéoarticulaire, Michaël Sobczyk, 2013, 368 pages.

Positions et incidences en radiologie conventionnelle, Guide pratique, Kenneth Bontrager, John P. Lampignano, Michel Bléry, 2012, 332 pages.

Imagerie médicale pour le clinicien, Lionel Arrivé, Anne Miquel, Laurence Monnier-Cholley, Laurence Rocher, Ahmed Chaouki Tourabi, 2012, 432 pages.

Guide des techniques de soins en imagerie médicale, Elisabeth Moerschel, 2012, 128 pages.

Atlas d'anatomie générale et radiologique, Jean-Philippe Dillenseger, 2011, 304 pages.

Guide des technologies de l'imagerie médicale et de la radiothérapie, Quand la théorie éclaire la pratique, Jean-Philippe Dillenseger, Elisabeth Moerschel, 2009, 416 pages.

Sous la direction de Michel Bléry

Radioprotection en milieu médical

Principes et mise en pratique

Yves-Sébastien Cordoliani

Professeur agrégé du Val-de-Grâce,
ancien chef de service de radiologie
et imagerie médicale de l'hôpital d'instruction des armées du Val-de-Grâce.

Hervé Foehrenbach

Professeur agrégé du Val-de-Grâce,
ancien chef du service de médecine nucléaire
de l'hôpital d'instruction des armées du Val-de-Grâce.

3^e édition



**ELSEVIER
MASSON**



Ce logo a pour objet d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, tout particulièrement dans le domaine universitaire, le développement massif du « photo-copillage ». Cette pratique qui s'est généralisée, notamment dans les établissements d'enseignement, provoque une baisse brutale des achats de livres, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que la reproduction et la vente sans autorisation, ainsi que le recel, sont passibles de poursuites. Les demandes d'autorisation de photocopier doivent être adressées à l'éditeur ou au Centre français d'exploitation du droit de copie : 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris. Tél. 01 44 07 47 70.

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays.

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle).

© 2014, Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

ISBN : 9782294739828

ISBN numérique : 9782294740473

Elsevier Masson SAS, 62, rue Camille-Desmoulins, 92442 Issy-les-Moulineaux cedex
www.elsevier-masson.fr

Avant-propos

La radioprotection, longtemps présumée science infuse des professionnels utilisant les rayonnements ionisants (RI), est désormais une obligation légale de formation et de pratique.

Tous les professionnels mettant en œuvre les rayonnements ionisants à des fins de diagnostic sont soumis à cette obligation de formation, initiale et continue, qu'ils soient médecin, chirurgien-dentiste, manipulateur ou physicien médical. L'attestation de formation doit être renouvelée tous les 10 ans pour ces professionnels.

Cet ouvrage traite de tous les sujets constituant les « objectifs communs » de cette formation pour l'ensemble des professionnels concernés.

Parmi la masse de données physiques, biologiques, techniques et réglementaires qui concernent la radioprotection, il s'est efforcé d'extraire le « nécessaire et suffisant » qui doit rendre simple et naturelle la pratique de la radioprotection en milieu médical.

Fondements de la radioprotection

Historique

Les rayonnements ionisants (RI) font partie intégrante de l'univers et la vie est apparue et s'est développée dans un rayonnement ambiant beaucoup plus intense qu'actuellement. La découverte de ces rayonnements ne date que d'un siècle et leur usage incontrôlé révéla rapidement leur danger potentiel. La nécessité d'une protection se fit donc jour, amenant à la création d'organismes nationaux, puis d'un comité international de radioprotection, qui allait devenir, en 1928, la Commission internationale de protection radiologique (CIPR). Concernant initialement les travailleurs exposés aux RI, la radioprotection devait leur garantir que le risque encouru du fait de cette exposition resterait acceptable en regard des autres risques professionnels et des risques acceptés par chaque individu dans la vie courante. Progressivement, et notamment avec l'utilisation de l'énergie nucléaire, exposant aux RI non plus seulement des travailleurs ou des malades mais également le public, le champ d'action de la radioprotection s'est étendu à l'ensemble de la population, amenant à une portée plus générale du concept de radioprotection exprimée ainsi par la CIPR : assurer un niveau de protection adéquat pour l'homme, sans pénaliser indûment les pratiques bénéfiques qui exposent aux rayonnements ionisants.

Les mesures de protection ne doivent donc pas être disproportionnées par rapport au risque et limiter inutilement les activités bénéfiques pour l'individu ou la société. Une limitation excessive pourrait en effet avoir un effet opposé à l'effet recherché, en empêchant de recourir à des techniques utiles ou en en rendant le coût prohibitif.

Les risques liés à l'exposition aux RI sont de deux ordres : un risque aléatoire, ou stochastique et un risque direct, déterministe. On considère que le risque aléatoire peut survenir après toute exposition, même s'il n'est démontré que pour les fortes doses. Une fois apparu, sa gravité est indépendante de la dose. La probabilité d'apparition d'un effet néfaste, pour l'individu ou pour sa descendance (détriment) est fonction de la dose, selon une relation linéaire. Le risque direct (déterministe) est dû à l'effet physique des RI ; il apparaît toujours au-delà d'une certaine dose et sa gravité augmente avec la dose reçue. Dans le domaine de la radiologie, seule la radiologie interventionnelle expose le patient à des doses suffisantes pour créer un risque déterministe. Le risque à prendre en compte en diagnostic, pour les patients (faibles doses) et pour le personnel (très faibles doses) est donc essentiellement le risque aléatoire. Initialement la radioprotection ne

prenait en compte que l'exposition des travailleurs, dont la protection reposait essentiellement sur l'instauration de limites d'exposition. Ces limites ont toujours évolué dans le sens de la sécurité comme le montre la genèse de la dose maximale admissible.

Dose maximale admissible

La dose maximale admissible (DMA) est, à l'origine, « la dose de rayonnements ionisants qui ne doit causer aucune lésion corporelle appréciable chez une personne exposée, à aucun moment de sa vie ». L'équivalent de dose annuel est utilisé comme norme pour le contrôle d'exposition des professions exposées. Cette dose est souvent présentée ou interprétée comme la frontière d'un danger, avec une connotation dramatique : « on a frôlé la dose maximale admissible !... ». En fait cette dose, très largement calculée et réajustée au fil des années dans un sens toujours plus restrictif, correspond à une exposition très en deçà de toute significativité biologique et il faut rappeler le cheminement de sa détermination (fig. 1).

Les applications thérapeutiques des rayons X suivirent de peu leur découverte ; or il n'existait pas de moyens de dosimétrie et celle-ci reposait sur la constatation des effets cutanés, en se référant au « coup de soleil » qu'on observait à partir d'une certaine dose délivrée en une fois : c'était la « dose-érythème ». Les irradiations thérapeutiques étaient fondées sur cette dose, déterminée pour chaque installation. On sait aujourd'hui que la dose nécessaire pour l'obtention de cet effet est de 5 à 6 sieverts (donc 5 à 6 grays pour les rayons X). Les observations de l'époque avaient montré, chez les opérateurs de ces installations, qu'une telle dose, délivrée par petites fractions en un an, ne provoquait aucun effet observable parmi ce personnel. À partir de

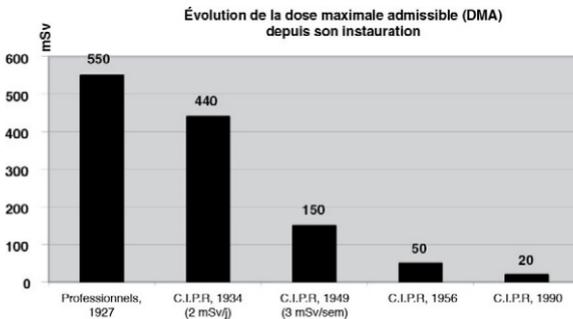


Figure 1

La DMA, limite de dose annuelle des travailleurs, a été initialement déterminée en divisant par 10 la dose érythème (5,5 Sv) pour éviter l'apparition d'effets déterministes (cutanés) chez les travailleurs.

Elle a été ensuite abaissée à 2 mSv par jour, puis 3 mSv par semaine, soit 150 mSv par an, limite à partir de laquelle les études rétrospectives ont montré la disparition des effets leucémogènes et cancérogènes chez les professionnels. Les abaissements ultérieurs résultent de calculs d'extrapolation de l'effet des fortes doses et de considérations sociétales.

cette dose pour laquelle il n'y avait donc pas d'effet observable, on détermina, en 1927, une limite acceptable d'exposition professionnelle que l'on fixa, pour avoir une bonne marge de sécurité, à un dixième de cette dose « inefficace ». La première « DMA » était née ; elle correspondait donc à un équivalent de dose de 0,5 à 0,6 Sv (500 à 600 mSv) par an (elle se mesurait à l'époque en roentgen (R) et correspondait à 55 R). Lors de la mise en place de la CIPR, une des premières mesures fut de fixer une limite journalière d'exposition correspondant à cette dose annuelle, rapportée au nombre de jours de travail de ces personnels. On obtenait ainsi un chiffre correspondant à 2,5 mSv par jour qui, toujours dans le même souci « d'arrondir vers la sécurité » fut ramené à 2 mSv par jour. La dose inefficace de départ était donc ainsi divisée par un facteur 12, dans un louable souci de prudence mais sans raison objective.

Cette limite fut maintenue jusqu'en 1949. À cette date, en prévision du développement de l'énergie nucléaire, il fut décidé, dans un légitime souci de prudence, mais toujours sans argument objectif, médical ou biologique, de diminuer encore cette dose, pour la porter à 3 mSv par semaine (soit 0,6 mSv par jour ou 150 mSv par an). Il faut noter que toutes les études épidémiologiques qui ont étudié rétrospectivement la survenue de leucémie et cancers parmi les professionnels exposés ont montré la disparition de l'excès d'incidence de ces affections cancéreuses à partir des années 1940. Cela légitimait *a posteriori* la réduction de dose préconisée par le CIPR et suggère un seuil de risque cancérogène des expositions chroniques entre 3 mSv et 10 mSv par semaine. Puis vint la drosophile. Cette mouche du fruit était l'animal de choix des observations génétiques et on expérimenta sur elle l'effet des radiations ionisantes, en utilisant des doses moyennes et fortes. À ces doses, on mit en évidence des modifications du génome et il fut décidé, à partir d'une extrapolation à l'homme pour de faibles doses, d'abaisser encore la DMA à 50 mSv par an. En fait, on s'aperçut ultérieurement que la drosophile avait une grande fréquence de mutations spontanées et était extraordinairement sensible à tous les agents physiques susceptibles d'induire des mutations génétiques. Toutes les expériences effectuées par la suite sur des mammifères conclurent à l'absence d'effets génétiques observables à ces doses. Malgré l'infirmité du raisonnement qui l'avait motivée, cette diminution fut conservée, en vertu d'un principe de précaution anticipé. La dose de sécurité initiale n'en était plus qu'au centième de sa valeur. C'est cette dose qui a été la DMA pour les personnels exposés jusqu'en 2003. Elle correspondait donc à un plafond annuel d'exposition correspondant à 1 % de la dose érythème de départ pour laquelle on n'observait pas d'effet si elle était étalée sur un an. Il fut décidé en outre, de fixer pour le public un équivalent de dose maximale admissible qui serait le dixième de celui des professions exposées, soit 5 mSv par an (un peu plus de deux fois celle résultant de l'exposition naturelle annuelle en France).

Les dernières directives européennes (1996 et 1997), fondées sur les calculs d'extrapolation de la CIPR à partir des données d'Hiroshima et Nagasaki, ont encore réduit la DMA à 100 mSv sur 5 ans pour les travailleurs, soit l'équivalent de 20 mSv par an, sans pouvoir dépasser 50 mSv par an, et à 1 mSv

par an pour le public. Pour ce dernier, la DMA est donc la moitié de la dose délivrée par le rayonnement naturel en France. On comprend donc, en rappelant cette genèse, que la dose maximale admissible n'a rien d'une limite de péril mais qu'elle a résulté de l'application itérative d'un principe de précaution avant la lettre. Cette application a eu le mérite, lorsque la limite a été respectée, de faire disparaître chez les professionnels d'abord les effets déterministes, puis les effets stochastiques en dessous de 150 mSv annuels. On peut cependant s'interroger sur le rapport coût/bénéfice des réductions en dessous de cette limite, décidées à partir de calculs théoriques d'extrapolation et de considérations sociétales.

Relation linéaire sans seuil

La relation linéaire sans seuil (RLSS) est le modèle de calcul de risque encouru par les personnes exposées. Il repose sur la relation observée entre la survenue de cancer chez les personnes exposées lors des explosions atomiques sur le Japon et la dose reçue.

Cette étude des survivants d'Hiroshima et de Nagasaki, connue sous le nom de « *Life span study* », a porté sur 93 741 personnes, étroitement suivies depuis 1950. Cette étude a recensé, jusqu'en 2014, 853 cas de décès par cancers imputables à l'irradiation subie lors des bombardements. Il faut garder à l'esprit que la probabilité pour tout individu de mourir d'un cancer est de l'ordre de 25 %. Ces 853 décès par cancers représentent donc l'excès observé, en sachant que devaient survenir naturellement environ 16 600 décès par cancers dans cet effectif, soit 17 448 décès vs. 16 600 attendus, ce qui signifie que seuls un peu moins de 1 % des sujets exposés ont développé un cancer mortel dû aux radiations. Un facteur important à noter est que la dose reçue par ces sujets a été délivrée dans un temps très bref (fort débit de dose). À partir de ces données épidémiologiques solides (grands effectifs, surveillance rigoureuse) a été mise en évidence une relation indiscutable entre la dose reçue et la survenue de cancers avec une relation sensiblement linéaire entre la dose reçue et la probabilité d'apparition de ceux-ci, mais uniquement pour des doses élevées : il n'y a pas eu d'augmentation du taux de cancers chez les personnes ayant reçu des doses inférieures à 0,1 Sv. C'est pourquoi la courbe de relation dose-effet n'a pas de partie initiale (fig. 2).

La relation est sensiblement linéaire au-dessus de 100 mSv. Pour pouvoir supputer un effet aux faibles doses, il faut reconstruire la partie initiale de la courbe par prolongation vers l'origine. Le modèle linéaire donne la certitude de ne pas sous-estimer l'effet cancérigène. C'est celui qui est adopté, dans un souci de sécurité.

Il existe donc un seuil pratique en dessous duquel il n'y a pas d'effet observable. Néanmoins, l'effet potentiel des faibles doses de rayonnements ionisants (doses inférieures à 100 mSv) a été calculé à partir de ces données, en extrapolant la partie linéaire de la courbe vers l'origine. Un autre facteur de surestimation lors de l'extrapolation aux faibles doses est que ces faibles doses sont généralement reçues de façon fractionnée et à faible débit de dose. Or un autre fait solidement établi de la radiobiologie

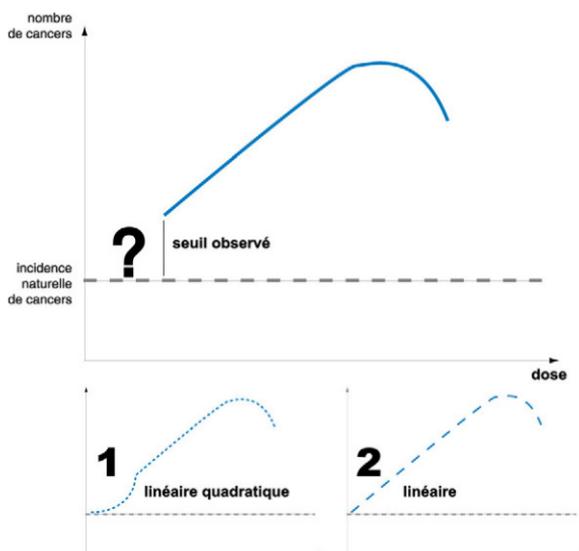


Figure 2

Courbe dose-effet pour la cancérogenèse.

Chez les sujets irradiés à forte dose et fort débit de dose, on met en évidence un excès de cancers par rapport à l'incidence naturelle. Cette augmentation est sensiblement linéaire, au-dessus d'un seuil de 100 mSv, en dessous duquel il n'a pu être mis en évidence d'effet. Afin de pouvoir utiliser cette courbe en radioprotection pour les faibles doses, il faut reconstruire la partie initiale de la courbe par prolongation vers l'origine. La forme de cette partie initiale est probablement de type linéaire quadratique (1) pour un grand nombre de cancers, dont les leucémies. Dans un souci de sécurité, pour être certain de ne pas sous-estimer le risque, on utilise une relation linéaire (2). Ce modèle dit « linéaire sans seuil » (LNT des Anglo-Saxons pour « linear non threshold »), n'indique pas une probabilité de risque, mais une limite supérieure de risque, le risque réel étant compris entre 0 et la courbe reconstruite.

est le moindre effet d'une dose de rayonnement lorsqu'elle est administrée en plusieurs fois ou à faible débit. Le facteur de réduction du risque pour une dose de rayonnement ionisant administrée en plusieurs fois ou à faible débit de dose est compris entre 2 et 10. Par souci de sécurité le facteur de réduction retenu pour les calculs est le plus faible. Ce principe d'extrapolation de la partie linéaire de la courbe en deçà du seuil pratique, surestime donc le risque, mais l'adoption de ce modèle, délibérément pessimiste, a un double intérêt :

- en premier lieu, il donne la certitude de ne pas sous-estimer le risque, ce qui répond à la finalité sociale de la radioprotection : garantir aux travailleurs exposés un niveau de risque maximal acceptable en regard des autres risques de la vie professionnelle et de la vie en société ;

- en second lieu, le modèle linéaire sans seuil permet d'agir avec équité dans la répartition des risques chez les travailleurs. Avec ce modèle, tout incrément de dose, quel que soit le niveau de départ, présente le même incrément de risque, quel que soit l'âge, ce qui permet une modélisation objective en termes de compensation financière et d'indemnisation.

On voit ainsi que la radioprotection s'appuie sur les données scientifiques de la radiobiologie mais fait aussi appel à d'autres considérations, sociales, éthiques et économiques.

Le modèle linéaire sans seuil est le fondement des calculs des effets carcinogènes des faibles doses régulièrement publiés par les institutions internationales. Il est très important de noter que cet éventuel effet carcinogène ne s'applique pas à partir d'un taux nul, mais à partir du taux naturel de mortalité par cancer. Celle-ci est de l'ordre de 25 %, c'est-à-dire que dans une population d'un million de personnes, il doit survenir naturellement 250 000 décès par cancer. L'excès maximal de décès par cancer pour une dose de 0,1 Sv serait de l'ordre de 0,5 % soit 251 250 au lieu de 250 000.

En tout état de cause, un tel modèle ne donne pas une estimation du risque mais une limite supérieure de ce risque, à des fins de radioprotection des travailleurs. Le risque réel des faibles doses est compris entre 0 et cette limite supérieure obtenue par extrapolation. Cette relation linéaire sans seuil est donc à comprendre comme un risque-plafond, permettant des comparaisons de risques, en estimant un nombre maximal de cancers sur de grands effectifs induits par une irradiation à une dose donnée. La notion de dose collective, exprimée par l'unité « homme \times sievert », produit du nombre total de personnes exposées par la valeur moyenne de l'exposition donne une indication de l'ordre de grandeur du risque maximal, mais elle ne permet en aucun cas un calcul de probabilité d'apparition de cancers, comme une utilisation inappropriée fréquente pourrait le laisser penser.

Principes de la radioprotection dans la réglementation

La conséquence de la prise en compte de toute exposition, quel que soit son niveau, fondée sur une relation linéaire sans seuil, est la nécessité d'encadrer l'exposition professionnelle selon des principes qui doivent assurer l'acceptabilité du risque. Ces principes sont au nombre de trois.

- Justification : les avantages d'une exposition doivent être supérieurs à ses inconvénients. Cette justification est générique (justification d'une technique utilisant les RI avant son adoption) et individuelle (le bénéfice de l'application de cette technique à un individu doit être supérieur aux inconvénients potentiels).
- Optimisation : recherche du rapport maximal entre les avantages et les inconvénients, en amplifiant les premiers et en diminuant les seconds autant que possible.

- Limitation : imposition de limites de dose qui assurent une protection appropriée aux personnes les plus exposées.

À ces deux derniers principes s'applique le concept ALARA, acronyme de « *as low as reasonably achievable* », c'est-à-dire que les matériels et les procédures doivent être conçus et mis en œuvre de telle sorte que les expositions individuelles et collectives soient maintenues aussi bas qu'il est raisonnablement possible en dessous des limites réglementaires. Il faut noter que le principe de limitation ne s'applique pas aux expositions médicales, où le bénéfice attendu est toujours très supérieur au risque. Les expositions médicales ne comportent donc pas de limites mais devront être confrontées à des niveaux de référence (cf. chapitre 12).

Ces principes doivent, pour être appliqués, être ensuite exprimés dans des lois et règlements.

Genèse des réglementations nationales

Nous avons vu que la radioprotection s'appuie sur les données scientifiques de la radiobiologie et de l'épidémiologie, mais tient également compte des facteurs éthiques, sociaux et économiques. La réglementation appliquée par un état européen reflète cette genèse.

Les données scientifiques sont analysées par le Comité des Nations Unies pour l'étude des radiations atomiques (UNSCEAR). À partir de ces données, la CIPR élabore des recommandations, régulièrement publiées. Ces recommandations sont traduites en directives par les commissions spécialisées des communautés européennes. Ces directives doivent être transposées par les états membres dans leur législation nationale. Les dernières directives transposées traitaient de la radioprotection des travailleurs et du public et des nouvelles normes de base (96/29 Euratom) ou de la radioprotection des patients (97/43 Euratom). Leur transposition en droit français est effective depuis mars 2003 (cf. chapitre 13).

Conclusion

Le champ de la radioprotection, qui n'incluait à l'origine que les travailleurs, s'est progressivement élargi au public puis aux personnes exposées pour raison médicale. Le risque de l'exposition aux rayonnements ionisants à faibles doses est essentiellement spéculatif et l'estimation de ce risque nécessite l'utilisation d'un modèle d'extrapolation de l'effet des fortes doses à celui des faibles doses. Ce modèle indique une limite supérieure de risque, utilisé comme coefficient de probabilité maximale de risque, qui permet de gérer la radioprotection des travailleurs. Une approche prudente a conduit à fixer des limites d'exposition toujours plus restrictives, en application anticipée du principe de précaution, qui garantissent aux professionnels un niveau de risque inférieur à celui de la plupart des activités de la vie moderne.

Vérifiez si vous avez assimilé les points importants de ce chapitre en répondant au questionnaire en fin d'ouvrage.

Pour en savoir plus

- ICRP Publication 103 : Recommendations of the ICRP. *Annals of the ICRP* 2007;37(2-4).
- UNSCEAR. *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation*. New York: UNO; 2000.
- Preston, Shimizu, Pierce, Suyama, Mabuchi. Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13 : Solid cancer and noncancer disease mortality : 1950-1997. *Radiat Res* 2012;178(2):146-72.
- Schull. *Effects of Atomic Radiations*. New York: Willey Liss; 1995.

1 Nature et origine des rayons ionisants

Les rayonnements ionisants (RI) sont, des rayonnements dotés d'une énergie suffisante pour éjecter un électron de l'orbite électronique d'un atome (ionisation). Les RI sont électromagnétiques ou corpusculaires (particulaires), selon qu'ils sont constitués d'une particule énergétique immatérielle, le photon, ou d'un corpuscule de masse non nulle.

Rayonnements électromagnétiques

Les rayonnements électromagnétiques comprennent la lumière et les rayons X ou γ . Ce sont des rayonnements photoniques. On les distingue par leur origine et par leur énergie. Ils ne sont ionisants qu'au-dessus de 10 eV, c'est-à-dire au-delà du spectre de la lumière visible.

Les rayons X (RX) et gamma sont constitués de photons, caractérisés par leur énergie, inversement proportionnelle à leur longueur d'onde. L'énergie des RX provient des électrons de l'orbite d'un atome. Elle s'exprime donc comme une énergie électrique, énergie acquise par une charge q quand elle franchit une différence de potentiel U et elle se mesure en électron-volt (eV).

Les rayons X et les rayons gamma (R_γ) sont de même nature et se distinguent par leur origine et non par leur énergie : le rayonnement X provient des couches électroniques de l'atome, alors que le rayonnement γ provient du noyau. Ainsi, certains RX peuvent être plus énergétiques, donc plus pénétrants, que des R_γ .

Rayonnement X

Il naît soit d'un réarrangement électronique après éjection d'un électron d'une couche orbitale profonde d'un atome (RX de fluorescence), soit de la dissipation énergétique de l'interaction entre un flux d'électrons et les noyaux des atomes d'une cible (RX de freinage).

Rayonnement de fluorescence

Le rayonnement X de fluorescence est dû à des collisions d'électrons incidents avec les électrons des orbites électroniques des atomes de la cible. Ces électrons, déplacés sur une orbite plus périphérique, restituent leur énergie lorsqu'ils regagnent cette orbite sous forme d'un rayonnement X. Chacune de ces transitions émet un rayonnement de fluorescence mono-énergétique sous forme d'une raie, l'ensemble des raies constituant un spectre caractéristique de l'élément cible. Ce rayonnement ne comporte que les valeurs discontinues d'énergie correspondant aux différentes transitions électroniques possibles (fig. 1-1a). Les RX résultant d'une transition donnée

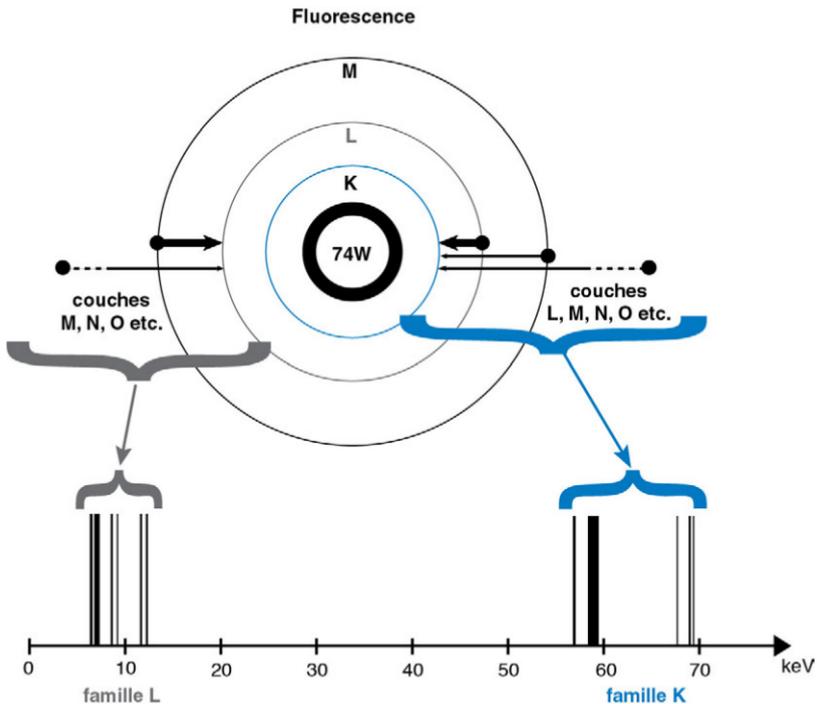


Figure 1-1a

Le rayonnement de fluorescence est la restitution d'énergie qui se produit lors de la désexcitation d'un atome.

Le transfert d'un électron de couche périphérique à une couche plus centrale, dont un électron avait été éjecté, dégage, sous forme de photon, une énergie égale à la différence de niveau énergétique des deux couches. La répartition des différentes énergies photoniques émises par ce mécanisme est discontinue. C'est un spectre de raies, caractérisant l'élément cible à la manière d'un « code-barre ». Ici est représenté le spectre de raies simplifié du tungstène (ou wolfram, numéro atomique 74).

constituent un rayonnement monoénergétique (monochromatique). L'ensemble des RX résultant de toutes les transitions possibles constitue un spectre discontinu ou spectre de raies caractéristique de l'élément qui constitue la cible.

Rayonnement de freinage

C'est le rayonnement émis par les électrons qui perdent de l'énergie lorsque leur trajectoire est modifiée par l'attraction coulombienne entre leur charge négative et la charge positive d'un noyau (fig. 1-1b). Toutes les valeurs d'énergie sont possibles entre 0 (pas d'interaction) et l'énergie totale de l'électron incident (arrêt complet). Ce rayonnement est polychromatique et l'ensemble des énergies qui le constitue réalise un spectre continu..

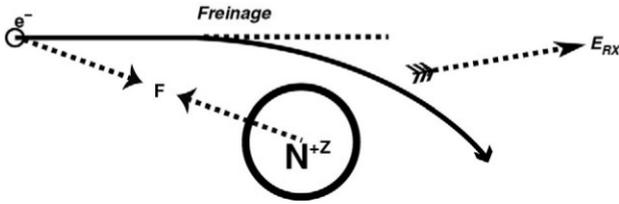


Figure 1-1b

Le rayonnement de freinage est le mode de dissipation d'énergie qui résulte de l'inflexion de trajectoire d'un électron, porteur d'une charge négative, qui subit l'attraction coulombienne d'un noyau chargé positivement.

Le rayonnement X qui en résulte a pour énergie maximale l'énergie maximale de l'électron incident, exprimée en eV. Dans un tube à RX, cette énergie maximale a la même valeur, en keV que la tension appliquée aux bornes du tube en kV. L'énergie du faisceau de rayonnement de freinage se répartit selon un spectre continu (fig. 1-2a, fig. 1-2b, fig. 1-2c).

Spectre de RX de freinage

C'est la répartition de l'énergie transportée par le faisceau de RX en fonction de l'énergie des photons X (voir fig. 1-2a). Le rayonnement de freinage, représenté par la surface du triangle délimité par la droite et les axes, est d'autant plus important que le nombre de photons arrivant sur la cible est plus élevé (donc lorsqu'on augmente l'intensité du flux d'électrons) et que le numéro atomique (Z) de l'atome cible est élevé (voir fig. 1-2b). L'énergie maximale de ce rayonnement polyénergétique de freinage est d'autant plus

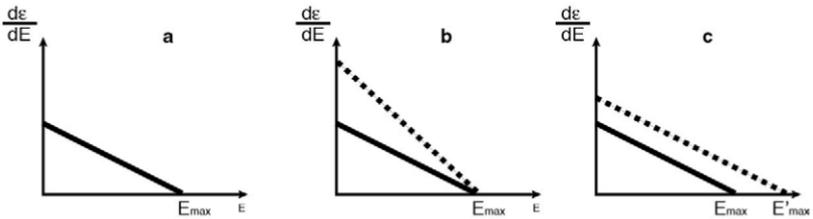


Figure 1-2

La distribution spectrale d'un rayonnement exprime la répartition de l'énergie entre les différentes classes d'énergie de photons.

Le nombre total de photons (intensité du faisceau) est représenté par l'aire sous la droite. Dans un faisceau de RX de freinage, beaucoup de photons peu énergétiques transportent la plus grande partie de l'énergie totale et la part d'énergie transportée diminue avec l'énergie des photons (a). Quand on augmente le nombre d'électrons incidents (c'est-à-dire la charge, exprimée en mAs), on augmente l'intensité du faisceau, dont l'énergie maximale ne varie pas (b). Quand le numéro atomique de l'élément cible augmente, le nombre de photons émis, pour un même nombre d'électrons incidents, augmente mais l'énergie maximale ne varie pas (même cas de figure b). Quand on augmente la tension (kV), le nombre et l'énergie des électrons incidents augmente. On augmente donc à la fois l'intensité du faisceau et son énergie maximale (c).

élevée que l'énergie maximale des électrons du faisceau incident est plus élevée. Elle dépend donc de la tension d'accélération des électrons, la valeur maximale de l'énergie des photons X du spectre, résultant de l'arrêt total d'un électron est donc, en keV, égale à la valeur de la tension, en kilovolts (kV), appliquée aux électrons. Il faut noter que l'augmentation de tension augmente non seulement l'énergie maximale du spectre, mais également le nombre total de photons (aire sous la droite).

Production des rayons X

Tube à rayons X

Le phénomène de rayonnement de freinage d'un tube de Crookes a été à l'origine de la découverte des RX par Röntgen et il fournit toujours l'essentiel des RX d'usage médical et industriel. Le principe du tube à RX est inchangé depuis le premier tube de Coolidge (fig. 1-3a). Un filament métallique chauffé (cathode) émet des électrons qui sont attirés et accélérés par une différence de potentiel vers l'anode, constituée d'un métal lourd (tungstène le plus souvent, molybdène pour les tubes de mammographie). L'énergie moyenne du rayonnement polyénergétique de freinage est d'autant plus élevée que l'énergie moyenne des électrons du faisceau incident est plus élevée. Dans un tube à RX conventionnel, elle est au maximum de 200 keV, mais peut ainsi atteindre plusieurs MeV lorsque le rayonnement X est émis par un accélérateur. De plus, dans un tube à RX le rayonnement de freinage, prédominant, est toujours associé à un rayonnement de fluorescence. Le spectre d'émission des rayons X résulte donc de la sommation du spectre continu du freinage et des raies caractéristiques de l'élément (fig. 1-3b). Il est défini par une énergie moyenne. La largeur du spectre peut être réduite par filtration, avec pour corollaire l'augmentation de l'énergie moyenne du faisceau. En pratique, on peut retenir que l'énergie moyenne du faisceau de RX d'un tube de radiodiagnostic, en keV, est comprise entre un tiers et la moitié de l'énergie maximale, selon l'épaisseur et la nature de la filtration ; plus l'épaisseur du filtre, ou son numéro atomique (cuivre vs. aluminium), augmentent, plus l'énergie moyenne du faisceau sera élevée. Quel que soit l'usage du tube une filtration en sortie de tube est obligatoire pour éliminer les RX de basse énergie qui seraient absorbés dans les premiers centimètres du patient, augmentant la dose sans contribuer à la formation de l'image. En radiologie conventionnelle, cette filtration obligatoire est de 2 mm d'aluminium. Selon les équipements, une filtration supplémentaire est ajoutée en fonction des énergies sélectionnées par l'opérateur. Pour la mammographie, la filtration est choisie en fonction de la composition de l'anode, afin de rendre le faisceau le plus homogène possible dans le domaine d'énergie choisie. Ainsi, lorsqu'on utilise une anode en molybdène, l'emploi d'un filtre de même métal, qui filtre fortement les rayonnements en dessous et au-dessus de l'énergie correspondant à la discontinuité des énergies de liaison des couches K et L, permet de modifier le spectre en privilégiant les énergies voisines du spectre de raies du molybdène, c'est-à-dire entre 15 et 20 keV (fig. 1-3b, fig. 1-3c).

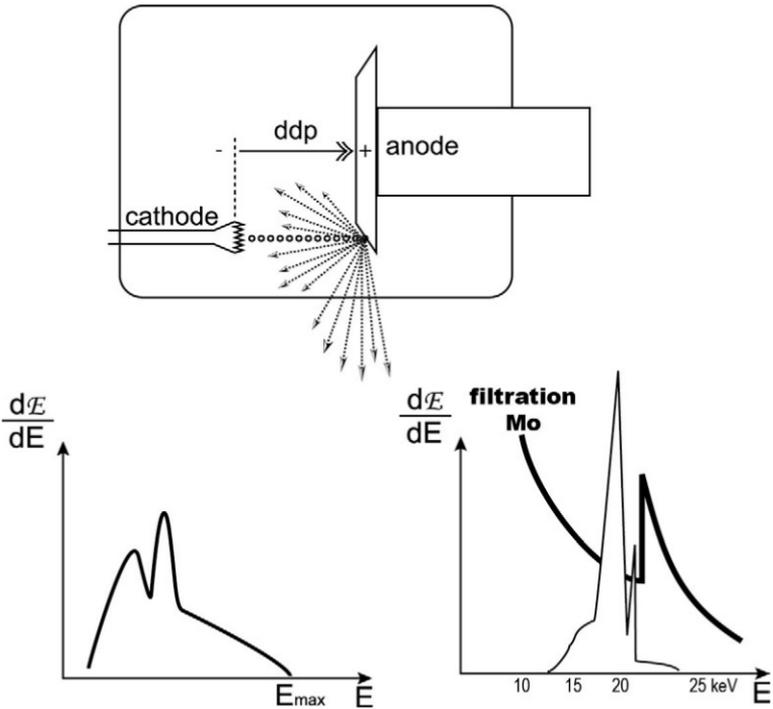


Figure 1-3

Schéma d'un tube à RX (a) et du spectre du rayonnement émis (b). Cas particulier d'un tube de mammographie avec anode et filtration en molybdène (c).

Les électrons sont émis par un filament chauffé par effet Joule. Ils sont accélérés par la différence de potentiel appliquée entre l'anode et la cathode et interagissent avec les noyaux atomiques de l'anode en émettant le rayonnement X de freinage. Ils déplacent aussi les électrons des couches électroniques de l'élément cible et le réarrangement électronique produit donc un rayonnement X de fluorescence. Le spectre résultant comporte donc une proportion plus importante de photons dont l'énergie est proche de celle des raies d'émission de fluorescence de l'élément cible. Pour un tube de mammographie comportant une anode et un filtre mince en molybdène, la filtration (trait épais) est très importante pour les basses énergies et pour les énergies immédiatement supérieures à l'énergie de la deuxième raie de fluorescence. Il en résulte une homogénéisation du faisceau dans la gamme d'énergie voisine des raies d'émission, aux alentours de 20 keV.

Accélérateur

Le principe de base est le même : des électrons accélérés sont dirigés sur une cible métallique pour produire un faisceau de RX de haute énergie mais peuvent aussi être directement utilisés en faisceau d'électrons mono-énergétique. La différence tient dans le principe de l'accélération qui est fournie par une onde de radiofréquence sur laquelle est synchronisé

chaque électron durant son parcours de façon qu'il subisse une accélération à chaque phase positive. On obtient ainsi des énergies très élevées, de plusieurs dizaines de MeV pour les faisceaux d'électrons et les énergies maximales de RX produits ont donc également des valeurs de dizaines de MeV. Cependant l'énergie moyenne du spectre de RX d'un accélérateur est, là aussi, nettement inférieure à cette énergie maximale et dépend de la filtration utilisée. C'est pourquoi l'usage est de caractériser ces faisceaux par l'énergie maximale exprimée en mégavolts (MV), même si les électrons n'ont pas été accélérés par une différence de potentiel mais par une onde de radiofréquence. On parlera ainsi, par exemple, de RX d'accélérateur de 10 ou 40 MV.

Rayonnement gamma (γ)

C'est un des modes de dissipation de l'énergie lors des réactions nucléaires ; il est mono énergétique pour une réaction donnée et caractéristique de cette réaction ; ainsi, la désintégration β du ^{137}Cs en ^{137}Ba s'accompagne d'une émission γ de 660 keV, celle du ^{60}Co en ^{60}Ni d'une double émission γ de 1,17 et 1,33 MeV. La disposition des raies de différentes énergies en spectroscopie, caractérise un radioélément, un peu à la manière d'un code-barre.

Rayonnements corpusculaires

Ce sont les rayonnements alpha, bêta et les neutrons. Ces rayonnements sont émis lors des transformations nucléaires qui se produisent dans les noyaux instables. La stabilité d'un noyau dépend du rapport qui existe entre les nucléons qui le constituent. Les noyaux les plus lourds se transforment en émettant deux neutrons et deux protons constituant un noyau d'hélium, c'est le rayonnement α . Les noyaux qui ont un excès de neutrons transforment un de leur neutron en proton en émettant un électron, c'est le rayonnement β^- . Les noyaux qui ont un excès de protons transforment un de leurs protons en neutron en émettant un électron positif, c'est le rayonnement β^+ (fig. 1-4). Après une transformation α , l'élément transformé modifie généralement son équilibre proton/neutron en émettant un rayonnement bêta (cf. fig. 4-1, chapitre 4).

Rayonnement alpha (α)

Il est constitué d'un noyau d'hélium, comportant deux protons et deux neutrons. Il a donc une masse et une charge électrique importantes.

Il provient des réactions nucléaires de désintégration des atomes lourds ($Z > 82$). Les émetteurs les plus courants sont le radon, le radium, le thorium, l'uranium, le plutonium et l'américium.

L'énergie d'émission α d'un atome lourd est constante et caractéristique de cet atome (cf. chapitre 4). Cette énergie varie de 1 à 10 MeV. Elle est de 5 MeV par exemple pour le ^{239}Pu .

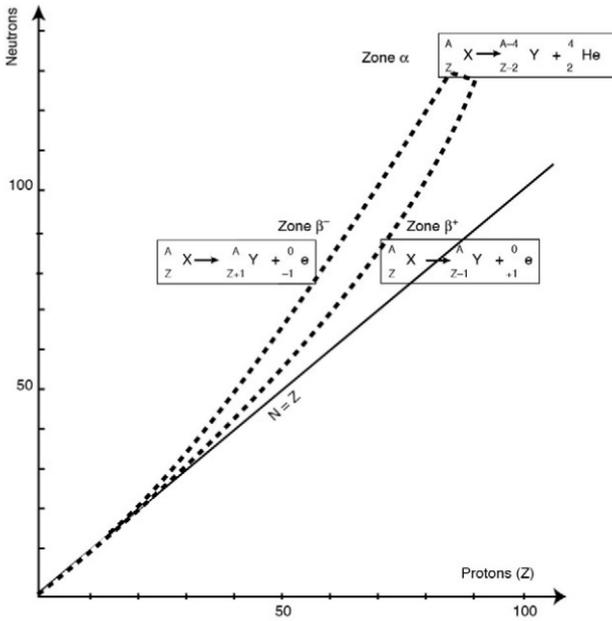


Figure 1-4

Dans les atomes légers, le nombre de neutrons est égal au nombre de protons.

Avec l'augmentation du nombre de protons (numéro atomique, Z), le nombre de neutrons (N) augmente un peu plus vite et la fonction qui relie N et Z s'écarte de la droite initiale. Certains isotopes deviennent instables. Au-delà de $Z = 80$, les noyaux regagnent de la stabilité en émettant dans une même particule deux neutrons et deux protons, soit un noyau d'hélium. L'élément descend de 2 cases dans la classification périodique. Dans la partie gauche de la courbe, les isotopes ont un excès de neutrons. Ils regagnent de la stabilité par transformation d'un neutron en proton, en émettant un électron (émission β^-). Dans la partie droite de la courbe, les isotopes ont un excès de protons. Ils regagnent de la stabilité par transformation d'un proton en neutron, en émettant un électron positif (émission β^+).

Rayonnement bêta (β)

Il est constitué d'électrons, de masse faible (1 800 fois plus faible que celle du proton ou du neutron), porteurs d'une charge électrique, négative (électron, β^-) ou positive (positron, β^+).

Il provient des réactions de désintégration nucléaire. Lors des réactions de désintégration nucléaire, il est associé ou non à une émission γ . Par exemple, le tritium (^3H) et le phosphore 32 (^{32}P) sont des émetteurs β purs, dont les énergies sont, respectivement, 19 keV (très faible) et 1,7 MeV (très élevée). Le carbone 14 (^{14}C) est également un émetteur β pur, d'énergie intermédiaire de 157 keV.

L'iode 131 (^{131}I) produit un rayonnement β d'environ 600 keV et un rayonnement γ d'environ 360 keV. Le potassium 40 (^{40}K) produit un rayonnement β d'environ 1,3 MeV et un rayonnement γ d'environ 1,4 MeV, le césium 137 (^{137}Cs), analogue chimique et métabolique du potassium, produit un rayonnement β d'environ 550 keV et un rayonnement γ d'environ 660 keV.

Un exemple d'émetteur $\beta +$ est le carbone 11 (^{11}C) qui produit un rayonnement β de 960 keV et un rayonnement γ d'environ 500 keV.

Électrons

Ils sont, par définition, de même nature que le rayonnement $\beta -$ mais proviennent de l'atmosphère électronique et non du noyau, soit par dés-excitation d'un radioélément qui éjecte un électron d'une couche périphérique, soit par arrachage et accélération dans un accélérateur linéaire. Les faisceaux d'électrons produits par ce dernier peuvent avoir des énergies de plusieurs dizaines de MeV et ils sont utilisés pour traiter des lésions superficielles.

Neutrons

Les neutrons ont une masse presque identique à celle du proton et ne portent pas de charge électrique. Ils sont émis lors des phénomènes de désintégration nucléaire, avec des énergies variables (quelques MeV à quelques dizaines de MeV). Une source usuelle de neutrons est le californium dont la fission spontanée émet 4 neutrons d'énergie moyenne de 2,2 MeV.

On peut aussi obtenir des neutrons en combinant un élément émetteur α avec un noyau plus léger. C'est le cas par exemple de la mise en contact du polonium avec une feuille d'aluminium, qui, dans l'expérience d'Irène et Frédéric Joliot a conduit à la découverte de la radioactivité artificielle et à celle du positon : un noyau d'aluminium ($Z = 13$) incorpore une particule alpha qui le transforme en phosphore 30 ($Z = 15$) instable, qui émet successivement un neutron et un positon pour se transformer en silicium ($Z = 14$). Pour les applications industrielles, on utilise actuellement une source de neutrons constituée de la combinaison américium-béryllium, qui produit des neutrons d'énergie moyenne de 4 MeV.

Radioactivité

Activité

L'activité d'une source radioactive est le nombre de désintégrations qui se produisent par unité de temps dans une quantité donnée du radionucléide qui la constitue. L'unité légale est le becquerel (Bq) égal à une désintégration par seconde. L'ancienne unité, le curie (Ci), était le nombre de désintégrations par seconde d'un gramme de radium, soit 37 milliards de becquerels (37 GBq). Il faut souligner d'emblée que le Bq, correspondant à une désintégration par seconde est une unité à l'échelle atomique, infiniment petite,

dépourvue de significativité à l'échelle biologique et pourtant détectable par les appareils de comptage.

L'activité massique d'un radionucléide est l'activité d'un gramme de ce radionucléide. Elle s'exprime en Bq. g⁻¹. Le [tableau 1-1](#) donne les valeurs d'activité massique de radionucléides ayant une importance en radioprotection.

Tableau 1-1

Activité massique et période des principaux radionucléides concernés par la radioprotection médicale

Radionucléide	Activité massique en Bq. g ⁻¹	Période	Émission principale et énergie en keV
Tritium	3,6.10 ¹⁴	12 ans	β 12
Carbone 14	1,65.10 ¹¹	5 730 ans	β 157
Fluor 18	3,52.10 ¹⁸	2 heures	γ 511, β 634
Phosphore 32	1,06.10 ¹⁶	14 jours	β 1710
Potassium 40	2,54.10 ⁵	1,3 milliard d'années	γ 1461, β 1312
Cobalt 60	4,18.10 ¹³	5,3 ans	γ 1125, β 318
Strontium 90	5,21.10 ¹²	29 ans	β 1400
Yttrium 90	1,99.10 ¹⁶	3 jours	β 2284
Technétium 99m	1,95.10 ¹⁷	6 heures	γ 140 β 120
Iode 123	7,14.10 ¹⁶	13 heures	γ 150, β130
Iode 125	6,45.10 ¹⁴	60 jours	γ 28, β 20
Iode 131	4,61.10 ¹⁵	8 jours	β 600, γ 360
Césium 134	4,77.10 ¹³	2 ans	γ 700, β 600
Césium 137	3,2.10 ¹²	30 ans	γ 600, β 520
Iridium 192	3,41.10 ¹⁴	74 jours	γ 400, β 550
Thallium 201	7,9.10 ¹⁵	3 jours	β 85, γ 80
Américium 241	1,27.10 ¹¹	433 ans	α 5450, γ 32, β 21
Radium 226	3,3.10 ¹¹	1 600 ans	α 6500 β 2000 γ 500
Thorium 232	4,07.10 ³	14 milliards d'années	α 4000, γ 12
Uranium 235	1,6.10 ⁵	700 millions d'années	α 4400, γ 180, β290
Uranium 238	3,72.10 ⁴	4,5 milliards d'années	α 4100, γ 15, β 2280
Plutonium 239	2,3.10 ⁹	24 000 ans	α 5100, γ 14

Décroissance radioactive

La transformation radioactive des atomes d'un radionucléide est aléatoire et aucune table ne permet de prévoir l'instant où un noyau donné va se réorganiser en émettant un rayonnement. En revanche, pour un très grand nombre d'atomes, le calcul de probabilité permet de savoir avec précision combien de noyaux vont se transformer et donc quelle proportion du radionucléide va disparaître par unité de temps. Cette proportion dN du nombre de noyaux présents N disparaissant dans un intervalle de temps dt est :

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt$$

Où λ est la constante radioactive, caractéristique de l'élément considéré, qui représente la probabilité de transformation d'un atome par unité de temps. Cette probabilité permet donc d'exprimer l'activité du radionucléide :

$$A = \lambda \cdot N$$

On peut, en connaissant cette activité et le nombre d'atomes présents N_0 , calculer le nombre d'atomes restants N_t en fonction du temps écoulé :

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

C'est la décroissance radioactive, qui est donc fonction exponentielle du temps.

Période radioactive

C'est le temps nécessaire à la disparition de la moitié des atomes d'un radionucléide. Après deux périodes, le nombre d'atomes est divisé par 4, après dix périodes par 1 024. La période est fonction de la constante radioactive. Après une période ($t = T$) :

$$N_t/N_0 = 1/2 = e^{-\lambda T}$$

donc

$$\text{Log}2 = -\lambda T$$

et

$$T = 0,693/\lambda$$

Le **tableau 1-1** montre que les activités massiques et les périodes sont inversement corrélées. Plus la période est courte, plus l'activité massique est grande. En d'autres termes, pour une activité égale, la masse d'un élément à longue période sera plus importante que celle d'un élément à période courte. À titre d'exemple, la masse correspondant à un GBq d'uranium 238 sera d'une tonne, alors que la même activité d'iode 131 correspond à 3 microgrammes de ce radioélément.

Vérifiez si vous avez assimilé les points importants de ce chapitre en répondant au questionnaire en fin d'ouvrage.

Pour en savoir plus

Régent D, Lisbona A, Masson F, Noël A. Scanner et rayons X. Paris: Elsevier Masson; 2013.

Galle P, Paulin R. *Biophysique*. Paris: Abrégé Masson; 2000.

Delacroix D, Guerre JP, Leblanc P. *Radionucléides et radioprotection*. Guide pratique. Paris: EDP Sciences; 2004.

2

Interaction des rayonnements ionisants avec la matière

Les effets des rayonnements ionisants sur les êtres vivants résultent d'un transfert d'énergie, ou interaction, entre les rayonnements et la matière. Si les résultats de ce transfert d'énergie sont relativement stéréotypés, l'intensité des effets dépend de la nature du rayonnement. En effet, selon que ce rayonnement est électromagnétique ou corpusculaire, chargé ou neutre, la quantité d'énergie transférée par unité élémentaire de volume sera différente et les conséquences biologiques seront d'autant plus importantes que ce transfert d'énergie sera plus concentré. Le mode de transfert d'énergie varie selon la nature du rayonnement et du milieu. Il en résulte toujours une atténuation du faisceau incident. Nous verrons successivement les mécanismes qui entrent en jeu pour les différents rayonnements ionisants, puis les effets sur le milieu.

Mécanismes d'atténuation en fonction du rayonnement

Rayonnement électromagnétique

Les photons X ou γ qui rencontrent un milieu matériel peuvent être absorbés, être diffusés ou créer, après matérialisation et dématérialisation, un rayonnement photonique naissant dans le milieu lui-même. Seule la fraction du rayonnement qui n'interagit pas avec le milieu peut être captée par un détecteur (fig. 2-1).

Effet photoélectrique

Un photon cède toute son énergie à un électron d'une couche profonde de l'atome et disparaît. L'énergie communiquée à l'électron mobilisé est dissipée dans le milieu. Le remplacement de l'électron éjecté par un électron d'une couche plus périphérique, puis, en cascade, de chaque électron ainsi récupéré par une couche plus interne, dissipe de l'énergie sous forme d'un rayonnement de fluorescence (fig. 2-1, premier cas). Il n'y a donc pas de photon X diffusé. La probabilité de cet effet est proportionnelle au cube du numéro atomique des éléments du milieu et inversement proportionnelle au cube de l'énergie du rayonnement incident :

$$\text{Effet Ph-él.} \propto Z^3 \cdot E^{-3}$$

Cet effet sera donc prépondérant pour les RX et R γ d'énergie faible et moyenne dans les milieux lourds (efficacité du plomb pour protéger des RX

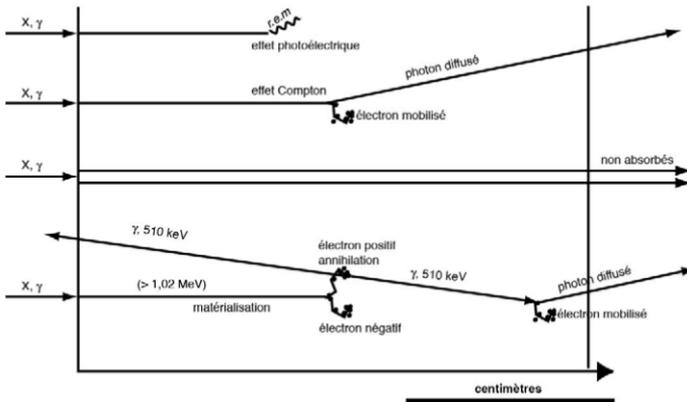


Figure 2-1

Interactions des rayonnements électromagnétiques avec un milieu biologique : les rayons X et γ peuvent être absorbés, diffusés ou inchangés par la traversée du milieu. Dans le premier cas, ils sont absorbés par effet photoélectrique, sans ionisation, avec dissipation de l'énergie par un rayonnement électromagnétique de plus grande longueur d'onde. Dans le deuxième cas, ils sont diffusés lors d'une collision, par effet Compton, avec perte d'énergie. L'énergie perdue, transférée à un électron, est absorbée sur place par collision électronique selon le même schéma que sur la [figure 2-2](#). Dans le troisième cas, ils traversent le milieu sans subir d'interaction. C'est le rayonnement transmis, direct, porteur de l'image virtuelle en radiologie. Enfin, pour les RX ou les Ry d'énergie supérieure à 1,02 MeV, se produit le phénomène de matérialisation. L'impact du rayonnement dans le milieu crée une paire d'électrons de signe opposé. L'électron négatif interagit dans le milieu selon le modèle de la [figure 2-2](#), le positon, après dissipation de son énergie cinétique par collisions, s'annihile en rencontrant un électron négatif du milieu. Il résulte de cette annihilation l'émission de deux photons de 510 keV, de direction opposée, qui peuvent, à leur tour, interagir avec le milieu ou sortir du milieu sans interaction. Ce phénomène d'annihilation d'un positon avec émission de photons opposés est à la base de la tomographie à émissions de positons mais ceux-ci proviennent dans ce cas d'un radionucléide émetteur β^+ (fluor 18). Notez l'échelle centimétrique du champ des interactions des rayonnements électromagnétiques.

en diagnostic par exemple). Dans les milieux biologiques, aux énergies du radiodiagnostic, cet effet intervient presque exclusivement dans l'os et les calcifications. Il explique pourquoi, en radiologie osseuse et en mammographie, on doit utiliser de faibles tensions d'émission des RX.

Effet Compton

Un photon cède une partie de son énergie à un électron, l'énergie restante étant emportée par un photon diffusé ([fig. 2-1](#), deuxième cas). Ce photon diffusé peut être émis dans n'importe quelle direction à partir du point de collision. L'énergie cinétique fournie à l'électron lui permet de quitter son orbite mais elle s'épuise rapidement dans le milieu. Cette énergie est donc absorbée au voisinage du point où a eu lieu la collision (voir [fig. 2-3](#)). Le rapport de

l'énergie ainsi absorbée à l'énergie emportée par le photon diffusé est d'autant plus important que l'énergie du photon incident est plus grande. À 50 keV, énergie moyenne du faisceau pour de nombreux actes de radiodiagnostic, ce rapport est de $1/10^0$, 10 % seulement de l'énergie de chaque collision étant absorbée au voisinage de celle-ci, tandis qu'à 1,25 MeV (cobalthérapie), le rapport est voisin de 1, la moitié de l'énergie étant communiquée à l'électron puis absorbée, l'autre moitié étant diffusée. La probabilité de l'effet Compton est inversement proportionnelle à l'énergie du rayonnement incident :

$$\text{Effet Compton} \propto 1/E$$

Matérialisation

Pour des énergies du photon incident supérieures à 1,02 MeV, il peut se produire, au voisinage du noyau, une création de matière, sous forme d'une paire d'électrons de signes opposés, dont la masse individuelle représente l'équivalent énergétique de 510 keV (fig. 2-1, quatrième cas). L'excédent d'énergie du photon, au-dessus de 1,02 MeV, est partagé en énergie cinétique entre les 2 électrons. L'énergie cinétique de l'électron négatif est absorbée au voisinage du point de collision, ainsi que l'énergie cinétique du positon mais, en fin de parcours, ce dernier s'annihile avec un électron négatif du milieu, en émettant deux photons de 510 keV, de direction opposée. La matérialisation n'existe qu'au-delà de 1 MeV, c'est-à-dire uniquement pour les énergies de radiothérapie, où cet effet augmente proportionnellement à l'énergie et au numéro atomique du milieu.

Importance relative de ces différents effets

La probabilité de l'effet Compton dépend peu du milieu, elle est inversement proportionnelle à l'énergie du rayonnement incident. La probabilité de l'effet photoélectrique est très dépendante du numéro atomique et diminue très rapidement avec l'énergie du rayonnement incident. Aux énergies du radiodiagnostic, l'effet Compton prédomine dans tous les tissus sauf pour l'os à des tensions inférieures à 100 kV où le calcium ($Z = 20$) rend prédominante l'absorption par effet photoélectrique. Pour des tensions d'émission plus élevées, l'effet Compton redevient prédominant, d'où l'intérêt d'utiliser des hautes tensions (120 à 140 kV) pour le cliché thoracique, ce qui « efface » les structures osseuses. La prédominance de l'effet Compton en diagnostic implique que l'essentiel de l'atténuation du faisceau primaire se fait avec émission de rayonnement diffusé.

Distribution spatiale de l'énergie transférée

Elle est dispersée sur le trajet du photon. Les rayonnements X ou γ créent peu d'ionisations directement, la majorité des ionisations étant créée par les électrons éjectés avec une grande énergie cinétique. Le transfert d'énergie par unité de distance (transfert linéique d'énergie = TLE) est relativement faible. Nous verrons que l'effet biologique des rayonnements, notamment sur l'ADN, est fonction du TLE, et il faut d'emblée noter que parmi tous les rayonnements ionisants, les rayonnements X ou γ ont le TLE le plus faible.

Absorption et atténuation

La probabilité qu'un photon d'énergie donnée de subir une interaction lors de la traversée d'un milieu est représentée par le coefficient d'atténuation pour ce milieu. Plus le parcours dans le milieu est long, plus la probabilité d'interaction augmente. C'est pourquoi ce coefficient d'atténuation, μ , s'exprime en cm^{-1} . Le coefficient d'atténuation d'un rayonnement X ou γ est la somme des coefficients des différents modes d'interaction (Compton, photoélectrique, matérialisation), la proportion de chacun de ces effets variant avec l'énergie du rayonnement et la nature du milieu comme nous l'avons indiqué précédemment. L'épaisseur d'un matériau donné qui divise par deux le nombre de photons incidents d'un faisceau monochromatique (où tous les photons ont la même énergie) est appelée couche de demi-atténuation (CDA). Elle est d'autant plus importante que l'énergie moyenne du faisceau est plus élevée. La CDA d'un matériau donné caractérise donc la qualité (pénétrance ou dureté) d'un faisceau de rayonnement X ou γ monochromatique. Pour un faisceau polychromatique, composé de photons dont les énergies sont réparties selon un spectre (cas général des rayons X du radiodiagnostic), la CDA n'est pas constante dans un matériau donné, puisque les photons les moins énergétiques sont davantage absorbés, ce qui a pour effet d'augmenter l'énergie moyenne du faisceau au fur et à mesure de sa progression dans le milieu, donc la CDA. On parle alors de 1° CDA, 2° CDA etc. ; le but de la filtration en sortie de tube de radiodiagnostic est de débarrasser le faisceau des photons les moins énergétiques, qui seraient absorbés par le patient dans les premiers centimètres et ne participeraient pas à la formation de l'image. On peut donc considérer, approximativement, ce rayonnement filtré comme monochromatique et utiliser une CDA moyenne pour les tissus mous. La diminution d'intensité d'un faisceau de rayons X ou γ sera ainsi exponentielle, divisée par deux à chaque CDA. À titre d'exemple, la CDA des tissus mous pour les énergies moyennes du radiodiagnostic conventionnel (de l'ordre de 40 keV) est de 3 cm, ce qui signifie que toute augmentation d'épaisseur de 3 cm, par rapport au patient « moyen », nécessite de doubler l'intensité du faisceau, en doublant la charge du tube (mAs) si l'on veut conserver la même quantité de photons sur le récepteur d'images (même rapport contraste/bruit).

Rayonnements corpusculaires

Ce sont les rayonnements alpha, bêta et les neutrons.

Rayonnement alpha (α)

Il est constitué d'un noyau d'hélium, comportant deux protons et deux neutrons.

Mécanisme d'atténuation

Sa double charge électrique rend la particule α fortement interactive avec les nuages électroniques des atomes du milieu qu'elle traverse. Elle est fortement freinée et son parcours sera très bref, dépendant de son énergie initiale et de la densité électronique du milieu traversé (fig. 2-2).



Figure 2-2

Interactions des rayonnements alpha avec un milieu biologique : les particules α très lourdes, ne sont pas déviées par les nuages électroniques des atomes du milieu. En revanche, porteuses de deux charges positives, elles sont très fortement freinées. Elles induisent donc de très nombreuses ionisations sur un parcours rectiligne très bref (notez l'échelle des distances en microns).

Distribution spatiale de l'énergie transférée

Le transfert total de l'énergie cinétique de la particule α sera sa « distance de freinage ». Le parcours maximum d'une particule α est de quelques centimètres dans l'air, de quelques dizaines de microns dans l'eau ou les tissus mous. Ainsi, le rayonnement α du ^{239}Pu est arrêté par la couche cornée de l'épiderme et la contamination externe ne peut produire d'effets cutanés. En revanche, lorsqu'il est inhalé, il peut produire ses effets en contact direct avec l'épithélium alvéolaire, ou avec un leucocyte lorsqu'il est phagocyté.

Du fait de leur quantité de mouvement, ces particules ne sont pas déviées par les nuages électroniques du milieu et leur trajectoire est rectiligne.

Durant ce parcours bref et rectiligne, la densité d'ionisations produites est très grande. Le TLE des rayonnements α est très élevé, leur effet biologique sera donc très important, notamment dans l'ADN car la proximité des effets successifs pourra endommager simultanément les deux brins de la chaîne.

Rayonnement bêta (β)

Il est constitué d'électrons ou de positons.

Mécanisme d'atténuation

Les particules β subissent deux types d'interaction avec les atomes : soit des collisions avec les électrons du nuage, soit un freinage à proximité du noyau.

Distribution spatiale de l'énergie transférée

Les électrons sont de faible masse et porteurs d'une seule charge, les rayonnements β sont donc faiblement ionisants, leur TLE est faible. Le nombre des interactions est d'autant plus important que l'énergie cinétique de la particule diminue. Le trajet est donc en ligne brisée, les segments diminuant de longueur à chaque interaction, pour finir dans une grappe d'ionisations où la densité d'ionisation et le TLE sont les plus élevés (fig. 2-3). La longueur

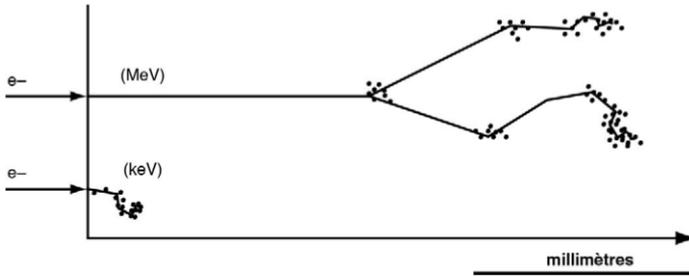


Figure 2-3

Interactions des rayonnements bêta et des électrons avec un milieu biologique : les électrons subissent d'autant plus d'interactions que leur énergie est faible.

À chaque collision ils sont déviés et transfèrent une partie de leur énergie à un électron qui est éjecté (ionisation) et, à son tour, ionise d'autres atomes. La densité d'ionisation augmente vers la fin du parcours et la longueur de celui-ci est déterminée par l'énergie initiale. Notez que le parcours est à l'échelle millimétrique.

moyenne, en centimètres, de la trajectoire d'un électron est approximativement égale à la moitié de son énergie en MeV. Ainsi, un rayonnement β de 3 MeV aura une pénétration moyenne de 1,5 cm, le rayonnement β de l'iode 131 (0,6 MeV) aura un parcours moyen d'environ 3 mm, celui du tritium (0,018 MeV) sera de quelques dizaines de microns.

Les rayonnements β ont un TLE voisin de celui des rayonnements X ou γ mais un trajet beaucoup plus court. Les électrons produits par les accélérateurs sont utilisés en radiothérapie pour traiter des lésions peu profondes, en épargnant ainsi les tissus sous-jacents.

Neutrons

Les neutrons ont une masse presque identique à celle du proton et ne portent pas de charge électrique.

Mécanisme d'atténuation

L'absence de charge rend les neutrons insensibles aux champs électriques intenses de l'atmosphère électronique des atomes. Ils transfèrent leur énergie essentiellement par collision élastique avec les noyaux légers (hydrogène, carbone). En revanche, ils traversent aisément les matériaux constitués d'atomes lourds (plomb, acier). L'énergie transférée à chaque collision avec un noyau léger est emportée par le noyau mobilisé, chargé, qui constitue la particule ionisante. Dans les milieux biologiques, l'essentiel des collisions a lieu avec des atomes d'hydrogène, c'est donc un proton, très fortement ionisant, qui est mobilisé. Les neutrons sont donc indirectement mais fortement ionisants (fig. 2-4).

Distribution spatiale de l'énergie transférée

Le proton ou le noyau léger mobilisé par l'impact avec un neutron perd rapidement son énergie au voisinage du point d'impact, le neutron dévié va entrer

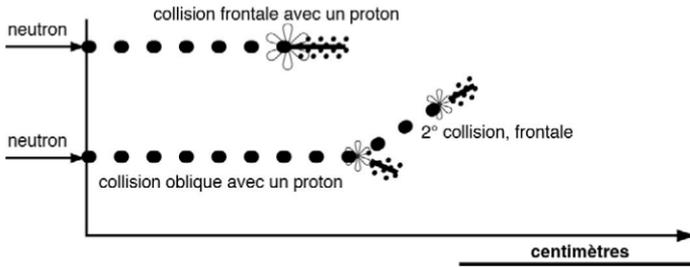


Figure 2-4

Interactions des rayonnements neutroniques avec un milieu biologique.

Les neutrons ont des interactions beaucoup plus aléatoires. Dans les milieux biologiques comportant de multiples atomes d'hydrogène, ils se comportent avec eux comme des boules de billard, perdant toute leur énergie par collision frontale ou la répartissant en collisions multiples. Ce sont les protons mobilisés qui ionisent à leur tour les atomes du milieu, avec une forte densité d'ionisations sur un trajet bref. Notez l'échelle centimétrique du champ des interactions des neutrons.

en collision avec un nouveau noyau léger et perdre ainsi rapidement son énergie jusqu'au niveau correspondant à l'énergie de l'agitation thermique (on dit d'un neutron ainsi ramené au niveau énergétique de base qu'il est « thermalisé » et il est appelé neutron thermique). Il pourra alors être capturé par un noyau, avec formation d'un isotope, le plus souvent radioactif. Les interactions des neutrons rapides avec le milieu sont aléatoires ; leur trajectoire et la profondeur maximale atteinte sont très variables et ne peuvent être schématisées sous forme d'un parcours comme pour les particules chargées.

