



IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Synthèse par l'IRSN des rapports de l'UNSCEAR //période 2003-2007

Edition du 15 septembre 2006

Synthèse par l'IRSN des rapports de l'UNSCEAR

//période 2003-2007

Première parution le 15 septembre 2006

Rapport IRSN 2006-74

ISRN IRSN 2006/74

L'IRSN

// en bref

L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), créé par la loi n°2001-398 du 09/05/2001 et dont les missions et l'organisation ont été précisées par le décret n°2002-254 du 22 février 2002, est un établissement public industriel et commercial (EPIC), placé sous la tutelle conjointe des ministres chargés de la Défense, de l'Environnement, de l'Industrie, de la Recherche et de la Santé.

Il rassemble plus de 1 500 spécialistes : ingénieurs, chercheurs, médecins, agronomes, vétérinaires et techniciens, experts compétents en sûreté nucléaire et en radioprotection, ainsi que dans le domaine du contrôle des matières nucléaires et sensibles.

L'Institut exerce des missions d'expertise et de recherche dans les domaines suivants :

- sûreté nucléaire;
- sûreté des transports de matières radioactives et fissiles ;
- protection de l'homme et de l'environnement contre les rayonnements ionisants ;
- protection et contrôle des matières nucléaires;
- protection des installations et des transports de matières radioactives et fissiles contre les actes de malveillance.

Doctrine et synthèse

Editions propriété de l'IRSN
77-83, avenue du Général de
Gaulle
92140 Clamart
Tél : 01-58-35-88-88

Site web : www.irsnn.fr

Sauf autorisation écrite, tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tout procédé et pour tout type d'usage, sont interdits. Pour plus d'informations contacter :

IRSN
Odile Lefèvre
BP 17
92262 Fontenay aux Roses cedex
Fax : +33 (0) 1 58 35 73 82

doc.syn@irsnn.fr

Avant-propos

L'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire conduit des programmes de recherche et des études sur les risques nucléaires et radiologiques, il est responsable de missions de service public dans le champ de la prévention de ces risques et il fournit un appui technique aux autorités publiques compétentes en matière de sûreté et de sécurité nucléaires et de radioprotection. A ces différents titres, l'Institut est amené à prendre position sur un certain nombre de sujets à caractère scientifique et technique.

Dans le cadre de sa politique de transparence et avec le souci de mettre à la disposition de l'ensemble des partenaires ou parties prenantes concernés une information de qualité facilitant l'élaboration de leur propre jugement, l'IRSN publie des "documents de doctrine et de synthèse", qui présentent la position de l'Institut sur un sujet particulier.

Ces documents sont élaborés par des experts de l'IRSN, le cas échéant en collaboration avec des experts extérieurs, puis soumis à un processus de validation sous assurance qualité.

Ils reflètent la position de l'IRSN au jour de leur publication sur son **site internet**. Cette position peut être revue, en fonction du progrès des connaissances scientifiques, des évolutions réglementaires, ou de la nécessité de son approfondissement en réponse à un besoin interne, ou à des sollicitations extérieures.

Ce document peut être librement utilisé et cité, à condition d'en mentionner la source et la date de publication.

Les commentaires sont bienvenus. Ils peuvent être transmis à **l'adresse** indiquée en marge en faisant référence au document auquel ils s'adressent.

www.irsn.org

Doctrine et synthèse

IRSN
BP 17
92262 Fontenay aux Roses cedex
Fax : +33 (0) 1 58 35 79 62

doc.syn@irsn.fr

Jacques Repussard
Directeur Général

//liste des auteurs

Jean-Claude Nénot

Conseiller du Directeur de la Stratégie, du
Développement et des Relations Extérieures

Annie Sugier

Direction de la Stratégie, du Développement
et des Relations Extérieures
Membre de la Commission Internationale
de Protection Radiologique

Résumé

Le présent document décrit de façon succincte neuf rapports examinés lors de la 54^e session de l'UNSCEAR qui s'est tenue en mai 2006 et qui s'inscrit dans un cycle de travail couvrant les années 2003 à 2007.

Créé en 1955, le Comité Scientifique des Nations Unies sur les effets des rayonnements atomiques (UNSCEAR)¹ établit périodiquement des synthèses de l'ensemble des données scientifiques internationales dans son domaine de compétence.

Les rapports examinés lors de la 54^e session du Comité traitent de sujets aussi différents entre eux que les sources de rayonnements, les expositions du public et des travailleurs, les expositions dues au radon, les expositions médicales, les effets des rayonnements sur l'être humain et sur les espèces animales et végétales, la physiopathologie des effets des rayonnements, les mécanismes et l'épidémiologie de la cancérogenèse radio-induite, les mécanismes des effets des rayonnements, les effets autres que le cancer, les effets des rayonnements sur le système immunitaire, les effets non ciblés et les effets à long terme. Ces rapports sont pratiquement tous sous une forme définitive ou quasi définitive ; certains devront encore être complétés.

¹

UNSCEAR:
United Nations Scientific
Committee on the Effects
of Atomic Radiation
www.unscear.org

Préambule

Ce travail bien que publié dans la collection Doctrine et Synthèse de l'IRSN, ne constitue pas une position de l'Institut mais davantage une présentation par l'IRSN des orientations principales des rapports de l'UNSCEAR pour la période 2003-2007.

Deuxième innovation, ce travail est publié alors que les rapports dont il fait référence ne le sont pas encore. En effet l'objectif visé est d'aider les professionnels de la radioprotection à s'informer des travaux d'instances internationales telles que l'UNSCEAR au fur et à mesure de leur développement. La démarche de l'IRSN a recueilli l'assentiment du Secrétariat de l'UNSCEAR.

L'IRSN joue aussi son rôle d'organisme d'expertise public ouvert aux acteurs de la société en contribuant à la diffusion de l'information dont ses experts bénéficient lorsqu'ils participent aux travaux des instances internationales.

Les normes de radioprotection sont établies à partir des connaissances scientifiques sur les effets des rayonnements sur l'homme et l'environnement. Dans un domaine aussi complexe touchant à des disciplines diverses comme la médecine, la biologie, la chimie, la physique et la radioécologie, il est essentiel pour la communauté internationale de procéder à des synthèses régulières sur l'évolution des connaissances sur les sources et les risques. La mission du Comité Scientifique des Nations Unies sur les effets des rayonnements atomiques est de réaliser ce type de synthèse à l'intention de l'Assemblée Générale des Nations Unies. Le Comité fait appel à des consultants choisis par son secrétariat scientifique. Les rapports sont discutés lors de la réunion annuelle de l'UNSCEAR à laquelle participent les délégations de 21 Etats, et sont publiés selon un cycle de cinq ans environ.

Le cycle actuel (2003-2007) n'est pas encore achevé mais les rapports examinés lors de la 54^e session de l'UNSCEAR en mai 2006 permettent dès à présent de décrire de façon succincte les grandes lignes des neuf rapports qui seront produits prochainement.

Sommaire

1/ Introduction	9
2/ Rapports finalisés	10
2/1 Bilan des relations source-effets pour le radon domestique et professionnel ¹	10
2/2 Études épidémiologiques des cancers causés par les rayonnements ²	11
2/3 Evaluation épidémiologique des maladies cardiovasculaires et des maladies autres que les cancers causées par les rayonnements ¹	17
2/4 Effets des rayonnements ionisants sur le système immunitaire ¹	20
2/5 Effets non ciblés et effets à long terme des rayonnements ¹	24
3/ Rapports en cours d'élaboration	30
3/1 Effets des rayonnements ionisants sur les espèces végétales et animales ¹	30
3/2 Expositions dus à des accidents radiologiques ¹	31
3/3 Sources d'exposition du public et des travailleurs ²	32
3/4 Expositions médicales ¹	34
4/ Conclusions	41

1/


Introduction

Chaque sujet est présenté sous forme d'un rapport faisant le point de l'état des dernières connaissances scientifiques. Les rapports avaient fait l'objet d'examens et de discussions au cours de sessions antérieures et, pour certains, depuis quelques années ; ils constituent des versions extrêmement détaillées, validées par les représentants des différentes nations membres de l'UNSCEAR. Cinq rapports ont été présentés sous une forme quasiment finalisée ; il est prévu de les publier en 2006 ou au plus tard en 2007. Les sujets concernent : 1/ les effets du radon, 2/ les études épidémiologiques sur le cancer radio-induit, 3/ les effets des rayonnements autres que le cancer, 4/ les effets des rayonnements sur le système immunitaire et 5/ les effets des rayonnements non ciblés et à long terme. Quatre autres rapports, bien qu'encore présentés à l'état de projet, constituent des versions révisées et améliorées de rapports déjà présentés ou évoqués lors des sessions des années précédentes ; ils devraient paraître au cours des deux prochaines années. Les sujets traités sont : 1/ les effets des rayonnements sur l'environnement vivant de l'espèce humaine (publication prévue en 2008), 2/ les accidents causés par les rayonnements (2007), 3/ les sources d'exposition du public et des travailleurs (2007) et 4/ les expositions médicales (2008).

2/ Rapports finalisés

2/1

Bilan des relations source-effets pour le radon domestique et professionnel

Ce volumineux rapport est présenté régulièrement depuis déjà plusieurs années aux membres du Comité de l'UNSCEAR. Le format reste identique à celui de la version 2004, avec la même approche logique et pédagogique. Le document, très exhaustif, constitue une véritable encyclopédie des études pratiquées sur les effets du radon. La partie dévolue aux études expérimentales n'est guère développée et renvoie au rapport américain NCRP 65  sur le même sujet (2004). Cette lacune s'explique par l'objectif du rapport, qui est d'évaluer le risque chez l'homme, exercice difficile sur la seule base de modèles animaux. Le rapport dresse une revue des mesures de radon et les risques liés, tout en évaluant les résultats ; il examine successivement les études effectuées 1/ sur les mineurs exposés au risque radon du continent nord-américain (Etats-Unis, Canada, Terre-Neuve), d'Europe (France, ex-Tchécoslovaquie, Suède), de Chine et d'Australie, et 2/ sur les populations des Etats-Unis, du Canada, d'Europe (Suède, Finlande, France, Royaume-Uni, Allemagne, Italie, Tchéquie, Autriche) et de Chine. Sont particulièrement détaillées les études sur les mineurs d'uranium américains du plateau du Colorado et de l'Ontario, les mineurs d'uranium canadiens du Saskatchewan et de Port Radium, les premiers mineurs tchèques de pechblende, les mineurs de fer suédois, les mineurs d'uranium de l'ex-Allemagne de l'Est, les mineurs d'uranium français, les mineurs de spath de Terre-Neuve et les mineurs d'uranium chinois. Les auteurs français sont référencés de façon convenable : les anciens comme Jammet, Pradel, Chamaud et Zettwoog (IPSN/CEA/COGEMA) sont cités 7 fois et les experts actuels le sont plus de 20 fois : Tirmarche, Laurier et col. (IRSN) 14 fois et Monchaux et col. (CEA/DSV) 7 fois. Il faut regretter l'absence d'un chapitre sur la modélisation du risque. Il existe des améliorations notables par rapport à la version précédente, notamment en ce qui concerne les études épidémiologiques sur les conséquences de l'exposition domestique au radon, qui regroupent

1

Rapport R.654:
Sources-to-effects assessment
for radon in homes and
workplaces

2

NCRP 65:
National Council on Radiation
protection and measurements.
Evaluation of occupational and
environmental radon risk.
NCRP SC 65, 2004

les études « cas-témoins » américaines et européennes. Cette extension permet une meilleure comparaison des résultats des études sur les mineurs d'uranium et de celles sur les populations, qui montrent une concordance satisfaisante : l'excès de risque relatif de cancer du poumon est évalué à 0,16 pour 100 Bq par m³, avec une incertitude d'un facteur 3 en plus ou en moins. Cette estimation est très proche de celle du rapport BEIR VI¹ qui situe ce risque à 0,15 pour 100 Bq par m³. La contribution de Margot Tirmarche (IRSN) à ce dernier sujet fait l'objet de remerciements particulièrement chaleureux de la part du consultant. Ce dernier regrette à juste titre qu'aucune étude, qu'il s'agisse des mineurs ou du public, ne prenne en compte la distribution des doses individuelles, ce qui aurait sans doute permis d'affiner la valeur du risque. Le tabac représente un risque confondant important, puisque 90 % du risque relatif au radon domestique est lié au tabagisme. Les experts étant partagés entre l'effet multiplicatif et l'effet sub-multiplicatif du tabac sur le risque de cancer du poumon induit par le radon, le rapport ne statuera pas sur ce point.

