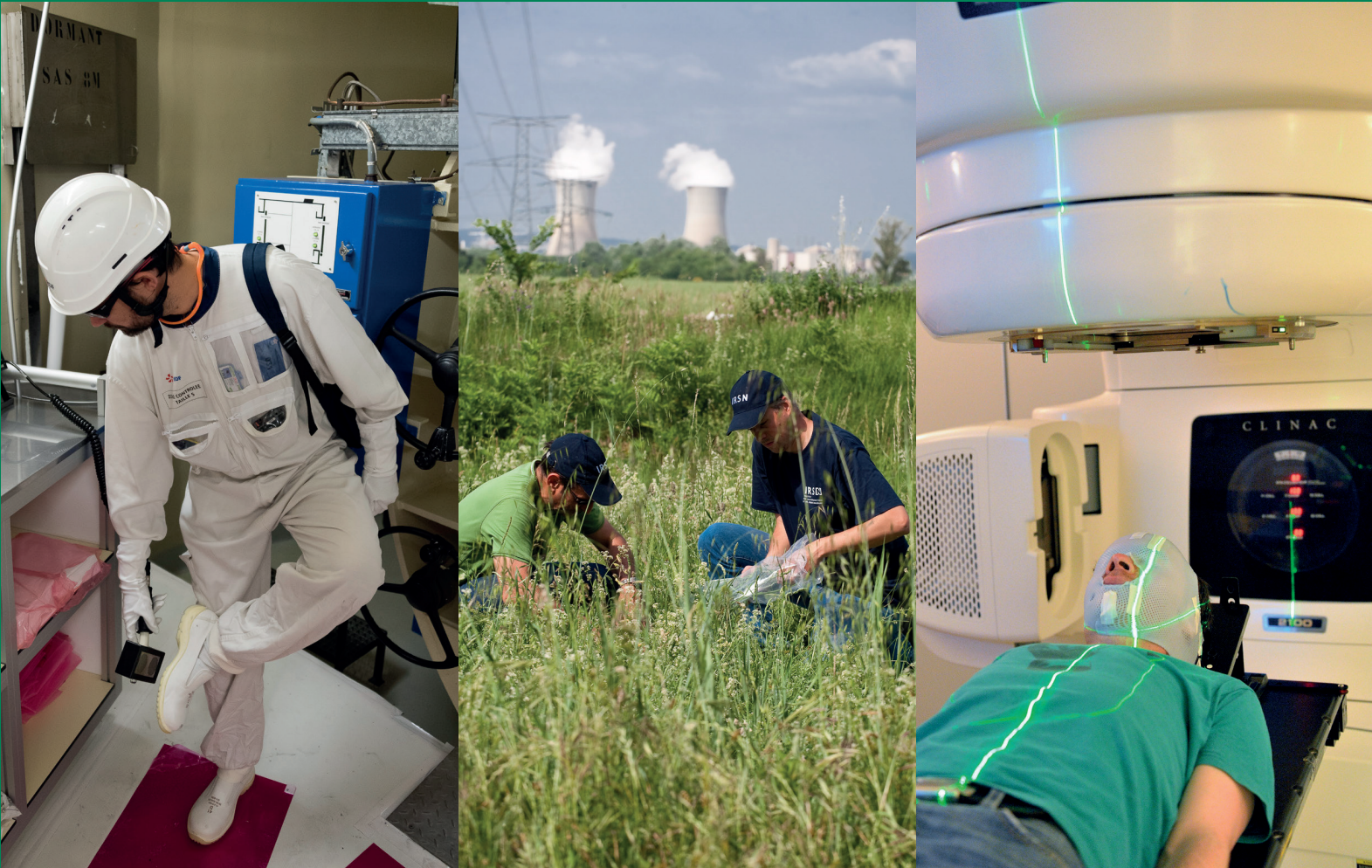


RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

« Se défier du ton d'assurance qu'il est si facile de prendre et si dangereux d'écouter »
Charles Coquebert, Journal des mines n°1, Vendémiaire An III (septembre 1794)



Les rayonnements ionisants :
leurs risques et leur gestion





RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

ISSN 2271-8052 (en ligne)

ISSN 1268-4783 (imprimé)

Série trimestrielle - N°117 - Janvier 2025

Rédaction

Conseil général de l'Économie (CGE)
Ministère de l'Économie, des Finances
et de la Souveraineté industrielle et numérique
120, rue de Bercy - Télédock 797
75572 Paris Cedex 12
Tél. : 01 53 18 52 68
<http://www.annales.org>

Grégoire Postel-Vinay
Directeur de la publication
et Rédacteur en chef

Alexia Kappelmann
Secrétaire générale

Daniel Boula
Secrétaire général adjoint

Magali Gimon
Assistante de rédaction et Maquettiste

Nuria Gorris
Webmestre et Maquettiste

Publication

Photo de couverture
Laurent Zylberman/Graphix-Images/Médiathèque IRSN
Noak/Le bar Floréal/Médiathèque IRSN
Laurent Zylberman/Graphix-Images/Médiathèque IRSN

Iconographie
Daniel Boula

Mise en page
Magali Gimon

Impression
Dupliprint Mayenne

Membres du Comité de rédaction

Pierre Couveinhes
Président du Comité de rédaction

Mireille Campana

Fabrice Dambrine

Dominique Dron

Jean-Luc Laurent

Richard Lavergne

Philippe Merle

Michel Pascal

Didier Pillet

Grégoire Postel-Vinay

Anne-Cécile Sigwalt

Claire Tutenuit

Benjamin Vignard

La mention au regard de certaines illustrations du sigle « D. R. » correspond à des documents ou photographies pour lesquels nos recherches d'ayants droit ou d'héritiers se sont avérées infructueuses.

Le contenu des articles n'engage que la seule responsabilité de leurs auteurs.

Les rayonnements ionisants : leurs risques et leur gestion

05

Préface

Frank DECONINCK

06

Introduction

Patrick DEVIN

Nature et enjeux

10

Rayonnements non ionisants
et rayonnements ionisants,
des faux frères ?

Emmanuel NICOLAS

15

Pas de renouveau du nucléaire
sans une radioprotection
– et une sûreté nucléaire – forte

Géraldine PINA

17

Le maintien et le renouvellement
des compétences en radioprotection
dans le cadre de la relance
de la filière électronucléaire française

Éric GADET

Les rayonnements ionisants

23

Sources naturelles et artificielles
de rayonnements ionisants :
quelle exposition des personnes ?

Éric BLANCHARDON et Philippe RENAUD

30

Réponse individuelle aux radiations
ionisantes : nous ne sommes pas égaux
face aux dommages de l'ADN

Nicolas FORAY

35

Le défi des expositions multiples
additionnelles à celle des RI

Michel BOURGUIGNON

39

Progrès en matière de dosimétrie
personnelle : vers une dosimétrie
en temps réel

Filip VANHAVERE et Olivier VAN HOEY

44

Surveillance de l'exposition
interne des intervenants
sur les installations nucléaires EDF

Dr Thomas EHRET, Dr Solenn LETALON,
Dr Agnès KIRBY et Dr Éric LAPORTE

49

Effets sur la santé humaine
des faibles doses de rayonnements
ionisants : un bref état
des connaissances issues
des études épidémiologiques

Corinne MANDIN, Énora CLÉRO
et Dominique LAURIER

Aspects internationaux et réglementaires

53

Les acteurs internationaux de la radioprotection et leurs rôles

Laurence LEBARON JACOBS

57

L'évolution du système international de radioprotection

Werner RÜHM

60

L'Association pour le Contrôle de la Radioactivité dans l'Ouest (ACRO), une vigie citoyenne de la pollution radioactive de l'environnement

Pierre BARBEY, David BOILLEY et Mylène JOSSET

Radioprotection de l'environnement

65

Les enjeux de la surveillance de la radioactivité de l'environnement

Nathalie REYNAL, Céline AUGERAY et Nicolas BAGLAN

69

Le cycle du combustible nucléaire et la radioprotection

Patrick DEVIN

77

La radioprotection : enjeu majeur pour la vie dans l'espace

Jean-François BOTTOLLIER-DEPOIS

83

Convention OSPAR et travaux du Comité des Substances Radioactives (RSC)

Benoît BETTINELLI, Brice DELIME, Nathalie REYNAL, Nicolas BAGLAN, Coralie NYFFENEGGER, Hélène CAPLIN, Catherine BORDIER-OLIVEIRA, Pierre-Yves HEMIDY et Patrick DEVIN

La radioprotection médicale

87

Radioprotection des professionnels en radiologie conventionnelle et interventionnelle

Emmanuel MUSEUX

92

Les enjeux des expositions médicales répétées aux rayons X pour les patients

Michel BOURGUIGNON

95

Enjeux des doses délivrées en tomodensitométrie

Jean-François CHATEIL

99

La médecine nucléaire : spécificités et enjeux particuliers en radioprotection

Jean-Philippe VUILLEZ

104

Diminution des rayonnements ionisants en milieu médical, l'intelligence artificielle est-elle la solution ?

Anaïs BARATEAU

Situations accidentelles et post-accidentelles

107

La radioprotection des patients
est une exigence première
de la radiothérapie

Jean-Marc SIMON

112

La réponse gouvernementale
en cas d'urgence radiologique

Sylvie SUPERVIL et Lionel LACHENAUD

116

Le Service de Protection Radiologique
des Armées : la radioprotection
dans le cadre de la dissuasion

Pr Jean-Christophe AMABILE,
Dr Emilie JAMET-ANSELME,
Dr Annabelle BONNIN DUSSAUD,
Lieutenant-colonel Ingrid RICHARD,
Dr Manon CHANTRE, Dr Denis CHIANÉA
et Guillaume GARNIER

122

La gestion post-accidentelle
des conséquences d'un accident
nucléaire : le CODIRPA

Olivier RIVIÈRE

127

Les conséquences sociétales
des accidents nucléaires
et le processus de co-expertise

Jacques LOCHARD, Thierry SCHNEIDER
et Jean-François LECOMTE

131

Traductions des résumés

137

Biographies des auteurs

Ce numéro a été coordonné
par Michel BOURGUIGNON et Valérie CHAMBRETTE

Préface

Par Frank DECONINCK

Professeur émérite, Vrije Universiteit Brussel

et Président honoraire du Centre d'étude de l'énergie nucléaire belge (SCK CEN)

La vie sur Terre est apparue il y a environ 4 milliards d'années et a évolué en se complexifiant de manière extraordinaire. Durant tout ce processus, la Terre a baigné dans un environnement de rayonnements variés, provenant à la fois de l'espace et du sol, à des niveaux bien plus élevés qu'ils ne le sont aujourd'hui. Ces rayonnements ont joué un rôle déterminant dans l'apparition et le développement de la vie ; il suffit de penser à la production d'oxygène par les cyanobactéries ou à la photosynthèse, rendue possible grâce à l'énergie solaire, sans laquelle le règne végétal n'aurait jamais vu le jour. De plus, la radioactivité terrestre a permis de maintenir une planète au noyau chaud, propice à l'épanouissement de la vie.

À notre connaissance, les radioactivités atmosphérique et tellurique naturelles qui, par exemple, conduisent à charger les organismes vivants en carbone 14, en potassium 40 et en divers noyaux radioactifs lourds comme l'uranium et ses descendants, ne semblent pas être à l'origine de pathologies humaines. Les rayonnements cosmiques, qui exposent les populations vivant en altitude à de faibles doses, non plus. En tout cas, on ne sait pas les mettre en évidence. De fait, aucun lien direct avec des maladies humaines n'a pu être clairement établi. Le risque reste donc faible et ne justifie pas de mesures particulières de radioprotection.

Néanmoins, nous savons que les rayons ultraviolets du soleil, bien qu'ils ne soient pas ionisants, se situent à la limite de cette catégorie et sont responsables d'un nombre significatif de mélanomes cutanés et autres cancers de la peau. Les surfeurs et amateurs de sports nautiques, particulièrement exposés, en sont les premières victimes. Aujourd'hui, les estivants des plages continuent de s'exposer massivement au soleil, ignorant souvent les risques de cancer, et ne s'inquiétant que des coups de soleil. Toutefois, de plus en plus de personnes prennent conscience des dangers, ce qui n'était pas le cas dans ma jeunesse. Les montagnards, eux, ont toujours prêté attention à la protection de leurs yeux contre les effets nocifs des rayons solaires sur les sommets enneigés.

Depuis un peu plus d'un siècle, la physique atomique puis nucléaire a amené l'humanité à développer de nouvelles technologies, de nouvelles industries. Ces développements ont profondément modifié la nature et l'intensité des expositions aux rayonnements ionisants. Parmi ces expositions, deux domaines prédominent en termes de nombre de travailleurs ou de population exposés et d'intensité ou d'intensité potentielle : l'industrie nucléaire, principalement liée à la production d'électricité et le secteur médical. Le premier connaît un regain d'intérêt dans le cadre de la renaissance du nucléaire, comme en témoigne le numéro de janvier 2024 des *Annales des Mines*. Le second, quant à lui, est en pleine expansion, la radiologie et la médecine nucléaire jouant un rôle crucial, non invasif et incontournable dans le diagnostic rapide des maladies, l'évaluation des bilans d'extension des cancers, et pour le suivi de l'efficacité des traitements et aux traitements eux-mêmes, qu'il s'agisse de radiologie interventionnelle, de chirurgie radioguidée ou encore de radiothérapie.

Les pionniers de toutes ces techniques ont payé un lourd tribut lors de leur développement, exposés qu'ils étaient à de fortes doses de radiation et ce de façon répétée. La radioprotection s'est progressivement imposée comme une nécessité, au point de devenir une spécialité reconnue. Les bombardements atomiques d'Hiroshima et Nagasaki, puis les accidents de Tchernobyl et de Fukushima ont marqué l'imaginaire collectif et profondément et durablement changé les perceptions du public à l'égard de ces rayonnements invisibles et imperceptibles. Le principe de précaution a contribué à renforcer la suspicion autour des faibles doses, perçues comme porteuses de risques différés et mal maîtrisés.

Il est crucial de fournir des informations claires, transparentes, et basées sur la science, tout en sensibilisant le public aux mesures de sécurité et aux applications bénéfiques de ces radiations dans divers domaines. C'est tout le mérite de ce nouveau numéro des *Annales des Mines*, complémentaire de celui consacré au nouveau nucléaire, de faire le point sur l'ensemble des questions fort nombreuses posées par la protection contre les rayonnements ionisants. Il est intitulé « Les rayonnements ionisants : leurs risques et leur gestion ». La tâche en a été confiée à la Société française de radioprotection (SFRP) qui a rassemblé une trentaine de spécialistes pour explorer en détail l'ensemble des questions qui se posent aujourd'hui vis-à-vis des expositions aux rayonnements ionisants.

Je tiens à remercier chaleureusement tous les auteurs pour leur travail didactique. Leur contribution permettra aux lecteurs des *Annales des Mines* d'approfondir leur compréhension de ce vaste domaine qu'est la radioprotection.

Introduction

Par Patrick DEVIN

Président de la Société française de Radioprotection (SFRP)
et responsable Sûreté Environnement Radioprotection (Orano)

La radioprotection est une discipline à part entière, associée à toutes les situations d'expositions aux rayonnements ionisants (RI) et notamment les applications industrielles nucléaires et les applications médicales. La Société Française de Radioprotection (SFRP) rassemble tous les acteurs du domaine et contribue par ses actions à une radioprotection de grande qualité en France. Ce numéro des *Annales des Mines* sur la radioprotection offre un panorama relativement complet d'un très grand nombre de situations et de domaines où la radioprotection est présente et nécessaire. Les articles sont portés par des experts connus et reconnus chacun dans leur domaine.

Ce numéro des *Annales des Mines* sort tout juste un an après celui consacré au nouveau nucléaire. Dédié aux rayonnements ionisants, leurs risques et leur gestion, il vient naturellement compléter ce numéro précédent. En effet, si le nucléaire ne peut pas exister sans une sûreté à toute épreuve, il ne peut pas vivre non plus sans une radioprotection tout aussi exigeante. Géraldine Pina, commissaire de l'Autorité de Sûreté Nucléaire, nous éclaire sur ce sujet. Il ne peut donc y avoir de relance du nucléaire sans un soutien important et simultané à la radioprotection !

La Société française de Radioprotection (SFRP) est ainsi très honorée d'avoir été sollicitée par les *Annales des Mines* pour la réalisation de ce numéro.

La Société française de Radioprotection (SFRP)

La SFRP est une association (loi 1901) duale qui va fêter en 2025 ses 60 ans d'existence. Elle est tout d'abord une société savante à la jonction de disciplines diverses : physique, chimie, biologie, médecine et sciences sociales. Elle est par ailleurs une association regroupant un grand nombre de métiers très différenciés et donc de professionnels : ingénieurs, industriels, chercheurs, techniciens, opérationnels, médecins, manipulateurs, personnes compétentes en radioprotection. Le challenge collectif est de maintenir une cohésion « sociale » entre tous ces acteurs en ayant soin de prendre en compte cette dualité toute particulière de la SFRP, cette capacité de créer du lien entre des acteurs multiples qui, sans elle, auraient peu d'occasion de se rencontrer et d'échanger.

Les confrontations entre tous ces corps de métiers, le partage de connaissances, d'expériences et d'idées au sein de la communauté nationale et internationale de la radioprotection, et de plus en plus avec le reste de la société, sont pour le public, une garantie de transparence, d'efficacité et d'objectivité. En effet, la radioprotection est aussi un domaine d'activité qui interfère avec des pans entiers de notre société : sur l'organisation du travail au sein des entreprises utilisant les rayonnements ionisants, sur le développement des pratiques médicales, sur la gestion des territoires vis-à-vis des sources naturelles de radioactivité (ou parfois celles héritées du passé), sur la gestion du risque accidentel lié aux activités nucléaires, comme nous l'a malheureusement rappelé l'accident de Fukushima en 2011, et *in fine* sur l'acceptation sociale du risque nucléaire et radiologique, actuellement en débat dans de nombreux pays. Ainsi, la radioprotection n'est pas qu'une affaire de spécialistes ; elle doit aussi se mettre en interface avec de nombreux acteurs de la société, souvent ignorants ou dans le doute vis-à-vis du risque lié aux rayonnements ionisants et non ionisants.

La SFRP est forte d'environ un millier de membres actifs en provenance de toutes ces disciplines et qui sont sa richesse. Il n'y a pas de « courants » à la SFRP mais des écoles de pensée, des appartenances institutionnelles, des préoccupations professionnelles, des centres d'intérêt très nombreux qui font aussi sa grande richesse. La SFRP n'est ni partisane, ni militante face aux enjeux politiques du nucléaire, ses seuls objectifs ont toujours été la science, la technique, la culture de la radioprotection et la diffusion des obligations réglementaires associées. Le dialogue et l'écoute dans le respect de l'autre, sont aussi une richesse, où l'on apprend au quotidien, où l'on échange, où l'on transmet le savoir, mais aussi ce qui est le plus difficile, l'expérience. La SFRP a un rôle de promoteur d'une véritable culture de radioprotection.

La vitalité et les propositions des membres de la SFRP s'expriment au sein de son conseil d'administration, de ses sections, clubs, commissions et groupes de travail, mais aussi lors de son congrès bisannuel et lors de différents ateliers et journées scientifiques qui collent au plus près des sujets d'actualité et qui sont des plateformes de rencontres et de partage. Le fonctionnement collégial de l'animation de la SFRP se poursuit car les présidents élus pour

deux ans veillent à préserver les diversités et le bon équilibre dans les structures de gestion de l'association (deux permanents dont une directrice qui assurent la continuité).

La qualité de la SFRP s'exprime également au travers de sa revue *Radioprotection*. C'est un journal à comité de lecture qui publie chaque année une quarantaine d'articles en français ou en anglais. Avec un facteur d'impact de 1,4 en croissance depuis 2017, la revue *Radioprotection* se situe au niveau des journaux internationaux du domaine et dans le second quartile des journaux de la catégorie Nuclear Science and Technology du Journal Citation Report Clarivate Analytics. Par ses publications, la revue *Radioprotection* favorise les débats aux niveaux national et international.

La SFRP est bien présente à l'international car la radioprotection est une discipline technique reposant sur des concepts et des méthodes rigoureux, parfois complexes, en constante discussion au niveau international. La SFRP compte plusieurs membres actifs au sein des instances de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), des plateformes européennes de recherche en radioprotection (ALLIANCE sur la radioécologie, EURADOS sur la dosimétrie, MELODI sur les faibles doses et NERIS sur la gestion accidentelle et post-accidentelle), de l'association internationale de protection radiologique (IRPA), de l'AIEA, de l'UNSCEAR ou encore des experts de l'article 31 du traité Euratom¹. L'ASN utilise d'ailleurs la SFRP comme vivier d'experts pour constituer notamment le Groupe permanent d'experts en radioprotection (GPRP).

La radioprotection est en constante évolution et doit faire face à des sujets délicats comme par exemple les usages médicaux des rayonnements ionisants avec une croissance continue qu'accompagne l'introduction de nouvelles technologies, les usages industriels avec la relance du nucléaire en France voire en Europe et dans le monde, l'évolution dans le domaine des rayonnements non ionisants. Les enjeux sont nombreux et complexes et rendent encore plus nécessaires l'animation de la communauté des professionnels de la radioprotection et le partage d'expérience, ainsi que la diffusion des bonnes pratiques et plus largement de la culture de radioprotection auprès de publics variés directement ou indirectement concernés.

Les enjeux en radioprotection

Si la radioprotection couvre l'ensemble de la protection contre les rayonnements, il convient cependant de distinguer deux domaines différents : les rayonnements ionisants (RI) plus énergétiques que les rayonnements non ionisants (RNI). La SFRP a une section technique dédiée aux RNI qui s'occupe de la protection du public et des travailleurs dans toute la gamme des rayonnements non ionisants (champs électrique et magnétique statiques et de très basse fréquence, champs électromagnétiques, radiofréquences, rayonnements optiques naturels et artificiels et les rayonnements lasers) : ceux-ci posent des problèmes spécifiques du fait de leurs actions biologiques différentes des RI (cf. article d'Emmanuel Nicolas). Les *Annales des Mines* avaient déjà traité des ondes non ionisantes en juillet 2021², ce numéro se centre donc sur les rayonnements ionisants.

Mais la radioprotection vis-à-vis des RI existait bien avant que les réacteurs nucléaires, la bombe atomique et l'industrie nucléaire n'existent et recouvre bien d'autres domaines que celui de l'industrie nucléaire, en particulier le domaine médical (cf. la partie consacrée à la radioprotection médicale). La sûreté nucléaire et la radioprotection sont les deux faces d'une même pièce et l'une ne va pas sans l'autre (cf. article de Géraldine Pina).

Les acteurs de la radioprotection sont nombreux et chaque nouvelle technique exige un renouvellement des compétences. L'Institut national des sciences et techniques nucléaire (INSTN), établissement public administratif dont l'administration a été confiée au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), est aussi un des acteurs importants de la formation en radioprotection en sus des actions importantes qu'il joue pour le renouvellement des compétences dans le cadre du renouveau du nucléaire (cf. article d'Éric Gadet).

Les rayonnements ionisants

À quoi sommes-nous exposés ? Il y a des sources naturelles et des sources artificielles fort nombreuses dont il convient de dresser le panorama car elles posent des problèmes de protection spécifiques dans leur environnement (cf. article de Éric Blanchardon et Philippe Renaud). Cela conduit à savoir qui est exposé – les travailleurs, les patients et la population – et quand ils sont exposés.

Mais il nous faut considérer que les travaux de radiobiologie montrent que nous ne sommes pas égaux devant les RI et qu'on estime qu'environ 20 % de la population présente une réponse individuelle anormale en matière d'effets biologiques et sanitaires (cf. article de Nicolas Foray). De plus, nous sommes aussi exposés à une grande variété de composés génotoxiques dans différents secteurs de la vie. Et il est aujourd'hui illusoire de ne vouloir considérer que le risque lié aux RI, alors que tous les autres facteurs de risques existent et se combinent puisque c'est au niveau de la réparation des lésions de l'ADN qu'ils combinent leurs effets (cf. article de Michel Bourguignon).

¹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:12012A/TXT>

² https://annales.org/re/2021/re_103_juillet_2021.html

Après avoir mis en œuvre les dispositions de prévention adaptées et le principe d'optimisation de la radioprotection connu sous l'acronyme ALARA (*As Low As Reasonably Achievable* : aussi bas que raisonnablement possible compte tenu des facteurs sociaux et économiques), la première question pratique de la radioprotection est de savoir quelle dose de RI est absorbée par notre corps, et ce pour chacune des sources de rayonnements externes. Cela vaut surtout pour les travailleurs et les patients. Mais nous sommes aussi exposés par voie interne, tout d'abord par les radionucléides naturels présents dans notre environnement, mais aussi par les radionucléides artificiels, qu'il s'agisse de radionucléides de l'industrie en cas d'incident de contamination lors d'une intervention, étant entendu qu'il est recherché en condition normale de travail de n'avoir aucune exposition interne, dans une moindre mesure lors de rejets ou plus rarement lors de rejets accidentels ou lors d'un examen nécessitant des molécules traçantes... Ces chapitres de la métrologie des RI sont ceux de la dosimétrie externe (*cf.* article de Filip Vanhavere et Olivier Van Hoey) et interne (*cf.* article de Thomas Ehret, Solenn Letalon, Agnès Kirby et Éric Laporte) avec tous leurs enjeux.

Si la radioprotection vis-à-vis des RI est si importante, c'est que trois effets sanitaires peuvent résulter des expositions des travailleurs, des patients et de la population : 1) des brûlures radiologiques si la dose absorbée par les tissus est très importante (effets déterministes à partir de fortes doses, de plus en plus rare de nos jours), 2) des cancers et des leucémies du fait de lésions de l'ADN liées aux ionisations créées par les rayonnements (faibles doses sans signature décelable), et 3) des maladies dégénératives comme les cataractes, des maladies cardiovasculaires ou neurologiques (également difficiles à déceler dans le bruit de fond de ces maladies). L'épidémiologie est une science de l'observation dont les études tentent d'établir ou tout le moins déceler un lien entre l'exposition aux RI et certaines maladies (*cf.* article de Corinne Mandin, Énora Cléro et Dominique Laurier) et de vérifier le modèle linéaire sans seuil (LNT) aux faibles doses. L'exercice reste complexe aux faibles et très faibles doses et compte tenu de nombreux facteurs confondants souvent difficiles à prendre en compte ; pour autant l'exercice se doit d'être mené.

Les aspects internationaux et réglementaires de la radioprotection

La radioprotection est une préoccupation internationale depuis le début du XX^e siècle dans le domaine de la radiologie médicale dont les pionniers ont payé le prix (*cf.* l'article de Laurence Lebaron Jacobs). Différents organismes internationaux ont coordonné ou compilé de nombreux travaux de recherche et c'est finalement la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) qui a élaboré un ensemble de recommandations pour la radioprotection, revu et optimisé régulièrement (*cf.* l'article de Werner Rühm). De par leurs qualités et leurs pertinences, ces recommandations forment *in fine* le socle des législations et réglementations internationales et nationales (pour la France, cela est initié par des directives européennes transposées ensuite en droit français).

La radioactivité, mythe et réalité, questionne, fait peur. Des acteurs non gouvernementaux sont très actifs en radioprotection. Cela résulte historiquement d'une part du rejet de l'industrie nucléaire qui est amalgamée à la bombe atomique, et d'autre part des accidents de Tchernobyl et de Fukushima qui ont durablement marqué les populations (*cf.* l'article de Pierre Barbey, David Boilley et Mylène Josset). Ces acteurs non gouvernementaux sont des parties prenantes vigilantes vis-à-vis des risques des RI et de leur gestion.

La radioactivité de l'environnement

La radioactivité de l'environnement est un enjeu important du fait notamment des rejets radioactifs des installations nucléaires dans l'environnement. Elle est fortement surveillée par de nombreux acteurs, les exploitants, l'IRSN, certaines associations, à partir de prélèvements dans l'environnement, manuels ou automatiques, et à partir de dispositifs de détection automatiques qui couvrent tout le territoire. Toutes les données sont consultables sur Internet (*cf.* l'article de Nathalie Reynal, Céline Augeray et Nicolas Baglan).

La France a fait le choix pour son industrie nucléaire d'un cycle du combustible nucléaire qui lui permet par le traitement et le recyclage des combustibles usés de préserver la ressource en uranium (*cf.* l'article de Patrick Devin).

Les rejets en mer font l'objet de la convention OSPAR qui vise la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est. OSPAR s'intéresse aux rejets des substances radioactives dans le milieu marin, la stratégie d'OSPAR visant à les prévenir, les réduire, voire les supprimer, notamment par le recours aux meilleures techniques disponibles. Cela concerne également l'industrie NORM (*Naturally Occurring Radioactive Material*) comme l'extraction d'hydrocarbures ou l'industrie des phosphates qui génèrent des rejets radioactifs de substances naturelles (*cf.* l'article de Benoît Bettinelli, Brice Delime, Nathalie Reynal, Nicolas Baglan, Coralie Nyffenegger, Hélène Caplin, Catherine Bordier-Oliveira, Pierre-Yves Hemidy et Patrick Devin).

La radioprotection est un enjeu majeur de la vie dans l'espace, les cosmonautes étant exposés à des doses importantes de RI, et des éruptions solaires sont susceptibles de mettre leur vie en jeu. Pas d'avenir pour les humains dans l'espace sans une maîtrise de leur protection vis-à-vis des RI (*cf.* l'article de Jean-François Bottollier-Depois).

Dans le domaine médical, il n'y a pas que les patients qui sont exposés aux RI. Les personnels de radiologie et de médecine nucléaire le sont aussi, parfois à des doses non négligeables (*cf.* article d'Emmanuel Museux). Ils forment un groupe de personnes exposées plus important que celui des travailleurs de l'industrie nucléaire.

Les expositions médicales répétées conduisent à des doses qui peuvent être importantes sur la durée. Les examens de dépistage entrent également dans cette catégorie. Ces situations demandent une vigilance particulière (cf. article de Michel Bourguignon).

Le scanner est une modalité d'imagerie médicale très puissante et qui contribue efficacement au diagnostic des maladies et accompagne la surveillance de l'efficacité de certains traitements. Comme les scanners délivrent les doses les plus importantes aux patients, leur utilisation fait l'objet de toute l'attention de radiologues (cf. article de Jean-François Chateil).

En médecine nucléaire, on utilise des radiopharmaceutiques, médicaments porteurs d'un isotope radioactif dont la destination dans l'organisme provient de la qualité du pharmacologique porteur. Le rayonnement émis sert : 1) soit à le suivre à la trace, les rayons gamma ou X émis permettant d'en réaliser la distribution pour évaluer une fonction physiologique ou un caractère pathologique, 2) soit à traiter une tumeur avec des rayons alpha ou bêta énergétiques. L'utilisation de radiopharmaceutiques en sources non scellées pose des problèmes spécifiques de radioprotection (cf. article de Jean-Philippe Vuillez).

L'intelligence artificielle fait irruption en médecine comme dans beaucoup d'autres domaines. C'est en particulier le cas dans les spécialités médicales utilisant les RI : radiologie, radiothérapie, médecine nucléaire. Des bénéfices particuliers en sont attendus en matière de radioprotection (cf. article d'Anaïs Barateau).

Situations accidentelles et post-accidentelles

La France a connu en 2006 et 2007 à l'hôpital d'Épinal et au CHU de Toulouse les plus importants accidents de radiothérapie connus sur son territoire. Des patients en sont décédés à Épinal. Un point sur l'origine de ces accidents, la façon dont ils ont été traités et sur le retour d'expérience qui a suivi nous est fait par Jean-Marc Simon, le radiothérapeute qui a piloté l'équipe médicale d'intervention à Épinal et découvert des événements cachés.

En cas d'accident nucléaire et radiologique, il convient pour les pouvoirs publics de savoir faire face. Un plan spécifique de réponse à l'urgence a été élaboré au sein du Secrétariat général de la Défense et de la Sécurité nationale (SGDSN) pour permettre au Gouvernement de piloter au mieux la crise (cf. article de Sylvie Supervil et Lionel Lachenaud).

Du côté militaire, le Service de Santé des Armées (SSA) a en son sein le Service de Protection Radiologique des Armées (SPRA) qui a développé des capacités de réponse spécifiques aux situations nucléaires et radiologiques susceptibles de survenir (cf. article de Jean-Christophe Amabile, Émilie Jamet-Anselme, Annabelle Bonnin Dussaud, Ingrid Richard, Manon Chantre, Denis Chianéa et Guillaume Garnier).

En matière post-accidentelle, l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) a mis en place le comité directeur pour la gestion de la phase post-accidentelle (CODIRPA) qui a pour mission de proposer au gouvernement des recommandations sur la stratégie de gestion des conséquences d'un accident nucléaire ou radiologique (cf. article d'Olivier Rivière).

Enfin, les situations accidentelles et post accidentelles à caractère nucléaire et radiologique ont des enjeux psychosociologiques importants qui ont été bien étudiés lors des accidents de Tchernobyl et de Fukushima. Des mécanismes de résilience ont été identifiés qui permettent de proposer des actions vis-à-vis des populations qui seraient concernées (cf. article de Jacques Lochar, Thierry Schneider et Jean-François Lecomte).

Conclusion

Comme on a pu le voir, la radioactivité est omniprésente, elle participe à la vie et est utilisée dans de nombreuses situations à des fins bénéfiques. Elle présente néanmoins des risques qu'il faut maîtriser et en ce sens gérer à travers un dispositif de radioprotection éprouvé, robuste et suffisamment protecteur. Cette gestion doit aussi s'intégrer à la gestion des autres risques afin d'avoir une vision globale et optimale de la prévention des risques. Dans le cadre d'une entreprise, ceci fait l'objet du document unique d'évaluation des risques (DUE).

La radioprotection est présente et nécessaire dans un très grand nombre de situations et de domaines, que les articles de ces annales abordent en présentant les différents risques et leur gestion. Sans prétendre couvrir l'exhaustivité du sujet, ces annales sur les RI offrent un panorama relativement complet du sujet porté par des experts connus et reconnus chacun dans leur domaine. Nous espérons vous offrir à ce titre un numéro spécial de qualité et vous en souhaitons une bonne lecture.

Rayonnements non ionisants et rayonnements ionisants, des faux frères ?

Par Emmanuel NICOLAS

Société Française de RadioProtection (SFRP, section RNI)

Cet article présente les différences fondamentales entre les rayonnements ionisants (RI) et les rayonnements non ionisants (RNI) en termes de nature physique, d'interactions avec la matière, et d'effets sur la santé. La notion de dose est elle aussi abordée pour ces deux domaines : alors qu'elle est une grandeur fondamentale pour les RI, elle ne s'applique pas pour le domaine des RNI. Les RI ont des effets cancérogènes, alors que les RNI n'en ont pas (en dehors des UV, mais par un mécanisme différent de celui des RI). Cela permet de conclure que les deux domaines RI et RNI sont fondamentalement différents et que l'utilisation d'un vocabulaire similaire voire identique pour les deux est trompeuse.

Introduction

Les humains sont exposés à une multitude de rayonnements d'origine naturelle et artificielle qui peuvent être classés en deux grandes catégories, les rayonnements ionisants (RI) et non ionisants (RNI). La société française de radioprotection (SFRP) est compétente dans les deux domaines.

Le domaine des RNI est celui des ondes électromagnétiques d'origine naturelle et artificielle. Il couvre un large spectre de fréquences allant du champ magnétique terrestre aux rayonnements ultraviolets (UV) en passant par la lumière (voir la Figure 1). Pour le domaine des

RI, il faut considérer à la fois les rayonnements (ondes) électromagnétiques (X et gamma) plus énergétiques que les UV, et les rayonnements particuliers (alpha, bêta, neutron) de la radioactivité. À noter que les ondes acoustiques, notamment les ultrasons, ne sont ni des RI ni des RNI car il s'agit d'un mode vibratoire de nature mécanique par oscillation d'un milieu physique tel que l'eau ou les tissus vivants ; ils ne seront donc pas abordés ici.