Les neutrons ont une grande efficacité biologique, liée à leur TLE élevé dans les tissus mous, par l'intermédiaire des protons mobilisés. Il faut retenir qu'ils ne sont pas arrêtés par les écrans constitués de métaux lourds.

Effets sur le milieu

Ce sont principalement l'ionisation et l'excitation.

Ionisation

L'énergie communiquée à un électron d'une couche périphérique le libère de l'attraction de son noyau. L'éjection de cet électron laisse l'atome à l'état d'ion positif. L'énergie communiquée doit être supérieure à l'énergie de liaison de l'électron considéré, dépendant de la couche électronique sur laquelle il se situe. L'énergie moyenne nécessaire pour créer une ionisation dans un milieu biologique (aqueux) est de 32 eV ; elle ne dépend pas de la nature du rayonnement ionisant. Outre la formation d'ions, nous verrons que l'interaction des RI avec l'eau peut créer des radicaux libres, atomes ou molécules comportant un électron non apparié, très réactifs et dommageables en milieux biologiques.

Excitation

L'énergie communiquée à un électron d'une couche interne, insuffisante pour l'éjecter, le déplace sur une orbite plus périphérique. L'atome est passé de son état stable à un état instable en emmagasinant de l'énergie. Il est dit excité. La restitution de cette énergie potentielle s'effectue par émission de rayonnement électromagnétique (rayonnement lumineux ou rayons X selon son énergie). Dans un milieu aqueux, l'absorption d'une énergie de 1 MeV, quel que soit le rayonnement incident, produit environ 30 000 ionisations et 100 000 excitations.

Fluorescence

C'est le mécanisme de dissipation d'énergie qui correspond à l'effet photo-électrique précédemment décrit. Un seul photon de fluorescence est émis si la place libre laissée par l'ionisation est prise par un électron libre ou si c'est l'électron déplacé par l'excitation qui regagne son orbite. En revanche, si le retour à l'état fondamental s'effectue en cascade, de couche en couche, de la périphérie vers le centre, chaque électron gagnant une couche plus centrale étant remplacé par un électron de la couche immédiatement périphérique, on observera plusieurs photons d'énergie différente, donc un spectre de raies électromagnétiques.

Effet Auger

L'énergie acquise par l'atome peut être restituée, lors d'une transition électronique de retour à l'état fondamental, non pas par l'émission d'un photon mais par celle d'un électron, éjecté d'une couche plus périphérique que celle où a eu lieu l'ionisation première. Cet électron éjecté, parfois appelé électron Auger, a une énergie cinétique correspondant à la différence d'énergie de liaison entre la couche d'où provenait le premier électron éjecté et celle d'où provient l'électron qui prend sa place. Après un effet Auger, l'atome est à nouveau ionisé et l'excès d'énergie sera restitué par fluorescence ou par un nouvel électron Auger. L'effet Auger est quantitativement plus important que la fluorescence dans les milieux constitués d'éléments légers, tels que les milieux biologiques en dehors du tissu osseux.

Conclusion

Le terme de « rayonnements ionisants » résume bien l'uniformité d'action de ces rayonnements. Dans un milieu essentiellement aqueux, comme les milieux biologiques, ce sont les ionisations qui assurent pratiquement toute l'absorption d'énergie, quel que soit le rayonnement incident. La différence d'effet des rayonnements ionisants résulte donc uniquement de la distribution spatiale de ce transfert, très concentrée sur un trajet court pour les rayonnements à fort TLE, beaucoup plus dispersée pour les rayonnements à TLE faible. Parmi ces derniers il faut distinguer les électrons et le rayonnement β , à TLE faible mais trajet relativement court et les rayonnements X

ou γ , à TLE faible mais trajet long. Le rayonnement α a un TLE si fort qu'il ne passe pas la barrière de la couche cornée de l'épiderme ; c'est pourquoi il n'est pas à redouter en contamination externe. En revanche il est dangereux en contamination interne, directement au contact des cellules vivantes.

La connaissance de ces modes de transfert d'énergie permet d'optimiser l'usage des RI. En radiodiagnostic ce sera pour choisir la tension adaptée au type de contraste souhaité, en radioprotection pour prévenir les effets nocifs des RI et en radiothérapie d'utiliser au mieux leurs effets en fonction de la profondeur de traitement souhaitée.

Vérifiez si vous avez assimilé les points importants de ce chapitre en répondant au questionnaire en fin d'ouvrage.

3 Grandeurs et unités en radioprotection

Il n'y a pas d'unité universelle en radioprotection. Savoir utiliser l'unité pertinente pour chaque domaine est le préalable indispensable à l'abord de la radioprotection. Ce chapitre concerne les grandeurs et unités à utiliser dans le domaine de la radiologie pour quantifier l'exposition des patients (N.B. : on parle d'exposition et non d'irradiation ; en effet, l'irradiation est le fait de délivrer une dose de RI à un patient ou à un objet pour créer un effet donné par un apport local d'énergie. Lorsque la dose résulte de l'emploi des RI dans un autre but, pour faire une image du milieu traversé en radiologie notamment, on emploie le terme d'exposition).

Dose absorbée (D)

C'est le quotient de l'énergie moyenne impartie d par le rayonnement à la masse de matière m :

$$D = d/m$$

L'unité de dose absorbée est le gray (Gy).

Il s'agit d'une grandeur physique, utilisable quels que soient le rayonnement et le milieu considérés.

Dose dans l'air (D_{AIR})

Cette dose est facilement mesurable à l'aide d'une chambre d'ionisation. Elle est indépendante de l'objet radiographié et permet de caractériser une installation radiologique dans des conditions données de distance foyer-détecteur, de haute tension et de filtration. Elle s'exprime en Gy.

Quand la dose dans l'air est déterminée, il est alors possible de calculer la dose pour un autre milieu (m), en la multipliant par le rapport des coefficients d'atténuation du milieu considéré et de l'air.

Dose à la surface d'entrée ou dose d'entrée (D_E)

Mesurée par un dosimètre sur la peau des patients pendant un examen radiologique, la dose d'entrée intègre le rayonnement rétrodiffusé par le patient. Ce rayonnement rétrodiffusé représente, en radiodiagnostic, selon l'énergie du rayonnement incident, 20 % à 40 % de la dose dans l'air, à laquelle il s'ajoute. Il faut donc en tenir compte dans les calculs, ce qui nécessite l'emploi du facteur de rétrodiffusion (FRD) dont les valeurs seront donc de 1,2 à 1,4.

$$D_E = D_{\text{AIR}} \times \text{FRD}$$

Elle s'exprime en Gy. Une formule simplifiée permet d'estimer la dose d'entrée à partir des paramètres d'une exposition :

$$D_E = 0,15 \times (U/100)^2 \times Q \times (1/DFP)^2$$

où U est la tension en kV, Q la charge en mAs et DFP la distance foyer-peau en mètres.

Dose en profondeur

La dose en profondeur est mesurable sur fantôme anthropomorphe mais non chez un patient (quelques mesures sont possibles en endocavitaire). Elle est donc généralement calculée à partir de la dose d'entrée, en tenant compte de l'atténuation.

Il ne s'agit donc le plus souvent pas d'une grandeur directement mesurée mais d'une grandeur calculée, entachée d'une incertitude car le calcul introduit une part d'inexactitude, d'autant plus importante que le milieu est moins homogène.

Dose à l'organe

La dose à l'organe est la dose moyenne absorbée rapportée à l'ensemble du volume de l'organe considéré. Elle permettra le calcul de la dose efficace. Ce calcul impose de tenir compte de la nature du rayonnement et du tissu considéré car tous les rayonnements n'ont pas la même efficacité pour produire un effet biologique et tous les tissus n'ont pas la même sensibilité à un rayonnement donné.

Facteur de pondération du rayonnement (WR)

Il sert à exprimer la plus grande efficacité de certains rayonnements corpusculaires pour induire un effet nocif à long terme chez l'homme, par rapport aux rayonnements photoniques (X ou gamma), affectés du coefficient 1 (tableau 3-1).

Tableau 3-1

Facteurs de pondération des rayonnements (WR). CIPR 103, 2007

Rayonnement	WR
Électromagnétique (X ou γ)	1
Électrons et β	1
Protons	2
Neutrons (selon énergie)	2,5 à 20
Alpha	20

Dose équivalente (H)

C'est la dose absorbée dans un organe, multipliée par le coefficient correspondant au rayonnement considéré.

$$H = D \times W_r$$

Elle s'exprime en sievert (Sv) ou millisievert (mSv) mais l'emploi de cette unité pour une dose n'intéressant qu'une partie de l'organisme entretient une confusion regrettable avec la dose efficace (cf. *infra*) qui concerne l'ensemble de l'organisme.

La radiologie utilise le rayonnement de référence, affecté d'un coefficient 1. Il n'y a aucune conversion à réaliser et il faut exprimer la dose délivrée au volume en gray et non en sievert.

Facteurs de pondération tissulaire (Wt)

Les tissus du corps humain sont d'autant plus sensibles qu'ils sont moins différenciés et que leur activité mitotique est plus grande et programmée sur une plus longue période. Pour tenir compte de cette disparité, en extrapolant aux faibles doses les données de la cancérogenèse radio-induite à de fortes doses, il a été établi un barème de radiosensibilité où chaque organe se voit affecter un coefficient ou facteur de pondération, Wt. L'utilisation de ces facteurs de pondération est censée donner son importance réelle à chaque organe dans la genèse des effets néfastes (détriment) provoqués par une exposition aux RI. La somme de ces facteurs de pondération est de 1, ce qui correspond au détriment global d'une exposition de l'ensemble du corps (tableau 3-2).

Tableau 3-2
Facteurs de pondération tissulaire* (CIPR 103, 2007)

Tissu ou organe	Wt	ΣWt
Côlon, estomac, moelle osseuse, poumon, sein**, autres tissus ou organes*** (ensemble)	0,12	0,72
Gonades	0,08	0,08
Foie, œsophage, thyroïde, vessie	0,04	0,16
Cerveau, glandes salivaires, peau, surface osseuse	0,01	0,04
Total		1

*Ces facteurs permettent d'estimer le risque stochastique résultant d'une exposition aux RI, en multipliant la dose reçue par chaque organe ou fraction d'organe par un facteur exprimant sa radiosensibilité relative. La somme des coefficients est 1 : une exposition de l'organisme entier aux RI s'exprimera donc par la même valeur en gray et en sievert puisque la dose efficace sera alors égale à la dose absorbée.

**On remarquera, par rapport aux précédentes recommandations de la CIPR, que le facteur de pondération du sein a été augmenté (0,12 au lieu de 0,05) et que celui des gonades a été fortement diminué (0,08 au lieu de 0,20).

***Cœur, muscles, muqueuse orale, vésicule, pancréas, rate, ganglions, thymus, intestin grêle, reins, surrénales, prostate, col utérin.

Dose efficace (E)

C'est un indicateur des risques des effets aléatoires, non directement mesurable. Il permet de rapporter une exposition locale à un effet théorique sur l'ensemble de l'organisme, en faisant intervenir les facteurs de pondération liés à la radiosensibilité tissulaire (W_t). La dose efficace est obtenue en multipliant la dose équivalente délivrée à chaque organe, simultanément ou successivement, par le facteur de pondération correspondant puis en faisant la somme de l'ensemble.

$$E = \sum H \times W_t$$

Elle s'exprime en sievert (Sv) ou millisievert (mSv) et réalise donc une véritable intégration de la dose pour l'ensemble de l'organisme, pour chaque exposition, même partielle.

Tout imparfaite que soit cette grandeur, résultant d'un produit de grandeurs approximatives et non d'une mesure physique objective, elle est la seule qui permette une estimation cohérente du niveau d'exposition global d'un patient en radiologie, où les expositions portent sur des régions différentes, à des moments différents. Cet indicateur est le seul qui permette une estimation du risque et la communication avec les patients et les correspondants.

Insistons sur le fait que cette dose efficace devrait dorénavant être la seule à être exprimée en sievert, afin de faire cesser l'ancienne ambiguïté qui consistait à quantifier avec cette même unité deux notions différentes : la *dose équivalente*, délivrée à une partie du corps, pondérée d'un facteur d'efficacité de rayonnement et la *dose efficace*, dose représentative d'un risque global pour un individu, obtenue en multipliant une ou plusieurs doses équivalentes par les facteurs de pondération tissulaire correspondants. Par exemple, une dose équivalente de 100 mSv délivrée au poumon correspondait à une dose efficace de 12 mSv, mais l'expression en sievert de la dose délivrée au volume thoracique, sans préciser qu'il s'agissait d'une dose équivalente et non d'une dose efficace, donnait lieu à une formulation inexacte, telle que « la dose reçue lors d'un scanner cardiaque est de 100 mSv ».

Grandeurs dosimétriques spécifiques du radiodiagnostic

Produit Dose.Surface

L'effet d'une exposition est évidemment différent selon qu'elle est délivrée sur une petite partie du corps ou une vaste surface (par exemple, une exposition unique de 6 Gy sur 10 cm² d'un membre inférieur ne créera qu'un érythème de la zone exposée, alors que la même dose délivrée à l'organisme entier sera mortelle dans la plupart des cas). Pour tenir compte de cette importance fondamentale de la surface (donc du volume) exposée on

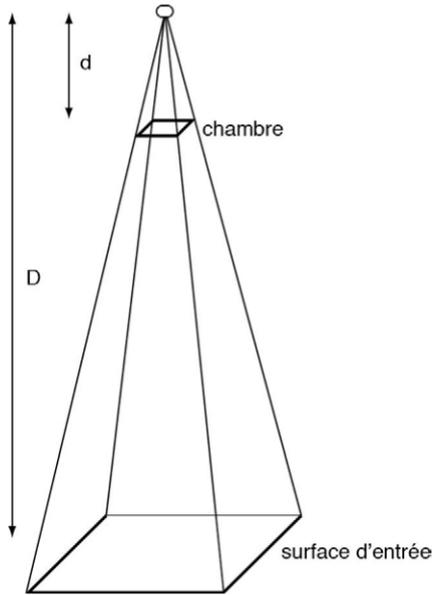


Figure 3-1

Produit Dose.Surface : l'intensité du rayonnement diminue en fonction du carré de la distance.

Selon la règle d'homothétie, le côté du quadrilatère représentant la chambre et le côté correspondant du quadrilatère représentant la surface d'entrée sont dans un rapport d/D . Entre la chambre et la surface d'entrée, la dose diminue comme $(d/D)^2$ alors que la surface augmente comme $(D/d)^2$. Le produit Dose.Surface est donc indépendant de la distance à la source de rayonnements.

utilise une grandeur constituée du produit de la dose délivrée par la surface sur laquelle elle est délivrée, c'est le **Produit Dose.Surface (PDS)**, qui s'exprime théoriquement en Gy.m^2 mais, plus couramment en cGy.cm^2 ou $\mu\text{Gy.m}^2$ avec les équivalences suivantes :

$$1 \text{ cGy.cm}^2 = 1 \mu\text{Gy.m}^2$$

$$1 \text{ cGy.cm}^2 = 0,1 \text{ dGy cm}^2 = 10 \text{ mGy.cm}^2$$

Il faut noter que le PDS est indépendant de la distance entre la source et la surface d'entrée car, à collimation égale, la surface exposée augmente comme le carré de la distance mais le flux de rayons X, lui, diminue selon le carré de cette distance (fig. 3-1).

On peut, par l'utilisation d'un coefficient de conversion, E_{PDS} , dépendant de la zone explorée et de la tension (tableau 3.3), estimer avec une bonne approximation la dose efficace à partir du PDS en appliquant la relation :

$$E \# \text{PDS} \times E_{\text{PDS}} \text{ (où PDS est exprimé en } \text{Gy.cm}^2 \text{)}$$

Tableau 3-3

Coefficients de conversion E_{PDS} permettant de passer du produit dose. Surface, exprimé en Gy.cm², à la dose efficace (d'après Le Héron)*

Région explorée	KV	EPDS	Estimation simplifiée
Thorax de face	130	0,33	#PDS (Gy.cm ²)/3
Thorax de profil	130	0,15	#PDS (Gy.cm ²)/3
Abdomen	90	0,22	#PDS (Gy.cm ²)/5
Bassin	70	0,20	#PDS (Gy.cm ²)/5
Tête (sinus) de face	80	0,04	#PDS (Gy.cm ²)/25
Rachis cervical de face	70	0,21	#PDS (Gy.cm ²)/5
Rachis cervical de profil	70	0,03	#PDS (Gy.cm ²)/5
Rachis thoracique de face	70	0,27	#PDS (Gy.cm ²)/3
Rachis thoracique de profil	80	0,10	#PDS (Gy.cm ²)/3
Rachis lombaire de face	80	0,21	#PDS (Gy.cm ²)/5
Rachis lombaire de profil	90	0,13	#PDS (Gy.cm ²)/5

*Pour simplifier, on peut retenir que la dose efficace correspond, à peu près, au PDS en Gy.cm² divisé par trois pour un cliché du thorax de face, par cinq pour un cliché de l'abdomen ou du rachis lombaire de face et par vingt-cinq pour un cliché de sinus.

On aura ainsi, par exemple, pour un cliché d'abdomen (PDS = 1,3 Gy.cm²) # 0,2 à 0,3 mSv selon la tension utilisée, pour un cliché de rachis lombaire de face (PDS = 0,7 Gy.cm²) # 0,15 mSv. La différence de coefficients entre le rachis cervical de face et le rachis cervical de profil s'explique par le fait que, dans le premier cas, la thyroïde est comprise dans le faisceau primaire, alors que dans le deuxième cas, si le cliché est correctement diaphragmé, la thyroïde n'est pas dans le champ d'exposition.

Dose glandulaire moyenne

La dose glandulaire moyenne (DGM) est une grandeur spécifique de la mammographie. Elle peut être estimée à partir de la dose à l'entrée du sein (D_E) au moyen de facteurs de conversion.

$$DGM = D_E \cdot g \cdot c \cdot s$$

Où :

- g est un facteur de conversion pour un spectre de référence (anode et filtration en molybdène) et un sein standard représenté par un fantôme demi-cylindrique de 16 cm de diamètre ; ce facteur dépend de l'épaisseur du sein comprimé ;
- c : facteur qui permet de tenir compte des différences de composition du sein ;
- s : coefficient de correction de g si le couple anode-filtration n'est pas constitué exclusivement de molybdène (molybdène-rhénium ou tungstène-rhénium par exemple).

Les valeurs de ces différents coefficients figurent dans les décisions fixant les modalités du contrôle de qualité des installations de mammographie. Les mammographes numériques calculent et affichent cette information, ainsi que la dose d'entrée, sur chaque image.

Index de dose scanographique (IDS ou CTDI)

Traduction du *Computed Tomographic Dose Index* (CTDI). Cette grandeur a été introduite pour tenir compte du profil de coupe (fig. 3-2).

Le CTDI peut être mesuré dans l'air sur l'axe de rotation du scanographe ou dans un fantôme en plexiglas. On recommande d'utiliser pour la tête un fantôme de 16 cm de diamètre et pour le corps un fantôme de 32 cm de diamètre. Pour mieux rendre compte de la dose moyenne absorbée par le patient, on mesure le CTDI au centre du fantôme (CTDI_c) et en périphérie (CTDI_p), à 1 cm de la surface. On définit alors le CTDI pondéré (CTDI_w) :

$$CTDI_w = (1/3 CTDI_c + 2/3 CTDI_p)$$

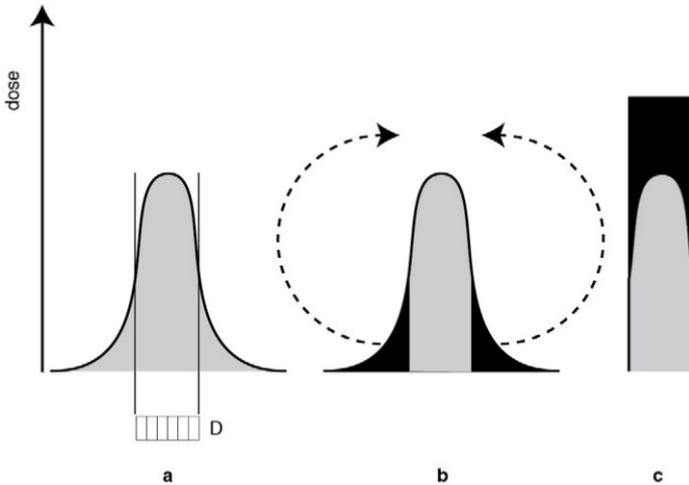


Figure 3-2

L'index de dose scanographique (IDS ou CTDI) exprime la dose intégrale reçue par le patient pour chaque coupe : a) l'épaisseur nominale de coupe correspond à la largeur du profil de coupe à mi-hauteur.

Elle correspond idéalement à la largeur du détecteur (D) et seule la partie du rayonnement comprise entre les deux demi-droites participe à la formation de l'image. C'est la partie utile du rayonnement ; b) la pénombre (en noir), de part et d'autre de la partie utile du rayonnement, ne participe pas à la formation de l'image mais elle est partie intégrante de la dose reçue par le patient ; c) pour chaque coupe, la dose reçue par le patient est la somme de ces deux parties. La part relative de la pénombre étant d'autant plus importante que l'épaisseur nominale est petite. Le CTDI exprime cette sommation de la dose.

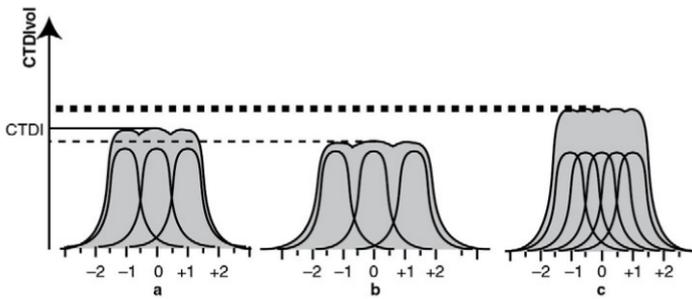


Figure 3-3

CTDI au volume (CTDIvol).

C'est l'index de dose scanographique divisé par le pas de l'acquisition : a) lorsque le pas est de 1, le CTDIvol est égal au CTDI ; b) lorsque le pas augmente, le CTDIvol (et la dose reçue par le patient) diminue ; c) lorsque le pas diminue (hélice chevauchée), le CTDI vol (et la dose) augmente.

Le CTDI s'exprime en milligrays.

Les normes européennes et internationales (Commission électrotechnique internationale = CEI) imposent aux constructeurs de faire apparaître cet index sur la console-opérateur pour toute série programmée. Il permet de connaître l'exposition résultant de l'examen et d'adapter éventuellement ses paramètres et ses protocoles.

Pour tenir compte aussi d'un élément, essentiel en acquisition hélicoïdale, qui est le pas (pitch), les constructeurs affichent également (ou exclusivement) le CTDI au volume, CTDIvol, qui est le CTDI divisé par le pas ; il est donc inférieur au CTDI nominal quand le pas est supérieur à 1, supérieur lorsque le pas est inférieur à 1 (fig. 3-3). Ce CTDI au volume correspond en fait à la dose moyenne multicoupes (*Multi Slice Average Dose* ou MSAD) dont l'emploi était préconisé dès les premières publications de dosimétrie en scanner.

Le CTDI peut être rapporté à la charge, c'est le CTDI pondéré normalisé (nCTDIw), qui s'exprime en mGy/mAs.

Il faut bien comprendre que le CTDI est un index d'exposition quantifiant la dose délivrée en fonction des paramètres de la coupe mais que cet index ne reflète pas la dose totale reçue par le patient. Par exemple, si le CTDI est de 15 mGy, la dose reçue par le patient pour une coupe sera de 15 mGy, mais la dose reçue pour dix coupes jointives sera également de 15 mGy (et non 150 mGy). La différence est que cette dose sera délivrée dans un volume plus grand, et le patient aura bien absorbé quinze fois plus d'énergie, mais l'énergie par unité de masse (définition de la dose) sera la même. Pour tenir compte de ce point fondamental, on a défini, par analogie avec le produit Dose.Surface, le produit Dose.Longueur, qui est un meilleur indicateur de l'exposition du patient.

Produit Dose.Longueur (PDL)

Il a été défini par analogie avec le produit Dose.Surface utilisé en radiologie conventionnelle, et pour rendre compte de la dose délivrée au cours d'une procédure complète :

le produit Dose.Longueur est égal au CTDI_{vol} multiplié par la longueur explorée (longueur de l'hélice).

$$PDL = CTDI_{vol} \times L$$

Ce produit s'exprime généralement en milligray.cm. On peut aussi le calculer à partir du CTDI normalisé, si l'on connaît la charge totale de l'acquisition, par la relation :

$$PDL = {}_nCTDI_w \times T \times A \times t$$

où T est l'épaisseur de coupe, et A × t représente la charge totale (mAs) de l'acquisition.

L'intérêt principal de cette grandeur est qu'elle représente exactement l'exposition en affectant la dose au volume exploré. Elle permet donc, en prenant en compte les organes figurant dans ce volume, de calculer ou d'estimer la dose efficace. Ce calcul se fait très simplement, comme pour la conversion à partir du PDS en radiologie conventionnelle, en utilisant des coefficients dépendant de la région explorée. Ces facteurs de conversion permettent d'estimer simplement et rapidement l'ordre de grandeur de dose efficace pour chaque examen, en multipliant le PDL relevé en TDM par un coefficient EPDL dépendant de la zone explorée (tableau 3-4).

On peut ainsi très facilement estimer l'ordre de grandeur de la dose reçue par le patient. L'usage de la dose efficace, exprimée en millisievert, unité qui devrait lui être réservée, permettra d'harmoniser l'expression finale de la dose en radioprotection. Son emploi évitera les incohérences qui pourraient résulter de la sommation d'expositions hétérogènes dans le temps et dans l'espace (par exemple un cliché de bassin, puis un scanner thoracique, et un panoramique dentaire). Il montre bien quels sont les examens sur lesquels doit porter en priorité l'effort de réduction de dose (fig. 3-4).

Tableau 3-4

Coefficients (EPDL) permettant de convertir le produit dose•longueur, exprimé en mGy.cm, en dose efficace, en mSv, en fonction de la région explorée

Région explorée	EPDL	Estimation simplifiée
Tête	0,002	#PDL (mGy.cm)/500
Abdomen et pelvis	0,015	#PDL (mGy.cm)/65
Thorax, homme	0,017	#PDL (mGy.cm)/60
Thorax, femme	0,020	#PDL (mGy.cm)/50

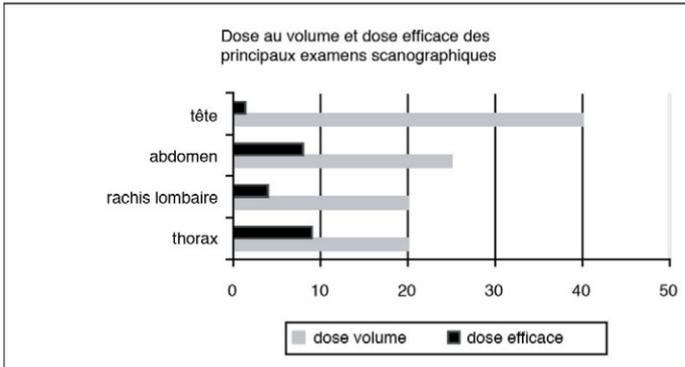


Figure 3-4

Comparaison de la dose au volume et de la dose efficace, en fonction de la région explorée.

On constate que la dose efficace est très dépendante de la région explorée. Malgré la dose relativement élevée au volume pour une exploration de la tête (40 mGy), la dose efficace reste modeste (1,3 mSv, soit l'équivalent d'environ 6 mois d'exposition au rayonnement naturel), alors que pour une exposition moindre du thorax (20 mGy), la dose efficace représente presque la moitié de cette dose (9 mSv). Ceci est dû à la sensibilité importante des tissus inclus dans le volume thoracique (poumon, sein, moelle osseuse).

Conclusion

La connaissance et le bon emploi des grandeurs et unités sont le préalable indispensable à l'optimisation des examens de radiodiagnostic, permettant de comparer rationnellement des paramètres techniques, des machines et des protocoles d'exploration.

Vérifiez si vous avez assimilé les points importants de ce chapitre en répondant au questionnaire en fin d'ouvrage.

Pour en savoir plus

Le Heron J. Estimation of effective dose to the patient during medical X-ray examination from measurements of the dose-area product. *Phys Med Biol* 1992;11:2117-26.
 ICRP Publication 103. Recommendations of the ICRP. *Annals of the ICRP* 2007;37(2-3).
 ICRP Publication 102. Managing Patient Dose in Multi-Detector Computed Tomography (MDCT). *Annals of the ICRP* 2007;37(1).

4 Exposition naturelle et artificielle

« *La radioactivité, c'est naturel !* » L'énoncé de cette évidence paraît incongru au public et souvent même aux médecins non spécialistes, tant le discours antinucléaire, abondamment relayé par les médias, a réussi à faire associer, dans l'inconscient collectif, radioactivité et nuisance. Nous verrons dans ce chapitre que la radioactivité est omniprésente et nous en détaillerons l'importance relative selon les sources, naturelles ou artificielles, en soulignant d'emblée que le rayonnement naturel est de même nature et a les mêmes effets biologiques que le rayonnement artificiel.

Sources d'exposition naturelle

Elles sont d'origine terrestre, cosmique et interne.

Origine terrestre (tellurique)

Le rayonnement tellurique est la source principale de l'exposition des êtres vivants et il actuellement très inférieur à ce qu'il était lors de l'apparition de la vie. En effet, parmi les radionucléides naturels primitifs, tous les éléments initialement présents dont la période (T) était inférieure au million d'années ont disparu par désintégration naturelle. Seuls persistent les éléments à période longue, en deux familles principales selon leur poids atomique : les éléments lourds et les éléments légers. L'autre composante de la radioactivité naturelle est constituée d'éléments produits en permanence par l'action des neutrons d'origine cosmique sur des éléments stables terrestres et atmosphériques : ce sont les radionucléides naturels secondaires.

Éléments lourds

Ce sont l'uranium, sous la forme de ses isotopes 238 (T = 4,5.10⁹ ans) et 235 (T = 0,7.10⁹ ans) et le thorium 232 (T = 14.10⁹ ans). Le mécanisme de la filiation qui conduit de l'uranium au plomb, par un jeu de désintégrations α et β – est schématisé sur la [figure 4-1](#). La désintégration de l'uranium 235 et du thorium 232 produit d'autres isotopes des mêmes éléments intermédiaires et aboutit à d'autres isotopes du plomb.

Éléments légers

Ce sont le potassium 40 (T = 1,3 milliard d'années) et le rubidium 87 (T = 4,5 milliards d'années). Le potassium 40 est à l'origine de l'essentiel de la radioactivité interne des êtres vivants. Chez un homme de 75 kg, il représente 6 000 Bq, c'est-à-dire que, chaque seconde, se produisent 6 000 désintégrations, avec émission de rayonnement β et γ très énergétique

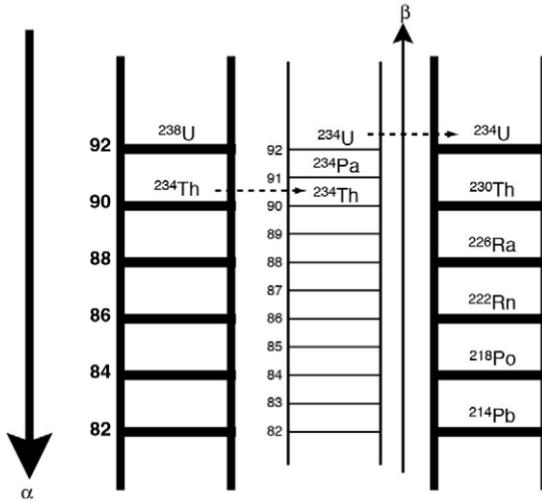


Figure 4-1

Tableau de filiation de l'uranium 238 : la désintégration α , émission d'un noyau d'hélium, soit deux neutrons et deux protons, fait « descendre de deux cases » (perte de deux protons) l'élément dans la classification périodique, ce qui transforme l'élément initial en l'élément de numéro atomique situé deux cases en dessous.

C'est une échelle à barreaux espacés, descendante. La perte de ces quatre nucléons allège de quatre son nombre de masse. La désintégration β^- , transformation d'un neutron en proton, le fait « remonter d'une case » en gardant le même nombre de masse et en émettant une charge négative. C'est une échelle à barreaux rapprochés, ascendante.

(cf. chapitre 1). Notons que le césium, situé dans la même colonne de la classification de Mendeleïev que le potassium, a des propriétés chimiques voisines, la même distribution que lui dans l'organisme et qu'il émet le même type de rayonnement β et γ , d'énergie plus faible. Ce point est important pour relativiser les conséquences de l'incorporation de cet élément, notamment après un accident nucléaire.

Origine cosmique

Le rayonnement cosmique provient des réactions nucléaires dans les étoiles de forte activité ou des explosions de supernovas, il baigne continuellement le système solaire. Le soleil lui-même émet des rayonnements, essentiellement protoniques, dont l'intensité varie cycliquement avec l'activité solaire. Le rayonnement cosmique entraîne une exposition externe directe et interagit avec des éléments terrestres ou atmosphériques pour former des radionucléides secondaires.

Exposition directe par le rayonnement cosmique

Elle est, au niveau de la mer, d'environ 0,4 mSv par an. Elle augmente avec l'altitude, à cause de la moindre filtration atmosphérique, à raison

d'environ 0,5 mSv tous les 1 000 m. Elle est ainsi de 2 mSv à 3 900 m (La Paz, Bolivie). Durant les vols longs courriers à une altitude de 10 000 m, le débit de dose est, en moyenne, de 5 $\mu\text{Sv/h}$. À 15 000 m, en vol supersonique (Concorde, avions de chasse), le débit de dose est de 10 $\mu\text{Sv/h}$. Les astronautes en station orbitale reçoivent quotidiennement 0,8 mSv.

Radionucléides naturels secondaires

Ils sont très nombreux et résultent de l'action du rayonnement cosmique sur les atomes présents dans la planète et dans son atmosphère. Ils peuvent être des éléments lourds (comme le plutonium 239, produit naturellement par capture d'un neutron par un atome d'uranium 238) ou des éléments légers, comme le tritium, H 3, émetteur β de très faible énergie (19 keV) ou le carbone 14, émetteur β de 157 keV. Ce dernier est également présent dans tout organisme vivant. Chez un homme de 75 kg, il représente environ 4 000 Bq.

Origine interne

L'exposition interne est endogène ou intrinsèque, lorsqu'elle provient d'isotopes radioactifs d'éléments constitutifs de l'organisme, exogène lorsqu'elle provient de radionucléides incorporés par inhalation, ingestion ou injection. On parle alors de contamination, sauf s'il s'agit d'une substance administrée à des fins médicales de diagnostic ou de traitement.

Exposition endogène

Elle est constituée essentiellement du potassium 40 qui produit un rayonnement β d'environ 1,3 MeV et un rayonnement γ d'environ 1,4 MeV et du carbone 14, émetteur β pur d'énergie 157 keV, pour une activité moyenne totale d'environ 10 000 Bq chez un homme de 75 kg.

Exposition exogène

Elle est due principalement à l'inhalation de radon 222 et à la radioactivité naturelle des aliments.

Radon

C'est un gaz omniprésent dans l'air. C'est un produit de filiation de l'uranium 238. Émetteur α de période courte (4 jours), il se désintègre en d'autres émetteurs α (polonium et plomb) qui irradient l'épithélium bronchique et alvéolaire au contact. L'activité totale résultant de la désintégration d'un atome de radon et de celle de ses descendants est de 5 Bq. La concentration en radon est très variable selon les endroits et les conditions d'habitat. Elle est en moyenne, en France, de 65 Bq/m³ et l'on estime (UNSCEAR) que la dose annuelle résultante est d'environ 10 nSv. h⁻¹/Bq. m⁻³, ce qui conduit, selon le taux de présence dans les bâtiments, à des doses annuelles de 1 à 2 mSv par an. Dans certaines conditions, où la concentration dans l'air ambiant dépasse 1 000 Bq/m³, la dose annuelle peut dépasser les 20 mSv. Le polonium 210, mis en vedette à l'occasion de la contamination criminelle d'un résident russe au Royaume-Uni est un émetteur α de forte énergie (5,3 MeV) et de forte activité massique. Il est omniprésent, comme

Tableau 4-1**Quelques valeurs de radioactivité en rapport avec l'alimentation**

	Activité en Bq/kg
Sol	2 000
Engrais phosphatés	5 000
Pomme de terre	150
Lait de vache	60
Viande	100
Huile de table	180
Eau minérale	1 à 5
Eau de mer	13
Poisson	120
Crustacés	150* *essentiellement due au ^{210}Po
Moyenne de la ration alimentaire	100

le radon dont il descend, mais se concentre dans certains végétaux (tabac) et crustacés (moules, à raison de plusieurs centaines de Bq par kg de produit sec). En contamination volontaire, on estime que quelques dizaines de microgrammes, correspondant à quelques GBq, suffisent à induire des effets graves, potentiellement mortels, chez l'homme.

Radioactivité des aliments

L'alimentation est également source de radionucléides exogènes. Le [tableau 4-1](#) donne quelques exemples d'activité de notre environnement alimentaire. Signalons à ce propos, que l'irradiation des aliments afin de les stériliser ou d'empêcher leur germination se fait à dose très forte (plusieurs milliers de grays) mais qu'elle n'augmente pas leur radioactivité spontanée.

Contribution à l'exposition humaine

Il découle de ce qui précède que le rayonnement naturel varie considérablement d'une région à une autre, selon la composition du sous-sol et selon l'altitude. Par exemple, si l'on prend comme référence la valeur de 2,4 mSv, correspondant à l'exposition moyenne annuelle au rayonnement naturel de régions au sol sédimentaire, contenant peu d'éléments radioactifs, comme le centre de la France ou la Belgique, on constate que la dose totale de rayonnement reçue en Bretagne (sol granitique) est augmentée de 50 %, soit 3,5 mSv environ. En montagne (Alpes), la dose individuelle est augmentée par le rayonnement cosmique et elle est en moyenne de 3 mSv par an à 1 500 m d'altitude ([fig. 4-2](#)). Cette variation connaît des amplitudes encore plus grandes de par le monde, et peut même dépasser, dans certaines régions, la dose maximale admissible annuelle des professionnels de catégorie A ([tableau 4-2](#)).

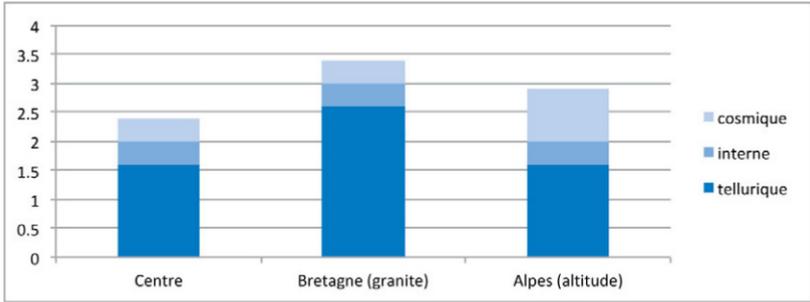


Figure 4-2

Variation de l'exposition moyenne annuelle au rayonnement naturel selon les régions (en mSv) : on constate que la variation par rapport au niveau de base (Île-de-France) peut aller jusqu'à 50 %, soit 1 mSv supplémentaire par an pour certaines régions (Bretagne). Pour les régions du monde les plus exposées, le niveau d'exposition correspond aux zones contrôlées vertes, voire jaunes, de la réglementation française.

Tableau 4-2

Valeurs d'exposition annuelle de populations fortement exposées

	Cause	Total annuel (mSv)
Montagne (3 500 m)	altitude	4,0
Personnel navigant	altitude	4,0
Régions à forte radioactivité tellurique		
Bretagne, massif central, Vosges	granite	3,5
Inde, province de Kerala	thorium	10 à 70
Brésil (Espírito Santo)	thorium	30
Iran, ville de Ramsar	uranium, thorium	130

La dose reçue par unité de temps du fait de l'exposition au rayonnement naturel représente une « échelle de valeurs » commode pour apprécier les niveaux de dose, en particulier dans le domaine des faibles doses (tableau 4-3).

Sources d'exposition artificielle

Elles résultent de l'activité médicale, des retombées des essais nucléaires aériens et de l'activité nucléaire civile.

Exposition d'origine médicale

Elle sera étudiée en détail dans les chapitres 9, 10 et 11. L'exposition due à l'activité médicale résulte des activités de radiodiagnostic, médecine

Tableau 4-3**Mémento d'équivalence des faibles doses et des doses reçues naturellement**

Dose	Correspondance en durée d'exposition au rayonnement naturel
2,4 mSv	1 an
0,2 mSv	1 mois
40 μ Sv	1 semaine
5 μ Sv	1 jour
0,2 μ Sv	1 heure

nucléaire et radiothérapie. On considère classiquement qu'elle ajoute environ 1 mSv à l'exposition naturelle de chaque individu en pays développé. En fait, cette assertion, qui repose sur la notion contestée de « dose collective » s'avère fausse quand on considère l'exposition par classes d'individus, parce que seule une petite partie des individus d'un pays subissent annuellement des explorations radiographiques (faibles doses) et une portion encore plus faible des irradiations thérapeutiques (fortes doses). Les recommandations 2007 de la CIPR insistent sur la nécessité de mettre fin à l'impropriété qui consistait à diviser la somme des expositions par le nombre d'individus de la population tout entière pour en déduire une exposition moyenne annuelle. On constate en effet que, pour une année donnée, les trois quarts de la population d'un pays développé ne reçoit aucune dose, un quart environ des doses très faibles (diagnostic dentaire et radiologie des extrémités) ou faibles (scanner et radiologie du tronc) et moins de 1 % les doses fortes de la radiothérapie, qui représentent cependant près du tiers de la dose globale (tableau 4-4). Cette analyse de répartition des doses montre bien l'inanité des publications qui, à partir de la relation linéaire sans seuil, calculent le nombre de morts par cancer qui seraient dues à l'exposition médicale, en redistribuant la dose totale à l'ensemble de la population.

Essais nucléaires

De 1945 à 1980, l'équivalent d'environ 220 Mt de TNT a été dispersé en explosions nucléaires dans l'atmosphère terrestre. Lors d'une explosion aérienne, la quasi-totalité des radionucléides formés gagne la stratosphère, y circule plusieurs années à la latitude du tir et ne peut s'en échapper qu'en petites quantités par les brèches de la tropopause. Les retombées sont donc très diluées et tous les produits de fission à période courte ont disparu avant de pouvoir retomber. L'essentiel des retombées a concerné l'hémisphère nord. Les caractéristiques des principaux radionucléides à prendre en compte en raison de leur longue période (carbone 14 césium 137 et strontium 90) sont rappelées dans le tableau 4-5.

Seuls les produits de fission ayant une période longue sont susceptibles de se déposer au sol. Ainsi, malgré les grandes quantités libérées, l'iode 131

Tableau 4-4

Répartition de l'exposition d'origine médicale dans un pays développé (France) en fonction de l'ordre de grandeur de la dose efficace résultante*

Nature de l'exposition	Ordre de grandeur de la dose efficace	Pourcentage de la population	Effectif	Dose totale (mSv) pour la population concernée
Aucune dose	0 mSv	75 %	45 000 000	0
Radiologie légère**	1 mSv	20 %	12 000 000	12 000 000
Radiologie lourde**	10 mSv	5 %	3 000 000	30 000 000
Radiothérapie	200 mSv	0,02 %	102 000	20 400 000

*Ce tableau montre bien l'hétérogénéité de la répartition et le caractère irréaliste de la conception de « dose collective médicale » qui attribuait une moyenne de 1 mSv annuel à l'ensemble de la population.

**La « radiologie légère » désigne le radiodiagnostic dentaire et la radiologie des extrémités, la « radiologie lourde » le scanner, la radiologie interventionnelle et les explorations à clichés multiples portant sur le tronc.

Tableau 4-5

Radionucléides dispersés par les explosions nucléaires expérimentales entre 1945 et 1980 dans l'hémisphère nord

Produit	Période	Quantité (Bq)	Dose efficace sur la vie d'un individu
Carbone 14	5 730 ans	2.10^{17}	2,6 mSv
Césium 137	30 ans	$1,3.10^{18}$	0,5 mSv
Strontium 90	28 ans	1.10^{18}	0,1 mSv

n'a pas été mesurable dans les retombées au sol. On voit que l'exposition externe résultant des dépôts cumulés de césium 137 et de strontium 90 reste très faible, inférieure à un dixième du débit de dose moyen d'un sol non granitique.

Industrie nucléaire

En fonctionnement normal

Rejets liquides

Ils sont constitués essentiellement de tritium, dont on fixe les rejets annuels autorisés (environ 30 TBq par an pour une puissance électrique de 1 000 MWe). Le reste de la radioactivité rejetée avec les effluents liquides est constitué par des produits d'activation et de corrosion en quantité infinitésimale (inférieures aux limites autorisées, de l'ordre de 10 GBq pour 1 000 MWe).

Rejets gazeux

Ils sont constitués essentiellement de gaz rares, de carbone 14, de tritium et d'iode 131. L'activité totale rejetée est d'environ 10 TBq pour une puissance électrique de 1 000 MWe.

En situation accidentelle

Trois accidents majeurs, aux conséquences très différentes, ont conduit à des rejets atmosphériques incontrôlés.

Windscale

Un incendie de réacteur dans cette centrale anglaise, en 1957, a conduit au relâchement de 740 TBq d'iode radioactif dans l'environnement et imposé des restrictions de consommation alimentaire (lait) pendant un mois aux alentours de la centrale.

Three-Mile Island

La fusion accidentelle du cœur d'un réacteur nucléaire à Harrisburg (Pennsylvanie, États-Unis), en 1979, a entraîné une très forte contamination du bâtiment réacteur mais, grâce à l'enceinte de confinement, les rejets d'iode 131 ont été très limités, estimés à 550 GBq, soit environ 1 000 fois moins qu'à Windscale. Il n'a pas été nécessaire de prendre de mesures de restriction alimentaire. Dans les deux cas, l'essentiel des rejets était gazeux et seul l'iode 131 était à prendre en compte au plan sanitaire.

Tchernobyl

À la suite de l'explosion d'un réacteur en 1986, l'absence d'enceinte de confinement et l'incendie du réacteur non maîtrisé pendant 10 jours ont permis le relâchement de quantités très importantes de radionucléides. Les retombées ont été maximales au voisinage de la centrale ; le périmètre le plus exposé dans les suites immédiates était délimité par un rayon d'environ 30 km autour de la centrale, ce qui concernait environ 120 000 personnes, qui ont été évacuées. La ville la plus proche, Prypiat (49 000 habitants) est à 3 km de la centrale. La dose moyenne reçue par les évacués était comprise entre 10 et 20 mSv, mais certains des habitants ont reçu des doses voisines de 400 mSv. Rappelons qu'il s'agit là de doses à l'organisme entier, mais que la thyroïde, notamment chez les enfants, a pu recevoir des doses beaucoup plus importantes (parfois plusieurs grays) en concentrant l'iode radioactif à défaut de traitement préventif par l'iode stable. L'essentiel de la radioactivité résiduelle est dû au césium 137 dont la période est de 30 ans. Les dépôts radioactifs au sol aux environs de Tchernobyl dans un rayon de 30 à 50 km ont été en moyenne de 600 kBq/m². Sur une superficie limitée à 3 000 km², la radioactivité dépassait 1 500 kBq/m². L'ordre de grandeur approximatif de la dose reçue pendant les 5 ans qui ont suivi l'accident, en tenant compte de la décroissance radioactive, était de 1 mSv/an pour 100 kBq/m². On estime que dans les « zones strictement contrôlées », où la radioactivité dépassait 600 kBq par m², la dose reçue en 5 ans, après l'accident, par les individus restés sur place a été de 35 mSv. Cette dose est donc environ trois fois plus importante que l'exposition naturelle cumulée pendant ces 5 ans. Les autorités soviétiques ont décidé d'évacuer les populations qui, si elles restaient sur place, recevraient sur toute leur vie une dose supérieure

à 350 mSv (qui correspondait à la dose maximale admissible pour le public en 70 ans, avec les normes de l'époque de 5 mSv/an).

De très nombreuses études épidémiologiques ont été entreprises sur les personnels intervenus pour lutter contre l'incendie de la centrale et la décontamination initiale (les « liquidateurs »). À ce jour, aucune ne permet de conclure à une augmentation significative du risque de leucémie ou de cancers solides dans cette population. En revanche, on a observé une forte augmentation des cancers de la thyroïde chez les enfants des territoires contaminés autour de la centrale, dont la thyroïde, carencée en iode dans ces régions, a absorbé des doses considérables d'iode radioactif. On estime à 7 000 environ le nombre de cancers observés chez les enfants et adolescents exposés à la contamination, dont heureusement la plupart ont guéri avec le traitement chirurgical, parfois complété par une curiethérapie métabolique. Le taux de mortalité a été inférieur à 1 %. En revanche il n'y a pas eu d'augmentation significative de cancers de la thyroïde dans la population exposée à l'âge adulte. Ces données soulignent l'importance cruciale de la saturation en iode de la thyroïde par administration précoce d'iode stable en cas d'accident avec risque de rejets d'iode. L'iodure de potassium sera administré en priorité aux enfants et femmes enceintes, la prise d'iode stable par les adultes n'ayant pas de réelle utilité car cet accident a confirmé la notion ancienne d'absence de radiosensibilité de la thyroïde de l'adulte.

À distance, le panache radioactif de la centrale fut à l'origine de la formation d'un nuage de fumées et poussières radioactives, tout d'abord dirigé sur l'Europe du Nord. La France fut atteinte à partir du 30 avril, par le sud-est, puis l'ensemble du territoire fut concerné, à l'exception de la Bretagne. Localement des pluies survenant au passage du nuage purent précipiter des quantités plus importantes de radioactivité au sol (cas de la Corse, de certaines régions des Alpes, de la Drôme et de l'Ardèche). La contamination radioactive résultant du passage de ce nuage a pu être externe (dépôt de particules radioactives) ou interne (par ingestion de produits porteurs de dépôts radioactifs ou de lait d'animaux ayant consommé des végétaux contaminés). Les doses moyennes délivrées à la population française pour cette période ont été minimales, comprises entre 0,02 et 0,05 mSv selon les régions, ce qui représente au maximum 2 % de l'exposition naturelle annuelle, c'est-à-dire environ une semaine d'exposition naturelle. L'exposition due au nuage reste donc très en deçà des simples fluctuations dues aux différences de nature des sols ou d'altitude. Pour le lait, le maximum de radioactivité mesurée a été de l'ordre de 400 Bq par litre de lait pendant quelques jours, pour les régions les plus exposées, avec quelques pics de valeurs de l'ordre de 1 000 Bq/l. Les calculs rétrospectifs prenant en compte tous les scénarios (y compris l'alimentation de nourrissons au lait de chèvre...) montrent que les doses maximales délivrées par l'iode 131 à la thyroïde des enfants les plus exposés auraient pu être de l'ordre de 10 à 20 mGy, niveaux pour lesquels tous les experts s'accordent sur l'absence d'effet à la thyroïde.

Fukushima*

Le 11 mars 2011, à la suite d'un tremblement de terre de magnitude 9 suivi d'un tsunami, la centrale nucléaire de Fukushima-Daiichi a perdu l'ensemble de ses sources d'alimentation électrique, conduisant à une perte progressive de la totalité de ses systèmes de refroidissement. Bien que les réacteurs aient été normalement stoppés par la procédure automatique d'arrêt d'urgence au moment du tremblement de terre, la température du cœur a augmenté du fait de la chaleur résiduelle, dégagée par les produits de fission, jusqu'à provoquer la fusion du cœur de 3 réacteurs et une augmentation dangereuse de la température des piscines de refroidissement de tous les réacteurs. Des explosions d'hydrogène ont endommagé les enceintes des réacteurs, avec pour conséquence des rejets radioactifs massifs qui restent cependant inférieurs à ceux de l'accident de Tchernobyl (tableau 4-6). Il faut noter qu'à la différence de Tchernobyl, il n'y a pas eu d'explosion des cuves, donc pas de dispersion des éléments du cœur des réacteurs et que seuls les éléments volatils (gaz rares, iodes, tellures et césium) ont été relâchés.

Grâce à l'orientation des vents dominants dans les premiers jours de l'accident, une grande partie de ces rejets est retombée dans l'océan Pacifique où elle s'est rapidement diluée mais, à la suite de modification des vents et de précipitations, une zone située sur un rayon nord-ouest d'un cercle de 40 km autour de la centrale a subi des retombées importantes.

L'évacuation précoce des populations dans un rayon de 20 km et les restrictions alimentaires, notamment sur le lait, ont permis de limiter l'exposition humaine. Les doses reçues par les habitants des régions atteintes restent faibles (tableau 4-7) et la saturation naturelle en iode de la thyroïde des habitants de ces régions, due au régime riche en algues, ainsi que la

Tableau 4-6

Estimation comparative des rejets d'iode et césium radioactifs des accidents de Tchernobyl et Fukushima (IRSN 2013)

	I-131 (10 ¹⁵ Bq)	Cs-137 (10 ¹⁵ Bq)
Fukushima (IRSN, 2012)	197	21
Tchernobyl (AIEA 2006)	1760	85

Tableau 4-7

Répartition des doses externes reçues au cours des 4 premiers mois après l'accident par la population de la préfecture de Fukushima selon les résultats de l'enquête réalisée par l'Université médicale de Fukushima (IRSN 2013)

Dose (mSv)	< 1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-10	10-15
Nb	234929	101738	15464	1122	393	799	118

* « Remerciements au Professeur André Aurengo pour son aide à la rédaction de ce paragraphe »

distribution précoce d'iode stable ont certainement protégé les enfants et adolescents des risques de cancer de la thyroïde, conséquence majeure de l'accident de Tchernobyl. Il faut néanmoins rappeler que le dépistage systématique permet de détecter un nombre élevé de nodules cancéreux. Une étude japonaise antérieure à l'accident (Kikuchi 2013) a montré que le taux de cancers ainsi dépistés dans une population générale était de 3 pour mille. Il faut donc s'attendre à la découverte de très nombreux cancers dans la population qui sera ainsi soumise à un dépistage systématique.

Pour les travailleurs ayant lutté pour maîtriser les conséquences de l'accident, les doses reçues sont également nettement moindres qu'à Tchernobyl. Le bilan effectué en 2013 porte sur environ 25 000 salariés de l'entreprise gérant la centrale (TEPCO) et des sous-traitants. La dose moyenne reçue de la date de l'accident au 31 décembre 2012 par ces travailleurs est de 25 mSv pour les salariés de TEPCO et de 10 mSv pour les salariés des sociétés sous-traitantes. Seuls six employés de la société TEPCO ont reçu une dose supérieure à 250 mSv, essentiellement par l'inhalation d'iode 131 en raison de l'absence de port de masques de protection adaptés. La dose maximale enregistrée est de 680 mSv. À ces niveaux d'exposition, il est probable qu'aucun effet sanitaire ne sera observable chez la quasi-totalité de ces personnels.

La seule conséquence majeure de cet accident reste la contamination du territoire environnant ; si la réhabilitation des milieux urbains est rapide, les zones forestières, qui représentent $\frac{2}{3}$ des territoires contaminés, vont conserver pendant plusieurs dizaines d'années des niveaux élevés de radioactivité, due au Césium 137. Les zones les plus contaminées (niveaux de contamination supérieurs à 600 000 Bq/m²) représentent une superficie d'environ 600 km² pour l'accident de Fukushima contre 13 000 km² pour l'accident de Tchernobyl, soit une superficie 20 fois moindre en gardant à l'esprit que l'espace habitable de l'archipel japonais est réduit. Les conséquences humaines du déplacement des populations et le coût de la décontamination sont également des éléments à prendre en considération dans le bilan de cet accident. La contamination du milieu marin devrait être rapidement diluée, à l'exception des sédiments proches de la centrale où vivent et se nourrissent certaines espèces de poissons et crustacés. Leur contamination devrait perdurer quelques années et nécessitera un contrôle de ces espèces.

L'accident nucléaire majeur de Fukushima aura donc des conséquences humaines, environnementales et économiques importantes, mais limitées. Il n'a pas entraîné (et n'entraînera probablement pas) de décès direct dû à la radioactivité. Il est frappant de constater qu'il a presque occulté, dans l'inconscient collectif, les 25 000 morts du tsunami lui-même. C'est une illustration de l'endoctrinement du public réussi par les organisations anti-nucléaires, puissamment aidées par les médias pour qui le catastrophisme fait l'audience. Au lieu d'utiliser les données scientifiques disponibles, provenant de sources indiscutables (OMS, UNSCEAR, universités japonaises), colligées notamment dans l'excellente documentation de l'IRSN,

les journalistes préfèrent donner la parole aux organisations écologiques et pratiquement jamais aux experts compétents parmi lesquels les médecins spécialistes de radioprotection, médecine nucléaire ou radiothérapie.

Uranium appauvri

L'uranium appauvri est le reliquat du processus d'enrichissement de l'uranium. En effet, l'uranium naturel est composé essentiellement d'uranium 238 (^{238}U) et contient moins de 1 % de l'isotope fissile (^{235}U), quantité insuffisante pour pouvoir être utilisé dans les réacteurs nucléaires conventionnels. L'enrichissement consiste à traiter une grande masse d'uranium pour qu'une partie soit plus riche en ^{235}U (uranium enrichi, à 3 % d' ^{235}U) et utilisable comme combustible nucléaire. L'autre partie contient donc beaucoup moins de ^{235}U (et de ^{234}U , d'activité massique beaucoup plus importante que celle de ^{235}U) que l'uranium naturel, c'est l'uranium appauvri. L'intérêt de ce métal vient de sa grande densité (supérieure à celle du plomb). Il a pour cela été utilisé dans beaucoup d'applications pacifiques, telles que le lest (quilles de voiliers, voilures d'avion). Cette très forte densité et sa dureté en font également un projectile capable de percer les blindages de char, et c'est dans cette application de projectile antichar qu'il a été utilisé pendant les conflits du golfe et du Kosovo et non en « bombardements » comme cela a pu être dit ou écrit de façon incorrecte. La radioactivité (activité massique) de l'uranium appauvri est d'environ la moitié de celle de l'uranium naturel, mais il garde les mêmes propriétés chimiques et aura donc le même métabolisme chez l'homme, voisin de celui du calcium. Les principaux organes cibles sont le rein, le squelette et le poumon (en cas d'inhalation). La toxicité de l'uranium est celle des métaux lourds, elle est avant tout rénale en cas d'ingestion répétée de quantités importantes. Cette toxicité est connue de longue date et a fait mettre en place une surveillance réglementaire pour les travailleurs de l'industrie et de l'armement, non pas à cause de sa radioactivité, très faible et sans effets sanitaires significatifs, mais à cause de sa toxicité chimique lorsqu'il peut être absorbé par ingestion ou inhalation. De nombreuses études publiées ont recherché d'éventuels effets chez les travailleurs exposés et aucune n'a montré d'effet sanitaire chez ces travailleurs. Il faut signaler que l'absorption et l'élimination d'uranium peuvent varier de plusieurs ordres de grandeur selon les régions en fonction de la teneur en uranium du sous-sol. Elle est ainsi beaucoup plus élevée que la moyenne nationale dans la Creuse ou le Limousin ainsi que dans certains pays scandinaves. En cas d'utilisation de projectiles à l'uranium appauvri, l'uranium pulvérisé s'enflamme après l'impact, se dépose ensuite en poussière puis s'incorpore dans les sols. Une campagne menée par les organisations antinucléaires a voulu faire de cette contamination des sols une source de danger potentiel pour les soldats ayant participé aux opérations et pour les populations. Un raisonnement simple montre pourtant que cet uranium déposé localement ne représente qu'une fraction très faible de l'uranium naturellement présent dans les sols. En effet la terre contient en moyenne

3 g d'uranium naturel par tonne. Pour une surface d'un km² de terrain, sur 10 cm de profondeur, soit un volume de 100 000 m³ et une masse de 120 000 tonnes pour une densité moyenne du sol de 1,2 t/m³, le sol contient donc environ 360 kg d'uranium naturel ! La dispersion de quelques dizaines de kg d'uranium appauvri, deux fois moins radioactif que l'uranium naturellement présent, sur un champ de bataille d'un km² ne peut donc avoir aucun impact sur l'environnement contrairement à ce qu'ont voulu faire croire certaines campagnes médiatiques. C'est pourquoi les mesures sur le terrain ne montrent aucune augmentation de radioactivité et le risque résiduel d'exposition et de contamination radioactive est inexistant.

Conclusion

L'exposition aux rayonnements ionisants d'origine naturelle est une constante de la vie de tout être vivant. Elle doit être bien connue pour servir de référence lorsque l'on aborde l'exposition d'origine humaine et permet d'en relativiser ses effets à faible dose.

L'exposition liée aux activités humaines est due aux activités nucléaires civiles et militaires et représente environ 1% du total de l'exposition annuelle des populations. L'exposition d'origine médicale ne peut pas être additionnée sans précaution à cette exposition en raison de l'hétérogénéité de la distribution.

Vérifiez si vous avez assimilé les points importants de ce chapitre en répondant au questionnaire en fin d'ouvrage.

Pour en savoir plus

Le Heron J. Estimation of effective dose to the patient during medical X-ray examination from measurements of the dose-area product. *Phys Med Biol* 1992;11: 2117-26.

Cordoliani Y-S. La dose efficace individuelle moyenne n'existe pas... et pourtant elle augmente ! *J Radiol* 2010;91:449-50.

Les leçons de Tchernobyl. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). *Accident à la centrale de Fukushima Daiichi (Japon)*. IRSN. <http://www.irsn.fr/>

5 Effets biologiques des rayonnements ionisants

Les premiers effets cliniques attribuables aux rayonnements ionisants (RI) ont été rapportés très tôt après la découverte des rayonnements X et de la radioactivité à la fin du XIXe siècle. La première radiolésion a été décrite en 1896, les premiers effets tératogènes en 1901 et le premier cancer humain radio-induit en 1902. La cancérogenèse était démontrée expérimentalement en 1910. La multiplicité de ces conséquences cliniques a ouvert la voie à la radiobiologie, étude des mécanismes aboutissant à ces lésions, afin de les prévenir.

L'unité élémentaire d'un tissu vivant est la cellule. Ce chapitre sera consacré à la description des effets des rayonnements à l'échelle cellulaire dans un premier temps, à l'échelle moléculaire dans un deuxième temps. Ce second niveau d'étude permettra de comprendre les effets cellulaires.

Interaction des rayonnements avec la matière vivante

Les rayonnements ionisants interagissent avec les atomes constituant la matière vivante comme avec les atomes de la matière inorganique. Les mécanismes d'interaction ont été présentés en détail au chapitre 2. Une notion fondamentale à rappeler pour bien percevoir l'effet des rayonnements dans les milieux biologiques est le faible transfert énergétique concerné. Ainsi, une dose de 1 gray absorbée dans un tissu correspond par définition à une énergie de 1 Joule transférée à un kilogramme de matière. En termes d'énergie dissipée sous forme thermique dans un milieu aqueux, cela équivaut à une élévation de température d'un quart de millième de degré Celsius. Ceci signifie que l'effet thermique, très faible, ne contribue en rien aux conséquences d'une telle dose, pourtant responsable d'effets biologiques significatifs. Les effets biologiques sont donc d'origine biochimique, conséquence des ionisations produites au sein du milieu irradié, sans participation d'une composante physique.

De même, cette dose de 1 gray produit une ionisation pour 100 millions de molécules d'eau. Ceci correspond à une augmentation du nombre d'ions apparaissant spontanément dans une cellule d'un ion supplémentaire pour 100 000 ions « naturels ». L'effet des rayonnements est donc, là encore, quantitativement minime. Cependant, les ions produits conduisent à la formation d'espèces chimiques très réactives. Il s'agit de radicaux libres, structures chimiques comportant un électron périphérique non apparié à

l'origine de ces propriétés. Ainsi, le radical hydrogène, noté $H\bullet$, est-il puissamment réducteur et le radical hydroxyle, $HO\bullet$, très fortement oxydant. La formation de ces espèces sera précisée plus loin dans la description du processus de radiolyse de l'eau.

Les ionisations engendrées par un rayonnement sont primaires, produites par le rayonnement lui-même, ou secondaires, induites par les électrons mis en mouvement. Elles sont distribuées le long de la trajectoire du rayonnement. Le paramètre majeur est, nous l'avons vu, la densité des interactions le long de la trajectoire du rayonnement dans le milieu. Elle permet de définir le transfert linéique d'énergie (TLE), caractéristique d'un rayonnement donné pour une énergie donnée. Ainsi, les interactions d'un rayonnement présentant un TLE élevé avec une structure moléculaire ont un risque élevé de lésions de celle-ci. À dose absorbée égale, les effets biologiques d'un rayonnement à TLE élevé seront donc potentiellement beaucoup plus importants que ceux d'un rayonnement à faible TLE.

Cette propriété est à l'origine de la notion de facteur de qualité des rayonnements qui tient compte de la différence de TLE existant entre les rayonnements électromagnétiques et les différentes particules (*cf.* chapitre 3). Pour un effet donné, on peut aussi faire le rapport entre l'énergie nécessaire d'un rayonnement donné pour obtenir cet effet et l'énergie nécessaire avec un autre rayonnement pour obtenir le même effet. Ce rapport est connu sous le nom d'effet biologique relatif des rayonnements (EBR). Il est défini spécifiquement pour chaque effet.

Effets cellulaires

Les effets élémentaires sur la cellule ont été pressentis dès l'identification des effets biologiques macroscopiques des rayonnements ionisants. En 1906, Bergonié et Tribondeau ont établi une relation entre la radiosensibilité des cellules et leur activité mitotique, leur devenir caryocinétique (nombre de mitoses programmées dans la vie du sujet) et leur différenciation. Plus une cellule se divise souvent, plus le nombre de divisions qu'elle doit accomplir est grand, moins elle est différenciée et plus elle est radiosensible. En corollaire, plus une cellule est différenciée, moins souvent et moins longtemps elle se multiplie et plus elle est radiorésistante. C'est cette loi qui explique qu'au sein d'un tissu irradié, ce sont les cellules souches non différenciées, dont la tâche est de fournir par multiplication les cellules qui vont secondairement se différencier pour construire le tissu, qui sont les premières éliminées. Cette loi est également à la base de toutes les applications des RI dans le traitement des affections néoplasiques puisque la capacité de prolifération des cellules malignes est supérieure à celle des cellules normales et les affecte donc d'une radiosensibilité plus élevée.

Courbes de survie et leur signification

Les expériences d'irradiation de cultures cellulaires ont permis de construire les premières théories relatives aux mécanismes d'action des RI sur les cellules et de fournir des évaluations quantitatives des effets observés.

En fonction de la forme des courbes de survie, il est possible de déduire plusieurs types de comportement cellulaire.

Courbe exponentielle (fig. 5-1)

Le modèle exponentiel (ou linéaire en représentation semi-logarithmique), chez les bactéries, répond à une équation simple :

$$S = e^{-D/D_0}$$

où S est la survie c'est-à-dire le rapport du nombre de cellules survivantes sur le nombre initial de cellules, N/N_0 et D_0 la dose pour laquelle, il reste 37 % de cellules survivantes, il s'agit alors de modèles à une cible létale et un impact est suffisant pour détruire une cellule, selon un modèle aléatoire.

Courbe sigmoïde (fig. 5-2)

Ce modèle avec épaulement, en représentation semi-logarithmique, correspond à un cas de figure plus complexe, rencontré pour les cellules de mammifères. Il s'explique non plus par le modèle à plusieurs cibles sublétales, non étayé par les données radiobiologiques modernes mais par la mise en évidence des systèmes de réparation cellulaire à faible dose.