Ce rapport se présente sous sa forme finale, sous réserve de quelques ajouts et corrections mineures, suggérés lors de la session ; de plus, une conclusion générale sera ajoutée. Il devrait être publié avant la fin de l'année 2006.

2/2

Études épidémiologiques des cancers causés par les rayonnements²

Cet épais rapport, qui inclut des tableaux et des figures détaillés, ainsi que des annexes techniques sur la méthodologie, la mesure du risque et la modélisation, complète les rapports précédents de l'UNSCEAR. Il présente les résultats d'études dont l'analyse et la synthèse n'avaient pas encore été réalisées ; il permet d'évaluer les facteurs de risque pour les organes et tissus considérés isolément. Par rapport au document précédent de 2004, il est extrêmement complet et le lecteur y trouve des sources de données et de résultats en très grand nombre. Parmi les populations particulièrement soumises au risque de cancer radio-induit qui manquaient dans les versions précédentes, il convient de citer plus particulièrement :

- **Les travailleurs du complexe nucléaire de Mayak**, qui regroupent un grand nombre de personnes ayant incorporé du plutonium, le plus souvent en quantité modérée. La mortalité par cancer est étudiée dans une cohorte de 21 500 travailleurs

1**BEIR VI:**

Committee on the Biological effects of Ionizing Radiation. The health effects of exposure to indoor radon. National Academy of Sciences (USA), National Research Council. National Academy Press, Washington, 1999

2**Rapport R.658:**

Epidemiological studies of radiation and cancer

- 2/Rapports finalisés

composée de 26 % de femmes, ayant travaillé entre 1948 et 1972, avec une dose cumulée moyenne de 0,8 Sv. Le suivi de cette population est de bonne qualité depuis 1977. Parmi les 7 067 décès observés, 1 730 sont dus à des cancers d'organes solides et 77 à des leucémies. Du plutonium a été retrouvé dans les organes de 668 individus morts d'un cancer. La prédominance de la mortalité par cancer du poumon et de l'estomac est forte. L'excès de risque relatif est de $0,30 \text{ Gy}^{-1}$ pour le poumon, le foie et le squelette avec une relation dose-effet légèrement concave vers le haut, exprimant un facteur de risque inversement proportionnel à la dose. Le niveau de risque constaté dans cette étude est très nettement inférieur à celui trouvé chez les survivants japonais d'Hiroshima et de Nagasaki ; ce résultat peut être dû aux incertitudes sur les doses, aux contaminations pulmonaires par le plutonium (parfois suffisamment élevées pour produire des fibroses), au fait que les individus les plus exposés étaient plus communément autopsiés que les autres (donc bénéficiant d'un diagnostic plus fiable). De plus, l'âge au moment de l'exposition ou le temps écoulé après l'exposition n'apparaissent pas constituer des facteurs modificateurs du risque, alors qu'il existe une diminution de ce dernier avec l'âge du sujet.

- **Les populations riveraines de la rivière Tetcha (Oural)**, soumises aux effluents radioactifs déversés sans aucune précaution et en énormes quantités quand l'ex-URSS était engagée dans la course aux armements nucléaires. Les expositions internes ont commencé à être évaluées depuis 1951 par des mesures d'échantillons prélevés lors des autopsies, depuis 1959 par des mesures *in vivo* des dentures et surtout par des mesures par anthropogammamétrie. Environ la moitié de ces populations a eu une évaluation des charges individuelles en strontium 90 (par la mesure de l'yttrium 90). Cependant, l'étude est du type « écologique », puisqu'elle repose sur la mesure des expositions internes et externes moyennes reçues par l'ensemble des habitants d'un village ; de plus il existe de grandes incertitudes sur les doses et surtout de très grandes variations dans leurs distributions (au moins deux ordres de grandeur). En conséquence, il est difficile d'accorder une grande confiance aux résultats de cette étude. Par exemple, pour les cancers d'organes solides, l'excès de risque relatif varie en fonction de paramètres inhabituels, comme l'âge au moment de la première exposition ou l'âge atteint, alors que des résultats inverses sont observés dans l'étude des survivants d'Hiroshima et de Nagasaki.

- **Les habitants du site d'essai d'armes de Semipalatinsk (Kazakhstan)**, qui occupent 10 villages soumis aux retombées des

- 2/Rapports finalisés

122 explosions aériennes pratiquées entre 1949 et 1962. L'étude considère les personnes nées avant 1961. Les résultats ne concordent pas avec ceux d'études considérées comme fiables : l'excès de risque relatif de ces populations est de $0,81 \text{ Sv}^{-1}$ pour l'ensemble des cancers solides, de $0,95 \text{ Sv}^{-1}$ pour le cancer de l'estomac et de $1,76 \text{ Sv}^{-1}$ pour le cancer du poumon. Le risque augmente avec l'âge au moment de l'exposition, ce qui est en contradiction avec l'étude des survivants d'Hiroshima et de Nagasaki ; la question reste posée de savoir si ce résultat inhabituel résulte d'un biais de nature « écologique » ou s'il exprime la différence entre les expositions aiguës des survivants japonais et les expositions prolongées dans le temps des essais soviétiques.

- **Les cohortes de travailleurs employés dans le nucléaire civil** (*International worker study*), qui regroupent, toutes nationalités et origines confondues, 407 391 personnes. Parmi elles, 190 000 ont été exclues de l'étude pour des raisons diverses : soit ces personnes n'avaient pas été employées dans une ou plusieurs installations pendant un an ou plus, soit leurs doses n'avaient pas été enregistrées, soit leurs expositions comportaient une composante interne ou neutronique. La population cumulée dans le temps est de 5,2 millions personnes-ans. La dose individuelle moyenne est de 19,4 mSv, avec une distribution des doses cumulées qui indique que 90 % des individus ont reçu moins de 50 mSv et moins de 1 % plus de 500 mSv. Parmi les décès relevés dans l'ensemble des cohortes, 6 519 sont dus à des cancers et 196 à des leucémies. L'étude principale, menée par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) ¹ montre un excès de risque relatif de $0,97 \text{ Sv}^{-1}$ pour les cancers d'organes solides et de $1,93 \text{ Sv}^{-1}$ pour la leucémie. La valeur du risque pour les cancers « solides » est très supérieure à celle trouvée par l'étude japonaise sur la durée de vie (*Life Span Study: LSS*) ² : environ huit fois plus élevée, après application du facteur de réduction de 2 pour les faibles doses et faibles débits de dose. Le taux de cancers d'organes solides est fortement influencé par le cancer du poumon ($1,86 \text{ Sv}^{-1}$). Le risque de cancer, en excluant la leucémie, les cancers du poumon et de la plèvre, s'abaisse à $0,59 \text{ Sv}^{-1}$. Cependant, comme les cancers attribuables au tabagisme représentent un excès de risque relatif de $0,21 \text{ Sv}^{-1}$, l'excès relatif aux maladies respiratoires radio-induites non cancéreuses est de $1,16 \text{ Sv}^{-1}$, alors que celui relatif à la bronchite obstructive chronique et de l'emphysème est de $2,12 \text{ Sv}^{-1}$. Les conclusions sont que, pris dans leur ensemble, les facteurs confondants du tabagisme peuvent être partiellement, mais pas totalement, responsables de l'augmentation du risque de mortalité par tous cancers, leucémie exceptée. Si certaines cohortes sont



CIRC:

International Agency for Research on Cancer: IARC Study Group on cancer risk among nuclear industry workers. Direct estimates of cancer mortality due to low doses of ionising radiation: an international study. *Lancet* Vol 344 -October 15, 1994, 1039-1043



D.L. Preston, Y. Shimizu, D. A. Pierce, A. Suyama and K. Mabuchi. Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and non cancer diseases mortality: 1950-1997. *Radiation Research*, 160, 381-407, 2003

considérées séparément, on constate que l'étude des travailleurs canadiens a une grande influence sur l'excès de risque relatif pour les cancers des organes solides. Bien que cette étude contribue seulement pour 400 cas de cancers sur l'ensemble (6,1 %) et que la dose individuelle moyenne est du même ordre de grandeur que celle de l'ensemble des cohortes réunies (19,5 mSv à comparer à 19,4 mSv), le fait de l'exclure de l'étude globale ramène le risque à $0,58 \text{ Sv}^{-1}$. De plus, le niveau de risque de cancer du poumon est anormalement fort dans cette étude canadienne, s'élevant à $3,1 \text{ Sv}^{-1}$, de même que celui de décès pour des causes aussi diverses que les maladies parasitaires et infectieuses ($4,9 \text{ Sv}^{-1}$), les maladies circulatoires ($2,3 \text{ Sv}^{-1}$), et les accidents ($8,8 \text{ Sv}^{-1}$). Ces résultats surprenants traduisent vraisemblablement de nombreux biais non élucidés dans cette étude ; ces biais entachent une grande partie de l'étude globale qui implique quinze pays.

- **Les techniciens américains en radiologie**, qui représentent une population de 146 000 personnes, dont 107 000 femmes, répertoriée entre 1926 et 1982. En 1997, parmi les 12 624 décès dans une cohorte de 90 305 personnes, le cancer était responsable de la mort dans 2 651 cas. La reconstitution des doses est en cours mais n'est pas encore disponible. Les résultats, encore fragmentaires, indiquent que le nombre d'années consacrées au travail sous rayonnements n'est pas associé à une augmentation du risque de cancer. Il semble qu'il existe une tendance à l'excès de la mortalité générale et du cancer du sein en particulier. Il existe de sérieux doutes sur les données de base de cette étude, donc sur sa robustesse, dus par exemple à la confusion entre la date d'entrée dans le métier et la date de naissance, aux incertitudes sur les doses, à l'absence de correction relative aux facteurs géographiques, etc.