Aucun RNI ou RI n'est visible par l'œil humain à l'exception de la lumière. En revanche ces rayonnements peuvent être détectés et mesurés grâce à des instruments de mesure spécifiques. Cet aspect mys-

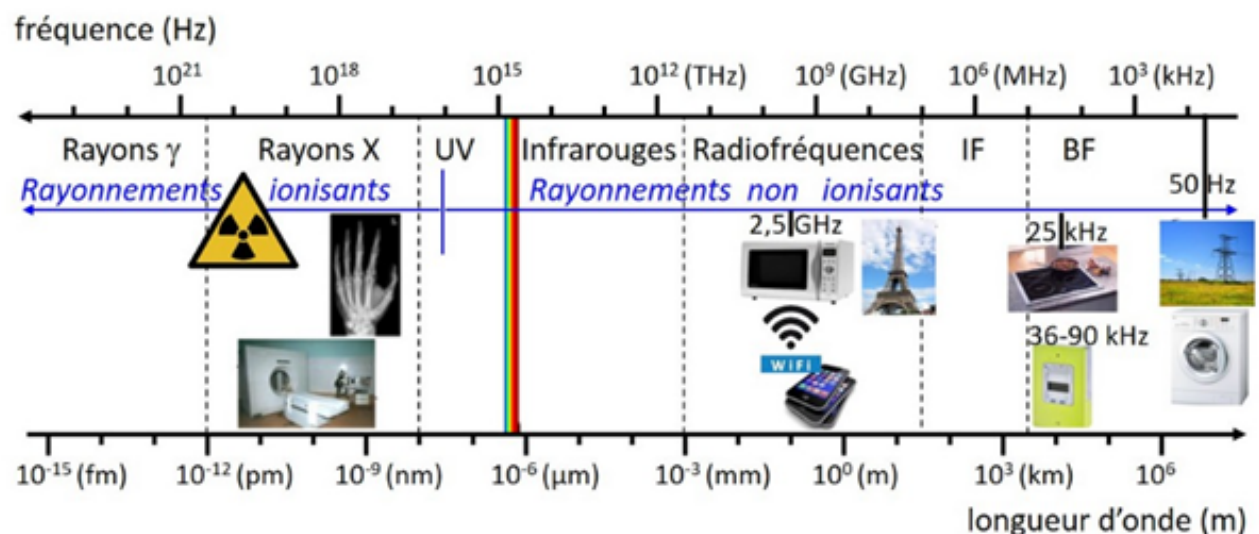


Figure 1 : Schéma simplifié de la gamme des fréquences et exemples d'applications. UV : ultraviolet ; IF : fréquences intermédiaires ; BF : basses fréquences (Source image : <https://www.encyclopedie-environnement.org/sante/radiofréquences-sante/>, adaptation à partir de Perrin & Souques, EDP-Sciences, 2018 avec l'accord de l'éditeur).

térieux d'invisibilité de ces rayonnements conduit les non spécialistes à les confondre alors qu'il existe une différence fondamentale entre RI et RNI : seuls les RI sont capables de ioniser la matière biologique qu'ils traversent, c'est-à-dire qu'ils sont capables d'arracher des électrons aux molécules avec lesquelles ils interagissent. Ainsi, la limite entre les deux domaines RI et RNI est la plus faible énergie nécessaire pour arracher un électron de l'atome d'hydrogène soit 13,6 eV et une longueur d'onde de 91,6 nm (en pratique, on retient la valeur de 100 nm comme frontière) limite du domaine UV.

Cette capacité d'ionisation est à l'origine des effets biologiques et sanitaires des RI. Les capacités de pénétration dans la matière biologique et les interactions des RI et des RNI avec les tissus biologiques étant fondamentalement différentes, leurs problématiques de radioprotection le sont tout autant.

Ces différences ont motivé le choix de consacrer ce numéro spécial des *Annales des Mines* aux seuls RI, et cet article a pour but d'expliquer sommairement ce que sont les RNI comparativement aux RI. L'immense domaine des RNI, leurs multiples applications et leurs particularités en termes de risque pourraient faire également l'objet d'un numéro dédié des *Annales des Mines*.

Quelques caractéristiques des RI

Tous les rayonnements particuliers (alpha, bêta, neutrons) sont ionisants, avec quelques particularités. Les particules alpha, qui sont les plus lourdes, constituées d'un noyau d'hélium présentant deux charges électriques positives, sont arrêtées après un parcours de quelques centimètres dans l'air, ou par une feuille de papier, ou par l'épiderme de la peau. Elles ne présentent pas de risque d'exposition externe mais en cas d'inhalation elles sont très néfastes et peuvent provoquer des cancers du poumon (c'est par exemple le cas du gaz radon d'origine naturelle, qui s'accumule dans les espaces mal ventilés, et qui se désintègre en libérant des particules alpha). Le rayonnement bêta, constitué d'électron ou positon, est un peu plus pénétrant mais une feuille d'aluminium les arrête car ils interagissent fortement du fait de leur charge électrique. Lorsque les radionucléides émetteurs alpha ou bêta sont à l'intérieur du corps humain (contamination interne, ou injection d'un radiopharmaceutique), leurs rayonnements sont absorbés à proximité immédiate. Enfin, les neutrons présents dans le noyau des atomes, apparaissent notamment lors de la fission nucléaire de l'uranium dans le cœur des réacteurs. Non chargés électriquement, les neutrons sont captés par des noyaux d'atomes qu'ils transmutent et ce sont les rayonnements secondaires à ces transmutations (particulaires ou électromagnétiques) qui sont ionisants.

Les rayonnements X et gamma sont progressivement arrêtés par la matière biologique, et sont d'autant plus pénétrants que leur énergie est élevée. Il faut un matériau lourd comme le plomb pour les arrêter.

Le phénomène d'ionisation conduit à la formation de radicaux libres H° et OH° à partir de l'eau qui constitue environ les deux tiers du corps humain. Ces radicaux sont extrêmement réactifs et vont interagir immédiatement avec les molécules du voisinage par exemple en rompant des doubles liaisons ou en les hydroxylant. Mais les RI peuvent aussi agir directement sur des molécules pour les transformer ou les rompre. Le résultat final est le même, l'altération de molécules au sein de la cellule. La cible principale en matière d'effet est l'ADN qui se trouve ainsi lésé de diverses façons. Il existe une machinerie de signalisation et de réparation des lésions de l'ADN. Les effets biologiques des RI dépendent de la gravité des lésions (les plus graves étant les cassures des deux brins de l'ADN) et de la qualité de leur réparation. Le devenir de la cellule en dépend : mort cellulaire, ou restitution ad integrum en cas de réparation fidèle, ou encore persistance de lésions mal réparées pouvant conduire à la cancérisation ou au vieillissement cellulaire puis tissulaire.

In fine, les effets des RI dépendent de la dose absorbée de rayonnement, c'est-à-dire de l'énergie déposée dans le tissu en J/kg appelé aussi Gray (Gy), mais aussi de la nature des RI. Les effets biologiques sont plus importants pour les rayonnements alpha et les neutrons que pour les bêta, les gamma et les X, et ils dépendent aussi de la sensibilité des tissus exposés qui varie selon leur nature.

Les caractéristiques des RNI

Par définition, les RNI ne peuvent pas produire une ionisation des atomes ou des molécules dans les milieux qu'ils traversent. De ce fait, ils n'ont pas intrinsèquement la capacité d'induire des altérations de l'ADN à l'origine de mutations et de cancers, à l'exception des UV.

Le domaine des RNI est divisé en deux sous-domaines, le domaine des champs électriques, magnétiques et électromagnétiques (ondes) et celui des rayonnements optiques (infrarouge, visible, ultraviolet). La séparation entre ces deux domaines est liée à la fréquence des ondes.

Domaine des champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz)

La fréquence nulle de 0 Hz est un cas particulier qui concerne les champs statiques qu'ils soient magnétiques (champ magnétique terrestre par exemple) ou électriques (à l'origine des éclairs d'orages ou des décharges électrostatiques).

Le domaine spectral des champs électromagnétiques couvert par la réglementation débute à 0 Hz et se termine à 300 GHz. Il couvre un très grand nombre d'applications domestiques, médicales et industrielles: l'IRM (imagerie par résonance magnétique nucléaire), le réseau électrique 50 Hz, des applications dans l'électroménager (plaques à induction, four micro-ondes), le

chauffage par induction, la transmission de données, la radiodiffusion, les systèmes de communications sans fil (téléphonie mobile, CB, *wifi*, etc.), la diathermie médicale, les radars, le GPS, l'hyperthermie médicale, les communications par satellites, les scanners corporels, la spectrométrie infrarouge, l'éclairage, les lampes germicides, les lampes de bronzage. Ces ondes électromagnétiques sont créées à partir de courants électriques qui oscillent à des fréquences discrètes pouvant couvrir tout le spectre des fréquences. Ces champs électromagnétiques variables donnent lieu à des ondes électromagnétiques qui se propagent dans l'espace.

Ces ondes transportent une énergie qui est directement liée aux intensités du champ électrique et magnétique. Des effets biologiques et sanitaires de ces rayonnements se produisent à partir d'une certaine quantité d'énergie absorbée (notion de seuil).

Brièvement, aux fréquences les plus basses (dites basses fréquences), le couplage des ondes électromagnétiques avec le corps humain donne lieu à la création de courants induits à l'intérieur du corps et entraîne la stimulation des tissus excitables, au niveau du système nerveux central, des nerfs périphériques et des muscles. Aux fréquences plus hautes (catégorie des radiofréquences), les interactions onde-matière se traduisent par un échauffement de la matière dû aux vibrations des molécules polaires, notamment l'eau, sous l'effet du rayonnement. On parle alors d'effets thermiques dus à la transformation de l'énergie en chaleur dans tout ou partie du corps humain selon le type d'exposition (par exemple corps entier pour l'exposition à une antenne-relais, ou localisée pour l'exposition d'une partie du corps à un téléphone mobile). L'effet et la pénétration des ondes dans la matière dépendent là aussi de la composition des tissus biologiques et de la fréquence. Au-delà de 6 GHz, les ondes ne pénètrent pas au-delà de la peau.

Ces effets physiques connus doivent être limités pour ne pas impacter notre santé.

La réglementation actuelle, pour le public et les travailleurs, a adopté des valeurs limites contraignantes en matière de puissance du rayonnement qui interdisent la possibilité que ces effets se manifestent. De plus, ces limites d'exposition intègrent des marges de sécurité importantes.

Domaine des rayonnements optiques (de 100 nm à 1 mm)

Les rayonnements optiques sont des rayonnements électromagnétiques dont les longueurs d'onde sont comprises entre 100 nanomètres (nm) et 1 millimètre

(mm). Ils se répartissent entre l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge (voir la Figure 1). Le domaine étroit à partir de 400 nm jusqu'à 780 nm est le seul visible par l'œil humain. Les deux autres domaines, ultraviolet et infrarouge, sont divisés en trois sous-bandes spectrales A, B et C dont les bornes sont spécifiées sur la Figure 2.

Les rayonnements optiques sont définis par leurs longueurs d'onde plutôt que par leurs fréquences plus élevées que dans le chapitre précédent. Dans la réglementation, le domaine des rayonnements optiques commence après celui des champs électromagnétiques, en passant (subitement) des micro-ondes (300 GHz) aux infrarouges (1 mm). La limite basse en longueur d'onde (100 nm) du rayonnement ultraviolet correspond à la frontière avec les rayonnements dits ionisants.

Ce sous-domaine des RNI est séparé du précédent car les paramètres à mesurer sont propres à la radiométrie (énergie, éclairage, luminance, angle solide) et la métrologie associée (spectroradiomètre) diffère sensiblement de celle pour la mesure des champs électromagnétiques (champ-mètre, antenne et analyseur de spectre radiofréquence).

Une grandeur radiométrique importante est celle liée à la quantité d'énergie. En effet, le temps d'exposition des yeux et/ou de la peau doit être limité pour éviter des effets délétères sur la santé. Une exposition énergétique des yeux ou de la peau correspond à une durée d'exposition continue de quelques secondes à plusieurs heures, engendrée par un éclairage énergétique plus ou moins intense. Elle se mesure en Joule par mètre carré et elle est limitée réglementairement par le code du travail pour protéger les travailleurs.

Par opposition à ces rayonnements optiques dits « incohérents », émis par des sources de type éclairage, métal ou verre en fusion, lampes UV, il faut distinguer ceux qui sont produits par émission stimulée (laser) et dits « cohérents ». Les expositions accidentelles des yeux ou de la peau à la lumière cohérente doivent être évitées grâce à des protections (lunettes adaptées ou écrans).

Les rayonnements ultraviolets qui se situent à la frontière entre ionisant et non ionisant sont classés dans la famille des RNI bien qu'ils soient des mutagènes avérés sur le long terme (cancers de la peau).

La dosimétrie et les RNI

Nous avons vu que la quantité d'énergie absorbée est la clé de la compréhension des effets des RI. Pour autant, quantifier l'exposition aux rayonnements n'est

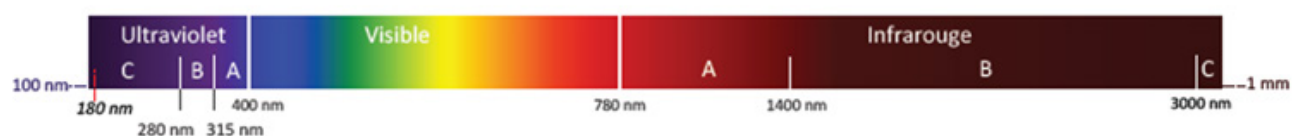


Figure 2 : Domaines spectraux des rayonnements optiques (Source : Fiches Techniques SFRP - Exposition aux rayonnements optiques artificiels incohérents sur les lieux de travail - janvier 2020).

pas simple et la notion de dose n'est pas toujours adaptée. Qu'en est-il pour les RNI ?

Pour les champs électromagnétiques

Pour les champs électromagnétiques, la réglementation retient qu'on ne peut pas parler de dose, et encore moins de cumul de dose.

Pour le spectre basse fréquence, jusqu'à 100 kHz, les effets sont des effets immédiats, donc la notion de dose n'est pas pertinente.

À partir de 100 kHz et jusqu'à 300 GHz les effets thermiques sont présents. L'énergie absorbée par les tissus biologiques et les organes se stabilise au bout d'un certain temps du fait du sang qui irrigue les organes et joue le rôle d'échangeur thermique entre l'air ambiant et le corps humain. L'énergie absorbée est donc dissipée pour atteindre un équilibre thermique, et la notion de dose n'a plus de sens au-delà de quelques minutes.

Pour les rayonnements optiques artificiels

Pour le domaine des rayonnements optiques (incohérents) on parle de durée d'exposition journalière et pas de dose journalière.

Les yeux et la peau sont les organes cibles avec des effets thermiques (érythème, kérato-conjonctivite, opacification du cristallin) ou des photo-rétinites par les rayonnements visibles, ou encore des effets photo-chimiques par les rayonnements infrarouges (kératite, conjonctivite). Tous ces effets délétères n'apparaîtront pas car les valeurs limites d'exposition (VLE) définies par le code du travail sont fondées directement sur des effets avérés sur la santé. La durée réglementaire de travail est limitée à huit heures continues et l'exposition énergétique cumulée sur huit heures n'est pas suffisante pour obtenir un effet irréversible tant que les VLE ne sont pas dépassées. Il n'est pas non plus exigé, voire recommandé, d'attendre un certain temps après une exposition de huit heures, mais il est tout de même sous-entendu qu'entre deux durées d'exposition de huit heures de travail, une durée de non-exposition de seize heures est respectée.

La notion de dose prend ici un sens limité à une durée correspondant à une journée de travail, donc au maximum huit heures, quarante heures par semaine ou cent soixante heures par mois.

L'usage du mot radiation au lieu du mot rayonnement

En anglais, rayonnement se dit radiation. Toutefois, le mot « radiation » ramène tout de suite au domaine de la radioactivité et aux craintes qu'elle suscite, liées aux bombes atomiques mais aussi aux accidents qui ont eu lieu dans des centrales nucléaires, notamment celui de Tchernobyl en 1986 qui a marqué les esprits. Nul besoin de rappeler l'incidence des irradiations à forte dose sur les tissus ou organes du corps humain.

Utiliser le mot radiation pour désigner des champs électromagnétiques du domaine des RNI laisse penser que ces ondes sont très dangereuses alors qu'elles ne véhiculent que des photons de basse énergie, incapables d'engendrer des dégâts au niveau cellulaire. Il est donc impropre d'utiliser ce terme pour désigner des rayonnements non ionisants, cela apporte le trouble et la confusion. D'ailleurs, cette terminologie est utilisée à dessein par les militants détracteurs des nouvelles technologies et par ceux qui tirent profit de la peur des ondes pour vendre des soi-disant appareils de protections anti-ondes dont certains utilisent même des appareils de mesures de champ électrique émettant un son inquiétant de compteur Geiger. Le mot radiation est donc à bannir du vocabulaire utilisé dans le domaine des RNI.

Conclusion

Cet article a mis l'accent sur les différences fondamentales entre les RNI et les RI, en ce qui concerne leurs propriétés physiques mais aussi leurs impacts sur le corps humain. Les effets sur la santé ne sont pas comparables, les RI ayant intrinsèquement un caractère cancérigène. Pour autant, si à haut niveau d'exposition tous les rayonnements ont des effets sur la santé, les RNI qui n'ont pas d'effets cumulatifs à long terme sont spécifiques. Pour les RI, on peut parler de dose, ce n'est pas le cas pour les RNI. Notons que les UV sont à la frontière entre les deux domaines RI et RNI, et leur caractère cancérigène est avéré. Ils auraient pu être classés dans ces deux domaines de rayonnements du fait des mécanismes d'interaction avec les tissus (peau) et les organes (œil) à la fois thermique et photo-chimique, mais aussi avec des effets cumulatifs sur le long terme (cancer de la peau).

En définitive, les recherches menées depuis des décennies n'ont pas permis de démontrer l'existence d'un effet cancérigène des rayonnements non ionisants comme en atteste les conclusions des expertises collectives. Ils peuvent avoir des effets immédiats sur le corps humain et sur la santé à partir de certains seuils d'exposition mais sont sans risque tant que les valeurs limites ne sont pas dépassées. En définitive, il n'y a pas d'effet à long terme puisqu'il n'y a pas d'effet de dose. C'est tout le contraire avec les rayonnements ionisants qui possèdent des effets immédiats (ou déterministes) directement fonction de la dose absorbée pour les cas d'exposition aiguë, et des effets stochastiques à relier aux faibles doses, c'est-à-dire sur le long terme. Pour ces dernières, il n'y a pas de seuil défini. On considère qu'il existe une relation de cause à effet sans seuil (linéaire sans seuil), la probabilité qu'une dose de rayonnement ionisant, même faible, provoque un cancer, n'étant pas nulle.

Ainsi, il paraît important de distinguer clairement ces deux types de rayonnements, RI et RNI, y compris à l'aide d'un vocabulaire approprié pour les désigner. Cela évite des analogies qui n'ont pas de justification objective et sont inquiétantes pour le public. Celui-ci peut être rassuré vis-à-vis des RNI présents dans notre environnement quotidien, et savoir que les RI sont dan-

gereux à fortes doses, tout en étant conscients que les RI à faibles doses font eux aussi partie de notre quotidien.

Références bibliographiques

Fiches techniques SFRP

Exposition aux rayonnements optiques artificiels incohérents sur les lieux de travail (janvier 2020).

Évaluer l'exposition des travailleurs aux champs électromagnétiques (juin 2020).

La 5G et la santé (novembre 2022).

Prévention des risques des champs électromagnétiques liés à l'IRM pour les travailleurs et les patients (janvier 2024).

Ouvrages

Environnement et santé publique, Fondements et pratiques, 2023 Presses de l'EHESP, chapitres 30 Rayonnements non ionisants et chapitre 31 Rayonnements ionisants.

Champs électromagnétiques, environnement et santé, 2^e édition, Paris, EDP Sciences, septembre 2018.

Article

ARPANSA, WHO review finds no link between mobile phone use and brain cancer, 4 September 2024, <https://www.arpansa.gov.au/who-review-finds-no-link-between-mobile-phone-use-and-brain-cancer>

Rapport d'expertise

Anses, Rapport d'expertise collective Saisine n°2016-SA-0176 « radiofréquences et cancer », septembre 2024.

Pas de renouveau du nucléaire sans une radioprotection – et une sûreté nucléaire – forte

Par Géraldine PINA

Commissaire de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN)

Le renouveau du nucléaire, une des réponses aux enjeux de souveraineté énergétique ou de décarbonation de l'énergie, est un phénomène mondial. Il s'appuie entre autres sur la prolongation des installations existantes et la construction de nouvelles installations, mais aussi sur le développement du « nouveau nucléaire » : petits réacteurs modulaires, réacteurs de fusion... Cela exige-t-il un changement profond ou une évolution de la doctrine en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection ? Derrière cette interrogation, c'est la question de l'acceptabilité sociale de la relance de la filière nucléaire qui est posée et elle passe par la priorité accordée à la protection des personnes et de l'environnement. Dans un contexte où les cadres institutionnels sont parfois soupçonnés de ne pas incarner l'intérêt général, créer la confiance et favoriser la culture de radioprotection est essentiel. Il n'y aura pas de renouveau du nucléaire sans une radioprotection – et une sûreté nucléaire – forte.

L'accession à une énergie abondante et peu chère, grâce notamment aux énergies fossiles, a été à la source de la révolution industrielle et du développement démographique et humain qu'on a connus au XIX^e siècle. Les XX^e et XXI^e siècles sont en revanche ceux de la crise de la ressource énergétique, crise qui alimente les inquiétudes sur l'avenir de nos modes de production et de nos modes de vie. Une des réponses est le réinvestissement dans l'énergie nucléaire. Ce choix de relancer la filière nucléaire n'est pas seulement celui du gouvernement français, il concerne de nombreux pays du monde. Il n'en reste pas moins que l'énergie nucléaire reste marquée par les craintes qu'elle suscite et dont des accidents graves comme Tchernobyl ou Fukushima ont montré la réalité. Assurer le développement de la filière nucléaire ne peut se faire sans que ce choix ne soit partagé par les citoyens et qu'ils soient aptes à en saisir les enjeux.

En France, le renouveau du nucléaire, porté par les lois d'accélération du nucléaire ou celle de la nouvelle gouvernance du nucléaire, a fait la part belle à la sûreté nucléaire et à son contrôle. La radioprotection est rarement évoquée, alors même qu'elle est une part importante du travail sur la confiance à tisser avec la population (Bourguignon, 2023). Pour le grand public, la distinction entre sûreté nucléaire et radioprotection est peu compréhensible. La question de la prévention des accidents nucléaires ou de la limitation de leurs conséquences a pris le pas sur tout, éclipsant parfois les enjeux de radioprotection. Pourtant, que ce soit pour les centrales électronucléaires et les installations d'amont et d'aval qui leur sont nécessaires, ou, de manière générale, pour toutes les installations y compris médicales qui utilisent les rayonnements ionisants, la protection des travailleurs en

leur sein, et celle du public et de l'environnement dans leur voisinage est bien l'objet de la radioprotection. C'est aussi le cœur de métier du "trusted regulator". Son rôle dans la protection de la société est précisément que cette société ait confiance dans le fait qu'il saura toujours agir dans l'intérêt de la sécurité des travailleurs, du public et de l'environnement. À cet effet, il utilise son expertise pour évaluer les risques et les apprécier de manière adaptée aux enjeux (NEA, 2024).

Un des défis qui accompagne le renouveau du nucléaire est celui de la régulation des technologies innovantes. La nécessaire attitude de prudence et d'interrogation du régulateur face au risque nucléaire ou radiologique est parfois mécomprise comme un excès de précaution susceptible de retarder l'arrivée des innovations voire un excès d'exigence pouvant nuire au développement industriel (Bertho, 2023).

Dans le domaine médical, la pression sociétale est parfois forte pour l'intégration rapide des nouvelles technologies dans l'arsenal thérapeutique. Ainsi, les nouvelles radiothérapies internes vectorisées posent le problème de la gestion des effluents. Le ZAP-X[®], plateforme de radiochirurgie dite « auto-blindée » qui permet d'éviter l'utilisation d'un *bunker*, pourrait permettre une meilleure accessibilité à la radiothérapie dans certains territoires. Cependant à cause de son rayonnement « de fuite », qui n'est pas nul, des précautions spécifiques sont à envisager pour la protection des travailleurs.

Dans le domaine de l'industrie, les petits réacteurs modulaires ou SMR, promettent des performances accrues en matière de sûreté grâce à des dispositifs de sûreté intrinsèque et passive. Leurs concepteurs souhaitent une harmonisation des exigences de sûreté des

pays qui souhaiteraient s'en doter. Il a même pu être suggéré que ces exigences de sûreté soient adaptées du fait de leurs caractéristiques de sûreté intrinsèque.

Pour autant, cela ne nécessite pas tant une révolution dans la manière de travailler des autorités de radioprotection et de sûreté nucléaire qu'une évolution dans l'anticipation des risques inhérents à ces nouveaux objets. En France, l'Autorité de Sûreté Nucléaire a su anticiper en initiant des revues conjointes de la conception de certains réacteurs SMR, avec d'autres régulateurs européens, portant notamment sur les objectifs de sûreté (ASN, 2023). Cette initiative a permis d'identifier les avantages en termes de sûreté mais aussi les questions de sûreté que ces SMR pourraient susciter. Les exigences et expériences des régulateurs ont été comparées afin d'identifier les évolutions possibles dans les réglementations nationales.

Dans le domaine médical, le CANPRI (Comité d'analyse des nouvelles techniques et pratiques utilisant les rayonnements ionisants, mis en place par l'ASN) a pour objectif d'identifier ces nouvelles pratiques et techniques, d'analyser leurs enjeux en termes de radioprotection et d'élaborer des recommandations pour la radioprotection des patients et des travailleurs. Ses premiers travaux ont porté sur la plateforme de radiochirurgie ZAP-X, la flash thérapie et les nouveaux radionucléides en médecine nucléaire.

En recherche, le réacteur ITER (*International thermonuclear experiment reactor*) est un réacteur expérimental de fusion en construction. Il doit faire la preuve que la fusion peut être utilisée comme source d'énergie à grande échelle. Les quantités importantes de tritium qui seront mises en jeu, le flux neutronique intense et l'activation des matériaux qui en résulte constituent des enjeux particuliers du point de vue de la radioprotection et représenteront d'importants défis pour la gestion sûre des déchets pendant l'exploitation et lors du futur démantèlement.

Parce qu'il est basé sur des objectifs de sûreté nucléaire ou de radioprotection, et non sur des moyens de les atteindre, le cadre de régulation dont nous disposons en France permet une juste appréhension des enjeux. C'est particulièrement vrai pour le nouveau nucléaire, grâce à la gradation des modes d'action, proportionnés aux risques (c'est une exigence fondamentale du régulateur, vérifiée lors des revues par les pairs réalisées par l'AIEA). C'est ce même cadre qui est utilisé pour les réacteurs EPR comme pour les SMR et ITER. L'enjeu de ce cadre de régulation, aussi difficile qu'il soit à mettre en œuvre, s'énonce de manière simple : il s'agit de mettre les enjeux de sûreté nucléaire et de radioprotection au cœur de la réflexion. C'est le cas dès le stade de la conception, mais aussi tout au long de la vie de l'installation, ou de l'utilisation de la source de rayonnements ionisants, et le cas échéant jusqu'à la fin du démantèlement et des opérations de conditionnement et de stockage des déchets.

D'autres défis nécessitent une évolution de notre cadre de régulation, comme les technologies de l'intelligence artificielle (IA). Si elles ne sont pas nouvelles, leurs récentes et rapides évolutions suscitent à la fois l'en-

thousiasme et le débat sur leur impact potentiel sur la sûreté nucléaire et la radioprotection. Les nouveaux développements et utilisations de l'IA ne peuvent être ignorés par les autorités de contrôle. Un des défis posés est la nécessité, pour le régulateur, de s'assurer que le recours à l'IA n'affaiblisse pas la démarche interrogative que doit conserver tout opérateur au titre de sa culture de sûreté et de radioprotection, et que l'opérateur reste le décideur final, dans le respect de sa responsabilité première. Devant les développements potentiels de l'IA, et notamment de l'IA générative, il apparaît nécessaire de s'interroger sur les besoins d'une position réglementaire commune sur les limites possibles de l'IA. Les régulateurs disposeraient ainsi d'un cadre méthodologique et éthique commun qui en permette le contrôle, et le cas échéant la limitation, sans risquer de bloquer l'innovation.

À la frontière entre la radioprotection et la sûreté nucléaire, les projets de fusion nucléaire, pour lesquels le « pas de produit de fission » est parfois compris à tort comme « pas d'effluents ni de déchets radioactifs » représentent un exemple particulièrement parlant d'un autre défi que les innovations représentent pour le régulateur. C'est aussi à lui qu'il appartient d'expliquer les enjeux de sûreté nucléaire et de radioprotection aux décideurs, aux industriels comme au public et parties prenantes. D'ailleurs parfois ingrate, cette action est déterminante dans l'acceptation des activités nucléaires qui dépend de la confiance, confiance qui dépend elle-même d'un partage des enjeux sincère, proportionné et exhaustif, en toute transparence. Cette notion de "trusted regulator" repose sur un dialogue ouvert et objectif, et sur la volonté à faire de la question de la protection de la population et de l'environnement la première priorité.

La tentation de disposer d'un régulateur dont la délivrance rapide d'avis favorables accélérerait les processus, même si elle semble intéressante sur le court terme, se payerait au prix fort dans la durée et laisserait le sentiment aux citoyens qu'ils ne peuvent faire confiance ni à leurs représentants ni à leurs experts scientifiques. L'acceptabilité du nucléaire ne saurait être acquise sans garantie sur la protection des personnes et de l'environnement. Loin d'être un frein au développement des activités nucléaires, le haut niveau de radioprotection et de sûreté nucléaire est plutôt le plus sûr garant de leur réussite. Il ne saurait y avoir de renouveau du nucléaire sans une radioprotection forte.

Références

- BOURGUIGNON M. (2023), « Pas de renouveau du nucléaire sans une radioprotection forte », *Radioprotection*, 58(3), pp. 157-159.
- NEA (2024), "Characteristics of a trusted nuclear regulator", NEA Green booklet, https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2024-04/7618_green_booklet_-_characteristics_of_a_trusted_nuclear_regulator.pdf
- BERTHO JM, HABIB GERYES B. (2023), « La radioprotection est une attitude... » *Radioprotection* 58(2), pp. 77-78.
- ASN (2023), "Nuward SMR Joint early review, Pilot phase closure report", https://www.french-nuclear-safety.fr/content/download/192690/file/NUWARD%20SMR%20Joint%20Early%20Review_Closure%20Report_Final_Version%20sign%C3%A9_vf.pdf

Le maintien et le renouvellement des compétences en radioprotection dans le cadre de la relance de la filière électronucléaire française

Par **Éric GADET**

Directeur de l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN)

À ce jour, la filière électronucléaire française compte sur ses 125 000 emplois directs et 220 000 emplois indirects pour subvenir à ses besoins en compétences. Cependant, les projets de constructions de 6 à 14 nouveaux réacteurs annoncés par le président de la République le 10 février 2022 à Belfort, ainsi que ceux de prolongation de la durée de vie des réacteurs du parc actuel jusqu'à 60 ans et au-delà, changent la donne. La filière estime devoir recruter 100 000 personnes sur les dix prochaines années pour atteindre ses objectifs. Les métiers de la radioprotection, ne sont pas en reste.

Ainsi, le maintien et le renouvellement des compétences en radioprotection obligent l'ensemble des acteurs de la filière – industriels, organismes de formation et établissements d'enseignement, branches et syndicats professionnels, organisations représentatives du personnel, services de l'État –, qui se mettent aujourd'hui en ordre de marche afin de répondre à ces besoins à court, moyen et long termes afin de relever les défis industriels de demain en assurant au meilleur niveau la sûreté et la sécurité des installations, du personnel et de l'environnement.

La France dispose d'un parc de 57 réacteurs nucléaires en fonctionnement. En 2023, avec 56 réacteurs à son actif – la divergence de Flamanville 3, 57^e réacteur actuellement en fonctionnement, a eu lieu le 3 septembre 2024 –, 65 % de l'électricité produite sur le territoire national était d'origine nucléaire. La filière électronucléaire française compte sur ses 125 000 emplois directs et 220 000 emplois indirects pour subvenir à ses besoins en compétences. Elle gère ainsi l'ensemble du cycle de ses installations : la construction, l'exploitation, le démantèlement, la gestion des déchets tout en développant la R&D.

Mais les projets de constructions de 6 à 14 nouveaux réacteurs de type EPR2 annoncés par le président de la République le 10 février 2022 à Belfort¹, ainsi que ceux de prolongation de la durée de vie des réacteurs du parc actuel jusqu'à 60 ans et au-delà, changent la donne. La filière estime devoir recruter 100 000 personnes sur les dix prochaines années pour atteindre ses objectifs. Il s'agit tant de pourvoir aux nouveaux besoins que d'effacer les effets de la pyramide des âges de la filière en remplaçant les nombreux départs en retraite prévus dans les années à venir. Les métiers

de la radioprotection, essentiels à la sûreté et à la sécurité des installations, du personnel et de l'environnement, ne sont pas en reste.

Le maintien des compétences, un enjeu majeur pour la filière

Le maintien et le renouvellement des compétences sont des enjeux majeurs et constants pour la filière nucléaire française. Ils sont aujourd'hui d'autant plus importants que la filière a connu de grandes discontinuités dans ses activités – liées notamment aux aléas politiques –, créant des discontinuités dans la disponibilité et le maintien des compétences. Seize années se sont ainsi écoulées entre le début de construction du réacteur Civaux 2 en 1991, dernier réacteur du « plan Messmer », et le début de construction de Flamanville 3 en 2007 ; vingt-et-une années devront s'écouler entre le début de la construction de Flamanville 3 et la coulée du premier béton des futurs EPR2 de Penly prévue en 2028.

Cette discontinuité d'activité, le choix de la France de miser sur les services au détriment de l'industrie, le désintérêt des jeunes générations – consécutifs – pour les métiers de l'industrie, sans même évoquer, plus

¹ <https://www.elysee.fr/emmanuel-macron/2022/02/10/reprendre-en-main-notre-destin-energetique>

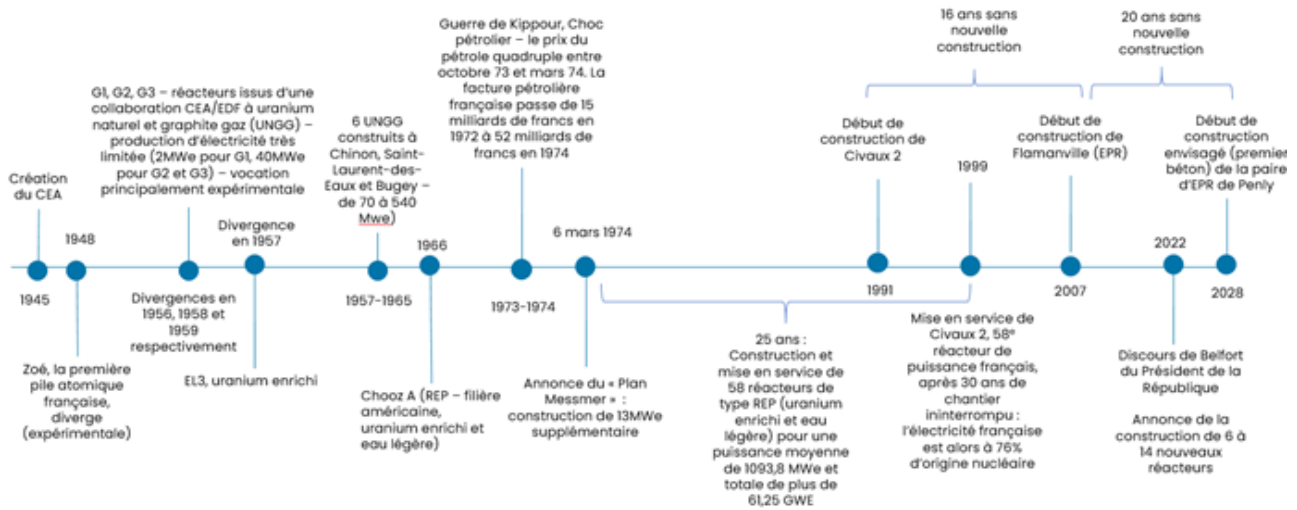


Figure 1 : Historique du parc nucléaire en France (Source : © CEA/INSTN).