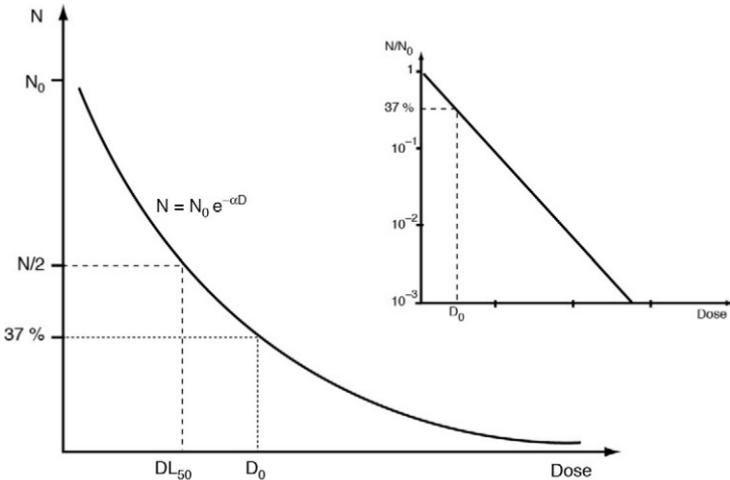


Figure 5-1

Courbe de survie cellulaire exponentielle.

On constate que le nombre de cellules survivantes diminue de façon exponentielle avec la dose. En coordonnées semi-logarithmiques, cette courbe est représentée par une droite de pente α , qui exprime la radiosensibilité de la population cellulaire. On utilise pour exprimer cette sensibilité la dose D_0 , égale à l'inverse de la pente, $1/\alpha$, qui est donc la dose qui laisse survivre 37 % des cellules. La dose qui tue la moitié des cellules est appelée « dose létale 50 » (DL_{50}). Elle est égale à $D_0 \times \text{Log}2$ (soit $0,693D_0$).

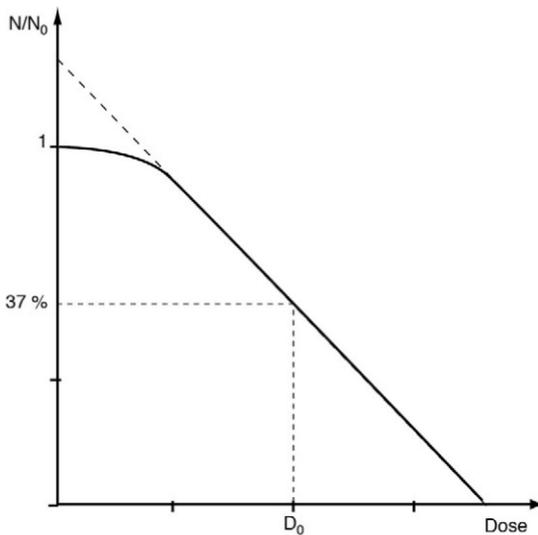


Figure 5-2

Courbe de survie avec épaulement.

Elle s'observe avec la plupart des cellules de mammifères. La partie initiale de la courbe n'est plus rectiligne en coordonnées semi-logarithmiques. D_0 n'est calculable qu'à partir de cette partie rectiligne, elle augmente donc par rapport à la courbe exponentielle. Cette courbe traduit la capacité de réparation des cellules aux faibles doses.

Effets déterministes

Ces courbes modélisent la mort cellulaire induite par les RI, qui est à l'origine des effets déterministes des rayonnements. Ces effets apparaissent au-dessus d'un seuil, dépendant de l'effet et du tissu considéré, et leur gravité augmente ensuite avec la dose. Le seuil d'apparition des symptômes cliniques est relié au pourcentage de cellules d'un tissu dont la mort est nécessaire pour désorganiser suffisamment sa fonction. La gravité clinique augmente avec la dose délivrée au tissu puisque le pourcentage de cellules tuées augmente lui aussi avec cette dose. Enfin, pour un tissu donné, il existe toujours un intervalle libre entre l'irradiation et l'apparition des symptômes ; ce délai est lié d'une part à la durée de vie des cellules différenciées, moins radiosensibles que les cellules souches et d'autre part à la mort cellulaire différée avant laquelle se produisent quelques divisions des cellules souches ; lorsque la dose augmente, la fraction de mort immédiate augmente et l'accélération de l'élimination des cellules souches est corrélée à la gravité de l'état clinique observé à la phase d'état.

Effets aléatoires ou stochastiques

Les RI peuvent aussi léser la cellule sans la tuer, en créant des altérations cellulaires compatibles avec la survie cellulaire mais potentiellement néfastes

à plus ou moins long terme. Les effets de ce type les plus importants sont les modifications chromosomiques. Ces effets relèvent d'un phénomène statistique au sein de la population cellulaire car ils surviennent au hasard dans les cellules. Ce sont des effets non déterministes, ou stochastiques des RI. Ils sont de deux types en fonction de la nature de la cellule concernée : effet cancérogène lorsque la cellule concernée est une cellule somatique et effet héréditaire transmissible lorsque la cellule est de nature germinale. Les effets stochastiques s'opposent en tous points dans leurs caractéristiques aux effets déterministes.

- Ils ne sont pas spécifiques : un cancer ou une mutation transmissible induit par les RI est indiscernable d'une affection spontanée naturelle.
- Leur gravité est sans lien avec la dose car une fois déclenchées, ces affections évoluent pour leur propre compte avec le même génie évolutif que les affections naturelles.
- Leur probabilité de survenue croît avec la dose jusqu'à un maximum où le nombre de cellules tuées devient trop important pour laisser suffisamment de cellules susceptibles d'être à l'origine d'une affection cancéreuse.
- Ils n'ont, en théorie, pas de seuil de survenue car un seul impact dans une cellule pourrait être à l'origine d'un cancer ; en réalité la situation est beaucoup plus complexe et il n'existe pas à ce jour de démonstration, épidémiologique ou biologique, de ce postulat qui est à la base de l'utilisation de la relation linéaire sans seuil pour calculer les effets des faibles doses de RI.

On voit donc que les effets des RI à l'échelle cellulaire ne sont pas univoques. Il est nécessaire d'envisager l'échelle moléculaire pour trouver des éléments de réponse à la diversité des effets observés.

Effets moléculaires

Au sein d'une cellule peuvent être identifiées plusieurs cibles potentielles : la membrane cellulaire, les organites cytoplasmiques et le noyau. Les deux premières de ces structures ne sont concernées que par les doses les plus fortes qui conduisent dans tous les cas à la mort cellulaire. C'est l'atteinte du noyau, plus particulièrement de son élément le plus noble, la molécule d'ADN porteuse du code génétique de la cellule, qui rend compte des effets stochastiques.

La molécule d'ADN présente de multiples particularités et l'une des plus intéressantes est l'existence d'une machinerie enzymatique très complexe dédiée au maintien de son intégrité et à la réparation la plus fidèle possible d'éventuelles lésions. Cet équipement enzymatique est fondamental pour la survie cellulaire, ce qui explique qu'il soit très constant pour l'ensemble des cellules et organismes vivants depuis les bactéries jusqu'aux mammifères. Ceci a permis d'extrapoler de nombreuses observations effectuées sur des organismes simples aux cellules de mammifères. Les lésions de l'ADN peuvent procéder de nombreuses causes, intrinsèques à la cellule ou extrinsèques. La plus importante est certainement liée à la production de radicaux libres au cours du métabolisme cellulaire de l'oxygène. Ce dernier

peut donc être considéré comme indispensable à la vie cellulaire mais également comme la source des espèces chimiques les plus toxiques pour l'ADN. Les RI font partie des agresseurs extrinsèques potentiels, au même titre que de multiples toxiques chimiques, souvent plus efficaces pour induire des anomalies de l'ADN.

Lésions de l'ADN

Les RI les provoquent par l'intermédiaire des ionisations moléculaires. Il est important de préciser d'emblée que les lésions provoquées par les rayonnements ne sont pas spécifiques. Ainsi, les lésions qui vont être décrites peuvent survenir spontanément dans une cellule ou être induites par d'autres toxiques. Il n'est donc pas possible d'affirmer la responsabilité de RI dans la genèse de lésions présentes dans une cellule. Il n'existe qu'un élément d'orientation lié au mode d'action des rayonnements, à savoir le caractère localement concentré de lésions sur un segment de l'ADN. Cette densité de lésions peut être expliquée par la localisation des interactions causales sur la trajectoire du rayonnement surtout en cas de TLE élevé.

Les RI vont exercer leur effet sur l'ADN de façon directe et indirecte.

Effets directs

La voie directe de lésion de l'ADN résulte de la création d'ionisations au sein de la molécule d'ADN elle-même, qu'elles surviennent dans les bases ou le squelette phosphodiester. Elle représente environ 40 % du nombre total de lésions produites par l'irradiation.

Effets indirects

Création de radicaux libres

La voie indirecte implique la molécule d'eau comme intermédiaire. L'eau est le composant majoritaire de toute structure vivante et, à ce titre, les interactions des RI avec les molécules d'eau sont les plus probables. Au cours de cette interaction, la molécule d'eau subit un processus appelé radiolyse. Il conduit à la formation des espèces très réactives déjà évoquées, les radicaux libres HO• et H• (fig. 5-3). La durée de vie de ces éléments est très courte, de l'ordre de 10^{-10} à 10^{-15} seconde. C'est dire que leur recombinaison est extrêmement rapide. Cependant, s'ils sont produits à proximité de la molécule d'ADN, ils vont pouvoir réagir avec elle et altérer sa structure par oxydation ou réduction.

Cette voie indirecte est influencée par la présence d'oxygène dans la cellule. Sa présence en grande quantité dans la cellule qui subit une irradiation, va favoriser la formation, à partir des radicaux libres, d'eau oxygénée H₂O₂, ainsi que d'autres espèces oxydantes, qui pourront également provoquer des lésions de l'ADN. L'oxygène amplifie les conséquences de l'irradiation par cette production secondaire d'agents puissamment oxydants. Ceci constitue le fondement de l'effet oxygène : une cellule bien oxygénée est plus radiosensible qu'une cellule en hypoxie car il existe plus d'effecteurs disponibles pour relayer les effets des RI. Inversement, l'hypoxie a un

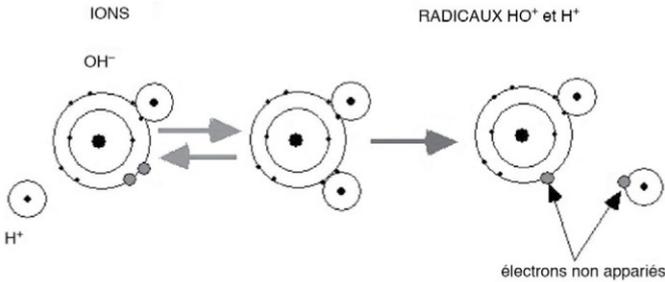


Figure 5-3

Différence entre ions et radicaux libres : une molécule d'eau s'ionise en se séparant d'un atome d'hydrogène mais en gardant sur son orbite périphérique la paire d'électrons correspondant à la liaison covalente.

Chaque ion formé est peu réactif car il n'a pas d'électron non apparié. En revanche, la formation de radicaux libres résulte de la rupture de la liaison covalente et chaque fragment conserve un électron non apparié qui lui confère une très forte réactivité.

effet protecteur, pénalisant en radiothérapie anticancéreuse car les grosses tumeurs sont fréquemment en situation hypoxique par défaut de perfusion tumorale. La conséquence en est une radiosensibilité moindre et une réduction des possibilités de traitement car il est souvent difficile d'accroître les doses pour compenser la diminution de radiosensibilité tumorale sans entraîner de lésion des tissus adjacents. Une autre conséquence est l'individualisation au sein des zones hypoxiques de la tumeur de foyers de résistance au traitement par irradiation, qui seront à l'origine d'une récurrence rapide après la fin du traitement.

Effet abscopal (bystander)

Cet effet, dont la dénomination implique qu'il survient à côté de la cible, a été observé lors d'irradiation de cultures cellulaires par des faisceaux de particules suffisamment étroits pour ne frapper qu'une cellule. On observe des modifications des cellules voisines, notamment des modulations de l'expression de certains gènes, des mutations et des lésions de l'ADN et, éventuellement, la mort de cellules n'ayant pas réparé les lésions de l'ADN. Cet effet est probablement induit par un échange de transmetteurs entre les cellules irradiées et les cellules voisines par les ponts et jonctions intercellulaires.

Les lésions de l'ADN sont diverses. Tous ses éléments peuvent être concernés, bases ou squelette phosphodiester, sur un ou deux brins. On peut distinguer les lésions intéressant un brin, les deux ou impliquant une structure externe.

Cassure monobrin

Les lésions monobrins peuvent consister en la perte d'une base, d'un nucléotide ou la modification d'une base. La création d'un pontage intrabrin entre

deux molécules adjacentes de thymidine peut également survenir. Ces lésions induisent des altérations du code génétique et des anomalies de transcription. Une lésion du support phosphodiester peut conduire à une rupture du brin d'ADN avec la perte d'un nombre plus ou moins grand de nucléotides du brin concerné.

Cassure double brin

Lorsque les deux brins sont concernés, on peut également observer la formation de dimères de thymidine réalisant des ponts interbrins qui empêchent la séparation des brins en vue de la réplication ou de la transcription. Au maximum, l'atteinte de la structure phosphodiester des deux brins aboutit à une cassure double brin (CDB) qui correspond à une rupture complète de la molécule d'ADN. Cet événement conduit nécessairement à la perte d'une séquence plus ou moins longue de nucléotides et donc d'information génétique.

Lésions complexes (épigénétiques)

Enfin, les lésions de l'ADN peuvent impliquer des structures adjacentes sous la forme de pontages avec des protéines nucléaires, des histones par exemple, ou avec des molécules d'ARN par la formation de dimères entre la thymidine et l'uracile. Dans les deux cas surviennent des anomalies de fonctionnement des systèmes de transcription et de réplication. Ces processus de modification du patrimoine génétique d'une cellule par combinaison avec d'autres éléments que l'ADN sont appelés « effets épigénétiques ».

Les lésions de l'ADN surviennent au lieu de l'interaction ou à distance, l'énergie résultante pouvant être transmise le long de la molécule pour agir en un point de fragilité de la chaîne. Des lésions et réarrangements particuliers peuvent ainsi être favorisés et survenir préférentiellement malgré une distribution aléatoire des interactions.

Lésions chromosomiques

Les lésions de la molécule d'ADN ont également des conséquences à une échelle supérieure, chromosomique ou chromatidique, visible microscopiquement. Elles sont liées à la survenue de lésions double brin qui rompent la molécule d'ADN. Diverses lésions peuvent être observées. Une délétion correspond à la perte d'un segment plus ou moins long de bras d'un chromosome. Une telle lésion comporte nécessairement une perte de matériel génétique et de la fonction protéique correspondante. Par ailleurs, peuvent survenir des ruptures avec réarrangement chromosomique ou chromatidique : inversion d'un segment de bras, translocation, transfert d'un segment de bras dans un autre bras, formation d'anneaux acentriques ou de chromosomes dicentriques. De tels réarrangements peuvent conduire à la mise en contact de gènes normalement indépendants. Ceci est une voie importante d'activation de gènes oncogènes impliqués dans la carcinogenèse radio-induite. Un exemple démonstratif est l'activation par translocation des gènes RET et PTC (translocation RET-PTC) à l'origine du développement du cancer de la thyroïde après exposition à de fortes doses d'iode radioactif.

Instabilité génétique

Certaines mutations peuvent apparaître dans les cellules-filles de cellules irradiées qui ne présentent pas ces mutations. Plusieurs mécanismes sont invoqués pour expliquer ce phénomène : des altérations des protéines de signalisation de dommages de l'ADN (protéine P53 notamment), ou des altérations des télomères, portions terminales des chromosomes impliquées dans le bon déroulement de la méiose.

Protection et réparation de l'ADN

La survie des êtres vivants et des espèces est tributaire du système de maintenance et réparation de la molécule d'ADN. L'intégrité de l'ADN est en permanence compromise par la survenue de lésions spontanées en relation avec le métabolisme oxydatif de la cellule. Ainsi, pour une cellule de mam-mifère, plusieurs milliers de lésions de l'ADN surviennent par heure du seul fait du métabolisme oxydatif. On estime qu'il persiste en moyenne une mutation résiduelle par cellule et jour, lésion résiduelle vraisemblablement impliquée dans les phénomènes de vieillissement et de cancérogenèse. Ceci indique l'efficacité remarquable du système de réparation mais aussi le fait qu'il n'est pas totalement fiable puisque des lésions résiduelles persistent. C'est donc dans un contexte de réparation permanente de lésions à jet continu de l'ADN qu'il faut intégrer l'action des RI. Ainsi, une dose d'un gray de RX détermine dans une cellule, en moyenne, 1 000 cassures simple brin pour 40 à 50 cassures double brin et 2 000 lésions de base, qui s'ajoutent aux lésions spontanées, dont elles on ne peut les distinguer.

On peut distinguer deux grandes fonctions de maintenance de l'ADN. L'une est dévolue à la détoxification de radicaux libres et l'autre à la détection des lésions de l'ADN et à la réparation proprement dite.

Défense contre les radicaux libres et le stress oxydatif

Après exposition à faible dose de RI, la cellule réagit en stimulant des mécanismes de défense enzymatiques qui sont des capteurs de radicaux libres et des antioxydants (superoxyde dismutase ou SOD, catalase, déméthylase et glutathion notamment). Ces enzymes et anti-oxygènes sont mis en œuvre très rapidement pour intercepter ou neutraliser les radicaux libres et les oxydants dès leur formation. Ils expliquent en partie le phénomène de réponse adaptative (*cf. infra*).

Mécanismes de protection

Les systèmes de surveillance des lésions de l'ADN ont pour finalité d'éviter toute rémanence d'une lésion qui pérenniserait une altération génétique.

Élimination des cellules lésées

Si les lésions sont trop importantes ou non réparables, la cellule meurt immédiatement ou après quelques divisions. Cette mort cellulaire différée est appelée apoptose. C'est un processus actif qui comporte une autodestruction enzymatique de la cellule et l'expression membranaire de

récepteurs provoquant l'action des cellules du système immunitaire. Ce processus repose sur des mécanismes génétiques complexes, déclenchés par la survenue des lésions de l'ADN, parmi lesquels le gène TP53 joue un rôle clef. Il est à noter que ce processus peut également être déclenché de façon externe par les systèmes de signalisation intercellulaire destinés à maintenir l'homéostasie d'un tissu. Enfin, le système immunitaire peut, indépendamment, intervenir pour éliminer une cellule altérée. Quelle que soit la voie aboutissant à la mort cellulaire, il est certain que cette dernière empêche la pérennisation d'une anomalie génétique importante, potentiellement délétère pour l'individu ou l'espèce.

Réparation de l'ADN

Lorsque les lésions de l'ADN ne sont pas incompatibles avec la survie cellulaire, l'action du système de réparation aura deux types de conséquences. La réparation peut être fidèle avec restitution *ad integrum* de l'ADN. Le code génétique est conservé et la cellule poursuit une vie normale. Si la réparation est fautive, l'altération persistante de l'ADN pourra être transmise aux descendantes de la cellule irradiée. C'est le point de départ de la cancérogenèse lorsque la cellule est somatique et des mutations héréditaires lorsque la cellule est germinale. On retrouve ici les effets stochastiques des rayonnements. Ces effets ne se manifesteront qu'après les divisions successives des cellules et un mode supplémentaire de sauvegarde existe pour les cellules engagées dans un processus de différenciation car, au stade de différenciation terminale la cellule perd toute capacité proliférative et une lésion peut donc rester muette si le nombre de divisions après sa mutation n'a pas permis l'expression de la mutation.

La réparation d'une lésion de l'ADN comporte plusieurs étapes avec la reconnaissance des lésions puis la réparation proprement dite. Il se produit en parallèle un arrêt de la progression du cycle cellulaire en fin de phase G1 ou G2. Cette suspension du cycle permet au système de réparation de disposer de temps pour exercer son action. Le contrôle du cycle cellulaire est donc essentiel pour permettre à la réparation de s'effectuer. Ici intervient également la protéine P53. Un déficit de cette protéine, liée à une altération du gène TP53 prédispose au cancer, en empêchant la réparation des lésions de l'ADN. Ces lésions surviennent naturellement dans toute cellule du fait du métabolisme oxydatif mais leur nombre augmente sous l'action de différents mutagènes, physiques ou chimiques, parmi lesquels les RI. C'est cette altération génétique qui est en cause dans la maladie de Li-Fraumeni, affection héréditaire à transmission autosomique dominante qui prédispose au cancer. Par ailleurs, la mise en œuvre de la protéine P53 est sous la dépendance de phosphokinases, elles-mêmes dépendantes d'un gène spécifique, en cause dans l'ataxie télangiectasie (ATM) et cette maladie prédispose également aux affections cancéreuses par défaut de réparation des CDB, induites par les RI et autres mutagènes. D'autres gènes ont été identifiés dans la prédisposition au cancer, notamment le gène BrCa dans le cancer du sein. Ce déficit génétique des enzymes de réparation des lésions nucléaires explique non seulement la survenue plus fréquente de tumeurs

chez les sujets porteurs de l'anomalie génétique, mais également une moins grande tolérance aux autres effets des RI. Les effets déterministes en particulier sont plus sévères chez ces sujets, ce qui complique ou peut rendre difficile la radiothérapie, notamment en raison de l'intensité inhabituelle des effets secondaires cutanés.

Les lésions l'ADN sont plus faciles à réparer lorsqu'elles ne concernent que l'un des brins, les lésions des deux brins étant le plus souvent incomplètement réparées.

Cassure monobrin

Pour réparer une lésion sur un seul brin, le système enzymatique prend modèle sur le brin restant pour obtenir une copie fidèle de la molécule, synthétise la portion manquante et la recolle à l'emplacement du segment lésé (fig. 5-4). Une telle réparation est rapide, effectuée en moyenne en moins de 10 minutes.

Cassure double brin

Les réparations de lésions double brin sont plus difficiles. Il existe deux modes de réparation de ce type de lésions. Le premier est la ligature non

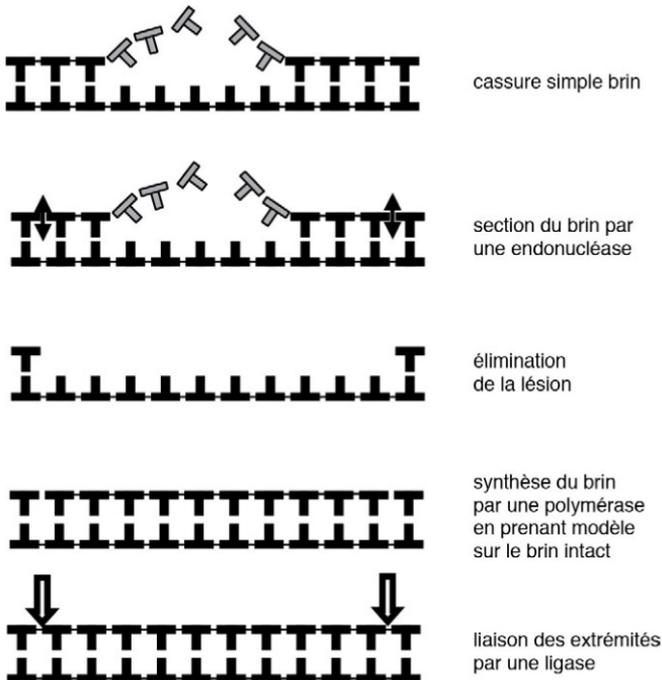


Figure 5-4

Schéma d'une réparation de lésion d'un brin de l'ADN, faisant intervenir successivement plusieurs enzymes spécialisées.

homologue qui aboutit à la simple réunion des deux extrémités sans respect des nucléotides perdus. C'est une réparation fautive. Le second mode est plus complexe puisqu'il implique la reconstruction homologue des brins d'ADN à partir du second chromosome. Dans ce cas, la réparation peut être fidèle. Une réserve doit cependant être apportée dans le cas où le chromosome intact servant de référence comporte une mutation récessive sur un des gènes concernés, les deux allèles porteront la mutation après la réparation et celle-ci pourra donc s'exprimer. La complexité de la réparation des lésions double brin allonge le temps de réparation, supérieur à 30 minutes.

Influence du débit de dose

Le processus de lésion-réparation explique l'effet du débit de dose pour les rayonnements ionisants à TLE faible. Plusieurs impacts cellulaires de ce type de rayonnement en un temps restreint sont nécessaires pour déterminer une atteinte cellulaire létale. Si l'on formule cette observation en termes de lésions de l'ADN, la faible densité d'interactions le long de la trajectoire de ces rayonnements ne détermine qu'une faible densité de lésions et un nombre total de lésions petit par rapport au bruit de fond spontané. De ce fait, le système de réparation peut réparer l'ensemble des lésions produites. En revanche, si le débit d'irradiation augmente, la fréquence d'apparition des lésions augmente également, jusqu'à saturer les capacités du système de réparation, ce qui laisse persister de plus en plus de lésions aboutissant à terme à la mort cellulaire. À l'échelle macroscopique, lorsque l'irradiation est délivrée de façon prolongée ou fractionnée, il faudra, pour un même effet, délivrer une dose totale très supérieure à la dose qui produit cette influence lorsqu'elle est administrée en une fois dans un bref laps de temps. Il faut noter que cette influence n'existe pas pour les rayonnements à TLE élevé (rayonnement α , neutrons et protons) dans la mesure où la densité de lésions le long d'une trajectoire est telle qu'il se produit simultanément un très grand nombre de lésions. De plus, la combinaison de multiples lésions groupées au même endroit de la molécule génère des atteintes très complexes difficilement réparables.

Influence du fractionnement et réponse adaptative

De même que l'abaissement du débit de dose diminue l'effet d'une irradiation, en permettant aux mécanismes de réparation d'effectuer plus complètement la restauration de l'ADN, le fractionnement d'une dose de RI diminue le nombre de morts cellulaires et de mutations. Cet effet est utilisé en radiothérapie car les cellules saines d'un tissu ont des mécanismes de réparation plus efficaces que les cellules tumorales. On délivre donc l'irradiation en fractions (généralement de l'ordre de 2 Gy par jour) ; dans l'intervalle les tissus sains peuvent réparer leurs lésions plus complètement que les cellules cancéreuses, ce qui permet *in fine* d'administrer la totalité de la dose tumoricide sans créer de lésions irréversibles des tissus avoisinants.

Les mécanismes de maintien de l'intégrité de l'ADN sont également à l'origine du phénomène de réponse adaptative, observé expérimentalement à faible dose d'irradiation. Ainsi, lorsqu'une culture cellulaire est pré-irradiée

à faible dose, la dose nécessaire pour obtenir le même taux de mort cellulaire est supérieure à celle nécessaire en l'absence de pré-irradiation. Cette protection relative vis-à-vis des RI débute quelques heures après la pré-irradiation et persiste pendant deux à trois jours avant de s'éteindre. Il a été observé dans ces cellules une activité accrue des enzymes intervenant dans la détoxification des radicaux libres ainsi que de celles qui sont impliquées dans la réparation de l'ADN. Ces données sont à l'origine de l'hypothèse de l'hormésis, amélioration des performances des mécanismes de réparation de l'ADN ayant pour corollaire un effet bénéfique pour la cellule et l'individu pour les faibles doses d'irradiation. Cependant, aucun effet protecteur significatif vis-à-vis des maladies néoplasiques n'a pu être démontré en expérimentation animale ou à l'échelle de populations humaines. Le seul résultat actuellement établi par de multiples études épidémiologiques dans les régions de forte exposition naturelle (plusieurs dizaines de fois l'irradiation moyenne naturelle en France) est l'absence d'augmentation d'incidence des effets stochastiques, cancérogenèse ou augmentation des affections génétiques, dans les populations exposées.

Dosimétrie biologique

C'est une application pratique de la connaissance des effets biologiques des radiations à l'échelle cellulaire et moléculaire. Certains effets sont caractérisés par une relation linéaire entre leur importance et le niveau de dose reçue. Il est donc possible, par la mesure d'un effet donné, d'estimer la dose délivrée au volume étudié. Ceci constitue le principe de base de la dosimétrie biologique. Son développement est justifié par la difficulté d'obtenir une estimation dosimétrique physique exacte en cas d'accident d'exposition. Pourtant, en cas d'accident, la connaissance de la dose reçue est fondamentale afin de prévoir, pour chaque victime, l'importance des conséquences cliniques et les moyens qui seront nécessaires pour sa prise en charge. Avant cette approche biologique, l'étude des signes cliniques à la phase prodromique, avant l'intervalle libre, constituait la dosimétrie clinique. Celle-ci est plus grossière mais reste cependant la seule praticable en cas d'afflux de nombreuses personnes irradiées.

Dosimétrie par étude du caryotype

L'exemple type de dosimétrie biologique est le dénombrement des chromosomes dicentriques dans les lymphocytes du sang circulant. Elle nécessite l'étude du caryotype de nombreux lymphocytes et la numération de lésions particulières, notamment le nombre de chromosomes dicentriques. L'intérêt est de disposer d'une méthode sensible permettant une évaluation de la dose reçue avec une précision de l'ordre de la dizaine de millisieverts. Elle nécessite cependant des moyens lourds en matériel et personnel spécialisé pour sa mise en œuvre. D'autre part, il s'agit de lésions instables, dont 50 % environ sont éliminées à chaque mitose et ce caractère transitoire interdit

toute étude rétrospective au-delà de quelques mois après l'exposition. Enfin il est impossible de différencier une exposition globale ou localisée. Elle n'en reste pas moins une alternative intéressante en cas de difficulté d'exploitation des données de surveillance dosimétrique ou en l'absence de celle-ci lorsque l'accident d'exposition concerne une personne non surveillée.

Dosimétrie moléculaire

Les méthodes modernes utilisent l'hybridation *in situ* pour repérer des séquences caractéristiques de lésions stables telles que les translocations. On utilise une séquence spécifique d'acide nucléique, appelée sonde moléculaire, qui se fixe sur un point particulier du chromosome et peut être marquée par un agent fluorescent. Cette technique donne des résultats équivalents au dénombrement de chromosomes dicentriques dans les premières semaines suivant l'exposition. Comme il s'agit de lésions stables, non éliminées par les mitoses, à la différence des dicentriques, on peut l'utiliser pour retrouver des traces d'exposition survenues plus longtemps auparavant. Cependant, le nombre de translocations augmente naturellement avec l'âge et les translocations induites par une exposition aux RI sont ainsi progressivement « diluées » ce qui limite la quantification rétrospective à quelques années. En pratique, on utilisera le dénombrement de dicentriques, plus facile, pour les expositions récentes (quelques semaines), et le dénombrement de translocations pour les expositions datant de quelques mois à quelques années.

D'autres techniques de génomique et protéomique hautement évoluées seront bientôt employées pour identifier les marqueurs biologiques spécifiques de l'exposition aux rayonnements. La protéomique consiste à étudier les protéines synthétisées en réponse à une irradiation cellulaire, par électrophorèse bidimensionnelle. L'analyse informatique permet de savoir quelles sont les protéines qui sont surexprimées et quelles sont celles qui sont sous-exprimées par rapport à l'activité métabolique normale et on met ainsi en évidence des profils types de réponse à l'irradiation qui peuvent ensuite être utilisés pour quantifier celle-ci. Au plan biologique, ces indicateurs sont plus significatifs que la mesure physique de l'exposition et pourraient être utiles pour évaluer les risques à long terme d'une exposition aux rayonnements.

Il est probable que ces données, fondées sur la réponse individuelle modifieront l'évaluation des risques liés à l'exposition aux RI.

Conclusion

Les effets biologiques des RI sont multiples et complexes. Leur étude a permis la découverte et la compréhension de mécanismes intimes du fonctionnement cellulaire et des progrès dans la connaissance de la cancérogenèse. Si la modélisation de l'effet des fortes doses à fort débit de dose est actuellement établie, l'estimation de l'effet des faibles doses reste grevée d'incertitudes, tenant à l'absence de véritable signature de l'action des RI. En effet, ces effets

ne sont pas spécifiques et peuvent être le fait de nombreuses autres causes physiques ou chimiques, voire du métabolisme normal de la cellule. Ainsi, une lésion ne peut qu'exceptionnellement être reconnue comme effectivement radio-induite. Les recherches actuelles doivent permettre d'acquérir de nouvelles données sur les processus biochimiques impliqués ce qui permettra peut-être de quantifier l'effet des RI à faible dose, dont on sait déjà qu'il est trop faible pour pouvoir être mis en évidence de façon convaincante par des études épidémiologiques.

Vérifiez si vous avez assimilé les points importants de ce chapitre en répondant au questionnaire en fin d'ouvrage.

6 Effets pathologiques des rayonnements ionisants : effets déterministes

Les effets déterministes sont ainsi nommés parce que leur survenue est inéluctable, quand la dose reçue est supérieure à un seuil.

Mécanismes

Effets précoces

Les effets déterministes précoces sont la conséquence directe de la mort cellulaire. Le délai et le seuil d'apparition de ces effets dépendent de la dose et de la différenciation des tissus. La plupart des tissus de l'organisme se renouvellent constamment. La naissance, la différenciation et la mort des cellules d'un tissu réalisent un équilibre dynamique assurant la trophicité et la pérennité de ce tissu. Seule une fraction de ces cellules, les cellules souches, assure le renouvellement de l'ensemble. Leur activité mitotique intense les rend très vulnérables aux rayonnements ionisants. En revanche, les cellules fonctionnelles, différenciées, ne se divisent plus et sont donc peu vulnérables. En contrepartie leur durée de vie est limitée. En cas d'irradiation aiguë, le délai d'apparition des lésions après une irradiation est donc déterminé, pour un effet donné, par la durée de vie des cellules différenciées de l'organe considéré (fig. 6-1). Seuls certains tissus ne répondent pas à ce mécanisme, ce sont les tissus dont les cellules fonctionnelles, différenciées et à longue durée de vie, sont capables de se multiplier pour combler un déficit. C'est le cas en particulier du foie dont on connaît les capacités de régénération.

Effets tardifs

Après une irradiation, la restauration tissulaire peut être complète, mais aux dépens des capacités de renouvellement à long terme du tissu concerné. De même, en irradiation chronique, la diminution du nombre des cellules souches peut ne pas avoir d'effet apparent tant que le nombre de cellules différenciées reste suffisant pour assurer la fonction du tissu. Ce tissu est néanmoins fragilisé et ne pourra réagir devant une agression, même minime. Il sera en outre plus rapidement altéré au cours du processus normal de vieillissement. Un autre déterminant, commun à tous les tissus, est l'altération de la vascularisation. Les vaisseaux des tissus irradiés présentent des lésions de vascularite, avec prolifération endothéliale irrégulière

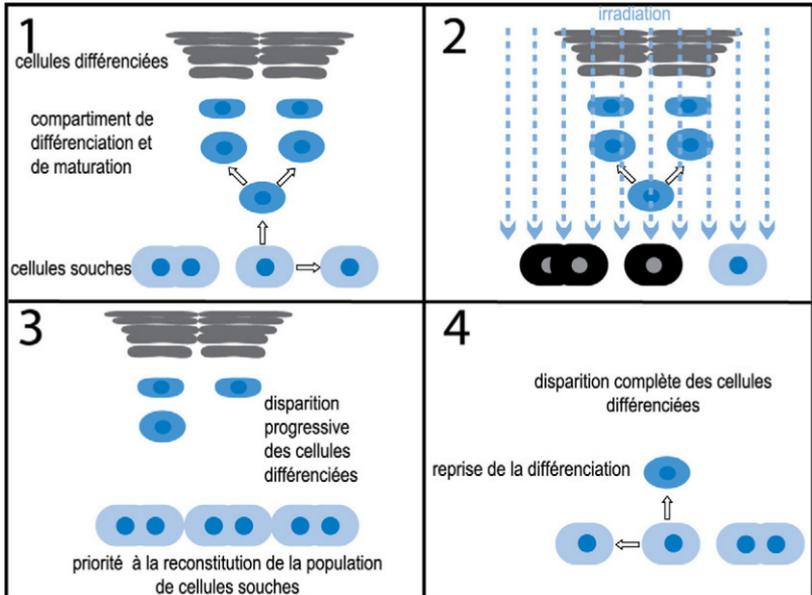


Figure 6-1

Effet d'une irradiation sur un tissu vivant, constitué de cellules souches et de cellules en cours de maturation et différenciation (1).

Le compartiment le plus touché par l'irradiation est celui des cellules souches (2). La mort de celles-ci n'entraîne pas d'effets immédiatement observables parce que les cellules en voie de différenciation au moment de l'irradiation continuent leur maturation mais elles ne sont pas remplacées car la priorité est à la reconstitution du capital de cellules souches (3). Les effets ne s'observeront qu'à la disparition des cellules nées de la dernière différenciation avant l'irradiation puisque ces cellules ne seront pas remplacées tant que la reconstitution (prioritaire) du compartiment des cellules souches ne sera pas achevée (4).

et perte des fibres musculaires, remplacées par des fibres de collagène. Le calibre et l'élasticité des vaisseaux diminuent et des télangiectasies apparaissent. L'atteinte intrinsèque du tissu et les altérations vasculaires se conjuguent donc pour diminuer la trophicité du tissu ou de l'organe. C'est le cas par exemple de la radiodermite chronique, où la peau, amincie et fragile, présentant des télangiectasies et une raréfaction capillaire, est plus vulnérable et cicatrise mal et lentement.

Caractéristiques

Délai d'apparition

Les effets déterministes précoces apparaissent peu après l'irradiation. Le temps écoulé correspond à la durée de vie des cellules différenciées du tissu, continuant à assurer la fonction. Ce n'est que lorsque ces cellules

disparaissent et ne sont pas remplacées, faute de cellules souches en nombre suffisant, que les effets se manifestent. Certaines cellules souches, partiellement atteintes, peuvent se diviser quelques fois après l'irradiation. C'est la mort différée, qui retarde également le délai d'apparition des signes cliniques. L'intervalle libre entre l'irradiation et l'apparition des effets cliniques dépend donc de la durée de vie des cellules différenciées, sensiblement constante pour un tissu donné, mais également de la proportion de cellules souches partiellement atteintes, qui dépend de la dose. Ceci explique que l'intervalle libre diminue quand la dose augmente.

Seuil

La désorganisation de la fonction d'un tissu n'apparaît que lorsqu'il a perdu une proportion importante de ses cellules. Les effets déterministes n'apparaissent qu'au-dessus de la dose qui détruit cette proportion de cellules. C'est la dose-seuil. En dessous de ce seuil, aucun effet n'apparaîtra, en revanche, au-dessus du seuil, l'effet est obligatoire. Il faut noter que ce seuil est variable selon les tissus, et, pour un même tissu, selon les individus. Certaines affections héréditaires, dont on sait qu'elles atteignent les mécanismes de réparation de l'ADN, augmentent considérablement la radiosensibilité individuelle aux effets des rayonnements ionisants, non seulement pour les effets stochastiques (cancérogenèse) mais aussi pour les effets déterministes. Ces affections sont le syndrome de Li-Fraumeni, l'anémie de Fanconi, l'ataxie-télangiectasie ou le xeroderma pigmentosum. Outre ce cadre pathologique étroit avec phénotypes particuliers, il existe des individus apparemment normaux ayant une plus grande radiosensibilité, qui se démasque notamment par des réactions disproportionnées lors de la mise en route de traitements par radiothérapie. Cette radiosensibilité individuelle doit alors être prise en compte et elle peut limiter les possibilités de traitement.

Influence du débit de dose et du fractionnement

Un effet déterministe précoce n'apparaîtra, pour la dose-seuil, que si cette dose est administrée en une fois et dans un temps bref. Si la dose est fractionnée ou délivrée dans un temps très long, la dose totale nécessaire à l'obtention de l'effet sera supérieure à la dose-seuil. Si l'on considère la dose cumulée, le seuil d'apparition des lésions augmente donc avec le fractionnement ou l'étalement de la dose dans le temps, parce que la réparation et la reconstitution partielle du capital de cellules-souches pendant l'irradiation limitent la perte cellulaire. En revanche, pour chaque exposition à dose suffisante pour tuer des cellules-souches, le seuil diminue, car le capital de cellules-souches ne se reconstitue pas intégralement après chaque exposition. Deux expositions successives à dose légèrement inférieure au seuil pourront donc faire apparaître un effet précoce lors de la seconde exposition. Le seuil théorique de survenue d'un effet déterministe diminue donc avec le nombre d'expositions, ce qui explique la survenue possible d'effets tardifs, pour des doses nettement inférieures à la dose-seuil, administrées de façon itérative. Il faut tenir compte de cette diminution de tolérance lors de procédures thérapeutiques, en radiothérapie ou en radiologie interventionnelle.

Gravité

La gravité d'un effet déterministe est proportionnelle à la dose délivrée au tissu puisque le pourcentage de cellules tuées augmente. En cas d'irradiation globale, les effets apparaissent d'abord pour les tissus les plus radiosensibles (tissus hématopoïétiques et cellules intestinales) puis pour des tissus moins sensibles mais pour des doses qui mettent toujours en jeu le pronostic vital. En cas d'irradiation partielle, le pronostic est fonctionnel, dépendant de la région irradiée, avec, le plus souvent, lésions cutanées associées. Un cas particulier est représenté par les lésions neurologiques observées après exposition fœtale à dose moyenne et forte.

Exposition globale

Après une exposition globale aiguë, les tableaux cliniques sont fonction de la dose. Jusqu'à 6 Gy, les symptômes dus à la déplétion hématopoïétique sont pratiquement seuls en jeu. À partir de 6 Gy, les symptômes dus à la destruction des épithéliums intestinaux viennent au premier plan. Au-delà de 8 Gy, apparaissent en sus les signes pulmonaires. Enfin, ce n'est qu'au-delà de 20 Gy que les désordres neurologiques entraînent un décès précoce, avant l'apparition de tout autre signe.

Effets sur l'hématopoïèse

Ils ne seront observés qu'après une exposition globale, en raison de la répartition multifocale de la moelle osseuse. Ils peuvent être au premier plan, par syndromes infectieux (leucopénie) et hémorragiques (thrombopénie), ou aggraver des manifestations digestives ou des brûlures cutanées éventuellement associées. La modification de la formule sanguine après une exposition est stéréotypée et reflète la différence de sensibilité des éléments figurés (fig. 6-2). L'ordre d'apparition de ces modifications est indépendant de la dose reçue, mais la gravité (intensité de la déplétion) et la durée de reconstitution sont proportionnelles à la dose reçue.

Lymphocytes

Ce sont les éléments les plus radiosensibles. La lymphopénie apparaît dès les premières heures après l'exposition. Elle est observable, en exposition globale, à partir d'une dose de 0,3 Gy, alors que les autres lignées ne montrent de diminution significative que pour des expositions globales à dose supérieure à 2 Gy. La disparition rapide des lymphocytes après exposition à forte dose rend impossible le typage lymphocytaire indispensable avant toute greffe de moelle et peut empêcher le recours à cette thérapeutique. La pente de décroissance des lymphocytes après une exposition aiguë globale permet d'estimer la dose reçue.

Granulocytes

Après une augmentation paradoxale brève (due à la mobilisation des réserves de polynucléaires réactionnelles à toute agression), ils diminuent

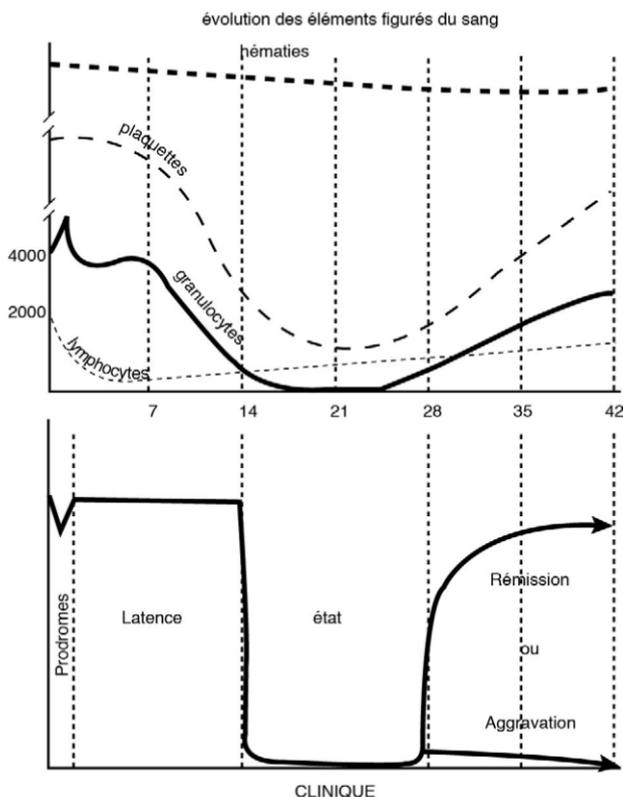


Figure 6-2

Évolution des éléments figurés du sang (en haut) et évolution clinique après une exposition globale aiguë de 4 à 5 Gy.

La phase de latence correspond à la survie de cellules différenciées en nombre suffisant pour assurer leur fonction.

progressivement pendant la première semaine, puis une deuxième chute plus rapide aboutit à la granulopénie maximale, qui dure pendant toute la troisième semaine. Enfin, intervient une phase de régénération rapide, avec restauration, plus ou moins complète selon la dose, en moins d'une semaine. Le risque infectieux est donc maximal à partir de la troisième semaine.

Plaquettes

Leur évolution est parallèle à celle des granulocytes. Le risque infectieux se double donc d'un risque hémorragique dû à la thrombocytopénie.

Érythrocytes

C'est la lignée sur laquelle l'effet de l'exposition est le moins apparent, en raison de la radiorésistance des hématies, cellules différenciées anucléées, et

de leur longue durée de vie. En fait, seule la baisse du nombre des réticulocytes, parallèle à celle des autres éléments figurés, traduit la diminution de l'érythropoïèse, mais, comme ils ne représentent qu'une petite partie des érythrocytes, la diminution de l'ensemble reste modérée, jusqu'à la reprise de l'érythropoïèse qui survient à la 4^e semaine comme pour les autres éléments figurés du sang.

Manifestations cliniques en fonction de la dose

Dose inférieure à 0,5 Gy

Aucun effet clinique n'est observable. Les examens biologiques montreront une baisse du nombre de lymphocytes, difficile à quantifier en l'absence de numération de référence pour chaque individu, et des altérations chromosomiques (chromosomes dicentriques) permettant éventuellement une estimation de la dose reçue (*cf.* chapitre 5).

Doses de 1 à 2 Gy

La dose de 1 Gy, en exposition globale aiguë, représente le seuil à partir duquel se produisent les signes digestifs précoces caractéristiques de ce que l'on nomme la phase prodromique. Il s'agit de nausées et vomissements apparaissant dans les 3 premières heures. Leur importance est considérable pour établir une « dosimétrie clinique » en l'absence de données dosimétriques instrumentales sur l'exposition radiologique. Ces signes précoces sont suivis de signes fonctionnels aspécifiques (malaise, asthénie, anorexie) que l'on a appelés « mal des rayons ». Cet état s'amende rapidement et la récupération est complète en 24 heures.

Doses de 2 à 4 Gy

Après la phase prodromique, la phase de latence clinique se prolonge mais l'atteinte du système hématopoïétique (baisse très importante des leucocytes, thrombocytopenie) impose une surveillance étroite, permettant un recours rapide à une antibiothérapie dès l'apparition de signes infectieux et le traitement d'éventuelles complications hémorragiques.

Doses de 4 à 6 Gy

Chez l'adulte sain, la dose mortelle pour 50 % des individus (DL 50) est estimée à 4,5 Gy en l'absence de traitement spécifique. À partir de 4 Gy, il existe toujours des manifestations cliniques sévères. Le tableau clinique évolue en quatre phases, correspondant à l'évolution des éléments figurés du sang (voir [fig. 6-2](#)).

Phase initiale ou prodromique

Une à deux heures après l'exposition, caractérisée par des vomissements, plus accessoirement par un état de malaise et des céphalées.

Phase de latence

Elle dure deux semaines environ (une dizaine de jours pour les doses les plus élevées), sans aucune manifestation clinique, alors que disparaissent

progressivement les granulocytes (les lymphocytes ont disparu dès le deuxième jour).

Phase d'état

L'aplasie intéresse les plaquettes, ce qui entraîne des hémorragies, et les granulocytes avec apparition des infections liées à l'absence de défense.

Phase d'aggravation ou de restauration

L'aggravation sera d'autant plus rapide ou l'amélioration d'autant plus lente que la dose reçue était plus importante.

Doses de 6 à 10 Gy

En l'absence de traitement substitutif (greffe de moelle, stimulation de l'hématopoïèse), 6 Gy représentent la dose mortelle dans 100 % des cas (DL 100). Outre les manifestations digestives, vomissements et diarrhée, hémorragies et perforations intestinales, le tableau clinique comportera, à partir de 8 Gy, des manifestations pulmonaires (hémoptysie, insuffisance respiratoire). Dans cet intervalle de dose, le pronostic dépend de l'âge, des lésions associées ou préexistantes et des capacités de traitement. Ainsi, une irradiation totale de préparation avant une greffe de moelle dans certains cas de leucémie, délivre une dose de 10 Gy à l'organisme entier mais la prise en charge en milieu hyper-spécialisé stérile, avec transfusions de plaquettes, alimentation parentérale et antibiothérapie préventive permet la survie de presque tous les patients.

Doses de 10 à 20 Gy

Décès inéluctable dans un délai inférieur à une semaine, après un intervalle libre de 2 à 3 jours (durée de vie des cellules intestinales) dans un tableau dominé par les manifestations digestives, associé à une détresse respiratoire, dans un contexte granulopénique et thrombocytopénique. On parle alors de syndrome de défaillance multiviscérale.

Doses très élevées, supérieures à 30 Gy

L'incapacitation neurologique (œdème cérébral) est immédiate à partir de 50 Gy. La mort survient dans les 48 heures.

Traitement

Il consiste en réanimation médicale dès l'apparition des signes digestifs, associant une alimentation parentérale, une antibiothérapie et des antifongiques. La prévention des effets hématologiques consiste à placer l'irradié en chambre stérile avec antibiothérapie préventive antimicrobienne et antivirale (prévention de la pneumopathie à cytomégalovirus) et transfusions plaquettaires. Une greffe de moelle autologue ou hétérologue compatible permet d'éviter ou raccourcir la phase d'aplasie mais elle est rarement possible en cas d'exposition accidentelle et ne peut être mise en œuvre en pratique que dans le cadre des irradiations corporelles totales délibérées de préparation aux greffes d'organes ou de mise en aplasie thérapeutique. En situation accidentelle, seuls pourront être employés des agents de stimulation de l'hématopoïèse.

Exposition partielle

L'effet d'une exposition partielle est fonction de la région exposée et de la dose reçue, qui régit la gravité de l'atteinte.

Effets sur la peau

La peau est le point de passage obligé de presque toutes les expositions aux RI. Les effets cutanés ont ainsi été les premiers connus et quantifiés. Ils sont à bien connaître car ils peuvent compliquer des actes de radiologie interventionnelle ayant nécessité des temps prolongés de scopie. Après une contamination externe, les émetteurs β en contact avec la peau sont la cause de radiolésions cutanées. En radiothérapie externe, les lésions cutanées ont été un effet secondaire constant jusqu'à l'apparition des accélérateurs dont les rayonnements de haute énergie épargnent relativement la peau du champ d'entrée en déplaçant vers la profondeur le maximum du dépôt d'énergie. On distingue les effets d'une exposition aiguë et les effets de l'exposition chronique.

En exposition aiguë

Pour des doses inférieures à 3 Gy, il n'y a généralement pas d'effet observable. Entre 3 et 5 Gy, les effets sont différés, sous forme d'une épidermite « sèche » (érythème, desquamation) apparaissant 3 semaines après l'exposition (durée du cycle épidermique). Cette épidermite sèche est précédée, à partir de 4 Gy, d'une épilation ou d'une chute des cheveux (alopécie) si l'exposition a intéressé le cuir chevelu. L'érythème précoce, analogue du « coup de soleil », apparaît dans les premières heures d'une exposition supérieure à 5 Gy. Il régresse en quelques jours et réapparaît 3 semaines plus tard sous forme d'épidermite. Il s'agira d'une épidermite sèche (desquamation) si la dose était inférieure à 20 Gy, d'une épidermite exsudative (phlyctènes), si la dose était supérieure à 20 Gy. Pour des doses supérieures à 30 Gy, on assistera à une nécrose cutanée, ulcération torpide très douloureuse dont la guérison ne pourra être obtenue que par excision-greffe cutanée.

En exposition répétée et chronique : effets tardifs

Radiodermite

Le seuil d'apparition des lésions cutanées est abaissé en cas de nouvelle exposition. En effet, un faible dépeuplement de la couche basale n'a pas d'effet macroscopiquement observable mais diminue le capital de renouvellement de l'épiderme. Une dose infraliminaire, sans aucune traduction clinique, peut donc abaisser suffisamment le seuil pour qu'une autre dose infraliminaire, quelques mois ou quelques années après, déclenche une épidermite exsudative ou une nécrose. Ce cas de figure n'est pas exceptionnel en radiologie interventionnelle, particulièrement en angioplastie coronaire où des actes peuvent se répéter et où les incidences sont suffisamment stéréotypées pour intéresser toujours le même champ d'entrée. Le relevé des doses par procédure et l'alternance du champ d'entrée (position du tube) en cas de procédures itératives sont des mesures simples qui permettraient d'éviter une grande partie de ces complications.

Radiodermite chronique

À long terme, la peau exposée chroniquement aux RI est fragilisée. Le derme est atrophique et le réseau vasculaire raréfié, ce qui expose la peau à des lésions fréquentes et de cicatrisation difficile. La peau est glabre, sèche, amincie (effacement des empreintes digitales) ou hyperkératosique et fissurée. Ces lésions peuvent s'observer pour des expositions chroniques, à partir de 2 Gy par an. En revanche, pour des doses fractionnées inférieures à 0,5 Gy par an (limite de dose « extrémités »), on n'observe pas de tels effets même après de nombreuses années d'exposition.

Effets sur les gonades

Les têtes de lignée des cellules sexuelles sont le prototype de la radiosensibilité selon les lois énoncées par Bergonié et Tribondeau. Elles sont en effet peu différenciées, en perpétuelle activité mitotique et leur devenir caryocinétique est particulièrement long entre la cellule-souche originelle et le gamète final.

Chez l'homme

Une exposition à dose aussi faible que 0,15 Gy suffit pour provoquer une stérilité transitoire chez l'homme, tandis qu'une exposition unique de 4 à 6 Gy entraîne une stérilité définitive. En revanche, les capacités et caractères sexuels sont conservés parce que les sécrétions hormonales sont préservées, du fait de la radiorésistance des cellules de Leydig.

Chez la femme

Une exposition unique de 3 à 6 Gy entraîne une stérilité définitive mais également, du fait de l'origine commune des sécrétions hormonales et des gamètes, une atteinte des caractères sexuels, avec ménopause précoce. Cet effet a été longtemps utilisé en thérapeutique comme traitement adjuvant des cancers hormonodépendants.

Effets sur le cristallin

L'exposition du cristallin aux rayonnements ionisants peut créer des opacités punctiformes, généralement sans conséquence visuelle, ou une cataracte, généralement sous-capsulaire postérieure, à la différence des cataractes superficielles (corticales) induites par les UV, ou des cataractes centrales (nucléaires) dont le principal facteur de risque est le tabac. Il faut savoir que les opacités cristalliniennes sont détectées chez 96 % de la population après 60 ans. Jusqu'aux dernières recommandations de la CIPR (2007), on considérait que le seuil d'apparition de ces effets était élevé :

- en exposition unique 1 à 2 Gy pour les opacités cristalliniennes et plus de 5 Gy pour la cataracte ;
- en exposition fractionnée, 5 Gy pour les opacités isolées et 10 Gy pour la cataracte ;
- en exposition chronique, le seuil d'apparition des opacités cristalliniennes était réputé supérieur à 0,15 Gy par an, dose maximale admissible pour les travailleurs exposés.

Rappelons que ces doses, exprimées en gray, ne concernent que les rayonnements X ou γ et que, si l'exposition est constituée de neutrons, il faut considérer l'équivalent de dose, exprimé en sievert et appliquer un facteur de qualité moyen de 10 (2,5 à 20 selon l'énergie), ce qui correspond à des expositions « physiques » 10 fois moindres.

Depuis 2006, de nombreuses publications ont fait état d'apparition d'opacités cristalliniennes et même de cataractes sous-capsulaires postérieures à des doses nettement inférieures à ces seuils, en exposition unique ou fractionnée. Les prochaines recommandations de la CIPR devraient donc abaisser ces seuils, ce qui amènera à une réduction de la dose maximale admissible. Ces données nouvelles incitent à renforcer dès à présent la prévention des effets oculaires, en imposant le port de lunettes de protection à tous les opérateurs et assistants en salle de radiologie interventionnelle. Pour les patients, particulièrement les enfants et adultes jeunes, il est nécessaire d'éviter d'inclure le cristallin dans le faisceau direct au scanner, notamment pour les explorations du rocher (fig. 6-3).

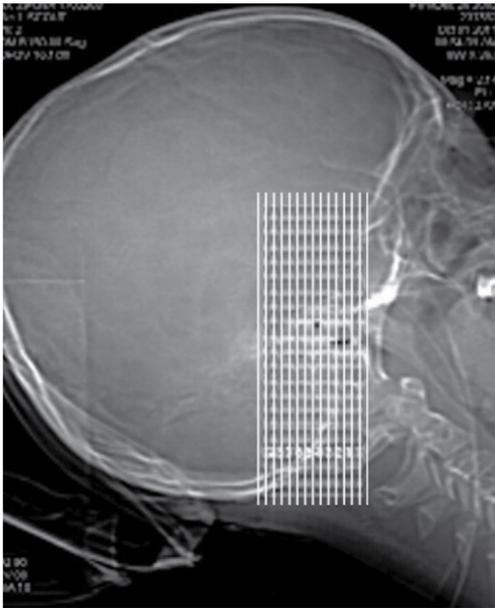


Figure 6-3

Réalisation du topogramme pour l'exploration du rocher.

La tête est fléchie afin que le volume d'acquisition se situe au-dessus des orbites. Les reconstructions multiplanaires permettront de replacer les coupes dans le plan du canal semi-circulaire latéral, plan de référence de l'exploration de l'oreille ou tout autre plan nécessaire à l'exploration d'une pathologie déterminée.

Effets sur l'embryon et le fœtus (tératogène)

La nature déterministe des malformations induites par les rayonnements ionisants implique l'existence d'un seuil. Ce point est d'autant plus important pour le radiodiagnostic que les données les plus récentes ont conduit la CIPR à estimer ce seuil « entre 0,1 et 0,2 Gy, voire supérieur », c'est-à-dire supérieur à la dose délivrée par toutes les explorations conventionnelles de radiodiagnostic et ne pouvant être atteint que par des explorations scannographiques répétées du pelvis chez une femme enceinte. L'exposition radiologique au cours de la grossesse fera l'objet du chapitre suivant et nous ne rappellerons ici que les points principaux :

- avant la nidation (10^e jour après la fécondation), c'est un mécanisme de tout ou rien : l'œuf est éliminé ou se développe normalement ;
- pendant l'embryogenèse (10^e jour au début de la 10^e semaine), le risque est théoriquement maximal, mais il suppose une dose supérieure au seuil de 100 à 200 mGy ;
- en fin d'embryogenèse et pendant la phase de croissance fœtale, il persiste un risque spécifique de retard mental, par action sur la migration neuronale, avec un seuil de 300 mGy.

Autres effets viscéraux

Système nerveux

Encéphale

En exposition aiguë

Les doses supérieures à 30 Gy provoquent des lésions neurologiques immédiates, avec troubles de conscience et convulsions, résultant d'un œdème cérébral. Ces lésions sont irréversibles et entraînent le décès en 24 à 48 heures.

En exposition fractionnée

Les lésions cérébrales secondaires à une irradiation fractionnée thérapeutique sont d'apparition tardive (1 à 3 ans). Elles consistent essentiellement en une leucoencéphalopathie diffuse dans le territoire irradié. Leur mécanisme relève d'une atteinte des oligodendrocytes, mais également d'une vascularite chronique avec hypoperfusion de la substance blanche dépendant des artères perforantes cérébrales. Des lésions de radionécrose cérébrale peuvent survenir dans les régions de surdosage, au voisinage de la lésion à traiter. Ces lésions sont parfois difficiles à distinguer d'une récurrence tumorale car elles sont rehaussées en périphérie par l'injection de produit de contraste et s'accompagnent d'œdème et d'effet de masse. Les techniques de radiothérapie conformationnelle s'attachent à éviter les surdosages en périphérie de la région à traiter pour prévenir ces complications. La radiothérapie stéréotaxique atteint un degré de précision encore plus grand et permet d'irradier fortement de petits volumes cibles, en ne délivrant que des doses faibles aux tissus avoisinants. Elle autorise donc le traitement de tumeurs bénignes telles que le schwannome vestibulaire, avec d'excellents

résultats pour les tumeurs de petite taille et en évitant à ces patients tous les risques d'une intervention neurochirurgicale.

Moelle épinière

Les myélopathies radiques aiguës peuvent survenir environ 3 mois après l'irradiation, pour des doses supérieures à 45 Gy en fractionnement classique. Elles se traduisent le plus souvent par des signes sensitifs (paresthésies, signe de Lhermitte) traduisant une atteinte cordonale postérieure et sont généralement réversibles. En revanche, une myélite transverse tardive, survenant plus de 6 mois et jusqu'à plusieurs années après irradiation, est une complication irréversible redoutable. Elle se traduit par un syndrome de section ou d'hémisection médullaire (*Brown-Sequard*) ; l'imagerie montre une moelle atrophique en hypersignal T2, correspondant histologiquement à des lésions de démyélinisation et d'ischémie secondaire à une vascularite.

Intestin

Les cellules de la muqueuse intestinale ont un renouvellement rapide. Après une exposition aiguë à dose supérieure à 6 Gy, la destruction de la muqueuse survient en 4 à 5 jours, avec troubles hydroélectrolytiques majeurs dus à la perte de la fonction d'absorption intestinale. Les ulcérations muqueuses entraînent des perforations digestives dont les conséquences sont gravissimes dans un contexte d'aplasie granulocytaire et de thrombocytopénie. À la phase chronique, ou après une exposition fractionnée, on observe une atrophie relative de l'épithélium intestinal, une fibrose sous-muqueuse avec épaississement pariétal diminuant la lumière, une rigidité des anses et une raréfaction vasculaire intestinale et mésentérique. L'ensemble constitue le « grêle radique » et se traduit cliniquement par des douleurs, des troubles du transit avec épisodes subocclusifs, un syndrome de malabsorption et, parfois, des complications à type d'occlusion, de perforation ou de fistules.

Poumon

La pneumopathie aiguë radique apparaît au-dessus de 8 Gy en dose unique. Elle se traduit par un syndrome de détresse respiratoire aiguë avec « poumon blanc ». Les zones de condensation parenchymateuses sont dues au collapsus alvéolaire par destruction des cellules alvéolaires qui produisent le surfactant. En exposition fractionnée ces pneumopathies apparaissent environ 3 mois après exposition et se traduisent par des condensations plus ou moins systématisées, parfois asymptomatiques mais induisant le plus souvent un tableau de pneumonie. Ces pneumopathies évoluent vers la fibrose pulmonaire, aggravée par les lésions capillaires associées, avec syndrome restrictif aboutissant à l'insuffisance respiratoire.

Os et cartilages

L'irradiation de l'os en période de croissance détruit les chondroblastes des cartilages fertiles et entraîne un retard voire un arrêt de croissance. En fractionnement conventionnel de radiothérapie, l'arrêt de croissance peut survenir à partir de 20 Gy, ce qui limite l'emploi de la radiothérapie dans les

affections tumorales de l'enfant. Chez l'adulte, les ostéoradionécroses peuvent survenir dans les champs d'irradiation d'affections malignes, à partir de doses de 60 Gy en fractionnement conventionnel.

Conclusion

Les effets déterministes sont toujours graves au-delà de leur seuil d'apparition. Ils engagent le pronostic vital en exposition globale et ont des conséquences fonctionnelles lourdes en exposition partielle. Le traitement des lésions tardives est difficile et peu efficace, il faut donc tout mettre en œuvre pour les prévenir, par la connaissance et le respect des doses limites, ce qui nécessite une dosimétrie efficace.

Vérifiez si vous avez assimilé les points importants de ce chapitre en répondant au questionnaire en fin d'ouvrage.

L'exposition aux RX d'une femme enceinte, patiente ou professionnelle engendre très souvent une inquiétude disproportionnée au risque et des conduites inadaptées. La plus extrême de ces conduites aboutira à une interruption de grossesse demandée par une patiente, sinon préconisée par un médecin, pour une exposition en réalité sans risque pour l'enfant à naître. Parfois, au nom d'un principe de précaution dévoyé, on pourra priver une femme enceinte du bénéfice d'un examen diagnostique qui n'aurait eu aucun effet sur l'enfant à naître, au risque de retarder un diagnostic et de laisser évoluer une affection qui ne pourra manquer de retentir sur l'enfant qu'elle porte. Pour les femmes professionnellement exposées, la « mise hors rayons » désorganise parfois le fonctionnement de petites structures et peut engendrer une discrimination à l'embauche et au travail. Ce chapitre envisage les ordres de grandeur de l'exposition en radiodiagnostic, la physiopathologie des risques encourus par l'enfant à naître en fonction de la période de la grossesse, puis la conduite à tenir dans les différentes situations d'exposition, fondée sur les récentes recommandations de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR 84).

Doses délivrées par l'exposition médicale

En radiodiagnostic

Radiologie conventionnelle

Le **tableau 7-1** donne quelques exemples de doses délivrées par des examens courants, pouvant intéresser, au moins partiellement, l'abdomen d'une femme enceinte.

Tomodensitométrie (TDM)

Les doses délivrées au volume exploré en TDM sont en règle plus importantes et plus homogènes qu'en radiographie conventionnelle, en raison de la rotation du tube autour du patient. La dose délivrée doit être appréciée dans le volume entier.

Les résultats des publications de dosimétrie du scanner présentent aussi une grande variabilité, moins dispersés cependant que ceux de la radiologie conventionnelle. Ici encore nous fournissons un ordre de grandeur de la dose délivrée au volume exploré par chaque type d'exploration (**tableau 7-2**).

L'avènement des scanners ultrarapides, multicoupes en acquisition hélicoïdale a fait disparaître un frein naturel à l'exposition qui était le facteur temps ; une exploration du thorax et de l'abdomen peut être effectuée

Tableau 7-1

Ordre de grandeur des doses délivrées à l'utérus par les clichés standard (en mGy)

Incidences	Dose à l'entrée	Dose à mi-épaisseur
Rachis lombaire de face	15	1,5
Rachis lombaire de profil	30	2,5
Abdomen sans préparation	12	1,5
Bassin de face	12	1,5
Pelvimétrie	50	6
Urographie intraveineuse (10 clichés)	100	12
Lavement baryté (10 clichés)	120	15
Artériographie abdomen et membres inférieurs	200	15

Tableau 7-2

Ordre de grandeur des doses délivrées au volume exploré et à l'utérus par les examens tomodensitométriques (en mGy, pour une seule série)

Région explorée	Dose au volume	Dose à l'utérus
Tête	40	< 0,01
Thorax	15	0,1
Abdomen (pelvis non exploré)	20	5
Pelvimétrie TDM	3	3
Pelvis	25	25
Rachis lombaire	15	10

aujourd'hui en 30 secondes et il n'est pas rare de voir des examens ayant comporté trois passages sur le même volume, délivrant ainsi à ce volume des doses supérieures à 60 mGy. Pour ce qui concerne l'exposition utérine, il faut noter que le scanner, utilisant un faisceau étroitement collimaté ne délivre de dose significative que lorsque le volume exploré contient l'utérus. Ainsi, un scanner de la tête ou du cou ne délivre pas de dose significative à l'utérus, un scanner thoracique tel qu'il peut être pratiqué pour recherche d'une embolie pulmonaire chez une femme enceinte, délivre, en fin de grossesse, moins de 0,2 mGy à l'utérus. En revanche, si le volume exploré contient l'utérus, l'intégralité de la dose sera délivrée à l'embryon ou au fœtus. Par exemple, pour un scanner pelvien qui délivre 25 mGy au volume, la dose efficace reçue par l'enfant *in utero* sera de 25 mSv. Si l'examen comporte trois séries, la dose totale sera de 75 mSv.