- **Les radiologues et techniciens chinois**, recensés entre 1950 et 1995. Ils représentent une population de 27 011 personnes dispersées dans 24 provinces chinoises. Bien qu'il n'existe pas de données sur les doses avant 1985, l'évaluation rétrospective à l'aide de méthodes biologiques conduit à une estimation de dose individuelle moyenne cumulée de 758 mGy pour ceux qui ont travaillé avant 1960, de 279 mGy entre 1960 et 1969 et de 83 mGy entre 1970 et 1980. Un excès de l'ensemble des cancers d'organes solides est mis en évidence, avec un risque relatif de 1,19, ainsi que des leucémies avec un risque relatif de 2,17. Des excès sont aussi constatés pour le cancer du sein (risque relatif de 1,34), de la peau, mélanome excepté (4,05), de l'œsophage (2,65), du foie (1,20), du poumon (1,20) et de la vessie (1,84). L'âge au moment de l'exposition semble être un facteur déterminant pour les cancers du

- 2/Rapports finalisés

poumon et de la thyroïde. Cependant, ces résultats doivent être considérés avec une confiance limitée, car les calculs ont été pratiqués de façon peu académique, notamment en ce qui concerne le groupe témoin.

- **Le personnel navigant aérien**, soumis à des doses relativement élevées, pouvant communément atteindre 6 mSv par an mais ne dépassant pas 80 mSv sur la durée de vie, avec une composante neutronique substantielle (25 à 50 %). Trois études semblent particulièrement intéressantes : la première regroupe les personnels des compagnies européennes et les deux autres portent sur les pilotes. Les paramètres considérés diffèrent selon les études : durées de travail, temps de vol en haute altitude et niveaux d'exposition. Les deux premières études montrent un excès de mélanomes chez les pilotes de sexe masculin, alors que cet excès n'est pas retrouvé chez les femmes de la première étude (la seconde étude ne concerne que des hommes). La troisième étude ne met pas en évidence cet excès de risque spécifique. L'ensemble indique une légère tendance vers un excès de risque relatif pour tous les cancers, qui augmente avec la dose ; pour des doses supérieures à 25 mSv, le risque relatif est de 0,74. Les incertitudes sur la dose sont dues au fait que le niveau d'exposition solaire n'est pas pris en compte dans le décompte des mélanomes. Comme il n'est trouvé aucune corrélation entre l'augmentation du risque et la durée du travail, de sérieux doutes peuvent être formulés sur l'étiologie des affections cutanées attribuées aux rayonnements.

- **Les études sur les facteurs de risque spécifiques** sont particulièrement détaillées et portent sur plus d'une vingtaine d'organes et tissus : glandes salivaires, œsophage, estomac, intestin grêle, colon, rectum, foie, pancréas, poumon, os et tissu de soutien, peau, sein, utérus, ovaire, prostate, vessie, rein, cerveau et tissu nerveux central, thyroïde, systèmes lymphatique (pour le lymphome non Hodgkinien et la maladie de Hodgkin) et myéloïde pour le myélome multiple et la leucémie. Huit de ces organes n'étaient pas considérés dans le rapport UNSCEAR présenté en 2000¹. Les résultats indiquent qu'il n'est pas possible de définir une valeur unique pour le risque, qu'il soit global ou spécifique, en raison principalement des variabilités qui existent dans les méthodes utilisées pour la projection du risque. D'une façon générale, les incertitudes sur le risque concernant un organe ou un cancer donné sont plus grandes que celles liées au risque pour l'ensemble des cancers. Les faits qui semblent actuellement acquis sont les suivants :



UNSCEAR 2000: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Vol. II: Effects, Annex I: Epidemiological evaluation of radiation-induced cancer, United Nations, New York, 2000

• 2/Rapports finalisés

1/ L'excès de risque relatif ou absolu pour tous les cancers d'organes solides est proportionnel à un produit de puissances du temps écoulé depuis l'exposition à l'âge atteint ;

2/ L'excès de risque relatif pour la leucémie est aussi proportionnel à un produit de puissances du temps écoulé depuis l'exposition et de l'âge atteint alors que l'excès de risque absolu est proportionnel à une puissance du temps écoulé depuis l'exposition ;

3/ Quand ces modèles de risque sont appliqués à l'une quelconque des populations à la base des études (Chine, Japon, Puerto Rico, États-Unis, Royaume-Uni), le risque estimé sur la durée de vie de l'individu et moyenné sur les deux sexes, se situe entre 4,3% et 7,2% pour une dose de 1 Sv ; ces valeurs peuvent varier d'une population à une autre et suivant les modèles utilisés ;

4/ Ces estimations sont légèrement inférieures à celles proposées précédemment par l'UNSCEAR et à celles proposées parallèlement par d'autres organisations ; cette réduction du risque peut s'expliquer par la nouvelle dosimétrie des survivants japonais des bombardements atomiques et par l'utilisation de nouveaux modèles ;

5/ Les incertitudes sur les estimations du risque peuvent être de l'ordre de 2, en plus ou en moins ; ces estimations peuvent être réduites de 50 % dans le cas des expositions prolongées, elles aussi entachées d'une erreur de l'ordre de 2, en plus ou en moins ;

6/ Le risque de cancer est nettement plus élevé chez les enfants, pour lesquels il peut être multiplié par 2 ou 3, par rapport au risque d'une population tous âges confondus ;

7/ Les résultats de l'étude des cancers survenus chez les survivants japonais sont cohérents avec une relation dose-effet linéaire (ou linéaire-quadratique) ; en conséquence et en première approximation, l'extrapolation linéaire de l'estimation du risque à 1 Sv (dose aiguë) peut être utilisée pour estimer le risque aux faibles doses ;

8/ Enfin, pour les cancers d'organes ou de tissus particuliers, les résultats présentés en 2000 demeurent inchangés ou sont très peu différents.

Les nouveaux résultats, par rapport à ceux des rapports antérieurs, concernent des systèmes, des organes et des affections spécifiques :

1/ Les différents organes du système digestif possèdent des potentiels très différents les uns des autres pour le développement d'un cancer. Des études complémentaires sont nécessaires pour

- 2/Rapports finalisés

estimer les liens qui peuvent exister entre d'une part le cancer radio-induit du foie et d'autres parts les affections virales (hépatite C) et la cirrhose ;

2/ Le pancréas semble être relativement résistant à l'induction de cancer par les rayonnements ;

3/ Le poumon est très sensible aux rayonnements, comme le montrent les études des survivants japonais d'Hiroshima et de Nagasaki, des malades exposés pour des raisons médicales, des populations autour du site Mayak, etc. L'excès de risque relatif semble plus élevé chez la femme que chez l'homme et ne diminue pas avec l'âge. Il n'existe pas d'études démonstratives du pouvoir cancérogène des rayonnements à faibles doses et faibles débits de dose. Les rayonnements ont un pouvoir d'induction de cancer qui s'additionne, voire se multiplie ou plus, avec celui du tabac ;

4/ Le sein est un organe très sensible, pour lequel il existe des facteurs aggravants, tels que les facteurs qui prédisposent au cancer, qu'ils soient génétiques ou liés à la reproduction ;

5/ L'utérus et le rein sont relativement radio-résistants ; les cancers de l'utérus n'apparaissent qu'au delà de quelques dizaines de Gy, ou plus ;

6/ La thyroïde fait partie des organes particulièrement sensibles aux rayonnements ; l'excès de risque relatif persiste toute la vie chez les enfants, mais des études suggèrent qu'il pourrait diminuer vingt ans après l'exposition.

2/3

Evaluation épidémiologique des maladies cardiovasculaires et des maladies autres que les cancers causées par les rayonnements

Le principal reproche adressé à la précédente version de 2004 était que son titre (*Epidemiological evaluation and dose response of diseases other than cancer*) laissait supposer que de nombreuses affections radio-induites non cancéreuses, affectant différents organes et tissus, y étaient décrites. En fait, le rapport n'abordait que les affections cardiovasculaires imputables à l'exposition aux rayonnements et passait sous silence d'autres systèmes et organes connus ou suspectés d'être le siège de développement d'affections radio-induites non cancéreuses, comme les systèmes digestif et respiratoire, le cristallin de l'œil et la thyroïde. Bien que le document se soit significativement étoffé depuis 2004, la même critique reste valable pour l'actuel rapport 2006. C'est pourquoi le Comité a



Rapport R.657:
Epidemiological evaluation
of cardiovascular disease
and other non-cancer
diseases following radiation
exposure

décidé de changer le titre du rapport, qui insiste maintenant sur les affections cardiovasculaires. Il existe des raisons convaincantes pour lesquelles les autres systèmes et organes ont été occultés : 1/ ces autres affections n'étant que rarement mortelles, au contraire des maladies cardiovasculaires, les données manquent de robustesse et sont difficiles à exploiter, 2/ le nombre de maladies à considérer est important pour un même système ou organe, 3/ il existe pour chaque maladie un nombre de biais et de facteurs confondants particulièrement important et 4/ les nombreux autres facteurs de risque, auxquels s'ajoutent les facteurs socio-économiques, sont plus difficiles à définir que pour le cœur et les vaisseaux. Cependant ces arguments ne sont pas valables pour la cataracte et les maladies thyroïdiennes non cancéreuses, pour lesquelles il existe maintenant des données fiables, particulièrement parmi les travailleurs et populations affectés par l'accident de Tchernobyl. L'analyse de ces données étant faite dans le rapport de l'UNSCEAR consacré à cet accident, elle n'apparaîtra pas dans le présent rapport. Malgré les remarques précédentes sur la fausse impression que pourrait donner le rapport sur une forte prépondérance des maladies cardiovasculaires sur l'ensemble des maladies non-cancéreuses radio-induites, le document est très satisfaisant, tant dans sa forme que dans son fond. Il explique les critères de sélection des cohortes étudiées, et discute particulièrement de l'effet « travailleur en bonne santé » (*healthy worker effect*), de la qualité des données de mortalité (surestimation des maladies non cancéreuses suite à un diagnostic étiologique erroné de la mort), des effets confondants dus aux nombreuses causes des maladies cardiovasculaires et aux variations importantes en fonction du contexte socio-économique, régional et des habitudes de vie. Les biais qui apparaissent dans certaines publications sont mentionnés ; ces biais s'expliquent par le fait que, jusqu'à présent, les études épidémiologiques sur les effets des expositions à des doses inférieures aux doses-seuils pour les effets déterministes ont été orientées principalement vers la recherche des maladies malignes radio-induites. Une amélioration notable par rapport au rapport de 2004 est la suppression du chapitre dévolu aux survivants d'Hiroshima et de Nagasaki ; puisque le rapport classe les maladies par type d'affection et non par origine des cohortes étudiées, les affections constatées chez les survivants d'Hiroshima et de Nagasaki sont désormais amalgamées avec celles des autres cohortes.