L'évolution de la perception du nucléaire en France

De nombreuses études ont été menées pour tenter de comprendre la défiance des français envers le nucléaire. Avant la relance du nucléaire, l'une des premières raisons citées était le fait que l'énergie nucléaire n'était pas une énergie décarbonnée et qu'elle produisait trop d'émissions de CO₂. Selon une étude BVA réalisée pour Orano en 2019 auprès de 3 008 Français, dont un échantillon national représentatif de 2 405 répondants, 69 % des Français estimaient que le nucléaire contribuait à la production de gaz à effet de serre et au dérèglement climatique, alors qu'il représente la première source d'énergie décarbonnée en France. Illustration de cette perception, respectivement 11 % et 10 % d'entre eux jugeaient que le charbon et le pétrole contribuaient moins au gaz à effet de serre que le nucléaire. Si l'accident nucléaire de Fukushima-Daiichi (2011) a clairement entamé la confiance des Français dans le nucléaire, l'influence du pouvoir et des décisions politiques sur la perception nationale de l'atome est prépondérante : la défiance des Français envers le nucléaire passe de 35 % en 2012 à 46 % en 2018, 1 an après la signature par Ségolène Royal du décret portant abrogation de l'autorisation d'exploiter la centrale nucléaire de Fessenheim (Source : étude annuelle EDF sur la perception du nucléaire en France). Presque 2 ans après le discours de Belfort et l'annonce de la relance du nucléaire, l'enquête annuelle d'opinion de l'ASN auprès des Français sur leur perception du nucléaire (Baromètre 2022-2023 publié le 20 novembre 2023) « montre que le rapport des Français au nucléaire a évolué quel que soit le jugement porté sur ce type d'énergie : ils sont désormais 46 %, contre 43 % en 2021, se déclarant favorables au nucléaire : un niveau record jamais atteint. ».

récemment la PPE² de 2020 annonçant la fermeture de 14 réacteurs nucléaires d'ici 2035, ont conduit à une pyramide des âges préjudiciable dans l'industrie française de manière générale et dans l'industrie nucléaire en particulier.

Le pouvoir politique, bien qu'en grande partie responsable de cette désindustrialisation et du désintérêt pour

l'industrie, n'est pas inconscient de ses conséquences. En septembre 2010, le ministre de l'Industrie Christian Estrosi installait douze comités stratégiques de filières (CSF), dont celui de la filière nucléaire (CSFN), pour initier la « reconquête industrielle française ». La filière nucléaire était alors déjà confrontée à un grand défi, celui de maintenir les compétences pour la maintenance et l'exploitation courante et le grand carénage³ malgré des départs à la retraite très significatifs. En décembre 2012, le groupe de travail « Compétences et formation » du CSFN publiait sa première synthèse qui mettait en exergue les défis de la filière dans le domaine de l'emploi, des compétences et de la formation : « Les

² Programmation Pluriannuelle de l'Énergie : <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/20200422%20Synthe%CC%80se%20de%20la%20PPE.pdf>, voir p. 5 « Fermeture de 14 réacteurs d'ici 2035, date d'atteinte d'une part de 50 % d'électricité nucléaire dans le mix énergétique ». Texte complet de la PPE en date du 22 avril 2020, disponible ici : <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/20200422%20Programmation%20pluriannuelle%20de%20l'e%CC%81nergie.pdf>, voir p. 159 « La trajectoire d'évolution du parc électronucléaire ».

³ Programme industriel de rénovation et de modernisation des centrales nucléaires existantes.

prochaines années vont donc être cruciales pour la filière nucléaire française, confrontée à un double défi : maintenir ses compétences techniques pour permettre de prolonger l'exploitation du parc nucléaire français, mais aussi renouveler ses effectifs pour préparer la relève des générations embauchées dans les années 1970 et 1980, lors des grands programmes de construction du parc nucléaire français. ».

Vint ensuite le rapport Folz sur la construction de l'EPR de Flamanville remis le 28 octobre 2019 au ministre de l'Économie et des Finances. Commandité par le Gouvernement pour analyser, notamment, les causes du retard de la construction de l'EPR de Flamanville⁴, ce rapport met à mal les compétences de la filière. La perte de compétences est pointée du doigt comme étant en partie responsable des délais allongés et surcoûts significatif du nouveau réacteur français : « Dans ce contexte, et en dépit de l'activité induite par la maintenance et les visites décennales du parc existant, il n'est pas surprenant de constater une perte de compétence certaine de la plupart des acteurs concernés, tant du fait du départ en retraite de spécialistes confirmés que du défaut d'entretien des expertises et savoir-faire inutilisés. ».

Point d'orgue de cette prise de conscience, lors de son discours à Belfort le 10 février 2022, le président de la République « souhaite que 6 EPR2 soient construits et que nous lancions les études sur la construction de 8 EPR2 additionnels ». La perte de compétences est ciblée tout en soulignant l'absolue nécessité de les préserver. « Ce choix nous devons le faire aujourd'hui pour donner à EDF et à toute la filière la visibilité qui s'impose et là-aussi, pour tirer toutes les leçons du passé. Car quand des ruptures arrivent, quand la visibilité n'est plus là c'est à ce moment qu'il y a des ruptures de charge, c'est à ce moment qu'il y a des pertes de compétences, c'est à ce moment que nous prenons des risques. Par ce choix de la Nation au long cours nous nous donnons aussi les moyens de préserver nos compétences nos savoir-faire ; chez EDF bien sûr mais dans toute la filière [...] ».

Cette relance du nucléaire en France n'est donc pas sans enjeux et les compétences sont en leur cœur. Pour y faire face, la filière s'est structurée notamment autour de deux institutions : le Groupement des industriels français de l'énergie nucléaire (Gifen) et l'Université des métiers du nucléaire (UMN). Le Gifen a ainsi créé une commission dédiée aux problématiques d'emploi, de compétences et de formation, le programme MATCH⁵ pour partager les prévisions de besoins en ressources humaines et techniques sur dix ans, le programme COACH dédié au compagnonnage et co-pilote, avec l'OPCO2i et le ministère du Travail, l'Engagement

⁴ « Par lettre en date du 5 juillet 2019 le président-directeur général d'EDF m'a chargé de faire une analyse des raisons qui avaient conduit au choix de l'EPR, des causes des retards successifs et des écarts entre les prévisions initiales et les coûts à terminaison de la construction de ce réacteur à Flamanville. ».

⁵ Outil de pilotage de l'adéquation entre les besoins et les ressources de la filière nucléaire, piloté par le GIFEN. Plus de 100 entreprises de la filière et organisations professionnelles sectorielles y contribuent.

de développement de l'emploi et des compétences (EDEC)⁶ de la filière. L'UMN, créée quant à elle en 2021 dans le cadre de l'avenant au Contrat stratégique de filière, co-pilote avec la Délégation interministérielle au nouveau nucléaire (Dinn) le plan d'actions « compétences » qu'elle a remis au Gouvernement en juin 2023. Les défis sont multiples : cartographier les emplois et les compétences, anticiper les besoins, renforcer l'attractivité des métiers et des formations qui y conduisent, capitaliser les connaissances et les compétences et les transmettre aux nouveaux arrivants, recruter pour sécuriser les 100 000 emplois dont la filière va devoir se doter sur les dix prochaines années.

Les travaux menés, notamment dans le cadre de l'EDEC et du Programme MATCH, permettent aujourd'hui à la filière de disposer d'une vision à 10 ans de ses besoins en compétences et formations associées.

Sur le périmètre des 20 segments d'activité de l'étude MATCH et 84⁷ métiers au cœur des activités nucléaires, qui représentent 125 000 emplois directs, équivalents temps plein, en 2023, la filière prévoit 60 000 recrutements équivalents temps plein (à moitié pour compenser les départs, à moitié pour la croissance d'activité), soit 6 000 par an avec des pointes à 10 000 par an.

Élargi à l'ensemble des 220 000 emplois que la filière compte au total, ce besoin est d'environ 100 000 recrutements équivalents temps plein sur 10 ans pour les chantiers de construction des futurs EPR2, des SMR, l'exploitation et la maintenance du parc en service, le grand carénage et l'allongement de la durée de vie des centrales.

Sur la base de l'étude MATCH du Gifen remise le 21 avril 2023 aux ministres de la Transition énergétique et de l'Industrie, l'UMN a également remis le 9 juin son plan d'actions détaillé pour que la filière nucléaire française attire, forme et recrute ses 100 000 nouveaux arrivants.

Le plan d'actions « compétences » est structuré en sept leviers :

- renforcer l'attractivité de la filière nucléaire ;
- élargir le *sourcing* et favoriser les reconversions ;
- favoriser l'orientation vers les formations techniques ;
- adapter l'offre de formation initiale ;
- favoriser l'alternance ;
- fédérer les moyens de formation de la filière ;
- renforcer les capacités d'intégration des entreprises de la filière.

⁶ Accord-cadre entre le ministère du Travail et le GIFEN, les branches professionnelles de la métallurgie et des industries électriques et gazières et les organisations syndicales représentatives de ces branches professionnelles visant à régénérer et préserver les compétences de personnels et entreprises de la filière nucléaire. Cet accord-cadre, signé début 2021 et co-financé par le ministère du Travail et l'OPCO2i, porte sur quatre axes : cartographie, formation, alternance et attractivité.

⁷ 97 sur l'étude 2024.

Les métiers de la radioprotection : des métiers clés pour assurer la sûreté et la sécurité des installations, du personnel et de l'environnement

Les métiers de la radioprotection jouent un rôle clef dans la conception, la mise en œuvre et l'actualisation des mesures de prévention et de maîtrise des risques liés aux rayonnements ionisants. Ils sont présents sur tous types d'installations nucléaires : installations de R&D, réacteurs, installations du cycle du combustible... Ils sont donc recherchés tant par les industriels, que par les organismes de contrôle, les organismes de R&D et les bureaux d'études et d'ingénierie. La filière nucléaire forme et emploie des radioprotectionnistes à tous niveaux de qualification : de l'opérateur à l'ingénieur en passant par le technicien.

Les métiers de la radioprotection font partie des 84⁸ métiers « clés et au cœur du nucléaire » étudiés dans le cadre du programme MATCH et le métier de technicien en radioprotection est l'un des dix métiers les plus représentés actuellement dans la filière nucléaire civile. Pour autant, c'est également l'un des 20 métiers les plus « sensibles », c'est-à-dire que le poids des recrutements est élevé alors que le métier est en très forte tension sur le marché de l'emploi⁹. 69 % des recrutements de techniciens en radioprotection sont considérés comme difficiles et un tiers des entreprises considère que des efforts, à la fois d'attractivité et de formation, sont requis afin de répondre au futur plan

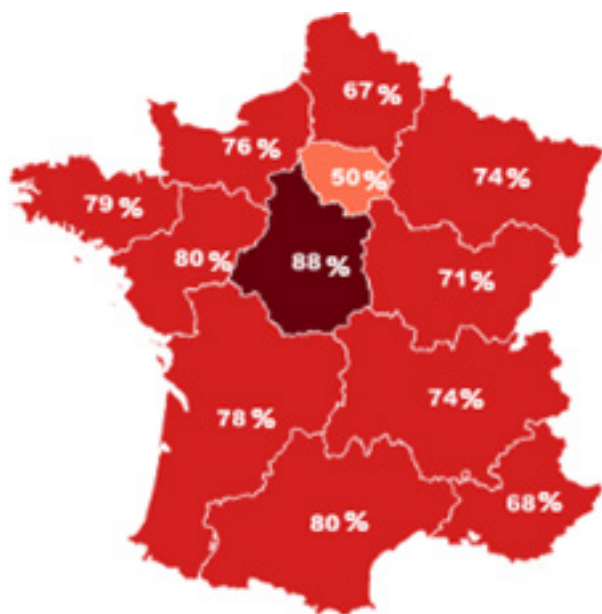


Figure 2 : Les difficultés de recrutements en France par région (Source : Enquête Besoins en main d'œuvre 2022 de Pôle Emploi).

⁸ 97 sur l'étude 2024.

⁹ La tension sur le marché de l'emploi est caractérisée par l'indice DARES par l'intensité d'embauche, d'une part, et l'inadéquation des compétences entre formation et emploi, d'autre part.

de charge. Les besoins d'ingénieur en radioprotection¹⁰ seront également notables sur la prochaine décennie bien que le métier ne rentre pas dans la catégorie des plus sensibles¹¹.

Les enjeux de formation pour les métiers de la radioprotection

Pour chaque métier l'EDEC a recensé les formations disponibles sur le territoire national et analysé la répartition régionale de personnes formées et susceptibles d'exercer chacun de ces métiers.

Le bilan pour le métier de technicien en radioprotection est le suivant :

Nombre & potentiel des formations sur le métier

Nombre de formations disponibles sur le territoire national | 48 formations

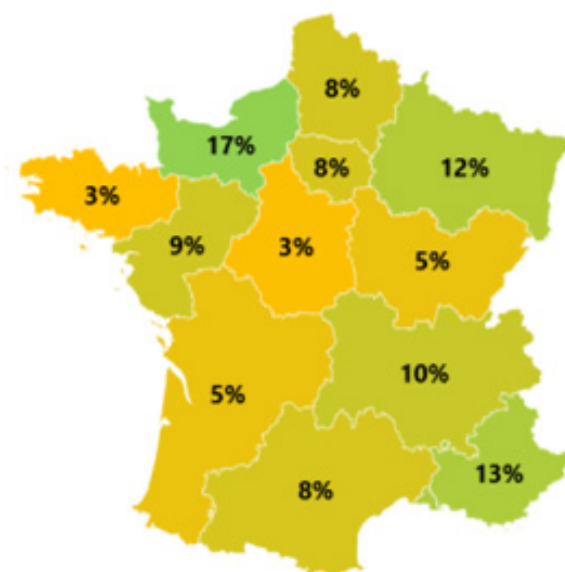


Figure 3 : Répartition régionale du potentiel de personnes formées susceptibles de s'orienter vers la filière nucléaire civile : le calcul du potentiel de personnes formées susceptibles de rejoindre la filière correspond à la somme des capacités de formation estimées X estimation du taux de formés ne poursuivant pas leurs études X taux de personnes susceptible de s'orienter vers la filière (calcul probabiliste) (Sources : GeoNames, Microsoft, TomTom).

Il existe de grandes disparités régionales. La Normandie possède le plus grand potentiel de diplômés susceptibles de rejoindre la filière (17 % du total). Le nombre total reste cependant insuffisant pour satisfaire l'ensemble des besoins. De plus, les industriels de la filière alertent sur le besoin de former au plus vite, sachant que la montée en compétences en entreprise demande encore d'un à trois ans pour être pleinement opérationnel.

¹⁰ Le terme d'ingénieur est utilisé ici pour désigner le métier/la fonction et non le diplôme acquis par les personnes effectuant ce métier. En effet, la majorité des formations spécialisées en radioprotection au niveau bac+5 sont des Masters.

¹¹ Source : EDEC de la filière nucléaire, cartographie des effectifs et projection des besoins en emploi et recrutement, juin 2023.

Pour les ingénieurs, 63 formations sont recensées avec 31 % du potentiel de personnes formées susceptibles de s'orienter vers la filière nucléaire civile en région AURA et 25 % en IDF. Si ces pourcentages sont en adéquation avec la répartition régionale des ETP actuels d'ingénieurs en radioprotection, ils ne couvrent pas les régions où les recrutements sont les plus difficiles, à savoir la Normandie, les Hauts-de-France et l'Occitanie¹².

À noter qu'au-delà de la formation diplômante ou certifiante pour les opérateurs, techniciens et ingénieurs dont la radioprotection est le cœur de métier, la formation professionnelle continue des travailleurs susceptibles d'intervenir en zone surveillée ou contrôlée est également critique (techniciens de maintenance, électriciens, soudeurs...). Le Code du travail prévoit que les travailleurs susceptibles d'intervenir en zone surveillée ou contrôlée bénéficient d'une formation à la radioprotection organisée par l'employeur et renouvelée *a minima* tous les 3 ans (articles R. 4451-47 & R. 4451-50). La croissance des recrutements nécessaires à la réussite des projets industriels de la filière, ainsi que l'augmentation des effectifs qui s'ensuivra, engendreront une augmentation conséquente des besoins en formation professionnelle continue des salariés de la filière dans le domaine de la radioprotection. Une augmentation des capacités des organismes de formation professionnelle continue est donc absolument nécessaire pour satisfaire ce besoin, tant en termes de formateurs que de ressources matérielles.

Les stratégies pour répondre aux enjeux

Deux types de stratégie sont mises en place pour répondre aux enjeux :

- des stratégies nationales ;
- des stratégies territoriales/régionales.

Au niveau national

Le Plan France Relance, à travers l'appel à projet « Renforcement des compétences de la filière nucléaire » a permis à de nombreux établissements d'enseignement et organismes de formation professionnelle continue de construire, moderniser, agrandir ou mettre en conformité leurs chantiers-écoles « radioprotection ». De nombreux outils multimédia de formation à la radioprotection ont également pu être développés dans ce cadre, de type *serious game* ou dispositifs en réalité virtuelle ou augmentée.

Pour accompagner la montée en charge des besoins en ressources pédagogiques, les instances de l'EDEC se sont penchées sur les possibilités de synergies entre les différents acteurs de la formation : partage de formateurs, mise à disposition de ressources matérielles (par exemple chantier-école), accès à des ressources numériques partagées... Si cette bonne pratique existe déjà dans la filière (6 organismes sur 10 partagent déjà des ressources), le potentiel de croissance est encore

important¹³. La première action résultant de cette étude sera mise en œuvre dès 2025 avec la création d'une plateforme en ligne de partage des ressources dans tous les domaines de la formation nucléaire, y compris la radioprotection.

Les campagnes nationales d'attractivité sur les réseaux sociaux, la création du portail « MonAvenirDansLeNucleaire.fr » ainsi que la Semaine des Métiers du Nucléaire coorganisée depuis 2022 par l'UMN et France Travail visent à attirer les jeunes, les demandeurs d'emploi et les personnes en recherche de reconversion vers les formations et les métiers du nucléaire. Tous les métiers de la filière y sont présentés et les métiers en tension, dont ceux de la radioprotection, y sont particulièrement mis en exergue.

La mise en place de dispositifs de « Validation des acquis de l'expérience » (VAE), individuelle ou collective, pour de nombreuses formations en radioprotection facilite et accélère la formation et la certification des professionnels.

Au niveau territorial/régional

Des stratégies locales des établissements d'enseignement se déploient au cœur des évolutions de leurs écosystèmes, depuis le *sourcing* des étudiants jusqu'au bassin d'emploi.

L'appel à manifestation d'intérêt « compétences et métiers d'avenir » (AMI/CMA) vise à favoriser la mise en place de politiques et d'outils de formation communs au niveau local, en s'appuyant notamment sur les Campus des Métiers et des Qualifications et les Campus d'Excellence. On constate ainsi une forte implication en région normande qui accueillera la construction des deux premiers EPR2 du programme de relance sur le site de Penly, avec une mise en service prévue en 2035. Fort de cette activité, le projet 3NC (Normandie Nucléaire, Nouvelles Compétences), lauréat de l'AMI CMA, rassemble un consortium de 36 acteurs locaux et bénéficie d'un budget de 64 millions d'euros sur 5 ans, dont 42 millions financés par l'État (annoncé le 9 juin 2023 à Caen, par les ministres de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, et de la Transition énergétique, ainsi que par la ministre déléguée chargée de l'Enseignement et de la Formation professionnels). Il se donne pour objectif de former 5 400 personnes par an d'ici 2030, dont 4 500 jeunes du CAP au bac+2 et près de 750 étudiants de bac+3 au doctorat. Il en découle de nombreux projets de formations ou d'infrastructures comme la Halle technologique nucléaire normande (HT2N), une plateforme de formation hébergeant du matériel spécifique destiné à la formation diplômante et continue à Caen. Les formations en radioprotection disponibles dans la région normande bénéficieront de ce projet à travers le partenariat entre l'INSTN et l'Université de Caen Normandie qui vise à s'élargir en développant un portefeuille commun de formations continues

¹² Source : EDEC de la filière nucléaire, cartographie des effectifs et projection des besoins en emploi et recrutement, juin 2023.

¹³ EDEC Nucléaire : mise à jour de l'état des lieux des formations et proposition de stratégie d'optimisation des ressources pédagogiques, février 2024.

en plus des diplômes déjà co-accrédités (LP-MRSN option CRIATP¹⁴ et M2.RP¹⁵).

On constate cette même mobilisation en Île-de-France avec la création du Campus des Métiers et Qualification Énergie durable, piloté par l'Université Paris-Saclay, et son Pôle nucléaire, qui développe actuellement une coloration « radioprotection » pour le BTS Environnement Nucléaire en alternance du lycée André Malraux ou encore la création d'une plateforme dédiée à la formation sur l'énergie nucléaire et la radioprotection à l'Université Paris-Saclay ouverte à l'ensemble de la communauté éducative du supérieur ou du secondaire.

Conclusion

En conclusion, les commissions et rapports successifs concernant la filière nucléaire indiquent depuis plus de 10 ans que des défis majeurs résident dans : l'emploi, le maintien des compétences et la formation. Annoncée en février 2022, la relance de la filière nucléaire met en exergue cette nécessité.

Parmi l'ensemble des compétences nécessaires pour la filière, les métiers de la radioprotection occupent une place très importante.

Ils sont impliqués à toutes les étapes d'un projet : de la conception au démantèlement, en passant par la mise en œuvre et le maintien au niveau de l'état de l'art :

- ils sont présents partout : installations de R&D, réacteurs, installations du cycle du combustible ;
- ils sont recherchés par tous : industriels, organismes de contrôle et d'expertise, organismes de R&D et bureaux d'études ;
- ils forment à tous les niveaux de qualification : du niveau bac au niveau bac+5, en passant par le bac+2 et le bac+3.

Il est également important de noter qu'une partie des qualifications ou des certifications délivrées en radioprotection ont un besoin de renouvellement périodique, ce qui engendrera une augmentation importante en termes de formation professionnelle continue et donc un besoin tout aussi important de formateurs qualifiés.

Pour répondre à l'ensemble de ces enjeux, des stratégies nationales et leurs déclinaisons territoriales sont mises en place. Nous pouvons ici citer les Plan France Relance et France 2030, la création de portails nationaux ou d'événements dédiés comme la Semaine des métiers du nucléaire pour ce qui traite du niveau national. Au niveau territorial, les régions, comme par exemple la Normandie et l'Île-de-France citées ci-dessus, ont répondu à cet appel au travers de la mise en place ou du renforcement de partenariats entre organismes de formation initiale, professionnelle conti-

nue, services de l'État ou parfois même par la création de Campus des Métiers et des Qualifications dédiés.

Ainsi, le maintien et le renouvellement des compétences en radioprotection dans le cadre de la relance de la filière électronucléaire française obligent l'ensemble des acteurs de la filière – industriels, organismes de formation et établissements d'enseignement, branches et syndicats professionnels, organisations représentatives du personnel, services de l'État –, à se mettre aujourd'hui tous en ordre de marche afin de pouvoir répondre à ces besoins à court, moyen et long terme dans le but de relever les défis industriels de demain en assurant au meilleur niveau la sûreté et la sécurité des installations, du personnel et de l'environnement.

¹⁴ Licence professionnelle « Métiers de la Radioprotection et de la Sécurité Nucléaire option Contrôle des Rayonnements Ionisants et Application des Techniques de Protection ».

¹⁵ Deuxième année du Master de Physique, parcours Radioprotection.

Sources naturelles et artificielles de rayonnements ionisants : quelle exposition des personnes ?

Par **Éric BLANCHARDON**

Chargé d'évaluation de la maîtrise des risques radiologiques et nucléaires au bureau d'expertise en radioprotection de la population de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN)

Et **Philippe RENAUD**

Chargé de mission auprès du directeur de l'Environnement de l'IRSN

Nous sommes tous exposés au rayonnement cosmique et aux radionucléides présents dans notre environnement, qu'il s'agisse de radionucléides naturels (cosmogéniques ou telluriques) ou de radionucléides artificiels rémanents des retombées anciennes des essais atmosphériques d'armes nucléaires ou de l'accident de Tchernobyl, ou encore de radionucléides rejetés par l'industrie nucléaire. Nous pouvons être également exposés à des rayonnements ionisants utilisés en imagerie médicale et pour le traitement de certaines pathologies. Enfin, les travailleurs de certains secteurs professionnels (travailleurs du domaine médical et de l'industrie nucléaire, personnels navigants de l'aéronautique...) sont soumis à des expositions spécifiques. La dose moyenne reçue par la population française pendant la période 2015-2019 a été estimée à 6,5 mSv/an, cette moyenne cachant une importante variabilité liée au lieu de résidence, au mode de vie ou encore aux actes médicaux.

Introduction

Des radionucléides sont présents dans tous les compartiments de l'environnement et tous les matériaux, y compris le corps humain. L'ensemble de la population est exposé aux rayonnements ionisants qu'ils émettent de plusieurs manières : une exposition externe, notamment aux radionucléides présents dans le sol, les matériaux et dans l'air, une exposition interne si ces radionucléides sont ingérés ou inhalés (voir la Figure 1 page suivante). Les conséquences de ces expositions dépendent de la nature et de l'intensité du rayonnement, de son énergie et de la sensibilité des organes du corps qui les reçoivent. Ces paramètres sont pris en compte dans l'évaluation de la dose efficace qui est utilisée pour quantifier, en mSv, le niveau d'exposition aux rayonnements ionisants.

L'exposition de la population mondiale est analysée par le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR, 2010, 2022). En France, l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) réalise des bilans périodiques de l'état radiologique de l'environnement (IRSN, 2021a), de l'exposition de la population française (IRSN, 2021b) et, plus particulièrement, de celle des travailleurs (IRSN, 2024) et des patients (IRSN, 2020). Les principaux éléments de ces bilans sont repris ici.

Exposition aux rayonnements cosmiques

L'espace est continuellement bombardé par des particules chargées de haute énergie (protons, particules alpha, électrons et ions lourds) constituant le rayonnement cosmique dit primaire. En pénétrant dans l'atmosphère terrestre, les particules primaires incidentes interagissent avec les constituants de l'air en donnant naissance à un ensemble complexe de particules secondaires (protons, neutrons...) et de photons. La population est exposée à ces particules à la surface de la terre, mais également lors des voyages aériens. L'atmosphère terrestre agit comme un écran sur les particules primaires de haute énergie ; plus l'altitude est élevée et moins le flux de particules primaires est atténué. L'exposition aux rayonnements cosmiques au sol se caractérise donc par une intensité variable sur le territoire en fonction de l'altitude avec une dose efficace variant de 0,3 mSv/an à 1,1 mSv/an en fonction des communes ; et une dose efficace moyenne par habitant de 0,31 mSv/an. S'agissant de l'exposition de la population liée au transport aérien, on estime une dose moyenne annuelle par habitant de 14 μ Sv (soit 0,014 mSv/an) pour un nombre moyen d'heures passées en avion. Des voyageurs fréquents effectuant 10 vols aller-retour par an recevraient une dose d'environ 280 μ Sv (soit 0,28 mSv/an) en moyenne annuelle (voir la Figure 2 page suivante).

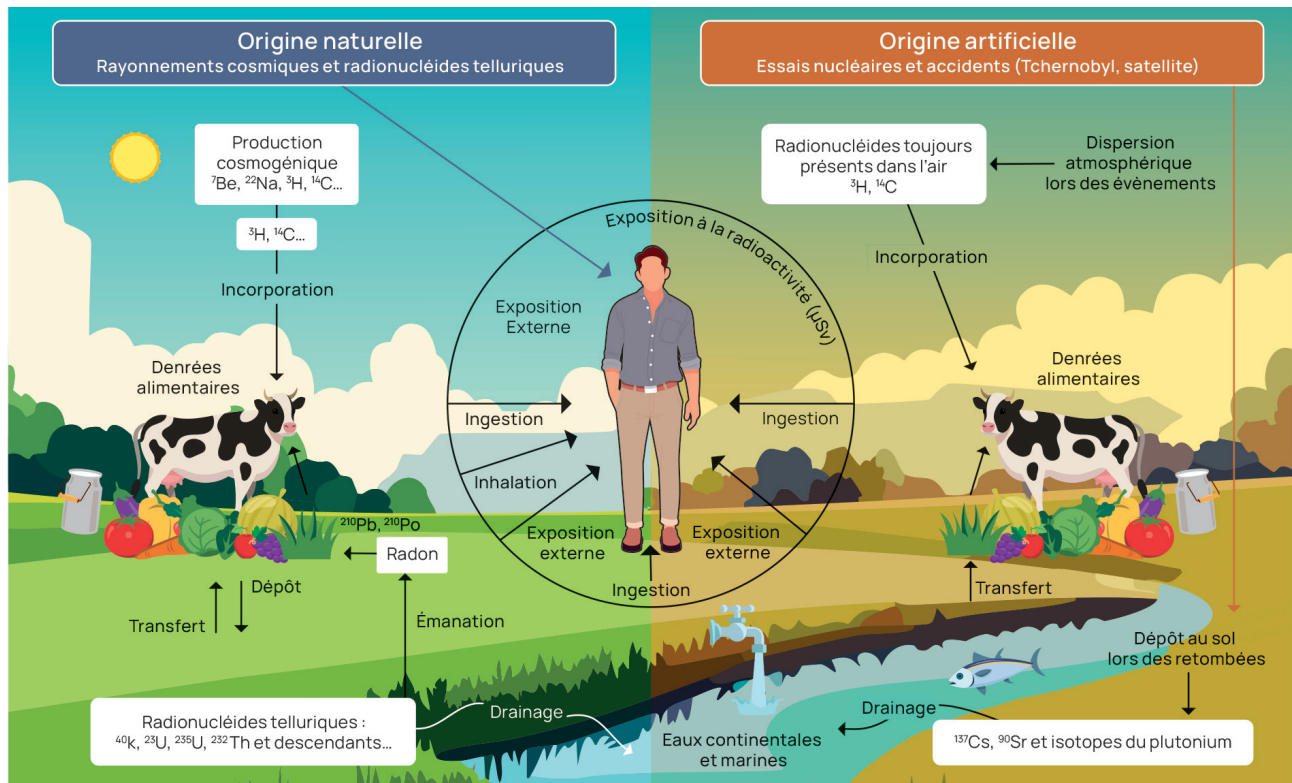
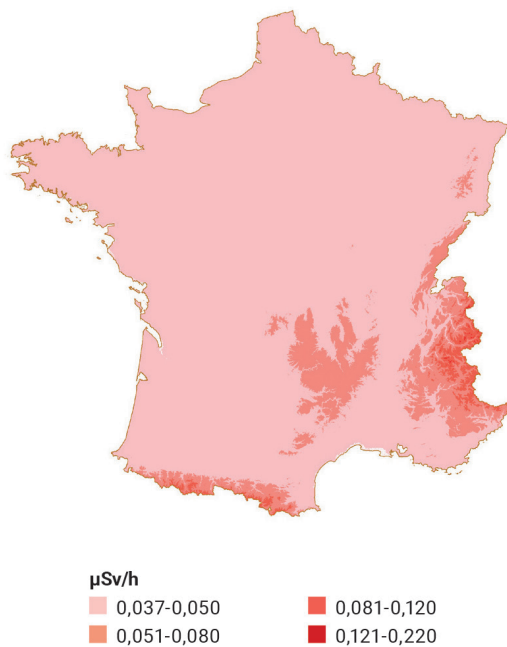


Figure 1 : Modes d'exposition à la radioactivité liés au bruit de fond radiologique (source : IRSN).

CARTE DU DÉBIT DE DOSE DANS L'AIR INDUIT PAR LE RAYONNEMENT COSMIQUE ($\mu\text{Sv/h}$)



ÉVOLUTION DU DÉBIT DE DOSE AVEC L'ALTITUDE ($\mu\text{Sv/h}$)

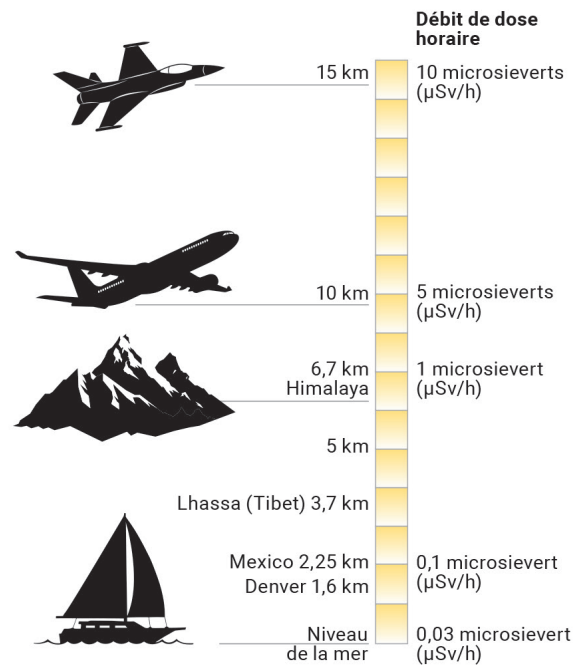


Figure 2 : Carte du débit de dose au sol induit par le rayonnement cosmique (source : IRSN).

Exposition aux rayonnements telluriques

La croûte terrestre contient des radionucléides dits primordiaux, présents sur terre depuis sa formation en

raison de leurs très longues périodes radioactives. Ces radionucléides sont principalement, l'uranium 238, le thorium 232 et l'uranium 235, qui, en se désintégrant, donnent naissance à une trentaine d'autres radionucléides naturels (chaînes de désintégration U-Th), ainsi que

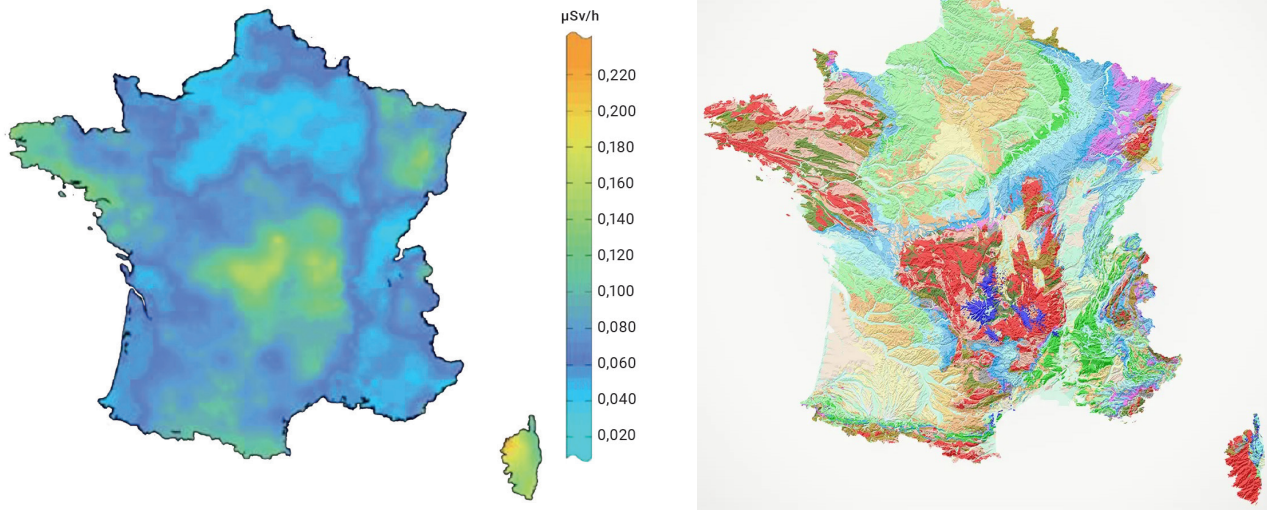


Figure 3 : Carte des débits de dose gamma tellurique (gauche, source : IRSN) et carte géologique de la France au 1/1000 000 (droite, source : BRGM, mise à jour le 02/11/2017).

le potassium 40 et le rubidium 87. Les rayonnements émis depuis le sol par ces radionucléides telluriques sont à l'origine d'une exposition externe des personnes. Cette exposition est plus importante dans les régions au sous-sols granitique, magmatique ou métamorphique, plus riches en uranium, thorium et potassium, comme le Massif central, la Bretagne et certaines parties des Vosges et de la Corse ; elle est plus faible dans les sols des bassins sédimentaires comme les bassins parisien et aquitain ainsi que dans les vallées fluviales (voir la Figure 3). Ainsi, l'exposition aux rayonnements d'origine tellurique se caractérise par une dose efficace variant de 0,3 mSv/an à 2 mSv/an suivant les régions ; et une dose efficace moyenne par habitant évaluée à 0,6 mSv/an.