En médecine nucléaire

En médecine nucléaire, les doses reçues par l'enfant *in utero* sont différentes en début et en fin de grossesse. Le [tableau 7-3](#) montre que pour la plupart des examens, la dose reçue à l'organisme entier reste faible, inférieure à 5 mSv

Tableau 7-3

Ordre de grandeur des doses délivrées à l'enfant par les explorations de médecine nucléaire réalisées chez la mère

Radio élément	Examen	Activité administrée à la mère (en MBq)	Dose reçue par l'enfant début de grossesse (mSv)	Dose reçue par l'enfant fin de grossesse (mSv)
^{99m} Tc	scintigraphie osseuse	750	5	2
^{99m} Tc	perfusion pulmonaire	200	0,5	0,8
^{99m} Tc	ventilation pulmonaire	40	0,2	0,1
^{99m} Tc	thyroïde	400	4	4
^{99m} Tc	fonction rénale	750	7	4
⁶⁷ Ga	abcès, tumeur	190	16	25
¹²³ I	captation thyroïdienne	30	0,5	0,3 (30 mGy à la thyroïde)
¹³¹ I	recherche métastases	40	3	11 (30 Gy à la thyroïde)

mais que le réel problème se situe à la thyroïde en cas d'administration d'iode 131. La glande thyroïde est fonctionnelle après la 8^e semaine suivant la conception. Une scintigraphie à l'iode 131 réalisée de la 9^e semaine au 9^e mois induira une insuffisance thyroïdienne aux conséquences très graves sur le fœtus.

Pour la médecine nucléaire se pose en outre le problème de l'exposition des personnes de l'entourage, donc éventuellement d'une femme enceinte, lorsque le patient n'est plus hospitalisé. En fait, le calcul montre qu'une personne se tenant en permanence à 50 cm d'un patient ayant reçu une dose thérapeutique pour cancer de la thyroïde recevrait une dose totale, jusqu'à décroissance complète (10 semaines), un peu inférieure à 7 mGy. Il est donc très improbable que les conditions de proximité avec une femme enceinte soient telles que la dose reçue par l'enfant *in utero* puisse atteindre la limite (arbitraire) de 1 mSv fixée pour le public. Néanmoins, pour éviter toute exposition inutile, on recommande à ces personnes d'éviter un séjour prolongé à proximité des femmes enceintes et des enfants.

En radiothérapie

La survenue d'un cancer au cours de la grossesse est une éventualité rare mais non exceptionnelle. La fréquence est d'environ 1 pour 1 000 grossesses, ce qui amène à discuter une éventuelle radiothérapie chez plusieurs centaines de femmes enceintes chaque année en France.

Pour les champs de traitement éloignés du pelvis (tête, cou, membre), les doses reçues par l'enfant sont relativement faibles. Elles sont beaucoup

plus élevées lorsque le pelvis – ou l’abdomen en fin de grossesse – se trouve en bordure du champ d’irradiation, particulièrement lorsqu’on utilise le rayonnement du cobalt 60, moins bien délimité que celui des accélérateurs. À titre d’exemple, l’exposition fœtale totale due au rayonnement diffusé sera de 30 mGy environ lors de l’irradiation d’une tumeur cérébrale de la mère mais elle pourra atteindre, pour certaines parties du fœtus, 0,5 à 1 Gy lors de traitement d’une maladie de Hodgkin. À l’extrême, les doses délimitées à l’utérus pour le traitement d’un cancer du col sont telles qu’elles pourront entraîner la mort fœtale.

Effets des rayonnements sur la grossesse

Ces effets sont de deux types : un risque malformatif et l’induction de cancer à long terme.

Effets malformatifs (téatogénèse)

Trois notions très importantes sont à retenir d’emblée :

- ce sont des effets déterministes, qui procèdent de mécanismes de mort cellulaire et qui n’apparaissent qu’au-dessus d’un seuil ;
- la sensibilité de l’enfant en formation n’est pas constante au cours de la grossesse ;
- l’incidence spontanée de malformations est élevée, 3 % des grossesses. Le retard mental, associé ou non à un syndrome malformatif, a la même incidence de 3 %.

Effets potentiels d’une exposition en fonction du stade de la grossesse (fig. 7-1)

Avant l’implantation (J8 ou une semaine post-conception)

Au stade de pré-implantation l’œuf est au stade de morula. Chacune des cellules qui le constituent est capable de produire un embryon normal. Si une ou plusieurs d’entre elles sont tuées, la multiplication des autres permet de compenser. L’effet d’une exposition obéit donc à la loi du tout ou rien : si toutes les cellules ont été lésées la grossesse s’arrête et n’est même pas décelée (pas de retard de règles). Si les lésions ne portent que sur une partie des cellules, la grossesse se poursuit normalement.

Pendant l’organogénèse (du 9^e jour au début de la 9^e semaine post-conception)

C’est pendant cette période que la radiosensibilité est la plus forte, particulièrement entre la 3^e et la 5^e semaine post-conception. Les cellules sont différenciées et se divisent rapidement. La mort d’un groupe de cellules peut occasionner à ce stade l’arrêt de développement, partiel ou total, d’un organe ou d’un membre, engendrant une malformation majeure. Il s’agit d’un risque déterministe qui n’apparaît qu’au-dessus d’un seuil, que la plupart des auteurs situent aux environs de 200 mGy.

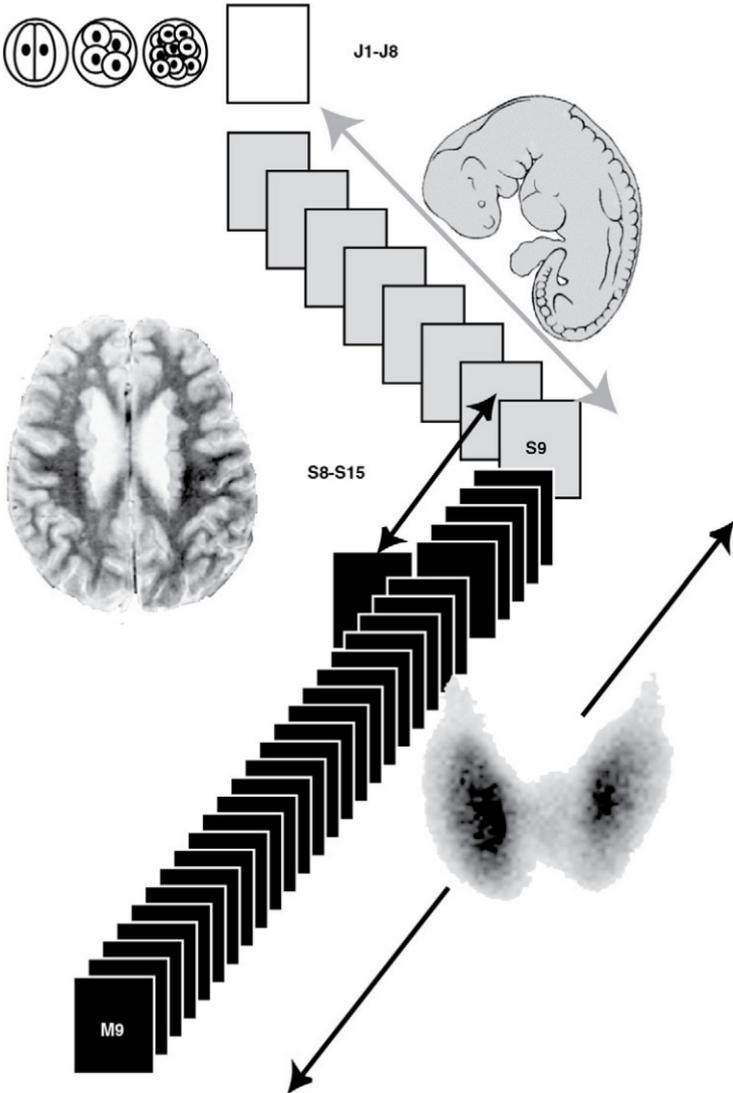


Figure 7-1

Principales étapes de la radiosensibilité : de J1 à J8, au stade de morula, chaque cellule est capable de se diviser pour compenser la perte des autres ; loi du tout ou rien. De J9 à S9, embryogenèse, sensibilité maximale. De S9 à M9, croissance fœtale.

Le fœtus est moins sensible à l'exposition externe, à l'exception du cerveau qui connaît la phase de migration neuronale de S8 à S15. En revanche, la thyroïde est fonctionnelle et peut capter l'iode radioactif, avec un risque majeur d'insuffisance thyroïdienne en cas d'administration d'iode 131 .

Au cours de la maturation fœtale (de la 9^e semaine au 9^e mois)

En règle générale, les organes sont formés et la mort d'un groupe de cellules ne peut plus causer qu'une malformation mineure ou partielle d'un organe. Une exception importante est le cerveau, qui connaît, jusqu'à la 15^e semaine une phase de développement cruciale, celle de la migration neuronale. À partir d'une couche germinative située en profondeur, près des ventricules cérébraux, les neurones migrent vers la surface pour s'organiser en couches dans le cortex. De nombreux facteurs extrinsèques, dont l'exposition aux rayonnements ionisants, comportent à ce stade un risque de « maldéveloppement » cérébral, se traduisant par un retard mental, associé ou non à une diminution du périmètre crânien. Ce risque de maldéveloppement a un seuil de 300 mGy au moins (CIPR 103, 2007). On estime cependant que des diminutions du QI peuvent apparaître au-dessus de 200 mGy. Rappelons qu'un retard mental (QI < 70) est observé spontanément chez 3 % des enfants.

Effets cancérigènes (carcinogènes)

À la différence des effets tératogènes, qui sont de type déterministe, liés à la mort cellulaire, les effets cancérigènes sont liés à des modifications non létales (mortelles) de la cellule. Il s'agit ici d'un risque stochastique (aléatoire), qui augmente avec la dose reçue, et pour lequel il n'y a, théoriquement, pas de seuil. L'incidence spontanée des cancers (et leucémies) de l'enfant, entre 0 et 15 ans, est de deux à trois pour mille.

À Hiroshima et Nagasaki, il n'a pas été observé d'augmentation significative des affections cancéreuses chez les enfants dont les mères ont été exposées au rayonnement initial de l'explosion. Dans d'autres études, en revanche, une augmentation statistique du nombre des cancers et notamment des leucémies de l'enfance a été constatée après des expositions *in utero* de l'ordre de 10 mGy. Les études les plus récentes, extrapolant à partir de fortes doses, estiment l'augmentation du risque à environ 0,05 % pour 10 mGy reçus *in utero*. Si l'on se réfère au risque spontané de 0,25 % (2,5 pour mille), une dose de 10 mGy reçue *in utero* ferait donc passer ce risque à 0,3 % (3 pour mille). Il faut rappeler que ce mode de calcul par extrapolation de l'effet des fortes doses aux faibles doses, sans tenir compte du débit de dose, ne repose sur aucune preuve scientifique et ne prend pas en compte les possibilités de réparation des dommages du matériel génétique. C'est une estimation délibérément pessimiste, qui a pour principal intérêt de donner la certitude de ne pas sous-estimer le risque. Il ne s'agit donc pas d'une probabilité, mais d'une limite supérieure du risque, le risque réel se situant quelque part entre 0 et cette limite supérieure. Quoi qu'il en soit, l'incertitude sur le risque cancérigène est la raison principale pour éviter, dans la mesure du possible, toute exposition *in utero* et, quand cette exposition est justifiée médicalement, pour la limiter à la dose la plus faible possible compatible avec le résultat diagnostique ou thérapeutique recherché.

Différentes situations d'exposition et conduites à tenir

En radiodiagnostic

La responsabilité initiale de recherche de grossesse incombe conjointement au médecin demandeur de l'examen et au médecin radiologue. De plus, à toutes les étapes qui conduisent à la réalisation d'un examen radiologique (prise de rendez-vous au secrétariat, accueil par le manipulateur), on doit s'enquérir de cette possibilité. Plusieurs situations sont possibles et *ne sont à envisager que lorsque l'utérus est dans le faisceau primaire* ou susceptible d'être exposé par le rayonnement diffusé à une dose non négligeable, c'est-à-dire en pratique pour une exploration du volume situé entre le diaphragme et le pubis (lorsque l'examen n'intéresse pas ce volume, les doses à l'utérus sont négligeables et l'examen peut être pratiqué sans risque).

Patiente sans retard de règles mais pouvant être au début d'une grossesse

L'examen peut être pratiqué, après approbation de l'indication par le radiologiste et après avoir informé la patiente de l'absence de danger réel pour une grossesse en phase de pré-implantation (dans les deux dernières semaines du cycle). La règle qui conseillait de ne réaliser d'examen radiologique que dans les 10 jours suivants les règles n'a plus lieu d'être appliquée car son absence de bien-fondé a été démontrée.

Grossesse avérée ou probable (retard de règles)

Si la décision thérapeutique découlant de l'examen peut être différée sans dommage pour la mère, l'examen sera reporté après l'accouchement ou l'exclusion de grossesse, avec l'accord du médecin demandeur et de la patiente.

Si l'examen radiologique est le seul à pouvoir établir un diagnostic nécessaire à une prise en charge thérapeutique dont le retard de mise en œuvre pourrait nuire à la mère et ainsi à l'enfant, il sera réalisé, après accord sur l'indication entre le radiologiste et le médecin demandeur, avec l'accord de la mère après une explication détaillée, mentionnant le risque spontané de malformations ou de cancer tardif et mettant en balance le risque ajouté avec le risque que ferait courir à la mère et à son enfant un retard de prise en charge par défaut de réalisation de l'examen radiologique. On utilisera alors l'appareillage et la technique permettant l'examen avec la plus faible exposition et on estimera la dose délivrée en reportant sur le compte-rendu tous les éléments nécessaires à cette estimation (*cf.* chapitres 10 et 11 pour les obligations de report de dose sur le compte-rendu chez la femme enceinte ou la femme jeune).

Si une grossesse a été méconnue lors d'explorations radiologiques

Si l'exploration n'a pas concerné l'abdomen

Ce sont les explorations de la tête, du cou, du thorax, des membres, en radiologie conventionnelle comme en scanographie :

- il n'y a pas lieu de faire calculer la dose reçue à l'utérus, elle est obligatoirement inférieure à 1 mSv ;
- il faut recevoir les parents et leur expliquer que cet ordre de grandeur de dose est celui des différences d'exposition annuelle au rayonnement naturel en France selon les régions. Il ne peut en résulter aucun risque supplémentaire pour l'enfant, en insistant sur le fait que le risque spontané n'est pas nul (*cf. supra*).

Si l'exploration a concerné l'abdomen

En radiologie conventionnelle

Explorations simples (moins de quatre clichés, moins d'une minute de scopie si elle a été utilisée pour le centrage) :

- La dose reçue à l'utérus est toujours inférieure à 10 mSv. Il n'est pas nécessaire de la faire calculer.
- Il faut recevoir les parents et leur expliquer que cet ordre de grandeur de dose est faible, correspondant à l'exposition naturelle annuelle dans certaines régions du monde (Inde, Brésil) et que l'on sait avec certitude que cette dose n'augmente pas le risque malformatif (donner la référence de la CIPR 84). Il n'y a pas lieu d'envisager d'interruption de grossesse. En revanche il faut dire que le risque spontané de cancer (2,5 pour mille de 0 à 15 ans) pourrait être légèrement augmenté selon certaines études, et passer de 2,5 pour mille à 3 pour mille. Il importe de présenter cette information dans le bon sens : « la probabilité pour votre enfant *de ne pas avoir de cancer* était de 997,5 pour mille, elle est passée à 997 pour mille ».

Explorations avec contraste (ce sont l'urographie intraveineuse, la cystographie rétrograde, le lavement baryté en double contraste, le transit du grêle) :

- La dose reçue à l'utérus est en règle inférieure à 50 mSv. Il est utile de la faire calculer en fournissant au physicien médical de l'établissement ou aux experts de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) ou de services spécialisés, toutes les données de l'examen (nombre de clichés et paramètres, kV, mAs ; temps de scopie) ou au besoin reconstituer l'examen sur fantôme anthropomorphe.
- Il faut recevoir les parents et leur expliquer que cet ordre de grandeur de dose est significatif mais que l'on sait avec certitude que cette dose n'augmente pas le risque malformatif (donner la référence de la CIPR 84). Il n'y a pas lieu d'envisager d'interruption de grossesse. Il faut dire que le risque spontané de cancer (2,5 pour mille de 0 à 15 ans) pourrait être légèrement augmenté selon certaines études, et passer de 2,5 pour mille à 4 pour mille, en adoptant la même expression « positive » que ci-dessus.

En scanographie

L'examen n'a comporté qu'une série sur le pelvis :

La dose reçue à l'utérus est en règle inférieure à 30 mSv. La dose reçue par l'enfant *in utero* peut-être estimée à partir du CTDIvol, obligatoirement inscrit sur le compte-rendu (*cf. chapitre 11*). Sachant que l'utérus en début de grossesse se situe approximativement au centre du champ, la dose théorique reçue par l'embryon ou le fœtus serait égale aux trois cinquièmes du

CTDIvol dans un fantôme de 32 cm. En réalité, du fait de la configuration du pelvis, la dose au centre est nettement majorée et, en première approximation, elle correspond à la valeur du CTDIvol majorée de 20 % pour une morphologie « standard » (1,60 m, 60 kg). Le coefficient de majoration est inversement corrélé au poids de la patiente : lorsque la masse augmente au-delà de 60 kg, la dose reçue se rapproche du CTDIvol. Quoi qu'il en soit, l'exposition de l'embryon est en moyenne de l'ordre de 15 mGy, toujours inférieure à 30 mGy et la conduite à tenir est la même que dans le cas précédent.

Plusieurs séries sur le pelvis.

- La dose reçue à l'utérus peut dépasser 100 mGy. Elle doit donc être déterminée avec le plus de précision possible à partir des données figurant sur le compte-rendu (somme des CTDIvol de chaque série + 20 %) en faisant valider l'estimation par un physicien de l'établissement ou l'expert de l'IRSN.
- Il faut recevoir les parents et leur expliquer que cet ordre de grandeur de dose est significatif mais que le risque malformatif est insignifiant. Il n'y a pas de raison objective d'envisager d'interruption de grossesse mais le choix doit être laissé aux parents dûment informés. Il faut également mentionner l'augmentation théorique du risque spontané de cancer de 2,5 pour mille à 5 pour mille environ, en présentant l'information dans le bon sens : « la probabilité pour votre enfant de ne pas avoir de cancer était de 997,5 pour mille, elle est passée à 995 pour mille ».

En pratique, sachant qu'aucun examen diagnostique n'est susceptible d'administrer des doses de 200 mGy, et qu'une dose de 100 mGy ne sera qu'exceptionnellement dépassée, il n'y aura pas lieu, dans la quasi-totalité des cas, d'envisager d'interruption médicale de grossesse.

En médecine nucléaire

Ici aussi, la recherche de grossesse doit être systématique à toutes les étapes qui conduisent à l'examen, depuis le cabinet du médecin demandeur jusqu'à l'injection du radiopharmaceutique. En revanche, après cette injection l'exposition sera nécessairement globale et la grossesse doit donc être éliminée avec certitude si la dose peut être significative, c'est-à-dire, en pratique, pour les procédures thérapeutiques ou lorsqu'on emploie un autre radiopharmaceutique que le technétium. En l'absence d'informations précises et crédibles permettant d'exclure une grossesse, il faudra réaliser au préalable un test biologique de grossesse.

Examen diagnostique pratiqué en cours de grossesse

Lorsque l'examen est justifié, après les mêmes étapes d'information et de consentement des parents, il sera réalisé en limitant le plus possible l'exposition de l'enfant. Le radiopharmaceutique, la dose et le protocole d'examen seront adaptés dans ce sens. Par exemple, pour une recherche d'embolie pulmonaire, on commencera toujours par la scintigraphie de perfusion et l'on ne réalisera la scintigraphie de ventilation que si la perfusion est anormale, en préférant alors le xénon 133 à un aérosol de technétium car

celui-ci a une élimination urinaire augmentant l'exposition utérine. Pour les radiopharmaceutiques à élimination urinaire, on augmentera la diurèse et la fréquence des mictions.

Examen thérapeutique pratiqué en cours de grossesse

Cette éventualité est extrêmement rare, car ce traitement n'est justifié que s'il évite à la mère un risque mortel. Dans la quasi-totalité des cas, le traitement peut être différé jusqu'à l'accouchement, notamment pour un traitement complémentaire de cancer thyroïdien. Le seul problème majeur est celui d'un examen thérapeutique réalisé au cours d'une grossesse méconnue. Il ne peut résulter que d'un concours de circonstances exceptionnel, car la pratique d'un test de grossesse avant une administration thérapeutique d'iode chez une femme jeune est la règle. Le plus souvent, la grossesse est à un stade précoce, avant la différenciation thyroïdienne, et la dose globale reçue par l'enfant est faible, de l'ordre de 3 mGy. La conduite à tenir est la même que pour un examen radiologique ayant intéressé le pelvis. Si la grossesse avait plus de 8 semaines au moment de l'administration d'iode ¹³¹I à dose thérapeutique, tout doit être fait pour limiter la dose reçue par la thyroïde fœtale. L'administration d'iode stable sous forme d'iodure de potassium permet de bloquer partiellement la thyroïde fœtale mais seulement dans un délai très court, inférieur à 12 heures. En fonction de la dose prévisible reçue par la thyroïde fœtale, l'éventualité d'une interruption de grossesse sera discutée avec les parents.

En radiothérapie

Les cancers survenant à distance du pelvis (tête, cou, sein, membres) chez une femme enceinte peuvent être traités par radiothérapie sans dommage pour l'enfant, les doses cumulées à l'utérus restant en règle inférieures à 50 mGy. En revanche, toute irradiation du pelvis fait courir un risque vital à l'enfant. Lorsque l'utérus est en bordure de champ, le niveau de dose atteint peut atteindre le seuil des effets sur le système nerveux central (0,3 Gy). Ce niveau de dose augmente par ailleurs significativement le risque de cancer radio-induit. Les protocoles de traitement devront être adaptés à la grossesse selon les règles prônées par les associations de médecins.

Dans le cadre d'une activité professionnelle

L'exposition des femmes enceintes employées dans un service utilisant les rayonnements ionisants a fait l'objet d'une analyse détaillée et de recommandations explicites de la CIPR 84 dont nous citerons de larges extraits. Ces recommandations, solidement étayées scientifiquement et tenant compte des réalités socio-économiques, dans le droit fil de la bonne gestion de la radioprotection, devraient désamorcer la phobie irrationnelle qui s'est parfois installée sur ce sujet dans ce milieu professionnel. Elles posent comme préambule des conditions extrêmement rigoureuses pour l'exposition du fœtus, considéré comme une personne du public : « Les limites

de dose pour le fœtus sont à peu près comparables à celles concernant la population générale. Cette approche est raisonnable, car si la mère a pu choisir une profession l'exposant au rayonnement, le futur enfant n'a quant à lui pas pris une telle décision. L'adoption d'une limite de dose rigide pour l'embryon ou le fœtus d'une femme enceinte professionnellement exposée pourrait poser des problèmes pratiques. [...]

Une fois que la grossesse est déclarée et que l'employeur en est averti, une protection supplémentaire du fœtus doit être envisagée. Les conditions de travail des travailleuses enceintes, après la déclaration de leur grossesse, doivent être telles que la dose supplémentaire que le fœtus risque de recevoir pendant le reste de la grossesse ne dépasse pas environ 1 mGy. Dans l'interprétation de cette recommandation, il est important de ne pas créer une discrimination inutile à l'égard des femmes enceintes. La travailleuse et l'employeur ont tous deux des responsabilités. La responsabilité première de la protection du fœtus incombe à la femme elle-même, qui doit déclarer sa grossesse à son employeur dès qu'elle en a confirmation ». Le décret 2003-296 du 31 mars 2003, transposant dans le Code de santé publique la directive Euratom 96/29 a repris cette position très prudente et précise (art. R231-77) : « En cas de grossesse, les dispositions sont prises pour que l'exposition, dans son emploi, de la femme enceinte soit telle que l'exposition de l'enfant à naître, pendant le temps qui s'écoule entre la déclaration de la grossesse et le moment de l'accouchement, soit aussi faible que raisonnablement possible, et en tout état de cause en dessous de 1 mSv. »

Si l'on peut s'assurer, par une étude de poste et la vérification des relevés dosimétriques, que cette dose ne peut être atteinte, il n'y a pas lieu d'écarter la femme enceinte d'un poste de radiologie diagnostique. Cette rigueur n'en donne que plus de valeur à la recommandation suivante, répétant que la soustraction d'une femme enceinte à un poste sous rayonnement ne doit en aucun cas être systématique : « La limitation de la dose délivrée au produit de conception ne signifie pas qu'il soit nécessaire pour les femmes enceintes d'éviter totalement le travail sous rayonnement ou avec des substances radioactives ou qu'il leur soit interdit de pénétrer ou de travailler dans des zones surveillées ou contrôlées. Cela signifie en revanche que leurs employeurs doivent examiner soigneusement les conditions d'exposition des femmes enceintes. Leur emploi doit, en particulier, être tel que la probabilité de doses accidentelles et d'expositions élevées à des radionucléides soit insignifiante. »

Même si la reconnaissance du « droit à l'inquiétude » est inscrite dans le texte : « Le changement de poste pour un poste sans radio-exposition est parfois demandé par les travailleuses enceintes elles-mêmes, qui comprennent que les risques peuvent être faibles, mais qui ne souhaitent accepter aucune augmentation du risque. » Le médecin du travail peut, à la demande de la travailleuse, demander un changement de poste sans avoir à justifier sa décision. « L'employeur peut également être à l'initiative de ce changement de poste afin d'éviter des problèmes futurs au cas où l'employée mettrait au monde un enfant présentant une anomalie congénitale spontanée (ce qui

se produit à un taux d'environ 3 pour 100 naissances). Cette approche ne s'impose pas du point de vue de la radioprotection et elle n'est évidemment envisageable que si le service est suffisamment grand et polyvalent pour que d'autres personnes puissent occuper le poste devenu vacant. [...] Il est également possible d'affecter la femme à un poste pour lequel l'exposition ambiante est plus faible. En radiologie diagnostique, cela peut se traduire par le transfert de l'opératrice de la radiologie interventionnelle à la tomomodensitométrie ou à toute autre zone où l'exposition au rayonnement diffusé est moindre. Dans les services de médecine nucléaire, une opératrice enceinte peut se voir imposer des limites en termes de temps passé dans la radiopharmacie ou à manipuler des solutions d'iode radioactif. En radiothérapie, lorsqu'il s'agit de manipuler des sources scellées, les opératrices ou infirmières enceintes peuvent être amenées à ne pas participer à la curi-thérapie manuelle. Il existe de nombreuses situations où la travailleuse souhaite continuer à faire le même travail ou bien dans lesquelles l'employeur dépend de la travailleuse pour continuer à assurer une prise en charge adéquate des patients. Du point de vue de la radioprotection, cela est parfaitement acceptable à condition de pouvoir estimer de manière raisonnablement fiable la dose fœtale et que celle-ci ne dépasse pas la limite recommandée de 1 mGy après la déclaration de la grossesse. Il serait raisonnable d'évaluer l'environnement de travail afin de garantir que l'exposition accidentelle à de fortes doses est improbable. »

Il faut à ce sujet rappeler que le niveau d'exposition très faible de la quasi-totalité des personnels des services de diagnostic, tel qu'il est mesuré par les procédures dosimétriques concerne la surface et qu'il est considérablement plus faible pour un fœtus, séparé de l'extérieur par l'épaisseur des organes et de la paroi abdominale de sa mère.

« La limite de dose recommandée concerne la dose fœtale et n'est pas directement comparable à la dose mesurée sur un dosimètre individuel. Les dosimètres individuels portés par les travailleuses des services de radiologie diagnostique peuvent surestimer la dose fœtale d'un facteur de 10, voire plus. Si le dosimètre est porté à l'extérieur d'un tablier en plomb, la dose mesurée peut même être environ 100 fois plus élevée que la dose fœtale. Les personnes qui travaillent dans les services de médecine nucléaire ou de radiothérapie ne portent généralement pas de tablier de plomb et elles sont exposées à des énergies photoniques plus élevées. Malgré cela, il est improbable que les doses fœtales dépassent 25 % de la dose lue sur le dosimètre individuel. »

On voit que ces recommandations analysent très précisément les situations d'exposition et permettent de fournir une information objective aux femmes soumises professionnellement à une exposition radiologique.

Conclusion

Les situations d'exposition de l'enfant *in utero* dans le cadre de la pratique médicale sont très différentes selon le type de pratique. Pour le diagnostic,

en radiologie comme en médecine nucléaire, le risque malformatif est nul. La justification et l'optimisation des expositions s'imposent néanmoins pour tenir compte du risque de cancérogenèse différée. En curiethérapie métabolique par l'iode, le risque d'hypothyroïdie foetale et de cancer secondaire peut généralement être prévenu par la pratique systématique d'un test de grossesse ou le report de la thérapeutique après la naissance. Pour la radiothérapie, où les doses foetales peuvent être fortes, les risques cancérogènes sont avérés et le risque de maldéveloppement cérébral n'est pas nul mais le devenir de l'enfant est étroitement dépendant de la santé de sa mère. Il y a donc un choix rationnel à faire, où les dimensions éthiques et familiales doivent avoir toute leur place.

Vérifiez si vous avez assimilé les points importants de ce chapitre en répondant au questionnaire en fin d'ouvrage.

Pour en savoir plus

ICRP. Grossesse et irradiation médicale. (ICRP publication 84). *Annals ICRP* 1991. Oxford, Pergamon Press, 2000 ; trad. fr. EDP Sciences, Paris, 7 avenue du Hoggar, BP 112, F-91944 Les Ulis Cedex.

8 Effets pathologiques des rayonnements ionisants : effets stochastiques

Les effets stochastiques, ou aléatoires, sont ainsi nommés parce que leur survenue s'analyse en termes de probabilité. Ils sont la conséquence de modifications du matériel génétique cellulaire qui induiront des cancers si elles portent sur des cellules somatiques, des modifications du phénotype de la descendance de l'individu exposé si elles portent sur des cellules germinales. Si ces effets n'ont, en théorie, pas de seuil, ils ne sont en réalité observables qu'à partir de doses moyennes et fortes au moyen d'études épidémiologiques. Pour ne pas sous-estimer le risque, on considère que l'augmentation de la probabilité d'apparition de cancer est proportionnelle à la dose reçue. Si l'effet apparaît, il évolue ensuite indépendamment de la dose, c'est-à-dire que sa gravité ne dépend pas de la dose initiale.

Cancérogenèse

La survenue de cancer après exposition aux rayonnements ionisants (RI) à forte dose est un effet bien établi, reconnu peu après la découverte des rayons X en 1895. Quel que soit le facteur déclenchant, le processus de cancérogenèse passe par trois étapes : l'initiation, la promotion et la progression.

Initiation

Elle résulte de l'activation d'un oncogène ou de l'inactivation d'un anti-oncogène.

Activation d'un oncogène

Au départ d'une lignée cancéreuse peut se trouver un transmetteur erroné de multiplication cellulaire, dont la synthèse est gouvernée par un gène appelé oncogène. Les oncogènes dérivent de proto-oncogènes qui ne sont fonctionnels qu'au cours de l'embryogenèse, durant laquelle ils permettent la multiplication de lignées cellulaires. Ils sont ensuite inactifs mais peuvent être réactivés par mutation, translocation ou amplification, portant toujours sur un point précis. Ainsi, par exemple, dans la thyroïde, une translocation induite par les rayonnements ionisants amène le locus « PTC » au contact du locus « RET » sur le chromosome 10 et cette conjonction peut induire un cancer papillaire. Ce mécanisme est en fait très rare

car l'activation d'un oncogène nécessite un impact très précis sur le locus du proto-oncogène, et sa probabilité est très faible. Toute lésion destructrice (délétion) survenant à proximité du locus supprime la fonction du gène ; il ne peut donc y avoir d'initiation de lignée cancéreuse. En outre, le proto-oncogène n'est parfois accessible qu'au cours de la croissance de l'organe. Lorsque celui-ci est arrivé à maturité, le proto-oncogène n'est plus activable. Ce n'est donc qu'en cas de très nombreux impacts, chez des sujets non adultes, comme dans le cas de la contamination par l'iode radioactif à forte dose survenue chez des enfants après Tchernobyl, que cette conjonction nécessaire à la carcinogenèse est possible. Un autre exemple d'induction de cancer par activation d'un oncogène est le lymphome de Burkitt de l'enfant africain, où l'oncogène C-myc est activé à l'occasion d'une co-infection par le virus Epstein-Barr et le paludisme. Les cancers par activation d'un oncogène peuvent survenir à tout âge, et notamment dans l'enfance.

Désactivation d'un anti-oncogène

D'autres gènes, les anti-oncogènes, règlent les capacités de prolifération cellulaire d'un tissu et les relations de chaque cellule avec les autres cellules du tissu. On en connaît plus d'une centaine, la plupart en lignées somatiques mais une vingtaine en lignées germinales et susceptibles de transmission à la descendance. Le mécanisme d'inactivation d'un anti-oncogène est beaucoup plus souvent en cause dans la genèse d'un cancer. Les deux allèles d'un gène ayant une fonction de contrôle de la multiplication cellulaire ont une fonction équivalente. Si une mutation, ou une lésion destructrice (délétion) affecte l'un des allèles, l'autre assure seul le contrôle de la prolifération cellulaire. Une inactivation de cet allèle restant, dans la même cellule, sera nécessaire pour donner naissance à une lignée cellulaire incontrôlée, c'est-à-dire un cancer. Si la probabilité du premier événement (inactivation du premier allèle) est de $1/N$, la probabilité de l'inactivation des deux allèles sera donc de $1/N^2$.

C'est pourquoi les cancers répondant à cette obligation de double inactivation surviennent souvent tard au cours de l'existence des sujets. La probabilité étant faible, il faut laisser le temps aux mutations, induites par toutes sortes d'événements, (en premier lieu les dégâts liés au métabolisme oxydatif, puis ceux de divers agents mutagènes, parmi lesquels les radiations ionisantes), de se produire. En revanche, lorsqu'il existe un défaut ou une absence d'un gène anti-oncogène, le cancer peut survenir tôt dans l'existence. Un des mieux connus de ces gènes, le gène ATM, déficient dans l'ataxie-télangiectasie, gouverne la mise en œuvre de la protéine P53, véritable contremaître de la chaîne de multiplication cellulaire : en cas de défaut sur l'ADN de la cellule en cours de division, cette protéine bloque la chaîne afin de laisser le temps aux mécanismes de réparation d'intervenir. Si ce gène est déficient, la multiplication se poursuit sans correction, aboutissant à des lignées cellulaires anormales.

Ces patients sont donc enclins à développer de multiples cancers et particulièrement sensibles aux carcinogènes, parmi lesquels les rayonnements ionisants. Si de multiples lésions sont survenues sur l'ADN, la protéine P53 suspend le mécanisme de réplication, en attendant que les mécanismes de

réparation aient pu restaurer l'intégrité du chromosome altéré. Si la réparation est insuffisante, le mécanisme de division cellulaire reste bloqué et la lignée fautive s'éteindra naturellement. Un certain nombre de maladies héréditaires sont dues à la mutation transmissible d'un allèle réprimant la multiplication cellulaire. Ce sont par exemple l'ataxie-télangiectasie, l'anémie de Fanconi, le xeroderma pigmentosum ou le syndrome de Li-Fraumeni. Le sujet homozygote exprime le phénotype de la maladie et développe inéluctablement au cours du temps une affection cancéreuse spécifique. Le sujet hétérozygote est prédisposé au cancer, puisqu'une seule mutation suffit pour enclencher le mécanisme qui aboutit à la lignée cellulaire cancéreuse.

Action des agents cancérogènes

L'action des agents cancérogènes en général et celle des RI en particulier peuvent donc être la réactivation d'un oncogène ou l'inactivation successive de deux allèles d'un anti-oncogène, ou d'un seul allèle en cas d'inactivation préexistante héritée ou produite par un autre agent cancérogène. Dans le premier cas, l'effet direct ou indirect d'un rayonnement est de produire une cassure avec une réparation incorrecte aboutissant, par translocation, à mettre en contact deux gènes normalement distants. Dans le second cas, toute perte d'un fragment de chromosome, intéressant ou emportant le locus d'un anti-oncogène suffit à supprimer la fonction d'un des deux allèles. Dans tous les cas, les rayonnements à TLE élevé, produisant plus de lésions par unité de volume élémentaire, auront une probabilité supérieure d'engendrer une configuration cancérogène. Par ailleurs, après toute lésion de l'ADN, entrent en jeu, pratiquement immédiatement, les mécanismes de réparation. Ces mécanismes sont très efficaces et assurent la restitution intégrale de la structure génétique tant que le nombre des lésions n'est pas trop élevé. Lorsque le nombre de lésions induites devient trop important, ces mécanismes peuvent être dépassés et réparer incomplètement ou de façon incorrecte les lésions de l'ADN. Ceci explique le rôle fondamental du débit de dose dans la genèse des lésions du matériel génétique.

Promotion

Le développement d'un cancer invasif n'est pas inéluctable après l'étape d'initiation. Beaucoup d'organes sont, avec le vieillissement, siège de cancers quiescents ou occultes (prostate, sein, thyroïde, notamment). C'est seulement sous l'action de facteurs extrinsèques qu'ils vont proliférer localement. Les facteurs qui stimulent la prolifération (promoteurs) sont nombreux. Ce sont des facteurs intrinsèques (inflammation chronique, hormones) ou extrinsèques (produits chimiques). On sait par exemple que le cancer du foie lié à l'hépatite B dans sa forme chronique n'est pas dû au virus lui-même (qui n'est pas oncogène), mais que le portage prolongé du virus induit, au sein du parenchyme hépatique, des réactions de défense inflammatoire qui vont promouvoir des lignées cancéreuses à partir de cellules mutées à l'état quiescent. Il en va de même pour les cancers de vessie liés à la bilharziose.

Progression

C'est l'étape ultime du développement du cancer qui acquiert la faculté de dépasser les limites de l'organe d'origine et de se développer à distance (métastases), voire d'être transmis par injection à un autre sujet. Cette capacité n'est acquise que par une fraction de la population de cellules cancéreuses, qui vont être sélectionnées aux dépens des cellules de moindre aptitude à la prolifération. Cette étape est soumise aux capacités de défense de l'hôte qui, normalement, détecte comme intruses ces cellules anormales et les détruit. Une baisse des capacités immunitaires de l'hôte permet l'expansion cancéreuse sans que l'on sache s'il s'agit d'un mécanisme pré-existant ou si cette déficience est induite par le cancer lui-même.

Quantification

Probabilité de développement

Toutes les étapes entre l'événement initial et le cancer symptomatique dépendent de nombreux facteurs qui peuvent enrayer le mécanisme. Le premier facteur de contrôle est actif, c'est le système enzymatique de réparation des lésions chromosomiques (cf. chapitre 5), très efficace quand le nombre de lésions reste limité. Par ailleurs, il existe des facteurs de sécurité « passifs » qui sont la faible probabilité de développement de cellules dont le matériel génétique est endommagé ; certaines de ces cellules vont mourir immédiatement, d'autres vont disparaître après quelques divisions (apoptose). Le système de réparation lui-même est sous le contrôle de gènes qui expriment des protéines régulatrices du cycle cellulaire telles que la protéine P53. Les étapes de promotion et de progression sont elles aussi dépendantes de facteurs extrinsèques ou intrinsèques, dont l'absence peut empêcher l'expression de la lignée cancéreuse. La filiation entre un événement (lésion de l'ADN produite par une ionisation) et un cancer nécessite donc un jeu complexe de probabilités conditionnelles et la probabilité résultante est donc beaucoup plus faible que chacune des probabilités d'événements nécessaires au développement d'un cancer invasif. La théorie simpliste de la linéarité sans seuil (« toute dose, si faible soit-elle, est susceptible d'aboutir à un cancer ») fait bon marché de la complexité de ces phénomènes biologiques que nous n'avons fait qu'aborder.

Incidence spontanée

On estime la probabilité de décès par cancer de chaque individu à 25 % environ et la probabilité naturelle de survenue de cancer dans la vie d'un individu à 30 % environ. En fait, les données des examens autopsiques systématiques montrent la présence de cancers occultes chez une majorité d'individus morts d'une autre cause. Ainsi, après 60 ans, des îlots de cellules cancéreuses sont découverts dans la prostate de plus de 50 % des hommes et dans le tissu mammaire de plus de 50 % des femmes. Il en va de même pour la thyroïde, un cancer occulte de la thyroïde pouvant être mis en évidence par examen anatomopathologique systématique chez 15 à 20 %

des sujets de plus de 50 ans, en sachant que la prévalence de nodules thyroïdiens est de 50 % après cet âge. On conçoit que l'amélioration du dépistage et l'allongement de la durée de vie fassent découvrir davantage de cancers parmi les populations occidentales. C'est ce que confirment les plus récentes enquêtes épidémiologiques qui mettent en évidence, pour les vingt dernières années en France, une augmentation de l'incidence du cancer mais une diminution de la mortalité due à ces cancers (l'incidence des cancers a augmenté de plus de 60 %, de 170 000 à 278 000 mais la mortalité par cancer n'a augmenté que de 20 %).

Chez l'enfant, on estime que le risque de cancer spontané entre 0 et 15 ans est de 0,2 à 0,3 %. L'exposition *in utero* à une dose de 10 mSv augmenterait ce risque spontané d'environ 0,05 % (cf. chapitre 7).

Cancérogenèse induite

Parmi l'ensemble des cancers déclarés, on estime schématiquement que 1/5 sont dus à l'intoxication tabagique, 1/10 à l'intoxication alcoolique, 1/3 à des facteurs alimentaires, 1/20 à des carcinogènes environnementaux, parmi lesquels les radiations ionisantes qui arrivent loin derrière les ultraviolets (cancers cutanés). Les principales causes de décès par cancers sont donc avant tout comportementales, notamment alimentaires, puisque le surpoids à lui seul est associé à une augmentation des morts par cancers d'environ 50 % chez l'homme et 60 % chez la femme.

Données épidémiologiques

Life span study (LSS)

On désigne sous ce nom l'étude des survivants d'Hiroshima et de Nagasaki. Elle a porté sur environ 95 000 personnes, suivies depuis 1950. Cette étude a recensé, depuis 1950, environ 850 cas de décès par cancers en excès par rapport au nombre attendu dans cet effectif (environ 20 000), en se référant à une population japonaise contemporaine non irradiée, à conditions de vie égales. Un facteur important à noter est que la dose reçue par ces sujets a été délivrée dans un temps très bref (fort débit de dose). À partir de ces données épidémiologiques solides (grands effectifs, surveillance rigoureuse), a été mise en évidence une relation indiscutable entre l'exposition et la survenue de cancers avec une relation sensiblement linéaire entre la dose reçue et la probabilité d'apparition de ceux-ci, mais uniquement pour des doses élevées : il n'y a pas eu d'augmentation du taux de cancers chez les personnes ayant reçu des doses inférieures à 0,1 Sv. C'est pourquoi la courbe de relation dose-effet n'a pas de partie initiale (cf. fig. 1-2).

Pour pouvoir supputer un effet aux faibles doses, il faut reconstruire la partie initiale de la courbe par prolongation vers l'origine. En outre, il faut appliquer un facteur de réduction du risque tenant compte du débit de dose. En effet, l'expérience montre que les effets d'une dose de rayonnements ionisants sont moindres si cette dose est délivrée dans un temps plus long (faible débit de dose). Ce coefficient de réduction de dose se situe

entre 2 et 10. Pour avoir la certitude de ne pas sous-estimer le risque, on utilise le modèle d'extrapolation linéaire (qui n'est pas le plus probable) et on applique le facteur de réduction de débit de dose le plus bas, c'est-à-dire deux. C'est ainsi qu'a été construite la relation linéaire sans seuil, d'où découlent tous les calculs de radioprotection et les recommandations de la CIPR.

Les cancers observés dans la LSS sont de tous types mais leur chronologie de survenue a été différente : un excès important de leucémies (risque relatif de 5) est apparu relativement tôt, à partir de la cinquième année après les bombardements, avec un pic à la huitième année, et une décroissance lente avec un excès persistant jusqu'à la quinzième année, puis un retour à la ligne basale. Parmi les cancers solides, l'excès est apparu plus de 15 ans après l'exposition et augmente avec le temps, en fraction constante du nombre spontané, c'est-à-dire que le risque relatif reste constant et que le nombre de cancers en excès augmente du simple fait de l'augmentation d'incidence des cancers avec l'âge.

Irradiations thérapeutiques

Outre la cohorte des irradiés japonais, plusieurs études épidémiologiques ont des effectifs et des niveaux d'exposition suffisants pour autoriser des conclusions statistiques. Les premières furent la cohorte de patients dont le rachis a été irradié pour traiter une pelvispondylite rhumatismale (PSR) et la cohorte de femmes irradiées pour cancer du col de l'utérus. Plus récemment ont été publiées des études multicentriques de cohortes de sujets irradiés dans l'enfance pour affections malignes.

Cancers survenus après irradiation rachidienne

Les doses reçues, dans un but anti-inflammatoire, par les patients atteints de PSR (environ 14 000) étaient de 3 à 5 Gy. Elles ont abouti à un excès de cancers solides de près de 30 % et à un triplement du taux de leucémie par rapport aux témoins. Cet excès de cancers est passé par un maximum une dizaine d'années après l'irradiation puis il a décroché jusqu'au taux basal en 20 ans environ. Cette étude confirme donc l'effet cancérigène des irradiations à forte dose, en revanche, elle ne confirme pas le modèle du risque relatif constant, puisque, dans ce cas, l'excès de cancers n'a plus été observé après 20 ans, alors que le nombre de cancers spontanés augmente avec l'âge.

Cancers apparus secondairement après irradiation pour cancer du col de l'utérus

Il s'agissait d'une étude multicentrique internationale comparant les seconds cancers survenus chez les femmes traitées par radiothérapie et curiethérapie pour cancer du col de l'utérus. Elle fait apparaître un excès de cancers pour les organes ayant été irradiés à forte dose (plus de 10 Gy) au voisinage de l'utérus. Il s'agit en particulier de cancers de la vessie, du rectum et de l'os. En revanche, l'incidence des leucémies est relativement faible (risque relatif de 1,7 pour 1 Gy) par comparaison avec la cohorte japonaise et celle des malades traités pour PSR. Ces discordances peuvent

s'expliquer, par un débit de dose très différent dans le premier cas, par l'irradiation préférentielle d'une grande quantité de moelle osseuse dans les irradiations du rachis dans le second cas.

Cancers apparus secondairement après irradiation dans l'enfance pour affection maligne

Plusieurs études multicentriques internationales, coordonnées par l'unité INSERM de l'Institut Gustave Roussy ont dénombré les seconds cancers survenus chez les patients traités par radiothérapie et chimiothérapie pour des affections cancéreuses dans l'enfance. Ces études montrent un risque de décès par survenue d'un deuxième cancer multiplié par 5 pour les carcinomes et par 12 pour les sarcomes pour des doses cumulées supérieures à 150 Gy, avec une augmentation du risque avec la dose reçue.

Expositions diagnostiques

Au début des années 2000, plusieurs études épidémiologiques ont essayé de déterminer le risque potentiel de l'exposition des patients aux rayons X dans un but diagnostique. Certaines de ces études, extrapolant le risque à l'ensemble de la population à partir de doses collectives de rayonnement délivrées dans un but médical, évaluaient ainsi le nombre de morts par cancer induit par les rayonnements dans les pays développés à plusieurs milliers annuellement (Berrington, Lancet 2004). Ce mode de calcul fantaisiste avait été par la suite repris par des articles de grande presse, notamment à l'occasion du rapport de l'INVS et de l'IRSN publié en France en 2006. On lisait ainsi dans l'hebdomadaire *Le Point* du 19 octobre 2006 : « L'IRSN a calculé que, du seul fait de ses visites chez le radiologue, chaque Français reçoit une dose de 0,6 à 0,8 mSv par an. Une dose qui, rapportée à l'ensemble de la population, causerait 2 500 cancers nouveaux chaque année. » On retrouvait ici l'ineptie du calcul du risque théorique de cancer extrapolé à la dose collective : une dose de 0,7 mSv par Français multiplié par 60 000 000, soit 42 000 Sv, avec un risque de cancer mortel de la population générale de 6 % par Sv, soit 2 500 cancers par an causés par la radiologie ! Pourquoi ce mode de calcul est-il inepte ? Pas seulement parce qu'il fait appel à la relation linéaire sans seuil, discutée pour les faibles doses (*cf. infra*), mais surtout parce qu'il ne tient pas compte de l'histogramme de distribution de la dose dans la population : chaque année, la majorité de la population ne reçoit aucune dose, un grand nombre reçoit des doses insignifiantes : clichés dentaires et extrémités, un petit nombre d'enfants, d'adolescents et d'adultes jeunes reçoivent des doses significatives parce qu'ils sont atteints de pathologie diverses et l'essentiel de la dose restante est distribué à des gens très malades ou très âgés. Les scanners itératifs « corps entier » et la radiologie interventionnelle ne concernent qu'une petite proportion de patients, donc une infime minorité de la population. Ces patients, dont la plupart ont plus de 60 ans, sont atteints d'une pathologie lourde, cancéreuse ou vasculaire. Les fortes doses qu'ils reçoivent seront sur eux sans conséquence parce que leur espérance de vie, du fait de leur grand âge ou de leur pathologie, est incompatible avec le risque stochastique modélisé

par la RLSS. On estime que, dans les pays développés, près de 30 % des dépenses de santé consacrées à un individu concernent des soins délivrés dans sa dernière année de vie. À l'évidence, les explorations diagnostiques lourdes font partie de cet ultime combat médical et notre expérience hospitalière quotidienne nous le confirme. La fin de vie des malades cancéreux ou polyvasculaires est rythmée par des explorations radiologiques dont la fréquence augmente en approchant du décès. Saupoudrer les fortes doses de ces examens de fin de vie sur une population générale pour calculer une valeur de mortalité induite dans cette population générale est donc un non-sens.

En revanche, plusieurs études plus récentes ont porté non sur des extrapolations mais sur des données de suivi épidémiologique de grands effectifs d'enfants et adolescents exposés à des doses significatives lors de scanners. Elles montrent un excès de risque relatif significatif pour les leucémies et tumeurs cérébrales. L'étude de Pearce (Pearce, Lancet 2012) met en évidence un excès de risque relatif de leucémie et de tumeur cérébrale maligne. Le risque serait multiplié par trois pour des doses cumulées supérieures à 50 à 60 mGy. Ces affections étant rares, le risque absolu cumulé reste cependant faible : chez des enfants exposés avant l'âge de 10 ans, le risque serait d'un cas supplémentaire de leucémie et d'un cas supplémentaire de tumeur cérébrale pour 10 000 examens scanographiques. Ces études récentes confirment donc la notion bien établie de radiosensibilité particulière des enfants et adolescents et doivent faire renforcer la vigilance sur la justification et l'optimisation des examens dans cette population.

Rayonnement naturel

De nombreuses régions du monde (*cf.* chapitre 4) ont une radioactivité naturelle très élevée, pouvant atteindre des valeurs 10 à 20 fois supérieures à celle de l'exposition naturelle moyenne en France. Toutes les études épidémiologiques effectuées dans ces régions ont conclu à l'absence d'augmentation des affections cancéreuses.

La seule corrélation établie entre une exposition au rayonnement naturel et l'augmentation de l'incidence des cancers est celle des cancers bronchopulmonaires chez les mineurs d'uranium. L'air des mines d'uranium contient en effet une importante quantité de radon (plusieurs milliers de Bq.m⁻³). Ce radioélément naturel, émetteur alpha, peut léser les cellules de l'épithélium bronchique et alvéolaire avec lequel il entre en contact. Parmi les mineurs ayant travaillé dans ces mines, avant qu'une ventilation efficace n'y soit devenue obligatoire, on a observé un excédent de cancers, avec un risque relatif de 2 à 5 selon les études. Le calcul des équivalents de doses reçues à l'épithélium broncho-alvéolaire évalue les doses reçues à plusieurs dizaines de sieverts. La mise en place de mesures de prévention efficaces (ventilation, surveillance dosimétrique d'ambiance, mécanisation et limitation de séjour dans les galeries) depuis plus de 20 ans a fait disparaître l'excès de risque chez ces travailleurs.

Quantification du risque cancérigène

L'ensemble des données disponibles sur la cancérogenèse parmi les populations soumises à des expositions fortes et moyennes est périodiquement revu par l'UNSCEAR qui publie ses conclusions dans des rapports exhaustifs. Parmi ces données, la *Life Span Study* a toujours un rôle prépondérant. La CIPR analyse les données de ces rapports et publie, dans ses recommandations, une estimation des risques, fondée sur la RLSS qui servira de modèle prévisionnel pour les affections cancéreuses radio-induites. Ainsi, à partir du rapport de l'UNSCEAR publié en 2000, la CIPR dans ses prochaines recommandations (publiées en 2007), estime le risque supplémentaire de décès par cancer pour la population générale et pour les adultes. Par rapport à la CIPR 60, la notion d'adultes (d'âge compris entre 20 et 64 ans) remplace celle de travailleurs en raison de l'introduction d'une limite de dose (1 mSv) pour le public.

- Risque cancérigène = $5,5 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Sv}^{-1}$ pour la population générale.
- Risque cancérigène = $4,1 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Sv}^{-1}$ pour une population d'adultes.

On pourrait ainsi calculer, par exemple, qu'un adulte recevant accidentellement 25 mSv verra son risque de décès par cancer augmenter de 0,1 % (c'est-à-dire passer de 25 %, taux moyen spontané, à 25,1 %). Notez que ce calcul ne tient pas compte de l'âge auquel l'exposition a eu lieu (le risque décroît considérablement, voire disparaît avec l'âge) et qu'il n'est qu'un outil de travail dont la CIPR déconseille l'emploi pour « prédire » des décès par cancer dans une population exposée à de faibles doses de rayonnement.

Effets héréditaires

Les effets héréditaires ou génétiques sont les effets qui sont susceptibles d'apparaître dans la descendance des sujets dont les cellules germinales ont été exposées aux rayonnements ionisants.

Données expérimentales

Les rayonnements ionisants sont capables, au même titre que de multiples agents, d'induire des mutations à doses moyennes et fortes en expérimentation animale (drosophile, souris). Les effets génétiques proprement dits sont néanmoins très limités et doivent être rapportés au taux spontané de ces anomalies, particulièrement important chez tous les mammifères. Le calcul des effets génétiques participant au « détrimement » potentiel des radiations ionisantes repose sur une double extrapolation, de l'animal à l'homme d'une part, des fortes doses à fort débit de dose aux faibles doses d'autre part.

Incidence spontanée et anomalies radio-induites

L'incidence spontanée des anomalies génétiques est très élevée chez les mammifères, supérieure à 70 % des naissances. L'ensemble des données

scientifiques disponibles est régulièrement analysé par le comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des radiations atomiques (UNSCEAR) qui propose sur une base expérimentale établie chez la souris, avec une dose doublante de 1 Gy (très probablement supérieure chez l'homme), une probabilité d'augmentation, pour une exposition parentale chronique de 1 Gy, d'environ 0,5 % par Gy par million de naissances et de 0,25 % à la deuxième génération (tableau 8-1).

Là encore se pose le problème de la validité de l'extrapolation à l'homme des expérimentations animales à fortes doses et forts débits de dose. Les résultats des calculs d'extrapolation sont d'autant plus hypothétiques que, à la différence de la cancérogenèse où l'extrapolation se fait à partir d'effets observés chez l'homme à fortes doses, l'extrapolation pour les effets génétiques ne peut se faire qu'à partir de l'expérimentation animale puisqu'aucun effet n'a jamais pu être mis en évidence dans l'espèce humaine. L'absence d'effets génétiques tangibles s'explique par la mise en jeu des mécanismes de réparation chromosomique. Depuis 25 ans, de nombreux travaux ont montré qu'il existait des mécanismes de réparation efficace des lésions de l'ADN constituant les chromosomes (cf. chapitre 5).

Tableau 8-1
Estimation du nombre d'anomalies génétiques transmises à la descendance après exposition aux rayonnements ionisants (UNSCEAR 2001)

Estimation du risque génétique pour une exposition parentale chronique, de 1 Gy, par million de naissances.			
Anomalies génétiques	Incidence naturelle par million de naissances vivantes	Nombre de cas supplémentaires à la 1 ^{re} génération	Nombre de cas supplémentaires à la 2 ^e génération
Mutations dominantes et liées au sexe	16 500	750 à 1 500	500 à 1 000
Mutations récessives	7 500	0	0
Anomalies chromosomiques	4 000	Incluses dans les autosomiques dominantes et les anomalies congénitales	
Anomalies multifactorielles	650 000	250 à 1 200	250 à 1 200
Anomalies congénitales	60 000	2 000	400 à 1 000
Total	738 000	3 000 à 4 700	1 150 à 3 200
Excès de risque par Gy		0,41 à 0,64 %	0,16 à 0,43 %

Noter la forte incidence des anomalies génétiques spontanées, supérieure à 70 % des naissances.

Données épidémiologiques

Life Span Study

Les données épidémiologiques humaines, qui ont porté sur la descendance des survivants d'Hiroshima et de Nagasaki, n'ont pas montré pour des doses fortes à fort débit de dose, donc dans les conditions les plus sévères, d'augmentation des anomalies génétiques ou d'augmentation des malformations ou affections malignes, supposées secondaires à des mutations, dans la descendance des sujets irradiés. Comme le constate Schull, généticien et rapporteur de l'immense somme de travaux consacrés aux conséquences des explosions japonaises : « [...] *despite the monumental investment in time and labor that has been made, no unequivocal evidence of radiation-related genetic damages emerges.* »*

Irradiations médicales

Aucune étude n'a montré d'augmentation des anomalies génétiques dans la descendance des patients traités par radiothérapie ou curiethérapie métabolique pour cancer, ni, *a fortiori*, chez les patients explorés en radiodiagnostic.

Rayonnement naturel augmenté

Les études de grande envergure portant sur les populations soumises à des niveaux d'exposition naturelle importante n'ont montré aucune augmentation des maladies à transmission héréditaire. Récemment, une étude menée au Kerala, région côtière d'Inde où l'exposition naturelle est d'un à deux ordres de grandeur supérieure à l'exposition naturelle moyenne, a montré une augmentation des modifications chromosomiques chez les habitants de ces régions. L'absence d'augmentation simultanée des affections génétiques ou des cancers est un argument supplémentaire pour penser que les lésions chromosomiques survenant à faible taux au cours d'une exposition à faible débit de dose sont neutralisées par les mécanismes de contrôle cellulaire et ne donnent donc pas d'effets observables.

Quantifications du risque génétique

Les données expérimentales et l'absence d'effets observables chez l'homme, quatre générations après la découverte des RI et l'absence d'effets observables à la deuxième génération des survivants d'Hiroshima et de Nagasaki, ont conduit la CIPR à revoir ce risque à la baisse, après les dernières publications de l'UNSCEAR.

Dorénavant, en tenant compte des études sur la souris, la CIPR estime le risque génétique à la deuxième génération à $2.10^{-3}.Sv^{-1}$ au lieu de $1.10^{-2}.Sv^{-1}$ dans les recommandations précédentes (CIPR60). Cette réévaluation, divisant le risque par 5, de 1 % à 0,2 %, a conduit à diminuer le coefficient de pondération des gonades, de 0,2 à 0,08 (cf. chapitre 3).

* « Malgré l'énorme investissement en temps et en travail, il n'apparaît aucune preuve tangible de dommages génétiques induits par les radiations ».

Relation dose-effet, effet des faibles doses

Les effets stochastiques sont réputés sans seuil et, faute d'effets observés aux faibles doses, la radioprotection a fondé ses principes de prévention sur une extrapolation linéaire des effets observés aux fortes doses. L'utilisation de la relation linéaire sans seuil est justifiée dans un but social, pour garantir aux travailleurs exposés une limite supérieure de risque, un niveau de protection acceptable et, le cas échéant une indemnisation (*cf.* Introduction : « Fondements et historique de la radioprotection »). Il en va tout autrement lorsqu'on utilise cette relation linéaire sans seuil comme une probabilité d'effets cancérogènes ou génétiques, appliquée à l'effet de faibles doses sur des effectifs considérables, ce qui conduit à des résultats totalement fantaisistes. On trouve ainsi régulièrement dans la presse généraliste ou des publications « écologistes » des assertions telles que : « [...] la radiologie médicale fait plusieurs milliers de morts en France chaque année » ou « [...] un avion sur La Hague ferait 1,5 million de morts en Europe ». Cette utilisation de l'extrapolation linéaire sans seuil, déconseillée par la CIPR, est contestée par la grande majorité des experts médicaux au fait de la complexité des mécanismes biologiques. En effet, elle repose sur le dogme « une seule altération du matériel chromosomique peut aboutir à un cancer ». Nous avons vu que les mécanismes de cancérogenèse sont extraordinairement plus complexes. Un exemple simple permet de pointer l'inanité d'un tel principe : les cellules humaines et celles des petits mammifères ont sensiblement la même taille et la même masse. Une même dose délivrée à une souris de 70 g ou à un homme de 70 kg devrait donc susciter 1 000 fois plus de cancers chez ce dernier. En effet, l'énergie déposée concerne 1 000 fois plus de cellules, avec une probabilité identique de dommage au matériel nucléaire. On sait pourtant que le taux d'incidence de cancers radio-induits est sensiblement le même dans les deux espèces à dose égale. L'extrapolation simpliste de la RLSS fait bon marché des mécanismes de réparation des lésions de l'ADN, dont on sait qu'elles sont spontanément très fréquentes (plusieurs milliers de cassures de la chaîne d'ADN se produisent par heure dans chaque cellule de mammifère, du fait du stress oxydatif). Les quelques cassures ajoutées par une exposition à faible dose et faible débit de dose ne peuvent avoir d'effet propre, ce qui n'est pas le cas des fortes doses à fort débit de dose où les milliers de lésions induites simultanément peuvent déborder ces mécanismes de réparation. En outre, de solides données expérimentales démontrent même un effet inverse des faibles doses, qui stimulent ou préparent les interventions de réparation cellulaire. Ainsi, des populations cellulaires irradiées à dose forte présentent moins de lésions si on leur a délivré au préalable une faible dose. C'est la réponse adaptative ou hormésis. Par ailleurs, de multiples exemples en pathologie humaine démontrent l'existence d'un seuil, notamment pour les contaminations par des émetteurs alpha. Les mieux connus sont les cancers radio-induits chez les peintres de cadrans lumineux contaminés par le radium contenu dans la peinture fluorescente dont ils enduisaient leur pinceau, chez qui les cancers ne sont apparus qu'au-dessus d'équivalents de doses cumulées de 10 Sv, ou chez les travailleurs du complexe nucléaire de Mayak, en URSS, où l'inhalation

de plutonium n'a entraîné de cancer bronchique que chez ceux qui ont cumulé des équivalents de doses de plusieurs Sv. Au début du XXe siècle et de la radiologie, un excès de leucémies était apparu chez les radiologues et techniciens qui utilisaient les rayons X sans protection efficace. Avec les premières recommandations de limites professionnelles d'exposition (à l'époque de 15 rads par an, soit 150 mSv), la mise en œuvre d'une surveillance et le respect de ces limites firent disparaître cet excès de leucémies dans la deuxième partie du siècle ce qui est également en faveur d'un seuil pour les faibles doses. Dans un rapport commun en 2005, l'Académie des sciences et l'Académie de médecine analysent l'argumentation des tenants de la RLSS et démontrent la fragilité des postulats qui sous-tendent cette théorie, en rappelant les mécanismes qui interviennent *in vivo* à tous les échelons pour contrôler le processus qui mène au cancer : la réponse modulée de la cellule à l'agression, qui tend à faire disparaître les cellules lésées si elles sont en petit nombre (très faibles doses) et à les réparer si le nombre de lésions est important (au-delà de 10 mSv environ) ; le contrôle mutuel, exercé par les cellules d'un même tissu, qui empêche la prolifération d'une cellule modifiée durablement par l'exposition ; la vigilance immunitaire de l'organisme, capable de reconnaître et d'éliminer des clones de cellules transformées. Notons d'ailleurs que les études récentes montrant une augmentation d'affections malignes chez des enfants exposés à des doses significatives mais inférieures à 100 mGy (50 à 60 mGy) indiquent que la relation n'était pas linéaire, mais linéaire quadratique dans cet intervalle (Pearce, Lancet 2012).

Conclusion

Les rayonnements ionisants à forte dose et fort débit de dose ont un effet cancérigène indubitable mais relativement faible par rapport aux autres cancérigènes naturels ou artificiels. Cependant, des effets cancérigènes ont été démontrés pour des doses inférieures à 100 mGy délivrées en scanner chez des enfants, confirmant la radiosensibilité accrue des sujets jeunes, ce qui doit imposer une particulière rigueur dans la justification et l'optimisation des examens radiologiques dans cette population.

Les effets sur le matériel génétique, éventuellement transmissibles à la descendance, ne sont pas établis dans l'espèce humaine et sont probablement négligeables par rapport au nombre d'altérations génétiques spontanées. Les effets des faibles doses quant à eux n'ont jamais pu être mis en évidence et ne le seront probablement jamais, compte tenu de la taille de l'échantillon qui serait nécessaire pour mettre en évidence une différence significative. À défaut de certitude épidémiologique, on utilise la relation linéaire sans seuil pour estimer l'ordre de grandeur du risque encouru par les travailleurs mais cette relation linéaire sans seuil est dépourvue de toute crédibilité scientifique lorsqu'on l'utilise comme une probabilité d'induction d'effets stochastiques des faibles doses dans la population générale.

Vérifiez si vous avez assimilé les points importants de ce chapitre en répondant au questionnaire en fin d'ouvrage.

Pour en savoir plus

- Remontet L, Estève J, Bouvier AM, Grosclaude P, Launoy G, et al. Incidence et mortalité par cancer en France de 1978 à 2000. *Rev Epidem Sante Pub* 2003;51:3-30.
- Calle EE, Rodriguez C, Walker-Thurmond K, Thun MJ. Overweight, obesity and mortality from cancer in a prospectively studied cohort of US adults. *N Engl J Med* 2003;348:1625-38.
- Schull. *Effects of atomic radiations*. New-York: Willey Liss; 1995.
- Berrington A, Darby S, Weiss HA, Doll R. 100 years of observation on British radiologists : mortality from cancer and other causes 1897-1997. *Br J Radiol* 2001;74: 507-19.
- UNSCEAR 2001 Report. *Hereditary Effects of Radiation*. United Nations Publications, New York.
- CIPR. Recommendations. *Annals ICRP* 2007, Publication 103. Pergamon Press, Oxford.
- Berrington de Gonzalez A, Darby S. Risk of cancer from diagnostic X-rays : estimates for the UK and 14 other countries. *Lancet* 2004;363(9406):345-51.
- Pearce MS, et al. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours : a retrospective cohort study. *Lancet* 2012;380:499-505.
- La relation dose-effet et l'estimation des effets cancérogènes des faibles doses de rayonnements ionisants. Rapport de l'Académie de médecine et de l'Académie des sciences. *Bulletin de l'Académie de médecine*, Paris, 2005.

Expositions aux radionucléides : médecine nucléaire, accidents et attentats

Doses délivrées au patient par examens diagnostiques en médecine nucléaire. Moyens de la réduction de la dose

En médecine nucléaire, l'exposition du patient résulte de l'administration d'un médicament radiopharmaceutique à l'origine d'une situation de contamination radioactive interne. Le marquage radioactif du traceur moléculaire est nécessaire pour sa détection par voie externe et pour la réalisation d'une image, en projection ou en coupes, de sa distribution dans l'organisme.