Les conclusions du rapport sont particulièrement intéressantes du point de vue de la protection contre les rayonnements : alors que les maladies radio-induites autres que les cancers, affectant les systèmes cardiovasculaire, respiratoire et digestif, étaient

- 2/Rapports finalisés

jusqu'alors considérées comme appartenant à la famille des effets déterministes, avec des seuils de dose relativement élevés estimés entre 4 et 5 Gy suivant l'affection et l'organe, il apparaît maintenant que ces maladies peuvent être induites par des doses inférieures à ces valeurs. Ce point est particulièrement mis en évidence par le suivi à long terme des survivants d'Hiroshima et Nagasaki (*Life Span Study*). Ce résultat requiert de nouvelles études sur des populations exposées à des doses relativement faibles. La difficulté est qu'une large proportion (près de 50 %) des études existantes est inexploitable en ce qui concerne les effets autres que les cancers. La plupart des données sur ces effets proviennent des cohortes de malades irradiés pour des raisons médicales (traitement de maladies bénignes ou radiodiagnostic), parmi lesquelles les affections cardiovasculaires prédominent. Par exemple, le risque de maladie coronarienne augmente avec une dose au cœur entre 1,6 et 3,9 Gy. Les effets autres que le cancer sont d'autant plus crédibles que les résultats issus d'études de mortalité sont cohérents avec ceux issus d'études de morbidité. Les mécanismes biologiques qui président à l'induction de telles affections demeurent encore inconnus. Des mécanismes impliquant une atteinte primaire des micro-vaisseaux du péricarde et du myocarde, une origine monoclonale des lésions d'athéromatose ou une origine inflammatoire sont évoqués, sans qu'il soit possible d'en faire une démonstration convaincante. Le rapport conclut en soulignant le besoin d'études complémentaires, à la fois au plan de l'épidémiologie qu'à celui des mécanismes.

Le rapport a été jugé dans une forme quasi définitive et devrait donc être publié rapidement. Il ne contiendra pas de données animales, puisqu'il ne considère que des études épidémiologiques. Il reste à élaborer le chapitre conclusif, qui mettra en exergue les points suivants :

1/ Alors que jusqu'à présent le risque de maladie cardiovasculaire était lié à des doses supérieures à 40 Gy (irradiations du médiastin pour maladie de Hodgkin), il existe maintenant des données sur l'existence d'un risque à des doses plus petites, de l'ordre de 30 à 35 Gy chez les adultes et de 15 à 25 Gy chez les enfants ; pour des doses encore plus petites (patients irradiés pour des spondylarthrites ankylosantes avec une dose moyenne au péricarde de 2,5 Gy) le nombre de décès dus à des causes cardiovasculaires est plus élevé que chez des malades atteints de la même maladie, mais non irradiés, sans qu'il soit possible de tirer des conclusions nettes, en raison d'un faible excès ;

- 2/Rapports finalisés

2/ Le risque varie avec l'âge au moment de l'exposition et le temps écoulé depuis cette exposition, mais peut persister durant trois ou quatre décennies. Cette donnée issue d'études sur des patients est compatible avec les résultats du suivi des survivants d'Hiroshima et de Nagasaki ;

3/ Il serait intéressant d'étudier les cohortes des professionnels de santé exposés au début du XX^e siècle ; malheureusement l'absence de données dosimétriques interdirait toute conclusion définitive ; il en va de même pour les cohortes de travailleurs de l'industrie, mais, dans ce cas, c'est la présence de nombreux facteurs confondants non identifiés qui cause la faiblesse de ces études ;

4/ Pour les maladies autres que celles affectant le système cardiovasculaire, il existe des données en provenance du suivi des survivants d'Hiroshima et de Nagasaki qui semblent montrer une relation causale avec des doses de l'ordre de 1 à 2 Gy, ou au-dessous ; cependant, cette conclusion est moins robuste que pour les affections cardiovasculaires, à cause du nombre limité de données, la grande diversité des maladies, les mécanismes pathologiques et les étiologies variés ainsi que la multitude de facteurs confondants ;

5/ Le Comité souligne en outre que les conclusions du rapport peuvent avoir des incidences au plan socio-économique, car on assiste dans plusieurs pays et depuis quelque temps à de nombreuses requêtes de compensations pour des maladies de nature cancéreuse ou non, que les plaignants attribuent à l'exposition aux rayonnements.

2/4

Effets des rayonnements ionisants sur le système immunitaire¹

Ce rapport fait suite à celui de 2004 dont de nombreuses parties devaient être complétées. Il constitue une revue très technique de la question qui s'adresse à des spécialistes, en dépit d'un effort certain pour le rendre accessible à des lecteurs peu avertis des phénomènes qui gouvernent l'immunité. Cette étude est particulièrement intéressante car la principale fonction du système immunitaire est la protection contre les infections et le cancer, grâce à un système de reconnaissance des antigènes étrangers. La qualité de la réponse repose sur quatre paramètres : la mémoire, la spécificité, la diversité et le pouvoir de discrimination. Le rapport rappelle les éléments et paramètres qui ont une fonction dans la réponse immunitaire. Les cellules principalement impliquées dans la réponse sont les



Rapport R.661:
Effects of ionizing radiation on
the immune system

lymphocytes (lymphocytes B et T), dont la maturation a lieu dans la moelle osseuse et le thymus. Les lymphocytes B sont les cellules qui commandent la réponse humorale alors que les lymphocytes T sont responsables des réponses cellulaires. Les lymphocytes matures empruntent la circulation sanguine pour se concentrer dans les ganglions lymphatiques, la rate et les autres tissus du système lymphatique. La capacité de la barrière cutanée qui permet à l'organisme de se défendre contre les agents pathogènes peut être d'ordre inné ou acquis. Enfin l'immuno-sénescence est un phénomène complexe qui représente plus un dysfonctionnement de la régulation qu'un déclin de l'ensemble de la fonction immunitaire. Les études pratiquées à fortes doses (sub-létales) ou à faibles doses indiquent que les rayonnements induisent une baisse significative des capacités de l'ensemble des paramètres impliqués dans la réponse immunitaire. Cette réponse dépend de la dose totale, et peu ou pas du débit de dose. Ce fait suggère que les réponses à forts débits de dose permettent de prédire les effets à faibles débits de dose, et ceci dans une large gamme de doses et de débits. Les cellules et tissus lymphoïdes sont particulièrement sensibles aux rayonnements à fort TEL¹, même à des doses relativement faibles ; les perturbations persistent longtemps après l'exposition.

Après des expositions prolongées à faibles débits de dose d'animaux d'expérience il existe une adaptation du système hématopoïétique, système normalement très radio-sensible, et il se produit une radio-résistance relative. Cette modification affecte les progéniteurs ; la récupération peut être incomplète. Il existe de nombreuses preuves que ce type d'exposition peut induire l'activation des fonctions immunitaires ; dans les mêmes conditions d'exposition, des effets inhibiteurs de la croissance des tumeurs malignes, du développement des métastases et de la carcinogenèse en général, peuvent être constatés. La réponse adaptative est aussi un phénomène observé dans de nombreux systèmes : elle semble en rapport avec la réduction du phénomène d'apoptose (mort cellulaire programmée), observée pour le système hématopoïétique après de fortes doses.

Les effets à court terme chez les survivants des bombardements d'Hiroshima et de Nagasaki furent principalement constitués par un épuisement aigu de la moelle osseuse, en rapport avec la létalité cellulaire, dont l'importance est proportionnelle à la dose. Ces effets sont réversibles en plusieurs mois. Les effets les plus remarquables sont les anomalies quantitatives et fonctionnelles des lymphocytes T et B, chez les sujets ayant reçu des doses supérieures à 1 Gy. Cependant, contrastant avec l'immunité adaptative, aucun

1

TEL :

Transfert d'Énergie Linéique, qui mesure la densité d'ionisation le long du parcours d'une particule chargée d'une énergie donnée ; il s'exprime par le quotient de l'énergie moyenne, localement communiquée au milieu par la particule, par la distance parcourue dans ce milieu par cette particule.

effet quantitatif ou fonctionnel n'est observé sur l'immunité naturelle.

Chez les personnes du public ayant subi l'exposition due à l'accident de Tchernobyl, des anomalies de toutes sortes ont été détectées, mais leur interprétation est difficile en raison du grand nombre de facteurs confondants. Les données varient en fonction des populations étudiées, des doses, de la distribution des doses dans le temps, du type d'exposition (externe et/ou interne) et du temps écoulé depuis l'exposition. Des effets à court et à long terme sont détectables chez les enfants des zones particulièrement contaminées autour du site ; ils sont constitués par des modifications fonctionnelles des lymphocytes B et T, ainsi que des modifications de la biosynthèse des immunoglobulines du sérum et de la salive. Certains de ces phénomènes dépendent du niveau de la dose. Le système immunitaire est impliqué dans la pathogenèse des maladies thyroïdiennes constatées chez certaines victimes de l'accident, la combinaison de l'irradiation et de phénomènes antigéniques conduisant à une réponse auto-immune. Des réactions endocriniennes et liées au stress, des maladies respiratoires et des infections chroniques peuvent aussi avoir contribué aux divers désordres d'ordre immunologique constatés dans les populations affectées par l'accident. Chez les travailleurs qui ont participé au nettoyage du site (les liquidateurs) des réponses plus accentuées ont été trouvées chez ceux qui ont reçu les doses les plus fortes (les pompiers et les sauveteurs durant l'accident, avec des doses entre 0,5 et 9 Gy, et les intervenants des premiers jours, avec des doses entre 0,1 et 0,5 Gy).

Le bilan dressé chez des populations aussi diverses que celles constituées par les survivants japonais, les personnes affectées par l'accident de Tchernobyl ou les riverains de la rivière Tetcha montre que les perturbations du système immunitaire persistent plus de 50 ans après l'exposition. La prolifération des mutations cellulaires radio-induites peut donner lieu à une expansion de type clonal, touchant particulièrement les cellules souches hématopoïétiques, les progéniteurs spécifiques et les lymphocytes T matures. L'expansion de type clonal, qui n'est pas particulièrement menaçante pour la santé, semble apparaître quelques années après l'exposition et traduit probablement un processus de récupération des dommages causés au système immunitaire. Les études épidémiologiques semblent indiquer que les modifications radio-induites des capacités immunitaires peuvent augmenter le risque de développer les mêmes maladies que celles observées chez les personnes âgées. Les rayonnements, de la même façon que le

vieillessement naturel, pourraient ainsi accélérer l'immuno-sénescence en perturbant l'homéostasie des lymphocytes T. L'apoptose est un phénomène essentiel pour le maintien d'une homéostasie cellulaire normale dans le système immunitaire. Des effets comme l'effet de proximité (*Bystander effect*), l'instabilité génomique ou la réponse adaptative ont été mis en évidence dans les réponses immunitaires aux rayonnements ; cependant, leurs implications possibles sur la santé ne sont ni expliquées ni démontrées. Il n'en reste pas moins que la baisse des capacités de défense immunitaire peut augmenter le risque de cancer, en affectant les réactions dirigées contre les cellules malignes. Enfin, la susceptibilité individuelle aux rayonnements d'origine génétique, qui est maintenant démontrée, est souvent associée à des altérations fonctionnelles du système immunitaire.

Les principales conclusions du rapport sont les suivantes :

1/ Le système immunitaire est sans nul doute un des systèmes les plus complexes de l'organisme, reposant sur un grand nombre de cellules dispersées dans les différents organes et tissus où s'effectue la maturation des cellules souches. Les cellules de ce système communiquent à l'aide de cytokines, molécules solubles qui stimulent la prolifération et la différenciation cellulaires.

2/ Les données examinées dans le rapport indiquent que l'exposition aux rayonnements conduit souvent à une immuno-suppression, particulièrement après de fortes doses ; ce phénomène est en rapport avec la grande radio-sensibilité des lymphocytes. En plus de ces effets cytotoxiques, les rayonnements peuvent déclencher un « signal de danger », qui peut influencer la réponse cellulaire d'ordre immunitaire. En conséquence, au lieu de classer l'exposition aux rayonnements parmi les agents à fort potentiel cytotoxique (donc immuno-suppresseurs), il conviendrait de la considérer comme un agent modulateur de l'immunité.