Exposition au radon

Le radon est un gaz radioactif naturel qui résulte de la désintégration du radium (radium 226 essentiellement qui appartient à la chaîne de désintégration de l'uranium 238). Il émane du sol (et dans une moindre mesure des matériaux de construction et de l'eau) et

se dilue dans l'air extérieur où sa concentration varie avec la teneur en uranium du sous-sol. L'exposition par inhalation de radon résulte surtout du fait qu'il peut se concentrer dans les bâtiments mal ventilés, après avoir migré à travers les parties directement en contact avec le sol (cave, vide sanitaire...). La plupart des personnes (public et travailleurs) passant l'essentiel de son temps à l'intérieur (habitat, lieu de travail, bâtiments recevant du public), l'exposition au radon résulte principalement de son inhalation en intérieur de bâtiments (l'exposition à l'extérieur est environ 60 fois plus faible) (voir la Figure 4).

La dose efficace due à l'inhalation de radon est estimée entre 0,75 mSv/an et 47 mSv/an pour une moyenne de 3,5 mSv/an.

Exposition liée à l'incorporation de radionucléides d'origine naturelle

Les denrées alimentaires, les feuilles de tabac et les eaux de boisson contiennent naturellement des radio-

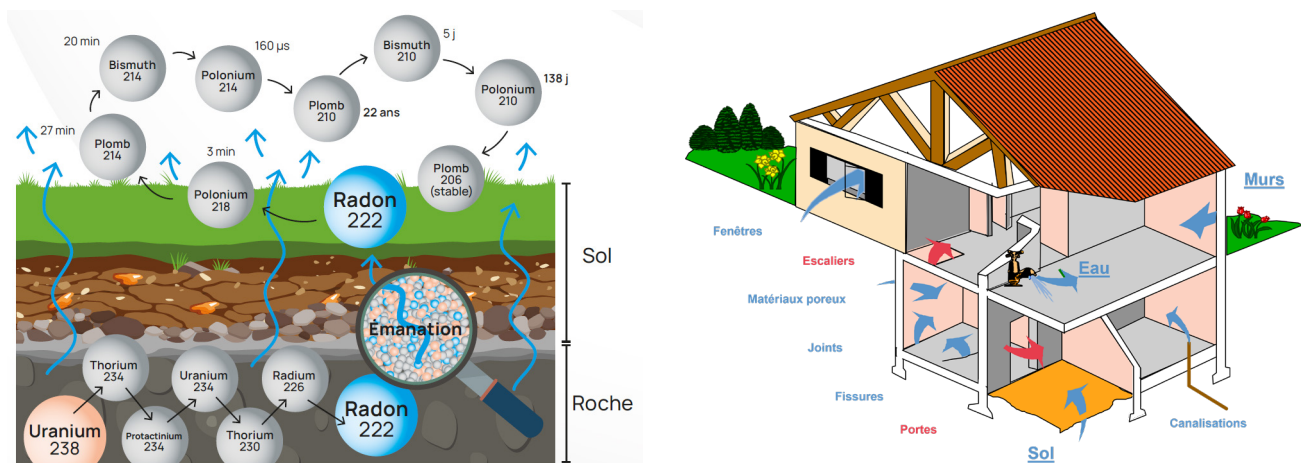


Figure 4 : Émanation et transfert du gaz radon (source : IRSN).

nucléides telluriques, ou qui sont produits en permanence dans les hautes couches de l'atmosphère sous l'effet du rayonnement cosmique (radionucléides cosmogéniques). Les principaux radionucléides cosmogéniques sont le tritium et le carbone 14 qui sont incorporés par les végétaux *via* la photosynthèse et s'intègrent ainsi dans les chaînes alimentaires. Les radionucléides telluriques sont transférés aux végétaux depuis les sols. Certains d'entre eux, comme le plomb et le polonium 210, descendants du radon qui a émané dans l'air, se déposent aussi à la surface des feuilles des végétaux. Les radionucléides naturels présents dans les milieux aquatiques, continentaux et marins, proviennent principalement du milieu terrestre, notamment par drainage des sols. Les radionucléides naturels sont transférés aux animaux principalement par ingestion (voir la Figure 5).

Le potassium 40, le polonium 210 et le plomb, ainsi que les radiums 226 et 228, sont à l'origine de l'essentiel de l'exposition liée à l'incorporation de radionucléides naturels qui résulte de l'ingestion de denrées et/ou du tabagisme. En effet, les radionucléides naturels contenus dans les feuilles de tabac sont libérés lors la combustion puis inhalés par le fumeur. Par ailleurs, du fait que le polonium 210 se concentre dans les coquillages et les crustacés, les habitudes de consommation de ces denrées sont, avec le tabagisme, les principales causes de variabilité de cette voie d'exposition. Ainsi, la dose efficace liée l'incorporation de radionucléides naturels est estimée entre 0,4 mSv/an pour une personne qui ne fume pas et ne mange pas de coquillages et de crustacés, et 1,8 mSv pour un gros fumeur et un gros consommateur de fruits de mer, pour une moyenne

nationale de 0,57 mSv/an. Enfin, il faut signaler que la teneur en radionucléides naturelle de l'eau de boisson peut conduire, pour moins de 1 % de la population française, à une dose supplémentaire de quelques centaines de microsievverts.

Exposition à la rémanence des retombées des essais nucléaires atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl

Entre 1945 et 1980, plus de 500 essais atmosphériques d'armes nucléaires, réalisés par les États-Unis, l'Union Soviétique, la Grande-Bretagne, la Chine et la France, ont libéré dans l'atmosphère de nombreux radionucléides. La plupart des radionucléides de période radioactive courte ayant disparu, il ne subsiste aujourd'hui que le césium 137, le strontium 90, les isotopes du plutonium et l'américium 241 principalement contenus dans les sols qui alimentent toutes les composantes de l'environnement, ainsi que le carbone 14 et le tritium présents dans l'air. Le césium 137 des essais nucléaires ne pouvant plus être distingué de celui provenant des retombées de l'accident de Tchernobyl, majoritaire sur la majeure partie du territoire français métropolitain, l'exposition actuelle de la population due aux retombées des essais nucléaires est principalement liée à l'incorporation de strontium 90 et de carbone 14 par ingestion de denrées, avec des doses efficaces estimées de l'ordre de 1 μ Sv/an (0,001 mSv/an) chacune au début des années 2020.

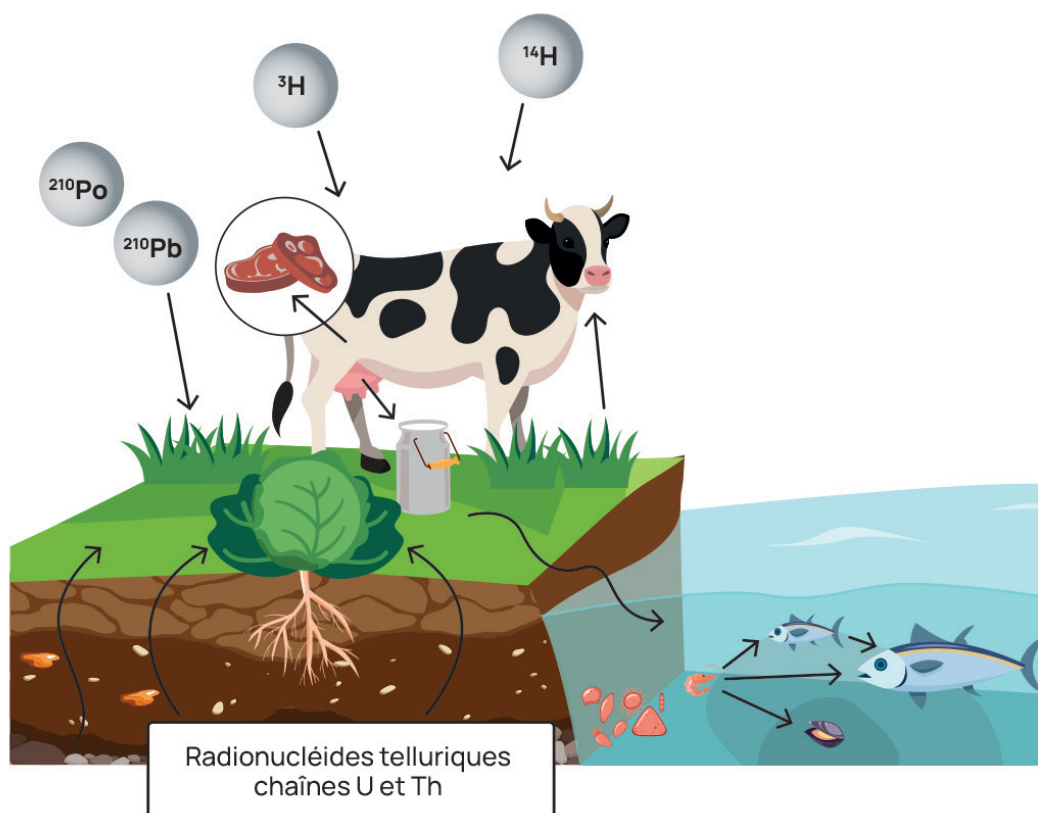


Figure 5 : Exposition par ingestion de radionucléides naturels (source : IRSN).

Les masses d'air contaminées par l'accident de Tchernobyl ont affecté la France en 1986. En raison de concentrations dans l'air plus importantes dans l'est que dans l'ouest du pays et de pluies très variables, les dépôts radioactifs, notamment ceux d'iode 131 et de césiums 134 et 137, ont été plus importants et plus hétérogènes dans l'Est de la France que dans le reste du pays. En raison de la disparition de l'iode 131 et du césium 134 par décroissance radioactive, les doses liées à la rémanence des retombées de l'accident de Tchernobyl sont dues au seul césium 137. Au début des années 2020, elles sont estimées entre 2 µSv par an pour la majeure partie du territoire et 12 µSv/an sur les zones de l'est du pays les plus touchées par les retombées de cet accident. Elles sont dues principalement à l'exposition externe aux rayonnements émis par le césium 137 présent dans les sols.

Les doses potentiellement reçues par les populations environnantes sont estimées annuellement par les exploitants nucléaires par modélisation à partir des rejets. Elles sont aussi estimées à fréquence triennale par l'IRSN sur la base des mesures acquises dans le cadre de la surveillance environnement des sites et centralisées via le Réseau national de mesure de la radioactivité dans l'environnement (voir le « Bilan de l'état radiologique de l'environnement français 2021-2023 »). Ces estimations dosimétriques sont concordantes et montrent que les doses potentiellement reçues par les populations riveraines des sites (dans un rayon de 10 km) sont inférieures ou égales à 1 µSv/an. À l'exception du site de la Hague où elles peuvent atteindre une dizaine de microsievert par an.

Expositions dues aux installations nucléaires et à des sources artificielles de rayonnement

Parmi les installations nucléaires, on distingue les centrales électronucléaires, les installations de l'industrie du cycle du combustible nucléaire, les centres de recherche, les centres de stockage de déchets radioactifs et les bases navales nucléaires. Les installations nucléaires sont amenées, dans le cadre de leur fonctionnement normal, à rejeter des substances radioactives dans l'environnement, dans leurs effluents liquides ou atmosphériques.

Exposition « médicale » des patients

En 2017, 45 % de la population a été exposée aux rayonnements ionisants dans un contexte de diagnostic médical conduisant à des expositions externes (radiographie conventionnelle et dentaire, mammographie, scanographie, radiologie interventionnelle à visée diagnostique spécifique) ou internes (scintigraphie après administration de radionucléides). La dose reçue peut varier d'environ 0,2 mSv pour une radio pulmonaire à 10 mSv pour un scanner abdomino-pelvien ou un TEP-scanner (voir la Figure 6), pour ce qui concerne les examens les plus courants. De plus, pour un même examen, il existe une grande disparité des

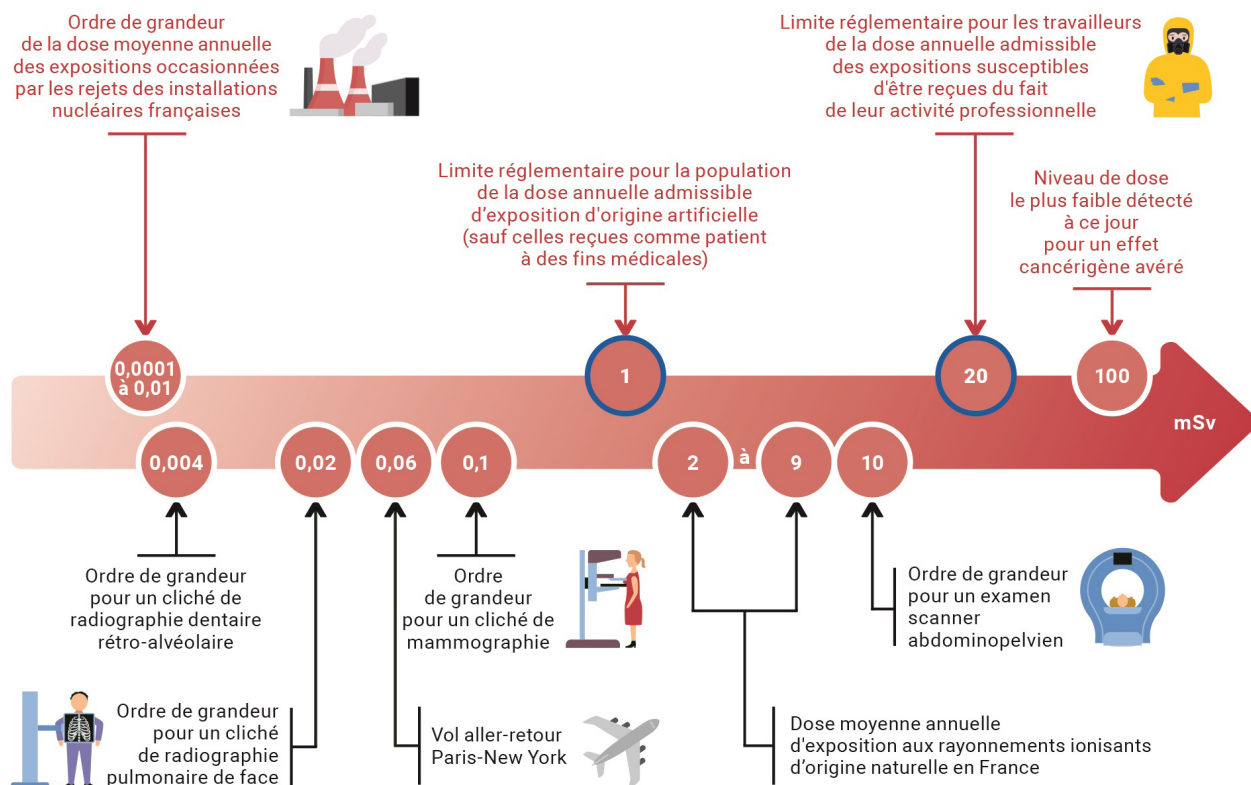


Figure 6 : Quelques ordres de grandeur des doses efficaces reçues lors d'examen diagnostiques (source : IRSN). Il est à noter que des études épidémiologiques récentes montrent un risque accru de cancer à des niveaux de dose de l'ordre de quelques dizaines de millisieverts (voir article de Dominique Laurier dans ce numéro).

doses reçues selon la pratique médicale, la technologie des appareils, la morphologie des patients, l'indication clinique...

Lorsque la dose efficace totale de la population française calculée pour l'année 2017 est rapportée au nombre de patients, la dose efficace individuelle moyenne est d'environ 3,4 mSv. La distribution est extrêmement hétérogène : la moitié des patients reçoit une dose inférieure ou égale à 0,1 mSv, 75 % reçoit moins de 1,5 mSv, tandis que les 5 % des patients les plus exposés reçoivent une dose supérieure à 18 mSv, pouvant atteindre plusieurs centaines de mSv pour un très faible nombre d'entre eux. Le nombre d'actes diagnostiques réalisés en France en 2017 est estimé à environ 85 millions, soit en moyenne environ 1 200 actes pour 1 000 habitants. La radiologie conventionnelle, la radiologie dentaire et la scanographie représentent respectivement 55 %, 29,5 % et 13 % des actes. La médecine nucléaire et la radiologie interventionnelle à visée diagnostique représentent quant-à-elles 2 % et 0,5 % des actes, respectivement. Rapportés à la population totale, les actes d'imagerie médicale diagnostique conduisent à une dose efficace moyenne par habitant de l'ordre de 1,5 mSv/an (IRSN, 2020).

S'agissant des actes thérapeutiques de radiothérapie externe et interne, les expositions associées correspondent à des fortes doses, délivrées localement pour soigner les pathologies concernées. Les patients ainsi traités constituent une fraction relativement peu nombreuse de la population générale et sont exposés dans un cadre très particulier. Ces dernières expositions ne sont pas comptabilisées dans les chiffres présentés ci-avant.

Exposition professionnelle

La surveillance des expositions professionnelles aux rayonnements ionisants concerne l'ensemble des travailleurs suivis dans les secteurs mettant en jeu des sources de rayonnements ionisants, y compris ceux de la défense, dans les domaines des activités médicales, dentaires et vétérinaires, de l'industrie nucléaire ou non nucléaire, de la recherche et de l'enseignement, mais aussi les travailleurs suivis dans les secteurs dont l'activité est susceptible de les exposer à la radioactivité naturelle, comme le personnel navigant. Lorsqu'un travailleur est soumis à un risque d'exposition externe, le suivi de référence s'effectue à l'aide de dosimètres portés par le travailleur. Lorsque le travailleur est soumis à un risque d'exposition interne, un programme de surveillance basé sur des mesures des rayonnements émis par les substances radioactives incorporées par le travailleur ou sur des analyses de prélèvements (urines, selles) prescrites par le médecin du travail, est mis en œuvre.

Conformément au code du travail, une surveillance de l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants est mise en œuvre dès lors que ceux-ci sont susceptibles d'être exposés au-dessus d'un certain seuil de rayonnements ionisants d'origine naturelle ou artificielle. Préalablement à l'affectation au poste de travail, l'employeur évalue l'exposition individuelle des

travailleurs. Au regard de la dose évaluée et de l'avis du médecin du travail, le travailleur bénéficie ou non d'un suivi dosimétrique individuel. 360 743 travailleurs étaient suivis en 2023 pour l'exposition externe. Ils ont reçu une dose moyenne de 0,95 mSv. Parmi ces travailleurs, moins de 1 % a été exposé à une dose efficace supérieure à 6 mSv. Six travailleurs ont été exposés à une dose efficace supérieure à la limite réglementaire de 20 mSv fixée par le code du travail, mais pour cinq d'entre eux, le dépassement n'a pas encore été confirmé par la médecine du travail. Dans la répartition des effectifs, le domaine des activités médicales, dentaires et vétérinaires est majoritaire, suivi de l'industrie nucléaire. Contrairement aux années précédentes où les travailleurs du domaine nucléaire et les personnels navigants exposés à la radioactivité naturelle (rayonnement cosmique) présentaient les valeurs de dose moyenne les plus élevées, en 2023, ce sont les travailleurs du domaine de l'industrie non nucléaire qui présentent la dose moyenne la plus élevée (1,42 mSv). Le nombre de cas avérés de contamination interne est faible : en 2023, 4 travailleurs ont eu une dose efficace engagée supérieure ou égale à 1 mSv (IRSN, 2024).

Conclusion

La dose efficace reçue en moyenne par la population en France du fait de l'ensemble des expositions, hors radiothérapie et expositions professionnelles, s'estimait en 2020 à 6,5 mSv (voir la Figure 7). C'est l'exposition au radon (54 %) qui constitue la contribution principale à la dose. Viennent ensuite l'exposition médicale (23 %), l'exposition au rayonnement tellurique (10 %), l'exposition liée à l'incorporation de radionucléides (8 %), l'exposition au rayonnement cosmique (5 %), enfin celle due à l'usage industriel et militaire de la radioactivité (< 1 % comprenant les expositions liées aux retombées des essais nucléaires et de l'accident de Tchernobyl et les doses potentielles dues aux rejets des installations nucléaires). Au-delà de cette exposition moyenne par habitant, les situations d'exposition de chacun d'entre nous varient en fonction du lieu d'habitation, des habitudes de vie et de consommation et des examens médicaux dont nous bénéficions. Cette

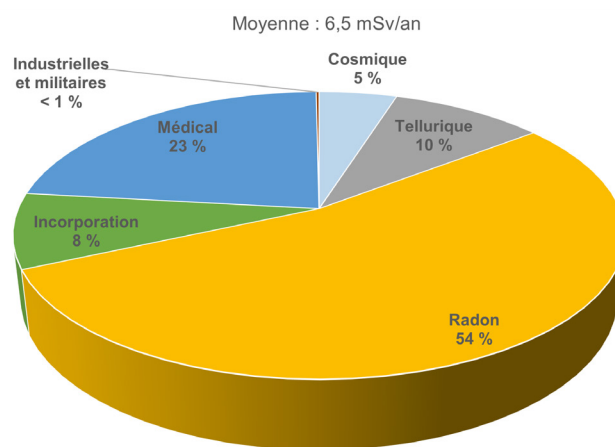


Figure 7 : Bilan de l'exposition moyenne de la population française sur la période 2015-2019 (source : IRSN).

variabilité de l'exposition individuelle a conduit l'IRSN à mettre à disposition du public un outil permettant à chacun d'estimer au mieux sa propre exposition (IRSN, 2021c).

Références

INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE (2020), « Exposition de la population aux rayonnements ionisants due aux actes d'imagerie médicale diagnostique réalisés en France en 2017 », <https://www.irs.n.fr/professionnels-sante/radioprotection-patients/exposition-population-francaise-actes-diagnostic>

INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE (2021a), « Bilan de l'état radiologique de l'environnement français de 2018 à 2020 », <https://www.irs.n.fr/savoir-comprendre/environnement/bilan-surveillance-radioactivite-france>

INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE (2021b), « Exposition de la population française aux rayonnements ionisants. Bilan 2014-2019 », https://www.irs.n.fr/FR/Actualites_presse/Communiques_et_dossiers_de_presse/Documents/IRSN_Rapport%20EXPOP_def.pdf

INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE, (2021c), application disponible sur <https://expop.irs.n.fr>

INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE (2024), « La radioprotection des travailleurs. Exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France : bilan 2023 », <https://expro.irs.n.fr/>

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION (2010), Sources, effects and risks of ionizing radiation, "UNSCEAR 2008 Report with scientific annexes", <https://www.unscear.org/unscear/en/publications/index.html>, ISBN: 978-92-1-142274-0

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION (2022), Sources, effects and risks of ionizing radiation, "UNSCEAR 2020/2021 Report with scientific annexes", <https://www.unscear.org/unscear/en/publications/index.html>

Réponse individuelle aux radiations ionisantes : nous ne sommes pas égaux face aux dommages de l'ADN

Par Nicolas FORAY

Inserm, UMR1296 « Radiations : défense, santé et environnement »

« Nous ne sommes pas égaux face aux radiations ». Cette phrase aurait pu être prononcée en 1906 au congrès qui réunissait à Lyon tous les « électroradiologistes » de l'époque qui signèrent une motion commune : « avec des doses égales évaluées avec les indicateurs actuels, certains individus dans des conditions spéciales peuvent, présenter des réactions quelque peu différentes ».

Cent vingt ans plus tard, les données radiobiologiques accumulées depuis permettent de soutenir deux faits : 1) la réponse individuelle aux radiations varie continûment de quelques rougeurs cutanées à la mort quasi-immédiate de patients atteints de syndromes génétiques rares ; 2) environ 20 % des individus montrent une réponse individuelle anormale aux radiations associée à un risque plus élevé de toxicité tissulaire, cancers radio-induits et/ou de vieillissement accéléré. Aujourd'hui, l'enjeu est de gérer une telle différence pour le patient, le citoyen ou le travailleur.

Prédire la radiosensibilité : la quête du Graal des radiobiologistes

Premières observations historiques : une évidence vieille de 130 ans

Quelques mois seulement après leur découverte en décembre 1895, les rayons X étaient déjà connus pour produire des effets délétères sur les tissus vivants (Foray *et al.*, 2012). C'est notamment ce que les premiers radiologues décrivirent sur le corps de leurs patients voire sur leur propre corps en appliquant les rayons X pour des radiographies osseuses (Arcelin, 1911). D'ailleurs, les trois grandes conséquences cliniques d'une irradiation étaient déjà connues dans les 10 premières années du XX^e siècle : des brûlures cutanées (réactions dites de toxicité ou de radiosensibilité) (Arcelin, 1911), des cancers radio-induits (ou réactions de radio-susceptibilité) (Frieben, 1902) et des cataractes radio-induites (réactions de radio-dégénérescence) (Chaluppecky, 1897). Malheureusement, pendant cette période, la dose de radiation absorbée n'était pas définie, si bien que ces observations pouvaient être dues à des surdoses physiques et non à une « idiosyncrasie individuelle » que certains évoquaient déjà (Arcelin, 1911). À un congrès d'« électroradiologistes » organisé à Lyon en 1906 et présidé par Jean-Alban Bergonié, on parvint à une motion prudente :

« avec des doses égales évaluées avec les indicateurs actuels, certains individus dans des conditions spéciales peuvent présenter des réactions quelque peu différentes » (Association française pour l'avancement des sciences, 1906). Présent à ce même congrès, le lyonnais Léon Bouchacourt (nommé parmi l'un des 11 premiers radiologues français de l'Histoire), accueillit dans son service en 1911 un jeune couple souhaitant se faire épiler par des rayons X. La pratique était assez courante mais dangereuse : Bouchacourt déconseilla dans un premier temps les imprudents mais finit par se laisser convaincre « pour la science » : il tenta de « compenser » la fragilité statistique de l'expérience (n = 2) par une analyse scrupuleuse de toutes les réactions radio-induites chez l'homme et la femme et publia ce qui est considéré comme la première publication sur la radiosensibilité individuelle de l'Histoire (Association Française pour l'avancement des Sciences, 1906). En parallèle, un autre lyonnais, Fabien Arcelin, réalisa le premier sondage sur le sujet parmi ses collègues praticiens : en 1911, la radiosensibilité individuelle était une évidence (Arcelin, 1911).

L'ataxia telangiectasia ou la découverte de l'hyper-radiosensibilité

Toutefois, après la Première Guerre mondiale, sous l'impulsion de Claudius Regaud, l'augmentation du voltage (et donc de l'énergie des rayons X), le fractionnement de la dose pour épargner les tissus sains et

le croisement des faisceaux pour mieux atteindre les tumeurs constituèrent les préoccupations majeures des radiothérapeutes jusque dans les années 1970 (Regaud et Lacassagne, 1927).

Entre 1960 et 1980, des enfants atteints d'*ataxia telangiectasia* (AT) (1/100 000 naissances), maladie associée à une ataxie cérébelleuse, une immunodéficience sévère et une forte prédisposition aux lymphomes et leucémies furent traités par radiothérapie corps entier. Ils succombèrent dès la première session (Taylor *et al.*, 1975). Une analyse de leurs cellules révéla que celles-ci avaient une survie cellulaire exceptionnellement limitée après une dose correspondant à une session de radiothérapie (99 % de cellules mortes à 2 Gy de rayons X) (Taylor *et al.*, 1975). Alors que l'ATM (*ataxia telangiectasia mutated*), le gène responsable de l'AT ne fut découvert qu'en 1995 (Savitsky *et al.*, 1995), les cellules de patients AT montrèrent également des taux encore inégalés de cassures de l'ADN et de cassures chromosomiques non-réparées (Foray *et al.*, 1997). Le syndrome AT est toujours considéré comme le syndrome humain associé à la plus forte radiosensibilité connue. La radiothérapie anti-cancéreuse est d'ailleurs très fortement déconseillée voire interdite pour les jeunes patients AT (Foray *et al.*, 2016).

Radiosensibilités clinique, cellulaire et moléculaire : un fossé puis un pont

Dans les années suivantes, les découvertes successives sur les mécanismes de la formation des dommages radio-induits de l'ADN et sur leur réparation ouvraient des champs inexplorés (Berthel *et al.*, 2019). Toutefois, alors que les radiothérapeutes traitaient toujours des patients... humains, de nombreux radiobiologistes utilisèrent pour leurs recherches des modèles animaux, des rongeurs voire des microorganismes (bactéries, levures). En modifiant des gènes de réparation des cassures double-brin de l'ADN (CDB), ils aboutirent à des modèles animaux radiosensibles dont les syndromes correspondants n'existaient pas chez l'homme (Berthel *et al.*, 2019). Dans le même temps, l'incidence des réactions tissulaires anormales de la radiothérapie fut pour la première fois estimée entre 5 et 20 % selon les grades de toxicité (Foray *et al.*, 2016). Un fossé s'agrandit alors entre les cliniciens qui demandaient des tests prédictifs fiables adaptés aux cas humains et les radiobiologistes qui, à partir de données non-humaines, élaboraient des modèles mécanistiques sophistiqués de réparation des CDB mais où la protéine ATM n'était pas présente. Certains auteurs en conclurent que chez l'homme, il n'y avait que des variations inter-individuelles autour d'une certaine radorésistance humaine et puis le groupe des patients mutés pour ATM (Burnet *et al.*, 1998).

Cette vision allait toutefois à l'encontre de deux faits bien documentés :

- Des radiothérapeutes élaborèrent des échelles consensuelles pour « grader » la sévérité des réactions tissulaires post-radiothérapie et ce, quel que soit l'organe ou le tissu considéré. L'analyse des cas radiosensibles suggéra fortement que l'irradiation

peut produire un *continuum* de réactions allant de l'absence de réaction (grade 0) à la mort de l'individu (grade 5) en passant par toutes les phases d'évolution de la mort tissulaire : simple rougeur (grade 1) à nécrose exsudative (grade 4). L'échelle la plus connue aujourd'hui est l'échelle CTCAE (*Common Terminology Criteria for Adverse Events*) (National Institutes of Health. National Cancer Institute, 2010).

- En 1981, Fertil et Malaise démontrèrent qu'en biopsiant une tumeur et en étudiant la survie clonogénique *in vitro* après une dose de 2 Gy, on pouvait prédire sa radiocurabilité au niveau clinique (Fertil et Malaise, 1981). En d'autres termes, la radiosensibilité cellulaire *in vitro* quantifiant la mort des cellules irradiées était liée à la radiosensibilité clinique. En élaborant des centaines de courbes de survie clonogénique de tumeurs ou de tissus humains, Fertil et Malaise montrèrent aussi l'existence d'un *continuum* des réponses : contrairement au paradigme précédent, la radiosensibilité n'est pas un phénomène de tout-ou-rien (Fertil et Malaise, 1981). On trouvera toujours un individu plus radiosensible et un autre plus radorésistant qu'un troisième.

Tant pour les tissus sains que pour les tumeurs, un pont était alors érigé entre la radiosensibilité clinique *in vivo* et la radiosensibilité cellulaire *in vitro*. Malheureusement, établir des courbes de survie clonogénique *in vitro* est très lourd du point de vue expérimental. À défaut de tests de radiosensibilité cellulaire, il fallait trouver un test moléculaire, plus rapide et fiable pour prédire la radiosensibilité clinique. Ce fut le défi des années 2000 pour les radiobiologistes.

Radiosensibilité moléculaire : quel test choisir ?

Dans les années 2000, de nombreux tests moléculaires furent proposés pour prédire la radiosensibilité individuelle (Foray *et al.*, 2016). Ce fut d'ailleurs une sorte de course par élimination qui commença. Le développement technologique de l'époque permettait de séquencer des centaines de gènes en quelques heures. Cependant, les séquences d'ADN ne changent pas avec la dose alors que la gravité des réactions tissulaires est clairement dose-dépendante (Foray *et al.*, 2016). Le développement technologique permettait aussi de mesurer en une nuit le nombre de copies de protéines dans une cellule. Cependant, certaines protéines sont produites en plus grand nombre après irradiation. Toutefois, la plupart des protéines de réparation de l'ADN sont très abondantes et leur expression n'augmente pas après irradiation alors que leur mutation entraîne une certaine radiosensibilité : l'expression des gènes ne prédit pas forcément la radiosensibilité (Foray *et al.*, 2016). Enfin, la plupart des syndromes génétiques associés à une forte radiosensibilité comme l'*ataxia telangiectasia* sont causés par la mutation de protéines impliquées dans la réparation de CDB. Cependant, d'autres syndromes associés à une radiosensibilité sont causés par des protéines cytoplasmiques dont les fonctions sont très éloignées de la réparation ou de la signalisation des dommages de l'ADN (Foray *et al.*, 2016).

La collection COPERNIC : une petite révolution ?