La distribution du traceur dépend des propriétés physiologiques de la molécule vectrice. Pour une application diagnostique donnée, un traceur est choisi en fonction de sa capacité d'incorporation dans une chaîne métabolique ou de fixation sur une cible moléculaire la plus spécifique de l'affection étudiée. Les caractéristiques biochimiques du traceur vont donc aboutir à son accumulation préférentielle au sein de certains organes, de certains tissus de ces organes ou au sein des lésions elles-mêmes. On notera par ailleurs des accumulations non spécifiques, le plus souvent liées à l'élimination du traceur. Elles sont principalement vues dans les cavités excrétrices rénales et le tractus urinaire, voie majeure d'épuration des traceurs et de leurs métabolites.

Paramètres de la dose délivrée par un traceur radioactif

Nature du rayonnement émis

Les rayonnements émis par les traceurs utilisés en médecine nucléaire sont électromagnétiques, principalement gamma d'origine nucléaire, et corpusculaire sous la forme de radioactivité bêta, négative ou positive, d'énergie variable selon les éléments ou d'électrons Auger de faible énergie. Ces deux types de rayonnements aboutissent à deux formes d'exposition différentes.

Rayonnement β et électrons

Le rayonnement β -, émis par le noyau, ou les électrons Auger, émis par le nuage électronique, des atomes radioactifs sont arrêtés dans le milieu où ils ont été émis. Ils vont donc céder toute leur énergie à ce milieu et la distance qu'ils y parcourent est proportionnelle à leur énergie d'émission. En moyenne, un électron de 2 MeV parcourt 1 cm dans un milieu liquide (cf. chapitre 2). Dans le cas d'un traceur radioactif qui s'est concentré dans un tissu, c'est celui-ci qui recevra toute l'énergie cédée par les électrons émis et donc la dose correspondante. Le rayonnement β de l'iode 131 a un parcours moyen de 2 mm dans les tissus. Ceci explique que ces rayonnements β sont à l'origine d'une dose locale potentiellement importante et constituent le principe de base des applications de radiothérapie métabolique. En revanche, ces rayonnements sortent peu du tissu où le traceur s'est accumulé et il n'en résulte pas d'exposition significative à distance. Seule la composante γ éventuellement associée à l'émission β sera source d'exposition à distance du patient. Le phosphore 32, émetteur β pur utilisé pour le traitement d'affections osseuses ou hématologiques, n'induit pas d'exposition dans l'environnement du patient.

Rayonnements électromagnétiques

Ils ne sont pas arrêtés mais seulement atténués par les tissus. De ce fait, l'accumulation d'un traceur émetteur de ce type de rayonnement au sein d'un organe transforme celui-ci en source de radiations ionisantes pour d'autres organes situés à distance. En corollaire, ils n'interagissent que peu dans l'organe de concentration du traceur et ne sont à l'origine que d'une faible exposition locale. Ces rayonnements sont à la base des applications diagnostiques des traceurs radioactifs puisqu'ils seront détectables à l'extérieur du patient et ne déposent qu'une part de leur énergie au sein des tissus, limitant ainsi l'exposition du patient.

Période effective du traceur

Elle correspond au temps au bout duquel la moitié de la radioactivité a disparu du corps du patient à qui le traceur a été injecté. Elle comprend deux termes : la période physique, T_p , du radionucléide qui représente la durée au bout de laquelle son activité a décliné de façon spontanée d'un facteur 2 et la période biologique, T_{biol} , du traceur qui est le temps au bout duquel la moitié de la quantité de traceur injectée a été éliminée du corps.

La période effective T_{eff} est égale au produit de ces deux périodes divisées par leur somme :

$$T_{\text{eff}} = \frac{T_p \times T_{\text{biol}}}{T_p + T_{\text{biol}}}$$

La forme de cette équation indique que la période effective est toujours plus proche de la période la plus courte. Plus la période effective est longue, plus la dose efficace délivrée au patient est élevée. La période

effective de l'iode 131 est de 7,6 jours, il est donc totalement éliminé du patient après 2 mois environ.

Pour calculer la dose reçue par un organe et non plus à l'ensemble de l'organisme, on utilise le temps de résidence qui rend compte de la persistance d'un traceur au sein d'un organe ou d'un tissu.

Quantité de radioactivité injectée

La dose délivrée au patient est linéairement reliée à la quantité de radioactivité injectée. L'activité injectée conditionne le rapport signal/bruit des images, donc la qualité d'image, pour une durée d'acquisition donnée. Un rapport signal/bruit comparable pourra être obtenu en augmentant l'activité injectée ou en augmentant le temps d'acquisition des données. Le choix de l'activité injectée dépend donc de la qualité d'image voulue, du temps d'acquisition que l'on estime compatible avec la réalisation pratique des examens et, évidemment, de l'exposition acceptable du patient.

Un autre paramètre de choix de la quantité d'activité injectée est le type d'acquisition envisagée. Lorsque l'acquisition est divisée en images élémentaires afin de réaliser une étude séquentielle au cours du temps pour représenter de façon dynamique l'accumulation et l'élimination du radiopharmaceutique, il faudra injecter une plus grande activité. C'est le cas également lorsque l'acquisition est faite en projections selon différents angles de vue afin de reconstruire des images tomographiques du volume étudié. L'accroissement de l'activité injectée est imposé par la nécessité de disposer d'un rapport signal/bruit suffisant pour ces images élémentaires, le temps d'acquisition de chacune d'elle étant nécessairement bref afin de maintenir l'acquisition totale dans un temps compatible avec la pratique clinique, 20 à 40 minutes en pratique.

Estimation de la dose en médecine nucléaire

Il s'agit d'un processus complexe en raison de l'hétérogénéité de la distribution des traceurs employés, de l'évolution au cours du temps de cette distribution liée à l'élimination et au métabolisme des molécules ainsi qu'au caractère dynamique des processus radioactifs.

Paramètres biologiques de l'incorporation

Il est nécessaire de disposer pour chaque traceur employé de la cartographie type de sa distribution dans l'organisme identifiant les différents organes et tissus où il se concentre. Pour chaque organe, il est nécessaire de disposer de mesures de la concentration radioactive et de son évolution au cours du temps. De même, les voies de métabolisme et d'élimination du traceur doivent être connues ainsi que l'évolution au cours du temps de la radioactivité du corps entier.

En tenant compte des rayonnements émis par le marqueur radioactif, il est possible de calculer la dose délivrée aux organes concentrant le traceur.

Lorsque le radioélément est émetteur bêta, la dose est délivrée *in situ* dans l'organe cible. À titre d'exemple, la dose délivrée à la thyroïde d'un adulte après absorption de 37 MBq d'iode 131 est de 13 Gy environ. Lorsque le radionucléide est émetteur gamma, il est nécessaire de calculer l'exposition des autres organes à partir des différents organes ayant accumulé le traceur. Des fantômes anthropomorphes sont utilisés pour calculer les paramètres de cette exposition à distance. Ainsi, à partir de l'ensemble de ces données, des procédures de calcul permettent de fournir une estimation de la dose aux principaux organes cibles, en mGy/MBq et de la dose efficace au corps entier en mSv/MBq.

Paramètres individuels

La difficulté de ces calculs est accrue par différents paramètres qui influent sur la distribution du traceur au sein de l'organisme.

Âge

C'est un paramètre très important car la part anatomique et fonctionnelle des organes varie au cours de l'enfance jusqu'à l'âge adulte. Il a donc été nécessaire d'obtenir des données quantitatives spécifiques de tranches d'âge au moyen de fantômes adaptés à ces différents âges. En pratique, l'enfance est divisée en 4 classes d'âge.

Fonction rénale

D'autres paramètres tiennent à l'élimination des traceurs. Ainsi, la dose délivrée par une même activité sera plus importante chez un insuffisant rénal en raison de l'allongement de la période biologique et donc effective d'un traceur à élimination rénale.

Fixation pathologique

Enfin, il existe des variations de distribution entre les patients pour un même traceur. Si une tumeur accumule un traceur de façon importante, elle devient une source radioactive éventuellement intense pour les organes adjacents. Or il n'est pas possible de prévoir l'ensemble des configurations possibles pour les localisations tumorales et l'estimation dosimétrique devient donc particulièrement difficile.

Quoi qu'il en soit, il existe actuellement des valeurs dosimétriques tabulées, calculées sur la base de tels modèles de distribution et de fantômes. Elles sont proposées pour les principaux organes cibles et pour le corps entier avec des pondérations en fonction de l'âge et, le cas échéant, de la fonction rénale. Le document 53 de la CIPR est entièrement consacré à ces données dosimétriques et, plus récemment, le document 80 fournit des valeurs complémentaires. Pour les raisons indiquées ci-dessus, ces documents ne peuvent tenir compte de l'accumulation tumorale éventuelle des traceurs et l'estimation accessible est nécessairement approximative pour un patient donné.

Comment réduire la dose en médecine nucléaire ?

Justification

Comme pour toutes les applications d'imagerie médicale, le premier paramètre de réduction de la dose est la justification de l'investigation projetée. Son principe en est la discussion de l'indication entre le médecin référent et le spécialiste de médecine nucléaire dont le rôle est également de connaître les autres techniques d'imagerie afin d'orienter un patient vers une autre technique n'utilisant pas les RI si elle est d'efficacité égale ou supérieure.

Par ailleurs, le développement actuel de l'imagerie métabolique, très sensible au contexte de réalisation de l'examen, notamment du fait des traitements mis en œuvre, impose un contrôle strict des paramètres susceptibles d'altérer la qualité des informations produites et de déterminer le temps optimal de réalisation de l'exploration en sachant différer celle-ci, si nécessaire.

Optimisation

Nous avons vu que les principaux facteurs de l'exposition sont la quantité de traceur radioactif injecté et la nature des rayonnements émis.

Activité injectée

Elle dépend du rapport signal/bruit nécessaire. L'augmentation de l'activité injectée accroît ce rapport. Cependant, il existe une limite technique à l'activité utilisable. C'est la saturation du détecteur. À ce seuil de saturation, toute augmentation supplémentaire d'activité représente une exposition inutile du patient puisque le détecteur ne peut enregistrer plus d'événements par unité de temps. Toutefois, les évolutions techniques actuelles des gamma-caméras et plus encore des TEP ont repoussé ces limites et la responsabilité de l'utilisateur est accrue en matière de choix d'activité à injecter. Le rôle de la personne spécialisée en radiophysique médicale est renforcé pour la détermination de l'activité et du rapport signal sur bruit optimaux pour une application donnée. Par contre, malgré l'amélioration de la sensibilité de détection des appareils et l'allongement du temps d'acquisition, une réduction excessive de l'activité injectée conduira nécessairement à une dégradation de la statistique de comptage et donc de la qualité des images ainsi que de leur validité diagnostique.

Temps de comptage

La limitation de dose, pour un rapport signal/bruit donné, peut être obtenue par l'augmentation du temps de recueil des données. L'inconvénient est le risque de mouvements du patient au cours d'une acquisition très longue. Ces mouvements aboutissent à une dégradation de la qualité des images.

Paramètres individuels

L'activité injectée doit également être fixée en fonction de paramètres tenant au patient lui-même et il est indispensable de disposer d'abaques d'activités

tenant compte du poids, de l'âge et, en fonction du métabolisme du traceur, de données physiologiques comme la fonction rénale par exemple.

Type de rayonnements émis

C'est un paramètre fondamental de l'optimisation des explorations scintigraphiques. Le choix judicieux du radionucléide peut conduire à une réduction importante de l'exposition. Un exemple est fourni par le remplacement, en diagnostic, de l'iode 131 par l'iode 123 tant pour les explorations thyroïdiennes que pour le marquage de la meta-iodobenzylguanidine MIBG, (utilisée comme traceur des phéochromocytomes ou des tumeurs carcinoïdes), ou de ligands de la neurotransmission. L'iode 123 est un émetteur gamma pratiquement pur de moyenne énergie (170 keV) et de courte période physique (13 heures) alors que l'iode 131 est émetteur gamma à haute énergie (360 keV) et bêta (600 keV d'énergie maximale), avec une période relativement longue (8 jours). En moyenne, l'iode 131 engendre une exposition 10 fois supérieure à celle due à l'iode 123. De plus, l'efficacité de détection des gamma-caméras est bien meilleure pour les rayonnements de basse énergie de l'iode 123 que pour ceux de l'iode 131, autre facteur d'accroissement du rapport signal/bruit lorsque l'isotope 123 est utilisé.

Choix de l'isotope

On peut également substituer à un traceur spécifique un traceur de comportement physiologique différent mais apportant des informations diagnostiques comparables avec des performances équivalentes. Le premier exemple est l'utilisation de traceurs marqués au technétium 99m pour l'imagerie de la perfusion myocardique et le diagnostic de la maladie coronaire en remplacement du thallium 201. Ce dernier est un analogue du potassium et il est distribué dans les mêmes secteurs biologiques que cet élément, alors que les substances technétiées ont une affinité pour les enzymes mitochondriales de la respiration cellulaire. Au plan dosimétrique, le thallium est très pénalisant, du fait d'une émission électromagnétique à faible énergie (80 keV) fortement atténuée par les tissus et d'une période physique de 3 jours. Au contraire, le technétium est un émetteur gamma pur de 140 keV avec une période courte de 6 heures qui permet l'obtention d'images de qualité supérieure tout en générant une exposition inférieure malgré une activité injectée supérieure à celle du thallium.

Le dernier exemple est celui, historique, de la scintigraphie au gallium 67 utilisée pour la mise en évidence de masses résiduelles de lymphomes. Émetteur de plusieurs rayonnements gamma de moyenne et haute énergie, de longue période physique et biologique, cet élément était responsable d'une des plus fortes expositions en médecine nucléaire. De plus, l'activité utilisable étant nécessairement limitée, la qualité des images était fréquemment médiocre. Malgré un métabolisme différent, le fluorodéoxyglucose (FDG) utilisé en tomographie par émission de positons procure une efficacité diagnostique supérieure et une qualité d'image incomparable pour une exposition quatre fois moindre en raison de la très courte période physique et biologique du fluor 18, pourtant émetteur de rayonnements gamma à haute énergie après l'annihilation des positons.

Paramètres radiologiques

Les appareils de tomographie par émissions de positons et de plus en plus de gamma-caméras sont maintenant associés à des dispositifs radiologiques permettant la réalisation d'images anatomiques en coupes, de type scanner le plus souvent et parfois de type capteur plan. Cette partie de l'examen de médecine nucléaire doit faire également l'objet d'une optimisation (cf. chapitre 11), sans perdre de vue les conditions particulières de réalisation de ces images : acquisition en balayage corps entier, sans apnée et sans inspiration profonde notamment.

Il est également nécessaire de rappeler que lorsqu'une telle acquisition est réalisée, les grandeurs dosimétriques correspondantes doivent figurer dans le compte-rendu de l'examen, à côté de l'activité injectée, le produit Dose. Longueur obligatoirement, et éventuellement la dose efficace.

Choix des détecteurs

De façon moins immédiate, l'évolution de la qualité des détecteurs contribue également à la limitation de la dose. L'augmentation de la sensibilité et de l'efficacité de détection permet d'exploiter au mieux l'activité présente dans le sujet et ainsi d'augmenter le signal. Ainsi, les appareils TEP les plus récents, utilisant la technique du temps de vol, ont permis, à qualité d'image conservée, voire améliorée, de réduire le temps d'acquisition (actuellement moins de 15 minutes pour un examen corps entier au FDG) et simultanément l'exposition des patients grâce à la réduction d'activité injectée qu'ils tolèrent.

Par ailleurs, l'augmentation de la résolution en énergie des détecteurs permet une meilleure discrimination du signal utile et du bruit. Cette amélioration intrinsèque du rapport signal/bruit peut être mise à profit pour diminuer la dose. L'exemple le plus caractéristique est fourni par les nouvelles gamma-caméras CZT à semi-conducteurs dont la résolution en énergie est au moins doublée par rapport aux caméras classiques pour les photons de 140 keV émis par le technétium 99m.

Information

Après avoir reçu un radiopharmaceutique, le patient devient un émetteur de RI et le médecin responsable de l'acte doit lui fournir des explications sur ce portage de radioactivité transitoire, ainsi que sur les risques liés aux RI. L'arrêté du 21 janvier 2004 relatif à l'information des personnes exposées aux rayonnements ionisants lors d'un acte de médecine nucléaire impose au médecin nucléaire réalisateur d'un acte thérapeutique quel qu'il soit, ou d'un acte diagnostique avec de l'iode 131, de fournir au patient, avant la réalisation de l'acte :

- les conseils de vie permettant de minimiser les contaminations éventuelles ;
- le nombre de jours où les contacts avec les enfants et les femmes enceintes doivent être réduits ;

- le nombre de jours où le contact avec le conjoint doit être réduit ;
- le nombre de jours où le contact avec des personnes doit être réduit dans le cadre du travail ;
- le nombre de jours où le contact avec les proches, autres que le conjoint, doit être réduit ;
- l'exposition de l'entourage d'un malade reste cependant très faible.

Pour une administration thérapeutique d'iode 131 , par exemple : le débit de dose est, en moyenne, $1,5 \mu\text{Gy/h/MBq}$. Pour 370 MBq administrés, cela donne les débits de dose suivants, selon la distance à la thyroïde du patient :

- $555 \mu\text{Gy/h}$ à 10 cm ;
- $140 \mu\text{Gy/h}$ à 20 cm ($/4$) ;
- $20 \mu\text{Gy/h}$ à 50 cm ($/25$) ;
- $5,5 \mu\text{Gy/h}$ à 1 m ($/100$).

La dose *totale* émise par le patient (jusqu'à la décroissance complète du radioélément, soit moins de 3 mois) est :

- à 50 cm : $< 0,25 \text{ mGy}$;
- à 1 m : $< 0,1 \text{ mGy}$.

Soit une dose inférieure à 15 jours d'exposition naturelle, insignifiante pour l'entourage même le plus proche.

Pour une scintigraphie osseuse au technétium $^{99\text{m}}$ (période = 6 heures, activité administrée = 750 MBq), le débit de dose à 1 m est de $15 \mu\text{Gy/h}$ immédiatement après l'injection, $7 \mu\text{Gy/h}$ 6 heures après celle-ci. La dose totale reçue à 1 m jusqu'à la décroissance complète serait de $0,1 \text{ mGy}$ environ.

Conclusion

Le calcul de la dose délivrée à un patient au cours d'une procédure d'imagerie nucléaire est complexe faisant intervenir de nombreux paramètres physiques et physiologiques. Des calculs ont donc été effectués en utilisant des méthodes standardisées et ont permis d'obtenir des tables tenant compte notamment de l'âge du patient et permettant d'obtenir assez simplement l'ordre de grandeur de l'exposition pour un examen donné. Connaissant ces ordres de grandeur, il est possible d'optimiser l'exposition en adaptant au mieux l'activité injectée pour une qualité d'image donnée. Un autre moyen d'optimisation de l'exploration scintigraphique est la sélection du meilleur traceur pour l'obtention de l'information diagnostique recherchée. Les évolutions technologiques récentes des appareils d'imagerie monophotonique et TEP ont également contribué à réduire de façon significative l'activité nécessaire et donc la dose délivrée. Enfin, lorsqu'une acquisition radiologique est réalisée en association aux images scintigraphiques, il ne doit pas être omis d'optimiser également ses paramètres.

L'exposition de l'entourage familial et professionnel d'un patient traité par radioéléments est très faible mais l'information du patient est désormais obligatoire après toute procédure thérapeutique.

Exposition des victimes d'un accident nucléaire ou d'un attentat à composante radique

L'exposition du public à des radionucléides artificiels peut également résulter d'un accident survenant dans une installation nucléaire ou d'un attentat terroriste dont on sait que plusieurs scénarios sont possibles. Le scénario le moins probable, sans être totalement exclu, est celui d'une explosion nucléaire dans un grand centre urbain. La technologie nécessaire est cependant, actuellement, hors de portée des groupes terroristes mais la « mise à disposition » par un état terroriste ne paraît plus impensable. Deux autres scénarios plus plausibles sont envisagés : la dispersion de radionucléides avec un explosif classique (« bombe sale ») ou l'abandon d'une source radioactive scellée dans un lieu public. L'attaque aérienne d'un bâtiment réacteur d'une centrale nucléaire est également un scénario peu probable en raison de la configuration des installations et de la difficulté d'un coup au but sur le bâtiment réacteur.

Dispersion de déchets nucléaires

Il peut s'agir de l'attaque d'une centrale nucléaire détruisant le bâtiment réacteur ou de la dispersion de déchets nucléaires dérobés dans une centrale ou un centre de retraitement.

Radionucléides concernés

Ce sont les produits de fission et les éléments de combustible non fissionnés.

Produits de fission

La rupture de chaque noyau fissile, uranium ou plutonium crée des paires de noyaux de masse voisine et dont la somme des nombres de charge reste égale au nombre de charge du noyau fissionné. Par exemple pour l'uranium 235, $Z = 92$, une paire constituée de baryum ($Z = 56$) et de krypton ($Z = 36$) ou toute autre paire constituée de numéros atomiques de somme égale à 92, entre [30-62] et [46-46] (fig. 9-1). Ces paires comportent un excès de neutrons. Ce ne sont donc pas des noyaux stables, mais des isotopes radioactifs qui vont tendre vers la stabilité en libérant de l'énergie sous forme de rayonnement β et γ .

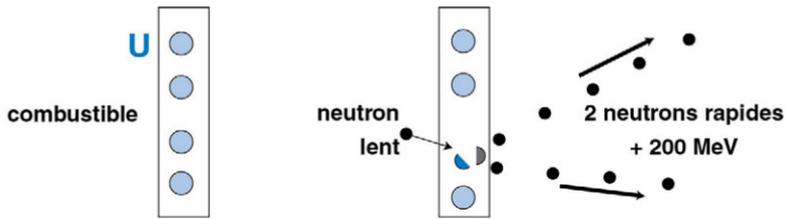
Résidus non fissionnés

Du matériau fissile lui-même : ^{235}U ou ^{239}Pu , émetteurs α .

Évolution temporelle

La radioactivité décroît avec le temps et cette décroissance est facilement calculable pour un élément donné, l'activité d'une source étant divisée par 2 quand le temps écoulé est égal à la période du radionucléide qu'elle contient. Pour l'ensemble des radionucléides présents dans le cœur d'un réacteur ou libérés par une explosion nucléaire, on définit une période moyenne, pour laquelle l'intensité à un instant donné sera :

$$i_t = i_1 \times t^{-1,2}$$



Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Hr	Rh	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd
30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46
62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46
Sm	Pm	Nd	Pr	Ce	La	Ba	Cs	Xe	I	Te	Sb	Sn	In	Cd	Ag	Pd

Figure 9-1

Lors d'une réaction de fission, un neutron lent est capturé par un atome d'uranium qui se scinde en deux atomes dont la somme des numéros atomiques est égale à 92.

Cette réaction s'accompagne d'un dégagement d'énergie et de deux neutrons rapides, qui, une fois ralentis, pourront à leur tour fissionner un atome d'uranium 235.

Ce qui revient à appliquer la règle suivante : *l'intensité du rayonnement des produits de fission est divisée par 10 chaque fois que le temps écoulé est multiplié par 7.*

L'activité sera ainsi le dixième de l'intensité initiale après 7 heures, le centième après 2 jours (49 heures) et ainsi de suite...

Conséquences

Modes d'action

Les radionucléides dispersés dans l'environnement, quel que soit le mode de dispersion, vont pouvoir entraîner trois types d'effets.

Radiocontamination externe

C'est le dépôt de particules radioactives sur la peau et les muqueuses découvertes. La dose à la peau sera essentiellement délivrée par le rayonnement β dont toute l'énergie est dissipée dans le derme et la partie superficielle de l'hypoderme (brûlure β). À celle-ci s'associe une contribution γ modérée, ces rayonnements traversant la peau en y interagissant peu.

Radiocontamination interne

C'est l'exposition aux RI émis par les particules ayant pénétré dans l'organisme, par inhalation, ingestion ou plaie. Selon l'élément absorbé, elle se fera par rayonnement γ , β mais également par rayonnement α qui devient ici redoutable, soit au contact intime d'un épithélium (alvéoles pulmonaires et muqueuse bronchique), soit par incorporation métabolique en raison d'une analogie structurale (strontium # calcium, par exemple), avec une action directement au contact des cellules.

Des mesures simples de protection (port de masques et tenues de protection, règles de comportement en zone contaminée) suffisent à minimiser ce risque pour des individus entraînés et encadrés. Il n'en va pas de même, évidemment, pour les populations civiles non informées du danger, comme l'ont montré l'irradiation accidentelle de pêcheurs japonais et des habitants des îles Marshall, après l'essai nucléaire mal contrôlé de Bikini, ou les conséquences de l'accident de Tchernobyl. Le suivi médical de ces populations a montré que pratiquement toutes les conséquences de l'exposition à des retombées nucléaires étaient liées à l'absorption par inhalation ou ingestion d'iode radioactif, et, très probablement, davantage du fait des isotopes à demi-vie très courte ($^{132}\text{I} = 2 \text{ h}$, $^{133}\text{I} = 21 \text{ h}$, $^{134}\text{I} = 52 \text{ min}$) déterminant un débit de dose élevé, que du fait de l'isotope 131 (demi-vie de 8 jours) à l'origine d'un débit de dose plus faible permettant l'action des mécanismes de réparation de l'ADN cellulaire. Les mesures de protection et l'administration préventive ou précoce d'iode stable auraient certainement permis d'éviter la quasi-totalité des cancers thyroïdiens induits par l'exposition.

Exposition à distance

C'est la dose reçue, sans contact direct, du fait du rayonnement γ émis par les dépôts radioactifs. La dose reçue par les personnes en zone contaminée sera délivrée sur une période de temps plus ou moins longue, fonction inverse du débit de dose.

Effets biologiques

Exposition globale

Elle est due essentiellement aux rayons γ émis par les produits de fission déposés dans l'environnement. Compte tenu du faible débit de dose lié à la dispersion des radioéléments, il n'y aura généralement pas d'effets aigus et seuls sont à prendre en compte les risques différés de cancérogenèse tels que nous les avons vus au chapitre 8.

Contamination externe

Les principaux effets sont cutanés. Pour une contamination de courte durée et de faible intensité, le tableau clinique est relativement stéréotypé : prurit dans les premières heures, puis latence de 1 à 2 semaines et apparition secondaire d'un érythème et d'une desquamation avec pigmentation, associée, pour les expositions les plus fortes à des ulcérations douloureuses. La restauration comporte généralement des séquelles : atrophie épidermique, hyperkératose, pigmentation résiduelle. Peuvent aussi s'observer conjonctivites et kératites.

La chute des cheveux peut survenir 2 à 4 semaines après l'exposition, pour des doses au cuir chevelu de 2 à 3 Gy. La repousse se produit du 2^e au 3^e mois.

Contamination interne

Le danger provient de l'incorporation métabolique d'isotopes radioactifs par certains organes (iode radioactif et thyroïde), ou d'analogies structurales permettant une assimilation partielle de certains éléments par l'organisme

(strontium # calcium, césium # potassium par exemple). Parfois la toxicité sera de contact (^{235}U , ^{239}P dans les alvéoles pulmonaires), voire chimique (U et rein par exemple).

Conséquences à court terme

Contamination externe

Une exposition importante expose à des brûlures étendues dont la prise en charge et le pronostic ont été profondément modifiés par l'introduction de nouvelles techniques thérapeutiques incluant l'utilisation de cellules souches mésoenchymateuses. Le dépôt de la dose dans la peau étant un phénomène cumulatif dans le temps, il est impératif de décontaminer les téguments le plus rapidement possible pour faire disparaître la source des brûlures.

Contamination interne

Les risques à court terme sont en fait théoriques, car, pour induire des effets somatiques, les quantités de radionucléides inhalées ou ingérées devraient être considérables et leurs conséquences s'effaceraient alors probablement devant les effets majeurs de l'exposition et de la contamination externe concomitantes.

Exposition cumulée

Même si aucun effet clinique n'est observable immédiatement pour une exposition prolongée, on considère que pour des doses cumulées de 1,5 Gy les capacités du sujet sont diminuées. Au-delà, la gravité des effets constatés est proportionnelle à la dose reçue.

Conséquences à long terme

Ce sont les effets de l'exposition externe et de la contamination interne. Les risques sont l'apparition retardée de cancers, dont la probabilité augmente avec la dose reçue (cf. chapitre 8). Si le risque est global pour l'exposition externe, la contamination interne expose à des risques particuliers en fonction de l'élément absorbé, car chacun de ces éléments a un tropisme ou une toxicité particuliers. L'action de chacun de ces éléments sur son organe cible est fonction de son type d'émission (α), de la quantité absorbée et de la durée pendant laquelle il s'applique. Celle-ci dépend de sa période effective (cf. *supra*). Ainsi pour les principaux éléments responsables de contamination interne (tableau 9-1).

Prévention et traitement

La prévention est essentielle et ne nécessite que l'application de règles simples.

En zone contaminée, il faut porter tenue et masque de protection dès que l'on ne se trouve plus dans un abri disposant d'un dispositif de filtration de l'air. De même, il ne faut pas manger, boire ou fumer hors d'un tel abri. Ne devront être consommés qu'aliments et boissons provenant de conditionnements protégés des poussières. Le délai prévisible entre la destruction

Tableau 9-1

Caractéristiques des principaux radioéléments à prendre en compte lors d'une contamination par dispersion de déchets nucléaires

Éléments	Émission	Analogie	Organe-cible principal	Période physique	Période biologique	Période effective
Iode 131	β, γ	Iode stable	Thyroïde	8 jours	30 jours	7,6 jours
Césium 137	β, γ	Potassium	Diffus	30 ans	150 jours	148 jours
Strontium 90	β	Calcium	Os	29 ans	200 jours	196 jours
Plutonium 239	α		Poumon (inhalation)	24 400 ans	50 ans (os)	50 ans (os)
Uranium 235	α		Rein (toxicité chimique)	700.106 ans	~ 200 jours (os)	~ 1 an

d'un bâtiment réacteur avec dispersion de radionucléides et le début des retombées pour les populations situées à distance sous le vent doit être mis à profit pour instaurer les mesures de confinement et protéger les réserves de boisson et d'alimentation. Surtout, il faut commencer la distribution des comprimés d'iodure de potassium (cp à 65 mg, 2 cps par personne dès que le risque de contamination par l'iode radioactif est connu, à renouveler chaque jour tant que dure l'exposition potentielle). La posologie est ensuite adaptée à l'âge. Cette mesure est totalement efficace contre le risque majeur de la contamination interne, l'induction de cancers thyroïdiens par l'iode radioactif. Elle ne doit jamais être différée, même si le risque est incertain, car elle ne présente aucun effet secondaire significatif et elle sera d'autant plus efficace qu'elle sera administrée avant une éventuelle contamination.

Organisation des secours

En cas de dispersion de radionucléides au moyen d'un explosif classique dans une agglomération, il faut se préparer à secourir et évacuer un grand nombre de victimes contaminées à des degrés divers. L'organisation des secours au niveau préhospitalier fait l'objet du plan d'intervention dit « plan ORSEC-NoVi » (décret 2005-1157 du 13/9/2005) et, dans le cas particulier d'un attentat à composante radioactive, l'ensemble des mesures à mettre en œuvre est détaillé dans la circulaire 800 (Circulaire interministérielle n° 800/SGDN/PSE/PPS du 23 avril 2003, dite « circulaire 800 »). Les moyens d'intervention, l'organisation et la coordination de ces moyens y sont détaillés. Ce document précise en particulier la délimitation des zones, l'emplacement des postes de secours, le circuit d'évacuation des blessés contaminés et des personnes sans blessures mais contaminées, les hôpitaux prévus pour la mise en place d'unités de décontamination et de prise en charge des blessés contaminés et l'information des victimes, de leur famille et du public. L'organisation du système hospitalier dans le cas d'un afflux de victimes est détaillée dans un schéma départemental, appelé « plan

Tableau 9-2**Établissements de santé de référence en cas d'attentat à composante nucléaire ou radique (arrêté du 30/10/2005)**

Zone de défense Nord	CHU de Lille
Zone de défense Est	CHU de Nancy CHU de Strasbourg
Zone de défense de Paris	Assistance publique des hôpitaux de Paris
Zone de défense sud-est	Hospices civils de Lyon
Zone de défense Sud	Assistance publique des hôpitaux de Marseille
Zone de défense sud-ouest	CHU de Bordeaux
Zone de défense Ouest	CHU de Rennes CHU de Rouen

blanc », devant notamment comprendre un volet NRBC adapté à l'accueil de victimes contaminées. Certains établissements hospitaliers sont dits de référence et jouent un rôle de formation spécialisée, de soutien et de coordination technique (tableau 9-2).

Quant aux personnels d'intervention devant intervenir et séjourner en zone contaminée, le décret n° 2003-295 du 31 mars 2003 (relatif aux interventions en situation d'urgence radiologique et en cas d'exposition durable) fixe une limite de dose à 100 mSv pour la durée de l'intervention pour les intervenants des équipes de secours, qui peut être portée à 300 mSv en cas d'intervention urgente destinée à sauver des vies.

Prétriage

Le prétriage doit concerner toutes les personnes susceptibles d'avoir été au contact de radionucléides. Il consiste à rechercher la présence d'éléments radioactifs sur les vêtements et le corps, grâce à des sondes détectrices de rayonnements β , γ et α . Il s'agit de chambres d'ionisation fonctionnant selon le régime Geiger-Müller. Elles doivent être passées au-dessus des vêtements ou de la peau sans les toucher. Il y a contamination quand l'activité détectée est trois fois plus forte que le bruit de fond. En cas de contamination par un émetteur gamma à haute énergie (césium 137, par exemple), les conditions de mesure doivent être maîtrisées pour éviter toute possibilité de détection croisée entre une personne non contaminée et une victime contaminée.

Décontamination

Elle doit lutter contre la contamination externe et contre la contamination interne et doit être la plus précoce possible pour diminuer le temps de contact avec le ou les radionucléides.

Décontamination externe

Elle répond à quelques principes de base :

- ne pas mettre en contact les sujets contaminés avec ceux qui viennent d'être décontaminés : mise en place d'un circuit ou chaîne de décontamination

respectant le principe de la marche en avant sans retour entre la zone contaminée et la zone propre ;

- ne pas contaminer la peau qui ne le serait pas et donc effectuer le déshabillage avec méthode. Le simple fait de retirer les vêtements supprime la majorité de la contamination externe ;
- ne pas léser la peau ce qui entraînerait une contamination interne ;
- pour les contaminés blessés, *l'urgence chirurgicale prime dans tous les cas sur l'urgence de décontamination*. Il faut mettre en œuvre les gestes de réanimation et d'urgence nécessaires avant toute décontamination. Soulignons que le port d'une tenue de bloc (sarrau, bottes calot, gants et masque) assure une protection efficace du personnel chirurgical : *le blessé contaminé ne présente pas de danger pour l'équipe chirurgicale*. Le parage des plaies contaminées nécessite leur contrôle par détecteur d'une contamination résiduelle. Toutefois, le geste de parage ne doit pas être inconsidérément élargi sous prétexte d'une contamination résiduelle et en particulier ne doit pas compromettre la fonction.

Un écueil pour la mise en œuvre de la décontamination externe est la crainte exprimée par les personnels chargés de sa réalisation au contact de victimes porteuses de contaminants radioactifs. Il faut insister sur l'insignifiance de l'exposition résultant de la décontamination d'un blessé non autonome effectuée par des personnes entraînées, qui est de l'ordre de 10 à 15 μSv .

Décontamination interne

Tout contaminé externe qui ne portait pas de masque de protection ou qui présente une plaie doit être considéré comme un radiocontaminé interne et un traitement de la contamination interne doit être mis en œuvre le plus précocement possible.

Il existe trois niveaux d'action.

- *Blocage du radionucléide à la porte d'entrée* :
 - insolubilisation des éléments transférables (1 g de bleu de Prusse *per os* pour le césium, 10 g de sulfate de magnésium *per os* et rhodizonate de sodium sur la plaie pour le strontium),
 - chélation des éléments non transférables pour qu'ils soient éliminés par les émonctoires (1 g soit une ampoule d'acide diéthylène-triamine-penta-acétique (DTPA) sur la plaie, aérosol de DTPA par spinhaler pour les terres rares, les actinides, le plutonium, *British-Anti-Lewisite* (BAL) pour le polonium).
- *Accélération de l'élimination* :
 - épuration des éléments lourds du sang circulant par chélation par DTPA (0,5 g en IV, pouvant être répétée les jours suivants à raison de 1 g par jour) ;
 - accélération de la diurèse pour le tritium (4 litres d'eau par jour) ;
 - accélération du transit intestinal par laxatifs doux (sulfate de magnésium) et protection de la muqueuse digestive par du *Phosphalugel*.

Saturation de l'organe critique : iode de potassium pour l'iode radioactif.

Les services d'intervention d'urgence et le Service de santé des armées disposent de trousse individuelles et collectives contenant tous ces agents

pharmaceutiques. Comme les éléments radioactifs en cause seront nombreux et inconnus, il est conseillé, en cas de contamination massive par des produits de fission, d'administrer l'ensemble de ces produits.

Le *Guide national d'intervention médicale en cas d'événement nucléaire* ou radiologique réalisé par l'Autorité de sûreté nucléaire est un document de référence pratique (téléchargeable gratuitement sur le site Internet de l'ASN (www.asn.fr))

Détournement d'une source médicale ou industrielle

Un projet terroriste pourrait aussi utiliser certaines sources médicales ou industrielles. Il peut s'agir de sources radioactives de radiothérapie dérobées dans un service hospitalier ou une clinique. Les sources industrielles sont notamment utilisées pour la radiographie de contrôle métallurgique ou pour la stérilisation. Selon leur constitution, ces sources peuvent être dispersées par un explosif classique ou vaporisées par la chaleur. Sous réserve de réussir à obtenir ce matériau de base, un montage explosif ou dispersif est assez simple à imaginer avec des moyens de radioprotection sommaires suffisants pour éviter une irradiation majeure au moment de la préparation de l'engin. Le but d'un tel montage n'est pas d'atteindre des niveaux d'exposition permettant d'obtenir des effets cliniques déterministes majeurs. En effet, une fois dispersées sur une grande surface, même des sources de forte activité ne permettraient pas d'observer un syndrome d'exposition globale aiguë. En revanche, la dispersion de matières radioactives au sein d'une population non préparée et non protégée permet de prévoir une contamination externe et interne significative et détectable. À l'extrême, des brûlures radiques pourraient être observées en cas de projections suffisamment concentrées et de décontamination tardive, voire négligée.

Un autre scénario consisterait à abandonner une source de forte activité dans un lieu public. En fonction du temps passé et de la distance à la source, certaines personnes pourraient recevoir des doses importantes et développer un syndrome d'exposition aiguë ou présenter des lésions déterministes (cf. chapitre 6). Une fois révélé ou détecté, un tel acte conduirait à des réactions de panique des personnes pensant, à tort ou à raison, avoir été exposées à cette source, qui pourraient saturer les services d'accueil des hôpitaux. Pour les personnes les plus exposées, présentant des manifestations cliniques, on pourrait estimer la dose reçue grâce aux techniques de dosimétrie biologique. En revanche, il est inconcevable, en raison de la haute technicité et du coût de ces méthodes, de les appliquer à un très grand nombre de personnes (certaines lignes de RER, par exemple, sont empruntées, chaque jour, par plusieurs centaines de milliers de personnes). Il en résulterait une situation d'anxiété collective et de revendication difficile à gérer.

Conclusion

L'exposition à des sources radioactives d'un grand nombre de personnes par un acte de terrorisme est une menace à laquelle le corps médical doit se préparer. La part de mortalité et de morbidité due aux rayonnements serait

en fait relativement faible, mais on peut prévoir avec certitude qu'une fois avéré le caractère radiatif de l'agression, il se développerait un phénomène de panique incontrôlable, tout à fait conforme au but recherché par les auteurs d'un acte de ce type. Cette panique s'alimenterait de la perception faussée du risque des radiations ionisantes dans la population, alors que le risque objectif est incomparablement inférieur à ce que pourrait déclencher un acte de terrorisme chimique ou biologique. Outre le problème spécifique de la prise en charge de blessés radiocontaminés, la prise en charge à grande échelle, pour décontamination, de personnes valides mais, pour la plupart, affolées ou prostrées, nécessite d'anticiper les scénarios possibles pour préparer les moyens nécessaires. Enfin, il faut prévoir une déstabilisation prolongée de la société victime d'un tel acte, du fait de la perception par le public d'un risque de cancérogenèse radio-induite très supérieur à la réalité. Il suffit d'évoquer les aberrations médiatico-politiques suscitées par la contamination insignifiante du territoire français à la suite de l'accident de Tchernobyl pour avoir une idée de ce que pourrait être l'impact médiatique d'un tel événement. Une exacte appréciation du risque par le corps médical est un préalable indispensable à une information objective du public qui permettrait de ramener l'événement à ses justes proportions.

Vérifiez si vous avez assimilé les points importants de ce chapitre en répondant au questionnaire en fin d'ouvrage.

Pour en savoir plus

Galle P, Paulin R. *Biophysique, radiobiologie, radiopathologie*. Paris: Abrégé Masson; 2000.

Laroche P, de Carbonnières H. *Terrorisme radiologique*. Paris: Elsevier; 2004.

10 Doses délivrées au patient en radiodiagnostic.

Quantification et optimisation

La connaissance des doses délivrées lors des examens radiologiques est un impératif absolu de la pratique radiologique, préalable obligatoire de la démarche de justification et d'optimisation, et obligation réglementaire depuis la transposition en droit français de la directive Euratom 97-43. L'article R. 1333-66 du Code de santé publique dispose en effet que « ...le médecin réalisateur de l'acte indique sur un compte-rendu les informations au vu desquelles il a estimé l'acte justifié, les procédures et les opérations réalisées ainsi que toute information utile à l'estimation de la dose reçue par le patient. »

Mesure et expression des doses délivrées

Les grandeurs et unités à employer en pratique radiologique ont été détaillées au chapitre 3. Nous ne rappellerons que les éléments essentiels à la mise en conformité des pratiques avec la réglementation. Le but est l'estimation de la dose reçue par chaque individu sous la forme de dose efficace mais la mesure et la mention de la dose sur un compte-rendu ne peuvent faire appel qu'à des grandeurs mesurables. La dose efficace pourra toujours être calculée *a posteriori*, à partir de ces données. On pourra ainsi faire la somme d'expositions hétérogènes dans l'espace et dans le temps.

Paramètres à mesurer et dispositifs de mesure ou de calcul

Indicateurs de dose

En radiologie conventionnelle, les indicateurs pertinents de la dose délivrée sont le produit Dose.Surface (PDS) et la dose d'entrée. En pratique, hormis pour la radiologie interventionnelle, où le risque à prendre en compte est déterministe et cutané, la dose d'entrée est un paramètre moins utile, qui peut d'ailleurs être estimé à partir du PDS. Quant à la dose absorbée en profondeur, elle n'est généralement pas mesurable *in vivo* et sa mesure se réalise sur fantôme anthropomorphe, par exemple pour estimer la dose délivrée par une procédure générique ou pour comparer des protocoles d'exploration.

Chambre d'ionisation

C'est l'instrument principal de mesure du rayonnement ionisant (RI). Elle est constituée d'une enceinte contenant un gaz et de deux électrodes entre lesquelles est établie une différence de potentiel. Lorsqu'un RI traverse l'enceinte, il ionise le gaz. L'électron et l'ion positif se dirigent respectivement vers l'anode et la cathode et un courant s'établit, dont l'intensité est proportionnelle au flux de RI. Les appareils de mesure de produit Dose.Surface sont constitués d'une telle chambre, fixée en sortie de tube, après la collimation primaire (fig. 10-1).

Ils indiquent, pour chaque exposition (graphie ou scopie), la quantité de rayonnement produit et la surface sur laquelle il se répartit à l'entrée du patient. Le produit Dose.Surface est indépendant de la distance source-peau (cf. fig. 3-1).

Il faut connaître deux causes d'erreur éventuelle, surestimant l'exposition réelle du patient :

- une collimation (« diaphragme ») insuffisante, en dehors des contours du patient ;
- l'emploi d'un localisateur placé au-delà de la chambre de mesure, sans adapter la collimation.

Calculateur de dose

Beaucoup de tables de radiologie conventionnelle modernes n'ont pas de chambre d'ionisation en sortie de tube mais un logiciel intégré calculant le PDS d'après les paramètres du générateur et l'ouverture du collimateur. Ce mode d'estimation est suffisant pour les tables ne disposant pas de scopie télévisée, sous réserve d'un étalonnage régulier du calculateur de dose avec une chambre d'ionisation.



Figure 10-1

Chambre d'ionisation pour mesure du produit Dose.Surface en sortie de tube (PTW-Diamentor).

Dosimètre radiothermoluminescent

Il permet des mesures directes (mais différées) de la dose *in vivo* en radiologie. Soumis au RI, le matériau utilisé (fluorure ou borate de lithium) est excité, puis désexcité par chauffage au moment de la lecture. Il émet lors de cette désexcitation un photon lumineux. La mesure de luminescence permet de quantifier l'exposition à laquelle a été soumis le détecteur.

La taille des détecteurs ne crée pas d'artefacts significatifs sur l'image radiologique, ce qui permet leur utilisation sur des patients. Ces détecteurs sont utilisés notamment pour mesurer les doses d'entrée lors des campagnes de mesure destinées à établir des niveaux de référence.

Détecteur à scintillations

Il est destiné à la mesure directe de la dose à la peau. Le capteur (scintillateur) est à base de phosphore et mesure 1 à 2 mm de diamètre. Il est solidaire d'une fibre optique. La lumière émise par le capteur lorsqu'il est exposé aux RI est guidée par la fibre optique jusqu'à un semi-conducteur photosensible. L'intensité du signal lumineux capté par le semi-conducteur est proportionnelle à la dose. Chaque détecteur peut servir pour cinquante mesures environ. Radiotransparents, ils se fixent très facilement par un adhésif à la peau du patient et sont parfaitement adaptés à la mesure de la dose en temps réel lors de procédures de radiologie interventionnelle.

Quantification et mention de la dose

En radiologie conventionnelle

Les paramètres dosimétriques qui caractérisent un examen sont la dose d'entrée (en milligray) et le produit Dose.Surface (PDS) en gray.cm² ou centigray.cm². L'article R. 1333-66 du Code de santé publique impose de faire figurer sur le compte-rendu d'un examen radiologique « toutes les informations nécessaires à l'estimation de la dose » (*cf.* chapitre 13). L'arrêté d'application du 22 septembre 2006 qui précise la nature de ces informations distingue deux cas, selon que l'équipement radiologique dispose ou non d'un dispositif de mesure.

Salles télécommandées et salles d'os et poumon

Pour les appareils indiquant le PDS, il suffit de reporter ce PDS ou la somme des PDS résultant de l'exploration d'une même région sur le compte-rendu (*fig. 10-2*), en Gy.cm² ou cGy.cm² (noter que certains appareils indiquent la dose en $\mu\text{Gy.m}^2$ unité égale au cGy.cm² puisque $10^2\text{Gy} \times 10^{-4}\text{m}^2 = 10^{-6}\text{Gy} \times 1\text{m}^2$). La mention obligatoire sur le compte-rendu de l'information de dose ne porte que sur les expositions significatives au plan de la radioprotection, c'est-à-dire le tronc (thorax, abdomen et pelvis) et la région cervico-céphalique. Les clichés des extrémités, nombreux en pratique courante (traumatologie, rhumatologie) ne sont pas concernés. En fait, pour des questions d'organisation, il est plus simple de relever tous les PDS, ce qui crée une habitude dans un service et évite les oublis. Tous les appareils installés en France depuis juin 2004 doivent être équipés d'un dispositif de mesure (décret 2004-254 du 15 juin 2004, *cf.* chapitre 13).

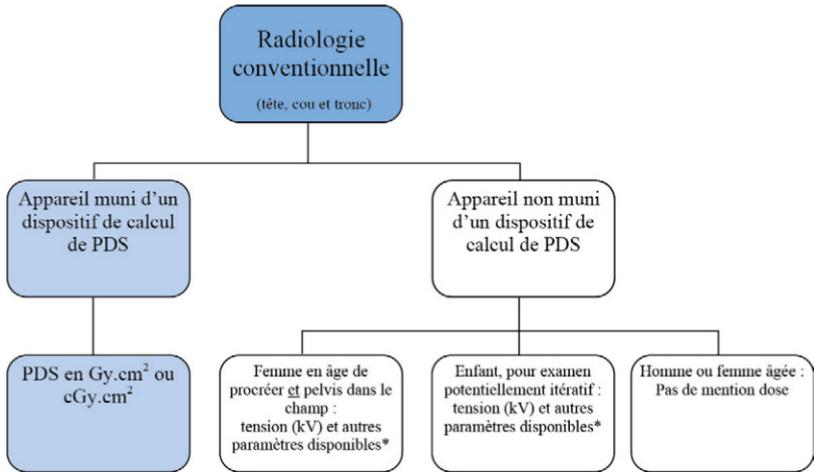


Figure 10-2

Indications à faire figurer sur le compte-rendu en fonction de l'équipement de l'installation et du type de patient, en radiologie conventionnelle.

* Les éléments disponibles diffèrent selon les installations ; on doit reporter ceux dont on dispose parmi les suivants : intensité (mA), temps d'exposition (s), charge (mAs), distance foyer-détecteur, nombre d'expositions et temps de scopie éventuelle.

Pour les appareils plus anciens n'indiquant pas le PDS, il n'y a pas d'obligation d'indiquer les éléments nécessaires à l'estimation de la dose, sauf dans deux cas :

- les expositions intéressant le pelvis chez les femmes jeunes ;
- les expositions répétées chez les enfants (suivi de scoliose par exemple).

Dans ces cas, si l'appareil n'est pas équipé d'un dispositif donnant le PDS, il faudra reporter sur le compte-rendu les éléments nécessaires à l'estimation de la dose. Ces éléments sont la tension (kV) et ceux disponibles parmi les suivants : charge électrique (mAs), distance foyer-détecteur (DFD) ou distance foyer-peau (DFP), durée de scopie pour chaque type de champ d'entrée et nombre d'expositions faites (en graphie), avec, pour chacune, la taille du champ à la peau du patient (ou la taille du champ sur le détecteur qui permet de retrouver la taille du champ à l'entrée du patient, en utilisant le rapport d'homothétie DFD/DFP).

Cette disposition permet, dans le premier cas, d'éviter les difficultés de dosimétrie rétrospective après exposition d'une grossesse méconnue. Dans le second cas, elle met l'accent sur le risque d'expositions répétées et permet un contrôle de l'optimisation des techniques.

Radiologie interventionnelle

Les obligations sont les mêmes qu'en radiologie conventionnelle ; il paraît cependant difficilement concevable aujourd'hui de réaliser des actes de

radiologie interventionnelle sans disposer d'un système de mesure ou de calcul du produit Dose.Surface. C'est le PDS cumulé (graphie et scopie) qu'il faut reporter pour chaque acte.

Dans ce domaine, c'est le risque déterministe (lésions cutanées, alopecie, cataracte) qui doit être pris en considération. En cas de procédure très longue ou itérative (angioplastie coronaire par exemple), on pourra utiliser un dosimètre de surface de type scintillateur et fibre optique pour évaluer la dose reçue par la peau du champ d'entrée des rayons X. En l'absence de dispositif de mesure, il faudra, comme en radiologie conventionnelle, reporter sur le compte-rendu tous les paramètres de l'exposition, le nombre de clichés ainsi que le temps et la fréquence des impulsions de scopie. Ici les doses sont considérablement plus élevées ; à titre indicatif, les valeurs de PDS cumulées pour une embolisation d'anévrisme intracrânien sont généralement comprises entre 100 et 500 Gy.cm². En coronarographie les PDS cumulés sont de l'ordre de 30 à 50 Gy.cm² pour une angiographie diagnostique et de 60 à 200 Gy.cm² pour une angioplastie.

Mammographie

L'information utile est la dose glandulaire moyenne, fournie automatiquement par les mammographes numériques, ou facilement calculable à partir d'abaques appliquant le mode de calcul détaillé au chapitre 3.

La dose à l'entrée (De) par incidence, pour un sein comprimé de 5 cm d'épaisseur (sein moyen) est de l'ordre de 10 mGy, ce qui correspond à une dose moyenne à la glande de l'ordre de 2,5 mGy (voir [tableau 10-1](#)).

Radiologie dentaire

Elle est implicitement incluse dans les examens de la tête. Les appareils ne disposent pas de l'information PDS, il n'y a donc pas lieu de prévoir d'indication de dose, sauf en théorie, pour les examens « potentiellement itératifs » chez des enfants. Certains examens d'orthodontie pourraient donc entrer dans ce cadre (télécrâne, orthopantomographies (OPT) répétées). Pour les clichés de télécrâne, il faudra donc indiquer le PDS, si l'appareil est équipé ou, s'il ne l'est pas, la tension et les paramètres disponibles comme précédemment. Pour les OPT d'orthodontie, potentiellement itératifs, la très faible exposition résultante ne paraît pas justifier une mention de tous les paramètres pour chaque procédure et il faudra indiquer le résultat éventuel de la mesure effectuée lors du contrôle de qualité. La dose d'entrée moyenne est d'environ 2 mGy et le produit dose.surface de 15 à 20 cGy.cm² par cliché.

Pour les clichés rétroalvéolaires, il n'y a pas lieu de reporter d'indication de dose. La dose de chaque exposition est très faible, environ 1 mGy pour la dose d'entrée et environ 3 cGy.cm² pour le PDS, sachant que la dose efficace correspondante est de l'ordre de 2 à 3 μSv par cliché. L'utilisation d'un système numérique diminue encore cette dose, de 40 % environ.

Optimisation

C'est l'obtention de l'information, en radiodiagnostic, ou du résultat, en radiologie interventionnelle, avec une exposition minimale du patient.

Tableau 10-1

Exemples de doses d'entrée (D_E) et de PDS pour quelques examens courants (NRD de l'arrêté du 24/10/2011)

Examen	De (mGy)	PDS (Gy.cm ²)
Thorax de face	0,3	0,25
Thorax de profil	1,2	1
Abdomen sans préparation	8	7
Rachis lombaire de face	10	4,5
Rachis lombaire de profil	25	8
Bassin de face	9	7

En radiodiagnostic

Règles générales concernant l'installation

Le décret portant obligation de maintenance et contrôle de qualité des appareils de radiodiagnostic impose une vérification régulière des performances des matériels (*cf.* chapitre 13). En attendant la mise en place de ces contrôles, chaque radiologue et manipulateur responsable de salle doit s'assurer de l'absence de dysfonctionnement manifeste de son installation : présence d'une filtration en sortie de tube, collimateurs bien réglés, distance foyer-détecteur constante, centreur lumineux efficace, réglage optimal de l'amplificateur de luminance, réponse correcte des cellules de l'exposemètre, etc.

Bonnes pratiques en radiodiagnostic

Radiographies simples

Paramètres : la tension et la charge doivent être adaptées à chaque région explorée. Ceci paraît évident à énoncer mais n'est pas toujours le cas lorsqu'on utilise des détecteurs numériques. En effet la grande tolérance de ces détecteurs à la surexposition fait que le cliché « trop noir » a disparu. On s'aperçoit en fait que beaucoup d'utilisateurs de radiographie numérique n'ont pas conscience de l'excès d'exposition, qui ne se traduit plus que par une indication chiffrée sur le film. Le choix de la tension quant à lui doit être adapté à l'indication. Par exemple, un cliché d'abdomen sans préparation pour suspicion d'occlusion doit être réalisé avec une tension élevée (l'information recherchée est du domaine du contraste gazeux et le gain de temps de pose est précieux chez un patient dyspnéique) ; en revanche, lorsqu'on recherche une lithiase ou après opacification iodée, le cliché d'abdomen doit être réalisé avec la tension la moins élevée possible (70 à 80 kV), afin d'optimiser le contraste calcique ou de rapprocher l'énergie moyenne du faisceau du pic d'absorption de l'iode (40 keV environ).

Grille antidiffusante : son utilisation ne doit pas être systématique. Elle est généralement inutile et facteur d'excès d'exposition chez l'enfant et l'adolescent mince.

Collimation : elle est obligatoire pour chaque cliché, et il ne devrait pas exister de clichés « sans marge ». Ici encore la radiographie numérique a souvent été un facteur de disparition de bonnes pratiques et certains opérateurs « diaphragme » *a posteriori* lors du post-traitement de l'image, au lieu d'appliquer une collimation physique lors de la prise du cliché.

Nombre de clichés : si l'indication (justification) est correcte, le nombre de clichés doit être réduit au strict minimum nécessaire à l'obtention de l'information. Ceci suppose le contrôle direct des radiographies pour éviter la redondance, source d'exposition injustifiée. Quelques exemples parmi les plus courants :

- la pratique des deux profils thoraciques, encore demandée par certains cliniciens, est abusive ;
- un pneumothorax visible sur le cliché en inspiration ne nécessite pas de cliché en expiration ;
- la visibilité d'une lyse isthmique lombaire sur les incidences de face ou de profil dispense des clichés de $\frac{3}{4}$, très irradiants ;
- il n'est pas nécessaire de réaliser un cliché de bassin debout en plus du rachis lombaire debout de face pour rechercher une inégalité de longueur des membres inférieurs, si les toits de cotyles sont visibles sur ce dernier cliché, ce qui est la règle.

Enfin, en règle générale, les clichés comparatifs sont pratiquement toujours inutiles chez l'adulte, hormis le cas de recherche d'asymétrie de minéralisation (algodystrophie) et le sont souvent chez l'enfant, chez qui ils ne seront pratiqués que sur avis du radiologue et non de principe.

Examens en salle télécommandée

Mode graphique : les mêmes recommandations que ci-dessus s'appliquent pour la prise de chaque cliché.

Mode scopie : le temps de scopie doit être limité au strict minimum nécessaire à la détermination du moment de prise de cliché. La scopie est assurée par de brèves impulsions sur la pédale et non en continu ; il faut utiliser, quand il est disponible, le mode de scopie discontinu (« scopie pulsée » ou scopie par impulsions). Le centrage doit se faire à l'aide du centreur lumineux et non en scopie. Les paramètres de scopie doivent être réglés pour fournir une information temporelle et non diagnostique, celle-ci étant dévolue au mode graphique. Ici la tension (kV) doit être choisie élevée pour obtenir le meilleur compromis entre la qualité d'image et la dose, d'autant plus que le patient est plus épais. Utiliser le moins possible le petit champ d'amplificateur qui nécessite une augmentation du flux de rayonnement (fig. 10-3).

En revanche, la surface d'entrée sur le patient doit être la plus petite possible (collimation focalisée sur l'endroit à étudier). Beaucoup d'équipements modernes permettent de régler la collimation d'un cliché sur une image figée de scopie, ce qui évite d'avoir à maintenir la scopie pendant ce réglage.

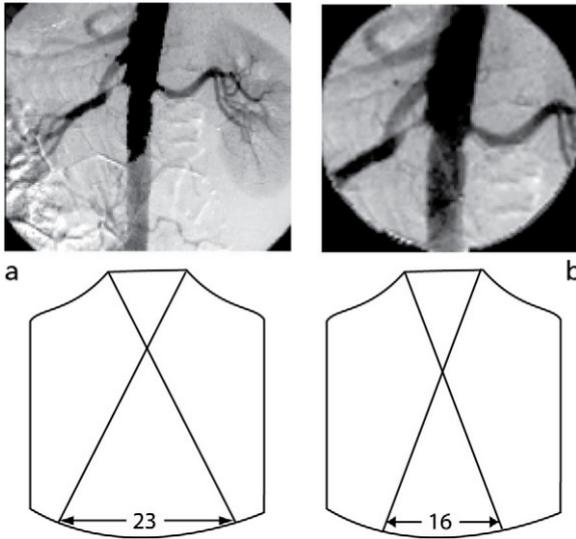


Figure 10-3

Effet de la réduction de champ d'amplificateur sur la dose.

En passant d'un champ d'entrée de 23 cm (a) à un champ de 16 cm (b), le nombre de photons arrivant sur l'écran secondaire de l'amplificateur diminue comme la surface du champ d'entrée (écran primaire), donc dans un rapport $(16/23)^2 \approx 0,48$. La conservation du rapport signal/bruit nécessite donc un doublement de la dose.

Artériographie et radiologie interventionnelle

Outre les recommandations précédentes concernant le mode scopique, il faut veiller à ce que le tube soit placé le plus loin possible du patient et l'amplificateur le plus près possible. L'amplificateur de brillance doit être au-dessus de la table pour diminuer l'exposition de l'opérateur, cependant, si la procédure se prolonge, il faut inverser la position de l'amplificateur et du tube afin de ne pas surexposer la peau du patient du côté du champ d'entrée initial. Le débit de dose à l'entrée du patient est de 10 à 40 mGy par minute, voire plus si le patient est obèse. Dans certains cas, la dose érythème (5 Gy) peut être atteinte en 2 heures de scopie. En cas de procédures itératives (angioplastie coronaire), la peau est à chaque fois moins « tolérante » à l'exposition et des nécroses peuvent se produire pour des temps de scopie nettement moindres que ceux délivrant la dose érythème sur peau saine.

Conclusion

Un radiologue doit être capable d'estimer la dose délivrée au cours de chacun des examens qu'il pratique. Outre l'obligation légale de mentionner les éléments nécessaires à l'estimation de cette dose sur le compte-rendu de son

acte, cette estimation en temps réel doit lui permettre de situer sa pratique par rapport aux niveaux de référence nationaux et de l'optimiser.

Vérifiez si vous avez assimilé les points importants de ce chapitre en répondant au questionnaire en fin d'ouvrage.

Pour en savoir plus

Guide pratique interactif de l'arrêté du 15 septembre 2006 concernant les indications à faire figurer sur le compte-rendu radiologique : site Internet de la Société française de radiologie www.sfrnet.org.

11 Doses délivrées en scanographie. Quantification et optimisation

La connaissance des doses délivrées lors des examens scanographiques est une obligation légale et un impératif absolu de bonne pratique, préalable obligatoire de la démarche de justification et d'optimisation. Chaque radiologue doit connaître, pour les principaux types d'examens qu'il réalise, le niveau de référence de la pratique nationale et vérifier que sa pratique ne dépasse pas régulièrement ce niveau. Il est tenu d'indiquer, sur le compte-rendu, « tous les éléments nécessaires à l'estimation de la dose ». Enfin, radiologues et manipulateurs devront rechercher, dans la pratique scanographique, les moyens d'optimiser les explorations, c'est-à-dire d'obtenir toute l'information utile avec la dose la plus faible possible, surtout pour les enfants, adolescents et jeunes adultes.

Outre l'obligation réglementaire, cette évolution s'impose pour répondre à une inquiétude grandissante du public vis-à-vis des rayonnements, suscitée par certains mouvements se réclamant de l'écologie et amplifiée sans discernement par les médias. Connaître et maîtriser l'exposition aux rayonnements engendrée par nos machines est le préalable indispensable qui nous permettra d'assurer à nos patients que le risque de l'exposition à but diagnostique est sans commune mesure avec le bénéfice qu'apporte une exploration scanographique justifiée et performante, d'autant plus que les scanners rapides multicoupes amplifient le potentiel d'exposition. Sur chaque modèle de scanner, l'utilisateur dispose d'indicateurs permettant l'estimation de la dose délivrée. Il peut modifier les paramètres auxquels il a accès pour adapter cette exposition à l'information demandée. La connaissance de ces paramètres et de leur mode d'emploi est nécessaire pour utiliser ces scanners de façon optimale car ils méritent souvent la dénomination de pratique « spécialement irradiante » que leur a attribuée la directive Euratom 97-43.

Estimation et expression des doses délivrées

Les valeurs et unités à employer en scanographie ont été détaillées dans le chapitre 3. En scanographie, les deux grandeurs utiles pour l'évaluation de la dose sont l'index de dose scanographique (IDS, plus connu sous l'acronyme anglais de CTDI) et le produit Dose.Longueur (PDL).

Le CTDI est un index d'exposition quantifiant la dose délivrée en fonction des paramètres pour une coupe. Il montre immédiatement l'influence des paramètres choisis (kV et mAs) sur la dose. Pour tenir compte aussi d'un élément, essentiel en acquisition hélicoïdale, qui est le pas (pitch), les constructeurs affichent également (ou exclusivement) le CTDI au volume (CTDIvol), qui est le CTDI divisé par le pas (il est donc inférieur au CTDI nominal quand le pas est supérieur à 1, supérieur lorsque le pas est inférieur à 1). Cet index ne reflète cependant pas la dose totale reçue par le patient. Pour exprimer cette dose totale, il faut utiliser le produit Dose.Longueur, exprimé en mGy.cm. C'est cette grandeur qui est appropriée pour l'estimation de la dose qui figure sur le compte-rendu d'examen. Comme en radiologie conventionnelle avec le produit Dose.Surface (PDS), cette grandeur permet d'avoir une indication de la dose efficace correspondante, par utilisation de coefficients dépendant de la région explorée. Soulignons que si plusieurs acquisitions ont eu lieu sur une même région, on multipliera le PDL cumulé par le coefficient correspondant à cette région mais que, si l'exploration a porté sur plusieurs régions (thorax et tête par exemple), on multipliera le PDL de chaque région par un coefficient différent. Il faudra donc bien spécifier chaque valeur de PDL par région dans le compte-rendu. Rappelons que, en prenant en compte les nouveaux coefficients de la CIPR, on peut estimer rapidement la dose efficace, en divisant le PDL (en mGy.cm) par 500 pour la tête, par 65 pour l'abdomen et le pelvis, par 60 pour le thorax chez l'homme, par 50 pour le thorax chez la femme.

En pratique, la dose à mentionner sur le compte-rendu d'examen est le PDL ou le PDL cumulé par région (tête, cou, tronc). C'est une grandeur immédiatement accessible puisqu'elle est obligatoirement affichée sur la console de l'appareil. En outre, c'est la grandeur qui exprime les niveaux de référence scanographiques, que l'on peut consulter sur le site Internet « optimisation et niveaux de référence » auquel on accède à partir des sites Internet de la SFR (cf. chapitre 12).

Optimisation en pratique scanographique

Connaissant le niveau de référence de chaque type d'examen, l'utilisateur peut situer sa pratique au plan dosimétrique grâce au PDS qu'il note à chaque examen réalisé. En cas de dépassement régulier du niveau de référence, il doit s'interroger sur sa pratique et modifier éventuellement les paramètres ou la technique d'acquisition utilisés.

Paramètres accessibles à l'utilisateur

La dose délivrée par un modèle donné de scanner dépend de multiples paramètres, parmi lesquels certains ne sont pas modifiables directement tels que la distance du foyer à l'axe ou la filtration. En revanche, certains paramètres sont directement accessibles et peuvent être modifiés pour une optimisation des examens : ce sont la tension, la charge (produit de l'intensité par le temps d'émission des rayons X) et le pas d'hélice.