3/ Ce rôle modulateur de l'immunité contre le cancer est maintenant mieux connu. Selon la théorie classique, les tumeurs malignes peuvent se développer si elles échappent à la surveillance, en raison soit d'une réduction de l'expression des antigènes tumoraux, soit d'une modification de la réponse. En fait, certaines promotions tumorales d'ordre immunologique peuvent être en rapport avec des infections persistantes à bas bruit, ou avec l'activation de cellules immunitaires immatures, ou encore avec le blocage cellulaire par des anticorps.

4/ Les effets des faibles doses (inférieures à 200 mGy) et faibles débits de dose (inférieurs à 100 mGy h⁻¹) font l'objet de

- 2/Rapports finalisés

controverses. Chez l'homme, l'irradiation des cellules aboutit souvent à des perturbations qui sont interprétées comme une diminution des capacités immunitaires ; certaines études semblent indiquer qu'il existe une réponse adaptative induite par les expositions prolongées dans le temps.

5/ Nombreuses sont les questions qui doivent être approfondies ; elles concernent principalement : les effets des faibles doses et faibles débits de dose comparés à ceux des doses moyennes et fortes, les effets combinés de l'irradiation et d'autres agents, les effets comparés de l'exposition externe et de l'exposition interne, les rapports entre modulation de l'immunité et cancer, les perturbations de l'homéostasie des lymphocytes T, les rapports entre l'immunité et la cancérogenèse, les vieillissements de la fonction immunitaire et de la réponse à l'inflammation.

2/5

Effets non ciblés et effets à long terme des rayonnements¹

Comparé au rapport précédent (R.638 de 2004), le document actuel est légèrement plus documenté, mais ne présente que des différences d'importance limitée. Le sujet constituait en 2004 une réelle nouveauté, car il n'avait été abordé dans les publications ou projets de publications précédents que de façon parcellaire et incomplète. Ce rapport présente le grand avantage d'être pratiquement le seul document qui fait le point sur des phénomènes qui sont décrits depuis relativement peu de temps et doivent être explorés et précisés, particulièrement en raison des répercussions qu'ils pourraient avoir sur les normes de radioprotection. L'appellation « effets non ciblés » regroupe des effets dont les mécanismes semblent être différents les uns des autres ; ils présentent une caractéristique commune : ils ne sont pas en rapport avec un dépôt d'énergie au niveau du noyau de la cellule, phénomène qui constituait, jusqu'aux années dernières, le dogme central de la radiobiologie classique. Il en découle que l'effet carcinogène est, d'une manière ou d'une autre, en rapport avec les potentiels mutagène et clastique. Ces effets ont été décrits dans un récent projet de rapport du NCRP² sur l'extrapolation du risque. Les connaissances actuelles reposent sur des résultats obtenus *in vivo* et *in vitro*.

L'instabilité génomique est connue et décrite depuis plusieurs années ; elle concerne les augmentations d'altérations du génome. Elle constitue la première étape critique de la genèse de certains



Rapport R. 659:
Non-targeted and delayed
effects of exposure to ionizing
radiation



National Council on Radiation
protection and Measurements.
Extrapolation of risks from
nonhuman experimental
systems to man. NCRP Draft
Report SC 1-4, October 2003

cancers radio-induits. Elle recouvre à la fois l'instabilité chromosomique des cellules non irradiées directement mais situées dans un environnement exposé aux rayonnements et l'instabilité des cellules issues des cellules souches non irradiées. Il semble bien que des signaux en provenance de cellules irradiées puissent stimuler des réarrangements chromosomiques dans des cellules qui n'étaient pas présentes lors de l'irradiation. Diverses observations chez l'homme ont mis en évidence le rapport entre irradiation et instabilité génomique : 1/ l'instabilité est présente dans des cultures *in vitro* de lymphocytes humains irradiés (elle a été retrouvée chez des victimes de l'accident d'irradiation survenu en Estonie en 1994), 2/ des aberrations chromosomiques des lymphocytes du sang circulant persistent chez les « travailleurs plutonium » de Sellafield (par suite sans doute d'une sélection des précurseurs irradiés dans la moelle osseuse), 3/ des mutations géniques (TP53) sont observées avec une forte fréquence (19/20) chez d'anciens patients ayant reçu du thorotrast, 4/ l'instabilité est observée dans les deuxièmes cancers après radiothérapie pour rétinoblastome bilatéral et 5/ des aberrations chromosomiques et des réarrangements chromosomiques sont constatés chez les survivants d'Hiroshima et Nagasaki ayant développé une leucémie myéloïde aiguë suite à une dose supérieure à 2 Gy. En revanche, aucune aberration cellulaire n'a été constatée chez 18 malades ayant reçu des doses entre 35 et 80 Gy administrées de façon fractionnée. Certaines observations tendent à démontrer que l'instabilité génomique joue un rôle non négligeable dans le développement des affections cancéreuses et permettent de conclure que l'instabilité persistante peut influencer fortement sur le développement de la leucémie chez l'homme.

L'effet de proximité (*Bystander effect*) est pris ici dans un sens relativement restrictif : « l'effet de proximité décrit la capacité des cellules affectées par un agent extérieur de transmettre les manifestations du dommage à d'autres cellules qui ne constituent pas la cible directe de l'agent causal ou qui sont susceptibles de l'exprimer ». Cette définition implique que les effets de proximité résultent d'un signal produit par une cellule qui interagit avec une cellule non irradiée et non de modifications radio-induites dans le milieu de culture. La majorité des connaissances actuelles provient d'expériences pratiquées *in vitro*. L'effet de proximité a été démontré en premier lieu pour les émetteurs α et des microfaisceaux de particules chargées. Ces modes d'irradiation focalisée électivement sur des constituants cellulaires et induisant la sécrétion d'une ou de plusieurs substances, peut se traduire par des effets divers : 1/ diminution des capacités de clonage par la stimulation de l'apoptose, 2/ augmentation de la mutagenèse et du

taux de transformation néoplasique, ou encore 3/ induction d'instabilité génomique dans des cellules non irradiées. Suite au transfert de milieux de culture de cellules irradiées, on observe une augmentation de la létalité cellulaire, une diminution de l'efficacité du clonage, une augmentation de la transformation néoplasique et de l'instabilité génomique. Actuellement de nombreuses expériences utilisant des rayonnements de faibles TEL aboutissent à des résultats comparables. Par exemple, l'irradiation de kératocytes humains par le ^{60}Co met en évidence un effet de proximité pour des doses entre 0,01 et 0,5 Gy, avec un effet relativement constant indépendamment de la dose ; au-dessus de 0,5 Gy, la létalité cellulaire est autant due aux effets directs de l'irradiation qu'à l'effet de proximité. En contradiction avec cet effet léthal, des réponses cellulaires différentes (prolifération) ont été observées chez des fibroblastes humains cultivés, issus de fibroblastes irradiés par un émetteur α . Cette contradiction est difficile à expliquer ; il demeure que les effets de proximité peuvent, tout au moins *in vitro*, modifier la réponse cellulaire et qu'il reste à déterminer si ces effets, qui se manifestent dans les cellules non irradiées, jouent un rôle déterminant dans la réponse des cellules irradiées *in vitro* et des cellules irradiées et non irradiées *in vivo*. Les quelques expériences pratiquées *in vivo*, centrées sur des sujets très précis, comme la formation des aberrations chromosomiques, l'étiologie des micronoyaux, le développement embryonnaire, la capacité de régénération, l'activation des macrophages ou la croissance tumorale, sont toutes d'interprétation délicate. Il a cependant été montré que le nombre de cancers du foie n'est pas dans le rapport du nombre de cellules irradiées. Il se pourrait qu'il s'agisse d'une « amplification » de l'efficacité biologique, qui se traduirait par l'augmentation du nombre de cellules extériorisant les effets néfastes, par rapport à celles qui sont directement exposées. Cet effet prédomine aux faibles doses, zone où il peut donner une réponse cellulaire complète. La seule conclusion actuellement possible est que la cible d'une exposition aux rayonnements dépasse le volume du noyau. Une autre question non résolue concerne le rapport entre l'effet de proximité et l'instabilité génomique. Il se pourrait que ces deux phénomènes, en raison de la similitude de leurs conséquences, constituent la manifestation d'un même phénomène au sein de cellules non irradiées. Dans ce cas, les fréquences élevées d'instabilité génomique pourraient s'expliquer par des phénomènes du type « effet de proximité ».

Les « effets abscopaux » correspondent à une réponse qui survient de façon significative dans des tissus distincts et à distance de la zone d'irradiation. Par exemple, après l'irradiation partielle d'un

poumon de rat, on constate des dommages de l'ADN dans des cellules du poumon non atteintes. Ce type d'effet a aussi été observé chez l'homme, à la suite d'irradiations thérapeutiques, soit isolément chez un malade (régression d'un carcinome hépatique après irradiation de métastases osseuses), soit dans des séries de malades atteints de leucémies chroniques (rémission hématologique au niveau de la moelle osseuse après irradiation de la rate). Certains auteurs, qui ont revu l'ensemble de la littérature médicale sur ce sujet, concluent qu'il est actuellement impossible de confirmer ou d'infirmier l'existence d'effets de proximité, et, par extension, d'effets « abscopaux » chez les malades irradiés.

Les « facteurs clastogéniques » ont été mis en évidence par des expériences où il a été démontré que le plasma d'animaux et d'humains irradiés contenait des facteurs capables d'induire des effets délétères dans des cellules non irradiées. Un exemple est fourni par les dommages à la moelle osseuse qui surviennent chez des enfants ayant subi auparavant une irradiation isolée de la rate. Ils ont aussi été constatés chez les personnes exposées lors de l'accident de Tchernobyl et chez les survivants japonais, en proportions égales. Ces troubles, constatés pour des doses de 200 mGy, subsistent pendant une dizaine d'années (jusqu'à trois décennies chez les japonais). Il existe une grande variabilité individuelle ; d'ailleurs tout individu n'est pas susceptible de présenter ce type d'effet. La nature précise de ces facteurs aussi dénommés « facteurs clastogéniques plasmatiques » demeure inconnue ; la participation de virus endogènes, l'interférence avec la réparation de l'ADN et la production de radicaux libres ont été évoquées. Cette dernière hypothèse semble actuellement la plus vraisemblable. Néanmoins, la présence de « facteurs clastogéniques » dans le sang périphérique de certains individus irradiés soulève la question de la représentativité des réarrangements chromosomiques comme dosimètres biologiques. Si ces effets se vérifient et qu'ils s'avèrent se produire systématiquement, ils pourraient avoir des conséquences notables au plan de l'hygiène publique ; par exemple, il n'est pas impossible de supposer que les produits alimentaires irradiés dans le but d'améliorer leur conservation constitueraient des vecteurs d'effets néfastes pour la santé. Cependant, les quelques expériences animales pratiquées pour vérifier cette hypothèse ont montré l'absence de conséquences, à l'exception d'une augmentation des cellules polyploïdes (c'est-à-dire avec plus de deux jeux de chromosomes) dans la moelle osseuse du rat nourri avec du blé irradié.