Plus de 300 cas de radiosensibilité classés en 3 groupes

Depuis 2004, les chercheurs de l'U1296 ont commencé l'une des plus grandes collections de lignées cellulaires de fibroblastes cutanés issus de patients cancéreux, souffrant ou non d'un syndrome génétique connu, traités par radiothérapie et présentant un large spectre de réponses aux radiations (Granzotto *et al.*, 2016, Sonzogni *et al.*, 2024). En 2014, à partir de cette collection dénommée COPERNIC, un modèle mécanistique de la réponse individuelle aux radiations basé sur la protéine ATM, fut proposé. En l'absence de stress, les molécules ATM se présentent sous forme de dimères. Après irradiation, les dimères ATM se monomérisent proportionnellement à la dose : la cellule possède son propre dosimètre ! Les monomères d'ATM diffusent dans le noyau pour déclencher la réparation des CDB. Tout retard de ce transit radio-induit d'ATM (RIANS en anglais) entraîne des réactions indésirables de toxicité,

des cancers ou bien des maladies de vieillissement accéléré (Berthel *et al.*, 2019). Le retard du RIANS est causé par l'interaction entre les monomères de protéines ATM et certaines protéines cytoplasmiques surexprimées appelées protéines X, spécifiques à chaque individu, tissu ou syndrome. Les complexes ATM-X-protéines formés dans le cytoplasme réduisent le flux de monomères ATM diffusant dans le noyau. En 2016, nous avons démontré que plus ATM reconnaissait de CDB dans le noyau, plus leur réparation était complète, moins la réaction post-radiothérapique était sévère et plus son grade CTCAE était bas (Granzotto *et al.*, 2016 ; Sonzogni *et al.*, 2024). Pour la première fois, un test moléculaire pouvait prédire la gravité des réactions de radiosensibilité en faisant un lien entre radiosensibilité clinique (grade CTCAE), la radiosensibilité cellulaire (survie clonogénique à 2 Gy) et la radiosensibilité moléculaire (activité maximale d'ATM) (Le Reun *et al.*, 2022). À partir du modèle RIANS, 3 groupes de radiosensibilité furent définis (Foray *et al.*, 2016) (voir la Figure 1) :

- Groupe I : le transit d'ATM est rapide et toutes les CDB sont reconnues et réparées. Les individus

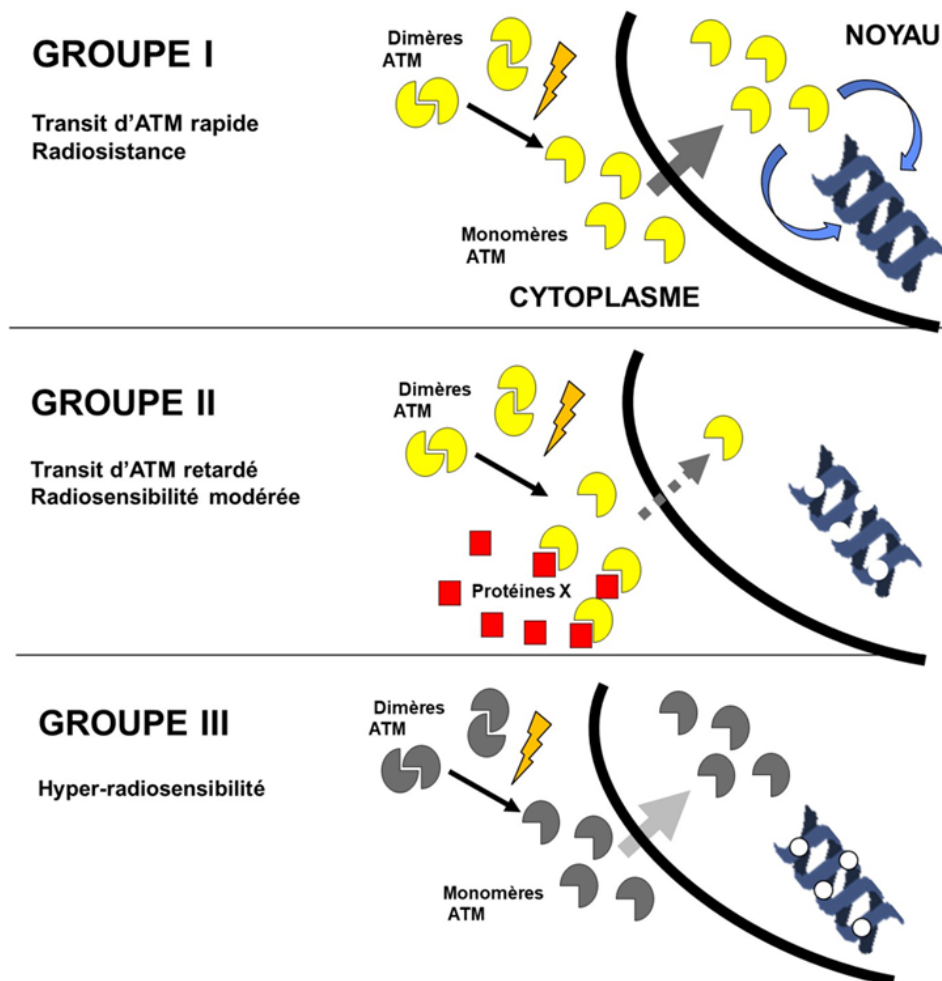


Figure 1 : Les 3 groupes de radiosensibilité : L'irradiation monomérise les dimères d'ATM. Les monomères rentrent dans le noyau pour reconnaître les CDB et déclencher leur réparation. Ce processus est rapide pour les cellules de groupe I. Dans le cadre du groupe II, les protéines X se complexifient avec les monomères d'ATM et en réduisent le flux dans le noyau. Les cellules de groupe III se caractérisent par des protéines ATM mutées ou de gros défauts de réparation des CDB (Source : auteur).

du groupe I sont radiorésistants, à faible risque de cancer ou de maladies dégénératives. Après radiothérapie, ils montrent des réactions de grade CTCAE 0 à 1.

- Groupe II : le transit d'ATM est retardé par la surexpression de protéines X cytoplasmiques et toutes les CDB ne sont pas réparées. Cliniquement les individus du groupe II sont d'une radiosensibilité modérée mais significative, à risque élevé de cancer ou de maladies dégénératives. Après radiothérapie, ils peuvent montrer des réactions de grade CTCAE de 1 à 4.
- Groupe III : quel que soit le transit d'ATM, les mutations d'ATM ou de ses partenaires directs font que l'activité d'ATM peut être quasiment nulle : une très grande majorité de CDB ne sont pas reconnues ni réparées. Les individus du groupe III sont généralement des enfants souffrant de syndromes associés à une hyper-radiosensibilité, un risque très élevé de cancer (par exemple AT) ou de maladie neurodégénérative (par exemple progeria). La radiothérapie leur est systématiquement fatale (grade CTCAE 5).

Importance des sous-populations sensibles

Une fois les paramètres de radiosensibilité définis, plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour évaluer l'importance relative des sous-populations sensibles :

- La méthode des prévalences : les maladies des groupes II et III se caractérisent par le type de mutations génétiques qui les causent : les maladies du

groupe II sont généralement issues de mutations hétérozygotes (une copie de gène mutée), plus fréquentes, alors que celles du groupe III sont causées plutôt par des mutations homozygotes (deux copies de gène mutées), plus rares. En plaçant la radiosensibilité et l'incidence de chaque syndrome correspondant sur une même courbe, son intégrale permet d'évaluer l'importance des groupes I, II et III à, respectivement, 75-85 %, 5-20 % et 0-1 % de la population générale (Ferlazzo et Foray, 2024) (voir la Figure 2).

- La méthode des grades : une autre approche, plus clinique, consiste à estimer la proportion relative de réactions tissulaires sévères selon le grade de sévérité CTCAE. Cette approche reste plus discutable puisque dépendante du choix du traitement et de la nature des tumeurs traitées. La revue de la littérature fournit les moyennes suivantes pour les groupes I, II et III : 82 %, 15,5 % et 0,5 % (Le Reun *et al.*, 2022).
- La méthode des cohortes : dans le cadre du projet d'investissement d'Avenir 2, et de l'appel à projet sur la radioprotection et la sûreté nucléaire (post-Fukushima), notre laboratoire a coordonné le projet INDIRA, à travers lequel nous avons pu prélever 30 biopsies de peau de volontaires masculins du SAMU 75 apparemment sains : les lignées fibroblastiques obtenues ont été soumises aux tests RIANS pour déduire le groupe de radiosensibilité correspondant. Cette approche, avait cependant l'inconvénient d'interdire toute appartenance au groupe III, syndromes sévères pédiatriques : seule une estimation

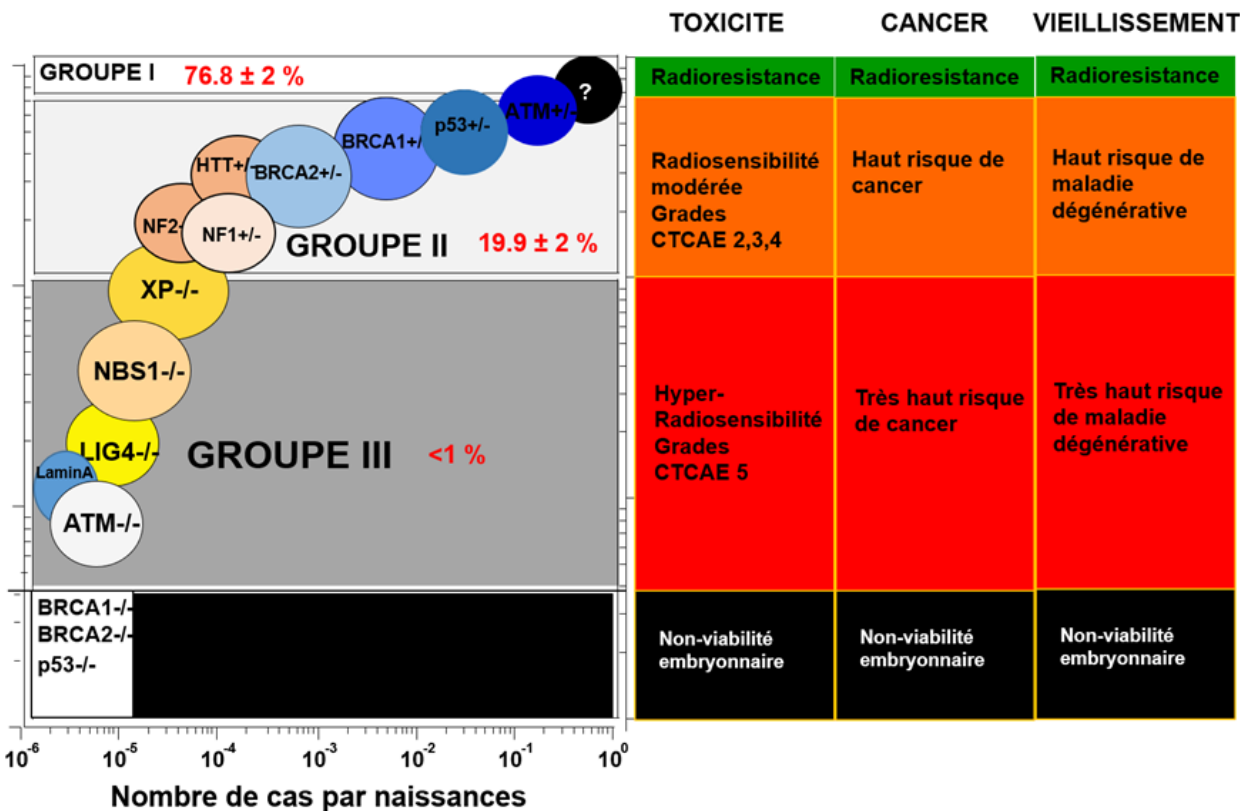


Figure 2 : Relation entre radiosensibilité, radiosusceptibilité et radiodégénérescence et la prévalence des syndromes génétiques symbolisés par les gènes mutés. L'intégrale sous la courbe permet une évaluation des groupes I, II et III (Source : auteur).

groupe I/groupe II était possible. Nous avons observé que 7 donneurs sur 30 appartenaient au groupe II (soit 23,3 %).

En faisant la synthèse avec d'autres méthodes plus sophistiquées, mais qui donnent toujours les mêmes ordres de grandeurs, nous pouvons conclure que les groupes I, II et III représentent respectivement, $76,8 \pm 2,1$, $19,9 \pm 2,0$ et $1,4 \pm 1,0$ % de la population globale (voir la Figure 2).

Conclusions

Près de 130 ans après la découverte des rayons X, l'existence de groupes plus radiosensibles dans la population générale est aujourd'hui bien documentée et ne peut être contestée. Ces personnes ne sont pas forcément des femmes ou des enfants, et leur réponse anormale aux radiations peut être détectable au niveau moléculaire ou cellulaire. Par ailleurs, nous savons que ce terme « radiosensibles » recouvre en fait trois situations : risque de réactions tissulaires dans le cadre d'une radiothérapie anti-cancéreuse, mais aussi risque de cancers ou de vieillissement accéléré radio-induits. Ces notions dépassant le cadre de la clinique, il faudra anticiper leur prise en compte dans le cadre d'une prise en charge personnalisée des patients, mais aussi du grand public ou des travailleurs dans le cadre d'une démarche de prévention. Cela pose des questions juridiques et éthiques devant lesquelles il ne faut pas reculer.

Références

- ARCELIN F. (1911), « Existe-t-il en radiothérapie des idiosyncrasies spontanées ou acquises », *Archives d'Électricité Médicale*, 10(314), pp. 37-61.
- ASSOCIATION FRANCAISE POUR L'AVANCEMENT DES SCIENCES, (1906), Compte-rendu de la 35^e session - Électricité Médicale, Lyon.
- BERTHEL E., FERLAZZO M.L., DEVIC C., BOURGUIGNON M. & FORAY N. (2019), "What does the History of Research on the Repair of DNA Double-Strand Breaks Tell Us? — A Comprehensive Review of Human Radiosensitivity", *International Journal of Molecular Sciences*, 20(21):5339.
- BERTHEL E., FORAY N. & FERLAZZO M.L. (2019), "The Nucleoshuttling of the ATM Protein: A Unified Model to Describe the Individual Response to High- and Low-Dose of Radiation?", *Cancers (Basel)*, 11(7).
- BURNET N. G., JOHANSEN J., TURESSON I., NYMAN J. & PEACOCK P.H. (1998), "Describing patients' normal tissue reactions: concerning the possibility of individualising radiotherapy dose prescriptions based on potential predictive assays of normal tissue radiosensitivity. Steering Committee of the BioMed2 European Union Concerted Action Programme on the Development of Predictive Tests of Normal Tissue Response to Radiation Therapy", *International Journal of Cancer*, 79(6), pp. 606-613.
- CHALUPEECKY H. (1897), "Über die wirkung der röntgenstrahlen auf das Auge und die haut", *Zentralbl Augenheilkd*, 21, pp. 234-271.
- FERLAZZO M.L. & FORAY N. (2024), *Effets biologiques des radiations ionisantes. Tome 3 Maladies génétiques associées à la radiosensibilité*, Sarrebruck, Allemagne, Éditions universitaires européennes.
- FERTIL B. & MALAISE E.P. (1981), "Inherent cellular radiosensitivity as a basic concept for human tumor radiotherapy", *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 7(5), pp. 621-629.
- FORAY N., BOURGUIGNON M. & HAMADA N. (2016), "Individual response to ionizing radiation", *Mutation Research Review*, 770, pp. 369-386.
- FORAY N., COLIN C. & BOURGUIGNON M. (2012), "100 years of individual radiosensitivity: how we have forgotten the evidence", *Radiology*, 264(3), pp. 627-631.
- FORAY N., PRIESTLEY A., ALSBEIH G., BADIE C., CAPULAS E.P., ARLETT C.F. & MALAISE E.P. (1997), "Hypersensitivity of ataxia telangiectasia fibroblasts to ionizing radiation is associated with a repair deficiency of DNA double-strand breaks", *Int J Radiat Biol*, 72(3), pp. 271-283.
- FRIEBEN A. (1902), "Cancroid des rechten Handrückens", *Deutsche medizinische Wochenschrift*, 28, 335.
- GRANZOTTO A. *et al.* (2016), "Influence of Nucleoshuttling of the ATM Protein in the Healthy Tissues Response to Radiation Therapy: Toward a Molecular Classification of Human Radiosensitivity", *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 94(3), pp. 450-460.
- LE REUN E., BODGI L., GRANZOTTO, A., SONZOGNI L., FERLAZZO M.L., AL-CHOBQ J., EL-NACHEF L., RESTIER-VERLET J., BERTHEL E., DEVIC C., BOUCHET A., BOURGUIGNON M. & FORAY N. (2022), "Quantitative correlations between radiosensitivity biomarkers show that the ATM protein kinase is strongly involved in the radiotoxicities observed after radiotherapy", *International Journal of Molecular Sciences*, 23(10434).
- NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH. NATIONAL CANCER INSTITUTE (2010), "Common Terminology Criteria for Adverse Events (CTCAE) Version 4.0", June 14.
- REGAUD C. & LACASSAGNE A. (1927), *Effets histophysiologiques des rayons de Roentgen et de Becquerel-Curie sur les tissus adultes normaux des animaux supérieurs. Fascicule I. Volume I, Radiophysologie et Radiothérapie*, Éd. C. Regaud. Paris, France, Presses Universitaires de France.
- SAVITSKY K., BAR-SHIRA A., GILAD S., ROTMAN G., ZIV Y., VANAGAITE L., TAGL D.A., SMITH S, UZIEL T., SFEZ S *et al.* (1995), "A single ataxia telangiectasia gene with a product similar to PI-3 kinase", *Science*, 268(5218), pp. 1749-1753.
- SONZOGNI L., GRANZOTTO A., LE REUN E., AL-CHOBQ J., BOURGUIGNON M., FORAY N. & BODGI L. (2024), "Prediction of radiotherapy toxicity: 20 years of COPERNIC radiosensitivity diagnosis procedure", *Cancer Radiother*, 28(5), pp. 435-441.
- TAYLOR A. M., HARNDEN D.G., ARLETT C.F., HARCOURT S.A., LEHMANN A.R., STEVENS S. & BRIDGES B.A. (1975), "Ataxia telangiectasia: a human mutation with abnormal radiation sensitivity", *Nature*, 258(5534), pp. 427-429.

Le défi des expositions multiples additionnelles à celle des RI

Par Michel BOURGUIGNON

Professeur émérite de l'Université Paris-Saclay (UVSQ)
et Rédacteur en chef de la revue *Radioprotection* (SFRP)

Les effets biologiques et sanitaires des rayonnements ionisants (RI) sont bien documentés à fortes doses. Les expositions aux faibles doses sont désormais les plus fréquentes et font l'objet d'importantes recherches, notamment sur leur capacité à favoriser l'apparition de cancers *via* leur génotoxicité. Mais chaque individu est exposé à une grande variété de génotoxiques à plus ou moins faibles doses, et qui forment son exposome.

Jusqu'ici, chacun de ces génotoxiques a été considéré séparément des autres, alors qu'ils additionnent leurs effets, voire agissent de façon synergique. L'évaluation du risque des expositions multiples additionnelles à celle des RI constitue donc un véritable défi.

Introduction

Le système de radioprotection vis-à-vis des rayonnements ionisants (RI) élaboré par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) repose sur le modèle de relation linéaire sans seuil (connu sous l'acronyme anglais LNT pour *linear no threshold*) d'évaluation et de gestion des risques, considérant que toute exposition aux RI présente un risque γ compris aux faibles doses. Cela a conduit à trois principes de gestion des expositions aux RI : justification des activités, optimisation des expositions et limitation des doses (ICRP, 1959). La mise en œuvre par voie législative et réglementaire de ces principes depuis quelques décennies a produit les fruits escomptés, notamment par une diminution importante des valeurs des limites de doses réglementaires et, par voie de conséquence, à des adaptations des conditions de travail et à une diminution très significative des doses effectivement reçues par les travailleurs.

Les faibles doses représentent actuellement la majorité des expositions des travailleurs mais aussi de la population (RI naturel ou médical). Des doses plus élevées sont rencontrées plus rarement dans des situations professionnelles ou médicales particulières et lors d'accidents.

Se pose alors la question du risque lié aux faibles doses de RI. Il est habituel de penser à la suite du célèbre médecin suisse Paracelse du XVI^e siècle que « Tout est poison, rien n'est poison : c'est la dose qui fait le poison », autrement dit que la toxicité d'une substance, quelle qu'elle soit, augmente de façon proportionnelle à la dose et que les faibles doses ne peuvent produire que de petits effets ou pas d'effet en dessous d'un

certain seuil. Or, aujourd'hui cette règle n'est plus aussi certaine, elle est notamment complexifiée par la prise en compte d'expositions multiples à de faibles doses d'agents physiques, chimiques ou biologiques pouvant agir en synergie et avoir ensemble un effet combiné sur la santé plus important que celui qu'ils ont individuellement à des doses *a priori* sans risque. C'est le fameux « effet cocktail » qui préoccupe beaucoup le public et les instances chargées de réglementer. Par ailleurs, des effets observés à faible dose peuvent être sans rapport avec les effets connus à forte dose d'un contaminant. C'est le cas pour le phénomène d'hormesis où une faible dose peut engendrer un effet bénéfique ou protecteur tandis qu'un effet délétère apparaît avec l'augmentation de la dose.

Concernant le risque de cancer, tous les humains sont exposés à de faibles doses de substances génotoxiques autres que les RI du fait de la présence d'agents mutagènes ou cancérogènes dans l'environnement public, privé ou professionnel. Pour ce qui est des agents cancérogènes avérés, on peut citer par exemple l'alcool, le tabac, l'amiante, des produits chimiques dont certains pesticides tel que le chlordécone à l'origine d'un scandale sanitaire aux Antilles (AFIS, 2022), des solvants (peintures, vernis), mais aussi des virus, comme plusieurs types de Human papilloma virus (HPV) ou encore les rayons UV du soleil. Sont également présents dans l'environnement, des métaux lourds, des perturbateurs endocriniens, etc. Plus généralement, l'exposition à de multiples facteurs de risque exogènes est liée au mode de vie, à l'alimentation, la qualité de l'air, etc. L'ensemble de ces expositions, rencontrées tout au long de la vie d'un individu, constitue l'exposome.

Quelle est la responsabilité de chacune de ces faibles doses considérées isolément vis-à-vis de la survenue d'une maladie ? Quel est leur impact en association les unes avec les autres ? Cela modifie-t-il la gestion du risque ? On ne peut plus ignorer ces questions aujourd'hui, d'autant plus que le principe de précaution inscrit dans la Constitution exige de lever les incertitudes sur la réalité des risques pouvant avoir des conséquences graves et irréversibles sur l'environnement, renforçant les craintes vis-à-vis des faibles doses suspectes du pire tant que les dangers ne sont pas dûment documentés. C'est cela qu'il convient d'explorer car les décisions à prendre vis-à-vis de ces risques ne sont pas sans conséquences sur l'organisation du travail dans les entreprises concernées et vis-à-vis de la population, avec *in fine* des contraintes pratiques, financières et économiques. Il convient donc que ces décisions soient prises sur des bases rigoureuses et objectives : y parvenir, notamment en matière de radioprotection, représente un vrai défi !

Pour relever ce défi, nous avons besoin de l'épidémiologie et de la radiobiologie.

L'épidémiologie

Les études épidémiologiques portant sur les effets des RI (Wakeford, 2004) sont focalisées essentiellement sur la survenue de cancers et ont montré de bonnes corrélations entre la fréquence des cancers et les doses de RI (Laurier, article dans ce numéro des *Annales des Mines*), le risque étant d'autant plus significatif que les doses sont plus élevées. Ce sont ces études qui ont conduit à la définition des faibles doses. De façon un peu caricaturale, on pourrait dire que les faibles doses sont celles pour lesquelles on ne met pas en évidence de risque par l'épidémiologie. Alors, pourquoi s'en préoccuper ?

Pour mieux préciser le risque, les études épidémiologiques successives ont accru leur puissance statistique principalement en augmentant la taille des cohortes (jusqu'au million de personnes), avec un meilleur enregistrement des doses et un suivi plus long des cohortes. En conséquence, les incertitudes ont été progressivement réduites et l'association entre la dose de RI et le risque de développer une affection maligne, qui était historiquement significative à des doses de l'ordre de 100 mSv chez les adultes, a été observée à des doses plus faibles, par exemple de l'ordre de 20 mSv chez les travailleurs du nucléaire dans l'étude INWORKS (Leuraud, 2021) ou chez les enfants chez qui des examens médicaux par scanner ont été réalisés (Bosch de Basea Gomez *et al.*, 2024 ; Hauptman *et al.*, 2024). Jusqu'où le seuil de significativité va-t-il baisser, à mesure que la puissance statistique augmente ? En tout cas, ces études renforcent l'idée que le modèle LNT est un bon modèle opérationnel, même si elles établissent une corrélation sans prouver l'existence de relation de cause à effet (Laurier, 2023).

Comment progresser davantage ? Il a été proposé depuis longtemps que des études épidémiologiques associant des biomarqueurs devraient être particulièrement utiles pour évaluer/démontrer un petit excès de

risque de cancer après exposition à l'IR car la prévalence naturelle du cancer est élevée. De plus, l'augmentation de la taille de la cohorte comme le poids statistique des personnes à risque, qu'il conviendrait d'étudier comme un groupe à part entière. Les études cas-témoins de sujets à risque assorties d'analyses d'échantillons biologiques nécessiteraient en théorie des analyses sur plusieurs centaines de sujets plutôt que sur des centaines de milliers pour les études épidémiologiques classiques, soit un gain très significatif. Pernot *et al.*, ont clairement abordé les questions méthodologiques concernant les biomarqueurs pour une utilisation potentielle dans les études épidémiologiques portant sur le risque des RI et ont établi une longue liste de possibles biomarqueurs à partir d'une revue de la littérature (Pernot *et al.*, 2012). Cette revue a été mise à jour par Hall *et al.*, qui ont identifié des centaines de biomarqueurs potentiels (Hall *et al.*, 2017). Mais jusqu'à présent, nous manquons de démonstration épidémiologique de l'utilité pratique des biomarqueurs concernant les effets de faibles doses d'IR, en grande partie parce que le choix d'un bon biomarqueur est difficile et est un préalable à la réalisation de ces études. La radiobiologie devrait pouvoir éclairer ce choix !

La radiobiologie

La radiobiologie étudie les effets des RI aux niveaux moléculaires, cellulaires et tissulaires de manière expérimentale. Les études sur les effets des RI sur l'ADN des cellules, cible principale des RI au niveau moléculaire, vont dans le sens d'une linéarité avec la dose : les RI produisent des dommages de l'ADN y compris à des doses très faibles, bien inférieures à ce que l'on pensait il y a encore 20 ans. Rothkamm et Löbrich ont mis en évidence avec des anticorps fluorescents des cassures des deux brins de l'ADN à des doses de 1 mGy, valeur 100 fois inférieure aux estimations précédentes (Rothkamm et Löbrich, 2003). De plus, la relation linéaire entre le nombre de lésions de l'ADN et la dose de RI à partir de niveaux de dose aussi bas que 1 mGy est également en faveur d'un risque non nul de cancer aux faibles doses ou du moins d'une contribution au risque de cancer (El Nachef *et al.*, 2024).

En effet, Hanahan et Weinberg ont analysé les caractéristiques fondamentales des cancers permettant de comprendre le processus en plusieurs étapes de la cancérogenèse nécessaire pour passer de l'initiation au niveau d'une cellule, à la promotion puis la progression pour atteindre une tumeur cliniquement détectable (Hanahan et Weinberg, 2011 ; Hanahan, 2022 ; El Nachef *et al.*, 2024). En fait, un cancer résulte d'environ une dizaine de lésions de l'ADN qui ne tuent pas la cellule mais qui déclenchent un mécanisme prolifératif. Les observations de radiobiologie permettent de comprendre que c'est la signalisation des lésions de l'ADN qui active des mécanismes de réparation qui ne sont pas toujours fidèles. Chaque altération de l'ADN mal réparée peut constituer une étape vers la cancérisation. Les observations de radiobiologie sont compatibles sur le plan mécanistique avec le modèle LNT.

Mais les études radiobiologiques apportent deux informations additionnelles essentielles :

- les humains ne sont pas égaux dans la réponse de leurs cellules aux RI. Environ 20 % de la population présente une plus grande sensibilité aux fortes doses de la radiothérapie, une plus grande susceptibilité au cancer, ou une propension à un vieillissement accéléré pouvant conduire à une radiodégénérescence (Foray *et al.*, 2016 ; Foray, article dans le présent numéro des *Annales des Mines*). Cela est dû à des anomalies dans la signalisation et la réparation des lésions de l'ADN qui ont été mises en évidence dans les laboratoires de recherche (Ferlazzo *et al.*, 2017). Les femmes à risque familial de cancer du sein font partie de ces personnes plus fragiles et présentent des anomalies de réparation de l'ADN dès les faibles doses (Colin *et al.*, 2011).
- Le format de l'exposition aux RI et autres génotoxiques joue un rôle majeur dans l'apparition du détriment. En effet, les cancers semblent résulter de l'exposition à des doses répétées de RI espacées par des périodes sans exposition, alors que les maladies dégénératives surviennent à la suite d'expositions permanentes aux génotoxiques.

Ces observations conduisent à deux positions de bon sens : 1) la radioprotection doit s'occuper en priorité des personnes qui sont plus fragiles que le reste de la population pour les mêmes doses d'exposition ; et 2) des études épidémiologiques ciblées sur ces personnes devraient être menées. Il s'agit de transposer les recherches en vue de mettre au point une méthode de détermination de la radiosusceptibilité individuelle au cancer utilisable en routine. Des méthodes ont été proposées mais elles ne font pas encore l'unanimité (Ferlazzo *et al.*, 2019). Cette nouvelle approche prend l'évaluation du risque proposée par la CIPR en défaut puisque celle-ci n'est que collective et ne prend pas encore en compte les spécificités individuelles. Les études épidémiologiques actuelles ne le font pas non plus ; elles pourront le faire avec des biomarqueurs de la signalisation et de la réparation de l'ADN pour la sélection des cohortes. Parmi ces biomarqueurs, la protéine ATM devrait jouer un grand rôle.

Les risques liés à l'exposome des faibles doses

Il est bien évidemment très difficile d'avoir une vision précise de l'exposome de chaque individu. Tout au plus peut-on identifier les quelques facteurs les plus importants, ceux pour lesquels les doses ne sont pas toujours faibles. C'est le cas par exemple de professionnels qui manipulent des produits chimiques, par exemple des pesticides pour les agriculteurs ou les viticulteurs. Des consignes existent pour l'utilisation de ces substances. Les professions les plus à risque d'expositions multiples devraient être systématiquement identifiées et documentées. Dans tous les cas, caractériser le niveau d'exposition, c'est-à-dire la dose effectivement reçue est un point clé pour les études épidémiologiques, c'est

une des principales difficultés dans l'étude des risques environnementaux.

Pour progresser dans l'évaluation du risque de l'exposome, les études concernant la protéine ATM, protéine clé de la signalisation et de la réparation de l'ADN sont éclairantes. Le transfert de la protéine ATM du cytoplasme vers le noyau (RIANS pour *Radiation Induced ATM Nucleo-Shuttling*) validé lors d'expositions de cellules aux RI (Foray, article dans ce même numéro des *Annales des Mines* ; Berthel *et al.*, 2019) a été étudié avec des expositions à des pesticides (Sonzogni *et al.*, 2022) et aux métaux lourds (Viau *et al.*, 2021). Les retards de transfert d'ATM vers le noyau contribuent à une mauvaise réparation des lésions de l'ADN quelles que soient leurs origines génotoxiques.

Dans la mesure où les réponses individuelles aux différents génotoxiques ont une composante commune, la prise en charge des lésions de l'ADN par les mécanismes de signalisation et de réparation au cœur desquels la protéine ATM, il nous faut considérer trois conséquences :

- chacune des expositions à faibles doses de l'exposome ne peut plus être considérée seule en matière de risque car elles s'additionnent, voire agissent de façon synergique. Autrement dit, on ne peut plus raisonnablement considérer chaque exposition à une faible dose d'un génotoxique comme négligeable en ignorant les autres ;
- parler de cancer radio-induit ou de maladie dégénérative aux faibles doses de RI (au sens de pathologies qui ne résulteraient que de l'exposition aux RI) ne tient plus car personne n'est exposé qu'à ce seul facteur de risque. Cela est d'ailleurs vrai pour chacun des facteurs de risque ;
- la question prend une tournure particulière si l'on prend en compte le fait qu'environ 20 % de la population présente une réponse anormale aux RI et aux génotoxiques.

Perspectives

L'évaluation du risque des expositions multiples additionnelles à celle des RI constitue donc un véritable défi. Celui-ci s'intègre dans la problématique de l'exposome. Pour progresser, le dépistage de la fragilité individuelle devient un impératif qui s'inscrit dans le cadre de la médecine personnalisée en plein développement. Cela n'est pas sans poser des questions techniques, éthiques, ou réglementaires, mais les ignorer et reculer devant la difficulté ne serait pas à la hauteur d'une médecine de prévention moderne et efficace.

Références bibliographiques

AFIS (2022), « La pollution des Antilles françaises par le chlordécone : des origines aux conséquences », Association française pour l'information scientifique, <https://www.afis.org/La-pollution-des-Antilles-francaises-par-le-chlordecone-des-origines-aux>

- BERTHEL E., FORAY N. & FERLAZZO M. (2019), "The Nucleoshuttling of the ATM Protein: A Unified Model to Describe the Individual Response to High- and Low-Dose of Radiation?", *Cancers*, 11(7):905.
- BOSCH DE BASEA GOMEZ M. *et al.* (2023), "Risk of hematological malignancies from CT radiation exposure in children, adolescents and young adults", *Nature Medicine*, 29, pp. 3111-3119.
- COLIN C., DEVIC C., NOEL A. *et al.* (2011), "DNA double-strand breaks induced by mammographic screening procedures in human mammary epithelial cells", *Int. J. Radiat. Biol.*, 87, pp. 1103-1112.
- EL NACHEF L., BODGI L., ESTAVOYER M. *et al.* (2024), "Prediction of Cancer Proneness under Influence of X-rays with Four DNA Mutability and/or Three Cellular Proliferation Assays", *Cancers*, 16(18):3188.
- FERLAZZO M., BOURGUIGNON M. & FORAY N. (2017), "Functional Assays for Individual Radiosensitivity: A Critical Review", *Seminars in Radiation Oncology*, 27(4), pp.310-315, doi: 10.1016/j.semradonc.2017.04.003
- FORAY N., BOURGUIGNON M. & HAMADA N. (2016), "Individual response to ionizing radiation", *Mut. Res.*, 770, pp. 369-386.
- HALL J., JEGGO P.A., WEST C. *et al.* (2017), "Ionizing radiation biomarkers in epidemiological studies – An update", *Mutation Research*, 771, pp. 59-84.
- HANAHAHAN D. & WEINBERG R.A. (2011), "Hallmarks of cancer: The next generation", *Cell*, 144, pp. 646-674.
- HANAHAHAN D. (2022), "Hallmarks of Cancer: New Dimensions", *Cancer Discov.*, 12, pp. 31-46.
- HAUPTMAN M. *et al.* (2023), "Brain cancer after radiation exposure from CT examinations of children and young adults: results from the EPI-CT cohort study", *Lancet Oncology*, 24, pp. 45-53.
- ICRP (1959), *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Now known as ICRP Publication 1*, Pergamon Press, New York.
- LAURIER D., BILLARAND. Y, KLOKOV. D & LEURAUD K. (2023), « Fondements scientifiques de l'utilisation du modèle linéaire sans seuil (LNT) aux faibles doses et débits de dose en radioprotection », *Radioprotection*, 58(4), pp. 243-260.
- LEURAUD K., RICHARDSON D.B., CARDIS E. *et al.* (2021), "Risk of cancer associated with low-dose radiation exposure: comparison of results between the INWORKS nuclear workers study and the A-bomb survivors study", *Radiat. Environ. Biophys.*, 60(1), pp. 23-39.
- PERNOT E., HALL J., BAATOUT S. *et al.* (2012), "Ionizing radiation biomarkers for potential use in epidemiological studies", *Mutation Research*, 751, pp. 258-286.
- ROTHKAMM K. & LÖBRICH M. (2003), "Evidence for a lack of DNA double-strand break repair in human cells exposed to very low x-ray doses", *Proc Natl Acad Sci USA*, 100(9), pp.5057-5062, doi: 10.1073/pnas.0830918100.
- SONZOGNI L., FERLAZZO M.L., GRANZOTTO A. *et al.* (2022), "DNA Double-Strand Breaks Induced in Human Cells by 6 Current Pesticides: Intercomparisons and Influence of the ATM Protein", *Biomolecules*, 12(2):250.
- VIAU M. *et al.* (2021), "DNA Double-Strand Breaks Induced in Human Cells by Twelve Metallic Species: Quantitative Inter-Comparisons and Influence of the ATM Protein", *Biomolecules*, 11(10):1462.
- WAKEFORD R. (2004), "The cancer epidemiology of radiation", *Oncogene*, 23, pp. 6404-6428.

Progrès en matière de dosimétrie personnelle : vers une dosimétrie en temps réel

Par Filip VANHAVERE et Olivier VAN HOEY
SCK CEN, Centre belge de recherche nucléaire

La dosimétrie individuelle est essentielle pour garantir que les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants sont surveillés et protégés de manière adéquate. Au fil des ans, ce domaine a connu d'importantes avancées technologiques visant à améliorer la précision, le retour d'information en temps réel et la facilité d'utilisation.