Tension

L'augmentation de la tension (kV) augmente le débit de photons et la pénétration du faisceau de rayons X émis par le tube. En contrepartie, le contraste d'image diminue car l'absorption par les éléments du corps humain devient plus homogène mais, comme le bruit est également diminué (plus grande quantité de photons au détecteur), le rapport contraste/bruit n'est pas affecté en TDM. En radiologie conventionnelle, l'augmentation de la tension permet de composer avec la corpulence des patients, d'égaliser les absorptions et d'effacer ainsi relativement l'os (radiographie pulmonaire), d'abaisser les temps de pose et, finalement, de diminuer les doses. Cependant, cette diminution de dose par l'augmentation de tension, en radiographie conventionnelle, n'est effective que parce qu'elle est obligatoirement couplée avec un contrôle automatique d'exposition (« cellule »), limitant l'émission de rayonnement au strict nécessaire à une exposition correcte du récepteur. En revanche, en tomodynamométrie, ce dispositif de limitation automatique n'existe pas et la tolérance des récepteurs à l'excès d'exposition est très grande. Toute modification de la tension retentit fortement sur la dose-patient, puisque celle-ci varie sensiblement comme le carré de la tension. Passer de 120 à 140 kV augmente la dose d'environ 40 %. L'expérience montre que les protocoles d'exploration scanographiques sont préréglés avec des tensions relativement élevées, ce qui permet d'assurer une constance des explorations, quel que soit le morphotype du patient. On voit ainsi dans la plupart des services utiliser les mêmes paramètres (par exemple, pour un examen d'abdomen 140 kV, 300 mAs) pour un patient adulte de 90 kg et pour une adolescente de 45 kg. La conservation de cette tension élevée n'est justifiée que si elle s'accompagne d'une diminution nettement plus importante (division par 2 à 4) de la charge (mAs). La règle qui énonçait, en radiologie conventionnelle, que la même variation de noircissement était obtenue par un doublement des mAs ou une augmentation de 20 % des kV reste valable en scanner, mais elle a été oubliée des utilisateurs (comme en radiologie numérique) parce qu'elle n'a plus de traduction sur l'image en raison de la tolérance des détecteurs. En pratique, il est tout à fait souhaitable, notamment dans les services ayant une activité pédiatrique, de disposer de protocoles d'exploration à tension réduite (pour la même charge par rotation) pour les enfants ou les adultes de faible corpulence ce qui est souvent plus simple que de modifier la charge dans un protocole fixe, et a donc plus de chance d'être appliqué en routine. Surtout, la diminution de la tension dans un protocole reste, sur la plupart des machines, compatible avec l'emploi des logiciels de réduction de dose (*cf. infra*), alors que l'emploi de ces protocoles ne permet plus un préréglage de la charge.

Charge

C'est le produit de l'intensité du courant appliqué à la cathode par le temps d'application de ce courant. Cette grandeur s'exprime en milliampère.seconde (mAs) en radiologie.

La charge est le paramètre le plus facilement corrélé à la dose ; en effet, il exprime directement la quantité de photons émise. Toute réduction ou augmentation de charge réduit ou augmente dans la même proportion l'exposition du patient. La réduction de dose que l'on peut obtenir en diminuant la charge est cependant limitée par l'augmentation du bruit qui en résulte. En effet, le bruit est inversement proportionnel à la racine carrée de la charge, ainsi il augmente de 40 % quand la charge est divisée par deux.

Tous les constructeurs proposent actuellement des protocoles automatisés dans lesquels la charge est liée au pas utilisé. Le rapport signal sur bruit sera ainsi constant, quel que soit le pas choisi (*cf. infra*).

Épaisseur de coupe

Avec les scanners multicoupes, ce terme n'est plus univoque. Il faut en effet distinguer la collimation, largeur du faisceau de rayons X dans l'axe des Z à l'entrée des détecteurs, qui est l'épaisseur d'acquisition, de l'épaisseur de reconstruction, utilisée soit pour une visualisation directe dans le plan d'acquisition, soit pour une visualisation dans tout autre plan par reconstruction.

Collimation

Elle détermine la largeur du faisceau, dans l'axe Z, donc l'épaisseur nominale de coupe qui est définie comme la largeur du profil de coupe à mi-hauteur (*cf. fig. 3-2*). Elle s'exprime en multiples de l'épaisseur de détection choisie, selon le nombre de détecteurs sélectionnés. Par exemple, une collimation de 2 cm correspond à $16 \times 1,25$ ou $8 \times 2,5$. La différence réside alors principalement dans l'épaisseur minimale de coupe qui peut être reconstruite, plus petite dans le premier cas, donc de meilleure qualité pour les reconstructions multiplanaires. Un point très important est l'importance relative de la pénombre (*overbeaming*) selon l'épaisseur de coupe. En effet, afin que les détecteurs situés aux extrémités de la couronne de détecteurs dans l'axe Z soient exposés à la même quantité de rayonnement que les détecteurs centraux, la collimation primaire ne doit pas être strictement limitée à la couverture des détecteurs mais un peu plus large, afin que les bords du faisceau dans l'axe Z, constitués de rayonnement de pénombre, ne soient pas inclus dans la mesure. Comme cette pénombre est indépendante de l'épaisseur de la collimation, plus la collimation est étroite, plus son importance relative (donc l'exposition inutile) augmente. C'est ce que certains constructeurs traduisent par « l'efficacité de dose », affichée avec les informations de dose. Ce paramètre attire l'attention de l'utilisateur sur la proportion de rayonnement qui contribue réellement à la formation de l'image, et il est d'autant plus faible que l'exposition non contributive à l'image augmente (*fig. 11-1*).

Épaisseur de reconstruction

Elle gouverne le bruit de l'image. Avec la technologie multicoupes, la tendance naturelle des utilisateurs est de réduire l'épaisseur de coupes, à l'acquisition (collimation) mais également en reconstruction primaire.

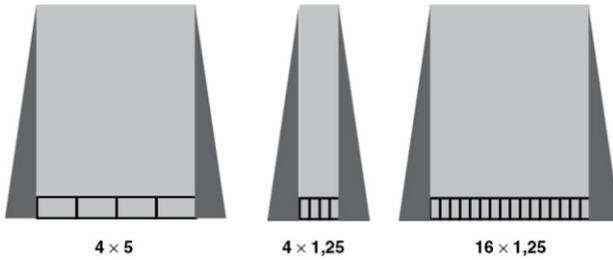


Figure 11-1

Influence de la collimation primaire sur la dose. Le faisceau primaire est nécessairement plus large que la couronne de détecteurs dans l'axe Z, afin que l'exposition des détecteurs soit homogène.

Comme la pénombre est constante, on constate que son importance relative est beaucoup plus importante, à épaisseur de détecteurs égale, pour un petit nombre de détecteurs (4 coupes) que pour un grand nombre (16 ou davantage). L'efficacité de dose, rapport entre la dose utile (participant à la formation de l'image) à la dose totale exprime bien la baisse de rendement : elle est bien meilleure pour 4×5 mm que pour $4 \times 1,25$ mm et pour $16 \times 1,25$ mm que pour $4 \times 1,25$ mm.

Le bruit est inversement proportionnel à l'épaisseur de coupe de reconstruction. C'est pourquoi certains systèmes adaptent automatiquement la charge à l'épaisseur de coupe sélectionnée pour la reconstruction primaire, en diminuant la charge proportionnellement à l'épaisseur de coupe choisie pour cette reconstruction. Avec un scanner multicoupe, on peut reconstruire des coupes plus épaisses ou plus fines que celles choisies initialement pour la reconstruction « de première visualisation », la limite inférieure étant celle de l'épaisseur déterminée initialement par le couplage de détecteurs. Par exemple, si l'on choisit une collimation de $8 \times 1,25$, on peut choisir une épaisseur de coupes de reconstruction primaire comprise entre 1,5 et 10 mm mais on ne peut reconstruire de coupes inframillimétriques, ce qui limite la résolution spatiale des reconstructions pour les structures très fines. Selon les systèmes, on peut alors sélectionner les détecteurs plus fins situés au centre de la barrette de détecteurs dans l'axe Z ($4 \times 0,5$ mm ou $4 \times 0,625$, par exemple), ce qui permettra des reconstructions *infra* millimétriques, en sachant que l'efficacité de dose va alors être de l'ordre de 40 %, c'est-à-dire que 60 % du rayonnement ne participera pas à la formation de l'image mais seulement à la dose. Il faut noter que le contraste naturel des structures osseuses ou du parenchyme pulmonaire peut très bien s'accommoder d'un bruit élevé, donc de coupes très fines, en reconstruisant les images avec un filtre spécifique (filtre spatial ou « dur ») et en les visualisant en fenêtre large. La résolution en densité nécessite un rapport contraste sur bruit suffisant mais la diminution d'épaisseur de coupe, e , n'est pas pénalisante quand on recherche de petites lésions, car, si le bruit varie en sens inverse de la racine carrée de l'épaisseur, le contraste des petits objets varie en sens inverse de l'épaisseur de coupe, puisque l'effet de volume partiel

diminue. Le rapport contraste sur bruit des petites lésions variant comme $\frac{\sqrt{e}}{e}$ diminue donc quand l'épaisseur de coupe augmente. En d'autres termes, bien que le bruit de l'image augmente, le contraste des petits objets augmente quand l'épaisseur de coupe est inférieure à leur diamètre.

Pas (pitch)

Le pas d'une hélice est la distance théorique parcourue par cette hélice en une rotation. Cette grandeur s'exprime en unité de longueur, sans se référer à l'épaisseur de l'hélice. En tomodynamométrie, le pas ou pitch exprime la distance parcourue en une rotation en se référant à l'épaisseur de cette hélice, c'est-à-dire de la coupe. Ainsi, le pas est le déplacement pendant une rotation, avec, pour unité de distance, l'épaisseur de coupe. Lorsque le lit se déplace d'une épaisseur de coupe pendant cette rotation le pas est égal à 1, ce qui peut correspondre à un déplacement de 1 cm pour une épaisseur de coupe de 1 cm, de 5 mm pour une épaisseur de coupe de 5 mm, etc. Le lit peut également, et c'est tout l'intérêt de l'acquisition hélicoïdale, se déplacer de plus d'une épaisseur de coupe et l'on peut ainsi obtenir des pas supérieurs à 1, généralement compris entre 1,25 et 3 et reconstruire néanmoins des images jointives, voire chevauchées. Cette technique procure ainsi un gain de temps substantiel, permet d'explorer rapidement de grands segments en tirant un meilleur parti de l'injection de contraste et autorise les explorations multiphasiques. En outre, elle permet de diminuer la dose, proportionnellement au pas, puisque la quantité de rayons X absorbée dans le volume exploré est inversement proportionnelle au pas : par rapport à une acquisition séquentielle en coupes jointives ou à une acquisition hélicoïdale avec un pas de 1, une acquisition avec un pas de 1,5 soumet un volume 1,5 fois plus grand au même flux de photons ; la dose, énergie transférée par unité de masse par ces photons dans le volume exploré, est donc bien divisée par 1,5. Pour les scanners multicoupes, la définition imposée par la Commission électrotechnique internationale est le rapport du déplacement du lit au produit de l'épaisseur de coupe par le nombre de coupes acquises simultanément :

$$p = d/(t \times n)$$

d = avance de table, t = épaisseur de coupes, n = nombre de coupes par rotation.

Certains constructeurs de scanners multicoupes présentaient initialement le pas en déplacement de table par épaisseur d'un détecteur, ce qui donnait des valeurs importantes, allant jusqu'à 6 en routine. En fait, la réalité est très différente. Par exemple, une acquisition avec 4 détecteurs centraux de 1,25 mm et un déplacement de table de 7,5 mm était présentée comme un pas de 6 ($7,5 : 1,25$) alors qu'elle correspond en fait à un pas de 1,5. À chaque rotation, la table se déplace de 7,5 mm devant une fenêtre d'exposition de 5 mm soit une réduction de dose de 33 % seulement ($1 : 1,5 = 0,66$). Il faut donc employer exclusivement le pas d'acquisition (déplacement du lit divisé par l'épaisseur totale explorée ou la collimation primaire). Ce dernier est

le seul qui réponde à la définition du pas, en vigueur dans les documents de normalisation. Il reflète directement la diminution d'exposition lors des acquisitions. La dose délivrée diminue en proportion de sa valeur : un pas de 1,5 diminue la dose de 33 %, un pas de 0,75 l'augmente de 33 %. C'est pour tenir compte de cette diminution de la dose délivrée en fonction du pas que le CTDI affiché sur la console de contrôle est le CTDI au volume. (cf. *supra*).

Couplage de la charge globale et du pas

En scanner multicoupe, il est possible de travailler à « mAs constant » (ou « rapport signal/bruit constant »). L'opérateur ne va plus modifier l'intensité seule, mais va choisir une charge par image, correspondant à la résolution en densité (rapport contraste/bruit) nécessaire pour l'usage clinique choisi (élevée pour l'étude des tissus mous, plus faibles pour l'os et les structures à haut contraste). En fonction du temps de rotation choisi et du pas, le tube va moduler les mA pour que les mAs délivrés au volume restent constants, autrement dit pour que la dose délivrée au volume soit identique. Si l'on travaillait à mA constants, l'augmentation du pas diminuerait le rapport signal sur bruit car le nombre de photons délivrés dans le volume diminue quand le pas augmente. C'est un changement par rapport à l'acquisition monocoupe où les mA étaient constants et la majoration du pas entraînait une diminution de la dose. En mode d'acquisition multicoupe à « mAs constants », la dose est indépendante du pas choisi mais dépend seulement de la charge choisie. En acquisition multicoupe, si l'on utilise une vitesse de rotation d'un tour par seconde, le choix d'une valeur de 100 mAs reviendra à délivrer 100 mA par rotation pour un pas de 1 mais à délivrer 200 mA par rotation pour un pas de 2 ou 50 mA pour un pas de 0,5. Ce qu'il faut retenir, c'est que, quel que soit le pas choisi, la dose reste identique. Le chevauchement partiel des hélices n'entraîne plus d'augmentation de dose inutile, l'étirement des hélices (pas supérieur à 1) ne permet pas d'économie de dose. Le seul intérêt de travailler avec un pas réduit est de permettre de meilleures qualités de reconstructions multiplanaires, au prix d'une acquisition plus longue, mais avec la même dose absorbée dans le volume étudié. Lorsque l'on ne prévoit pas la nécessité de reconstructions « lisses » dans différents plans, on peut choisir un pas plus élevé, ce qui permet un gain de temps global ou une meilleure résolution temporelle. Cette modulation de l'intensité n'est pas toujours possible, notamment quand on utilise un asservissement (*gating*) cardiaque.

Dispositifs de réduction de dose

Ils reposent sur des matériels modifiant le faisceau ou sur des logiciels modulant la charge en fonction de l'épaisseur ou de l'absorption du patient selon la hauteur de coupe.

Matériels

Filtre papillon

Ce filtre, disposé en sortie de tube est plus mince au centre que sur ses bords. Il permet d'adapter l'intensité le rayonnement à la réalité anatomique,

en laissant passer plus de rayonnement au centre du corps (plus épais) qu'à la périphérie.

Collimateurs de champ

Placés en sortie de tube, ils limitent le faisceau, dans le plan déterminé par les axes X et Y, au champ choisi. Ainsi, on n'utilise que les données d'absorption du volume correspondant au champ choisi, au lieu d'exposer tout le volume. Ils permettent ainsi une substantielle économie de dose et sont un bon exemple d'optimisation de l'exposition. Avec les systèmes multibarrettes larges sont également apparus des collimateurs dans l'axe Z, qui permettent de ne pas exposer inutilement en début et en fin d'hélice (fig. 11-2).

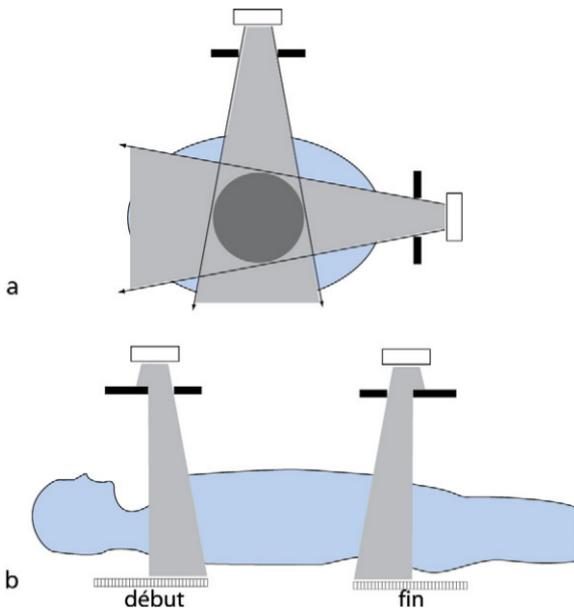


Figure 11-2

Collimateurs de champ.

a) Limitation du faisceau au champ choisi dans le plan X, Y. Seule la partie de la coupe délimitée par ce champ est exposée pendant toute la rotation. La partie périphérique du corps n'est exposée que partiellement.

b) Dans l'axe Z, la fermeture d'un volet de collimation permet de limiter strictement le faisceau au volume d'exploration choisi. En effet, le centre de la première et de la dernière coupe correspond au centre de la rangée de détecteurs. Pour un ensemble de détecteurs de $64 \times 0,625$ par exemple, il y aura donc une bande de 2 cm de part et d'autre de la longueur à explorer qui sera exposée inutilement. La fermeture du volet proximal au premier tour de l'hélice et du volet distal au dernier tour permet de ne pas exposer ces bandes « hors champ ».

Options logicielles

Modulation de l'intensité en fonction de l'incidence sur chaque rotation

C'est la plus simple de ces applications. Elle procède de la constatation que la plupart des corps humains sont plus épais dans le plan frontal que dans le plan sagittal. L'émission des RX sera donc programmée pour être plus importante à 90° et 270° qu'à 0° et 180° (fig. 11-3a).

Modulation de l'intensité en fonction de la position en Z

Il s'agit d'adapter la charge en fonction de l'absorption de chaque « tranche » du volume, déterminée au préalable par les mesures d'absorption de topogrammes de face et de profil (fig. 11-3b).

Modulation de l'intensité en fonction de l'absorption mesurée en cours de rotation

Elle est plus sophistiquée que la simple modulation en fonction de l'incidence du tube, car elle mesure l'absorption du sujet, pour la coupe considérée, sur la première partie de la rotation et module la charge sur la deuxième partie, en fonction des données recueillies (fig. 11-3c).

Critères de choix

Ces logiciels ont des noms variables selon les constructeurs. La mesure montre que la réduction de dose est cependant assez voisine, comprise entre 20 et 30 %, quelle que soit la technique choisie. L'essentiel est donc de disposer de l'une de ces options, en sachant que leur résultat est équivalent.

Soulignons que l'emploi de ces différents réglages automatisés ne permet plus de réduire *a priori* la charge (mAs) puisqu'elle est déterminée par le logiciel. Cela montre tout l'intérêt de diminuer la tension, en sus, chez les enfants, les adolescents et les patients minces. Remarquons par ailleurs que ces systèmes, modulant la charge en fonction de l'absorption, ne s'adaptent pas toujours à un besoin diagnostique. Par exemple, lorsqu'on explore un ensemble « abdomen-pelvis » la charge augmentera en abordant le pelvis, à cause de l'atténuation plus forte due au bassin osseux, ce qui ne correspond pas à un besoin en matière de résolution en densité (contraste/bruit) alors qu'elle sera plus faible au passage du foie, qui nécessite pourtant le meilleur rapport contraste/bruit.

Méthodes de reconstruction itérative

Elles remplacent la méthode de rétroprojection filtrée jusqu'ici utilisée et permettent une diminution de l'exposition en réduisant la proportion de bruit dans l'image. Chaque constructeur propose sa méthode ; certains modélisent l'ensemble des paramètres de la production d'images, d'autres se contentent d'intégrer les paramètres de l'acquisition pour analyser dans l'espace image la composante due au bruit et reconstruire plusieurs fois l'image en retranchant à chaque reconstruction cette composante. Le temps de reconstruction est donc théoriquement augmenté, mais l'augmentation de la puissance de calcul des processeurs images permet de

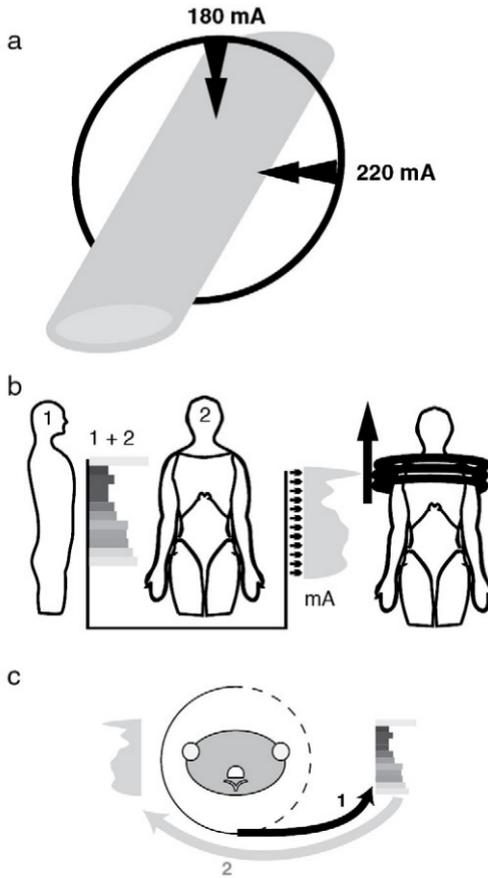


Figure 11-3

Logiciels de réduction de dose en scanner hélicoïdal.

a) Modulation de l'intensité au cours de la rotation : le corps humain est assimilé à un cylindre aplati, la quantité de rayonnement émise par le tube est plus importante à 90° et 270° qu'à 0° et 180°. b), la variation d'atténuation des rayons X selon l'axe Z est mesurée d'après les données des topogrammes de face et de profil. En cours de défilement devant le faisceau de RX, chaque tranche recevra une dose proportionnelle à l'absorption précédemment mesurée pour cette tranche. c) Les mesures d'absorption sont effectuées pendant la première moitié de la rotation et enregistrées (1). L'émission des RX est ensuite modulée, pour la demi-rotation suivante (2), en fonction de l'absorption mesurée dans la position angulaire symétrique.

compenser cet allongement du temps d'examen. Le gain en termes d'exposition est significatif, permettant une diminution de dose de 40 à 60 % pour une même qualité d'image.

Règles d'utilisation en fonction du patient et du type d'exploration

Réduire l'intensité (charge)

Ceci diminue linéairement la dose délivrée, au prix d'une diminution du rapport signal/bruit d'un facteur égal à la racine carrée du facteur de réduction de charge (lorsque la charge est divisée par deux, le rapport signal sur bruit est divisé par 1,4, soit une diminution de 30 % environ de ce rapport). Lorsque l'information à recueillir est du domaine de la résolution spatiale, cas de structures à fort contraste spontané, il est tout à fait possible – et recommandable – de diminuer la quantité de rayonnement, car les algorithmes de reconstruction utilisés s'accommodent d'un rapport signal/bruit moyen. C'est le cas par exemple de l'exploration des sinus, dont une exploration parfaitement informative peut être réalisée à 80 kV et 40 mAs, ou du parenchyme pulmonaire (100 ou 120 kV, 80 mAs). En revanche, lorsque l'information souhaitée est du domaine de la densité (cas général de l'abdomen, mais aussi de l'encéphale ou du rachis à la recherche d'une hernie discale), il est nécessaire d'avoir un bon rapport signal/bruit, donc de conserver un nombre de photons suffisant ; on ne peut pas diminuer la charge sans dégrader le contraste et risquer de perdre de l'information. Un compromis est donc nécessaire.

Réduire la tension

Nous avons vu que c'est un moyen simple et rapide de diminuer la dose administrée par un protocole donné quand on a affaire à des enfants ou à des sujets minces (< 50 kg). Une diminution de la tension de 20 %, toutes choses égales par ailleurs, diminue la dose de près de 50 %. Il faudra choisir en fonction des machines la réduction de tension ou de charge, avec la même recherche du meilleur compromis entre la qualité d'image et la dose. Cette réduction de tension est possible au préalable même quand on utilise des logiciels de modulation d'intensité en fonction du morphotype et doit être utilisée par principe chez les enfants et les adolescents et adultes minces. Signalons en outre qu'elle améliore le contraste quand on utilise l'iode, parce que l'abaissement de l'énergie moyenne du faisceau favorise son absorption au voisinage du pic de fluorescence de l'iode.

Augmenter le pas

L'acquisition hélicoïdale permet, tout en augmentant le pas de l'hélice, de recalculer des coupes jointives, voire chevauchées (diminution de l'incrément de coupe à la reconstruction), puisqu'elle fournit des données sur l'ensemble du volume. En reconstruisant les coupes avec un incrément plus faible que le pas d'acquisition on peut ainsi, sans dose supplémentaire, obtenir des reconstructions multiplanaires de bonne qualité. Avec les

scanners multicoupes, on peut même reconstruire des coupes plus fines que les coupes de l'acquisition initiale. Par exemple, si des coupes de 5 mm, sont obtenues en activant 4 détecteurs de 1,25 mm, il est tout à fait possible de reconstruire des coupes de 2,5 mm en utilisant séparément les données des détecteurs. De même, une reconstruction dans tout autre plan que le plan d'acquisition initial sera toujours possible en mode hélicoïdal, alors qu'elle ne sera possible qu'à partir de coupes jointives ou chevauchées en mode axial. Le choix du pas dépendra essentiellement de l'indication de l'examen, de la vitesse de réalisation souhaitée et de la nécessité ou non de prévoir des reconstructions. Nous avons vu en effet que, pour les machines requérant la fixation initiale de la résolution en densité de l'image (ou, ce qui revient au même, du niveau de son rapport signal/bruit), c'est-à-dire le choix du nombre de mA par image, la dose sera indépendante du pas choisi. Seuls changeront le temps d'acquisition et la qualité de reconstruction secondaire, tous deux inversement proportionnels au pas. L'augmentation de celui-ci ne sera donc utilisée, avec ce mode de travail à mAs constants, que pour gagner du temps, aux dépens de la qualité des reconstructions secondaires en plans différents.

Limiter les acquisitions

Le facteur principal d'augmentation de la dose est en fait directement lié à la facilité et la rapidité d'acquisition. Le mode hélicoïdal diminue la charge du tube et permet la répétition ou l'enchaînement des acquisitions. Cette rapidité d'acquisition a fait disparaître un frein naturel à l'exposition qui était le facteur temps. Quand l'exploration de la totalité du thorax ou de l'abdomen dure 10 secondes, il paraît simple de répéter les séries. Il n'est pas rare de voir des examens abdominaux de routine ayant comporté 4 passages sur le même volume (coupes sans injection, temps artériel, temps veineux et coupes tardives), sans réel apport diagnostique supplémentaire, mais ayant délivré dans ce volume une dose cumulée de 80 à 120 mGy selon les paramètres. La présence d'un médecin expérimenté à la console est plus que jamais nécessaire pour savoir justifier chaque séquence et arrêter l'exploration dès que l'information est obtenue. Il est coupable de faire réaliser par défaut un maximum de séquences pour pouvoir interpréter l'examen *a posteriori* sans risquer d'avoir manqué un temps de l'examen. Il est indispensable que chaque examen soit programmé rationnellement en fonction des indications cliniques : faut-il injecter, faut-il faire des coupes avant injection, si oui sur une partie seulement de la région à explorer ou sur toute cette région, les coupes tardives sont-elles utiles, etc. ?

Adapter sa pratique aux nouveaux outils

Les performances des scanners multicoupes permettent d'obtenir d'excellentes reconstructions dans tous les plans à partir d'une acquisition axiale transverse. Les collimations étroites pour l'acquisition n'augmentent pas forcément la dose si l'on accepte une diminution du rapport signal sur bruit en n'augmentant pas les paramètres de l'intensité du faisceau (kV ou mA). Ce choix peut être tout à fait pertinent pour des structures à haut

contraste et une information spatiale (parenchyme pulmonaire, explorations osseuses, sinus). En outre, il est tout à fait possible de programmer en reconstruction une épaisseur supérieure à l'épaisseur de coupe d'acquisition. La perte de signal sur bruit sera ainsi compensée par ce qui équivaut à une augmentation d'échantillonnage. Certains équipements ajustent d'ailleurs automatiquement à la baisse l'intensité du faisceau lorsque l'épaisseur de reconstruction demandée par l'opérateur est supérieure à la largeur de détecteurs sélectionnée. Ces possibilités de reconstructions rendent inutiles la plupart des acquisitions dans deux plans (axial et coronal pour une exploration des sinus par exemple), que l'on peut aujourd'hui remplacer par des reconstructions secondaires à partir d'un volume initial acquis avec une épaisseur de coupe et un pas suffisamment petit pour que l'image reconstruite ait une résolution spatiale équivalente à celle de l'image native. De même, l'inclinaison du statif pour « enfilet » une structure, particulièrement un disque intervertébral, déjà obsolète avec le scanner hélicoïdal monocoupe, est une faute technique avec le scanner multicoupe. En effet, cette pratique est particulièrement pénalisante au plan de la radioprotection (augmentation du volume traversé, inclusion des ovaires dans le faisceau direct chez la femme) et elle est inutile puisque les reconstructions obliques dans le plan du disque ont une qualité d'image égale ou supérieure à une acquisition dans un plan oblique. En pratique, l'inclinaison du statif n'est justifiée aujourd'hui que pour éviter des sources d'artefacts potentiels (notamment en cervical, afin d'éviter les prothèses dentaires) ou, en scanner interventionnel, pour inclure un trajet d'aiguille dans le plan des coupes de contrôle. Enfin, il faut savoir remettre en question des pratiques anciennes telles que l'opacification digestive par un produit radio-opaque (solution de baryte ou d'iode). En effet, cette opacification, nécessaire avec les premiers scanners pour mieux identifier les structures rétropéritonéales et digestives lors d'acquisitions longues et dépendantes du péristaltisme, est aujourd'hui inutile, voire néfaste (artefacts) pour la plupart des explorations abdominales. Elle est avantageusement remplacée, lorsqu'on veut étudier la paroi intestinale, par un remplissage à l'eau qui permet une meilleure appréciation du rehaussement de contraste de la paroi et qui a l'immense avantage de peu absorber le rayonnement. La réplétion barytée ou iodée du tube digestif augmente en effet considérablement l'absorption des RX et les logiciels d'ajustement automatique vont alors augmenter la charge (mAs) en conséquence, ce qui conduit à une exposition très supérieure du patient.

Indication de dose

En scanner, l'obligation de relevé de dose s'applique, pour tous les patients, aux examens du tronc, de la tête et du cou (fig. 11-4). En outre, parce que le scanner est considéré comme « pratique délivrant des doses élevées », il faut mentionner, sur chaque compte-rendu, les éléments d'identification du scanner (marque et type dans la marque). L'indicateur dosimétrique retenu est le produit Dose.Longueur (PDL).

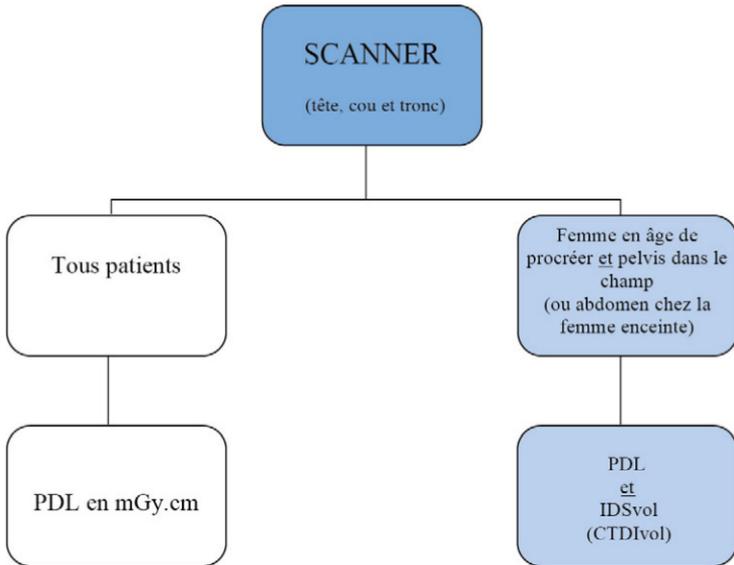


Figure 11-4

Indications à faire figurer sur le compte-rendu en tomodensitométrie.

Pour tous les examens, il faut faire figurer sur le compte-rendu les éléments d'identification de l'appareil (marque et type) et les éléments de quantification de la dose :

En pratique, l'arrêté du 15 septembre 2006 impose de mentionner le PDL ou le PDL cumulé pour tous les examens intéressant le tronc, la tête ou le cou mais également, pour les femmes jeunes le CTDIvol lorsque l'exploration concerne le pelvis. Cette exigence supplémentaire est justifiée par le même besoin qu'en radiologie conventionnelle de pouvoir connaître la dose *a posteriori* en cas de grossesse méconnue. En effet, le CTDIvol permet d'estimer avec précision la dose reçue par l'enfant *in utero* (cf. chapitre 7). Cette obligation de reporter le CTDIvol, en sus du PDL, s'applique également pour tout examen concernant l'abdomen pratiqué chez une femme enceinte. Lorsque l'utérus est contenu tout entier dans le volume exploré, la dose efficace délivrée à l'enfant est comprise entre 1 et 1,2 CTDIvol selon le poids de la mère et l'avancement de la grossesse. Notons que le PDL, grandeur utile à la connaissance de l'exposition de la mère, n'est pas pertinent pour estimer l'exposition de l'enfant si le volume exploré est plus important que le volume dans lequel il est contenu, ce qui est toujours le cas en début de grossesse.

Tous les scanners actuellement sur le marché doivent obligatoirement afficher les informations de dose pour chaque examen, en précisant les valeurs de CTDIvol et de PDL pour chaque série (fig. 11-5). Lorsque l'on utilise un système de réduction de dose par ajustement automatique de l'intensité en cours d'acquisition, la valeur de CTDIvol indiquée est la moyenne des

Images	Dose information			
	CTDIvol mGy	DLP mGy.cm	Dose Eff. %	Phantom cm
1-24	36,41	772,39	80,8	Head 16
25-75	5,42	233,86	90,78	Body 32
Projected series DLP			1006,25 mGy.cm	

Figure 11-5

Information de dose figurant sur la console d'un scanner (scanner VCT, GEMS).

L'information comporte le CTDIvol pour chaque série, et le PDL résultant de la longueur explorée, l'efficacité de dose (signalant la part utile de la dose, consacrée à l'image, par rapport à la dose totale, incluant le rayonnement inutile de la pénombre) et le fantôme utilisé pour le calcul du CTDIvol.

CTDIw de chaque rotation, divisée par le pas. La valeur du PDL n'est pas affectée par cette variation d'intensité en cours d'acquisition.

Dans certains cas (hélice intéressant la région cervicale et le tronc dans un bilan de lymphome par exemple) il n'est pas possible de distinguer le PDL de chacune de ces régions et les valeurs affichées sont celles du fantôme « tronc » si l'on ne programme pas deux hélices distinctes, ce qui n'est pas toujours possible. Dans ce cas, il faudra reporter le PDL global, en sachant qu'il existe une sous-estimation pour la partie cervico-céphalique.

Chez l'enfant de moins de 5 ans, il faut également mentionner le fantôme utilisé par l'appareillage pour l'affichage du CTDI et du PDL car le calcul de CTDI avec un fantôme « corps » sous-estime la dose.

Rappelons que, pour l'information des patients et des correspondants, la dose efficace peut être facilement estimée à partir du PDL (cf. tableau 3-4).

Conclusion

La qualité de l'information délivrée par les scanners multicoups améliore nos capacités diagnostiques et le service rendu aux malades. L'exploration scanographique se substitue à une grande partie des explorations conventionnelles et représente dorénavant une part prépondérante de l'ensemble des expositions diagnostiques aux rayons X. Une utilisation rationnelle permet d'assurer à nos patients un rapport bénéfice/risque d'autant plus grand que la plupart de nos explorations concernent des patients de plus de 60 ans, chez qui le risque génétique est nul et le risque carcinogène pratiquement inexistant. Cependant les nouveaux scanners multicoups délivrent des doses sans commune mesure avec celles de la radiologie conventionnelle et, chez les adultes jeunes et les enfants, il faut bannir avec la plus extrême rigueur toute exposition inutile et limiter les expositions justifiées au strict nécessaire pour le diagnostic. Il doit s'instaurer au sein des équipes de médecins et de manipulateurs exerçant en scanographie une véritable culture de radioprotection, fondée sur l'autocontrôle rendu possible par l'affichage des index de dose et la connaissance des doses de référence.

Vérifiez si vous avez assimilé les points importants de ce chapitre en répondant au questionnaire en fin d'ouvrage.

Pour en savoir plus

Nagel H, editor. Radiation Exposure in Computed Tomography. Hambourg, European Coordination Committee of the Radiological and Electromedical Industries; 2000.

Dion AM, Berger F, Hélie O, Ott D, Spiegel A, Cordoliani YS. Diminuer la dose en tomодensitométrie abdominale : abaisser la tension (kV) ou la charge (mAs) ? J Radiol 2004;85:375-80.

Guide pratique interactif de l'arrêté du 15 septembre 2006 concernant les indications à faire figurer sur le compte-rendu radiologique : site Internet de la Société française de radiologie www.sfrnet.org.

12 Radioprotection des patients : niveaux de référence, guide des procédures et des indications des examens d'imagerie

L'usage des rayonnements ionisants (RI) dans le domaine du diagnostic médical ne peut se voir appliquer de limites réglementaires car le bénéfice qu'ils apportent est très supérieur à leurs potentiels effets néfastes, à condition que l'examen soit justifié et d'une qualité suffisante au diagnostic.

Niveaux de référence diagnostiques

L'obligation légale de reporter les indicateurs de dose sur les comptes rendus d'examens radiologiques doit amener les techniciens et les médecins radiologues à prêter une attention permanente à l'exposition de leurs patients. La connaissance de valeurs d'exposition, PDS ou PDL pour les principaux examens leur permet également de situer leur pratique par rapport à la pratique médiane, grâce à la confrontation avec les niveaux de référence diagnostiques nationaux (NRD).

Les NRD se substituent, dans le domaine de l'exposition médicale, au principe de limitation dans le domaine de l'exposition professionnelle. Ils permettent d'évaluer le niveau de dose d'un examen donné dans la pratique nationale afin que chacun puisse situer sa pratique et la corriger en cas de dépassement régulier.

Par ailleurs, ont été mis en place des guides concernant la réalisation et les indications des explorations utilisant les rayonnements ionisants.

Origine et signification des NRD

La directive Euratom 97-43, relative à « la protection des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants lors d'expositions à des fins médicales » a imposé l'usage d'un référentiel proposé par la CIPR en 1996. La directive stipulait à l'article 4 (optimisation) : « les États membres favorisent l'élaboration et l'utilisation de niveaux de référence diagnostiques ». La transposition de cette directive en droit français a imposé la détermination de NRD en radiologie médicale et en médecine nucléaire. L'article R. 1333-68 du Code de santé publique dispose que : « Pour les examens exposant aux

rayonnements ionisants les plus courants et pour les examens les plus irradiants, des niveaux de référence diagnostiques de dose sont fixés par arrêté du ministre chargé de la santé, pour des examens types sur des groupes de patients types ou sur des matériaux simulant le corps humain. Ces niveaux de référence sont constitués par des niveaux de dose pour des examens types de radiologie et par des niveaux de radioactivité de produits radiopharmaceutiques en médecine nucléaire diagnostique. Le médecin ou le chirurgien-dentiste qui réalise un acte exposant aux rayonnements ionisants à des fins de diagnostic prend les mesures nécessaires pour ne pas dépasser les niveaux de référence diagnostiques. » Nous verrons que cette formulation est incorrecte car ces niveaux devront parfois être dépassés dans l'intérêt du patient.

Selon la définition de la directive Euratom 97-43, les NRD sont « des niveaux de dose dans les pratiques radiodiagnostiques ou, dans le cas de produits radiopharmaceutiques des niveaux d'activité, pour des examens types sur des groupes de patients types ou sur des fantômes types, pour des catégories larges de types d'installations. Ces niveaux ne devraient pas être dépassés pour les procédures courantes se conformant aux bonnes pratiques normales et utilisant des matériels performants ». Ces niveaux doivent être établis prioritairement pour les examens fréquents et les examens de dépistage ainsi que pour les examens délivrant des doses élevées (tomodensitométrie, radiologie interventionnelle). Il ne s'agit pas de limites, car les médecins utilisant les rayonnements ionisants doivent conserver la possibilité de délivrer en cas de besoin les doses nécessaires au but recherché dès lors que l'emploi des RI est justifié. Ainsi, chez un patient obèse, le radiologue pourra être amené à délivrer des doses supérieures au NRD d'un examen donné, établi sur des patients types, afin d'avoir une qualité d'image suffisante pour ne pas compromettre le diagnostic. De même, un radiologiste interventionnel pourra prolonger un examen si le résultat n'est pas atteint et que la survie du patient en dépend (exemple d'une hémorragie ou d'un anévrisme). L'assujettissement à une limite de dose pourrait ainsi faire subir un grave préjudice pour le patient. La notion de niveau de référence est tributaire de la qualité informative des images. Délivrer des doses inférieures aux NRD n'est un critère de bonne pratique que si les examens réalisés répondent à la question posée.

Les NRD sont donc des repères dosimétriques permettant au radiologiste de situer sa pratique pour l'ensemble des examens qu'il réalise, par rapport à celle de l'ensemble de la profession et de prendre ainsi conscience de possibilités éventuelles de diminution de dose. C'est le préalable à toute démarche d'optimisation. Ces repères permettent d'apprécier la qualité des équipements et des pratiques lors des contrôles internes et externes, et d'engager, en cas de dépassement injustifié, des actions de correction. La formulation du Code de santé publique est donc incorrecte, car c'est l'exposition moyenne, pour un acte donné, qui doit se situer en dessous du NRD et non l'exposition de tous les actes. En effet on ne peut exiger, pour un acte, que l'exposition se situe sous le NRD, car les circonstances (corpulence du patient, nécessité de réitérer une acquisition, etc.) peuvent amener à dépasser occasionnellement le NRD.

Élaboration des NRD

Elle suppose le choix de grandeurs dosimétriques appropriées, qui doivent être clairement définies et mesurables, refléter l'importance de la dose délivrée aux patients, dépendre directement des paramètres techniques de l'examen et être adaptées au matériel radiologique courant. Ces grandeurs ont fait l'objet d'un accord international. En radiologie conventionnelle, on utilise la dose à la surface d'entrée du patient (D_E) exprimée en milligrays (mGy) et le produit Dose.Surface (PDS) exprimé en $Gy.cm^2$ ou en $cGy.cm^2$.

En scanner, les indicateurs dosimétriques caractérisant une procédure sont l'indice de dose de scanographie pondéré (IDSP ou $CTDI_w$) et le produit Dose.Longueur (PDL). Pour l'établissement des valeurs numériques des NRD, la Commission européenne conseille une méthode empirique, partant de la réalité des pratiques médicales pour aller vers une réduction progressive des doses délivrées aux patients. C'est la méthode statistique dite du 75^e percentile, déjà mise en œuvre par plusieurs pays européens, dont la Grande-Bretagne, depuis une vingtaine d'années.

Les NRD initiaux sont mesurés pour une procédure courante, sur des groupes de patients types (en théorie, 70 ± 3 kg de masse corporelle, 20 ± 2 cm d'épaisseur de torse, en pratique patients de corpulence normale, soit un indice de masse corporelle (IMC) compris entre 19 et 25 ou sur un fantôme anthropomorphe standard. On adopte comme niveau de référence la valeur du 75^e percentile des doses mesurées pour une procédure donnée, sur un grand nombre de patients répartis dans un grand nombre de centres, représentatifs de la pratique radiologique d'un pays (fig. 12-1). Il ne s'agit donc pas d'une moyenne mais, pour chaque pratique, d'une valeur en dessous de laquelle se situent 75 % des mesures. Ceci revient à considérer que le quart des examens correspondant aux doses les plus élevées ne sont pas optimisés.

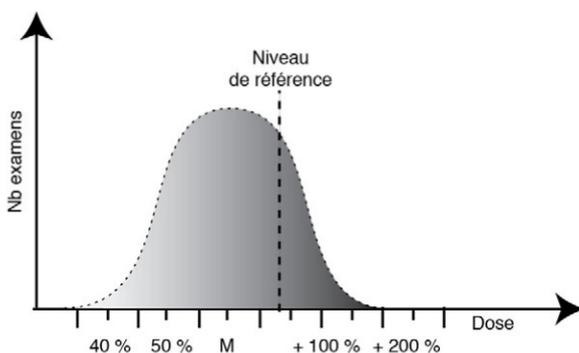


Figure 12-1

Niveau de référence diagnostique. C'est le 75^e percentile d'une distribution de doses. Les valeurs de dose pour un examen donné ont une distribution gaussienne. Le niveau de référence retenu pour cet examen ne sera pas la moyenne (M) mais la valeur en dessous de laquelle se situent 75 % des mesures.

Tableau 12-1

Niveaux de référence de la dose à l'entrée du patient, D_E , et du produit Dose. Surface en radiologie chez l'adulte (arrêté du 24 octobre 2011)

Examen	D_E en mGy pour une incidence	PDS EN cGy.cm ² pour une incidence
Thorax de face (postéro-antérieur)	0,3	25
Thorax de profil	1,2	100
Abdomen sans préparation	8	700
Bassin de face (antéropostérieur)	9	700
Hanche (face ou profil)	9	300
Rachis cervical (face ou profil)	4	75
Rachis dorsal de face	5	175
Rachis dorsal de profil	7	275
Rachis lombaire de face	10	450
Rachis lombaire de profil	25	800
Orthopantomographie	Sans objet	20

Les niveaux de référence proposés par la Commission européenne découlent de la mise en œuvre de cette méthode, à partir de mesures effectuées dans une sélection de services de radiologie représentatifs des différents États membres de la Communauté. Les valeurs retenues en France ont été actualisées dans l'arrêté du 24 octobre 2011, pour les examens les plus courants en radiologie (tableau 12-1 pour l'adulte et 12-2 pour l'enfant) et en scanographie (tableaux 12-3 pour l'adulte et 12-4 pour l'enfant) ; soulignons que, par définition, ces niveaux sont appelés à se modifier avec une meilleure collecte des niveaux nationaux et la diminution des doses permises par les améliorations techniques (notamment les capteurs plans en radiologie conventionnelle et les techniques de reconstruction itérative en scanographie).

En outre, cet arrêté stipule que chaque service relève à intervalle régulier les valeurs d'exposition pour trente patients, sans limite de poids ou de taille, dont les valeurs seront également reportées pour chaque enregistrement, de façon à disposer annuellement de trente valeurs pour deux examens référencés. Ces données sont communiquées à l'Institut de sûreté nucléaire et radioprotection (IRSN).

Utilisation, recueil et communication des données dosimétriques

Lorsque l'indication des éléments nécessaires à l'estimation des doses est obligatoire, c'est-à-dire en scanographie et en radiologie conventionnelle pour les examens concernant le tronc ou la région cervico-céphalique effectués avec un appareil équipé de système de mesure du PDS, la comparaison

Tableau 12-2

Niveaux de référence de la dose à l'entrée, DE, et du PDS en radiopédiatrie (arrêté du 24 octobre 2011)

Examen	poids (kg)	âge	DE en mGy	pds en cGy.cm ²
Thorax face (antéro-postérieur)	3,5	0-1 an	0,08	1
Thorax face (antéro-postérieur)	10	1 an	0,08	2
Thorax face (postéro-antérieur)	20	5 ans	0,1	5
Thorax face (postéro-antérieur)	30	10 ans	0,2	7
Thorax de profil	20	5 ans	0,2	6
Thorax de profil	30	10 ans	0,3	8
Pelvis antéropostérieur	10	1 an	0,2	3
Pelvis antéropostérieur	20	5 ans	0,9	20
Pelvis antéropostérieur	30	10 ans	1,5	40
ASP	20	5	1	30
ASP	30	10	1,5	70

Tableau 12-3

Niveaux de référence en scanographie chez l'adulte pour une acquisition

Examen	IDSV (mGy)	PDL (mGy.cm)
Encéphale	65	1 050
Thorax	15	475
Thorax-abdomen-pelvis	20	1 000
Abdomen-pelvis	17	800
Rachis lombaire	45	700

Fantôme de 16 cm pour les examens de l'encéphale, 32 cm pour les autres examens.

Tableau 12-4

Niveaux de référence IDSV et PDL en scanographie pédiatrique (arrêté du 24 octobre 2011)

Examen	1 an (10 kg)	5 ans (20 kg)	10 ans (30 kg)
	IDSV (mGy)/PDL (mGy.cm)		
Encéphale	30/420	40/600	50/900
Massif facial (sinus)	25/200	25/275	25/300
Rochers	45/160	70/280	85/340
Thorax	3/30	4/65	5/140
Abdomen-pelvis	4/80	5/120	7/245

Fantôme de 16 cm pour les examens de l'encéphale, du massif facial et des rochers, 32 cm pour les autres examens.

avec le NRD pour chaque examen est simple, de même que le recueil de NRD de patients types.

En scanographie

La mention du PDL de chaque région explorée (tronc, tête ou cou) doit devenir systématique. Relever et reporter le PDL sur le compte-rendu permet de situer sa pratique par rapport au PDL de référence correspondante. Il faut prendre l'habitude, dans chaque service de scanographie, de définir annuellement les examens qui feront l'objet du transfert de données à l'IRSN et prévoir un formulaire de recueil, qui peut être un tableur sur ordinateur à proximité de la console du scanner (fig. 12-2). Pour un service de scanner, ce sera, par exemple, les examens du thorax et de la tête une année, de l'abdomen et du rachis lombaire l'année suivante.

Si le relevé annuel montre un dépassement régulier des niveaux de référence, une révision des procédures s'impose. Une action correctrice doit être envisagée si rien ne justifie le dépassement. Un contrôle régulier, avec mesure de dose sur fantôme pour des procédures types, permettra de s'assurer de la validité des valeurs de PDL indiquées par l'installation. Ce contrôle est effectué lors du contrôle de qualité interne de l'installation.

En radiologie conventionnelle

L'obligation de transmission des données concerne chaque installation de radiologie. Le terme « installation » doit être compris au sens large de « service » quand il y a plusieurs appareils par service. Par exemple, on relèvera une année, dans un service de radiologie conventionnelle, la valeur du PDS ou de la D_E pour la radiographie pulmonaire de face et l'abdomen sans préparation. Ces valeurs, établies pour un groupe de patients types, seront communiquées à l'IRSN. L'année suivante, le service devra communiquer deux autres valeurs de son activité, par exemple radiographie pulmonaire de profil et rachis lombaire de face.

Appareils munis d'un dispositif de mesure du PDS

Comme en scanographie, la mention du PDS sur le compte-rendu permet de le comparer au PDS de référence de l'exploration réalisée et de situer sa pratique moyenne. Ici aussi, un contrôle régulier, avec mesure de dose sur fantôme pour des procédures types, permettra de s'assurer de la validité des valeurs de PDS indiquées par l'installation. Comme pour le scanner, deux examens seront sélectionnés chaque année pour un recueil de trente mesures sur patients de tous morphotypes en relevant la taille et le poids. À la différence de la version précédente de l'arrêté d'application, il n'est plus nécessaire de calculer la dose d'entrée, ce qui simplifie la collecte des données. En revanche, il faut préciser, outre le poids et la taille, la haute tension utilisée (kV) et la distance foyer détecteur.

Appareils démunis d'un dispositif de mesure du PDS

Dans ce cas, nous l'avons vu, le respect des obligations réglementaires nécessite soit de faire effectuer les mesures sur des fantômes types par

Il faudra en outre procéder régulièrement à des mesures de doses sur fantôme ou sur des groupes de patients types pour estimer la dose de chaque procédure réalisée avec les paramètres habituels de l'installation.

Mammographes

Nous avons vu que l'indicateur pertinent de dose était ici non le produit Dose.Surface mais la dose glandulaire moyenne (DGM) ou la dose d'entrée (DE). C'est cette dernière qui figure dans l'arrêté du 12 février 2004, avec une valeur de 10 mGy. Le contrôle de la dose sur fantôme fait partie des contrôles imposés par l'arrêté d'application à la mammographie du décret 2001-1154 sur la maintenance et le contrôle de qualité. Deux décisions de l'AFSSAPS ont détaillé les modalités de ce contrôle, pour la mammographie analogique et la mammographie numérique.

Radiographie dentaire

Panoramique dentaire

L'indicateur retenu est le PDS ; comme les orthopantomographes ne peuvent être équipés de chambre d'ionisation, il s'agit de PDS calculé à partir des paramètres d'exposition (kV, mAs), de la largeur du champ d'exposition et de la longueur du balayage curviligne.

Clichés rétroalvéolaires

Ici aussi il n'existe pas de NRD et leur établissement n'est pas prioritaire, compte tenu du très faible niveau d'exposition résultant de cette pratique. Pour la radiographie dentaire conventionnelle, il est peu probable que les appareils soient équipés d'appareils de mesure de l'exposition. Lorsque des NRD seront établis, la vérification du respect de ces NRD dans la pratique reposera sur les contrôles dosimétriques périodiques.

Ainsi, l'utilisation des NRD introduira, dans la pratique de tous, une routine d'estimation et de contrôle de la dose délivrée au patient, ce qui sera une amélioration considérable de la pratique professionnelle en radiologie. Rappelons cependant que le respect des niveaux de référence n'est pas le seul critère de bonne pratique. D'une part le principe de justification des actes doit au préalable être respecté, d'autre part, le non-dépassement des niveaux de référence ne dispense pas de poursuivre la démarche d'optimisation des doses, en gardant comme objectif permanent, indissociable de la dosimétrie, la qualité diagnostique des images.

Évolution

Au plan national

La nature même des NRD indique qu'il s'agit d'un processus tendant vers la réduction de dose. En effet, lorsque les NRD seront définis à l'issue d'une première campagne de mesure, si tous les professionnels adaptent leur pratique pour rester en deçà du 75^e percentile, les mesures qui seront réalisées ensuite verront une diminution globale de l'exposition, c'est-à-dire un déplacement vers la gauche de la courbe de la [figure 12-1](#). Le 75^e percentile, établi à partir de la deuxième campagne de mesures, sera donc inférieur à celui de la première campagne et ainsi de suite. Il est bien évident que ce

mécanisme de baisse aura des limites mais, dans un premier temps, il permettra d'éliminer des matériels et des pratiques inacceptables, puis il sera en grande partie assuré par l'amélioration constante des matériels (capteurs plans, par exemple).

Les données communiquées à l'Institut de sûreté nucléaire et radioprotection permettront ainsi d'actualiser régulièrement les valeurs nationales.

Pour chaque installation

Les résultats des évaluations de chaque service doivent être tenus à la disposition des agents chargés du contrôle de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), ce qui suppose la tenue d'un registre, papier ou informatique, où figurent les doubles des résultats adressés chaque année.

La confrontation avec les NRD nationaux permet de situer sa pratique, de l'optimiser, voire de la corriger si l'on constate des dépassements réguliers du NRD pour un examen donné. Dans ce cas, les mesures mises en œuvre pour ramener le niveau moyen d'exposition d'une pratique en dessous du NRD devront être mentionnées sur le registre de relevé des NRD.

Guide des procédures

Également spécifiée dans la directive Euratom 97-43, la nécessité de disposer, pour chaque acte exposant aux rayonnements ionisants, d'une description écrite des étapes et paramètres techniques de cet acte a été transcrite dans le Code de santé publique (CSP) (article R1333-69) : « Les médecins ou chirurgiens-dentistes qui réalisent des actes établissent, pour chaque équipement, un protocole écrit pour chaque type d'acte de radiologie ou de médecine nucléaire diagnostique qu'ils effectuent de façon courante, en utilisant des guides de procédures nationaux (article R1333-71). Ces protocoles écrits sont disponibles, en permanence, à proximité de l'équipement concerné. »

Le guide des procédures a été réalisé par la Société française de radiologie (SFR) sous l'égide de la Haute autorité de santé, avec la participation de l'Autorité de sûreté nucléaire et chaque procédure a fait l'objet d'une estimation ou d'une mesure de dose par les physiciens médicaux de l'IRSN. L'ensemble figure dans le rapport SFR/IRSN « Les procédures radiologiques : critères de qualité et optimisation des doses », accessible sur le site Internet de la SFR, qui propose une standardisation des examens et des recommandations pour réduire les doses.

Méthode

La première version du guide a été réalisée par la SFR en 2000, en réunissant des radiologues de modes d'exercice différents (hospitalo-universitaire et exercice libéral) et des physiciens l'IRSN. Le comité a adopté la démarche suivante :

- 1) définition, pour chaque type d'examen, de critères de qualité qui fassent l'objet d'un consensus au niveau national ;

- 2) rédaction des procédures d'examen conciliant ces critères de qualité avec des paramètres techniques conduisant au niveau d'irradiation le plus faible possible ;
- 3) établissement de niveaux de référence diagnostiques pour chaque procédure.

La rédaction des points 1 et 2 (élaboration des procédures) a été confiée aux groupes de travail de la SFR, celle du point 3 (dosimétrie) au groupe de travail de l'IRSN.

Rédaction des protocoles

Elle a procédé par consensus d'experts, défini par la Haute autorité de santé (HAS). Des groupes de travail spécialisés ont été constitués par le comité de pilotage dans chaque société d'organe. Au total quinze groupes, chacun sous la direction d'un responsable et de deux adjoints, ont rédigé les protocoles d'examen. Ces protocoles ont fait l'objet d'une analyse critique par le comité de pilotage avant leur acceptation.

Validation par des experts

Les protocoles validés par le comité de pilotage ont été soumis à la relecture d'experts. Pour impliquer l'ensemble de la profession, ces experts (dix à douze par spécialité) ont été choisis au sein des sociétés d'organes de la SFR et également au sein de la Fédération nationale des médecins radiologues (FNMR), avec un souci d'équilibre entre secteur libéral et secteur hospitalier, secteur hospitalier universitaire et non universitaire, villes de moins de cinquante mille habitants et grosses agglomérations, région parisienne et province. La validation par ces experts (près de 150 experts ont participé à cette tâche) permet de considérer ces protocoles comme consensuels pour la radiologie française.

Résultat

Contenu de chaque fiche de procédure

Chaque fiche est conçue selon le même plan :

- indications et étapes préparatoires : ce sont les principaux motifs de demandes d'un examen donné et le rappel de la démarche diagnostique qui conduit à le demander ;
- requis diagnostiques : ils énumèrent, pour chaque type d'examen, les renseignements attendus et les critères de qualité permettant de juger de son apport diagnostique ;
- description de la procédure et des paramètres techniques, avec le détail de tous les éléments techniques de la réalisation de l'examen, ce qui garantit sa reproductibilité et l'estimation de la dose délivrée ;
- estimation du niveau de dose et moyens d'optimisation : le niveau de dose exprimé en PDS et DE ou PDL, est calculé d'après les paramètres techniques indiqués, ou mesuré directement en appliquant ces paramètres ; l'effet des modifications des paramètres techniques sur la dose est mentionné, ce qui guide l'opérateur dans le processus d'optimisation ;

- conditions particulières : ce sont les adaptations techniques résultant de situations cliniques moins fréquentes où l'exploration doit être orientée vers une pathologie particulière et la technique adaptée en conséquence.

Utilisation et évolution

Pour chaque examen courant, conventionnel ou scanographique, on peut accéder par Internet au protocole standardisé validé. La mise à disposition en ligne permet une actualisation régulière des protocoles et des niveaux de référence ; ceux-ci sont pour la plupart, actuellement, des niveaux européens et des NRD français leur seront substitués, au fur et à mesure de leur établissement.

Guide du bon usage des examens d'imagerie médicale

L'élaboration d'un guide des indications était explicitement demandée par la directive Euratom 97-43 : « les États membres veillent à ce que des recommandations concernant les critères de prescription pour les expositions à des fins médicales, y compris les doses d'irradiation, soient mises à la disposition des médecins ordonnateurs d'expositions à des fins médicales. » Ce guide représente en fait concrètement la justification de chaque acte exposant aux RI. En conséquence, la transposition dans le CSP stipule (article R1 333-70) : « En liaison avec les professionnels et en s'appuyant soit sur les recommandations de pratiques cliniques établies par la Haute autorité de santé, soit sur l'avis concordant d'experts, le ministre chargé de la santé établit et diffuse un guide de prescription des actes et examens courants exposant à des rayonnements ionisants. Ce guide contient notamment les niveaux de référence diagnostiques. » Notons, là encore, une confusion dans la transcription de la directive car le décret demande que le guide contienne les niveaux de référence diagnostiques, au lieu des « niveaux d'irradiation » mentionnés dans la directive or les NRD ne sont que des indicateurs indirects de l'exposition et seraient totalement incompréhensibles à nos correspondants. L'esprit de la directive était de donner, comme dans les guides existants, notamment européens, une indication sur l'exposition. Cette indication ne peut être exprimée qu'en dose efficace et, éventuellement, comparée à l'exposition naturelle pour donner un ordre de grandeur de cette exposition. Il est d'ailleurs très facile, à partir des NRD figurant dans le guide des procédures radiologiques, d'estimer la dose efficace correspondante pour la faire figurer dans le guide des indications des examens d'imagerie.

Méthode

La Communauté européenne a édité, en 2001, un guide de recommandations pour la prescription des examens d'imagerie médicale. Le guide national, *Guide du bon usage des examens d'imagerie médicale*, reprend la présentation et la démarche de ce guide. Il est divisé en chapitres qui correspondent

aux spécialités d'organe. Dans chaque chapitre, l'entrée est un symptôme ou une pathologie soupçonnée. Chaque examen utilisable en présence de ce symptôme est cité, avec une indication sur l'exposition qui en résulte, et coté en fonction de sa pertinence, avec un commentaire explicatif. L'indicateur d'exposition est divisé en quatre classes :

- 0 : pas d'exposition aux RI ;
- I : exposition < 1 mSv,
- II : 1 à 5 mSv ;
- III : 5 à 10 mSv,
- IV : > 10 mSv.

Répetons que seuls ces niveaux d'exposition, exprimés en dose efficace, ont une place dans ce guide, destiné aux médecins demandeurs, et non pas, comme il est mentionné dans le décret de transposition, les NRD, indicateurs indirects de l'exposition et trop techniques pour être intelligibles par les correspondants. D'autre part, les NRD ne sont établis que pour certains examens (les plus courants) et ne pourraient être indiqués pour tous les examens cités par le guide. Enfin, la mise à jour de celui-ci, représentant déjà un travail permanent considérable, ne peut être alourdie par la mise à jour simultanée des NRD pour chaque indication.

Quant à la pertinence (niveau de preuve), elle reprend celle des recommandations de pratique clinique : A : essais avec répartition aléatoire, B : travaux prospectifs, observations fiables, C : avis concordants d'experts.

Réalisation du guide français

Un comité de pilotage de la SFR a été mis en place en 2001, dans la continuité du comité de pilotage des procédures, associant les radiologues et médecins nucléaires, les représentants de la Direction générale de la sûreté nucléaire et de la radioprotection (DGSNR) et l'ANAES. Quatorze groupes de travail ont analysé, chacun dans une spécialité différente, l'argumentaire du guide européen et l'ont actualisé par analyse des références bibliographiques parues depuis sa rédaction (1998). Ces groupes ont réuni des radiologues et médecins nucléaires de modes d'exercice différents (hospitalier et hospitalo-universitaire et exercice libéral) et des représentants de la médecine générale. La démarche a été la suivante :

- 1) rédaction des items, en complétant ou modifiant les items du guide européen pour prendre en compte les données nouvelles par rapport à la rédaction initiale ; dans ce cas, l'argumentation bibliographique a été insérée ;
- 2) relecture par un groupe d'experts constitués de spécialistes d'imagerie médicale et de cliniciens, spécialistes de l'appareil étudié et généralistes ; après discussion et arbitrage, ces indications sont classées A, B ou C ;
- 3) deuxième relecture, par un groupe d'experts plus large, pour tester l'accord professionnel ;
- 4) validation définitive par le comité de pilotage et publication du *Guide du bon usage des examens d'imagerie médicale*.

Utilisation et évolution

Le guide français est appelé à devenir le document de référence de la justification pour les examens utilisant les RI. Là encore, une mise à disposition en ligne permet une actualisation régulière des indications. L'existence et la diffusion de ce guide vont redonner tout son sens à la justification des examens d'imagerie et devraient faire disparaître les examens inutiles ou redondants car le radiologue, reprenant la pleine mesure de son rôle de consultant, pourra s'appuyer sur ce référentiel pour orienter, modifier ou refuser une demande inadaptée. En effet le CSP indique sans ambiguïté que, « en cas de désaccord entre le praticien demandeur et le praticien réalisateur de l'acte, la décision appartient à ce dernier » (article 1333-57). En contrepartie, il constitue un cadre réglementaire, sur lequel s'appuieront les structures de contrôle de la radioprotection, mais aussi, potentiellement, des organismes de couverture du risque maladie, imposant ainsi une vigilance attentive dans la réalisation des actes.

Le *Guide du bon usage des examens d'imagerie médicale* est facilement accessible en ligne pour tous les praticiens, demandeurs et réalisateurs à l'adresse Internet :

<http://gbu.radiologie.fr/>

Conclusion

La mise en place de niveaux de référence diagnostique couplée à l'élaboration des guides de bon usage des examens d'imagerie d'une part et des procédures radiologiques d'autre part permet de disposer de tous les éléments nécessaires à une bonne pratique. Le *Guide du bon usage des examens d'imagerie médicale* répond au principe de justification, le guide des procédures au principe d'optimisation et les niveaux de référence diagnostique permettent à chacun de situer sa pratique par rapport à l'ensemble de la profession et de corriger d'éventuels excès de dose pour un examen donné. Cet ensemble cohérent n'est cependant utilisable que s'il s'adapte à l'évolution des matériels et des techniques, c'est pourquoi il devra nécessairement être remanié en permanence, ce que permet sa mise à disposition sur un serveur Internet. Le guide des indications des examens d'imagerie permet en outre l'utilisation rationnelle et optimale des moyens diagnostiques de spécialités différentes substituant la synergie à la redondance et, si la communauté radiologique en perçoit les effets positifs, il devrait puissamment contribuer à replacer le radiologiste dans sa fonction de consultant et le dégager du rôle de prestataire de services où certains ont voulu le cantonner. L'ensemble permettra d'assurer aux patients, parfois déstabilisés par une désinformation permanente sur les rayonnements ionisants, que la pratique des explorations utilisant les rayonnements ionisants est maîtrisée et optimisée pour apporter un bénéfice sans commune mesure avec les risques théoriques de l'exposition aux rayonnements.

Vérifiez si vous avez assimilé les points importants de ce chapitre en répondant au questionnaire en fin d'ouvrage.

Pour en savoir plus

Conseil des Communautés européennes. Directive Euratom 97-43 du 30 juin 1997 relative à la protection sanitaire des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants lors des expositions à des fins médicales.

Code de santé publique. Commenté sur le site de la SFR www.sfrnet.org

Commission européenne. Conseils sur la mise en œuvre de niveaux de référence diagnostiques pour les expositions médicales. Radioprotection 109, 1999.

Les procédures radiologiques : réalisation, critères de qualité et optimisation. www.sfrnet.org. ou www.imagemed.org

Guide du bon usage des examens d'imagerie médicale. <http://gbu.radiologie.fr/>

13 Organisation de la radioprotection

L'historique de la radioprotection a été rappelé en introduction. Ce qui n'était au départ qu'un ensemble de règles destiné à éviter aux professionnels exposés aux rayonnements ionisants (RI) la survenue d'effets déterministes est devenu un système complexe dont la finalité est d'assurer à tout individu une protection optimale, selon son statut par rapport à l'exposition. On a ainsi une réglementation pour les travailleurs exposés, pour le public et pour les patients.

Organismes internationaux

La Commission internationale de protection radiologique (CIPR)

Créée en 1928 au II^e Congrès international de radiologie à Stockholm (Suède), c'est une organisation non gouvernementale, regroupant des experts de plusieurs pays, qui édicte, à partir des données scientifiques disponibles, des recommandations en matière de radioprotection. Ces recommandations sont incitatives et chaque état est libre de les mettre en pratique. Les recommandations dont sont issues les directives européennes (directives Euratom 96/29 et 97/43) ont été publiées en 1990, sous forme d'une publication identifiée par son numéro d'ordre, la CIPR 60. Elle est fondée sur une réévaluation dosimétrique, en 1986, de la cohorte des sujets irradiés à Hiroshima et à Nagasaki, qui a incité la CIPR à proposer un abaissement des limites légales d'exposition pour la population générale et pour les travailleurs. De nouvelles recommandations ont été publiées en 2007 (CIPR 103). Les principales modifications concernant la pratique radiologique portent sur les facteurs de pondération tissulaire, avec, notamment, la diminution importante du facteur de pondération des gonades.