Les effets héréditaires sont les effets observés dans la descendance de parents irradiés (un seul ou les deux). La question a fait l'objet de nombreux débats contradictoires et certaines conclusions sont régulièrement remises en question. Le sujet est particulièrement bien documenté en ce qui concerne certaines espèces animales, en ce sens que des effets sont constatés, qu'ils sont décrits et que les facteurs de risque sont appréciés. Le cas de l'espèce humaine est complètement différent, puisqu'à ce jour aucun effet héréditaire radio-induit n'a pu y être mis en évidence, qu'il s'agisse de la descendance de cancéreux traités par radiothérapie et/ou chimiothérapie, de femmes irradiées dans leur enfance pour hémangiome, de survivants japonais aux bombes atomiques (la cohorte comporte 31 150 enfants). Une étude récente, portant sur des habitants de Belarus dans la région de Mogilev, particulièrement contaminée par les retombées de l'accident de Tchernobyl, va dans le sens contraire puisqu'elle semble démontrer l'existence de cet effet. Cette dernière étude a été extrêmement critiquée par des auteurs britanniques, qui lui ont reproché la sélection erronée comme population témoin d'une population non exposée du Royaume Uni, pour la comparer ensuite avec celle des parents exposés en Belarus ; d'autres critiques s'adressent à l'oubli d'autres polluants et d'affections virales, ainsi qu'à la signification biologique de certaines mutations. Le risque accru de cancer dans la descendance d'humains irradiés avant d'avoir conçu leurs enfants est tout aussi sujette à controverse. La survenue d'un excès de leucémies et de lymphomes chez les enfants issus de pères employés par l'usine de retraitement de Sellafield est âprement discutée depuis de nombreuses années, mais ne peut être radicalement rejetée.

Les principales conclusions du rapport sont les suivantes :

- 1/ Le rôle des effets non ciblés et des effets héréditaires sur l'induction des cancers demeure imprécis ;
- 2/ Pour l'instabilité génomique radio-induite, son rôle directif sur la progression des modifications d'ordre génétique, qui fourniraient l'impulsion nécessaire à induire des altérations du génome favorables à la cancérogenèse, est encore du domaine de la spéculation. Cette hypothèse de travail doit cependant être tempérée par les fréquences très élevées d'instabilité génomique observée à la fois *in vivo* et *in vitro* et par le fait que cette dernière se sature rapidement aux faibles doses. Il demeure que la question de l'augmentation d'une hypersensibilité héritée des parents n'est pas résolue et pourrait avoir des implications importantes.

3/ La plupart des estimations du risque de nature héréditaire a reposé dans le passé sur les types classiques de mutations observées chez des populations très importantes de mammifères faciles à étudier ; il ne semble pas nécessaire, au vu des études les plus récentes, de modifier la quantification du risque génétique proposée dans les rapports antérieurs de l'UNSCEAR. Cependant, il n'est nullement évident que l'instabilité trans-générationnelle radio-induite conduirait à une prolifération d'effets importants du point de vue clinique dans les générations successives. Puisque l'UNSCEAR estime actuellement que le risque pour la première génération est transmis, pour nombre d'effets, aux générations suivantes, les quelques exemples de prolifération qui existent ne devraient pas modifier l'estimation actuelle du risque ;

4/ Pour l'effet de proximité (*Bystander effect*), puisqu'il se limite à l'organe exposé et que les facteurs de risque concernent les organes et non les cellules, il est inclus dans l'enveloppe de l'estimation du risque ;

5/ Il semble acquis que les connaissances sur ces familles d'effets, instabilité génomique, effet de proximité, effets abscopaux, facteurs clastogéniques et effets héréditaires sont encore à leurs débuts. Il semble que ces effets amplifient l'efficacité d'une dose donnée, par l'augmentation du nombre de cellules qui extériorisent un effet, par rapport au nombre de cellules directement irradiées.

6/ S'il était démontré que ces effets sont courants à tous les types de rayonnements, les hypothèses actuellement prises en compte par la radioprotection conduiraient à une sous-estimation du risque radiologique, tout au moins pour les niveaux d'exposition habituellement rencontrés dans la vie courante. Il ne faudrait cependant pas occulter le fait que les systèmes biologiques ont démontré leur remarquable capacité d'adaptation à l'environnement auquel ils sont exposés, en particulier aux faibles doses. De plus, les multiples incertitudes et l'insuffisance de preuves sur les réelles conséquences de ces effets suggèrent qu'ils ne devraient pas remettre en cause les estimations actuelles des risques de cancer et d'effets héréditaires.

7/ Il est essentiel de reconsidérer les deux concepts de dose et de cible.

8/ Il semble prudent de considérer la combinaison des effets directs et indirects dans la modélisation de la cancérogenèse radio-induite.

9/ Enfin, il convient de noter que les effets non ciblés peuvent être produits par des agents nocifs autres que les rayonnements.

3/ Rapports en cours d'élaboration

3/1

Effets des rayonnements ionisants sur les espèces végétales et animales¹

Ce document de 102 pages est relativement nouveau ; il fait suite à un rapport produit en 1996, qui reposait sur des données limitées en nombre et en qualité. Il était alors conclu que les expositions dues aux activités humaines, principalement celles provenant du radon et de ses produits de filiation pour l'environnement terrestre, du polonium 210 pour l'environnement aquatique et des émetteurs alpha pour les environnements terrestre et aquatique, constituaient un ajout significatif à l'exposition d'origine naturelle. En 2005, il a été convenu que les travaux de l'UNSCEAR devaient se concentrer sur l'évaluation des niveaux d'exposition des espèces non-humaines et des effets subis, se situant ainsi en amont de ceux de la CIPR et de l'AIEA, qui proposent des normes de protection. La version 2006 du rapport constitue une revue qui paraît relativement exhaustive sur : 1/ les méthodes et résultats des évaluations des niveaux d'exposition (choix des organismes de référence, transferts dans les environnements terrestre, aquatique et marin, et 2/ les effets somatiques et génétiques constatés sur les plantes terrestres et les animaux terrestres, aquatiques et marins, considérés à titre individuel ou collectif. Le rapport a pour objectif d'être complémentaire des publications faites sur le même sujet par d'autres organismes internationaux ou nationaux, comme la CIPR (2003)², l'AIEA (2005)³, le Forum Tchernobyl organisé sous l'égide des Nations-Unies (2005)⁴, FASSET (2004)⁵, ERICA (2003)⁶, le Département de l'Energie⁷ des USA et les autorités du Canada⁸. Récemment la délégation française à l'UNSCEAR a demandé qu'un chapitre sur « *les mécanismes biologiques de la réponse à l'agression du biotope par les rayonnements* » soit ajouté,

¹

Rapport R.662:
Effects of ionizing radiation on
non-human biota

²

CIPR : Commission Internationale
de Protection Radiologique. Cadre
méthodologique pour évaluer
l'impact des rayonnements
ionisants sur les espèces non
humaines. Publication 91 de la
CIPR, IRSN, Ed. TEC & DOC,
Lavoisier Ed., 2005 (2003 pour
l'édition originale en anglais)

³

AIEA: International Atomic Energy
Agency. Draft plans of activities on
the radiation protection of the
environment. IAEA, GOV/2005/49,
24 August 2005

⁴

The Chernobyl Forum: Chernobyl's
legacy: Health, Environmental and
Socio-economical impacts and
Recommendations to the
Governments of Belarus, the
Russian federation and Ukraine.
IAEA, WHO, FAO, UNDP, UNEP,
UN-OCHA, UNSCEAR. IAEA,
Vienna, 2005

⁵

FASSET: Framework for
Assessment of Environmental
Impact, Final Report. Developed
under EC 5th Framework Program.
Contract FIGE-C

⁶

ERICA: Environmental Risk from
Ionizing Contaminants:
Assessment and Management.
Developed under EU 6th
Framework Program. Contract
F16R-CT-2004-508847, 2003

⁷

United States Department of
Energy. A graded approach for
evaluating radiation doses to
aquatic and terrestrial biota. DOE-
STD-1153-2002, US DOE, 2002

permettant de définir pour de nombreuses espèces les méthodes appropriées de surveillance. La proposition faite par la délégation française des thèmes à traiter dans ce nouveau chapitre a été bien accueillie ; comme le sujet a semblé trop ambitieux pour le prochain rapport, il lui a été demandé de préparer une synthèse, en se focalisant 1/ sur les paramètres principaux qui jouent sur la réponse biologique à l'agression par les rayonnements et 2/ sur l'importance de la compréhension de ces phénomènes pour l'interprétation des effets biologiques. Considérant que les modifications de la reproduction constituent un indicateur plus sensible que la mortalité, l'UNSCEAR estime que des débits de dose délivrés de façon prolongée et inférieurs à $100 \mu\text{Gy h}^{-1}$ ne devraient pas avoir d'effets significatifs sur les individus les plus exposés de la plupart des espèces terrestres. Pour les espèces du milieu aquatique, il estime de même que des débits jusqu'à $400 \mu\text{Gy h}^{-1}$ ne devraient pas se traduire par des effets néfastes dans une population donnée.

3/2

Expositions dus à des accidents radiologiques

Ce rapport relativement court est très récent et est censé dresser l'inventaire des accidents dus à des sources variées de rayonnements. Bien qu'en préambule il soit clairement indiqué que le document n'a pas l'ambition de dresser un bilan exhaustif, il semble anormal que certains accidents graves ne figurent pas dans la liste, alors que de nombreux accidents qui n'ont entraîné que des conséquences peu importantes pour les victimes, pour la société et/ou l'environnement sont détaillés. Certes il n'est pas possible de dresser un tableau complet des accidents, d'autant plus que la définition du terme « accident » reste imprécise, mais le rapport risque de donner une idée fautive de la répartition et de la gravité des accidents radiologiques suivant les sources et leurs activités. Ainsi, il ne ressort pas clairement que les sources « tueuses » sont les sources puissantes qui émettent des rayonnements de fortes énergies (cobalt 60 par exemple), et que les petites sources industrielles (iridium 192 par exemple) sont responsables du plus grand nombre d'accidents. Ce n'est sans doute pas le rôle de l'UNSCEAR de tirer les leçons des accidents (l'AIEA revoit en détail chaque accident grave en examinant ses causes, ses circonstances et les leçons à en tirer), mais le Comité aurait pu faire plus que de lister certains accidents, en suivant une classification selon l'utilisation des sources (nucléaire civil et militaire - avec une

•3/Rapports en cours

8

Advisory Committee on Radiological Protection (ACRP22). Protection of non-human biota from ionizing radiation. Canadian Nuclear safety Commission (CNSC), INFO-0703, March 2003

1

Rapport R.660 :
Exposures from radiation accidents

préférence marquée pour les accidents de criticité - industrie, sources orphelines, transport et médecine).