Ce document donne un aperçu complet de l'état de l'art en matière de dosimétrie personnelle, en se concentrant particulièrement sur les progrès qui permettent une surveillance en temps réel, tels que les dosimètres personnels actifs (APD), les dosimètres hybrides et les méthodes de dosimétrie computationnelle. L'objectif de ces progrès est de remédier aux limites des dosimètres passifs traditionnels, d'accroître la précision des évaluations de dose et d'améliorer les pratiques de radioprotection.

État actuel de la dosimétrie passive

Le système de protection radiologique définit des grandeurs dosimétriques comme la dose efficace E , qui sont utilisées pour évaluer le risque biologique dû aux rayonnements. Ces grandeurs dosimétriques ne sont pas mesurables, c'est pourquoi des grandeurs opérationnelles pratiques sont définies pour donner une estimation correcte et prudente des grandeurs de protection. Pour la dosimétrie individuelle, $H_p(10)$ est la grandeur opérationnelle liée à la dose efficace, et $H_p(0,07)$ est celle liée à la dose équivalente de la peau. Les dosimètres utilisés par les travailleurs sous rayonnement doivent être conçus pour mesurer $H_p(10)$ et $H_p(0,07)$ et doivent être étalonnés dans ces grandeurs.

Depuis des décennies, les dosimètres personnels passifs (tels que les badges à film et les dosimètres thermoluminescents) sont utilisés pour surveiller l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants. Ces dispositifs ont fait l'objet d'améliorations substantielles au fil des ans. Les dosimètres passifs modernes, notamment les dosimètres à luminescence stimulée optiquement (OSL) et à radiophotoluminescence (RPL), offrent une meilleure précision et une sensibilité réduite aux facteurs environnementaux tels que l'humidité et la température.

L'inconvénient le plus important des dosimètres passifs est toutefois leur incapacité à fournir un retour d'information en temps réel. Les travailleurs ne reçoivent leurs rapports de dose qu'après que le dosimètre a été traité en laboratoire, ce qui peut prendre des semaines.

Ce délai limite la capacité des travailleurs et des responsables de la radioprotection à prendre des mesures correctives immédiates en cas d'exposition imprévue. En outre, les dosimètres passifs ne sont pas équipés pour déclencher des alarmes dans les situations de forte exposition, ce qui peut laisser les travailleurs dans l'ignorance des niveaux de rayonnement dangereux jusqu'à ce qu'il soit trop tard.

Malgré ces limites, les dosimètres passifs sont encore largement utilisés pour la surveillance des doses légales en raison de leur fiabilité et du fait qu'ils constituent la norme industrielle depuis des décennies. Cependant, les dosimètres passifs présentent encore de grandes incertitudes dans certains scénarios, comme la dosimétrie des neutrons, où aucun appareil petit et léger ne peut mesurer avec précision les doses dans une large gamme d'énergies et d'angles.

En Europe, de vastes comparaisons interlaboratoires, telles que celles organisées par le Groupe européen de dosimétrie des rayonnements (EURADOS), ont permis d'évaluer les performances des dosimètres passifs. Les résultats de ces comparaisons indiquent que si la plupart des dosimètres répondent aux normes internationales, il subsiste des incertitudes notables, en particulier dans les champs de rayonnement mixtes et non standard. Les Figures 1 et 2, situées page suivante, montrent par exemple des valeurs aberrantes significatives pour, respectivement, la dosimétrie des extrémités bêta et la dosimétrie des neutrons.

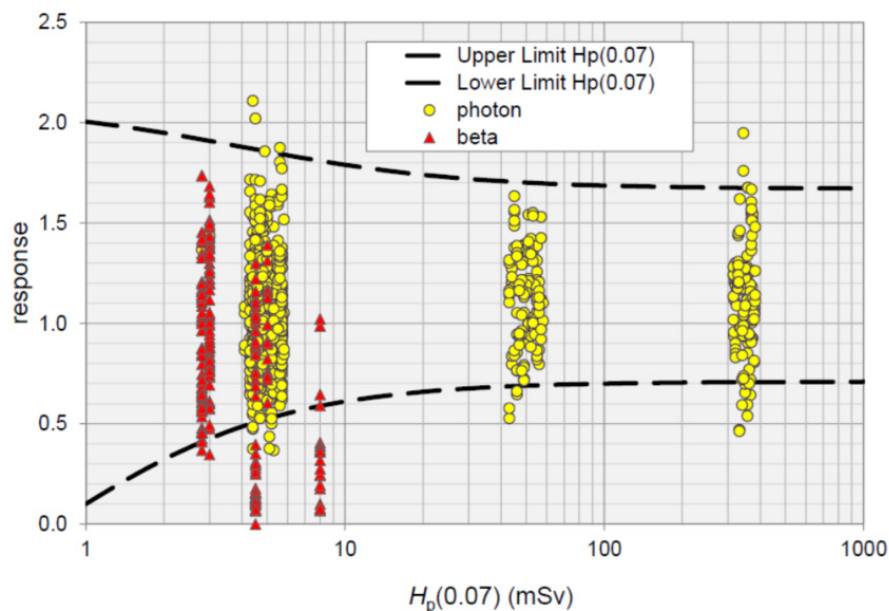


Figure 1 : Les valeurs de réponse $H_p(0,07)$ en fonction de la dose de référence avec indication des limites de performance pour l'intercomparaison des dosimètres d'extrémités EURADOS 2019. Les irradiations photoniques sont représentées par des cercles jaunes et les irradiations bêta par des triangles rouges. L'autorisation de reproduire la figure a été obtenue auprès des auteurs (Source : McWhan *et al.*, 2021).

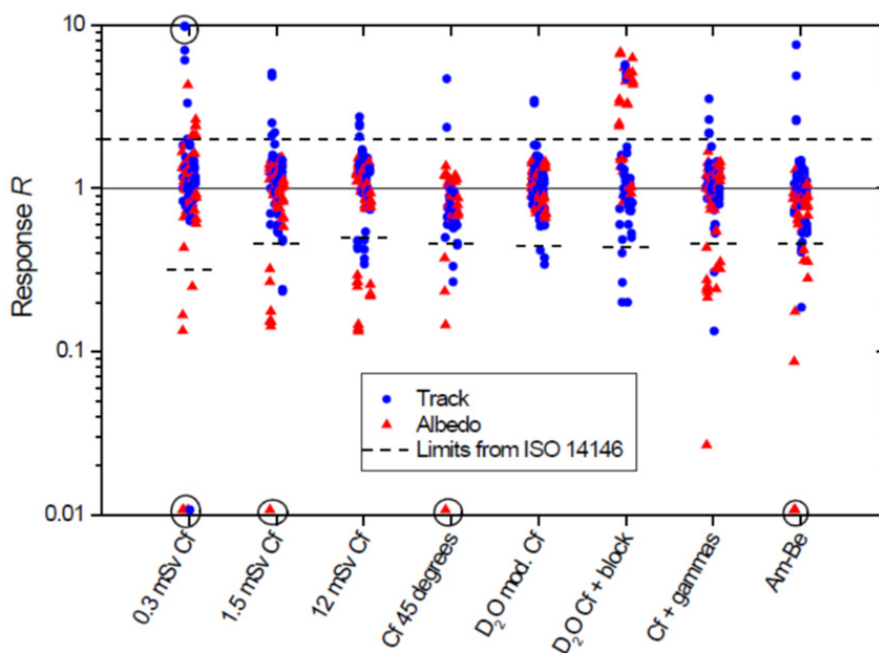


Figure 2 : Les valeurs de réponse $H_p(10)$ en fonction de la qualité du rayonnement avec indication des limites de performance pour l'intercomparaison des dosimètres neutroniques EURADOS 2017. Les dosimètres de traces sont représentés par des cercles bleus et les dosimètres d'albédo par des triangles rouges. L'autorisation de reproduire la figure a été obtenue auprès des auteurs (Source : Mayer *et al.*, 2021).

Progrès dans le domaine des dosimètres personnels actifs (APD)

Le développement des dosimètres personnels actifs (APD) a constitué une avancée significative dans le domaine de la dosimétrie individuelle. Les APD

sont des dispositifs électroniques capables de fournir des relevés de dose en temps réel au porteur. Ces appareils utilisent généralement des détecteurs à semi-conducteurs, tels que des diodes au silicium, ou des tubes Geiger-Müller pour mesurer les niveaux de rayonnement. L'avantage le plus important des APD

par rapport aux dosimètres passifs est leur capacité à fournir un retour d'information immédiat, ce qui permet aux travailleurs d'adapter leur comportement pendant les tâches d'exposition aux rayonnements.

Les APD sont particulièrement utiles dans les environnements fortement irradiés, tels que les centrales nucléaires et les services de radiologie interventionnelle. Dans ces environnements, les travailleurs sont régulièrement exposés aux rayonnements et la surveillance en temps réel est essentielle pour maintenir les doses au niveau le plus bas qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre (ALARA).

Au cours des dernières décennies, les APD sont devenus plus petits, plus légers et plus fiables. Les APD modernes peuvent mesurer des doses de l'ordre du micro-Sievert, ce qui est nettement inférieur aux limites de détection de la plupart des dosimètres passifs. En outre, les progrès réalisés dans le domaine de la technologie de la transmission sans fil des données ont amélioré la commodité et la facilité d'utilisation des APD.

Bien que les APD présentent de nombreux avantages, il reste encore quelques défis à relever. L'une des principales limites des APD est leur performance dans les champs de rayonnement pulsé et de faible énergie. En radiologie interventionnelle, par exemple, les travailleurs sont souvent exposés à des faisceaux de rayons X pulsés dont les débits de dose peuvent dépasser la plage de réponse linéaire de nombreux APD. Lorsque les débits de dose sont trop élevés, les APD peuvent être saturés et sous-estimer la dose réelle. Il est donc important de tester les APD dans une variété de champs de rayonnement pour s'assurer qu'ils fonctionnent de manière fiable dans toutes les conditions.

Dosimètres hybrides passifs/actifs

Les progrès récents de la technologie de la dosimétrie ont conduit au développement de dosimètres hybrides, qui combinent les meilleures caractéristiques des dispositifs passifs et actifs. La technologie de stockage direct des ions (DIS) utilisée dans le dosimètre Instadose en est un exemple. Ce type de dosimètre fonctionne comme un dispositif passif, mais il présente l'avantage supplémentaire de pouvoir se lire lui-même et d'envoyer les données sans fil, ce qui permet aux travailleurs d'accéder à leurs données de dose sans avoir à renvoyer le dosimètre pour une analyse en laboratoire.

Les dosimètres hybrides représentent un compromis entre la haute précision et la fiabilité des dosimètres passifs et le retour d'information en temps réel fourni par les APD. Ils sont bien adaptés aux environnements où une surveillance fréquente de la dose est nécessaire, mais où des alarmes en temps réel ne sont pas requises. Les dosimètres hybrides sont également plus abordables que les APD, ce qui en fait une option intéressante pour les organisations dont le budget est limité.

Cependant, comme les dosimètres passifs, les dispositifs hybrides ne fournissent que des mesures ponctuelles, c'est-à-dire qu'ils mesurent le rayonnement à

un seul endroit du corps. Cela peut poser problème dans les champs de rayonnement non homogènes, où les doses peuvent varier de manière significative d'une partie du corps à l'autre. Malgré ces limites, les dosimètres hybrides devraient être plus largement adoptés dans les années à venir en raison de leur commodité et de leur faible coût.

Dosimétrie computationnelle

L'une des avancées les plus prometteuses dans le domaine de la dosimétrie individuelle est l'utilisation de méthodes informatiques pour calculer les doses de rayonnement. La dosimétrie informatique utilise des simulations de Monte Carlo pour modéliser le transport des rayonnements et les interactions dans le corps. Ces simulations peuvent être associées à des technologies de suivi des mouvements, telles que des caméras ou des capteurs, pour suivre la position et l'orientation des travailleurs en temps réel.

Cette approche a été inaugurée dans le cadre du projet PODIUM (*Personal Online Dosimetry Using Computational Methods*), financé par la Commission européenne. L'objectif du projet PODIUM était de démontrer la validité du concept d'un système permettant de calculer les doses de rayonnement sans avoir recours à des dosimètres physiques. Des caméras et des moniteurs de rayonnement ont été utilisés pour capter les mouvements des travailleurs et le champ de rayonnement dans leur environnement. Ces données ont ensuite été utilisées pour effectuer des simulations de Monte Carlo qui ont permis d'estimer la dose reçue par les différentes parties du corps. Le projet PODIUM s'est concentré sur deux applications qui pourraient particulièrement bénéficier de cette nouvelle technologie : la radiologie interventionnelle et les champs de travail neutroniques. La Figure 3 (voir page suivante) montre une capture d'écran du logiciel développé dans le cadre du projet pour la radiologie interventionnelle (Abdelrahman *et al.*, 2020).

L'avantage de la dosimétrie computationnelle est qu'elle peut fournir une évaluation plus précise de la distribution de la dose sur le corps, ce qui est particulièrement important dans les champs de rayonnement non homogènes. Par exemple, en radiologie interventionnelle, où les travailleurs sont exposés à des rayons X diffusés, la dose reçue par les mains et les yeux peut être beaucoup plus élevée que la dose reçue par la poitrine ou l'abdomen. Les dosimètres passifs traditionnels ne mesurent la dose qu'en un seul point, alors que la dosimétrie computationnelle peut calculer la dose pour toutes les parties du corps concernées, y compris les organes radiosensibles.

En outre, la dosimétrie computationnelle a le potentiel de réduire de manière significative les incertitudes associées aux méthodes traditionnelles de dosimétrie. En intégrant des informations détaillées sur le champ de rayonnement, les mouvements du travailleur et la géométrie du lieu de travail, les méthodes informatiques peuvent fournir des estimations de dose plus précises que les dosimètres physiques. En particulier dans le cas de la dosimétrie des neutrons, l'approche



Figure 3 : Suivi de la silhouette des travailleurs pendant une procédure de radiologie interventionnelle (en haut) et logiciel permettant de générer les simulations de transport de rayonnement de Monte Carlo correspondantes, y compris la source de rayonnement et la géométrie d'exposition avec un fantôme anthropomorphe représentant le travailleur (en bas).
Les figures ont été reproduites avec l'autorisation des auteurs (Source : Abdelrahman *et al.*, 2020).

computationnelle a le potentiel d'être significativement plus précise que l'approche des dosimètres personnels.

Intelligence artificielle et apprentissage automatique en dosimétrie

Les progrès rapides de l'intelligence artificielle (IA) et de l'apprentissage automatique (*machine learning* – ML) offrent de nouvelles opportunités passionnantes pour améliorer la dosimétrie personnelle. Les algorithmes

d'IA et de ML peuvent être utilisés pour analyser de vastes ensembles de données sur les enregistrements de doses, les mouvements des travailleurs et les caractéristiques du champ de rayonnement afin de prédire les doses de rayonnement avec plus de précision.

Dans le contexte de la dosimétrie informatique, l'IA peut être utilisée pour optimiser les simulations de Monte Carlo en donnant la priorité aux paramètres les plus importants. Par exemple, si un travailleur se

trouve loin d'une source de rayonnement, la simulation n'a pas besoin d'être aussi détaillée, ce qui permet des calculs plus rapides. En revanche, si le travailleur est plus proche de la source, des simulations plus précises peuvent être privilégiées pour s'assurer que la dose est calculée avec une plus grande précision.

L'IA peut également être appliquée aux enregistrements historiques des doses afin d'améliorer les procédures opérationnelles. Par exemple, des algorithmes d'apprentissage automatique pourraient prédire la probabilité qu'un travailleur reçoive une dose importante sur la base de ses antécédents d'exposition et de son horaire de travail. Ces informations pourraient être utilisées pour donner la priorité à la surveillance des doses pour les travailleurs qui présentent un risque d'exposition plus élevé.

Conclusion

La dosimétrie individuelle a beaucoup évolué depuis l'époque des badges à film et des dosimètres thermoluminescents. Si les dosimètres passifs restent la norme pour la surveillance légale des doses, les dosimètres personnels actifs (APD) et les dosimètres hybrides sont de plus en plus populaires en raison de leur capacité à fournir un retour d'information en temps réel et de leur facilité d'utilisation.

Le développement de la dosimétrie informatique et l'intégration de l'intelligence artificielle sont très prometteurs pour l'avenir de la dosimétrie. Ces méthodes ont le potentiel de fournir des évaluations de dose plus précises, de réduire les incertitudes et d'améliorer les pratiques de radioprotection. Au fur et à mesure que la technologie continue d'évoluer, nous pouvons nous attendre à voir encore plus de progrès dans la dosimétrie personnelle, en particulier dans les domaines de la surveillance en temps réel, de l'analyse des données et de l'optimisation des doses.

Références

- ABDELRAHMAN M. *et al.* (2020), "First steps towards online personal dosimetry using computational methods in interventional radiology: Operator's position tracking and simulation input generation", *Radiation Physics and Chemistry*, 171, 108702, 2020.
- McWHAN A. F. *et al.* (2021), "EURADOS Intercomparison 2019 for Extremity and Eye Lens Dosimeters", EURADOS Report 2021-05.
- MAYER S. *et al.* (2021), "EURADOS Intercomparison IC2017n for Neutron Dosimeters", Rapport EURADOS 2021-06.

Surveillance de l'exposition interne des intervenants sur les installations nucléaires EDF

Par Dr Thomas EHRET

Médecin du travail CNPE de Cattenom et adjoint au médecin référent du domaine Rayonnements Ionisants et Anthropogammamétrie, Division Production Nucléaire EDF de Saint-Denis

Dr Solenn LETALON

Médecin du travail CNPE de Penly et adjointe au médecin référent du domaine Rayonnements Ionisants et Anthropogammamétrie, Division Production Nucléaire EDF de Saint-Denis

Dr Agnès KIRBY

Médecin spécialisé en biologie médicale, directeur du Laboratoire EDF de biologie médicale, spécialisé en analyses radiotoxicologiques

Et Dr Éric LAPORTE

Médecin du travail CNPE de Saint-Alban Saint-Maurice et médecin référent du domaine Rayonnements Ionisants et Anthropogammamétrie, Division Production Nucléaire EDF de Saint-Denis

Les auteurs remercient le docteur Michèle GONIN pour sa contribution à la rédaction de cet article.

Produire en toute sûreté et sécurité 70 % d'électricité nucléaire nécessite une maîtrise collective et individuelle des risques liés à l'exposition aux rayonnements ionisants dans une installation nucléaire. Cette exigence répond à des obligations réglementaires, mais également éthiques. Les principes reposent sur la mise en place de programmes de surveillance élaborés conjointement entre les Services de Prévention des Risques et les Services de Prévention et de Santé au Travail. Dans le cadre de la surveillance de l'exposition interne, les objectifs sont de garantir l'absence d'exposition interne chez les intervenants et le cas échéant d'en évaluer l'impact dosimétrique, voire sanitaire. La communication au sens large des événements avec rigueur et transparence auprès des intervenants, des autorités et de la population est primordiale afin de garantir les enjeux de la surveillance de l'exposition interne et préserver l'acceptabilité du nucléaire.

Introduction

La production d'électricité nucléaire est l'un des piliers du mix énergétique français, représentant près de 70 % de l'électricité produite dans le pays. EDF, en tant qu'exploitant des 56 réacteurs implantés sur le territoire français et responsable de la gestion des chantiers de déconstruction du parc français, porte une responsabilité dans la gestion sûre et durable de cette source d'énergie.

La maîtrise des expositions externe et interne dans les installations nucléaires de base (INB) est donc un

enjeu de santé publique et de sûreté industrielle. Elle est encadrée par une réglementation stricte en matière de radioprotection reposant sur le respect de ses principes fondamentaux : justification, optimisation et limitation des doses.

Les exigences sont définies au niveau national (code du travail, décrets relatifs à la protection contre les rayonnements ionisants, code de santé publique) et international (directives de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique ou de l'Union européenne).

La valeur limite réglementaire d'exposition aux rayonnements ionisants pour un travailleur est de 20 mSv

sur 12 mois consécutifs. Cette valeur a été fixée pour limiter les risques à long terme sur la santé.

En outre, la transparence et la rigueur dans la gestion des expositions répondent à une attente forte de la société. L'industrie nucléaire étant souvent perçue comme « industrie à risque », toute faille dans la surveillance des expositions pourrait entacher la réputation de l'exploitant et compromettre l'acceptabilité sociale de cette source d'énergie.

Les enjeux de la surveillance de l'exposition interne

Dans le cadre de la surveillance de l'exposition interne, la finalité est de s'assurer de l'absence d'exposition chez un intervenant. Le cas échéant, les mesures permettent de caractériser et quantifier la présence de radionucléide afin d'en évaluer l'impact dosimétrique au regard du respect des limites réglementaires, voire d'en évaluer l'impact sanitaire.

La responsabilité de la mise en œuvre de la surveillance est partagée entre les Services de RadioProtection (SPR) et les Services de Prévention et de Santé au Travail (SPST).

En France, le rôle des SPST est central dans la protection de la santé des travailleurs et la prévention des risques professionnels afin de garantir la sécurité, leur santé physique et mentale.

Pour les SPST en INB, la surveillance de l'exposition interne constitue une de leurs missions et axes d'activités prioritaires.

Elle nécessite que les SPST acquièrent des compétences spécifiques pour répondre aux exigences des dispositions réglementaires particulières concernant l'exposition aux rayonnements ionisants : définir un programme de surveillance radiologique, réaliser des mesures anthropogammamétriques, prescrire des analyses radio-toxicologiques, prescrire des thérapeutiques spécifiques, réaliser des décontaminations corporelles et contribuer à l'évaluation dosimétrique.

Elle implique une sensibilisation constante des travailleurs aux risques encourus et aux moyens de s'en protéger. Cela passe par :

- l'information des intervenants sur la connaissance des risques, les types de radionucléides auxquels ils peuvent être exposés et les parades qui les protègent ;
- la formation des intervenants leur permettant de savoir comment réagir en cas de suspicion d'exposition (autosurveillance et respect des procédures) ;
- le dialogue : les consultations médicales sont l'occasion d'échanger sur leurs inquiétudes notamment celles liées à la perception du risque radiologique. En effet, le décalage entre la perception psychologique et la réalité du risque lié aux rayonnements ionisants peut susciter des inquiétudes dans un contexte social parfois méfiant et peu averti. Il faut leur apporter

des réponses, les rassurer tout en maintenant un niveau de vigilance chez l'intervenant.

Les principes de la surveillance de l'exposition interne

Sur les installations d'EDF, les exigences et dispositions des programmes de surveillance s'intègrent au processus global d'évaluation des risques à deux niveaux :

- collectif : caractérisation des risques aux postes de travail (SPR) ;
- individuel : en fonction de la nature des risques et du terme source aux postes de travail (SPST).

La surveillance des niveaux d'expositions permet le suivi *a posteriori* de l'efficacité des mesures de préventions instaurées.

Le terme source fait référence à l'ensemble des radionucléides contribuant aux doses mesurées aux postes de travail.

Les radionucléides formés dans le cœur du réacteur résultent des nombreuses réactions nucléaires induites par le flux intense de neutrons qui y règne. Ces réactions se répartissent en trois grandes catégories :

- Les produits d'activation, issus des structures métalliques oxydées dans le fluide du circuit primaire, sont émetteurs bêta-gamma, avec parmi les plus fréquemment retrouvés les cobalts 60 et 58, l'argent 110m, le manganèse 54, l'antimoine 124 et le chrome 51, ou issus du fluide primaire ou de l'air avec le tritium. Le rayonnement gamma a un pouvoir de pénétration élevé (traverse le corps humain et les matériaux épais), mais il est moins ionisant.
- Les produits de fissions, issus de la réaction de fission, sont émetteurs bêta-gamma, majoritairement sous forme d'oxydes solides, fixés dans le combustible. D'autres sont sous forme soluble, aérosol ou gazeuse, tels l'iode 131, les césium 137 et 134 ou les gaz rares xénon 133 et krypton 85.
- Les actinides, issus de la transformation des noyaux « fissiles » initialement présents dans le combustible, sont émetteurs alpha : l'uranium, l'américium et les isotopes du plutonium et du curium. Le rayonnement alpha a un faible pouvoir de pénétration (quelques micromètres dans les tissus, arrêté par la peau). En revanche ce rayonnement est très ionisant, donc pénalisant sur le plan dosimétrique s'il est incorporé dans l'organisme.

Parallèlement, la connaissance des différents modes d'incorporation (inhalation, ingestion, ou plus rarement, absorption cutanée ou par blessure) est fondamentale pour la mise en place des mesures de protections collectives et individuelles adaptées.

La surveillance individuelle de l'exposition interne

La surveillance individuelle de l'exposition interne repose sur la recherche de radionucléides artificiels

présents dans l'organisme, soit par mesure directe, *in vivo* (examen anthropogammamétrique), soit par mesure indirecte *in vitro* dans des excréta (urines, selles).

Conformément à la norme ISO 20533, deux catégories de programme de surveillance individuelle sont définies :

- une surveillance de routine prescrite à périodicité définie en fonction du terme source. La surveillance de chantier en est un cas particulier, les modalités du suivi et de sa périodicité dépendent de l'analyse des risques du chantier ;
- une surveillance spéciale prescrite en cas de survenue d'un événement d'exposition.

L'évaluation de l'impact dosimétrique

L'évaluation de l'impact dosimétrique repose sur l'évaluation de la dose efficace engagée afin de :

- vérifier le respect de la limite réglementaire de 20 mSv sur 12 mois consécutifs ;
- contribuer à la démarche d'optimisation par la détection précoce des expositions à des niveaux faibles.

La Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) définit la dose efficace engagée comme la somme des doses efficaces reçues par les différents organes et tissus du corps sur une période donnée (généralement 50 ans pour un adulte), à la suite de l'incorporation d'un radionucléide.

Contrairement à l'exposition externe, on ne peut pas déduire la dose directement à partir des mesures. L'évaluation de la dose est déterminée par le médecin du travail à partir de mesures individuelles *in vitro* et/ou *in vivo* réalisées successivement afin de prendre en compte le cumul des doses reçues par les organes et la durée de rétention dans l'organisme.

Les modalités de surveillance de l'exposition interne

La première chaîne de surveillance

La première chaîne de surveillance s'appuie sur des mesures de la responsabilité des SPR :

- collectives : contrôle d'ambiance radiologique avec des mesures atmosphériques et/ou surfaciques des postes de travail et des locaux ;
- individuelles : contrôle de l'absence de contamination des intervenants avec des appareils de contrôle radiologique en sortie de zone contrôlée et du site. Ils constituent des barrières successives pour éviter la dissémination de la radioactivité par l'intervenant. Ils sont représentés par les contrôleurs mains-pieds en sortie de chantier ou zone à risque, les différents portiques C1 (entre zone contrôlée et vestiaire chaud), C2 (entre vestiaire chaud et vestiaire froid) et C3 (sortie de site).

Le suivi spécifique du risque d'exposition interne

Le suivi spécifique du risque d'exposition interne est de la responsabilité des SPST.

La surveillance individuelle est réalisée, soit dans les SPST des INB d'EDF (mesures *in vivo*), soit au Laboratoire de Biologie Médicale (LBM) (mesures *in vitro*) centralisé d'EDF et situé à Saint-Denis en région parisienne.

Les personnels des SPST (médecins et infirmiers) des INB EDF sont spécialement formés à la prise en charge des intervenants en cas d'événements radiologiques, à la prescription et/ou réalisation des examens nécessaires à l'évaluation de l'impact dosimétrique, et leur enregistrement dans le Système d'Information de la Surveillance de l'Exposition aux Rayonnements Ionisants (SISERI).

La prise en charge de l'intervenant

La prise en charge de l'intervenant est réalisée en cas d'événement d'exposition interne, le plus souvent suspecté en cas de déclenchement des portiques de contrôle (pour les émetteurs bêta-gamma).

Elle est réalisée par les SPST :

- avec en premier lieu une décontamination pour éliminer une exposition corporelle externe éventuelle ;
- en cas d'exposition interne identifiée, prescriptions des mesures anthropogammamétriques (ATP), voire d'analyses radiotoxicologiques, dans le cadre de la surveillance spéciale ;
- voire un traitement en fonction des protocoles définis par les médecins du travail.

La réalisation des examens anthropogammamétriques par les SPST

Pour les INB en exploitation, la présence de radionucléides émetteurs gamma rend la surveillance de l'exposition interne possible par l'ATP.

Chaque SPST est doté de deux ou trois équipements de spectrométrie gamma, enceintes de mesure blindées (afin de réduire le bruit de fond ambiant) équipées de deux détecteurs à scintillation de type iodure de sodium. Ces mesures permettent d'identifier les radionucléides (énergie spécifique de chaque photon gamma) et de quantifier leurs activités en Becquerels (Bq).

La configuration de mesure des équipements permet de cibler une zone « haute » pour le thorax et une zone « basse » pour l'abdomen.

Les mesures sont rapides, d'une minute de comptage en routine, hors prolongation pour diminuer l'incertitude liée à la mesure.

La réglementation française exige que les mesures soient accréditées par le Cofrac selon la norme NF EN ISO/IEC 17025 qui s'applique aux laboratoires d'essais et d'étalonnage. Les SPST des INB d'EDF sont accrédités depuis maintenant plus de 15 ans. L'accréditation

contrairement à une certification qui porte principalement sur l'organisation d'un système qualité, porte majoritairement sur les compétences des personnels et la maîtrise technique des matériels. « La qualité au service de la technique et non l'inverse ».

Les modalités de surveillance en routine conduisent :

- à la réalisation d'un examen ATP *a minima* annuel, pour donner suite à la visite médicale de surveillance renforcée des salariés ;
- au cours et à la fin d'un chantier identifié comme plus à risque d'exposition interne ;
- en sortie définitive de site pour les intervenants.

Les SPST réalisent environ 70 000 mesures annuellement.

La réalisation des examens radio-toxicologiques par le LBM

Le LBM a pour mission d'assurer l'exécution des analyses prescrites par les médecins du travail liées à la surveillance réglementaire des travailleurs susceptibles d'être exposés au risque rayonnement ionisant dans les INB d'EDF. La réglementation française exige que les mesures soient accréditées par le Cofrac selon la norme NF EN ISO 15189.

Les missions du LBM au carrefour des deux enjeux, santé et radioprotection, sont :

- d'assurer la réalisation des examens radiotoxicologiques, à la recherche de présence de radioactivité d'origine professionnelle sur des prélèvements biologiques, dans des délais de rendu de résultat compatibles avec les exigences et objectifs liés à la surveillance du risque à la fois pour les salariés et pour les chantiers ;
- d'assurer du conseil, quant à leur interprétation, auprès des équipes d'EDF ;
- de contribuer au développement et à la mise au point de nouvelles analyses ou méthodes en radiotoxicologie avec les autres laboratoires du même domaine.

Sur les sites en déconstruction où le risque d'exposition aux émetteurs alpha est prépondérant, une surveillance spécifique des chantiers a été mise en place depuis les années 1990, car la surveillance par ATP n'est pas pertinente.

Ce suivi se situe à deux niveaux :

- surveillance collective des chantiers et du risque d'exposition interne des intervenants par prélèvements de mucus nasal ;
- surveillance individuelle par prélèvements fécaux à la recherche d'actinides, dans le cadre d'un programme de routine ou d'une surveillance spéciale.

La surveillance collective par mouchages (analyses du mucus nasal) est assurée pour chaque intervenant du chantier, à chaque sortie quotidienne du chantier. Les résultats sont rendus rapidement permettant la réactivité des acteurs de la santé et de la radioprotection.

La découverte de résultats positifs déclenche une enquête portant sur le chantier ou la pertinence des mesures de radioprotection.

La surveillance individuelle de routine consiste en un suivi par prélèvement de selles *a minima* annuel ou en fin de chantier. Une bonne pratique est d'étaler les prescriptions de prélèvements des intervenants tout au long de l'année, ce qui permet de combiner la surveillance individuelle à une surveillance collective des activités.

L'estimation et l'évaluation de la dose efficace engagée

Cette estimation permet d'évaluer, *a posteriori*, l'impact dosimétrique de l'exposition interne, et de décider d'éventuelles mesures complémentaires en lien avec le respect de la limite réglementaire.

L'évaluation repose sur :

- les résultats des mesures et examens réalisés de façon rapprochée les premiers jours, puis jusqu'à leur négativation ;
- la connaissance des conditions d'exposition : nature du radionucléide, mode d'incorporation, forme physico-chimique, granulométrie.

La connaissance précise de ces conditions d'exposition, alliée à l'interprétation des résultats des mesures, permet de déterminer la distribution du radionucléide dans l'organisme ainsi que les temps de rétention et d'excrétion avec le temps, et ainsi déterminer le modèle bio-cinétique de la CIPR le plus adapté à l'évaluation dosimétrique.

Les « outils » à la disposition des médecins du travail des INB sont :

- les données issues de la CIPR :
 - modèles bio-cinétique de la publication 66 pour l'incorporation par inhalation et de la publication CIPR 100 pour l'incorporation par ingestion,
 - les coefficients de dose à appliquer mis à jour dans plusieurs publications successives de la CIPR entre 2015 et 2022 et repris par la réglementation française.
- guide pratique de calcul de dose, fruit du travail d'un groupe de médecins du travail d'EDF édité en 2021 ;
- outils numériques d'aide au calcul de dose tel le logiciel MODOSE de l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) ou le logiciel CADORMed développé par un médecin du travail EDF.

Les outils d'aide au calcul peuvent être particulièrement utiles lorsque les conditions de l'exposition sont insuffisamment connues. L'étude des différentes mesures successives permet de chercher un ajustement convenable entre la cinétique de décroissance des activités mesurées et un modèle d'excrétion prévu par la CIPR, et pouvoir ainsi valider au plus près les paramètres d'un modèle bio-cinétique.

L'enregistrement de la dose et données chiffrées dans SISERI

SISERI, une plateforme gérée par l'IRSN, centralise et archive les données relatives à l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants des travailleurs.

L'ensemble des organismes accrédités pour les mesures d'exposition transmettent régulièrement les résultats à SISERI.

Conformément à la réglementation, le médecin du travail de l'intervenant communique à SISERI la dose dès lors que celle-ci est significative d'un point de vue de la radioprotection.

La CIPR recommande un enregistrement des doses supérieures à 1 mSv en cas d'exposition interne. À EDF, en ce qui concerne les estimations dosimétriques dues aux émetteurs gamma, il est possible d'évaluer et d'enregistrer des doses à partir de 0,1 mSv, niveau de dose qui correspond à la limite de quantification basse assortie d'une incertitude de près de 50 %.

Chaque année, l'IRSN publie le bilan annuel de la surveillance des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants, pour l'ensemble des exploitants de la filière nucléaire, à partir des informations transmises par chaque exploitant.

Conclusion

Le champ d'actions des Services de Prévention et de Santé au Travail est large : contribution à l'évaluation des risques professionnels, suivi médical des salariés incluant des examens spécifiques en lien avec des risques particuliers, conseils et accompagnements aux employeurs, actions de santé publique, contribution à la traçabilité des expositions professionnelles pour la mise en œuvre d'un suivi post-professionnel.

Pour une prévention active, cela implique un travail en étroite collaboration avec les Services de Prévention des Risques et les encadrants pour améliorer les pratiques en fonction des retours d'expérience.

Bien que les situations d'exposition interne et les doses estimées soient en diminution, grâce aux progrès de la radioprotection, des événements ponctuels non négligeables peuvent survenir, justifiant le maintien d'une vigilance sur le respect des dispositions des programmes de surveillance mis en œuvre.

C'est pourquoi il apparaît indispensable de poursuivre les actions de formation auprès des intervenants, de renforcer la prévention des risques, de garantir la maîtrise de la sécurité et de la radioprotection de nos chantiers, ceci dans un fort contexte de renouvellement du parc nucléaire français avec la construction d'EPR et des futurs chantiers de déconstruction à venir.