Les sources scientifiques internationales

Les données scientifiques sur lesquelles se fonde la CIPR proviennent de l'UNSCEAR (*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations*), comité des Nations Unies, et du BEIR (*Board on Radiation Effects Research*) agence américaine, qui dépend de la *Commission on Life Sciences du National Research Council*.

Ces deux organismes publient régulièrement des rapports faisant la revue des travaux scientifiques dans tous les domaines de la radioprotection (radiobiologie, épidémiologie et physique).

L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA)

L'Agence internationale de l'énergie atomique (basée à Vienne, en Autriche) a pour but de promouvoir l'utilisation pacifique de l'énergie atomique. Elle établit des règlements dans ce domaine, essentiellement dans celui de la sûreté nucléaire, ce sont les *Basic Safety's Standard* (BSS). Plus récemment, ces BSS ont élargi leur champ d'action en abordant la radiothérapie et la radiologie interventionnelle.

Le Conseil des Communautés européennes

Depuis 1965, la Commission européenne a la possibilité de prendre des décisions sous deux formes : le règlement, dont l'application, obligatoire, est immédiate dans tous les pays de l'Union européenne ; et la directive, plus souple, permettant à chaque pays de choisir les moyens de transposition dans le cadre d'une loi ou de décrets nationaux. Néanmoins, la transposition est obligatoire, dans un délai précisé par chaque directive. Ainsi, les directives européennes relatives à la radioprotection des travailleurs (1996) et des patients (1997) n'ont été transposées en droit français qu'en 2003.

Outre les directives, la Commission européenne émet des recommandations techniques pour l'application des directives.

Réglementation française

Lois, décrets et arrêtés

En France, les règles de la protection des travailleurs d'une part, des patients et du public d'autre part, sont énoncées, respectivement, dans le Code du travail et dans le Code de la santé publique. L'ordonnance 2001-270 du 28 mars 2001, relative à la transposition de directives communautaires dans le domaine de la protection contre les rayonnements ionisants a modifié le Code de la santé publique et celui de travail pour y permettre la transposition des articles des directives européennes 96-29 et 97-43 (fig. 13-1). Ces modifications ont été apportées par plusieurs décrets. Des arrêtés des ministères concernés ont défini et actualisent régulièrement les modalités pratiques de certains points de chacun de ces décrets.

Code du travail

Le décret 2003-296 du 31 mars 2003 transposant la directive Euratom 96-29 est codifié dans le livre IV du Code du travail, au titre V qui s'intitule « Prévention du risque d'exposition aux rayonnements ionisants ». Nous en avons extrait les points concernant la protection des travailleurs applicables dans un service de radiologie.

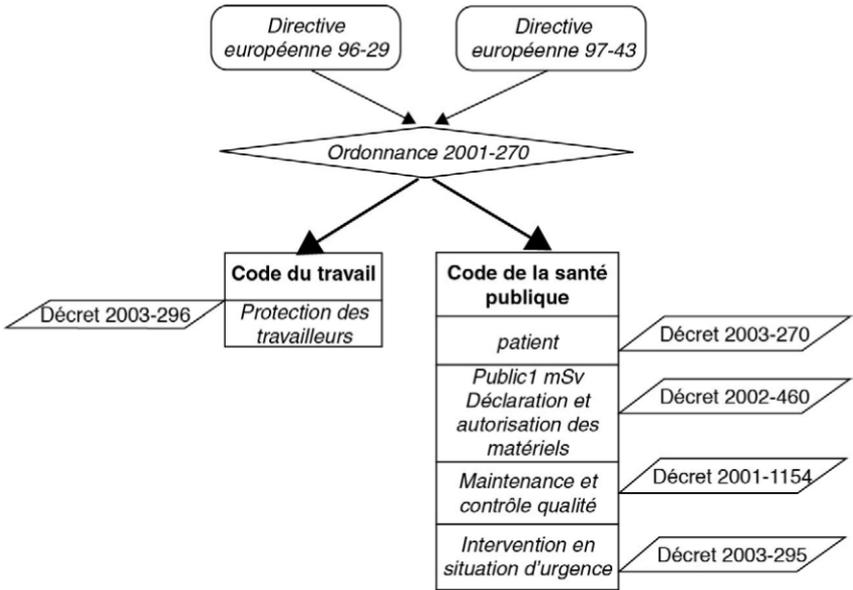


Figure 13-1

Déroulement de la transposition des directives européennes en droit français.

Champ d'application et principes de radioprotection

Article R. 4451-1 : établissements concernés

Établissements nucléaires et établissements détenant des générateurs de rayonnements ou des sources radioactives, c'est-à-dire tous les services de radiologie, médecine nucléaire et pharmacie utilisant des radiopharmaceutiques pour des dosages.

Article R. 4451-7-8-9 : responsabilité des employeurs

L'employeur est responsable de toutes les mesures de radioprotection sur les lieux de travail. Le travailleur non salarié doit mettre en œuvre les mesures de protection vis-à-vis de lui-même ou des personnes pouvant être exposées du fait de son activité. Il prend les dispositions nécessaires afin d'être suivi médicalement.

Article R. 4451-10 : limitation

Les expositions professionnelles individuelles et collectives aux rayonnements ionisants sont maintenues en deçà des limites prescrites, au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre.

Article R. 4451-11 : évaluation des risques

Pour optimiser les expositions et les maintenir au niveau « le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre » (référence à l'article 1333-1 du Code de la santé), le chef d'établissement fait procéder, par la personne

compétente en radioprotection, à une évaluation prévisionnelle des doses collectives et individuelles.

Articles R. 4451-12 à R. 4451-17 : valeurs limites d'exposition

Ils fixent les limites d'exposition à ne pas dépasser annuellement (tableau 13.1).

Il faut noter que le dépassement d'une des limites constitue une infraction dont l'employeur doit répondre.

Aménagement technique des locaux de travail

Articles R. 4451-18 à R. 4451-28 : réglementation des lieux de travail

Concernent la délimitation des zones sur les lieux de travail, la signalisation et le contrôle de ces zones. Lorsque la dose susceptible d'être atteinte en un an dans un espace de travail est supérieure ou égale à 6 mSv, cet espace est classé « zone contrôlée ». Si la dose annuelle est comprise entre 1 et 6 mSv, il s'agit d'une « zone surveillée », en dessous de 1 mSv, il s'agit de zones « public ». L'arrêté du 14 mai 2006 précise la délimitation et la signalisation de ces zones en fonction des débits de dose (*cf.* chapitre 14).

Contrôles techniques et relevés

Articles R. 4451-29 à R. 4451-39 : sources et locaux

Un contrôle de radioprotection des sources est réalisé à la réception puis périodiquement. Les locaux sont également contrôlés par mesure de débit de dose à l'installation du matériel puis par dosimètres d'ambiance. Ces contrôles sont réalisés par la PCR de l'établissement (contrôles internes) et tous les 3 ans par un organisme externe. Les résultats sont consignés dans un « document unique d'évaluation des risques » et tenus à disposition de l'inspecteur du travail.

Un relevé actualisé des sources et appareils émetteurs de RI utilisés doit être transmis annuellement à l'IRSN.

Articles R. 4451-40 à R. 4451-43 : protections collective et individuelle

Les équipements de protection individuelle sont choisis par l'employeur, après consultation de la PCR, du médecin du travail et du CHSCT, ou à défaut, des délégués du personnel.

Tableau 13-1

Limites d'exposition à ne pas dépasser annuellement

Personnes exposées	Dose efficace annuelle	Dose équivalente extrémités	Dose équivalente peau	Dose équivalente cristallin
Travailleurs adultes	20 mSv	500 mSv	500 mSv	150 mSv
Étudiants, apprentis (< 18 ans)	6 mSv	150 mSv	150 mSv	50 mSv
Femmes enceintes	Catégorie B, < 1 mSv reçu par l'enfant à compter de la déclaration de grossesse (<i>cf.</i> chapitre 12).			

Ces limites n'incluent pas évidemment les expositions résultant d'examen médicaux individuels.

Condition d'emploi et de suivi des travailleurs exposés

Articles R. 4451-44 à R. 4451-46 : catégories de travailleurs

Elle est décidée par l'employeur, après avis du médecin du travail. Les travailleurs de catégorie A sont les personnes qui, dans les conditions normales de travail, peuvent être amenées à recevoir, annuellement, une dose égale ou supérieure à $3/10^{\circ}$ d'une des limites d'exposition. Cela correspond donc à une dose de 6 mSv à l'organisme entier ou à une dose équivalente de 150 mSv pour les extrémités ou la peau, de 45 mSv pour le cristallin. Les travailleurs de catégorie B sont ceux qui peuvent avoir une exposition annuelle supérieure à 1 mSv mais inférieure à 6 mSv. Les étudiants ou apprentis de moins de 18 ans et les femmes enceintes sont obligatoirement en catégorie B.

Il faut noter que la catégorisation se fait en fonction de l'exposition potentielle, indépendamment de l'affectation. Un travailleur de catégorie B peut exercer en zone contrôlée si l'exposition à son poste ne peut atteindre les $3/10^{\circ}$ d'une des limites de dose (moins de 6 mSv à l'organisme entier ou de 150 mSv aux extrémités par exemple).

Articles R. 4451-47 à R. 4451-50 : formation

Elle porte sur les risques de l'exposition aux RI, les procédures et les règles de prévention et de protection. Elle est organisée par l'employeur et renouvelée au moins tous les trois ans.

Articles R. 4451-57 à R. 4451-61 : fiche d'exposition

L'employeur établit pour chaque travailleur une fiche d'exposition mentionnant la nature du travail accompli, les sources émettrices, les périodes d'exposition et, éventuellement, les autres risques ou nuisances d'origine physique, chimique, ou biologique. En service de radiologie, il s'agit essentiellement du risque biologique. Une copie est remise au médecin du travail.

Articles R. 4451-62 à R. 4451-66 : surveillance individuelle

Précisent les modalités de surveillance dosimétrique : passive pour les travailleurs de catégorie B, active et passive pour les travailleurs de catégorie A, ou les travailleurs de catégorie B intervenant en zone contrôlée. Les résultats nominatifs sont communiqués au médecin du travail et, sur une période ne dépassant pas 12 mois, à la personne compétente en radioprotection (PCR) de l'établissement.

Le travailleur ou le médecin qu'il désigne peut demander communication des résultats dosimétriques le concernant.

Article R. 4451-63 : information en cas de dépassement

L'organisme chargé de la surveillance dosimétrique informe le médecin du travail et l'employeur ; le médecin du travail informe le salarié.

Articles R. 4451-67 à R. 4451-74 : dosimétrie opérationnelle

Elle est obligatoire dès lors que l'on travaille en zone contrôlée.

Les résultats du suivi dosimétrique et les doses efficaces reçues sont communiqués au travailleur intéressé ainsi qu'au médecin du travail et à

l'employeur. Ils doivent être communiqués aux agents de l'inspection du travail qui en font la demande.

Articles R. 4451-77 à R. 4451-81 : mesures à prendre en cas de dépassement des valeurs limites

L'employeur informe de ce dépassement le CHSCT ou, à défaut, les délégués du personnel ainsi que l'inspecteur du travail. L'employeur en informe également, selon le cas, l'Autorité de sûreté nucléaire.

Surveillance médicale des travailleurs exposés

Articles R. 4451-82 à R. 4451-92 : aptitude et surveillance médicale des travailleurs

Nécessité d'une détermination d'aptitude avant affectation à des travaux exposant aux RI et de visites médicales périodiques. La périodicité de la surveillance médicale a été modifiée par le décret du 30 janvier 2012 relatif à l'organisation de la médecine du travail. Elle reste annuelle pour les travailleurs de catégorie A (article R. 4451-84) mais elle est devenue biennale (tous les deux ans) pour les travailleurs de catégorie B. Elle comprend un examen clinique et, éventuellement, des examens complémentaires qui sont prescrits par le médecin du travail et à la charge de l'employeur. Le médecin du travail est destinataire des résultats de la surveillance dosimétrique.

Le médecin du travail constitue et tient, pour chaque travailleur exposé, un dossier individuel contenant le double de la fiche d'exposition, les dates et les résultats du suivi dosimétrique ainsi que des examens complémentaires. Le dossier individuel du travailleur peut être communiqué, sur sa demande, au médecin inspecteur du travail et au médecin traitant.

Le dossier individuel est conservé pendant au moins cinquante ans après la fin de la période d'exposition. Si l'établissement vient à disparaître ou si le travailleur change d'établissement, l'ensemble du dossier est transmis au médecin inspecteur du travail, à charge pour celui-ci de l'adresser, à la demande du travailleur, au médecin du travail désormais compétent.

Une carte individuelle de suivi médical est remise par le médecin du travail à tout travailleur de catégorie A ou B. Les données contenues dans cette carte sont transmises à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire.

Article R. 4451-92 : carte de suivi médical et suivi dosimétrique

L'arrêté du 17 juillet 2013 en précise le contenu et les modalités de délivrance.

La carte individuelle de suivi médical d'un travailleur exposé contient :

- le nom, le prénom, le sexe, la date et le lieu de naissance ;
- le statut d'emploi et la quotité de travail ;
- le secteur d'activité ;
- le numéro d'enregistrement du travailleur au registre national d'identification des personnes physiques ;
- le classement du travailleur ;

- le nom, le prénom et l'adresse de l'employeur, la désignation de l'établissement, son numéro de Siret et son adresse ;
- le nom, le prénom et l'adresse du médecin du travail en charge du suivi médical du travailleur ;
- la date du dernier examen médical ;
- le nom, le prénom et l'adresse professionnelle de la personne compétente en radioprotection ;
- Le numéro d'enregistrement attribué par le Système d'Information de la Surveillance de l'Exposition aux Rayonnements Ionisants de l'IRSN (SISERI) si celui-ci a déjà été attribué.

La carte individuelle de suivi médical est remise par le médecin du travail à chaque travailleur de catégorie A ou B, lors de l'examen médical préalable à son affectation à des travaux l'exposant à des rayonnements ionisants.

Chaque travailleur exposé peut demander la communication des résultats dosimétriques le concernant. Ils lui seront transmis confidentiellement ainsi qu'à un médecin qu'il aura désigné.

Lorsqu'un résultat individuel de la dosimétrie dépasse l'une des valeurs limites d'exposition, l'organisme de dosimétrie informe immédiatement le médecin du travail concerné et communique cette information à SISERI.

Le médecin du travail informe l'employeur de ce dépassement. Il diligente alors une enquête avec le concours de l'employeur et de la personne compétente en radioprotection. Il informe SISERI et l'organisme de dosimétrie du déclenchement de l'enquête et des conclusions de celle-ci.

Dosimétrie opérationnelle : le suivi individuel par dosimétrie

Il est mis en œuvre par la personne compétente en radioprotection, sous la responsabilité de l'employeur. La PCR exploite les résultats des dosimètres opérationnels des travailleurs et transmet à SISERI, de façon hebdomadaire, tous les résultats individuels de la dosimétrie opérationnelle.

Situations anormales de travail

Articles R. 4451-93 à R. 4451-98

Ces situations correspondent aux anciennes « expositions exceptionnelles concertées », et représentent essentiellement les situations accidentelles. Ces articles définissent la constitution des équipes et des procédures de secours.

Articles R. 4451-99 à R. 4451-102

Déclaration d'événement significatif : l'employeur déclare tout événement significatif ayant entraîné ou étant susceptible d'entraîner le dépassement d'une des valeurs limites.

Organisation de la radioprotection

Articles R. 4451-103 à R. 4451-113 : personne compétente en radioprotection (PCR)

Sa nomination par l'employeur est obligatoire dès qu'il existe un risque d'exposition aux RI. Ses missions sont la délimitation des zones réglementées,

la formation à la sécurité des travailleurs exposés, la constitution des dossiers de déclaration ou de demande d'autorisation, la définition des risques d'exposition et les mesures de protection à mettre en œuvre.

Articles R. 4451-115 à R. 4451-118 : participation du médecin du travail

Il participe à l'établissement et l'actualisation de la fiche d'exposition, à l'information des travailleurs sur les risques d'exposition aux RI et donne un avis sur le choix des équipements de protection.

Articles R. 4451-119 à R. 4451-121 : information du CHSCT

Le CHSCT est informé annuellement du bilan des contrôles d'ambiance et d'éventuels dépassements de valeurs limites. Il a accès aux résultats des contrôles d'ambiance et de dosimétrie non nominatifs.

Articles R. 4451-125 à R. 4451-128 : participation de l'IRSN

L'IRSN gère et exploite les données dosimétriques des travailleurs par l'intermédiaire de SISERI. Les résultats de mesure individuelle sont conservés au moins cinquante ans. Ils sont à la disposition de l'inspection du travail.

Articles R. 4451-129 à R. 4451-130 : contrôle

Tous les documents auxquels a accès l'inspecteur du travail sont tenus à la disposition des inspecteurs de la radioprotection et des agents des services de prévention des organismes de sécurité sociale.

Code de la santé publique

La transposition de la directive Euratom 97-43 a conduit à modifier le régime des autorisations et déclarations des appareils utilisant les RI et instauré l'obligation de maintenance et de contrôle de qualité des matériels ainsi que l'obligation d'équiper les matériels d'imagerie de dispositifs permettant l'estimation de la dose délivrée d'autre part.

Les dispositions ayant trait à la protection des personnes (public et patients) ont été introduites dans un nouveau chapitre « Rayonnements ionisants » (chapitre 3), au titre III « Prévention des risques sanitaires liés au milieu » du livre III, « Protection de la santé et environnement » de la première partie « Protection générale de la santé » du Code de la santé publique.

Dispositifs médicaux utilisant les RI

Autorisation et déclaration

Le régime des autorisations et déclarations figure à la section 3 du chapitre « Rayonnements ionisants » du titre III « Prévention des risques sanitaires liés au milieu et sécurité sanitaire environnementale » du livre III « Protection de la santé et environnement » du CSP.

Les scanners restent soumis à autorisation préalable du ministère de la Santé et toute demande d'installation initiale ou de renouvellement doit faire l'objet d'une demande d'autorisation auprès de l'ASN (article R. 1333-23) ;

les tables d'angiographie, anciennement classées « matériel lourd » avec le scanner, sont désormais soumises au régime de déclaration. Sont détaillées ensuite (art. R1333-23 à 26) les informations à fournir dans la demande d'autorisation et la constitution du dossier justificatif à fournir. Le titulaire de l'autorisation d'un scanner doit être qualifié en radiodiagnostic et imagerie médicale par le Conseil de l'ordre des médecins.

Les autres appareils de radiologie, médicale et dentaire, sont soumis à déclaration auprès de la division territoriale de l'ASN correspondant au lieu d'utilisation. Celle-ci accuse réception et précise les conditions générales sous lesquelles le matériel peut être utilisé. Le déclarant constitue un dossier justificatif, tenu à disposition des autorités compétentes. Cette déclaration doit être renouvelée tous les 5 ans.

Maintenance et contrôle de qualité

Cette exigence de la directive Euratom 97-43 a été la première transposée dans le Code de santé publique, par le décret 2001-1154 du 5 décembre 2001.

Ce décret charge le ministre de la Santé, après avis du directeur de l'Agence française de sécurité sanitaire des produits de santé (AFSSAPS), de publier la liste des dispositifs soumis à l'obligation de maintenance et aux contrôles de qualité. Ces contrôles de qualité sont « internes » quand ils sont réalisés par l'exploitant ou par un prestataire sous sa responsabilité, « externes » quand ils sont réalisés par un organisme indépendant de l'exploitant, du fabricant et de celui qui assure la maintenance. En imagerie médicale tous les matériels radiologiques sont concernés puisque la liste publiée par arrêté du ministre de la Santé mentionne les « dispositifs médicaux nécessaires à la production et à l'interprétation des images de radiodiagnostic ». Tous les éléments de la chaîne du radiodiagnostic (production et émission des rayons X, détection et reproduction) sont concernés par ces contrôles dont la nature et la fréquence ont fait l'objet d'une décision de l'AFSSAPS (décision du 20 novembre 2006 fixant les modalités du contrôle de qualité interne de certaines installations de radiodiagnostic).

Estimation de la dose délivrée lors des examens radiologiques

L'obligation d'équiper les appareils radiologiques de dispositifs permettant d'estimer sinon la dose, du moins la quantité de rayonnement produite lors d'une procédure a également été introduite dans le Code de santé publique (livre V bis) par décret (2004-254 du 15 juin 2004). Nous avons vu l'importance de pouvoir utiliser de tels dispositifs pour pouvoir répondre aux nouvelles obligations réglementaires en matière de niveaux de référence (cf. chapitre 12) et afin de pouvoir mentionner sur le compte-rendu d'examen des éléments permettant d'estimer la dose délivrée par chaque acte.

Prévention des risques sanitaires liés aux rayonnements ionisants

L'article L. 1333-1 introduit explicitement dans le domaine législatif, les principes de radioprotection (justification, optimisation et limitation).

L'article L. 1333-11 définit les conditions d'utilisation des RI en médecine et notamment l'obligation d'une formation, initiale et continue, de tous les acteurs de ces applications médicales : médecins, manipulateurs, physiciens médicaux, chirurgiens dentistes. Cette formation devait être validée par tous les utilisateurs de rayonnements avant mai 2009. Elle doit être renouvelée tous les 10 ans.

L'article L. 1333-17 établit la liste des services habilités à contrôler l'application des mesures de prévention. Pour la radiologie médicale, ce sont principalement les agents de l'ASN, éventuellement les médecins inspecteurs de santé publique et les médecins de l'Inspection générale des affaires sociales.

L'article R. 1333-8 fixe les limites de dose pour le public.

La somme des doses efficaces reçue par toute personne du public (c'est-à-dire non exposée professionnellement ou médicalement) doit être inférieure à 1 mSv par an, pour les expositions résultant des activités nucléaires. Pour le cristallin, la limite est de 15 mSv par an et pour la peau de 50 mSv par an. On peut remarquer que la valeur de l'exposition « corps entier » se situe dans l'intervalle de fluctuation de l'exposition naturelle en France, ce qui donne une idée du niveau de protection atteint en ce domaine, comparé à tous les risques environnementaux. En pratique le respect de cette limite ne pose de problème que pour la durée d'hospitalisation et les conseils à délivrer à un patient ayant bénéficié d'une curiethérapie métabolique, afin qu'aucun membre de son entourage (public) ne puisse recevoir cette dose du fait de la proximité de ce patient.

Personnes exposées pour raisons médicales ou médico-légales

C'est la principale nouveauté introduite dans la législation nationale par la transposition de la directive Euratom 97-43. Les principes directeurs sont la justification et l'optimisation mais non la limitation, à laquelle est substitué le principe de niveaux de référence. En effet, il n'est pas envisageable d'introduire de limitation dans l'usage médical des rayonnements ionisants, car certaines situations diagnostiques ou thérapeutiques nécessitent des expositions importantes qui ne peuvent se voir fixer de limites. La nécessité de respecter un ordre de grandeur de dose lors des explorations les plus courantes a cependant conduit à la notion de niveaux de référence (cf. chapitre 12). En revanche, lorsqu'il s'agit d'une exposition sans bénéfice direct pour le sujet exposé (expertise médico-légale ou participation volontaire à une recherche médicale), le médecin réalisant l'acte doit déterminer au préalable une dose maximale de rayonnement, qui doit figurer dans le document d'information (art. R 1333-65). La transposition de la directive 97-43 s'est traduite par l'introduction des principes de justification (art. R 1333-56 à 58) et d'optimisation (art. 1333-59 à 66) dans le CSP.

Article R. 1333-56

Il énonce la mise en balance du risque éventuel d'une exposition avec le bénéfice attendu et prescrit de s'assurer « qu'aucune autre technique d'efficacité comparable comportant de moindres risques [...] n'est disponible ». Cette rédaction un peu hâtive ne tient pas compte du fait que le risque

des faibles doses à faible débit de dose n'est toujours pas scientifiquement démontré, de la disponibilité insuffisante des techniques de substitution et du coût pour la société de telles substitutions. L'application stricte de la loi pourrait ainsi, par exemple, conduire à utiliser l'IRM pour un diagnostic de fracture d'avant-bras (efficacité comparable à la radiographie standard), ce qui serait absurde. La justification n'est pas du seul ressort de l'utilisateur de RI mais repose sur « les recommandations de pratique clinique de l'ANAES ou sur l'avis concordant d'experts », l'ensemble nécessitant la publication d'un guide des indications des examens d'imagerie destiné aux correspondants (art. R 1333-70), réalisé par les professionnels en collaboration avec la Haute autorité de santé (*cf.* chapitre 12).

Article R. 1333-57

L'analyse de l'indication (justification) doit précéder chaque réalisation d'acte. En cas de désaccord entre le demandeur et le réalisateur, la décision appartient à ce dernier.

Article R. 1333-58

Interdiction de l'usage de la radioscopie sans amplificateur (intensificateur) de luminance.

Article R. 1333-59

Énonce la nécessité de maintenir la dose au niveau le plus bas raisonnablement possible, ainsi que l'obligation de maintenance et d'assurance de qualité.

Article R. 1333-60

Énonce la nécessité de faire appel à une personne spécialisée en radiophysique médicale. (PSRPM). L'arrêté du 6 décembre 2011 relatif à la formation et aux missions de la personne spécialisée en radiophysique médicale précise ses missions. La PSRPM :

- s'assure que les équipements, les données et procédés de calcul utilisés pour déterminer et délivrer les doses et activités administrées au patient dans toute procédure d'exposition aux rayonnements ionisants sont appropriés et correctement utilisés. Elle contribue à la mise en œuvre de l'assurance de qualité, y compris le contrôle de qualité des dispositifs médicaux ;
- contribue à l'identification et à la gestion des risques liés à toute procédure d'exposition aux rayonnements ionisants ;
- contribue au développement, au choix et à l'utilisation des techniques et équipements utilisés dans les expositions médicales aux rayonnements ionisants ;
- contribue à l'élaboration des conseils donnés en vue de limiter l'exposition des patients, de leur entourage, du public et les éventuelles atteintes à l'environnement. À ce titre, elle apporte les informations utiles pour estimer la dose délivrée à son entourage et au public par un patient à qui ont été administrés des radionucléides en sources non scellées ou scellées ;
- participe à l'enseignement et à la formation du personnel médical et paramédical dans le domaine de la radiophysique médicale.

Article R. 1333-61

Coresponsabilité du médecin demandeur et du médecin réalisateur dans la recherche préalable de grossesse chez toute femme en âge de procréer. En cas de grossesse, une attention particulière doit être portée à la vérification de l'indication et à l'optimisation.

Article R. 1333-65

Il souligne l'attention particulière qui doit être apportée à la justification et à l'optimisation de procédures réalisées dans un cadre médico-légal ou de recherche, avec la nécessité d'une information explicite et de la fixation préalable d'un niveau de dose à respecter pour cette exploration (contrainte de dose).

Article R. 1333-66

C'est l'article le plus important pour la pratique radiologique quotidienne. Il énonce en effet que : « Aucun acte exposant aux rayonnements ionisants ne peut être pratiqué sans un échange préalable d'information écrit entre le demandeur et le réalisateur de l'acte. Le demandeur fournit au réalisateur les informations nécessaires à la justification de l'exposition demandée dont il dispose. Il précise notamment le motif, la finalité, les circonstances particulières de l'exposition envisagée, notamment l'éventuel état de grossesse, les examens ou actes antérieurement réalisés... » Il est donc illégal de réaliser un acte utilisant les RI sans disposer de renseignements cliniques complets. Cette information devra être diffusée largement auprès de nos correspondants. Elle devrait puissamment contribuer à replacer le radiologue dans un rôle de consultant qu'il a parfois abdiqué. D'autre part, cet article impose au réalisateur d'un acte de fournir, sur son compte-rendu, des éléments permettant de déterminer la dose délivrée : « Le médecin réalisateur de l'acte indique sur un compte-rendu les informations au vu desquelles il a estimé l'acte justifié, les procédures et les opérations réalisées ainsi que toute information utile à l'estimation de la dose reçue par le patient. Un arrêté du ministre chargé de la santé précise la nature de ces informations ». Cette deuxième phrase associe deux autres points fondamentaux pour la pratique. Le premier est l'obligation de mentionner sur le compte-rendu l'indication de l'examen, qui devra être compatible avec les indications d'examens d'imagerie définies selon les modalités de l'article R. 1333-56 (recommandations de pratique clinique, avis d'expert, guide des indications d'examens). C'est, en pratique, la vérification de la justification de l'examen, Le guide du bon usage des examens d'imagerie réalise le référentiel nécessaire à cette justification. Le second est l'obligation d'indiquer sur le compte-rendu les éléments nécessaires à la détermination de la dose (PDS en radiologie conventionnelle, PDL en scanner). Cette obligation est cohérente avec l'obligation de confronter sa pratique avec les niveaux de référence diagnostiques (*cf.* chapitres précédents).

Article R. 1333-67

Impose une qualification pour les médecins et chirurgiens dentistes employant les RI et rappelle que les manipulateurs ne peuvent exercer que

sous la responsabilité et la surveillance directes d'un médecin possédant cette qualification. La qualification de radioprotection des patients doit être obligatoirement détenue par tout utilisateur de RI à des fins médicales (médecin, manipulateur, physicien médical). Ce n'est pas la qualification de personne compétente en radioprotection, qui ne concerne que la radioprotection des travailleurs et ne dispense donc pas de la qualification de radioprotection des patients. Le programme de la formation nécessaire à l'obtention de cette qualification figure dans l'arrêté du 18 mai 2004. Cette qualification est initialement obtenue avec le diplôme d'études spéciales de radiologie et imagerie médicale, radiothérapie et médecine nucléaire ou le diplôme d'état de manipulateur ou de personne spécialisée en radiophysique médicale. Il est valable 10 ans. Des formations diplômantes sont organisées par différentes structures hospitalières ou de FMC. La formation peut également être individuelle et sanctionnée par un examen de contrôle organisé chaque année par la SFR au moment des Journées françaises de radiologie.

Article R. 1333-68

Instaure les niveaux de référence diagnostiques et ajoute (incorrectement puisque ce ne sont pas des limites) que le médecin qui réalise un acte prend les mesures nécessaires pour ne pas dépasser le niveau de référence. Cette formulation incorrecte a été corrigée dans l'arrêté d'application (*cf.* chapitre 12).

Article R. 1333-69

Nécessité d'établir, pour chaque équipement et chaque acte courant, des protocoles écrits se référant aux guides de procédures nationaux. Ces protocoles doivent être disponibles, en permanence, auprès de l'équipement concerné. Il peut s'agir d'un point d'accès Internet, permettant l'accès direct au guide national des procédures radiologiques du site Internet de la SFR.

Articles R. 1333-70 à R. 1333-72

Ils concernent les guides d'indication et de réalisation des examens d'imagerie. *L'article R. 1333-70* impose l'établissement et la diffusion d'un guide de prescription des examens d'imagerie, base de la justification des examens énoncée à *l'article R. 1333-56*. Cet article contient lui aussi un contresens car il demande que le guide contienne les niveaux de référence diagnostiques, au lieu des « niveaux d'irradiation » mentionnés dans la directive européenne. Destinée à des cliniciens, il ne peut contenir que des indications sur l'ordre de grandeur des expositions (*cf.* chapitre 12). En effet, la notion et les valeurs de NRD n'ont pas grand sens pour les correspondants.

L'article R. 1333-71 impose l'établissement et la diffusion d'un guide des procédures de réalisation. Ce guide, rédigé par les sociétés savantes concernées, doit contenir les niveaux de référence diagnostiques, puisque ce sont les professionnels qui s'y réfèrent pour situer leur pratique.

Enfin, *l'article R. 1333-72* précise que chacun de ces guides doit faire spécialement mention des actes concernant les enfants et les femmes enceintes (ou allaitant, pour la médecine nucléaire), ainsi que les examens de dépistage.

Article R. 1333-73

Il aborde le point spécifique des audits cliniques, contrôle par des pairs, qui devront être définis par la Haute autorité de santé et seront probablement mis en place dans le cadre des procédures d'accréditation des établissements.

Article R. 1333-74

Il définit l'agrément des organismes de formation à la radioprotection, qui doit être délivré par les sociétés savantes correspondantes, seules à même de garantir la capacité de l'organisme à délivrer cette formation.

Organismes officiels et organismes de contrôle et d'accréditation

Dans le domaine de l'utilisation des rayonnements ionisants, l'état doit disposer d'organismes d'expertise et d'organismes de contrôle, nécessairement séparés afin d'éviter qu'un organisme unique soit juge et partie ce qui pourrait conduire à remettre en cause son impartialité.

Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN)

Cet organisme d'expertise national a été créé par la loi du 9 mai 2001 (2001-398) sur l'Agence française de sécurité sanitaire environnementale. Cette loi fusionnait l'institut de protection et sûreté nucléaire (IPSN) et l'Office de protection contre les rayonnements ionisants (OPRI) en un Établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC), placé sous la tutelle conjointe des ministres chargés de la Défense, de l'Environnement, de l'Industrie, de la Santé et de la Recherche. Les missions de l'IRSN, fixées par décret du 22 février 2002 (2002-254), sont de réaliser des expertises sur les risques nucléaires et radiologiques, de réaliser des recherches sur ces risques, de contribuer à la formation en radioprotection des professionnels de santé et des personnes professionnellement exposées et d'assurer la surveillance en radioprotection pour l'environnement, les travailleurs et les sources radioactives. Enfin, l'Institut assure également une mission d'information du public et participe à de nombreuses actions internationales de recherche et d'expertise. Pour ce qui concerne l'imagerie médicale, l'IRSN est chargé notamment de l'élaboration et du recueil des niveaux de référence diagnostiques. C'est lui qui enregistre les résultats de la surveillance de l'exposition des travailleurs (dosimétrie) et qui assure l'exploitation et la conservation de ces résultats.

Autorité de sûreté nucléaire et de la radioprotection (ASN)

C'est l'organisme de contrôle national créé par la loi 2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire (codifiée aux livres I^{er} et V du Code de l'environnement). L'ASN dépend du ministère de l'Économie et des Finances. Les activités contrôlées par l'ASN sont toutes celles qui comportent un risque d'exposition des personnes aux rayonnements ionisants, émanant soit d'une source artificielle, soit d'une source

naturelle. Outre les installations nucléaires civiles, l'ASN contrôle les installations médicales, et les installations industrielles et de recherche utilisant des rayonnements ionisants. Elle élabore la réglementation et contrôle son application. Ce sont donc des inspecteurs de cet organisme qui contrôlent les services d'imagerie pour vérifier l'application des mesures entrées en application depuis mars 2003 pour la radioprotection des patients et des travailleurs.

L'ASN doit être informée de tout incident ou accident ayant entraîné une exposition d'un travailleur au-delà des limites, mais également, depuis 2009 (loi 2009-879 du 21 juillet 2009), des incidents ou accidents survenus à des patients (accidents de radiothérapie, mais aussi accidents cutanés de radiologie interventionnelle).

Direction des relations du travail

Elle a, au sein du ministère du Travail, l'attribution de l'élaboration de la réglementation des travailleurs. À ce titre, c'est elle qui a été chargée de la transposition de la directive Euratom 96-29 par le décret 2003-296, ainsi que de la rédaction des arrêtés précisant les différents points de ce décret, notamment l'arrêté définissant le programme et les modalités d'obtention et de renouvellement de la qualification de Personne compétente en radioprotection. Le contrôle de l'application de la réglementation concernant la radioprotection des travailleurs peut également être effectué par les agents de l'inspection du travail. L'organisation et les mesures pratiques de la radioprotection des travailleurs dans un service de radiodiagnostic seront détaillées dans le chapitre suivant.

Conclusion

L'intégration en droit national des recommandations des directives européennes a nécessité un profond remaniement législatif et réglementaire. La mise en application de ces nouvelles règles et obligations modifie considérablement les pratiques et, au prix d'un apprentissage nécessaire et de quelques contraintes supplémentaires, améliore le service rendu à nos patients en leur assurant un bénéfice maximal des explorations radiologiques avec une meilleure maîtrise de l'exposition.

Vérifiez si vous avez assimilé les points importants de ce chapitre en répondant au questionnaire en fin d'ouvrage.

Pour en savoir plus

L'intégralité des textes législatifs concernant la radioprotection en milieu médical, avec les commentaires explicatifs et les fichiers d'aide à la mise en œuvre est accessible en ligne sur le site de l'ASN (www.asn.fr) ou celui de la SFR (www.sfrnet.org) en suivant le lien « Guide des procédures radiologiques » puis « législation en radioprotection ».

14 Organisation de la radioprotection dans un service d'imagerie médicale

Si l'essentiel des préoccupations du médecin utilisateur de rayonnements ionisants (RI) en matière de radioprotection concerne ses patients, il est également impliqué dans la radioprotection des travailleurs, en tant que chef de service ou responsable de cabinet de radiologie, dont il peut être la personne compétente en radioprotection, ou, plus simplement, en tant que personnel exposé, assujéti aux règles de radioprotection et à une surveillance, dosimétrique et médicale. Les mesures de radioprotection d'un service de radiodiagnostic concernent les locaux, les personnels et les matériels. Le responsable en est le chef d'établissement et le coordonnateur la personne compétente en radioprotection (PCR). La réglementation de la radioprotection des travailleurs est détaillée dans le Code du travail. La réglementation de la radioprotection concernant les matériels est intégrée dans le Code de santé publique (CSP). Nous avons détaillé les articles correspondants de ces codes au chapitre précédent, nous allons en voir les modalités pratiques.

Installations et locaux, délimitation et signalisation

Il faut noter tout d'abord que le milieu médical avait conservé, pour ses salles de radiologie, une classification de zones contrôlées, autrefois justifiée par les matériels et les méthodes de travail mais aujourd'hui complètement inadéquate pour la plupart des activités de radiologie médicale. Le maintien de cette classification obsolète imposerait réglementairement la mise en place d'une dosimétrie active ou électronique, dite opérationnelle, qui induirait des coûts très importants (de quelques milliers d'euros pour les petites structures, à plusieurs centaines de milliers d'euros pour les hôpitaux), alors que, selon les rapports annuels de l'IRSN, centralisant la surveillance dosimétrique nationale, plus de 95 % des niveaux d'exposition en milieu médical, qui représente une large majorité des personnels exposés professionnellement, sont insignifiants, inférieurs à 1 mSv par an. Ce coûteux investissement ne se traduirait donc, pour l'immense majorité des personnels exposés, par aucun bénéfice en matière de prévention du risque. L'employeur doit faire délimiter les espaces de travail en fonction des débits de dose autour de la table. Cette délimitation doit donc s'appuyer sur une

étude de poste, réalisée par la PCR. Malheureusement, l'arrêté du 15 mai 2006 (relatif aux conditions de délimitation et de signalisation des zones surveillées et contrôlées et des zones spécialement réglementées ou interdites compte tenu de l'exposition aux rayonnements ionisants) en ne faisant pas la distinction entre la radiologie médicale et les activités nucléaires et industrielles, ne simplifie pas la mise en application de la réglementation.

Situations et niveaux d'exposition d'un service de radiologie

Rappelons au préalable que l'énergie moyenne des photons du rayonnement direct employé en diagnostic varie entre # 20 keV (mammographie) et # 80 keV (scanographie) et que les opérateurs ne sont qu'exceptionnellement exposés directement à ce type de rayonnement (radiologie interventionnelle). La seule source d'exposition à considérer est donc le rayonnement diffusé, d'énergie moyenne encore plus faible, pour laquelle la protection des tabliers plombés est très efficace, divisant l'exposition par un facteur 70 pour un tablier de 0,35 mm d'équivalent plomb, ce qui revient à dire que moins de 1,5 % du rayonnement est transmis à l'organisme sous-jacent. Cependant, l'arrêté du 15 mai 2006 ne tient plus compte des « conditions normales de travail » et prescrit de réaliser la délimitation en fonction des doses potentiellement reçues sans équipements de protection individuelle.

Radiologie conventionnelle

La principale activité, en nombre d'actes, reste le cliché thoracique, suivi de la radiographie du rachis, de l'abdomen sans préparation et des membres. Tous ces examens sont réalisés le plus souvent sans utilisation de scopie, le manipulateur se tenant au pupitre, donc en deçà de la vitre de protection plombée au moment de la prise du cliché. L'exposition résultante est minimale ; les débits de dose mesurés au pupitre en cours d'émission des rayons X sont de l'ordre de quelques dizaines de micrograys par heure, soit environ 1 μ Gy par minute et le temps d'émission cumulé journalier de ce type de salle est inférieur à 2 minutes.

En salles télécommandées sont réalisés des examens plus complexes, nécessitant un temps de scopie, pour lequel l'opérateur peut être au-delà de la vitre de protection. L'examen qui reste le plus pratiqué est l'urographie intraveineuse pour laquelle l'opérateur est toujours au pupitre. Il en va de même pour les transits digestifs où la suspension barytée est ingérée par le malade (transit œsogastroduodénal, transit du grêle). La cystographie rétrograde ou l'hystérogographie peuvent nécessiter la présence de l'opérateur pendant une courte période auprès du malade (moins d'une minute de scopie). Le lavement opaque n'a plus d'indication chez l'adulte, mais reste pratiqué chez l'enfant pour traiter l'invagination intestinale ; il nécessite un temps de scopie en étant à moyenne distance de l'enfant pour pouvoir contrôler la pression de remplissage et d'insufflation. Dans des conditions normales de travail (faisceau collimaté, distance minimale de 1 m du centre du champ,

port du tablier plombé, impulsions de scopie et non scopie continue), pour un temps total de scopie de l'ordre de 2 minutes, l'exposition résultante reste très faible, inférieure à $1 \mu\text{Gy}$ sous le tablier et inférieure à $20 \mu\text{Gy}$ à la peau non protégée (extrémités et tête). Il faut noter que le scanner et les endoscopies digestives ont fait considérablement diminuer les indications de ces examens, autrefois courants, et qui ne sont plus que rarement pratiqués (la fréquence est inférieure à 1 par semaine dans un service de radiologie générale). Même si tous les examens sont réalisés par le même opérateur, les doses annuelles « extrémités » et « corps entier » resteront très en deçà des $3/10^{\text{e}}$ des limites annuelles correspondantes (respectivement 15 mSv et 6 mSv).

Cependant l'étude de poste appliquant les instructions de l'arrêté du 15 mai 2006 ne peut plus tenir compte de cette exposition réelle de l'opérateur et doit délimiter des zones en fonction du débit horaire (en intégrant les expositions résultant des examens réalisés habituellement en une heure d'activité de la salle). La délimitation des zones en fonction des débits de doses rapportés à l'heure est indiquée dans le [tableau 14-1](#).

Notons que la durée cumulée d'émission des rayons X est en fait très généralement inférieure à une heure par jour, plus souvent de l'ordre de quelques minutes. Néanmoins, l'application du texte conduit à délimiter autour de la table une zone contrôlée (verte), intermittente (puisque l'émission de rayonnement n'est pas continue), voire, au plus près de la table une zone spécialement contrôlée (jaune !). Le médecin travaillant dans ces zones doit théoriquement porter un dosimètre électronique en sus du dosimètre passif. En revanche, la zone située derrière le pupitre, où le débit de dose, rapporté à l'heure, reste constamment inférieur à $7,5$ micrograys/heure reste une zone surveillée, où le port de dosimètre électronique n'est pas obligatoire.

Scanner

La plupart des acquisitions sont réalisées alors que le personnel est derrière la vitre plombée de la salle de contrôle. Seules certaines séries avec injection nécessitent parfois la présence d'un opérateur auprès du patient, pour contrôler le bon déroulement de l'injection par l'injecteur automatique. Il faut savoir qu'en raison du délai nécessaire pour qu'un produit injecté par voie intraveineuse atteigne le système artériel, l'injection est le plus souvent terminée lorsque les rayons X commencent à être émis. L'opérateur a donc

Tableau 14-1

Délimitation des zones en radiologie médicale, en fonction des débits de doses mesurés lors des contrôles d'ambiance

Zone	Dose potentielle organisme entier en 1 h	Dose potentielle extrémités en 1 h
Surveillée bleue	$< 7,5 \mu\text{Gy}$	$< 0,2 \text{ mGy}$
Contrôlée verte	$[7,5 - 25 \mu\text{Gy}]$	$[0,2 - 0,65 \text{ mGy}]$
Contrôlée jaune	$[25 \mu\text{Gy} - 2 \text{ mGy}]$	$[0,65 - 50 \text{ mGy}]$

pu regagner la salle de contrôle protégée. Les études de poste calculant la dose théorique maximale reçue par un opérateur affecté en permanence au scanner montrent qu'il est pratiquement impossible d'atteindre les niveaux d'exposition nécessitant le classement en zone contrôlée de la salle du scanner, sauf pour certaines installations dédiées à la radiologie interventionnelle scanoguidée (scanographie interventionnelle).

Cependant, la même « logique » réglementaire devra faire délimiter les zones au voisinage du scanner en fonction du débit horaire.

Radiographies hors service de radiologie

Ce sont essentiellement les radiographies au lit du malade, lorsque celui-ci est intransportable et les explorations radiographiques au bloc opératoire.

Radiographie au lit du patient

Pour chaque cliché, la dose dans l'air, mesurée à 2 m de l'axe du faisceau (télécommande de déclenchement ayant une longueur de 3 m) est inférieure à 0,1 μGy par cliché, c'est-à-dire nulle pour un opérateur revêtu du tablier plombé obligatoire.

Radioscopie et radiographie au bloc opératoire

Dans cette pratique, l'utilisation d'amplificateurs de brillance sur arceau se généralise ; un appareil moderne délivre, à 60 cm du centre de l'amplificateur, 1 mGy par heure de scopie (soit environ 15 μGy par minute). L'application de l'arrêté du 15 mai 2006 doit faire classer la zone dans un rayon de 1 m autour de l'axe du faisceau en zone contrôlée verte, même si aucun opérateur respectant les règles de radioprotection et portant un tablier plombé ne peut recevoir annuellement 3/10^e d'une des limites de dose. Le port de dosimètres opérationnels est donc devenu obligatoire pour cette activité, même si les opérateurs restent classés en catégorie B.

Radiologie interventionnelle et angiographie

Cette salle sera, du fait de la présence d'un opérateur à proximité du malade pendant l'émission de rayonnement, une zone contrôlée jaune ou verte autour de la table et zone surveillée derrière le pupitre. L'opérateur, quelle que soit sa catégorie, devra porter un dosimètre opérationnel en plus du dosimètre passif.

Gestion des personnels exposés en radiodiagnostic

Elle comporte une surveillance dosimétrique, en fonction de l'affectation des personnels, et une surveillance médicale.

Classement des personnels exposés

Dès lors qu'un personnel est susceptible de recevoir, dans les conditions normales de travail, une dose supérieure ou égale aux trois dixièmes d'une

des limites de dose annuelle, il est classé en catégorie A. Les personnels ne pouvant atteindre cette fraction des limites de dose mais dont l'exposition pourrait dépasser celle admise pour le public (1 mSv au corps entier, 50 mSv pour les extrémités, 15 mSv pour le cristallin) sont classés catégorie B. Dans un service de radiodiagnostic, seuls les personnels pratiquant régulièrement la radiologie interventionnelle relèvent donc de la catégorie A. En effet, l'une des limites de dose peut être atteinte, non pas la limite corps entier, qui reste, pour la totalité des opérateurs utilisant correctement leur dosimètre (sous le tablier et non sur celui-ci), toujours inférieure à 6 mSv par an, mais la limite peau et extrémités, notamment en raison de l'exposition souvent inévitable de la main au rayonnement primaire au cours de certaines interventions.

Le classement, ou le reclassement est décidé par le chef d'établissement, sur avis de la PCR, qui réalise les études de poste justifiant cette décision, en informant le médecin du travail de l'établissement. La décision de reclassement s'appuiera utilement, en plus des études de poste, sur la revue de la dosimétrie des années passées, qui montrera sur une période suffisante (5 dernières années) que le niveau d'exposition « corps entier » des personnels se situe bien en dessous du seuil de 6 mSv. Un relevé anonyme est utile pour l'information du personnel. Cette information est en effet une étape capitale pour l'acceptation de la mesure. Elle doit rappeler les considérations générales sur les risques des faibles doses, démontrer l'absence de justification réglementaire du classement en catégorie A, en s'appuyant sur les relevés dosimétriques des années passées et souligner que le passage en catégorie B maintient la surveillance dosimétrique et ne comporte aucun inconvénient statutaire, salarial (pas de prime attachée à la catégorie A) ou de retraite. Cette information s'intègre d'ailleurs dans la formation périodique obligatoire que doit organiser, au moins une fois tous les trois ans, le chef d'établissement pour tous les personnels exposés (articles R. 4451-47 à R. 4451-50 du Code du travail).

Il faut noter que les femmes enceintes et les étudiants et apprentis de moins de 18 ans ne peuvent être en catégorie A. Ils seront classés en catégorie B.

Pour chaque travailleur exposé doit être remplie, sous la responsabilité de l'employeur, une fiche d'exposition mentionnant la nature du travail effectué, des rayonnements utilisés et les périodes d'exposition et d'éventuels autres facteurs environnementaux.

Surveillance dosimétrique des personnels exposés

Dispositifs de mesure utilisés

Ils diffèrent par le matériel employé, selon la catégorie du personnel mais également de l'endroit où il travaille, régulièrement ou occasionnellement.

Dosimétrie passive

On appelle ainsi toute technique de mesure de dose réalisée à l'aide d'un dispositif à lecture différée : dosifilm, dosimètre thermoluminescent, dosimètre à lecture optiquement stimulée (OSL) ou dosimètre radiophotoluminescent (DPL).

En cas d'emploi du film dosimètre (dosifilm), la fréquence de lecture sera de préférence trimestrielle. En effet, compte tenu des faibles doses enregistrées, un développement trimestriel permettra une mesure plus fiable car le seuil d'enregistrement des films dosimètres est de 0,2 mSv, aussi une exposition mensuelle de 0,1 mSv ne sera pas comptabilisée en enregistrement mensuel, alors que la somme trimestrielle de 0,3 mSv le sera.

Dosimétrie active, ou opérationnelle

Cette technique utilise un dosimètre électronique, qui affiche la dose en temps réel. En radiodiagnostic, il doit être adapté aux rayons X de faible énergie (seuil de détection de 20 keV). Cette technique nécessite, outre les dosimètres individuels, une ou plusieurs bornes de lecture et un poste informatique de centralisation, archivage et transmission des données. Le recueil des données se fait en temps réel, lorsque le personnel porteur passe devant une borne de lecture, et la transmission des données est mensuelle.

Attribution des dosimètres dans le service

Les personnels de catégorie A doivent cumuler les deux types de dosimétrie, dosimétrie passive à lecture mensuelle et dosimétrie électronique. Signalons que pour les personnels pratiquant régulièrement la radiologie interventionnelle, ce classement résulte de l'exposition potentielle des extrémités or celle-ci ne sera justement pas surveillée en temps réel, puisque les systèmes actuels de dosimètres électroniques ne permettent pas la détection aux extrémités. Cette exposition des extrémités sera surveillée par dosimétrie passive, dosifilm poignet ou, mieux, bague radiothermoluminescente. On retrouvera le même problème pour les biopsies réalisées au scanner avec le mode scopie que permettent aujourd'hui les systèmes multicoups. L'opérateur est suffisamment protégé du rayonnement diffusé par le tablier plombé, mais pourrait recevoir, en cas de pratique intensive, des doses pouvant approcher les $3/10^6$ des limites annuelles à la main la plus exposée.

Les personnels de catégorie B peuvent être surveillés par dosimètre passif s'ils n'interviennent qu'en zone surveillée mais s'ils travaillent occasionnellement en zone contrôlée, ils doivent alors porter en plus un dosimètre électronique (article R. 4451-67 du Code du travail). Il faut bien noter cette dissociation entre le classement des personnels, la surveillance dosimétrique et le zonage. Rien n'empêche un personnel de catégorie B de travailler occasionnellement en zone contrôlée (par exemple pour une procédure interventionnelle), tant que son exposition annuelle reste en deçà des fractions de limites utilisées pour le classement.

Si une femme enceinte reste affectée à un emploi en zone surveillée, le port d'un dosimètre électronique indiquant la dose en temps réel est particulièrement conseillé.

Lecture des dosimètres et enregistrement des données

Les dosimètres passifs sont adressés mensuellement ou trimestriellement à l'IRSN ou à un laboratoire agréé. Après détermination de la dose reçue par

chaque travailleur, le relevé nominatif pour tous les travailleurs exposés de l'établissement est adressé au médecin du travail de cet établissement. La PCR peut prendre connaissance des doses individuelles, pour une période ne dépassant pas un an.

Les résultats de la dosimétrie en temps réel sont comptabilisés dans le service (tout passage devant la borne électronique du personnel met à jour la dose cumulée). Les résultats sont adressés mensuellement au laboratoire dont dépend le service et confrontés au résultat de la dosimétrie passive, afin de vérifier la concordance des mesures. En cas d'écart important, ou de dépassement de limite, une enquête est menée systématiquement pour retrouver les circonstances de l'exposition et déterminer la dose réellement reçue par le porteur du ou des dosimètres. En cas de discordance, la règle est de retenir la valeur estimée par le dosimètre passif.

Enfin, quel que soit le laboratoire agréé qui procède au décompte des doses pour chaque travailleur, l'ensemble des données dosimétriques est collecté, au plan national, par l'IRSN dans une base de données informatique, le système informatique de surveillance de l'exposition aux rayonnements ionisants (SISERI). Ce système garantit une traçabilité des doses reçues par chaque travailleur, même s'il change de service, d'emploi, voire de pays, puisqu'une extension est prévue à l'espace européen.. Les informations dosimétriques de chaque travailleur doivent être conservées 50 ans après sa cessation d'activité.

Surveillance médicale

Elle est annuelle pour les travailleurs de catégorie A (article R. 4451-84 du Code du travail), mais elle est devenue biennale (tous les deux ans) pour les travailleurs de catégorie B depuis 2012.

Visite initiale d'aptitude

Elle a pour but de déterminer l'aptitude, en recherchant les contre-indications éventuelles à l'exposition chronique aux rayonnements. S'agissant d'exposition externe, ce seront essentiellement des affections hématologiques et des opacités cristalliniennes. Outre les antécédents familiaux et personnels, l'interrogatoire recherche d'éventuelles affections ou prise de médicaments pouvant avoir un effet sur la lignée sanguine. Une numération formule sanguine, avec numération des plaquettes, sera pratiquée à titre d'examen de référence ainsi qu'un examen du cristallin à la lampe à fente. Lors de cette première visite, le travailleur est informé des risques de l'exposition aux RI, avec une mention particulière, pour les personnels féminins, des risques en cas de grossesse et de la nécessité de déclarer celle-ci dès qu'elle est connue afin de prendre les mesures nécessaires à une protection optimale de l'enfant (cf. chapitre 7). À l'issue de cette visite, le médecin du travail établit une carte individuelle de suivi médical dont un volet est adressé à l'organisme qui centralise la surveillance dosimétrique (IRSN). La carte est remise à l'intéressé qui la présente à chaque visite médicale systématique pour validation. Elle est valable 3 ans.

Visites périodiques

Chaque travailleur exposé de catégorie A doit bénéficier d'une visite annuelle d'aptitude. Les examens complémentaires ne sont pas obligatoires au cours de cette visite. Ils seront demandés par le médecin du travail en cas d'anomalie clinique ou de pathologie intercurrente. Cette visite est consignée sur la carte individuelle de suivi médical. Les travailleurs de catégorie B bénéficient de cette visite tous les deux ans.

Dossier individuel

Constitué et tenu par le médecin du travail pour chaque travailleur exposé, il comporte :

- le double de la fiche d'exposition rédigée par l'employeur, mentionnant la nature des RI auxquels est exposé le travailleur, ainsi que les autres facteurs environnementaux du poste de travail le cas échéant ;
- les dates et résultats de la dosimétrie individuelle ;
- les dates et résultats des examens complémentaires pratiqués.

Ce dossier peut être demandé par le médecin inspecteur régional du travail et il peut être communiqué au médecin traitant du patient si celui-ci le demande. Il doit être conservé 50 ans après la fin de la période d'exposition.

Carte individuelle de suivi médical

Établie et remise par le médecin du travail à tout travailleur de catégorie A ou B. Les données contenues dans cette carte sont transmises à l'IRSN.

Prévention des risques et information : document unique d'évaluation des risques.

En application de l'article 4121-1 du Code du travail, l'employeur indique dans un document unique les résultats de l'évaluation des risques pour la santé et la sécurité des travailleurs. Dans un service de radiologie médicale, outre les risques liés à l'utilisation des RI, il faut également mentionner les risques biologiques. Ce document est tenu à la disposition des travailleurs qui doivent en être informés par affichage, et de tous les agents habilités à inspecter et contrôler le service au titre de la protection des travailleurs. Ce document doit être mis à jour au moins annuellement, et lors de toute modification du service pouvant modifier les conditions de sécurité au travail.

Cas particulier des radiologues libéraux

Contrairement à ce que laisserait supposer l'origine du mot « libéral », le travailleur indépendant non salarié (qui est son propre employeur) est tenu réglementairement d'organiser sa propre surveillance médicale et dosimétrie s'il est exposé aux rayonnements ionisants. Le Code du travail (article R. 4451-9) stipule qu'il doit mettre en œuvre les mesures de protection vis-à-vis de lui-même. Il doit donc prendre les dispositions nécessaires afin d'être suivi médicalement par un médecin du travail et organiser son propre suivi dosimétrique de référence.

Installation et gestion des matériels radiologiques

Les matériels émetteurs de RI à des fins médicales doivent être installés dans des locaux adaptés et sont soumis à un contrôle qui est initial (déclaration ou autorisation), puis continu (maintenance et contrôle de qualité).

Homologation des locaux : norme NFC 15-460

Cette norme définit les caractéristiques du volume et des parois d'une salle de radiologie nécessaires au respect des limites d'exposition pour la salle elle-même et pour les salles contiguës. La révision effectuée en 2011 devrait entrer en vigueur en 2014. Elle imposera des calculs élaborés pour justifier le niveau de protection de chacune des parois (murs, sols et plafonds) de la salle en fonction de la source et des orientations possibles du tube et, dans certains cas, une augmentation de la protection plombée de certaines cloisons (notamment parmi celles qui peuvent recevoir du rayonnement primaire).

Autorisation et déclaration

Nous avons vu au chapitre précédent que les scanners restent soumis à autorisation préalable du ministère de la Santé et toute demande d'installation initiale ou de renouvellement doit faire l'objet d'une demande d'autorisation auprès de l'ASN. Les informations à fournir dans la demande d'autorisation et la constitution du dossier justificatif sont détaillées dans le « formulaire de demande d'autorisation d'utilisation d'une installation de scanographie » disponible sur le site Internet de l'Autorité de sûreté nucléaire (www.asn.fr). Le titulaire de l'autorisation d'un scanner doit être qualifié en radiodiagnostic et imagerie médicale par le Conseil de l'ordre des médecins. Le formulaire de déclaration, également disponible sur le site Internet de l'Autorité de sûreté nucléaire, est à adresser à la division territoriale de l'ASN correspondant au lieu d'utilisation. Celle-ci accuse réception et précise les conditions générales sous lesquelles le matériel peut être utilisé. Le déclarant constitue un dossier justificatif, tenu à disposition des autorités compétentes. L'installation d'un nouveau matériel soumis à déclaration dans un service entraîne *ipso facto* la nouvelle déclaration de l'ensemble des matériels du service puisque le formulaire a déclaration en fait explicitement mention. Il faudra donc, pour ces matériels, établir une déclaration récapitulative de l'ensemble des matériels des services de radiologie ou dépendant d'eux (appareils de radiographie mobiles de bloc opératoire). Ce récapitulatif sera adressé lors de l'installation d'un nouveau matériel. Il s'agit non seulement d'être en conformité avec la réglementation mais aussi de permettre le remboursement des actes réalisés avec ces appareils, ce qui nécessite un numéro d'agrément d'installation à jour (article R. 162-53 du Code de la sécurité sociale). Cette déclaration doit également être renouvelée lors de toute modification des locaux ou du déclarant.

Toute cessation de l'utilisation d'une installation de radiologie doit être signalée à l'ASN (article R. 1333-41 du Code de la santé publique) au moins

six mois avant la date prévue de la cessation, en utilisant un formulaire disponible sur le site Internet de l'ASN. Celle-ci délivre au déclarant une attestation le dégageant le déclarant de ses obligations relatives aux appareils électriques émettant des rayons X, lui sera alors délivrée (articles R. 1333-41 et R. 1333-42 du Code de la santé publique).

Rappelons qu'une liste actualisée des appareils émetteurs de RI doit également être fournie annuellement à l'IRSN (article R. 4451-38 du Code du travail)

Contrôles de radioprotection

Ils ont été définis par une décision de l'ASN du 4 février 2010 et consistent en contrôles internes externes.

Contrôles internes

Ce sont les contrôles des ambiances des lieux de travail (article R. 4451-30 du Code du travail) et les contrôles techniques de radioprotection des appareils.

Les contrôles des ambiances permettant l'évaluation de l'exposition des personnels en poste dans les zones surveillées ou contrôlées. Ils doivent porter, en radiologie, sur une vérification du champ de rayonnement ambiant. Lorsque ces contrôles ne sont pas effectués de façon continue, leur périodicité est fixée par l'employeur, avec toutefois une fréquence minimale mensuelle pour les installations soumises à autorisation (scanographie). Pour les installations soumises à un régime de déclaration, la périodicité de ces contrôles est, selon l'installation visée, mensuelle ou trimestrielle.

Les contrôles techniques de radioprotection portent sur les appareils émetteurs de rayonnements ionisants, les dispositifs de protection et d'alarme ainsi que sur les instruments de mesure (matériels de radioprotection) détenus et utilisés. Ils doivent comprendre un contrôle à la réception dans l'établissement (ou en cas de modification) et un contrôle périodique. Ces contrôles internes doivent être effectués par la personne compétente en radioprotection ou, à défaut, par un organisme agréé (différent de celui qui effectue les contrôles externes) ou par l'IRSN.

Contrôles externes

Ils sont réalisés en externe par un organisme agréé ou par l'IRSN. La périodicité de ces contrôles est d'au moins une fois par an pour les installations soumises à autorisation (scanographie). Pour les activités soumises à un régime de déclaration, la périodicité de ces contrôles est de 1, 3 ou 5 ans selon l'installation. La liste actualisée des organismes agréés pour réaliser des contrôles de radioprotection en application du travail est disponible sur le site Internet de l'ASN. Les contrôles externes complètent les contrôles internes réalisés par l'employeur avec l'assistance de la PCR et ne s'y substituent pas. Si les contrôles internes sont confiés à un organisme agréé, le contrôle externe ne peut pas être confié au même organisme agréé (article R. 4451-33 du Code du travail). Le [tableau 14-2](#) précise les fréquences de réalisation de ces contrôles.

Tableau 14-2

Fréquence des contrôles internes et externes selon la catégorie d'appareils de radiologie

	Contrôles internes		Contrôles externes	
	Radioprotection	Ambiance	Radioprotection	Ambiance
Radiographie dentaire endobuccale et panoramique avec ou sans dispositif de tomographie volumique à faisceau conique. Appareils de téléradiographie crânienne. Appareils de tomographie volumique à faisceau conique hors scanners. Appareils d'ostéodensitométrie	Annuel	Trimestriel	5 ans	5 ans
Appareils de radiodiagnostic à poste fixe. Mammographes. Appareils mobiles de radiologie.	Annuel	Trimestriel	3 ans	3 ans
Appareils de radiologie interventionnelle fixes ou mobiles (arceaux)	Annuel	Mensuel	Annuel	Annuel
Scanners	Semestriel	Mensuel	Annuel	Annuel

La périodicité des contrôles externes de radioprotection sera annuelle si les appareils sont utilisés occasionnellement pour des actes de radiologie interventionnelle.

Contrôle de qualité et maintenance

Définition

L'introduction dans le CSP de l'obligation de contrôle de qualité et de maintenance des appareils de radiologie (décret 2001-1154 du 5 décembre 2001) se conforme à l'article 8 de la directive Euratom 97-43 : « les autorités compétentes prennent des dispositions pour assurer que les mesures nécessaires sont prises par l'exploitant de l'installation radiologique pour remédier aux insuffisances ou aux défauts des équipements. Par ailleurs, elles adoptent des critères spécifiques d'acceptabilité pour les équipements afin de signaler, le cas échéant, que des mesures correctives appropriées sont nécessaires, y compris, éventuellement, la mise hors service des équipements ».

On entend par maintenance d'un dispositif médical l'ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir un dispositif médical dans un

état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement pour accomplir une fonction requise ; les conditions de réalisation de la maintenance sont fixées contractuellement, s'il y a lieu, entre le fabricant ou le fournisseur de tierce maintenance et l'exploitant. Un registre dans lequel sont consignées toutes les opérations de maintenance et de contrôle qualité interne et externe doit être ouvert pour chaque dispositif médical dès la mise en service d'une installation et être régulièrement tenu à jour. Il doit notamment permettre de connaître la date et la nature des défauts rencontrés ainsi que les actions correctives apportées pour y remédier, le nom et la qualité des intervenants.

On entend par contrôle de qualité d'un dispositif médical l'ensemble des opérations destinées à évaluer le maintien des performances revendiquées par le fabricant ou, le cas échéant, fixées par le directeur général de l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM ex ANSM). Le contrôle de qualité est dit interne, s'il est réalisé par l'exploitant ou sous sa responsabilité par un prestataire ; il est dit externe, s'il est réalisé par un organisme indépendant de l'exploitant, du fabricant et de celui qui assure la maintenance du dispositif. Dans le domaine des appareils de radiodiagnostic, on avait coutume d'englober sous le terme de maintenance l'ensemble des activités et opérations concernant la sûreté de fonctionnement et la constance des performances. Cette « maintenance » au sens large était jusqu'à présent du ressort du constructeur de l'appareil, ou, plus rarement, d'une société de maintenance ou d'un autre constructeur. Dans la nouvelle réglementation, ces opérations doivent être séparées, l'essentiel des opérations portant sur le maintien des performances du dispositif.

Pour le radiodiagnostic, les dispositifs soumis à ces opérations sont les « dispositifs médicaux nécessaires à la production et à l'interprétation des images de radiodiagnostic ». En pratique, sont concernés « tous les éléments de la chaîne de production et de lecture de l'image radiodiagnostique dont les performances ou caractéristiques ont une incidence sur la dose délivrée au patient et sur la qualité d'image ». L'objectif est donc de s'assurer du maintien des performances de l'ensemble des éléments de cette chaîne. Pour cela, l'exploitant doit s'assurer de la réalisation des opérations de maintenance prévues, et mettre en œuvre les contrôles dont la liste est établie par l'ANSM. Il doit donc définir et mettre en œuvre une organisation adaptée, tenir un inventaire à jour des dispositifs concernés ainsi qu'un registre de traçabilité des opérations.

Les référentiels de contrôle font l'objet de décisions du directeur général de l'ANSM, qui fixe notamment :

- les critères d'acceptabilité des performances et caractéristiques ;
- les opérations de contrôle ;
- la périodicité des contrôles ;
- les conditions de remise en conformité.

Les contrôles internes sont réalisés par l'exploitant, ou, sous sa responsabilité, par un prestataire. Les contrôles externes sont réalisés par des organismes agréés par l'ANSM.

Mise en application

Le [tableau 14-3](#) récapitule les décisions qui fixent les modalités et la périodicité de ces contrôles au 1^{er} janvier 2014 pour les différents types de matériel.

Le contrôle de qualité porte sur la chaîne de production des images (générateur, faisceau, récepteur primaire) et éventuellement sur le dispositif de mesure de dose. La fréquence est annuelle.

Pour les équipements utilisant un système de développement humide, s'ajoute un contrôle hebdomadaire de la sensitométrie.

Les contrôles annuels sont réalisés périodiquement à la date anniversaire du contrôle initial de chaque dispositif qui y est soumis, avec une tolérance de plus ou moins 2 mois.

Registres à tenir par l'exploitant

Inventaire des dispositifs

À savoir :

- marque, modèle, numéro de série et date de première mise en service des appareils concernés ;
- date de mise en service de leurs tubes à rayons X et générateurs de rayons X ;
- selon le type d'installation, date de mise en service de leurs tubes amplificateurs de luminance ;
- marque, modèle, numéro de série et date de première mise en service des machines à développer et marque et type de films utilisés, le cas échéant.