3/3

Sources d'exposition du public et des travailleurs

Ce rapport volumineux constitue une actualisation des données fournies dans les anciens rapports de l'UNSCEAR. Le sujet, qui constitue une de raisons d'exister de l'organisme, est en effet régulièrement examiné. Le rapport passe successivement en revue, 1/ pour l'exposition du public : les sources naturelles en général, celles dont l'importance est augmentée par des activités humaines, les sources relevant d'activités civiles et militaires, et 2/ pour les travailleurs : les méthodes d'évaluation des doses, les sources naturelles, les sources relevant d'activités civiles et militaires. Le rapport comporte 110 tableaux détaillés (occupant 114 pages) et 47 figures (occupant 56 pages), qui constituent des références de grand intérêt. Les principales conclusions sont les suivantes :

1/ L'estimation du niveau moyen de l'exposition naturelle demeure inchangée ; elle se situe aux environs de 2,4 mSv par an, avec une contribution majoritaire du radon. La distribution des doses sur l'ensemble du globe terrestre suit une loi log-normale et la plus grande part des expositions se situe dans la fourchette 1 – 10 mSv par an ;

2/ Les expositions dues à des sources naturelles modifiées par l'homme prennent une importance particulière, du fait que de nouvelles sources sont identifiées et que les doses résultantes sont estimées en fonction de scénarios divers. Cependant, il n'est pas encore possible de faire un bilan global de l'inventaire de ces sources, qui permettrait de procéder à une extrapolation valable pour la planète ;

3/ Dans cette catégorie de sources, les résidus de mines représentent des quantités énormes de matériaux contenant des radionucléides naturels en concentration plus élevée que dans l'environnement normal ; de ce fait, ces résidus posent le double problème de leur entreposage et de la restauration des sites. La dose à la population due à ces résidus n'est pas élevée, mais le nombre de personnes recevant des faibles doses peut être grand ;

4/ Les réacteurs nucléaires civils ne sont pas à l'origine de rejets de produits radioactifs en grande quantité ; les doses en rapport sont donc faibles. Pour l'ensemble du cycle nucléaire, les expositions



Rapport R.656:

Exposures of the public and workers to various sources of radiation

collectives locales et régionales sont estimées à $0,72 \text{ homme Sv (GW a)}^{-1}$. Le calcul aboutit, pour une production énergétique annuelle de 272 GW, à une dose collective par année de production de l'ordre de 196 homme Sv. Pour une population locale et régionale d'environ 250 millions de personnes, cette dose collective correspond à une dose individuelle moyenne inférieure à $1 \mu\text{Sv}$ par an. En supposant que la production d'énergie par les réacteurs nucléaires ait la même capacité pendant encore 100 ans, la dose individuelle moyenne rapportée à la population mondiale sera au maximum égale $0,2 \mu\text{Sv}$ ce qui est peu élevé en comparaison de la dose due au fond naturel ;

5/ La plus forte contribution à la dose collective due aux sources de rayonnements créés par l'homme est liée aux essais atmosphériques des armes nucléaires. Les expositions résultantes sont locales, régionales et globales, puisque les dépôts radioactifs se sont produits sur toute la surface de la terre. Les estimations conduisent à des doses individuelles qui culminent à $110 \mu\text{Sv}$ en 1963 et qui diminuent depuis pour atteindre $5 \mu\text{Sv}$ (principalement dus au ^{14}C , au ^{90}Sr et au ^{137}Cs) ;

6/ Les expositions des populations habitant à proximité des sites d'essais d'armes nucléaires sont maintenant connues ; elles peuvent être élevées, particulièrement quand les populations ont réintégré leur ancien habitat. Sur le site de Semipalatinsk, la contamination résiduelle est considérable, alors que dans les atolls de Mururoa et Fangataufa elle ne participe que de façon très modérée à l'exposition globale, et que dans les îles Marshall et de Maralinga elle dépend beaucoup des modes de vie des habitants ;

7/ Au moment de la constitution des arsenaux nucléaires, et particulièrement au cours des années 1945 à 1960, des populations en grand nombre ont été exposées aux rejets des installations militaires. Il est difficile de dresser un bilan exact, car la surveillance était de mauvaise qualité et les risques étaient occultés ;

8/ Les procédés d'enrichissement génèrent de grandes quantités d'uranium appauvri. En raison des propriétés de ce métal très dense, ses utilisations civiles et militaires sont nombreuses. Les derniers conflits ont vu l'usage d'uranium appauvri ; il existe de nombreux endroits, comme au Kosovo, en Serbie, en Bosnie et au Monténégro, ainsi qu'au Koweït et en Irak, où le public est exposé constamment à des résidus de cette nature. De nombreuses éventualités ont été examinées, de façon à évaluer les conséquences possibles de cette exposition. Il est estimé que, mis à part quelques rares scénarios, les expositions sont faibles. La question qui demeure en suspens est le

devenir à long terme de l'uranium appauvri et de sa possible migration dans les nappes d'eau souterraines.

9/ Les sites qui sont encore contaminés à la suite d'anciennes activités civiles utilisant des produits radioactifs sont très nombreux. La plupart sont contaminés par du radium, sont identifiés, et beaucoup ont fait l'objet de travaux de décontamination et sont le plus souvent interdits au public quand ils n'ont pas été réhabilités. Les anciens résidus miniers posent le même genre de problèmes. Les programmes entrepris pour restaurer les sites ont pour objectif de ramener les expositions à un niveau considéré comme acceptable pour de telles pratiques.

10/ Les accidents ne concernent en général que peu d'individus, mais les doses peuvent être élevées. Des exceptions sont constituées par les accidents de Mexico en 1983, de Goiânia en 1987 et de Taiwan en 1982-84. Le premier a causé des expositions de la population à des niveaux relativement faibles, dues au ^{60}Co qui avait été utilisé pour fabriquer des fers à béton et des éléments de mobilier. Le second, dû à la dissémination d'une source médicale de ^{137}Cs , a eu des conséquences beaucoup plus graves, causant quatre morts et vingt-huit brûlés. A Taiwan de nombreuses habitations collectives ont été construites avec des fers contaminés par du ^{60}Co ; l'exposition des résidents, bien qu'elle ait duré pendant des années, est restée à un niveau modéré.

3/4

Expositions médicales

Ce document très documenté (192 pages, dont 60 pages de texte, 110 pages de tableaux et 10 pages de propositions de formulaires et questionnaires) représente une amélioration notable du document précédent, qui n'abordait que très succinctement les deux domaines de la radiothérapie et de la médecine nucléaire, qui contribuent pourtant fortement à la dose d'origine médicale reçue par le public. Bien que ces deux sujets aient été convenablement étoffés, le rapport présente encore de nombreuses lacunes. Par exemple, les doses causées par le radiodiagnostic, dont certaines méthodes récentes particulièrement performantes (scanographie, radiographie interventionnelle, mammographie et densitométrie osseuse par exemple) sont souvent coûteuses en doses pour le patient, sont bien mieux documentées que celles en rapport avec la radiothérapie et la médecine nucléaire. Le rapport inventorie les doses reçues par les patients en radiologie pédiatrique et dentaire, ainsi que les doses reçues par le fœtus. Le bilan dosimétrique de ces techniques, qui



Rapport R.655 :
Medical radiation exposures

sont maintenant d'usage courant, présente un très grand intérêt pour les praticiens utilisateurs, car la plupart d'entre eux n'en connaissent pas toutes les implications négatives pour leurs patients, puisque n'appartenant pas le plus souvent au monde de la radiologie médicale (cardiologie, pédiatrie, traumatologie, etc.). Les techniques qui sont particulièrement irradiantes pour le patient sont bien documentées. Quelques parties restent encore à écrire, faute de documentation et de références appropriées.

Les rapports UNSCEAR précédents ont montré que la médecine fournit la plus grande partie de l'exposition d'origine humaine reçue par la population du globe. L'usage des rayonnements par la médecine repose sur trois familles de sources différentes : 1/ les rayons X utilisés pour le diagnostic et la radiologie interventionnelle, 2/ divers radionucléides utilisés pour le diagnostic et le traitement et 3/ des rayonnements de nature variée utilisés principalement pour le traitement du cancer. Indépendamment de la qualité des soins prodigués dans les pays considérés, l'utilisation des rayonnements a augmenté au fil des années, surtout en raison de la dissémination croissante des appareils médicaux dotés des sources de rayonnements. De plus, l'urbanisation croissante dans le monde a permis à un plus grand nombre de personnes d'accéder à des soins radiologiques. Le domaine de la radiologie médicale est en perpétuelle évolution, en raison des innovations permanentes des équipements. Les techniques permettant des explorations et des traitements ambulatoires ont été plébiscitées par les patients et par le personnel médical, d'où une pression continue pour favoriser des techniques modernes comme la radiologie interventionnelle (cardiologie et neurologie), la scannographie hélicoïdale ou l'imagerie numérique. Malgré l'augmentation du nombre des examens et des méthodes reposant sur l'utilisation des rayonnements, des efforts certains sont réalisés dans le but de réduire les doses individuelles ; ces efforts reposent en grande part sur les progrès techniques portant sur les équipements, la standardisation des protocoles, la mesure des doses réellement délivrées aux patients, les programmes d'assurance de la qualité, etc.

L'exposition due au radiodiagnostic augmente de plus en plus ; la raison principale de cette augmentation est le nombre croissant d'examens radiographiques par rayons X. Le nombre d'examens est estimé à 1,9 milliards entre 1991 et 1996 (contre 1,6 milliards entre 1985 et 1990), ce qui équivaut à un taux de $330 \cdot 10^{-3}$ (contre $300 \cdot 10^{-3}$). A ceci s'ajoutent 520 millions d'examens radiologiques dentaires (taux de $90 \cdot 10^{-3}$). La dose collective pour l'ensemble des

examens à visée diagnostique est de $2,33 \cdot 10^6$ homme Sv pour la période 1991-1996 soit une moyenne de 0,4 mSv par personne ($1,6 \cdot 10^6$ entre 1985 et 1990, soit une moyenne de 0,3 mSv par personne). La distribution mondiale du nombre d'examens varie énormément en fonction du niveau de développement médical du pays considéré : pour la période 1991-1996, 74 % des examens ont été effectués dans les pays particulièrement favorisés pour leur couverture sanitaire (taux de $920 \cdot 10^{-3}$), 25 % dans les pays moyennement favorisés ($50 \cdot 10^{-3}$) et seulement 1 % dans les pays peu favorisés ($20 \cdot 10^{-3}$). Pour la même période, la dose efficace moyenne par examen est de 1,2 mSv, à comparer avec 1 mSv pour les cinq années précédentes. La répartition des niveaux d'exposition entre les différents types d'examens montre que la scannographie est largement prédominante, notamment dans les pays très développés du point de vue médical avec 34 % de la dose totale ; elle détrône la radiographie de l'intestin qui ne représente que 14 %. La répartition varie avec le niveau du développement médical national : la radioscopie pulmonaire représente encore 50 % de la dose collective dans les pays moyennement développés et la scannographie seulement 2 % dans les pays peu développés. Le nombre de scannographies a augmenté de façon considérable dans des pays à infrastructure médicale particulièrement avancée : multiplié par un facteur 6 en quelques années dans certains pays européens. Certes l'introduction d'appareillages de plus en plus élaborés, comme le scanner hélicoïdal, aurait dû se traduire par une diminution des expositions, mais cette dernière n'a pas été suffisante pour compenser le nombre croissant d'examens.

Les doses dues à la mammographie ont diminué au cours des années dernières, avec l'utilisation d'équipements spécialisés : au début, des doses de 100 mGy par examen étaient courantes ; elles ont d'abord été abaissées d'un facteur 3, puis d'un facteur 10, avec des doses au sein qui se situent entre 1 et 2 mSv.