Pour autant, cela ne doit pas se faire au détriment de la prise en compte d'autres risques comme ceux liés aux produits chimiques, à la manutention, aux chutes de plain-pied, aux travaux en ambiance chaude, pour ne citer que ceux qui sont les plus pourvoyeurs de l'accidentologie sur les INB.

Effets sur la santé humaine des faibles doses de rayonnements ionisants : un bref état des connaissances issues des études épidémiologiques

Par Corinne MANDIN, Énora CLÉRO et Dominique LAURIER
Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN)

Si les effets des rayonnements ionisants sur la santé humaine à des doses modérées ou élevées (> 100 mGy) sont bien connus, les effets aux faibles doses (< 100 mGy) le sont moins. Les connaissances issues des études épidémiologiques confirment un risque de cancer associé à une exposition à de faibles doses de rayonnements ionisants, sans qu'il soit possible de confirmer ou non l'existence d'un seuil de dose à partir duquel ces effets apparaîtraient. Les risques de maladies du système circulatoire, du système nerveux central ou d'opacités cristalliniennes ne sont pas exclus aux faibles doses mais les résultats des études épidémiologiques restent contradictoires. Enfin, les effets héréditaires observés chez l'animal ne le sont pas chez l'humain, les études épidémiologiques restant cependant limitées.

Introduction

Les faibles doses de rayonnements ionisants (RI) sont définies par le Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des RI (UNSCEAR) comme étant les doses inférieures à 100 milliGray (mGy). Les expositions aux faibles doses de RI peuvent être d'origine environnementale, professionnelle ou médicale. Cet article présente une synthèse des connaissances issues des études épidémiologiques nationales et internationales menées au cours des deux dernières décennies sur les risques de cancers et de maladies non cancéreuses associés à l'exposition aux faibles doses de RI.

Expositions aux faibles doses de rayonnements ionisants et risques de cancers

Survivants des bombardements atomiques

Depuis 1950, la cohorte des survivants des bombardements atomiques d'Hiroshima et de Nagasaki fournit des données essentielles sur les effets sanitaires des RI. Les doses individuelles reçues par plus de 86 000

survivants suivis sur leur vie entière ont été évaluées. L'étude de l'incidence de l'ensemble des cancers solides a montré une relation dose-risque significative¹ pour les survivants ayant reçu une dose inférieure à 100 mGy (Grant *et al.*, 2017). De nouvelles analyses ont confirmé l'observation de relations dose-risque sur des sites spécifiques de cancers tels que le sein, le tractus digestif, l'utérus, les ovaires, le cerveau, le foie, la prostate, le rein et la vessie (Brenner *et al.*, 2022).

Travailleurs exposés aux rayonnements ionisants

Contrairement aux survivants des bombardements atomiques exposés à des doses uniques (exposition aiguë), les travailleurs dans le domaine nucléaire ou médical cumulent des doses faibles répétées sur de longues périodes.

De grandes cohortes nationales de travailleurs de l'industrie nucléaire (par exemple, plus de 170 000 travailleurs au Royaume-Uni, 80 000 travailleurs dans la cohorte française SELTINE) ont montré une relation significative entre la dose cumulée et le risque de

¹ En statistiques, on parle de relation « significative » quand celle-ci est considérée fiable (robuste) et non liée au hasard.

cancer solide (Haylock *et al.*, 2018) ou d'hémopathie maligne (Hunter & Haylock, 2022 ; Laurent *et al.*, 2022). L'étude internationale INWORKS, sur 310 000 travailleurs du nucléaire, confirme une association significative avec le risque de cancer solide (Richardson *et al.*, 2023) et le risque de leucémie (Leuraud *et al.*, 2024), même à des doses cumulées inférieures à 100 mGy.

Les personnels médicaux exposés aux RI présentent également un risque accru de cancer, surtout associé à des périodes d'exposition anciennes. Aux faibles doses, les résultats restent cependant contradictoires. Des cohortes de professionnels médicaux en Corée du Sud et en France n'ont pas rapporté d'association entre l'exposition aux RI et le risque de cancer solide ou de leucémie (Lee *et al.*, 2021 ; Lopes *et al.*, 2024). Une étude américaine a montré une relation faible mais significative avec la mortalité par cancer du poumon, mais pas pour le cancer du sein, du cerveau ou la leucémie (Boice *et al.*, 2023).

Expositions environnementales naturelles

La principale source d'exposition environnementale naturelle de la population aux RI est le radon. Les études en population générale montrent une relation statistiquement significative entre exposition au radon domestique à l'âge adulte et risque de cancer du poumon. Quelques études ont analysé l'association entre l'exposition au radon et la survenue d'autres maladies telles que la leucémie infantile, le cancer de la peau ou du cerveau, mais les résultats sont discordants (Henyoh *et al.*, 2024).

Les résultats des études épidémiologiques ayant examiné les relations entre cancer et rayonnements telluriques et cosmiques sont actuellement discordants (Laurier *et al.*, 2023a).

Expositions environnementales anthropiques

Les expositions environnementales anthropiques peuvent être liées aux rejets dans l'air et les eaux des installations nucléaires, aux retombées atmosphériques des essais nucléaires ou aux émissions dans l'environnement consécutives à des accidents nucléaires.

De nombreuses études ont été réalisées sur la santé des populations résidant à proximité de sites nucléaires. Si des excès localisés de leucémies infantiles ont été identifiés à proximité de certains sites, à Sellafield (Angleterre), Dounreay (Écosse) et Krümmel (Allemagne), les études n'ont pas mis en évidence d'association entre la proximité à un site nucléaire et le risque de cancer (Laurier *et al.*, 2008).

Au sujet des effets sanitaires des retombées des essais nucléaires atmosphériques, les résultats des études sont insuffisants pour établir des liens entre l'exposition aux RI et l'occurrence de pathologies. En corollaire, ces résultats ne permettent pas d'exclure l'existence de conséquences sanitaires passées inaperçues (Inserm, 2020).

S'agissant des accidents nucléaires, l'augmentation de la fréquence des cancers de la thyroïde chez les

enfants résidant dans les régions les plus contaminées d'Ukraine, de Biélorussie et de Russie est le principal effet sanitaire associé aux retombées radioactives de l'accident de Tchernobyl (Cléro *et al.*, 2021). Les retombées radioactives de l'accident de Fukushima ont un impact moindre sur la santé que celles de Tchernobyl du fait de doses plus faibles (UNSCEAR, 2021).

Patients d'imagerie médicale

Des publications récentes ont montré une augmentation du risque de cancer après scanner durant l'enfance. Le projet européen EPI-CT, incluant près d'un million d'enfants, a rapporté une relation dose-risque significative entre les doses délivrées par des scanners et l'incidence de tumeurs cérébrales malignes (Hauptmann *et al.*, 2023) ou d'hémopathies malignes (Bosch de Basea *et al.*, 2023). Ces résultats doivent être interprétés avec prudence, mais une association semble persister après exclusion des enfants ayant des facteurs de prédisposition au cancer (Foucault *et al.*, 2022). Les études chez les enfants exposés *in utero* aux RI pour diagnostic médical montrent un excès de risque de cancer proportionnel à la dose reçue (Wakeford et Bithell, 2021).

Synthèses et méta-analyses des risques de cancer aux faibles doses

Des méta-analyses récentes viennent consolider les résultats des études épidémiologiques et concluent que la relation dose-risque de cancer est bien décrite par une relation linéaire sans seuil, même pour des doses inférieures à 100 mGy (Shore *et al.*, 2018 ; Hauptmann *et al.*, 2020). Les résultats scientifiques des deux dernières décennies ne démontrent pas l'existence d'un seuil de dose en-dessous duquel le risque de cancer associé aux RI serait nul. Des incertitudes persistent mais un tel seuil de dose, s'il existe, ne peut être supérieur à quelques dizaines de mGy (Laurier *et al.*, 2023b).

Expositions aux faibles doses de rayonnements ionisants et risques de pathologies non cancéreuses

Les pathologies autres que le cancer ont longtemps été considérées comme des effets dus à de fortes doses, avec un seuil de dose en-dessous duquel ce type d'effets ne pouvait survenir. Néanmoins, plusieurs études récentes suggèrent l'existence de tels effets à des doses plus faibles.

Maladies du système circulatoire

Les fortes doses de RI sont reconnues pour causer des lésions cardio- et cérébrovasculaires, augmentant le risque de maladies du système circulatoire. La Commission internationale de protection radiologique (CIPR) considère un seuil de dose de 500 mGy pour ces maladies (CIPR, 2012). Une méta-analyse de 93 études a montré une relation dose-risque significative pour toutes les maladies cardio- et cérébrovasculaires (Little *et al.*, 2023). Néanmoins, pour les doses

reçues inférieures à 500 mGy, des incertitudes persistent quant à la forme de la relation dose-risque, l'existence d'un seuil de dose et la contribution d'autres facteurs de risque.

Maladies du système nerveux central

L'intérêt pour les effets potentiels des RI sur les fonctions cognitives a augmenté ces dernières années, notamment à la lumière des études récentes sur les travailleurs du nucléaire. De plus, une méta-analyse a observé des relations dose-risque significatives pour la maladie de Parkinson associées à des doses faibles à modérées reçues à l'âge adulte (Lopes *et al.*, 2022). Une autre méta-analyse américaine a confirmé un excès de risque de mortalité par maladie de Parkinson associé à une dose de 100 mGy au cerveau (Dauer *et al.*, 2024). Ces résultats étant récents, ils nécessitent d'être consolidés.

Opacités cristalliniennes

En 2012, sur la base de données épidémiologiques, la CIPR a abaissé le seuil de dose pour la protection contre les cataractes à 500 mGy. Aujourd'hui, la synthèse des résultats disponibles montre une augmentation des risques d'opacité cristallinienne pour des doses inférieures à 500 mGy, y compris chez les personnes exposées de manière prolongée, remettant en question l'existence d'un seuil. De plus, de nouveaux résultats suggèrent un lien avec le glaucome et la rétinopathie diabétique, et soulignent la nécessité d'une compréhension approfondie des mécanismes sous-jacents et d'une évaluation continue des risques pour la santé oculaire (Hamada, 2023).

Effets héréditaires

Bien que les études chez l'animal aient montré des effets héréditaires des RI, c'est-à-dire des effets chez la descendance de parents exposés avant la conception, aucune confirmation n'a été établie chez l'humain jusqu'à présent. Une revue de la littérature récente n'a pas identifié de preuves d'une association entre l'exposition des parents aux RI avant la conception et les effets chez les enfants. Cependant, elles soulignent le manque de données et les limites méthodologiques, suggérant que si des effets de santé peuvent se produire, ils sont faibles et difficiles à démontrer (Amrenova *et al.*, 2024).

Conclusions et perspectives

Les recherches épidémiologiques récentes confirment les risques de cancer associés aux faibles doses de RI, montrant des excès de risque dès 100 mGy voire à de plus faibles doses. Les conclusions de consortiums internationaux soulignent l'absence probable d'un seuil de dose en-dessous duquel il n'y aurait aucun risque de cancer. Pour les très faibles doses (< 10 mGy), il n'y a pas aujourd'hui d'évidence biologique ni épidémiologique, mais l'hypothèse d'une persistance de la relation sans seuil de dose reste privilégiée. Pour les pathologies non cancéreuses, les résultats épidémiologiques

suggèrent également des excès de risque aux doses faibles à modérées, mais l'incertitude reste élevée. La poursuite des études épidémiologiques est essentielle. En intégrant les approches expérimentales, ces recherches contribueront à une meilleure détermination des risques associés aux faibles doses de RI.

Références

- AMRENOVA A. *et al.* (2024), "Intergenerational effects of ionizing radiation: review of recent studies from human data (2018-2021)", *International Journal of Radiation Biology*, 100(9), pp. 1253-1263.
- BOICE J. D. *et al.* (2023), "Mortality among medical radiation workers in the United States, 1965-2016", *International Journal of Radiation Biology*, 99(2), pp. 183-207.
- BOSCH DE BASEA M. *et al.* (2023), "Risk of haematological malignancies from CT radiation exposure in children, adolescents and young adults", *Nat Med*, 29, pp. 3111-3119.
- BRENNER A. V. *et al.* (2022), "Comparison of all solid cancer mortality and incidence dose-response in the life span study of atomic bomb survivors, 1958-2009", *Radiat Res*, 197(5), pp. 491-508.
- CLÉRO E. *et al.* (2021), « Conséquences sanitaires 35 ans et 10 ans après les accidents nucléaires de Tchernobyl et de Fukushima », *Environnement, Risques & Santé*, 20, pp. 525-534.
- COMMISSION INTERNATIONALE DE PROTECTION RADIOLOGIQUE (CIPR) (2012), "ICRP Statement on Tissue Reactions / Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context", ICRP Publication 118, Ann ICRP, 41(1/2).
- DAUER L. T. *et al.* (2024), "Moon, Mars and Minds: Evaluating Parkinson's disease mortality among U.S. radiation workers and veterans in the million person study of low-dose effects", *Z Med Phys*, 34(1), pp. 100-110.
- FOUCAULT A. *et al.* (2022), "Childhood cancer risks estimates following CT scans: an update of the French CT cohort study", *Eur Radiol*, 32(8), pp. 5491-5498.
- GRANT E. J. *et al.* (2017), "Solid cancer incidence among the life span study of atomic bomb survivors: 1958-2009", *Radiat Res*, 187(5), pp. 513-537.
- HAMADA N. (2023), "Noncancer effects of ionizing radiation exposure on the eye, the circulatory system and beyond: developments made since the 2011 ICRP statement on tissue reactions", *Radiat Res*, 200(2), pp. 188-216.
- HAUPTMANN M. *et al.* (2020), "Epidemiological studies of low-dose ionizing radiation and cancer: summary bias assessment and meta-analysis", *JNCI Monographs*, 2020(56), pp. 188-200.
- HAUPTMANN M. *et al.* (2023), "Brain cancer after radiation exposure from CT examinations of children and young adults: results from the EPI-CT cohort study", *Lancet Oncol*, 24, pp. 45-53.
- HAYLOCK R. G. E. *et al.* (2018), "Cancer mortality and incidence following external occupational radiation exposure: an update of the 3rd analysis of the UK national registry for radiation workers", *Br J Cancer*, 119(5), pp. 631-637.
- HENYOH A. M. S. *et al.* (2024), "Radon exposure and potential health effects other than lung cancer: a systematic review and meta-analysis", *Front Public Health*, 12, 1439355.
- HUNTER N. & HAYLOCK R. (2022), "Radiation risks of lymphoma and multiple myeloma incidence in the updated NRRW-3 cohort in the UK: 1955-2011", *J Radiol Prot*, 42, 011517.

- INSERM (2020), « Essais nucléaires et santé. Conséquences en Polynésie française », Collection Expertise collective, Montrouge, EDP Sciences.
- LAURENT O. *et al.* (2022), "Updated mortality analysis of SELTINE, the French cohort of nuclear workers, 1968-2014", *Cancers*, 15(1), 79.
- LAURIER D. *et al.* (2008), "Epidemiological studies of leukaemia in children and young adults around nuclear facilities: a critical review", *Radiat Prot Dosim*, 132(2), pp. 182-190.
- LAURIER D. *et al.* (2023a), « Chapitre 31 - Rayonnements ionisants » dans *Environnement et santé publique : Fondements et pratiques*, Isabelle Goupil-Sormany éd., Rennes, Presses de l'EHESP, pp. 829-849, <https://doi.org/10.3917/ehesp.goupi.2023.01.0829>
- LAURIER D. *et al.* (2023b), « Fondements scientifiques de l'utilisation du modèle linéaire sans seuil (LNT) aux faibles doses et débits de dose en radioprotection », *Radioprotection*, 58(4), pp. 243-260.
- LEE W. J. *et al.* (2021), "Occupational radiation exposure and cancer incidence in a cohort of diagnostic medical radiation workers in South Korea", *Occ Environ Med*, 78(12), pp. 876-883.
- LEURAUD K. *et al.* (2024), "Leukaemia, lymphoma, and multiple myeloma mortality after low-level exposure to ionising radiation in nuclear workers (INWORKS): updated findings from an international cohort study", *Lancet Haematol*, 11(10), e761-e769.
- LITTLE MP. *et al.* (2023), "Ionising radiation and cardiovascular disease: systematic review and meta-analysis", *BMJ*, 380, e072924.
- LOPES J. *et al.* (2022), "Risk of Developing Non-Cancerous Central Nervous System Diseases Due to Ionizing Radiation Exposure during Adulthood: Systematic Review and Meta-Analyses", *Brain Sci*, 12(8), 984.
- LOPES J. *et al.* (2024), "Central nervous system tumours and occupational ionizing radiation exposure: a nested case-control study among the ORICAMs cohort of healthcare workers in France", *BMJ Open*, 14, e084285.
- RICHARDSON D. B. *et al.* (2023), "Low dose exposure to ionizing radiation and cancer: Updated findings from the International Nuclear Workers Study (INWORKS)", *BMJ*, 382, e074520.
- SHORE R. E. *et al.* (2018), "Implications of recent epidemiologic studies for the linear nonthreshold model and radiation protection", *J Radiol Prot*, 38(3), pp. 1217-1233.
- UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION (UNSCEAR) (2021), "Sources, effects and risks of ionizing radiation. UNSCEAR 2020/2021 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Volume III. Scientific Annex C. Biological mechanisms relevant for the inference of cancer risks from low-dose and low-dose-rate radiation", United Nations, New York.
- WAKEFORD R. & BITHELL J. F. (2021), "A review of the types of childhood cancer associated with a medical X-ray examination of the pregnant mother", *Int J Radiat Biol*, 97, pp. 571-592.

Les acteurs internationaux de la radioprotection et leurs rôles

Par Laurence LEBARON JACOBS

Conseiller international en radiobiologie, radiopathologie et toxicologie nucléaire au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)

La radioprotection est née au niveau international dans le domaine médical dans les années qui ont suivi la Première Guerre mondiale, bien avant l'apparition des réacteurs nucléaires de recherche, de la bombe atomique, puis de la production nucléaire d'électricité. Les acteurs internationaux de la radioprotection sont nombreux, jouent des rôles souvent complémentaires et sont en bonne partie à l'origine des législations et réglementations nationales.

L'histoire de la radioprotection

Grâce au chimiste et physicien William Crookes qui crée les tubes qui portent son nom, le physicien allemand Wilhelm K. Röntgen découvre les rayons X en 1895 en parvenant à rendre lumineux un écran de platino-cyanure de baryum, lors de son étude sur les rayons cathodiques. Il reçoit le premier prix Nobel de physique en 1901 pour sa découverte.

Dans sa première communication faite à la Société Physico-Médicale de Würzburg, Wilhelm K. Röntgen décrit la première image radiographique et réalise également le premier cliché radiographique le 22 décembre 1895, en intercalant la main de son épouse entre le tube de Crookes et une plaque photographique (voir la Figure 1).

En 1896, Henri Becquerel découvre par hasard la radioactivité en remarquant qu'une plaque photographique en contact avec des sels d'uranium est impressionnée même dans l'obscurité.

En 1898, Marie et Pierre Curie découvrent le polonium et le radium, deux radioéléments alors inconnus, présents dans le minerai d'uranium. Pour ces travaux, Henri Becquerel et les époux Curie ont partagé le prix Nobel de physique en 1903.

En 1897, le docteur Bécclère crée le premier laboratoire français de radiologie grâce à la mise en place d'une installation radioscopique dans son service de médecine générale à l'hôpital Tenon. Le dépistage systématique de la tuberculose est ainsi possible par radioscopie du thorax. Malheureusement, les premiers manipulateurs opèrent sans protection : leurs mains en particulier maintiennent l'écran ou la plaque photographique sans protection (voir la Figure 2 page suivante). Apparaissent alors les premières radiodermites, puis, à plus long terme des cancers, qui conduisent à des



Figure 1 : Wilhelm K. Röntgen et première radiographie X de la main de sa femme prise en 1895 (Source : Deutsches Museum, Munich, République Fédérale d'Allemagne).

amputations, voire à des décès parmi les radiologues. Le corps médical prend alors conscience de la nocivité des rayons X.

En octobre 1907, lors de la réunion de l'American Roentgen Ray Society, R. V. Wagner, un fabricant de tubes à rayons X, déclare qu'il a commencé à porter une plaque photographique dans sa poche et à la développer chaque soir, afin de vérifier s'il a été exposé ou non. Cependant, R. V. Wagner a déjà développé un cancer et décède six mois plus tard. Par la suite, l'adoption de recommandations en matière de radioprotection par la British Roentgen Society en 1915 a constitué une évolution majeure en matière de protection contre les rayonnements ionisants. En procédant à des contrôles de radioprotection, l'American Roentgen Ray Society



Figure 2 : L'exposition aux rayons X pouvait durer de quelques minutes à quelques heures, pendant lesquelles le médecin et le patient n'étaient absolument pas protégés (Source : *The X-ray, or Photography of the Invisible and its Value in Surgery* by William J. Morton and Edwin W. Hammer. American Technical Book Company, New York, 1896).

a également fourni une base solide aux utilisateurs de rayons X (1922).

Pour minimiser l'exposition aux rayons X, les manipulateurs se placent alors à distance et derrière une vitre plombée.

En parallèle, les résultats de l'utilisation d'aiguilles ou de pansements au radium pour soigner des tumeurs et autres affections cutanées semblent prometteurs : ce sont les débuts de la radiothérapie, qui sera par la suite testée sur de nombreuses pathologies incurables de l'époque comme la tuberculose. Durant la Première Guerre mondiale, afin de localiser précisément les balles à l'intérieur des blessés et faciliter les interventions chirurgicales, Marie Curie crée dix-huit unités chirurgicales mobiles qui sont envoyées au front : ce sont les « Petites Curies », voitures transportant du matériel de radiologie.

Au début du XX^e siècle, le radium est aussi utilisé pour réaliser des peintures radio-luminescentes. En effet, les sels de radium associés à du sulfure de zinc dans un vernis constituent une peinture qui émet une lumière continue peu intense. Ainsi, entre 1917 et 1924, des jeunes femmes américaines (connues sous le nom de radium girls) vont peindre les cadrans lumineux de réveils et de pendules avec des sels de radium, en effleurant leur pinceau avec les lèvres. Par la suite, l'industrie pharmaceutique vend de nombreux produits dérivés contenant du radium en prônant leurs vertus miraculeuses, mais qui ne sont pas vérifiées médicalement. Apparaissent ainsi des pommades, des compresses, des ampoules, des potions buvables, de la laine et des

compléments alimentaires pour animaux contenant du radium.

Dans les années qui suivent la fin de la guerre, de nombreux radiologues présentent des leucémies, ce qui, en particulier, a conduit la Société internationale de radiologie à créer lors de son congrès de Londres en 1925 l'International X-ray Unit Committee, puis en 1928 à Stockholm, l'International X-ray and Radium Protection Committee. Les premières règles de radioprotection sont alors érigées par ces deux comités pour répondre aux préoccupations croissantes au regard des effets des rayonnements ionisants observés dans la communauté médicale.

Sur la base de la première unité standard de mesure de la dose (le röntgen) définie en 1928, la première limite destinée à la protection des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants est fixée à 0,2 röntgen par jour de travail en 1934.

ICRU, ICRP et UNSCEAR

Au décours de la Seconde Guerre mondiale et en particulier des bombardements d'Hiroshima et de Nagasaki, l'International X-ray Unit Committee, qui devient l'International Commission on Radiological Units (ICRU) en 1950, élabore et promulgue des recommandations internationales sur les quantités et unités de rayonnement et de radioactivité, sur les procédures adaptées à la mesure et à l'application de ces grandeurs en radiologie diagnostique, radiothérapie, radiobiologie, médecine nucléaire, radioprotection et activités industrielles et environnementales, et enfin sur les

données physiques nécessaires à l'application de ces procédures. L'ICRU a donc un rôle d'autorité internationale et collabore étroitement avec le Conseil national américain sur la protection contre les rayonnements ionisants (NCRP) ainsi qu'avec d'autres organisations internationales, notamment l'Agence internationale de l'Énergie atomique (AIEA), l'Organisation mondiale de la santé (OMS), la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), le Comité scientifique des Nations unies sur les effets des rayonnements atomiques (UNSCEAR), l'Organisation internationale de normalisation (ISO), le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) et le Comité international des Poids et Mesures (CIPM).

De même, au décours des bombardements d'Hiroshima et de Nagasaki, l'International X-ray and Radium Protection Committee devient l'International Commission on Radiological Protection (ICRP) en 1959 afin de mieux tenir compte des utilisations des rayonnements ionisants hors du domaine médical. La CIPR est une organisation indépendante dont la mission est de fournir des recommandations et des conseils sur tous les aspects de la protection contre les rayonnements ionisants.

L'UNSCEAR est créé en 1955 par la résolution 913(X) de l'Assemblée générale des Nations Unies (AGNU) en réponse aux nombreuses préoccupations relatives aux effets des rayonnements ionisants sur la santé et l'environnement. Le Comité a pour mission d'évaluer les niveaux et les effets des rayonnements ionisants naturels et artificiels sur l'Homme et son environnement. Les travaux de l'UNSCEAR servent de base à la CIPR dans l'élaboration de ses recommandations sur la protection des travailleurs, de la population et des patients contre les rayonnements ionisants. Le programme de travail du Comité, couvrant généralement une période de quatre à cinq ans, est approuvé par l'AGNU. L'UNSCEAR a pour mission de rassembler et d'analyser les données concernant les sources de rayonnements ionisants et fournies par les États membres de l'Organisation des Nations unies (Onu), les organisations internationales et les organisations non gouvernementales. Par ailleurs, le Comité produit des rapports qui analysent l'ensemble des publications scientifiques pertinentes sur les effets biologiques et sanitaires des rayonnements ionisants en fonction du programme de travail. La méthode de validation par les pairs du Comité est rigoureuse. Les rapports publiés sont des ouvrages de référence incontournables et indiscutables.

Les autres organismes internationaux

L'AIEA est une organisation des Nations unies fondée en 1957 dont la mission initiale est de promouvoir les usages pacifiques de l'énergie nucléaire dans le monde entier, ce qui contribue à limiter le développement de ses applications militaires. L'AIEA publie et révisé régulièrement les standards dans les domaines de la sûreté nucléaire et de la radioprotection à partir des recommandations de la CIPR : les "Basic Safety Standards".

D'autres organismes internationaux sont également présents dans ce domaine de la radioprotection.

L'Agence pour l'Énergie nucléaire (AEN), créée en 1958, est une agence intergouvernementale qui facilite la coopération entre les pays dotés d'infrastructures technologiques nucléaires. L'AEN opère dans le cadre de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). L'AEN fournit des évaluations sur des questions clés en vue de contribuer aux décisions gouvernementales en matière de politique énergétique nucléaire, et aux analyses plus larges de l'OCDE dans des domaines tels que l'énergie et le développement durable.

Trois autres organismes sont impliqués en radioprotection dans le domaine qui leur est propre : l'OMS organisation créée en 1948 pour le domaine médical, la FAO (Food and Agriculture Organisation en 1945) pour l'alimentation et l'agriculture, et l'OIT (Organisation internationale du travail en 1919) pour les travailleurs. À noter, le Codex Alimentarius est une organisation conjointe de l'OMS et de la FAO dans le domaine de la toxicologie alimentaire, incluant les radionucléides. Comme la radioprotection n'est pas au centre de leurs préoccupations, ces organismes collaborent avec l'AIEA et fonctionnent en réseau au sein de l'ONU.

L'ISO est une organisation internationale indépendante et non gouvernementale. Créée en 1947, l'ISO élabore des normes internationales dans tous les domaines industriels et commerciaux, dont certaines ont une composante de radioprotection.

L'IRPA (Association internationale de radioprotection) est une société savante créée en 1965 dont les membres sont les sociétés nationales de radioprotection. Au travers des conférences continentales et mondiales régulières, l'IRPA favorise la rencontre de tous les acteurs de la radioprotection dans le but d'une plus grande professionnalisation. Le réseau ALARA (As Low as Reasonable and Achievable) des professionnels européens de la radioprotection les accompagne depuis 1979 pour la mise en place du principe d'optimisation des expositions aux rayonnements ionisants.

Euratom

Deux traités ont été signés le 25 mars 1957, l'un instituant la Communauté économique européenne (CEE) et l'autre, la Communauté européenne de l'énergie atomique (CEEA ou Euratom). Les principaux objectifs du traité Euratom sont de promouvoir la recherche et la diffusion des informations techniques, d'établir des normes de sécurité harmonisées pour protéger la population et les travailleurs de l'industrie, faciliter la recherche et veiller que les matières nucléaires ne soient pas utilisées à d'autres fins, en particulier militaires.

Euratom dispose d'un comité scientifique et technique et de comités spécialisés dont le groupe des experts de l'article 31 réunissant des représentants de tous les États membres, auquel la Commission européenne fait appel en matière de recommandations en vue de l'élaboration des directives.

Alors que l'ICRU et la CIPR sont des organisations indépendantes, que les différents organismes Onusiens ont leur rôle propre mais qu'aucun ne possède d'autorité réglementaire, que l'AEN n'a pas non plus de pouvoir régalién, ce sont pourtant leurs analyses et leurs recommandations qui vont former le socle de la législation et de la réglementation européenne grâce à leurs transpositions nationales. En effet, pour répondre à la demande de la Commission européenne, les experts de l'article 31 s'appuient et utilisent les travaux déjà publiés, notamment ceux de la CIPR dont la phraséologie est déjà assez proche d'une phraséologie législative ou réglementaire.

Conclusion

Les acteurs internationaux de la radioprotection jouent un rôle fondamental dans la compilation et l'analyse des connaissances scientifiques nécessaires à la mise en place de la radioprotection, et se situent ainsi au cœur de l'élaboration des législations et réglementations européennes, puis nationales de chacun des États membres.

L'évolution du système international de radioprotection

Par Werner RÜHM

Président de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR)
et Chef de l'unité « Avenir de la radioprotection »
à l'Office fédéral de radioprotection, Allemagne

Depuis de nombreuses décennies, les réglementations internationales en matière de radioprotection se fondent sur les recommandations de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR). Avec les recommandations générales de la publication 103 [1] de la CIPR en 2007, celles des publications 26 [2] et 60 [3] ont été mises à jour. Étant donné que les travaux préparatoires à la publication 103 ont commencé il y a plus de 20 ans, la CIPR considère qu'il est temps d'engager le processus de révision de ces recommandations et, si nécessaire, de les améliorer. Dans ce processus, il convient de prendre en compte toutes les nouvelles connaissances scientifiques sur les effets des rayonnements sur la santé, ainsi que les évolutions des valeurs sociales et de la perception des risques par la société.

Les premiers pas vers la révision du système de radioprotection

Le point de vue de la CIPR

Afin de lancer une discussion internationale, la CIPR a publié en 2021 des idées initiales sur des sujets qui pourraient être pertinents pour la révision du système de radioprotection (le « Système ») [4]. Ces sujets comprenaient :

- la catégorisation des effets induits par les rayonnements ionisants (RI) en effets stochastiques et réponses tissulaires, qui peut ne plus refléter l'état de la science ;
- la définition du préjudice causé par les RI, qui pourrait également inclure des maladies non cancéreuses telles que les maladies du système cardiovasculaire et qui pourrait par exemple être spécifiée séparément pour les hommes et les femmes d'âges différents ;
- si les preuves scientifiques actuelles de la radiosensibilité individuelle et des effets héréditaires liés aux rayonnements sont suffisantes pour justifier des changements dans le système ;
- l'examen des effets de l'exposition aux RI sur la flore, la faune et l'ensemble des écosystèmes.

En outre, la CIPR a proposé de réfléchir à une intégration conceptuelle cohérente de la protection humaine et environnementale, de revoir les principes de « justification » et d'« optimisation » qui sous-tendent la radioprotection et d'analyser l'expérience pratique des situations d'exposition introduites dans la publication 103 [1]. Enfin, l'importance de la communication et de l'implication des parties prenantes ainsi que l'impor-

tance de l'éducation et de la formation en matière de radioprotection ont été soulignées [4].

Les idées de la communauté internationale

La CIPR a encouragé la communauté internationale de la radioprotection à se joindre à ces efforts et à travailler ensemble pour développer un cadre moderne de radioprotection qui sera valable pour les décennies à venir. Dans ce contexte, il est important de noter que la CIPR entretient depuis de nombreuses années des relations étroites avec d'autres organisations internationales qui s'intéressent à la radioprotection. Du point de vue de la CIPR, ces organisations peuvent apporter de précieuses contributions à l'examen et à la révision du système en fonction de leurs différents rôles et des points de vue de leurs membres.

Un atelier en ligne organisé par la CIPR du 14 octobre au 3 novembre 2021 a fourni une première occasion de discuter des idées décrites dans [4] et de présenter ses propres propositions. Les résultats de cet atelier sont résumés dans [5]. Les principaux sujets qui en sont ressortis comprenaient la classification des effets induits par les rayonnements, la méthode des chemins des effets indésirables (AOP Adverse Outcome Pathway) pour estimer les effets biologiques de petites doses de rayonnements ionisants, la connaissance des relations dose-réponse pertinentes, les approches holistiques pour optimiser la protection contre les RI, la radioprotection de l'environnement, les fondements éthiques du système, l'importance de la clarté et de la cohérence dans le système, l'application de la radioprotection spécifiquement en médecine et l'application des principes de « justification » et d'« optimisation » en radioprotection.

La recherche à l'appui du système de radioprotection

Le point de vue de la CIPR

Les idées décrites ci-dessus constituent le cadre de la révision actuelle de la radioprotection par la CIPR. Cependant, les publications [4, 5] ne contiennent aucune suggestion quant aux projets scientifiques qui pourraient encore améliorer le système. Pour combler cette lacune, la CIPR a récemment publié un autre article visant à compléter les priorités de recherche proposées par d'autres organisations internationales dans le but de soutenir le développement ultérieur de la radioprotection [6]. Cet article décrit des sujets de recherche qui, de l'avis de la CIPR, sont susceptibles d'améliorer la radioprotection à court, moyen et long terme.

Les besoins de recherche identifiés par la CIPR nécessitent un large éventail de disciplines telles que la radiobiologie, la dosimétrie, l'écologie, l'épidémiologie, la toxicologie, l'imagerie médicale et la radiothérapie, l'éthique, les sciences de la communication et les sciences sociales. Le développement de nouvelles technologies, y compris l'application de l'intelligence artificielle, joue également un rôle. La publication [6] identifie trois domaines de recherche primordiaux :

- la recherche sur l'évaluation des risques liés aux rayonnements ;
- la recherche pour améliorer la dosimétrie des rayonnements ;
- la recherche pour soutenir l'application et la mise en œuvre du système.

Les propositions visant à améliorer le calcul du détrimement dû aux RI ont fait l'objet d'une grande attention, notamment des recherches plus poussées portant sur les modèles de risque de cancer et les facteurs de pondération des tissus, sur les effets du débit de dose sur le développement du cancer et sur l'influence de facteurs de pondération indépendants des rayonnements ionisants sur le calcul détrimement. En outre, les effets possibles sur le calcul du détrimement de la prise en compte des maladies de l'appareil circulatoire, des expositions aux rayonnements *in utero*, des effets héréditaires des rayonnements et des incertitudes ont été mentionnés.

Dans le domaine de la dosimétrie, la recherche sur la pondération des différentes qualités de rayonnement, l'utilisation des doses adaptées en médecine et les développements de la dosimétrie dans les situations d'urgence ont été jugés importants à court/moyen terme. À long terme, il a été demandé d'identifier les cellules cibles dont l'exposition aux RI est responsable du développement de certains types de cancer. Il a également été demandé de poursuivre le développement de modèles biocinétiques pour décrire la distribution des radionucléides incorporés dans le corps humain et de développer des méthodes dosimétriques pour la protection de l'environnement.