Registre des opérations de maintenance et de contrôle de qualité

Informations relatives à l'utilisation des dispositifs soumis aux contrôles :

- fonctions généralement utilisées : radiographie ou radioscopie, ou les deux ;
- liste des trois types d'examen réalisés le plus fréquemment avec chacun des dispositifs et la valeur des paramètres d'acquisition utilisés pour

Tableau 14-3

Récapitulatif des décisions de l'ANSM fixant les modalités et la périodicité des contrôles pour les différentes installations

Installation	Date de la décision	Périodicité du contrôle externe
Radiodiagnostic médical	24/09/2007	annuelle
Mammographie analogique	7/10/2005	semestrielle
Mammographie numérique	30/01/2006, 22/11/2010 et 5/07/2011	semestrielle
Scanographie	22/11/2007 et 11/03/2011	annuelle
Ostéodensitométrie	20/04/2005	mensuelle (DMO et CMO) annuelle (dose)
Radiologie dentaire	8 décembre 2008	annuelle

ces examens sur des patients types de masse corporelle $70 \text{ kg} \pm 10 \text{ kg}$ et d'épaisseur de torse $20 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$, en radiographie et en radioscopie, si les deux fonctions sont disponibles et généralement utilisées ;

- modes de radioscopie utilisés le plus couramment pour ce qui concerne les dispositifs de radioscopie ;
- éventuels traitements d'image utilisés le plus couramment pour ce qui concerne les dispositifs de radioscopie et les dispositifs numériques ;
- valeurs de tension minimale (kVmin) et de tension maximale (kVmax) utilisées dans la pratique courante avec l'installation en radiographie et en radioscopie si les deux fonctions sont disponibles et généralement utilisées ;
- valeurs de courant minimal et maximal (mAmin et mAmax) utilisés dans la pratique courante, s'il est ajustable de manière indépendante, ainsi que les valeurs des charges minimale et maximale (mAsmin et mAsmax) utilisées dans la pratique courante, associées à chacune des tensions kVmin, kVmax et 70 kV, en radiographie et en radioscopie, si les deux fonctions sont disponibles et généralement utilisées.

Informations relatives à la réalisation des contrôles :

- informations relatives aux matériels utilisés pour le contrôle interne ;
- date de réalisation et résultats des contrôles internes ;
- date de remise en conformité en cas de non-conformité constatée.

Par ailleurs, les rapports de contrôles internes, en cas d'intervention d'un prestataire extérieur, ainsi que les films issus du contrôle de qualité interne, même lorsque ce contrôle est réalisé par un prestataire extérieur, doivent être annexés à ce registre. Le marquage des films issus du contrôle de qualité interne doit permettre d'identifier le dispositif contrôlé, la date du contrôle et les conditions du contrôle.

Nature des contrôles

Ils sont détaillés dans les décisions de l'ANSM et nous ne ferons que citer les points sur lesquels ils portent.

- Contrôle de la sensitométrie pour les machines à développer.
- Contrôle des dispositifs de production des images.
- Contrôle en radiographie :
 - tension appliquée au tube à rayons X et qualité du rayonnement,
 - exactitude et répétabilité de la tension appliquée au tube à rayons X,
 - couche de demi-atténuation,
 - reproductibilité, répétabilité et linéarité du rayonnement de sortie,
 - correspondance entre le produit kerma \times surface, affiché et mesuré,
 - géométrie du faisceau de rayons X,
 - exposeur automatique,
 - résolution spatiale.
- Contrôle en radioscopie :
 - tension appliquée au tube à rayons X et de la qualité du rayonnement,

- exactitude de la tension appliquée au tube à rayons X,
- couche de demi-atténuation,
- correspondance entre le produit kerma \times surface affiché et mesuré,
- limitation de la taille du faisceau de rayons X,
- débit de dose maximum à l'entrée du patient,
- contrôle de la qualité de l'image.

Qualification et attributions de la personne compétente en radioprotection (PCR)

La PCR est le maître d'œuvre de la radioprotection dans un service de radio-diagnostic ou dans un hôpital. Sa désignation par le chef d'établissement est obligatoire. Elle est choisie parmi les personnels titulaires de la qualification spécifique. Dans les établissements comportant une ou plusieurs installations soumises à autorisation et notamment dans un hôpital disposant d'un service de médecine nucléaire, le chef d'établissement crée un service compétent en radioprotection, en mentionnant les attributions et rôles respectifs des PCR qui composent ce service.

Il faut bien noter que cette qualification ne concerne que la radioprotection des travailleurs. Elle n'est pas obligatoire pour les médecins utilisant les RI, à la différence de la qualification de radioprotection des patients, qui devra être acquise par tous les professionnels utilisant les RI à des fins médicales (médecins, manipulateurs, physiciens médicaux) avant mai 2009.

Qualification

La formation de PCR et les conditions de délivrance de l'attestation ont été modifiées par l'arrêté du 26 octobre 2005. La formation comporte un module théorique et un module pratique.

Le module théorique est de 30 heures de cours, réparties également entre trois unités :

- unité 1 : rayonnements ionisants et effets biologiques ;
- unité 2 : radioprotection des travailleurs : principes, moyens de protection et de contrôle ;
- unité 3 : réglementation.

Les médecins spécialistes d'imagerie médicale ou de médecine nucléaire peuvent être dispensés du module 1, ce qui ne fait plus que 20 heures de cours théoriques.

Le module de formation pratique a une durée minimale de 12 heures pour les médecins radiologues (utilisateurs de sources scellées) et de 18 heures pour les médecins nucléaires (utilisateurs de sources non scellées).

La qualification de PCR est valable 5 ans. Le renouvellement de cette qualification nécessite un rapport d'activité et 12 à 18 heures (en fonction du mode d'exercice) de cours de remise à niveau.

Rôle de la PCR

Évaluation et prévention des risques

C'est la PCR qui réalise l'analyse des postes de travail pour déterminer à quelle dose potentielle peuvent être exposés les travailleurs (études de postes). Cette analyse permet de déterminer et matérialiser les zones d'exposition dans chaque salle et de proposer à l'employeur le classement des travailleurs en catégorie A ou B et le classement des salles de radiologie (« zonage »).

Gestion de la dosimétrie des personnels

La PCR reçoit communication des résultats non nominatifs de la surveillance dosimétrique. C'est elle qui collecte et expédie les dosimètres passifs et qui transmet, le cas échéant, les résultats de la dosimétrie active. À l'arrivée d'un nouveau personnel, elle propose, en liaison avec le médecin du travail, au chef d'établissement le classement en catégorie A ou B de ce personnel en fonction du poste où il est affecté. Elle établit la demande de surveillance dosimétrique pour ce personnel. En cas de dépassement de dose, elle est chargée de l'enquête sur les circonstances de ce dépassement.

Délimitation des zones

C'est la PCR qui réalise l'expertise technique (études de postes) permettant le classement des salles de radiologie par l'employeur (« zonage »). Elle s'assure du balisage correct de ces zones et met en place la dosimétrie d'ambiance : la méthode la plus simple consiste à placer un film dosimètre derrière la vitre qui protège le pupitre de commande et à relever mensuellement les doses enregistrées.

Prévention et formation

La PCR prend en charge, avec le médecin du travail, l'information initiale des personnels nouvellement affectés sur les particularités du service. Elle participe à la formation périodique (au moins triennale) des travailleurs exposés, qui rappelle les risques liés à l'exposition, les procédures générales de radioprotection et les règles de prévention, notamment pour les femmes susceptibles de débiter une grossesse. Elle analyse les postes de travail, dépiste les circonstances d'exposition majorée et met en place les moyens d'abaisser cette exposition « aussi bas que raisonnablement possible ». En service de radiologie, c'est essentiellement en radiologie interventionnelle que ce rôle est important, en proposant les aménagements matériels utiles, et en donnant des conseils d'optimisation nécessaires, avec l'aide la personne spécialisée en physique médicale (PSPM) de l'établissement.

Procédures et démarches administratives

La PCR prépare les dossiers de déclaration ou de demandes d'autorisation qui seront transmis par l'employeur. Elle tient à jour le recensement de ces installations, avec leurs caractéristiques techniques, les modifications éventuelles subies depuis l'installation, la date et le résultat des contrôles passés et la planification des contrôles à venir. Elle participe au contrôle de qualité interne, en collaboration avec la PSRPM et les personnels du service.

Identification et correspondants de la PCR

Le nom de la PCR de l'établissement est communiqué à chaque travailleur exposé au moment de la visite d'aptitude initiale. Son nom figure également sur chaque fiche de poste des salles de radiologie. Dans ses fonctions, la PCR est en relation avec le médecin du travail et avec le Comité d'hygiène, sécurité et conditions de travail (CHSCT) de l'établissement. Elle est le correspondant des organismes d'expertise (IRSN) ou de contrôle (DGSNR), sous couvert du chef d'établissement.

Personne spécialisée en radiophysique médicale (PSRPM)

En application de l'article R. 1333-60 du Code de la santé publique, l'utilisation d'installations radiologiques nécessite de faire appel à une PSRPM à des fins notamment de dosimétrie, d'optimisation, d'assurance de qualité (y compris le contrôle de qualité), d'identification et de gestion des risques et de radioprotection des patients. Les conditions d'intervention de la PSRPM sont précisées dans l'arrêté du 19 novembre 2004. Pour les installations soumises à autorisation (scanner) et utilisées en radiologie interventionnelle, un plan rédigé par le chef d'établissement précise les moyens en personnel et le temps de travail nécessaires à la mission de PRSPM. Pour les installations soumises à déclaration (services de radiologie diagnostique), cet arrêté indique que l'utilisateur doit pouvoir faire appel à une personne spécialisée en radiophysique médicale pour la détermination et le report des NRD. En pratique, si le service réalise correctement ses relevés et transmissions de NRD, l'intervention de la PSRPM n'est donc pas systématique.

Conclusion

La radioprotection des travailleurs en milieu médical repose sur la PCR, conseiller du chef d'établissement, et le médecin du travail. La délimitation des zones pose un réel problème dans les services de radiologie médicale, car les textes réglementaires ne font pas la distinction entre l'exposition médicale, intermittente et le plus souvent insignifiante, et les sources de l'industrie nucléaire et imposent en outre une délimitation en fonction de débits de doses horaires théoriques et non plus des doses susceptibles d'être reçues en conditions normales de travail. Cette réglementation impose donc une signalisation inutilement compliquée, totalement déconnectée de l'exposition réelle des travailleurs en milieu médical et incongrue par rapport au risque de cette exposition réelle. Le régime des déclarations et autorisations permet un recensement exhaustif du parc radiologique national. Le contrôle de qualité des équipements de radiologie implique tous les acteurs des services de diagnostic à côté de la PCR. L'ensemble de ces nouvelles dispositions, jointes aux prescriptions en matière de radioprotection des patients, vont donner à la radioprotection une place importante dans la pratique radiologique quotidienne.

Vérifiez si vous avez assimilé les points importants de ce chapitre en répondant au questionnaire en fin d'ouvrage.

Pour en savoir plus

Présentation des principales dispositions réglementaires de radioprotection applicables en radiologie médicale et dentaire. Publication de l'ASN. www.asn.fr.

Arrêté du 15 mai 2006 relatif aux conditions de délimitation et de signalisation des zones surveillées et contrôlées et des zones spécialement réglementées ou interdites compte tenu de l'exposition aux rayonnements ionisants.

Sur le site Internet de l'IRSN (www.irsn.fr) : *Guide pratique de réalisation des études dosimétriques de poste de travail présentant un risque d'exposition aux rayonnements ionisants.*

Tests de formation médicale continue

Vérifiez si vous avez assimilé les points importants de chaque chapitre en répondant à ces questionnaires sous forme de QCM.

Cochez la ou les propositions vraies dans tous les QCM suivants (le nombre de réponses exactes attendues est indiqué entre parenthèses).

Fondements et historique de la radioprotection

1. Les risques (2) :
 - A) Le risque aléatoire est aussi appelé stochastique ;
 - B) L'évolution du risque aléatoire est indépendante de la dose causale ;
 - C) Le risque déterministe ne concerne que l'opérateur ;
 - D) On appelle détriment les effets indésirables apparus dans la descendance d'un individu après une exposition radiologique.
2. Pour une exposition unique à faible dose, < 100 mGy (2) :
 - A) La probabilité d'apparition d'un cancer est donnée par une relation linéaire sans seuil ;
 - B) Le risque de survenue d'un effet cutané observable est nul ;
 - C) Le risque d'induire un détriment est compris entre 0 et la droite d'extrapolation calculée à partir de la relation dose-effet aux fortes doses ;
 - D) Le débit de dose ne modifie pas le risque d'apparition d'un effet stochastique.
3. À Hiroshima et Nagasaki :
 - A) Plusieurs milliers de cancers dus aux radiations sont survenus chez les survivants ;
 - B) Les leucémies ont été les premiers cancers à apparaître en surnombre ;
 - C) Il n'y a pas eu d'augmentation de cancers chez les enfants des personnes irradiées ;
 - D) La dose a été délivrée sur une longue période suivant l'explosion.
4. La relation linéaire sans seuil (2) :
 - A) Permet de modéliser un risque et son indemnisation chez les travailleurs exposés ;
 - B) Repose sur des données scientifiques ;
 - C) Exprime, aux faibles doses (< 100 mSv), une limite supérieure du risque et non une probabilité du risque ;
 - D) Se vérifie pour les populations vivant dans les régions où l'exposition au rayonnement naturel est très supérieure à celle de la France.

5. Principes de la radioprotection (2) :

- A) L'optimisation est le choix de la meilleure technique diagnostique ;
- B) La justification signifie que les avantages d'une technique sont supérieurs à ses inconvénients ;
- C) La justification s'applique à une technique et non à un examen individuel ;
- D) La limitation ne s'applique pas à l'exposition des patients.

Réponses : 1 = A, B ; 2 = B, C ; 3 = B, C ; 4 = A, C ; 5 = B, D.

Nature et origine des rayonnements ionisants

1. (2).

- A) Les rayons X peuvent être émis par freinage ou fluorescence ;
- B) Les rayons X peuvent avoir une énergie supérieure à celle des rayons γ ;
- C) Les rayonnements ultra-violetes ne sont pas ionisants ;
- D) Un accélérateur délivre des électrons de haute énergie et des rayons γ .

2. (2).

- A) Le spectre de RX exprime le nombre de photons émis par unité de temps ;
- B) L'augmentation de la charge du tube augmente l'intensité du faisceau de RX ;
- C) L'augmentation du numéro atomique de l'anode augmente l'intensité du faisceau de RX ;
- D) L'augmentation de la tension aux bornes du tube n'augmente que l'énergie maximale du faisceau de RX.

3. (2)

- A) Le rayonnement α est constitué d'un noyau d'hélium ;
- B) L'activité massique de l'uranium 238 est supérieure à celle de l'uranium 235 ;
- C) La masse d'un GBq de césium 137 est supérieure à celle d'un GBq d'iode 131 ;
- D) L'incorporation d'un noyau d'hélium par un noyau d'aluminium produit un noyau de plutonium

4. Le rayonnement beta (2) :

- A) Est composé de particules chargées négativement ;
- B) Est toujours d'origine nucléaire ;
- C) Ne s'accompagne jamais d'une émission γ ;
- D) Résulte d'une transformation de proton en neutron ou l'inverse.

5. La période radioactive (2) :

- A) Est le temps au bout duquel un radionucléide a disparu ;
- B) Est inversement proportionnelle à la constante radioactive ;

- C) Est d'autant plus courte que l'activité du radioélément est plus grande ;
 D) Est le logarithme de l'activité.

Réponses : 1 = A, B ; 2 = B, C ; 3 = A, C ; 4 = B, D ; 5 = A, C.

Interaction des rayonnements ionisants avec la matière

- (2)
 - L'effet Compton est à l'origine du rayonnement diffusé ;
 - L'effet photoélectrique est indépendant de la nature du milieu ;
 - L'effet de matérialisation n'intervient pas aux énergies du diagnostic ;
 - La CDA est constante pour un faisceau de rayons X émis sous une tension donnée.
- Les neutrons (2) :
 - Ont un parcours plus long dans l'eau que dans le plomb ;
 - Ne perdent leur énergie que par collision ;
 - Ont, à énergie égale, un TLE supérieur à celui du rayonnement β ;
 - Ont une masse voisine de celle de l'électron.
- (2).
 - L'ionisation d'une molécule d'eau représente une énergie de 32 eV ;
 - Chaque ionisation s'accompagne d'un nombre égal d'excitations ;
 - La désexcitation est à l'origine du rayonnement diffusé ;
 - L'excitation n'entraîne pas d'effets biologiques.
- L'effet photoélectrique (3) :
 - Est prédominant dans l'os en radiologie conventionnelle, sauf à tension élevée ;
 - Est utile et recherché en mammographie ;
 - S'accompagne de rayonnement diffusé ;
 - N'existe pas dans le plomb.
- L'effet de matérialisation (2) :
 - N'existe pas en radiologie diagnostique ;
 - Produit deux électrons ;
 - Produit un électron et un positon ;
 - Produit deux photons émis dans la direction du rayonnement incident.

Réponses : 1 = A, B, C ; 2 = B, C ; 3 = A, D ; 4 = A, B, D ; 5 = A, C.

Grandeurs et unités en radioprotection

- On peut mesurer (2) :
 - La dose absorbée ;
 - La dose efficace ;

- C) La dose d'entrée ;
 - D) La dose à l'organe.
2. Le facteur de pondération d'un rayonnement (2) :
- A) Tient compte de l'efficacité du rayonnement pour induire un effet ;
 - B) Est plus important pour les électrons que pour les neutrons ;
 - C) Permet de calculer l'énergie du rayonnement ;
 - D) N'est pas à prendre en compte en radiodiagnostic.
3. Le facteur de pondération tissulaire (2) :
- A) Est abaissé à 0,08 pour les gonades dans les dernières recommandations de la CIPR ;
 - B) Est plus élevé pour la thyroïde que pour le poumon ;
 - C) Permet de calculer la dose efficace ;
 - D) Varie en fonction de la nature du rayonnement.
4. L'Index de dose scanographique au volume (CTDIvol) (2) :
- A) Est le produit du CTDI par la longueur explorée ;
 - B) Doit être obligatoirement affiché à la console du scanner ;
 - C) Est indépendant du nombre de coupes ;
 - D) Est indépendant de l'épaisseur de coupe.
5. Le produit (2) :
- A) dose surface s'exprime en Gy par cm² ;
 - B) dose longueur permet le calcul de la dose efficace ;
 - C) dose longueur augmente avec le pas d'acquisition (pitch) ;
 - D) dose surface est indépendant de la distance foyer peau.
6. La dose efficace (2) :
- A) Peut être calculée facilement en scanner à partir du PDL et d'un coefficient dépendant de l'âge ;
 - B) Ne peut être calculée pour des expositions de régions différentes espacées dans le temps ;
 - C) Ne peut pas être mesurée directement ;
 - D) Est égale à la dose totale si l'exposition intéresse tout l'organisme.
7. (2).
- A) La dose efficace est plus importante pour une exploration de la tête délivrant 40 mGy au volume que pour une exploration du thorax délivrant 20 mGy au volume ;
 - B) La répétition des acquisitions n'augmente pas la dose efficace si elle porte sur le même volume exploré ;
 - C) La dose efficace peut être calculée en radiologie conventionnelle ;
 - D) La dose efficace s'exprime obligatoirement en Sv ou mSv.

Exposition naturelle et artificielle

1. Quel radioélément est majoritaire dans la radioactivité du corps humain ?
 - A) Le tritium ;
 - B) Le carbone 14 ;
 - C) Le potassium 40 ;
 - D) Le radon.

2. 2 réponses exactes :
 - A) Le rayonnement du potassium 40 a la même composition que celui du césium 137 et une énergie supérieure ;
 - B) Le plutonium n'existe pas à l'état naturel ;
 - C) Le tritium est un émetteur β de très faible énergie ;
 - D) Le polonium 210 n'existe pas à l'état naturel.

3. 2 réponses exactes :
 - A) L'eau de mer a une activité supérieure à 10 000 Bq par m^3 ;
 - B) La présence de radioactivité dans les aliments les rend impropres à la consommation ;
 - C) L'ébullition du lait permet d'éliminer sa radioactivité ;
 - D) L'irradiation des aliments ne modifie pas leur radioactivité propre.

4. 2 réponses exactes. Le rayonnement cosmique :
 - A) Est surtout composé de rayonnement ultraviolet ;
 - B) Peut créer du plutonium 239 à partir de l'uranium 238 ;
 - C) Est à l'origine du potassium 40 ;
 - D) Crée du carbone 14 à partir de l'azote atmosphérique.

5. 2 réponses exactes :
 - A) L'exposition au rayonnement naturel en France peut varier de 50 % en fonction des régions ;
 - B) L'exposition au rayonnement naturel ne dépasse jamais 10 mSv ;
 - C) Le radon est responsable d'une exposition globale de l'organisme ;
 - D) L'irradiation reçue en une heure de vol transatlantique est approximativement égale à celle d'une journée à terre.

6. 2 réponses exactes :
 - A) On ne détecte pas d'augmentation significative de radioactivité due à l'uranium appauvri sur les champs de bataille où il a été utilisé comme arme antichar ;
 - B) On peut encore mesurer le césium 137 des retombées des explosions nucléaires aériennes ;
 - C) Les produits de fission d'une explosion nucléaire aérienne retombent dans l'année qui suit ;
 - D) La dose reçue au voisinage d'une source de plutonium peut être rapidement mortelle.

7. 2 réponses exactes :

- A) L'accident de Tchernobyl a augmenté la radioactivité naturelle en France d'environ 2 % en 1986 ;
- B) L'accident de Fukushima a relâché moins de césium et d'iode radioactifs que l'accident de Tchernobyl ;
- C) L'accident de Fukushima a entraîné plusieurs décès par syndrome d'irradiation aiguë ;
- D) Après Tchernobyl, la contamination radioactive par l'iode était encore détectable après 2 ans.

Réponses : 1 = C ; 2 = A, C ; 3 = A, D ; 4 = B, D ; 5 = A, D ; 6 = A, B ; 7 = A, B.

Effets biologiques des rayonnements ionisants

1. Cochez la ou les réponses exactes (2) :

- A) Les effets biologiques des rayonnements ionisants (RI) sont dus à l'ionisation, l'excitation et l'agitation thermique ;
- B) À dose absorbée égale, le nombre d'ionisations diminue quand le débit de dose diminue ;
- C) L'essentiel des radicaux libres provient de la radiolyse de l'eau ;
- D) L'action des radicaux libres est plus importante en présence d'oxygène.

2. Cochez la ou les réponses exactes (2) :

- A) À dose absorbée égale, l'effet biologique augmente quand le transfert linéique d'énergie (TLE) augmente ;
- B) L'effet biologique des RI à TLE élevé est beaucoup moins dépendant du débit de dose que celui des rayonnements à TLE faible ;
- C) La fréquence des lésions complexes de l'ADN créées par un RI est indépendante du TLE de ce RI ;
- D) Le TLE des rayonnements β est supérieur à celui des rayonnements α .

3. Cochez la ou les réponses exactes (2) :

- A) L'effet des RI aboutit toujours à la mort cellulaire ;
- B) La mort cellulaire est à l'origine des effets déterministes des RI ;
- C) La radiosensibilité augmente avec la différenciation cellulaire ;
- D) Après irradiation, la mort cellulaire peut survenir plusieurs générations cellulaires plus tard.

4. Cochez la ou les réponses exactes (2) :

- A) Les lésions de l'ADN induites par les RI ne peuvent survenir que lors de la mitose ;
- B) L'augmentation du métabolisme oxydatif augmente les lésions de l'ADN ;
- C) Les lésions double brin de l'ADN sont spécifiques des RI ;
- D) Le mécanisme d'apoptose est bénéfique, en éliminant des cellules mutées.

5. Cochez la ou les réponses exactes (2) :
- A) Les cassures double brin de l'ADN peuvent être réparées ;
 - B) La survenue de lésions de l'ADN accélère le cycle cellulaire ;
 - C) La réparation incomplète ou infidèle de l'ADN est à l'origine des effets stochastiques ;
 - D) La persistance de lésions de l'ADN après tentative de réparation entraîne toujours une mort cellulaire différée.
6. Cochez la ou les réponses exactes (2) :
- A) L'hypoxie augmente le nombre de lésions cellulaires radio-induites ;
 - B) La gravité des effets stochastiques augmente avec la dose ;
 - C) L'exposition préalable à une faible dose de RI diminue le nombre de lésions observées après une deuxième irradiation dans un délai bref ;
 - D) Le dénombrement du nombre de chromosomes dicentriques ne permet pas l'estimation de la dose reçue plus d'un an après une exposition accidentelle.

Réponses : 1 = C, D ; 2 = A, B ; 3 = B, D ; 4 = B, D ; 5 = A, C ; 6 = C, D.

Effets pathologiques des rayonnements ionisants : effets déterministes

1. Cochez la ou les réponses exactes (2) :
- A) Les effets déterministes ont un seuil constant, quel que soit le nombre d'expositions ;
 - B) Le seuil d'un effet déterministe donné est identique chez tous les individus ;
 - C) Le délai d'apparition des lésions aiguës d'un tissu dépend de la durée de maturation des cellules qui le composent et de la dose reçue ;
 - D) La gravité des lésions aiguës dépend de la dose reçue par un tissu.
2. Cochez la ou les réponses exactes (2) :
- A) Une exposition unique de l'organisme entier aux RX, à dose inférieure à 1 Gy n'entraîne pas d'effet déterministe cliniquement observable ;
 - B) Lors d'une irradiation globale aiguë, le délai d'apparition des effets est indépendant de la dose ;
 - C) Après une exposition aiguë, les vomissements précoces indiquent une dose supérieure à 1 Gy ;
 - D) Les éléments les plus sensibles des lignées sanguines sont les granulocytes.
3. Après une exposition globale aiguë aux RI comprise entre 4 et 6 Gy (2) :
- A) Il existe un intervalle libre pendant lequel le sujet irradié ne présente aucun symptôme ;
 - B) Les signes neurologiques apparaissent en premier ;
 - C) L'anémie survient simultanément à l'aplasie leucocytaire ;
 - D) La greffe de moelle est souvent irréalisable car le typage leucocytaire est impossible.

4. Après une irradiation aiguë localisée (2) :
- A) Une ulcération cutanée peut survenir en quelques jours si la dose seuil est dépassée ;
 - B) L'érythème précoce indique une dose supérieure à 5 Gy ;
 - C) L'alopecie peut survenir après une dose unique de 1 Gy au cuir chevelu ;
 - D) Si la première irradiation est inférieure à la dose seuil, une deuxième irradiation également inférieure à cette dose seuil, peut créer de lésions cutanées aiguës.
5. Cochez la ou les réponses exactes (2) :
- A) L'irradiation des testicules à une dose de 6 Gy provoque une stérilité définitive et la perte des caractères sexuels secondaires ;
 - B) L'irradiation des ovaires peut entraîner une ménopause précoce ;
 - C) La stérilité après irradiation testiculaire est due à la perte du flagelle des spermatozoïdes ;
 - D) Une stérilité transitoire peut survenir chez l'homme après une dose unique de 0,2 Gy.
6. Lors de l'irradiation du système nerveux central (2) :
- A) Les lésions encéphaliques post radiques intéressent principalement la substance grise ;
 - B) La radionécrose cérébrale n'entraîne pas d'œdème ni d'effet de masse ;
 - C) La leucoencéphalopathie radique est liée à l'atteinte des oligodendrocytes et à une vascularite des vaisseaux perforants ;
 - D) Une myélopathie radique tardive avec paraplégie est toujours irréversible.

Réponses : 1 = C, D ; 2 = A, C ; 3 = A, D ; 4 = B, D ; 5 = B, D ; 6 = C, D.

Grossesse et exposition médicale

1. Cochez la ou les réponses exactes (2) :
- A) Un scanner thoracique, réalisé en début de grossesse, délivre moins de 0,2 mGy à l'utérus ;
 - B) Une scintigraphie thyroïdienne diagnostique pourrait avoir des conséquences très graves sur la thyroïde de l'embryon ;
 - C) Un scanner pelvien comportant trois acquisitions avec un CTDIvol de 35 mGy délivre moins de 100 mGy à l'utérus ;
 - D) Un traitement par radiothérapie d'une tumeur cérébrale est incompatible avec la poursuite d'une grossesse.
2. Cochez la ou les réponses exactes (2) :
- A) Les effets malformatifs sont dus à un mécanisme de mort cellulaire ;
 - B) Le maximum de risque malformatif se situe dans les dix premiers jours de grossesse ;

- C) Une exploration radiologique ne peut être pratiquée que dans les dix jours suivant la date des dernières règles ;
 D) On doit pratiquer un test de grossesse chez toute femme jeune avant de réaliser une administration thérapeutique d'iode 131.

3. Cochez la ou les réponses exactes (2) :

- A) Les malformations radio-induites les plus fréquentes chez l'homme sont les fentes palatines ;
 B) Un retard mental (baisse du QI) peut survenir pour une dose *in utero* de 100 mGy ;
 C) La période la plus sensible du cerveau humain se situe entre la 8^e et la 15^e semaine ;
 D) Le retard mental (QI < 70) a une incidence spontanée de 3 % des naissances.

4. Cochez la ou les réponses exactes (2) :

- A) La probabilité de cancer de l'enfant (entre 0 et 15 ans) est de 0,2 à 0,3 % ;
 B) L'augmentation d'incidence des cancers de l'enfant après exposition *in utero* est extrapolée des données d'Hiroshima et de Nagasaki ;
 C) Le risque de cancer de l'enfance après une exposition *in utero* à 10 mGy augmente d'environ 0,05 % ;
 D) Le risque de cancer après une exposition *in utero* a un seuil de 100 mGy.

5. Cochez la ou les réponses exactes (2) :

- A) Une manipulatrice enceinte doit être retirée d'un poste de radiologie conventionnelle ;
 B) De la déclaration de grossesse jusqu'à l'accouchement, la dose à l'utérus doit être inférieure à 1 mGy ;
 C) Une femme enceinte doit porter son dosimètre sur le tablier de plomb ;
 D) Le médecin du travail peut demander le changement de poste d'une femme enceinte sans avoir à justifier sa décision.

Réponses : 1 = A, C ; 2 = A, D ; 3 = C, D ; 4 = A, D ; 5 = B, D.

Effets pathologiques des rayonnements ionisants : effets stochastiques

1. Cochez la ou les réponses exactes (2) :

- A) Un proto-oncogène est un gène normalement présent dans le matériel génétique ;
 B) L'activation d'un oncogène à la suite d'une irradiation est consécutive à une délétion chromosomique ;
 C) La protéine P53 a une fonction de contrôle de la réplication de l'ADN ;
 D) Les cassures de la chaîne d'ADN sont spécifiques des cancérogènes chimiques et des rayonnements ionisants.

2. Cochez la ou les réponses exactes (2) :
 - A) Les effets dus à l'inactivation d'un anti-oncogène apparaissent généralement tard dans la vie de l'individu ;
 - B) Si la probabilité d'atteinte d'un des 2 allèles d'un anti-oncogène est de $1/n$, la probabilité d'inactivation de cet anti-oncogène par atteinte du 2^e allèle est de $\frac{1}{2} n$;
 - C) Une même dose délivrée dans un temps plus court est plus nocive car elle peut saturer les mécanismes de réparation de l'ADN ;
 - D) L'ataxie-télangiectasie prédispose au cancer par activation d'un oncogène.
3. Cochez la ou les réponses exactes (2) :
 - A) La promotion se déclenche systématiquement après l'initiation d'une cellule cancéreuse ;
 - B) L'inflammation chronique est un promoteur de la cancérogenèse ;
 - C) L'apoptose est un mécanisme de contrôle qui élimine aussitôt les cellules anormales ;
 - D) Le développement d'une lignée cancéreuse peut être entravé par des mécanismes immunitaires.
4. Cochez la ou les réponses exactes (2) :
 - A) Le risque de décès par cancer de tout individu est de 25 % sur la vie entière ;
 - B) Les principaux facteurs d'augmentation du risque de cancer dans la population générale sont environnementaux ;
 - C) Après 60 ans, un adulte sur deux est porteur d'au moins un cancer occulte ;
 - D) On observe depuis 20 ans une augmentation de mortalité par cancer parallèle à l'augmentation d'incidence des cancers.
5. Cochez la ou les réponses exactes (2) :
 - A) L'incidence naturelle d'anomalies génétiques est très élevée, supérieure à 70 % des naissances ;
 - B) Une exposition parentale à 1 Gy augmente de 2 % le nombre total d'anomalies génétiques à la deuxième génération ;
 - C) Toute anomalie survenant sur le matériel génétique des cellules germinales est transmise à la descendance ;
 - D) Il n'a pas été observé d'anomalies génétiques chez les descendants des irradiés d'Hiroshima et de Nagasaki.
6. Cochez la ou les réponses exactes (2) :
 - A) L'application de la relation linéaire sans seuil permet de déterminer le nombre de cancers qui surviendront après une exposition aux rayonnements ionisants à faible dose ;
 - B) En pathologie humaine, l'existence d'un seuil est démontrée pour certains cancers ;

- C) Le débit de dose est un paramètre négligeable dans le processus de cancérogenèse ;
- D) Une irradiation préalable à faible dose de populations cellulaires diminue les effets observés après une seconde irradiation à dose forte.

Réponses : 1 = A, C ; 2 = A, C ; 3 = A, C ; 4 = A, C ; 5 = A, D ; 6 = B, D.

Doses délivrées au patient par les examens diagnostiques en médecine nucléaire.

Moyens de réduction de la dose

1. Cochez la ou les réponses exactes (2) :
 - A) Le parcours moyen du rayonnement β de l'iode 131 dans les tissus est de 3 mm environ ;
 - B) Seule la composante γ ou X de l'émission d'un radionucléide est détectée par les caméras de scintigraphie ;
 - C) C'est la composante γ de l'émission de l'iode 131 qui délivre l'essentiel de la dose reçue par la thyroïde ;
 - D) L'émission β disparaît plus rapidement que l'émission γ .

2. Cochez la ou les réponses exactes (2) :
 - A) La période effective d'un radioélément est voisine de la plus courte des deux périodes, physique ou biologique ;
 - B) La période biologique d'un radioélément est toujours plus courte que sa période physique ;
 - C) La période effective d'un radioélément administré à un patient détermine la dose efficace ;
 - D) La dose efficace dépend uniquement de la dose reçue par l'organe cible.

3. La dose reçue par le patient après injection d'un radiopharmaceutique (2) :
 - A) Est proportionnelle à l'activité injectée ;
 - B) Diminue si l'on augmente le temps d'acquisition des images pour une même activité injectée ;
 - C) Est indépendante de la vitesse d'élimination du radiopharmaceutique ;
 - D) Dépend de la sensibilité des détecteurs utilisés pour un même rapport signal/bruit.

4. Quel radioélément utilisé en scintigraphie diagnostique délivre les doses les plus importantes ?
 - A) Le technétium 99m ;
 - B) L'iode 131 ;
 - C) Le gallium 67 ;
 - D) L'iode 123.

5. Après une injection de radiopharmaceutique (2) :
- A) Le rayonnement du technétium 99m n'est pas suffisamment énergétique pour sortir du patient ;
 - B) L'iode 131 est totalement éliminé en 2 mois environ ;
 - C) La dose totale dans l'air, à un mètre du patient, pendant toute la décroissance de l'iode 131 est de 0,1 mGy environ ;
 - D) Le technétium 99m se dépose dans le tissu osseux pour plusieurs mois.
6. En cas d'attentat dispersant des déchets nucléaires (2) :
- A) Le rayonnement du plutonium 239 n'est pas suffisamment énergétique pour franchir la couche cornée de l'épiderme ;
 - B) Les blessés radiocontaminés exposeraient le personnel soignant à de fortes doses de rayonnements ;
 - C) Les brûlures radiques sont dues au dépôt cutané de radioéléments émetteurs β ;
 - D) Le césium et le strontium seraient éliminés en quelques semaines de l'organisme des personnes exposées.

Réponses : 1 = A, B ; 2 = A, C ; 3 = A, D ; 4 = A, C ; 5 = C ; 6 = B, C.

Doses délivrées en radiodiagnostic (radiologie conventionnelle et dentaire, mammographie). Quantification et optimisation

1. Cochez les réponses exactes (2) :
- A) Le produit Dose.Surface (PDS) diminue quand la distance tube détecteur augmente ;
 - B) Le compte-rendu de chaque examen doit mentionner la dose efficace résultant de cet examen ;
 - C) Le PDS de l'exploration d'une région permet d'estimer la dose efficace ;
 - D) La dose d'entrée peut être estimée à partir du PDS.
2. Cochez les réponses exactes (2) :
- A) Dans une chambre d'ionisation, les charges électriques induites par le rayonnement produisent un courant d'intensité proportionnelle à la dose ;
 - B) Le dosimètre radiothermoluminescent donne une mesure instantanée de la dose ;
 - C) Le dosimètre à scintillateur et fibre optique donne une mesure instantanée de la dose ;
 - D) Un système de mesure du PDS permet d'estimer la dose reçue par un patient même si la largeur du faisceau est plus large que le patient.

3. Quels paramètres (2) ne sont pas pris en compte par la formule simplifiée de calcul de la dose reçue par un patient ?

- A) La tension (kV) ;
- B) La filtration (mm d'aluminium ou de cuivre) ;
- C) Le temps de scopie et le nombre de clichés ;
- D) L'épaisseur du patient.

4. Pour lesquels de ces examens (2) n'utilise-t-on pas le PDS pour estimer la dose délivrée ?

- A) Mammographie ;
- B) Uréthrocystographie rétrograde ;
- C) Artériographie ;
- D) Orthopantomographie.

5. Cochez les réponses exactes (2) :

- A) La tension d'un cliché d'ASP pour occlusion doit être plus élevée que celle utilisée pour une recherche de calcul ;
- B) La grille antidiffusante permet une diminution de la dose quand on emploie une tension élevée ;
- C) La dose augmente quand le champ d'amplificateur choisi augmente ;
- D) La dose diminue quand le champ d'entrée du rayonnement sur le patient diminue.

Réponses : 1 = C, D ; 2 = A, C ; 3 = B, D ; 4 = A, D ; 5 = A, D.

Doses délivrées au patient en scanographie (scanner). Quantification et optimisation

1. Cochez les réponses exactes (2) :

- A) Le produit Dose.Longueur (PDL) diminue quand le pas augmente ;
- B) La dose efficace est égale au PDL multiplié par un facteur de conversion constant ;
- C) Le compte-rendu d'un examen comportant une exploration du thorax et de la tête mentionne le PDL cumulé pour l'ensemble de ces régions explorées ;
- D) Pour une même longueur explorée, le PDL diminue si l'épaisseur de coupe augmente.

2. Cochez les réponses exactes (2) :

- A) La dose délivrée en scanographie augmente quand l'épaisseur de coupe augmente ;
- B) Passer de 120 à 100 kV équivaut approximativement, au plan de la réduction de dose, à diviser les mAs par 2 ;
- C) Le rapport signal/bruit diminue d'environ 30 % quand on divise la charge par 2 ;
- D) Le pas est égal au déplacement du lit pendant une rotation divisée par le nombre de détecteurs activés.

3. Quelle grandeur reflète le mieux la dose reçue par le patient en scannographie, et doit être habituellement reportée sur le compte-rendu d'examen ?

- A) L'index de dose scanographique (CTDI) ;
- B) Le CTDI au volume ;
- C) Le PDL ;
- D) La charge (mAs) totale.

4. Classer par ordre décroissant la dose efficace résultant d'une même valeur de PDL pour un scanner explorant :

- A) Le cou ;
- B) Le thorax ;
- C) La tête ;
- D) L'abdomen.

5. Cochez les réponses exactes (2) :

- A) L'inclinaison du statif permet une meilleure analyse des disques intervertébraux ;
- B) En choisissant de travailler à charge constante, le pas (pitch) n'influe plus sur la dose délivrée ;
- C) Il est impossible de diminuer la tension (kV) si l'on utilise un logiciel de réduction de dose par modulation de la charge (mAs) ;
- D) Le choix préalable de l'épaisseur de reconstruction peut modifier la dose reçue par le patient.

6. Une jeune femme de 60 kg a été explorée par scanner abdominopelvien au cours d'un début de grossesse méconnue (4 SA). Le PDL de l'exploration était de 600 mGy.cm et le CTDIvol de 20 mGy. Quelle est la dose approximative reçue par l'embryon ?

- A) 600 mGy ;
- B) 12 mGy ;
- C) 24 mGy
- D) Elle ne peut être calculée si on ne connaît pas les mAs et les kV.

Réponse(s) : 1 = A, D ; 2 = B, C ; 3 = C ; 4 = B, D, A, C ; 5 = B, D ; 6 = C.

Radioprotection des patients : niveaux de référence, guide des procédures et des indications des examens d'imagerie

Cochez les réponses exactes (2).

1. Les niveaux de référence diagnostiques (NRD) :

- A) Sont établis à partir de la collecte de niveaux de doses pour un certain nombre d'examens dans la pratique nationale ;
- B) Doivent être établis pour tous les examens radiologiques ;

- C) Peuvent être dépassés ;
 D) Sont fixés définitivement pour un examen donné.
2. Les niveaux de référence diagnostiques (NRD) :
- A) Représentent la moyenne de l'exposition résultant d'un examen donné, pratiqué par un échantillon représentatif de la pratique radiologique nationale ;
 B) Devront obligatoirement diminuer au fur et à mesure que la démarche qu'ils impliquent sera appliquée par la communauté radiologique ;
 C) Ne dispensent pas le radiologue dont la pratique se situe régulièrement en dessous d'optimiser ses protocoles ;
 D) Sont les mêmes, pour un examen donné, chez l'adulte et chez l'enfant.
3. Les niveaux de référence diagnostiques (NRD) :
- A) Correspondent à la dose efficace et peuvent être exprimés en mSv pour tous les examens ;
 B) Correspondent au produit Dose.Surface, exprimé en cGy.cm², pour la radiologie conventionnelle et l'angiographie ;
 C) Doivent être mentionnés sur le compte-rendu d'examen ;
 D) Correspondent à la dose moyenne à la glande, exprimée en mGy, ou à la dose d'entrée, exprimée en mGy, en mammographie.
4. Le guide des procédures radiologiques :
- A) Devait être obligatoirement mis en place par tous les États membres du fait de la directive 97-43 Euratom ;
 B) Concerne tous les examens d'imagerie ;
 C) Est accessible sur Internet ;
 D) Ne concerne que la pratique hospitalière.
5. Le guide du bon usage des examens d'imagerie :
- A) Est disponible sur Internet ;
 B) Mentionne, pour chaque examen, l'ordre de grandeur de l'exposition aux rayonnements ionisants, le cas échéant ;
 C) Ne concerne que les examens utilisant les rayonnements ionisants ;
 D) Ne concerne que la pratique hospitalière.

Réponses : 1 = A, C ; 2 = B, C ; 3 = B, D ; 4 = A, C ; 5 = A, B.

Organisation de la radioprotection : organismes internationaux, législation européenne et française

1. Cochez la ou les réponses exactes (2). Dispositions législatives et réglementaires concernant la radioprotection :
- A) Elles sont la transposition en droit français de directives européennes ;
 B) Elles sont toutes contenues dans le Code de santé publique ;

- C) Leur non-respect n'est passible que d'amendes ;
- D) Ont fait l'objet de multiples arrêtés d'application.

2. Cochez la ou les réponses exactes (2) :

- A) Les limites de dose pour les travailleurs sont fixées par un article du Code du travail ;
- B) Les limites de dose sont applicables à un travailleur subissant un examen radiologique ;
- C) La nouvelle législation a introduit une limite de dose pour le public ;
- D) Le dépassement de limites de doses n'a pas de conséquences judiciaires pour l'employeur.

3. Cochez la ou les réponses exactes (2) :

- A) Les limites d'exposition aux extrémités et au cristallin sont les mêmes pour les travailleurs de catégorie A et les travailleurs de catégorie B ;
- B) Un travailleur de catégorie B ne peut pas travailler, même épisodiquement, en zone contrôlée ;
- C) Un travailleur de catégorie A doit porter, quelle que soit son affectation, un dosimètre passif et un dosimètre actif (opérationnel) ;
- D) La visite médicale est semestrielle pour les personnels de catégorie A et annuelle pour les personnels de catégorie B.

4. Cochez la ou les réponses exactes (2) :

- A) La justification d'un examen radiologique repose sur un guide du bon usage des examens d'imagerie élaboré par les sociétés savantes en collaboration avec la Haute autorité de santé ;
- B) La mention sur le compte-rendu d'éléments permettant d'évaluer la dose n'est obligatoire que pour le scanner ;
- C) Les systèmes d'évaluation de la quantité de rayonnement produits sont en option sur les matériels neufs ;
- D) Il est illégal de réaliser un examen radiologique si la demande ne comporte pas de renseignements cliniques.

5. Cochez la ou les réponses exactes (2) :

- A) Le contrôle de l'application des nouvelles obligations en matière de radioprotection des patients est réalisé par des inspecteurs de l'IRSN ;
- B) Le guide des procédures radiologiques doit pouvoir être consulté auprès de tout appareillage radiologique ;
- C) La surveillance de l'exposition de tous les travailleurs est centralisée à l'IRSN ;
- D) Le programme de formation de personne compétente en radioprotection est déterminé par le ministère de la Santé.

Réponse(s) : 1 = A, D ; 2 = A, C ; 3 = A, C ; 4 = A, D ; 5 = B, C.

Organisation de la radioprotection dans un service d'imagerie médicale

1. Cochez la ou les réponses exactes (2) :
 - A) L'étude des postes de travail pour le zonage mesure les doses potentiellement reçues avec protection individuelle (tablier plombé) ;
 - B) Plus de 95 % des personnels médicaux reçoivent une dose annuelle au corps entier inférieure à 1 mSv ;
 - C) Un tablier plombé arrête près de 99 % du rayonnement diffusé en radiologie conventionnelle ;
 - D) Une salle de radiologie conventionnelle émet des rayonnements pendant plusieurs heures par jour.

2. Cochez la ou les réponses exactes (2) :
 - A) Dans un service de diagnostic la plupart des salles doivent être signalées par un trèfle vert ;
 - B) Le port du dosimètre électronique est obligatoire pour un travailleur de catégorie B intervenant dans une zone contrôlée ;
 - C) Le dosimètre électronique doit être porté sur le tablier de plomb ;
 - D) L'exposition des extrémités ne peut pas être surveillée en temps réel.

3. Cochez la ou les réponses exactes (2) :
 - A) Un travailleur est classé catégorie A s'il travaille exclusivement en zone contrôlée ;
 - B) Un travailleur de catégorie B peut travailler en zone contrôlée ;
 - C) Une femme enceinte ne peut être ou rester classée catégorie A ;
 - D) La fiche d'exposition n'est à établir que pour les travailleurs de catégorie A.

4. Cochez la ou les réponses exactes (2). La surveillance médicale par un médecin du travail :
 - A) N'est pas obligatoire pour les radiologues libéraux ;
 - B) Permet au médecin du travail de classer le travailleur en catégorie A ou B ;
 - C) Recherche essentiellement des affections hématologiques ou oculaires lorsque l'exposition potentielle est le fait de sources scellées ;
 - D) Donne lieu à la délivrance d'une carte de suivi médical, remise au travailleur.

5. Cochez la ou les réponses exactes (2) :
 - A) Toute installation ou modification d'un appareil de radiologie impose une déclaration mentionnant tous les appareils utilisés par un service ;
 - B) Le contrôle de qualité des matériels est effectué par l'IRSN ;
 - C) Le titulaire de l'autorisation d'un scanner est le chef d'établissement ;
 - D) Le contrôle de qualité des installations de radiodiagnostic doit être effectué tous les ans.

6. Cochez la ou les réponses exactes (2) :

- A) La PCR d'un service de radiologie appartient obligatoirement à ce service ;
- B) La qualification de PCR doit être renouvelée tous les 5 ans ;
- C) La PCR d'un établissement ne gère que la dosimétrie passive ;
- D) La PCR est chargée de l'enquête en cas de dépassement de limite d'exposition.

Réponses : 1 = B, C ; 2 = B, D ; 3 = B, C ; 4 = C, D ; 5 = A, D ; 6 = B, D.

Index

A

Académie
– de médecine, 111
– des sciences, 111
Accélérateur, 13
Accident nucléaire, 121
Accréditation, 184
Acide diéthylène-triamine-penta-acétique (DTPA), 127
Activité, 16
– injectée, 115
– massique, 17
ADN, 60
Aérosol de technétium, 93
AFSSAPS, 179
Agence
– française de sécurité sanitaire des produits de santé, 172, 179
– internationale de l'énergie atomique, 172
– nationale de sécurité du médicament, 198
AIEA, 172
ALARA, 7
Alopécie, 78, 135
Alpha, 14
Alternance du champ d'entrée, 78
Aluminium, 12, 16
Américium, 14
Américium 241, 17
Américium-béryllium, 16
Amplificateur, 138
– de luminance, 181
Anémie de Fanconi, 73, 101
Angiographie, 190
Angioplastie coronaire, 78, 135
Angoisse collective, 128
ANSM, 198
Anti-oncogènes, 100
Apoptose, 63, 102
Apprentis, 175, 191
Aptitude, 176
Arrêt de croissance, 82

Article R. 1333-66 du Code de santé publique, 133
Asservissement, 147
Ataxie-télangiectasie, 64, 73, 100
ATM, 64, 100
Attaque d'une centrale nucléaire, 121
Attentat, 121
Atténuation, 21
Audits cliniques, 184
Auger, 28
Autorisation, 178
Autorité de sûreté nucléaire et de la radioprotection, 184

B

Bague radiothermoluminescente, 192
Basic Safety's Standard, 172
Becquerel, 16
BEIR, 171
Bergonié et Tribondeau, 56, 79
Bêta, 15
Bleu de Prusse, 127
Bloc opératoire, 190
Blocage du radioélément, 127
Board on Radiation Effects Research, 171
Bornes de lecture, 192
Bq, 16
British-Anti-Lewisite (BAL), 127
Brown-Sequard, 82
BSS, 172
Bystander, 61

C

Cadrans lumineux, 110
Cadre médico-légal, 182
Calculateur de dose, 132
Californium, 16
Cancer
– du col de l'utérus, 104, 105
– du foie, 101
– occulte de la thyroïde, 102

- occultes, 101, 102
- papillaire, 99
- quiescents, 101
- Capacités immunitaires, 102
- Carbone 14, 15-17, 43, 47, 48
- Carcinogène, 90
- Carcinoïdes, 118
- Carte individuelle de suivi médical, 193
- Cartilages, 82
- Cartographie, 115
- Caryotype, 67
- Cassure
 - double brin, 62, 65
 - monobrin, 61, 65
- Catalase, 63
- Cataracte, 79, 135
- Catégorie
 - A, 175, 191
 - B, 175, 191
- Catégories de travailleurs, 175
- CDA
 - des tissus mous, 24
- CDB, 62
- CEI, 38
- Cellules
 - de Leydig, 79
 - germinales, 107
 - souches, 71
- Centrage, 137
- Centreur lumineux, 137
- Cerveau, 90
- Césium, 127
 - 134, 17
 - 137, 16, 17, 47
- Chambre d'ionisation, 132
- Champ d'amplificateur, 137
- Charge, 143
- Chef d'établissement, 187, 191
- Chromosomes dicentriques, 62, 67
- CHSCT, 203
- Chute des cheveux, 78
- Ci, 16
- CIPR, 107
 - 60, 171
 - 84, 85
- Circulaire 800, 125
- Classement des personnels, 202
- Classes d'exposition, 168
- Classification de zones, 187
- Clichés comparatifs, 137
- Cobalt 60, 17
- Cobalthérapie, 23
- Code
 - de la santé publique, 172
 - de santé publique, 187
 - du travail, 172, 187
 - génétique, 62
- Coefficient de conversion, 35
- Collimateurs de champ, 148
- Collimation, 132, 137, 144
- Collision élastique, 26
- Commission
 - électrotechnique internationale, 38, 146
 - internationale de protection radiologique, 1, 171
- Compte-rendu, 133, 182
- Conseil des Communautés européennes, 172
- Constante radioactive, 18
- Contact, 120
- Contamination
 - externe, 123
 - interne, 123
- Contrainte de dose, 182
- Contre-indications, 193
- Contrôle
 - de qualité, 136, 179, 197
 - de qualité externe, 179
 - externe, 198
 - interne, 198
 - par des pairs, 184
- Coresponsabilité, 182
- Couche de demi-atténuation, 24
- Couplage charge et pas, 147
- Courbes de survie, 56
- Cristallin, 193
- CTDI
 - au volume, 38
 - pondéré, 37
 - pondéré normalisé, 38
 - volumique, 142
- CTDIvol, 38, 142
- CTDIw, 37
- Cuivre, 12
- Curie, 16
- Cystographie rétrograde, 188

D

- Débit de dose, 66, 120
- Déclaration, 178
 - à l'IRSN, 196
- Décontamination
 - externe, 126
- Décroissance radioactive, 18
- Défaillance multiviscérale, 77
- Défense de l'hôte, 102
- Délai d'apparition, 72
- Délétion, 62
- Délimitation des zones, 174, 202
- Déméthylase, 63
- Dépassement, 176
 - de dose, 202
 - de limite, 193
- Descendance, 107
- Désintégration, 16
- Détecteurs
 - à scintillations, 133
 - numériques, 136
- Détriment, 33, 107
- DFD, 134
- DFP, 134
- Diaphragme, 132, 137
- Dispersion de déchets nucléaires, 121
- Dispositifs
 - de mesure de dose, 179
 - permettant l'estimation de la dose délivrée, 178
- Distance
 - foyer-détecteur, 134
 - foyer-peau, 134
- Division territoriale de l'ASN, 179, 195
- DL
 - 100, 77
 - 50, 76
- DMA, 2
- Document
 - 53 de la CIPR, 116
 - 80, 116
- Document unique d'évaluation des risques, 194
- Dose
 - absorbée, 31
 - dans l'air, 31
 - en profondeur, 32
 - équivalente, 33
 - érythème, 2
 - limites, 83
 - maximale admissible, 2
 - moyenne multicoupes, 38
- Dosifilm, 191
 - poignet, 192
- Dosimètre
 - à lecture optiquement stimulée, 191
 - électronique, 192
 - radiophotoluminescent, 191
 - radiothermoluminescent, 133
 - thermoluminescent, 191
- Dosimétrie
 - active, 175, 187, 192
 - biologique, 67
 - clinique, 76
 - d'ambiance, 202
 - électronique, 187
 - moléculaire, 68
 - opérationnelle, 187, 192
 - passive, 175, 191

E

- EBR, 56
- Effet
 - oxygène, 60
- Effet(s)
 - abscopal, 61
 - aléatoires, 58, 99
 - Auger, 28
 - biologique relatif, 56
 - cancérogènes, 90
 - Compton, 22
 - déterministes, 58
 - épigénétique, 62
 - génétiques, 107
 - héréditaires, 107
 - malformatifs, 88
 - photoélectrique, 21
 - stochastiques, 99
- Efficience de dose, 144
- Électron Auger, 28, 114
- Électron-volt, 9
- Éléments
 - non transférables, 127
 - transférables, 127
- Embolie pulmonaire, 93
- Embolisation d'anévrisme, 135

- Énergie
 – maximale, 12
 – moyenne, 12
- Enfants, 183
- Enquête, 202
- Épaisseur
 – de coupe, 144
 – de reconstruction, 144
 – nominale de coupe, 144
- Épidermite
 – exsudative, 78
 – sèche, 78
- Épigénétiques, 62
- Épilation, 78
- Épithélium broncho-alvéolaire, 106
- Érythème précoce, 78
- Érythroïde, 76
- Essais nucléaires, 46
- Étude de poste, 188
- Étudiants, 175, 191
- eV, 9
- Évaluation prévisionnelle des doses, 174
- Évolution temporelle, 121
- Excitation, 28
- Exposition
 – globale aiguë, 74
 – interne, 43
 – médicale, 46
- Expositions exceptionnelles concertées, 177
- F**
- Facteur
 – de pondération, 32, 33
 – de rétrodiffusion, 31
 – extrinsèques, 101
 – intrinsèques, 101
- Faibles doses, 110
- Faisceau de RX, 12
- Fantômes, 37
 – anthropomorphes, 116
- FDG, 118
- Fédération nationale des médecins radiologues, 166
- Femme enceinte, 85, 175, 183, 191, 192
- Fenêtre large, 145
- Fibre optique, 133
- Fiche
 – d'exposition, 175, 191, 194
 – de poste, 203
 – de procédure, 166
- Filiation, 41
- Filtration, 12, 24
- Filtre, 12
 – papillon, 147
 – spatial, 145
- Fluor 18, 17, 118
- Fluorescence, 28
 – rayonnement, 9
- Fluorure de lithium, 133
- Fluorodéoxyglucose, 118
- FNMR, 166
- Formation, 175
 – agrément, 184
 – périodique, 202
 – périodique obligatoire, 191
- Fractionnement, 66
- FRD, 31
- Freinage rayonnement, 10
- Fukushima, 50
- G**
- Gallium 67, 118
- Gating, 147
- Gaz rares, 41, 48
- Geiger-Müller, 126
- Gène TP53, 64
- Glutathion, 63
- Granulopénie, 75
- Graphie, 137
- Gray, 31
- Greffe de moelle, 74
- Grêle radique, 82
- Grille, 136
- Grossesse, 85, 182
 – méconnue, 91
- Guide
 – des indications, 167, 183
 – des procédures radiologiques, 165, 183
 – du bon usage des examens d'imagerie médicale, 167, 182
- Gy, 31
- H**
- HAS, 166, 184
- Haute autorité de santé, 166, 184
- Hématopoïèse, 74
- Hépatite B, 101
- Hétérozygote, 101
- Hiroshima, 4, 90, 103
- Histones, 62

- Hormésis, 67, 110
 Hybridation *in situ*, 68
- I**
- IDS, 37
 Image gelée, 137
 Incapacitation neurologiques, 77
 Incorporation, 115
 Index de dose scanographique, 37
 Indicateur d'exposition, 168
 Industrie nucléaire, 47
 Inflammation chronique, 101
 Information
 – du patient en médecine nucléaire, 119
 – initiale, 202
 Initiation, 99
 Inspecteurs, 185
 Inspection du travail, 185
 Instabilité génétique, 63
 Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, 92, 184
 Intensificateur de luminance, 181
 Interaction, 21
 Interruption
 – de grossesse, 85
 – médicale de grossesse, 93
 Intervalle libre, 58
 Interventions en situation d'urgence, 126
 Inventaire des dispositifs, 199
 Inversion, 62
 Iode
 – 123, 17, 118
 – 125, 17
 – 131, 16, 17, 118
 Iodure de potassium, 127
 Ionisation, 27, 55
 Iridium 192, 17
 Irradiation rachidienne, 104
 IRSN, 92, 184, 193
 Isotopes, 41
- J**
- Joliot, 16
 Justification, 6, 169
- L**
- Lavement opaque, 188
 Lésions
 – cutanées, 135
 – de l'ADN, 61
 – double brin, 62
 Leucoencéphalopathie, 81
Life span study, 4, 103
 Li-Fraumeni, 64
 Limitation, 7
 Limite
 – corps entier, 191
 – de dose, 191
 – de dose pour fœtus, 95
 – d'exposition, 174
 – peau et extrémités, 191
 Livre
 – III, 178
 – V bis, 179
 Loi du tout ou rien, 88
 LSS, 103
 Lymphopénie, 74
- M**
- Maintenance, 136, 197
 – et assurance de qualité, 181
 Mal des rayons, 76
 Maldéveloppement, 90
 Malformations, 88
 Manifestations pulmonaires, 77
 Manipulateurs, 182
 – responsabilité, 183
 mAs constant, 147
 Matérialisation, 23
 Maturation fœtale, 90
 Mayak, 110
 Médecin
 – demandeur, 182
 – du travail, 175, 191, 193, 202
 – inspecteur régional du travail, 194
 Mégavolts, 14
 Ménopause précoce, 79
 Meta-iodobenzylguanidine, 118
 Métastases, 102
 MIBG, 118
 Millisievert, 34
 Mineurs d'uranium, 106
 Ministère du Travail, 185
 Mode scopie, 137
 Modulation de l'intensité, 149
 Moelle épinière, 82
 Molybdène, 12
 Monochromatique rayonnement, 10
 Monoénergétique, 14
 – rayonnement, 10
 Morula, 88

- MSAD, 38
 mSv, 34
 Mutations, 107
 MV, 14
 Myélite transverse, 82
 Myélopathie radique, 82
- N**
- Nagasaki, 4, 90
 nCTDI_w, 38
 Nécrose cutanée, 78
 Neutrons, 16, 26
 – thermique, 27
 Niveau
 – de preuve, 168
 – de référence, 183
 Noyau d'hélium, 14
 Numération formule sanguine, 193
- O**
- Obligation
 – de formation, 180
 – de maintenance et de contrôle de qualité, 178
 Œdème cérébral, 81
 Oncogène, 62, 99
 Opacités du cristallin, 79
 Optimisation, 6
 Organisation des secours, 125
 Organogenèse, 88
 Ostéoradionécroses, 83
Overbeaming, 144
- P**
- Pas, 146
 PCR, 175, 191, 193, 201
 PDL, 39, 141
 PDS, 35, 131
 Peau, 78
 Pelvispondylite rhumatismale, 104
 Pénombre, 37, 144
 Périmètre crânien, 90
 Période
 – biologique, 114
 – effective, 114
 – physique, 114
 – radioactive, 18
 Personne
 – compétente en radioprotection, 175, 177, 185, 187, 191, 201
 – spécialisée en physique médicale, 202
 – spécialisée en radiophysique médicale, 181
 Personnel
 – exposé, 187
 Pertinence, 168
 Phase
 – d'aggravation ou de restauration, 77
 – de latence, 76
 – de latence clinique, 76
 – prodromique, 76
 Phéochromocytomes, 118
 Phylctènes, 78
 Phosphore
 – 30, 16
 – 32, 15, 17
 Photons, 9
 Pitch, 146
 Plan
 – blanc, 125
 – rouge, 125
 Plutonium, 111
 – 239, 17, 43
 Pneumopathie aiguë radique, 82
 Polonium, 16, 127
 – 210, 43
 Pontage intrabrin, 61
 Ponts interbrins, 62
 Positon, 15
 Potassium
 – 40, 16, 17, 41
 Poumon blanc, 82
 Pré-implantation, 88
 Principes de radioprotection, 179
 Probabilité
 – de décès par cancer, 102
 – de survenue de cancer, 102
 Produit
 – de fission, 121
 – Dose.Longueur, 39, 141
 – Dose.Surface, 35, 131
 Progression, 99, 102
 Promoteurs, 101
 Promotion, 99, 101
 Prostate, 101
 Protection de la santé et environnement, 178
 Protéine P53, 63, 64, 100
 Protéomique, 68
 Protocoles écrits, 183
 Proto-oncogènes, 99

PTC, 99

Public, 174, 180

Pupitre, 188

Q

Qualité d'un faisceau, 24

R

Radical, 56

Radicaux libres, 60

Radioactivité artificielle, 16

Radiodermite, 78

– chronique, 79

Radiographie

– au bloc opératoire, 190

– au lit, 190

– numérique, 136

Radiolésion, 55

– cutanée, 78

Radiologie

– interventionnelle, 78, 131, 133, 190

Radiolyse, 60

Radionécrose cérébrale, 81

Radioprotection, contrôle, 196

Radiosensibilité individuelle, 73

Radiothérapie

– conformationnelle, 81

– métabolique, 114

Radium, 14, 16, 110

– 226, 17

Radon, 14, 106

– 222, 43

Raies, 14

Rayonnement(s)

– à TLE élevé, 101

– alpha, 14

– bêta, 15

– cosmique, 42

– électromagnétiques, 9

– photoniques, 9

– rétrodiffusé, 31

– tellurique, 41

Rayons

– gamma, 9

– X, 9

– X, production, 12

– X, tube, 12

Réactions de panique, 128

Recherche, 182

– de grossesse, 91

Recommandations de pratique clinique, 182

Reconstruction, 144

Reconstruction primaire, 144

Registre des opérations de maintenance et de contrôle de qualité, 199

Rejets

– gazeux, 48

– liquides, 47

Relation linéaire sans seuil, 4, 107, 110

Relevé dosimétrique, 193

Renseignements cliniques, 182

Réparation

– de l'AND, 64

– fautive, 66

Réplication, 62

Réponse adaptative, 66, 110

Requis diagnostiques, 166

Résolution

– en densité, 145

– spatiale, 145

Responsabilité, 173

Résultats dosimétriques, 175

RET, 99

Retard mental, 88, 90

Rhodizonate de sodium, 127

Risque

– cancérogène, 107

– génétique, 109

RLSS, 4, 107

Röntgen, 12

Rubidium, 41

S

Saturation de l'organe critique, 127

Scanner, 178

Scanographie

– interventionnelle, 190

Scintillateur, 133

Scopie pulsée, 137

Sein, 101

Service compétent en radioprotection, 201

Seuil, 71, 73

– d'enregistrement, 192

SFR, 165

Sievert, 34

Silicium, 16

SISERI, 193

Situations

– accidentelles, 177

– anormales de travail, 177

Société française de radiologie, 165
 SOD, 63
 Source
 – de neutrons, 16
 – industrielle, 128
 – médicale, 128
 Spectre
 – continu, 10
 – de raies, 10
 – discontinu, 10
 Spectroscopie, 14
 Spinhaler, 127
 Stérilité
 – définitive, 79
 – transitoire, 79
 Stimulation de l'hématopoïèse, 77
 Stochastiques, 58
 Strontium, 127
 – 90, 17, 47
 Superoxyde dismutase, 63
 Support phosphodiester, 62
 Surveillance
 – dosimétrique, 175, 190, 202
 – individuelle, 175
 – médicale, 176, 190, 193
 Sv, 34
 Syndrome de Li-Fraumeni, 73, 101
 Système informatique de surveillance de l'exposition aux rayonnements ionisants, 193

T

Tables d'angiographie, 179
 Tablier plombé, 188
 Tchernobyl, 48, 100
 Technétium 99m, 17, 118
 Télomères, 63
 Temps
 – de comptage, 117
 – de résidence, 115
 – d'émission cumulé, 188
 Tension, 143
 Tératogenèse, 88
 Test de grossesse, 94
 Thallium 201, 118
 Thorium, 14
 – 232, 17, 41
Three-Mile Island, 48

Thrombocytopénie, 75
 Thymidine, 62
 Thyroïde, 101
 TLE, 23
 Tomographie par émission de positons, 118
 Traçabilité des doses, 193
 Traceur radioactif, 113
 Transcription, 62
 Transit
 – du grêle, 188
 – œsogastroduodénal, 188
 Translocation
 – RET-PTC, 62
 Tritium, 15, 17, 43, 47, 127
 Tube de Coolidge, 12
 Tungstène, 12
 Typage lymphocytaire, 74

U

UNSCEAR, 107, 171
 Uranium, 14, 41
 – 235, 17
 – 238, 17, 18
 – appauvri, 52
 Urographie intraveineuse, 188

V

Visite annuelle d'aptitude, 194
 Visite d'aptitude, 193
 Vomissements, 76

W

Windscale, 48
 Wr, 32
 Wt, 33

X

Xénon 133, 93
 Xeroderma pigmentosum, 73, 101

Y

Yttrium90, 17

Z

Zonage, 202
 Zone
 – contrôlée, 174
 – surveillée, 174

473982 – (I) – (0,9) – CMM115 – PMS 300

Elsevier Masson S.A.S - 62, rue Camille-Desmoulins,
92442 Issy-les-Moulineaux Cedex
Dépôt Légal : juillet 2014

Composition : Thomson Digital

Imprimé en Pologne par Dimograf