L'exposition due au radiodiagnostic dentaire diminue avec le temps contrairement à celle due au radiodiagnostic médical : 14 000 homme Sv, soit 0,002 mSv par personne entre 1991 et 1996 ($18\,000$ homme Sv, soit 0,003 mSv par personne entre 1985 et 1990). Les doses dues aux examens médicaux ne peuvent pas être directement transposées en risques potentiels, car les personnes en cause ne sont pas représentatives de l'ensemble de la population, puisque ce sont pour la plupart des personnes âgées et/ou malades. C'est l'inverse pour la dentisterie, qui s'adresse à des patients de plus en plus jeunes.

Les données sur l'exposition des enfants et des fœtus sont particulièrement intéressantes. Les études sur les enfants proviennent de services de pédiatrie de Belgique, du Royaume-Uni et d'Espagne. L'étude belge montre que la scannographie délivre des doses individuelles de 0,4 à 2,3 mSv au crâne, de 1,1 à 6,6 mSv au thorax et de 2,3 à 19,9 mSv à l'abdomen. Le traitement des varicocèles chez les adolescents délivre une dose efficace de 18 mSv. Les études sur le fœtus proviennent d'Iran, du Royaume-Uni, des Etats-Unis et d'Allemagne. Sur la base de 1 300 patientes iraniennes enceintes, examinées par scannographie pour des problèmes bénins gastro-intestinaux ou urinaires, la dose au fœtus, d'âge moyen un mois, se situe entre 6 et 8 mGy. La plupart des femmes anglaises examinées présentaient une grossesse de plus de huit semaines ; 85 % des fœtus ont reçu une dose inférieure à 5 mGy (seulement 5 fœtus avec plus de 10 mGy). L'étude américaine sur les examens pratiqués à l'aide du scanner hélicoïdal (détection d'embolies pulmonaires chez la mère) montre des doses au fœtus de 3,3 à 20,2 mGy pour le premier trimestre et de 51,3 à 130,8 mGy pour le troisième trimestre ; ces doses sont élevées, mais elles demeurent néanmoins inférieures à celles dues à la scintigraphie pratiquée dans les mêmes circonstances.

Le nombre d'effets déterministes apparus chez des patients explorés par des actes de radiologie interventionnelle est nettement sous-estimé, car ces effets ne sont pas régulièrement rapportés, en raison d'un suivi insuffisant du patient par son médecin et de l'ignorance de ce dernier quant aux complications possibles de tels actes irradiants.

La densitométrie osseuse est utilisée chez les enfants pour explorer la croissance de l'os et chez les personnes âgées pour évaluer le risque de fracture, particulièrement chez les femmes ménopausées. Le document fournit les doses efficaces, en moyenne situées entre quelques mSv et quelques dizaines de mSv, suivant le type d'examen. Il est regrettable qu'il ne donne pas les doses absorbées à l'os, qui seraient plus intéressantes, ne serait-ce qu'à titre de comparaison.

Il existe une volonté délibérée de la part des autorités, des concepteurs d'appareils et des praticiens pour réduire les niveaux d'exposition des patients. L'éducation et l'entraînement du personnel peut réduire les doses jusqu'à 40 % de leur valeur. La CIPR, dans sa Publication 73¹ de 1996 et la Directive Euratom 97/43² de 1997 recommandent des niveaux de référence pour le diagnostic, qui fixent les niveaux optimaux pour chaque type



Commission Internationale de
Protection radiologique.
Protection et sûreté
radiologiques en médecine.
Publication 73 de la CIPR.
Nucléon, 1996



European Union. Council
Directive 97/43/EURATOM on
Health protection of
individuals against the dangers
of ionizing radiation in relation
to medical exposure, and
repeating Directive
84/486/EURATOM, 1997

•3/Rapports en cours

d'examen. Enfin de nombreuses techniques permettent d'abaisser les doses dans des proportions appréciables : jusqu'à 40 % en évitant la répétition inutile des films, de 32 % à 66 % en utilisant la radioscopie pulsée pour les angiographies et en proportion appréciable avec les techniques numériques, etc. Ce rapport vient ainsi compléter de façon opportune les rapports récents de la CIPR [1-2-3-4-5] sur des pratiques de la radiologie médicale particulièrement irradiantes pour le patient et pour le personnel médical.

La médecine nucléaire utilise régulièrement divers produits radioactifs à des fins diagnostiques ou thérapeutiques, essentiellement le ^{99m}Tc et les ^{123}I , ^{125}I et ^{131}I . Le rapport rappelle la taille des populations de patients concernés par les procédures à visée diagnostique : entre 1991 et 1996, il y a eu dans le monde 32,5 millions d'examens par an, soit un taux de $5,6 \cdot 10^{-3}$ (24 millions dans la période précédente de cinq ans, soit un taux de $4,5 \cdot 10^{-3}$) ; ce nombre reste petit comparé à celui concernant le radiodiagnostic. La plus grande partie (89 %) de ces examens et traitements a été effectuée dans les pays très développés, une moindre part (11 %) dans les pays moyennement développés et une infime part (inférieure à 1 %) dans les pays peu développés. La dose efficace collective correspondante, 150 000 homme Sv soit 0,03 mSv par personne sur la période 1991-1996 demeure inchangée par rapport à la période précédente, ce qui indique une baisse des niveaux d'expositions de chaque type d'examen, puisque le nombre d'examens a augmenté. L'utilisation de radionucléides à des fins thérapeutiques concerne 400 000 traitements par an, soit un taux de $0,065 \cdot 10^{-3}$, valeur égale à celle relative à la curiethérapie.

La radiothérapie s'adresse principalement à des patients atteints de cancers. Ce type de traitement est souvent associé à la chirurgie et/ou la chimiothérapie. La proportion de malades traités par les rayonnements peut varier considérablement d'un pays à un autre. Le traitement peut faire appel à deux techniques : la téléthérapie, qui utilise un faisceau de rayonnements dirigé sur la cible à traiter, et la curiethérapie, qui utilise une source radioactive directement placée dans une cavité naturelle ou au sein d'un organe. Enfin, des sources non scellées et des anticorps monoclonaux sont utilisés pour le traitement des métastases. Les rayonnements utilisés par la téléthérapie appartiennent à quatre familles : 1/ les rayons gamma du ^{60}Co , 2/ ceux du ^{137}Cs , de plus en plus remplacé par les rayons X de 50kVp à 300 kVp, 3/ les électrons et rayons X produits par les accélérateurs linéaires et 4/ les protons ou particules chargées issus de cyclotrons et de synchrotrons. Ces dernières machines sont



International Commission on Radiological protection. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals. ICRP Publication 80, Pergamon Press, Vol. 28, N° 3, 1998



International Commission on Radiological protection. Pregnancy and medical radiation. ICRP Publication 84, Pergamon Press, Vol. 30, N° 1, 2000



International Commission on Radiological protection. Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures. ICRP Publication 85, Pergamon Press, Vol. 30, N° 2, 2000



International Commission on Radiological protection. Prevention of accidental exposures to patients undergoing radiation therapy. ICRP Publication 86, Pergamon Press, Vol. 30, N° 3, 2000



International Commission on Radiological protection. Managing patient dose in digital radiology. ICRP Publication 93, Pergamon Press, Vol. 34, N° 1, 2004

encore rares et concentrées en Europe, aux Etats-Unis et au Japon. Le nombre total de traitements par radiothérapie (externe et interne) effectués dans le monde entre 1991 et 1996 est estimé à 5,1 millions soit un taux de $0,9 \cdot 10^{-3}$, dont 90 % par téléthérapie. Cette valeur est la même que celle correspondant à la période 1985-1990. Comme pour le radiodiagnostic, il existe de grandes variations suivant le niveau de développement médical du pays : 51 % des traitements ont été effectués dans les pays très développés (taux de $1,7 \cdot 10^{-3}$), 43 % dans les pays moyennement développés (taux de $0,7 \cdot 10^{-3}$), 6 % dans les pays peu développés (taux de $0,5 \cdot 10^{-3}$) et 1 % dans les pays très défavorisés (taux de $0,07 \cdot 10^{-3}$).

La radiothérapie intravasculaire, techniquement comparable au radiodiagnostic interventionnel, consiste à introduire une source scellée dans la lumière du vaisseau sténosé ; cette technique de traitement localisé d'un grand nombre d'affections vasculaires n'est guère discutée, mais les doses en rapport avec la plupart des procédures couramment utilisées sont fournies sous forme de tableau : les expositions locales sont rarement inférieures à quelques dizaines de mGy, dépassent souvent quelques centaines de mGy et atteignent même parfois quelques Gy.

Le rapport met en évidence la grande variabilité du nombre d'équipements disponibles dans les pays, suivant le niveau du développement national. Par exemple, le parc des accélérateurs linéaires, rapporté à un million d'habitants, est de 3,04 dans les pays à fort développement, de 0,26 dans les pays moyennement développés, de 0,06 dans les pays peu développés et de zéro dans les pays les moins développés. La gamme de variabilité est grande : aucun accélérateur linéaire en Lituanie et en Equateur alors qu'il en existe 7,28 par million d'habitants aux Etats-Unis. Le nombre de traitements pratiqués, donc de malades en bénéficiant, est en rapport direct avec le nombre de machines disponibles. Ainsi, la fréquence des traitements par téléthérapie varie d'un facteur 30 entre les pays les mieux pourvus et les pays les moins favorisés : la fréquence des traitements est entre 0,7 et $37 \cdot 10^{-3}$ dans un échantillon de 28 pays très développés, entre 0,05 et $3,1 \cdot 10^{-3}$ dans un échantillon de 19 pays moyennement développés et entre 0,05 et $2,1 \cdot 10^{-3}$ dans un échantillon de 6 pays peu développés.

En conclusion, ce rapport demande à être complété sur de nombreux points. Des questionnaires fournis en annexe, devraient permettre de fournir les informations qui manquent dans les domaines de la médecine nucléaire et de la recherche biomédicale, ainsi qu'en ce qui concerne de nombreux pays en voie de

développement. Certes il est clair que la radioprotection ne constitue pas le sujet du rapport ; il est cependant dommage que le bilan des expositions du personnel médical, qui devient préoccupant dans le cas de certaines méthodes modernes d'investigation, ainsi que l'impact dosimétrique du dépistage systématique par radiodiagnostic, n'apparaissent pas dans ce rapport.

4/

Conclusions

Ces documents peuvent se classer en deux groupes : 1/ les rapports de nature technique, qui font partie de la mission dévolue normalement à l'UNSCEAR et qui correspondent en fait à la raison de son existence : l'inventaire des sources de rayonnements et la quantification des expositions publiques et professionnelles, l'analyse détaillée des expositions dues au radon, les expositions médicales, les effets des rayonnements sur l'être humain et les espèces animales et végétales ; 2/ les rapports qui traitent de sujets de nature scientifique, qui se situent en amont des premiers et qui explorent les aspects étiologiques et physiopathologiques des différents effets des rayonnements : les mécanismes et l'épidémiologie de la cancérogenèse radio-induite, les mécanismes des effets autres que le cancer, les réactions du système immunitaire vis-à-vis de l'exposition aux rayonnements, les effets non ciblés et les effets à long terme.