Enfin, [6] mentionne également la recherche sur l'application et la mise en œuvre des recommandations de la CIPR. En particulier, le développement rapide des tech-

nologies dans lesquelles les RI sont utilisés doit être pris en compte. Les effets des nouvelles technologies en médecine sont cités en exemple. La recherche impliquant l'intelligence artificielle, les sciences sociales, l'éthique, les sciences de la communication et l'implication des parties prenantes est également considérée comme importante.

Les idées de la communauté internationale

Afin de donner l'occasion de commenter cette publication et de faire des suggestions, la CIPR a organisé en octobre 2022 un atelier intitulé « Analyse et révision du système de radioprotection : les priorités de recherche », au cours duquel des sujets de recherche pertinents pour la radioprotection ont été discutés [7].

Un large consensus s'est dégagé parmi les participants sur le fait que le système est robuste et applicable dans la pratique. Toutefois, il a également été reconnu que les développements scientifiques, technologiques et sociétaux qui ont eu lieu depuis la publication des dernières recommandations générales de la CIPR [1] pourraient avoir un impact sur la radioprotection. Par conséquent, l'initiative de la CIPR de réviser le Système a été très bien accueillie. Tous les participants ont partagé le point de vue de la CIPR selon lequel la poursuite des recherches dans différents domaines pourrait conduire à des améliorations à court, moyen et long terme.

Par exemple, un besoin évident de recherche a été identifié en raison du développement dynamique des nouvelles technologies dans le domaine médical. Un consensus s'est également dégagé sur le fait que des efforts scientifiques supplémentaires sont nécessaires pour quantifier les risques liés aux RI à faibles doses et débits de dose, en tenant compte non seulement du cancer mais aussi des maladies non cancéreuses telles que les maladies cardiovasculaires et les cataractes.

En outre, une approche « holistique » de la radioprotection a été discutée, qui inclut également les risques sanitaires non liés aux RI. Enfin, il a été souligné que la recherche devrait également inclure les sciences sociales et humaines afin de mieux communiquer sur les risques liés aux RI, par exemple, et de développer davantage les fondements éthiques du Système.

Par ailleurs, d'autres idées ont été exprimées lors de l'atelier, qui vont au-delà des besoins de recherche énumérés dans [6]. Par exemple, il a été suggéré d'examiner la pertinence des connaissances acquises dans le monde entier pendant la pandémie de Covid-19 pour la radioprotection en termes d'impacts sociétal, économique et environnemental. De plus, la question a été posée de savoir si les stratégies de protection actuellement mises en œuvre dans le cadre des interventions d'urgence devraient également prendre en compte les scénarios militaires à venir, tels que ceux observés lors du conflit militaire en Ukraine, et si les détonations nucléaires devraient également être prises en compte lors de l'élaboration d'autres scénarios d'urgence. Enfin, il a été proposé d'étudier si et, le cas échéant, comment la recherche sur les RI et la radio-

protection peuvent contribuer aux Objectifs de développement durable (ODD) adoptés par les Nations unies en 2015 [7].

L'Appel à l'action de Vancouver de la CIPR

La recherche durable sur les RI dans le but de développer le système à long terme nécessite un soutien continu à différents niveaux. Dans son « Appel à l'action de Vancouver », la CIPR a donc appelé au renforcement de l'expertise dans le domaine de la radioprotection à l'échelle mondiale en renforçant :

- les ressources fournies par les gouvernements et les organisations internationales pour la recherche en radioprotection ;
- les laboratoires de recherche et autres institutions qui maintiennent ou lancent des programmes de recherche à long terme ;
- les universités qui mettent en place des programmes de licence et de master pertinents ;
- l'utilisation d'un langage simple lors de la communication avec le public et les décideurs sur le thème de la radioprotection ;
- la sensibilisation à l'utilisation raisonnable des RI et à la promotion de la radioprotection parmi les relais d'informations par le biais de l'éducation et de la formation [8].

L'appel de Vancouver de la CIPR a déjà reçu un large soutien dans le monde entier. Avant même sa publication, une étude à long terme avait été menée aux États-Unis pour analyser la situation dans différents domaines professionnels où les RI jouent un rôle [9]. Sur la base de l'expérience acquise, les responsables de cette étude ont expressément salué l'appel publié par la CIPR dans l'Appel de Vancouver [10]. Récemment, les représentants de 19 organisations internationales ont également exprimé, dans une action commune sans précédent, leur inquiétude quant au fait qu'un soutien insuffisant à la radioprotection mettrait en péril la capacité de la société à faire face aux risques induits par les RI. Ils ont clairement indiqué que le renforcement des compétences en matière de radioprotection demandé dans l'Appel de Vancouver de la CIPR est une priorité commune à toutes les organisations participantes [11].

Quelle est la prochaine étape ?

Actuellement, une trentaine de groupes de travail (GT) de la CIPR travaillent sous l'égide des quatre comités permanents de la CIPR (le Comité 1 sur les effets des rayonnements, le Comité 2 sur la dosimétrie, le Comité 3 sur les applications médicales des rayonnements ionisants et le Comité 4 sur l'application des recommandations élaborées par la CIPR) sur des sujets pertinents pour l'examen et la révision du système – des sujets identifiés par la CIPR en collaboration avec la communauté internationale comme décrit ci-dessus. Les GT sont censés informer de l'état d'avancement

de leurs travaux en organisant des séminaires en ligne et/ou des ateliers, et sont encouragés à publier leurs résultats dans la littérature scientifique évaluée par les pairs. Les projets de rapports des GT sont publiés sur le site *web* de la CIPR (www.icrp.org) pour consultation publique, afin de permettre à la communauté internationale de formuler des commentaires et d'apporter des améliorations. Une fois finalisés, ces rapports informeront la Commission principale de la CIPR dans ses efforts d'examen et de révision du système avec pour objectif final d'élaborer un ensemble révisé de recommandations générales qui remplaceront à terme celles qui avaient été énoncées dans la publication 103 de la CIPR de 2007 [1].

Références

- [1] ICRP (2007), "The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection", ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37.
- [2] ICRP (1977), "Recommendations of the ICRP", ICRP Publication 26, Ann. ICRP 1.
- [3] ICRP (1991, 1990), "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21.
- [4] CLEMENT C. *et al.* (2021), "Keeping the ICRP recommendations fit for purpose", *Journal of Radiological Protection*, 41(4), pp. 1390-1409.
- [5] RÜHM W. *et al.* (2022), "Summary of the 2021 ICRP workshop on the future of radiological protection", *Journal of Radiological Protection*, 42, 023002.
- [6] LAURIER D. *et al.* (2021), "Areas of research to support the system of radiological protection", *Radiation and Environmental Biophysics*, 60(4), pp. 519-530.
- [7] RÜHM W. *et al.* (2023), ICRP Workshop on the Review and Revision of the System of Radiological Protection: A Focus on Research Priorities – Feedback from the International Community, *Journal of Radiological Protection*, 43, 043001.
- [8] RÜHM W. *et al.* (2023), "Vancouver Call for Action to Strengthen Expertise in Radiological Protection Worldwide", *Radiation and Environmental Biophysics*, 62, pp. 175-180.
- [9] NEWHAUSER W.D. *et al.* (2022), "The professional radiation workforce in the United States", *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 23(Suppl 1):e13848.
- [10] NEWHAUSER W.D. *et al.* (2023), "In support of ICRP's call to action to strengthen expertise in radiological protection worldwide", *Radiation and Environmental Biophysics*, 62, pp. 287-288/
- [11] MAZZONI L. *et al.* (2024), "Support for the 'Vancouver call for action to strengthen expertise in radiological protection worldwide': the position of organisations in formal relations with the International Commission on Radiological Protection (ICRP)", *Physica Medica*, 124, 103392.

L'Association pour le Contrôle de la Radioactivité dans l'Ouest (ACRO), une vigie citoyenne de la pollution radioactive de l'environnement

Par Pierre BARBEY
Vice-président de l'ACRO

David BOILLEY
Président de l'ACRO

Et Mylène JOSSET
Coordinatrice et chargée d'études de l'ACRO

Dans un contexte de défiance d'une partie des citoyens à l'égard des exploitants nucléaires mais aussi vis-à-vis des institutions, le besoin d'une information indépendante et d'une expertise contradictoire est devenu saillant au lendemain de la catastrophe de Tchernobyl. C'est ainsi qu'a été créée l'Association pour le Contrôle de la Radioactivité dans l'Ouest, région fortement nucléarisée. S'appuyant sur le potentiel de son laboratoire, l'ACRO s'est donnée pour mission principale de produire et délivrer de l'information avec pour objectif de « rendre le citoyen auteur et acteur de la surveillance de son environnement comme de son information, mais également acteur dans le cadre des processus de concertation ».

Introduction

Le 26 avril 1986 survient la catastrophe de Tchernobyl. Choqués par le traitement de l'information en France, des citoyens se mobilisent ici et là. Dans la région Nord-Ouest, fortement nucléarisée, les réunions d'information se multiplient et font salles comblées. Chaque fois, la même question revient : comment disposer d'informations fiables et indépendantes ? Une association est créée pour répondre à cette attente, l'Association pour le Contrôle de la Radioactivité dans l'Ouest (ACRO).

La montée en compétence de l'ACRO

Le premier laboratoire a bénéficié d'un financement citoyen pour l'achat d'une chaîne de spectrométrie gamma HPGe. Les premiers résultats de mesures dans l'environnement mettent en évidence les retombées du « nuage » de Tchernobyl. Puis, très vite, l'ACRO lancera une première alerte sur la contamination en ^{137}Cs de laits en poudre 1^{er} âge de plusieurs marques.

À l'époque, le fonctionnement du laboratoire repose entièrement sur le bénévolat d'acteurs disposant de compétences professionnelles reconnues dans ce domaine. Pour remplir sa mission d'information, l'association édite une revue trimestrielle, *l'ACRONIQUE du Nucléaire*, qui publie l'ensemble des résultats de mesure et s'attache également à une communication scientifique et technique vulgarisée sur la question nucléaire.

Puis la surveillance s'oriente vers les installations nucléaires du Nord-Cotentin et porte sur des matrices de l'environnement, mais aussi, et surtout, sur des produits de consommation confiés par des particuliers.

Vers la fin des années 1980, l'ACRO a publié des résultats de mesures portant sur la Sainte-Hélène, un cours d'eau dont la source est en bordure du Centre de Stockage de la Manche, géré par l'ANDRA. Au-delà du tritium dans l'eau, un cocktail de radionucléides est observé dans les sédiments, en particulier les ^{137}Cs et ^{134}Cs à des niveaux d'au moins un ordre de grandeur supérieur à ceux publiés par les exploitants et le SCPRI. Les résultats de l'ACRO sont contestés par un exploi-

tant nucléaire. La Commission Spéciale Permanente d'Information près de l'Établissement de La Hague (CSPI, CLI de l'époque) organise alors un essai inter-laboratoires sur le site même de la Sainte-Hélène (seul le SCPRI refusera de rendre les résultats). La presse locale titre « Le laboratoire ACRO avait raison ! ». Non seulement les trois laboratoires (ACRO, SPR-COGEA et le laboratoire départemental) obtinrent des résultats en parfaite cohérence mais ils ont validé les niveaux de contamination révélés par l'ACRO. Depuis cet épisode, la qualité des données publiées par l'association n'est plus mise en cause.

Le mesurage mais aussi la citoyenneté

Surveillance citoyenne

Le laboratoire de l'ACRO n'est pas un laboratoire comme les autres. Il est en effet piloté par une association avec pour objectif de « rendre le citoyen auteur et acteur de la surveillance de son environnement comme de son information, mais également acteur dans le cadre des processus de concertation ».

C'est ainsi que depuis plus de 20 ans, en appui au laboratoire, l'Observatoire Citoyen de la Radioactivité dans l'Environnement (OCRE) a été créé pour regrou-

per les citoyens bénévoles réalisant les prélèvements dans l'environnement (voir la Figure 1). Ces acteurs de terrain, connaisseurs de leur propre environnement, sont formés et s'appuient sur des protocoles techniques. À noter que cette idée originale est reprise aujourd'hui par d'autres acteurs institutionnels et associatifs.

Actuellement, l'observatoire permet de suivre les niveaux de radioactivité sur plus de 600 km du littoral normand, les principaux cours d'eau du bassin Seine-Normandie, ainsi que le long de la Loire et de la Vienne.

L'activité en iode-129, déterminée dans le cadre de l'observatoire citoyen dans les algues le long du littoral normand, est représentée sur la Figure 2 (page suivante). Ce radioélément est uniquement rejeté par les usines de retraitement à La Hague et peut être détecté jusqu'au Danemark. La technologie pour le filtrer est utilisée au Japon – l'ACRO réclame la mise en œuvre des meilleures technologies disponibles afin de réduire les rejets, conformément aux engagements pris dans le cadre de la convention OSPAR de protection de l'Atlantique Nord-Est.

Démarche participative

L'ACRO siège activement dans le collège associatif de presque toutes les Commissions Locales d'Information (CLI) de Normandie. L'on observe que sans la présence



Figure 1 : Prélèvements de l'ACRO dans la Manche (© ACRO).

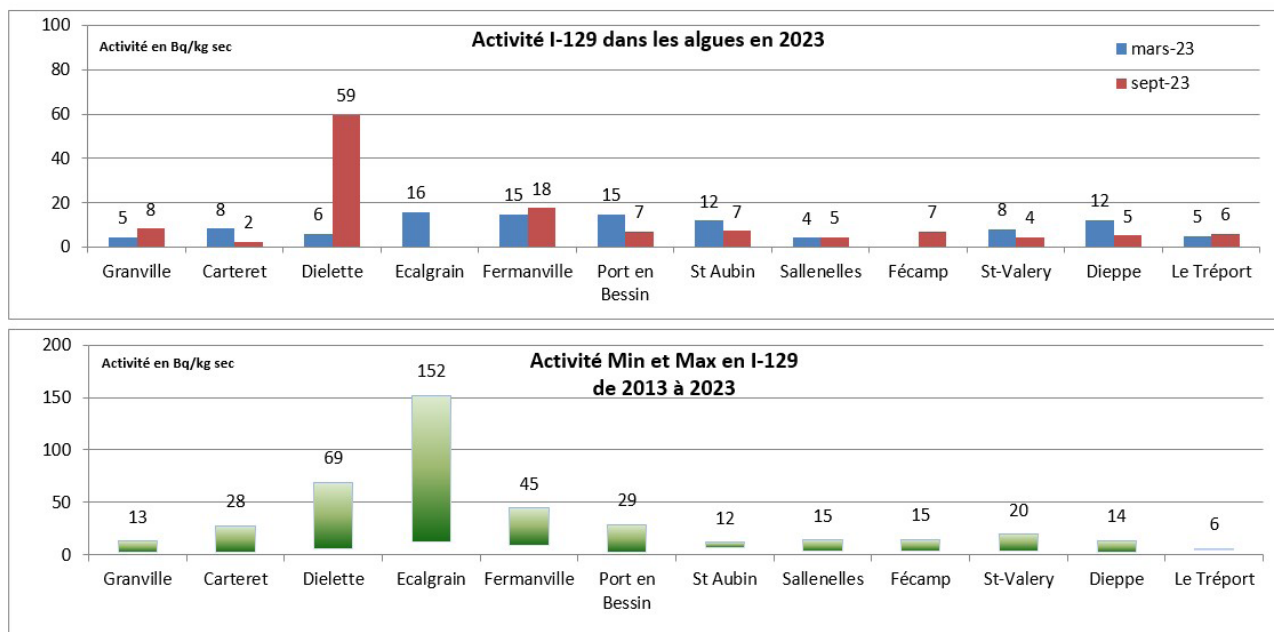


Figure 2 : Exemple de résultats de mesures ACRO le long des côtes de la Manche.
 En haut : concentration en iode-129 dans les algues prélevées lors des deux campagnes de 2023, en Bq/kg sec.
 En bas : Variations des niveaux d'iode-129 dans les algues mesurés par l'ACRO entre 2013 et 2023, en Bq/kg sec.

de ce collègue des associations, les débats y resteraient bien ternes.

Dans le milieu des années 1990, suite à l'émotion qui a accompagné la publication des travaux épidémiologiques du Pr Jean-François Viel, la ministre de l'Environnement a chargé l'IPSN d'animer un groupe d'expertise pluraliste – le Groupe Radioécologie du Nord-Cotentin (GRNC) – en vue d'évaluer l'impact dosimétrique des installations nucléaires du Nord-Cotentin. L'ACRO accepte d'y participer, s'impliquant dans les différents sous-groupes de travail, pour apporter sa connaissance du terrain (contestant notamment les zones d'impact retenues par les exploitants) et fournir ses propres résultats de mesure.

Les trois missions successives du GRNC [GRNC, 2010], présidé par Annie Sugier, se sont poursuivies jusqu'en 2010.

Puis c'est une autre controverse environnementale qui apparaît autour des anciennes mines d'uranium du Limousin. Fort de l'expérience tout à fait novatrice du GRNC, un nouveau groupe d'expertises pluraliste (GEP) est constitué, le GEP-Mines qui rendra son rapport en novembre 2013 (GEP, 2013). De nouveau l'ACRO y est présente et contribue à cette expertise.

Le nucléaire est un sujet bien conflictuel dans la société. La démarche participative ne va donc pas de soi car elle implique une confrontation avec les exploitants nucléaires dans un contexte de déséquilibre exacerbé de moyens dont chacun dispose. Le choix de participer ou pas se fait au cas par cas, avec le souci de ne pas jouer les faire-valoir. Le regard critique que porte l'association et son expérience de terrain peuvent faire évoluer des positions (notamment du côté institutionnel). La participation de l'ACRO à différentes instances

contribue aussi à sa montée en compétence, surtout en cas d'expertise pluraliste.

En tout état de cause, la participation de l'ACRO ne signifie en aucun cas cogestion de situations à risque et l'association ne peut être associée à un processus de décision qui doit rester le rôle des instances régaliennes.

L'ACRO est aujourd'hui présente dans diverses instances : Le Haut Comité pour la Transparence et la Sécurité et l'Information Nucléaire (HCTISN), le Plan National pour la Gestion des Déchets et Matières Radioactives (PNGMDR) ou encore le Comité Directeur sur le Post Accidentel (CODIRPA).

Quelques illustrations des actions de l'ACRO

L'ACRO est souvent la seule organisation à effectuer une surveillance de la radioactivité sur les sites qu'elle a retenus. La plupart du temps, les résultats sont conformes aux attentes. Mais, à maintes reprises le rôle de vigie citoyenne et d'alerte de l'ACRO s'est révélé fort pertinent, comme l'illustrent ces quelques exemples.

Les incidents de rejets de ^{106}Ru en 2001

En mai 2001, en s'appuyant sur ses propres données de surveillance autour de l'usine de retraitement de La Hague, l'ACRO remet en cause les annonces de l'exploitant sur un incident de rejets atmosphériques de ^{106}Ru en provenance de l'usine. Utilisant le modèle de dispersion aérien du GRNC, l'association évalue que le rejet radioactif a dû être environ 1 000 fois supérieur à ce qu'indique l'exploitant. Un incident analogue surviendra fin octobre 2001, avec, encore une fois, une sous-estimation du rejet par l'exploitant. Un nouveau

groupe technique du GRNC, mandaté par l'ASN, met alors en évidence que le dispositif de surveillance des rejets aériens, situé à mi-hauteur de la cheminée de rejet, est inadapté pour le ^{106}Ru et confirme ainsi les données de l'ACRO.

La pollution au ^{226}Ra à Saint Nicolas d'Aliermont

Fin novembre 1993, à la demande de citoyens inquiets d'un projet de lotissement sur un terrain ayant appartenu à la société BAYARD (fabricant de réveils à aiguilles lumineuses peintes au radium), l'ACRO intervient sur le site de Saint Nicolas Aliermont afin de procéder à des prélèvements. Les résultats de mesurages indiquent des contaminations élevées en ^{226}Ra dans la terre végétale (jusqu'à plusieurs centaines de milliers de Bq/kg) ainsi que ses descendants proches (^{214}Pb et ^{214}Bi). Cette alerte lancée par l'ACRO a conduit le préfet à décider la fermeture du site (installation d'une clôture), à suspendre le projet de lotissement et à diligenter sa décontamination que l'ANDRA engagera l'année suivante.

Par la suite, l'ACRO a procédé à des prélèvements de végétaux qui ont souligné un important transfert terre → plante du ^{226}Ra et qui ont permis à l'association d'esquisser une évaluation d'impact sanitaire et ainsi de contester les seuils de décontamination présentés par le ministère de la Santé.

Le Tritium dans la Loire

Depuis 2017, le collectif Loire Vienne Zéro nucléaire, s'est associé à l'ACRO afin de mettre en place une surveillance radiologique de l'environnement des installations nucléaires du bassin de la Loire (Loire et Vienne). Le 21 janvier 2019, une valeur tout à fait anormale de Tritium à 310 Bq/L est observée à Saumur. Des analyses complémentaires effectuées sur place montrent qu'il n'y a toujours pas de « bon mélange » dans la Loire des rejets radioactifs de la centrale de Chinon, située à une vingtaine de kilomètres en amont.

À la suite des échanges entre les différents acteurs (ASN, IRSN, ACRO, Associations, CLI...), l'IRSN conduit une campagne spécifique de mesurages pendant 5 mois au niveau de Saumur. Un des enseignements majeurs de cette étude et des modélisations réalisées est de montrer que la station multi-paramètres d'EDF, censée assurer la surveillance des rejets de la centrale de Chinon, ne détecte pas ou très rarement les rejets du Centre nucléaire de Production d'Électricité de Chinon, seulement dans certaines conditions de débit du fleuve.

Les actions internationales de l'ACRO

L'existence d'associations indépendantes dotées d'un laboratoire et d'une capacité d'expertise dans le champ nucléaire est assez exceptionnelle sur la scène internationale et explique les sollicitations auxquelles l'ACRO a pu répondre.

L'intervention de l'ACRO en Biélorussie (l'après Tchernobyl)

Au début des années 2000, l'ACRO est intervenue dans plusieurs villages du sud de la Biélorussie pour fournir des équipements de mesurage de la radioactivité dans les denrées alimentaires et former les habitants en vue de développer des pratiques quotidiennes permettant de réduire le risque de contamination interne.

Centrée sur les écoles, la formation des enseignants à l'utilisation des instruments de mesure a permis d'élaborer avec eux des projets pédagogiques à destination des élèves, contribuant par leur approche pratique liée à la mesure, à donner du sens à un apprentissage dans le domaine de la radioactivité et de la contamination potentiellement présente dans leur environnement immédiat, qu'il s'agisse des lieux ou des produits de consommation courante.

L'ACRO en appui aux citoyens japonais après l'accident de Fukushima

Dès les premières semaines suivant l'accident de Fukushima, l'ACRO a procédé à de nombreux mesurages de radioactivité à la demande d'associations japonaises, soulignant l'étendue de la catastrophe jusqu'à Iitate ou la ville de Fukushima. En outre, l'association a été fortement sollicitée pour venir en appui à des groupes de citoyens mobilisés pour développer des moyens autonomes de mesurage de la radioactivité. La défiance vis-à-vis de l'exploitant et du gouvernement est très forte et de nombreux petits laboratoires de mesure vont voir le jour. L'ACRO accueille et forme dans son laboratoire des citoyens japonais dont la mission va être de créer un laboratoire analogue au Japon (Chikurin) qui constitue une référence métrologique auprès des petits laboratoires autonomes. Grâce à un soutien financier de la région Île-de-France, l'association fournit deux détecteurs GeHP et un château de plomb à Chikurin.

Mais, en parallèle, dans l'immédiat post-catastrophe, l'ACRO répond aux nombreuses demandes de résidents au Japon, dont des Français expatriés, inquiets des conséquences sanitaires pour leurs enfants. Le laboratoire de l'association s'est alors consacré presque entièrement à des mesurages de radiotoxicologie qui souligneront la présence de ^{137}Cs dans tous les premiers échantillons urinaires.

L'ACRO aujourd'hui

Depuis son origine, l'association a déménagé à quatre reprises, accroissant à chaque fois les surfaces de son laboratoire et adaptant les locaux et les équipements de façon à mieux répondre aux exigences normatives et de qualité. Les pratiques internes sont conformes aux exigences organisationnelles et techniques fixées par la norme ISO/CEI 17025. L'activité quotidienne du laboratoire est assurée par 4 salariées à temps plein et les bénévoles du réseau OCRE constituent un vivier de ressources humaines.

Le laboratoire participe aux campagnes annuelles d'intercomparaisons (IRSN et AIEA) et dispose de multi-

Tableau 1 : Agréments délivrés à l'ACRO par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (Source : ACRO).

Matrices	Catégorie des Agréments	Codes	Références agréments ASN	Limite de validité
Eaux	Tritium eau douce	1-05	CODEP-DEU-2021-056602	31 déc. 2026
	Tritium eau de mer		CODEP-DEU-2019-024660	30 juin 2024
	Radionucléides γ	1-01 1-02	CODEP-DEU-2020-058804	31 déc. 2025
	Radon (Rn-222)	1-15	CODEP-DEU-2020-058804	31 déc. 2025
Sols	Isotopes U	2-09	CODEP-DEU-2020-029669	30 juin 2025
	Isotopes Th	2-10	CODEP-DEU-2020-029669	30 juin 2025
	Ra226 + desc.	2-11	CODEP-DEU-2020-029669	30 juin 2025
	Ra228 + desc.	2-12	CODEP-DEU-2020-029669	30 juin 2025
	Uranium pondéral	2-12	CODEP-DEU-2020-029669	30 juin 2025
	Radionucléides γ	2-01 et 2-02	CODEP-DEU-2021-026595	30 juin 2026
Biologique	Radionucléides γ	3-01 et 3-02	CODEP-DEU-064408	31 déc. 2028
Air	Tritium	5-05	CODEP-DEU-2021-056602	31 déc. 2026
	Radon ERP	Niveau 1	CODEP-DIS-N°2021-031618	31 août 2026

ples agréments délivrés par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) qui procède à des inspections régulières.

Le laboratoire de l'ACRO est également agréé pour procéder aux analyses et aux essais, pour la répression des fraudes dans les denrées alimentaires et divers objets.

L'ACRO publie tous ses résultats environnementaux sur son site internet ainsi qu'au Réseau National de Mesure de la Radioactivité dans l'Environnement (RNME) (ASN, 2024). Enfin, si la mission principale de l'association est de produire et délivrer de l'information vulgarisée auprès d'un large public, le laboratoire a pu être associé à divers travaux et publications scientifiques (Daillant *et al.*, 2003 ; Daillant *et al.*, 2004 ; Paquet *et al.*, 2013 ; Picat *et al.*, 2002 ; Pittet *et al.*, 2021).

Conclusion

Créée en réaction à une crise de confiance, l'ACRO répond à un besoin de contrôles indépendants de la radioactivité dans l'environnement en permettant aux personnes concernées de devenir des vigies. Cette position singulière exige une qualité sans faille pour garder la confiance du public et des autorités. En s'impliquant, les citoyens ont transformé un sujet purement technique en un sujet politique. Ils ont ainsi contribué à plus de transparence et à une meilleure surveillance de l'impact des rejets radioactifs.

La mesure citoyenne de la radioactivité a encore de longs jours devant elle et devrait être étendue à d'autres types de polluants. La publication du rapport Houllier (Houllier, 2016) sur les sciences et recherches participatives en France a montré l'intérêt et la richesse de cette démarche.

Références

ASN (2024), « Les acteurs du Réseau National de Mesure de la Radioactivité dans l'Environnement (RNME) », <https://mesure-radioactivite.fr/les-acteurs-du-rnm>

DAILLANT O., BOILLEY D., GERZABEK M., PORSTENDÖRFER J. & TESCH R. (2003), "Tritium and radiocarbon metabolism in lichens and their use as bio-monitors", BIOMAP Congress, Bled, Slovenia, 21-25 septembre 2003.

DAILLANT O., KIRCHNER G., PIGREE G. & PORSTENDÖRFER J. (2004), "Lichens as indicators of tritium and radiocarbon contamination", *The Science of the Total Environment*, 323(1), pp. 253-262.

GEP (2013), « Groupe d'Expertise Pluraliste (GEP) sur les sites miniers d'uranium du Limousin », <http://www.gep-nucleaire.org/gep/sections/actualites>

GRNC (2010), « Le Groupe Radioécologie Nord-Cotentin », <http://www.gep-nucleaire.org/norcot/gepnc/>

HOULLIER F. & MERILHOU-GOUDARD J.B. (2016), « Les sciences participatives en France », *Natures Sciences Sociétés*, 25(4), pp. 418-423, doi:10.15454/1.4606201248693647E12

PAQUET F., BARBEY P., BARDIES M., BIAU A., BLANCHARDON E., CHETIOUI A., LEBARON-JACOBS L. & PASQUIER J.L. (2013), "The assessment and management of risks associated with exposures to short-range Auger- and beta-emitting radionuclides. State of the art and proposals for lines of research", *Journal of Radiological Protection*, 33, pp. R1-R16.

PICAT P., CALMET D., LOUVAT D., VRAY F., LEMAITRE N., LINDEN G., BARBEY P., PIGREE G., BOURCER T., LEVY F., LE BAR S., BARON Y., DELACROIX D., PANAÏVA E., DE BRUYNE T., HERVÉ J.Y., BEGUINEL P., CABANNE N., DE PAEPE A., SANTUCCI C., PROT T., MATRAY J.L. & TILLIE J.L. (2002), « Radioactivité d'origine naturelle dans l'environnement en France : niveaux non perturbés par l'homme », *Radioprotection*, 37(3), pp. 283-327.

PITTET P.A., JOSSET M., BOILLEY D., BERNOLLIN A., ROUGIER G. & FROIDEVAUX P. (2021), "Origin and age of an ongoing radioactive contamination of soils near La Hague reprocessing plant based on $^{239+240}\text{Pu}/^{238}\text{Pu}$ and $^{241}\text{Am}/^{241}\text{Pu}$ current ratios and ^{90}Sr and Ln(III) soil contents", *Chemosphere*, 270, 129332, pp. 1-8.

Les enjeux de la surveillance de la radioactivité de l'environnement

Par Nathalie REYNAL

Adjointe au directeur de l'environnement et des situations d'urgence de l'ASN

Céline AUGERAY et Nicolas BAGLAN

Chargés d'affaires à la direction de l'environnement et des situations d'urgence de l'ASN

Le dispositif de surveillance de la radioactivité de l'environnement mis en œuvre aujourd'hui par les exploitants nucléaires autour de leurs installations et par l'IRSN sur l'ensemble du territoire français est adapté à la réalité des installations et répond aux exigences légales et réglementaires fixées par le code de la santé publique et le code de l'environnement. Il a pour objectifs principaux de contribuer à suivre l'évolution de l'état radiologique de l'environnement, détecter une augmentation anormale de la radioactivité environnementale, vérifier le respect des prescriptions applicables aux installations et contribuer à évaluer leur impact.

Les résultats de cette surveillance sont mis à la disposition du public notamment sur le site du réseau national de mesure de la radioactivité (RNM) mesure-radioactivite.fr et partagés avec les instances internationales compétentes.

Les principaux enjeux sont à présent de maintenir dans la durée un dispositif de surveillance approprié, permettant de faire face à d'éventuelles situations d'urgence, d'adapter en tant que de besoin ce dispositif pour faire face aux enjeux futurs associés notamment à la prolongation de la durée de fonctionnement d'installations existantes, à la création de nouvelles installations, à l'évolution de la nature des rejets des installations médicales et en tenant compte de l'évolution de l'environnement liée au changement climatique.

Origines de la radioactivité dans l'environnement et objectifs de la surveillance

La radioactivité présente dans l'environnement provient de différentes origines. On distingue, d'une part, les origines naturelles (radionucléides telluriques présents sur terre depuis sa formation, en particulier le radon, et le rayonnement cosmique qui produit de manière permanente des radionucléides cosmogéniques) et d'autre part, les origines anthropiques résultant d'activités historiques (par exemple : rémanence d'apports anciens de radionucléides artificiels issus des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires jusque dans les années 1980, retombées d'accidents tels que ceux de Tchernobyl ou Fukushima ou actuelles (industrie nucléaire, autres industries, rejets hospitaliers...)).

Cette présence de radioactivité dans l'environnement conduit à une exposition de la population à des rayonnements ionisants sur l'ensemble du territoire national, qu'il convient de mesurer et de quantifier

afin d'en évaluer l'impact sur l'homme et sur l'environnement. Dans le présent article, on s'intéressera essentiellement à l'impact des rejets des installations nucléaires sur les niveaux de radioactivité observés dans l'environnement.

La surveillance radiologique de l'environnement répond à différents objectifs :

- contribuer à la connaissance de l'état radiologique de l'environnement et de son évolution ;
- contribuer à l'évaluation de l'exposition radiologique dans un objectif de protection sanitaire des populations et de préservation de l'environnement ;
- détecter le plus précocement possible une élévation anormale de la radioactivité environnementale, assurer son suivi et contribuer à la détermination de son origine (naturelle ou anthropique) ;
- vérifier le respect des prescriptions applicables aux installations exerçant une activité nucléaire en identifiant en cas de dépassement de seuils prédéfinis, la nature et l'origine des radionucléides détectés ;

- contribuer à vérifier que l'impact radiologique des installations reste inférieur aux valeurs limites fixées par la réglementation ainsi qu'aux estimations présentées dans l'étude d'impact.

Dans un contexte où la maîtrise des rejets des installations nucléaires suscite de fréquentes interrogations de la part du public et où de nouveaux projets de création d'installations nucléaires (réacteurs de types EPR ou SMR) se développent, la connaissance du niveau de radioactivité de l'environnement constitue un sujet de préoccupation majeure pour la population riveraine des installations actuelles et futures et la mise à disposition du public des données de surveillance de l'environnement présente un enjeu particulier pour l'ASN, dans le cadre de sa mission d'information du public.

À cet égard, le réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement (RNM), instauré par le code de la santé publique¹ et développé à la fin des années 2000 sous l'égide de l'ASN et de l'IRSN, vise à répondre à ces préoccupations.

Surveillance de l'environnement autour des installations nucléaires

Comme toute activité industrielle, les installations nucléaires sont à l'origine de rejets d'effluents liquides et gazeux, susceptibles de contenir des substances radioactives ou chimiques. En application du code de l'environnement, ces rejets sont encadrés par des décisions prises par l'ASN.

La surveillance de l'environnement prescrite aux exploitants d'installations nucléaires par la réglementation² afin de surveiller l'impact des rejets sur l'environnement est adaptée à chaque type d'installation selon qu'il s'agit d'un réacteur électronucléaire, d'une usine, d'une installation de recherche, d'un centre de stockage de déchets, etc. et en fonction des spécificités locales. Elle porte sur les différents compartiments de l'environnement vers lesquels les radionucléides présents dans les rejets des installations sont susceptibles de migrer et couvre l'ensemble des paramètres radiologiques pertinents.

Il peut s'agir de mesures en continu (par exemple : mesures de dosimétrie gamma ambiante), de détermination de l'activité de radionucléides d'intérêt (par exemple : tritium, carbone 14, radionucléides émetteurs alpha, etc.) mesurée en différé sur des échantillons prélevés dans l'environnement, d'indicateurs de radioactivité globale mesurés en continu ou en différé

(par exemple : indices de radioactivité alpha, bêta ou gamma globale), etc.

La réglementation impose aux exploitants d'informer le public en publiant régulièrement leurs résultats de surveillance de l'environnement sur le site du RNM (cf. ci-après) et en établissant un rapport annuel, publié sur Internet et présenté à la Commission locale d'information du site, dressant notamment le bilan de leurs rejets dans le milieu et les niveaux de radioactivité présents dans l'environnement autour de leurs installations.

Les données de surveillance de l'environnement sont par ailleurs communiquées annuellement aux instances internationales compétentes : Commission européenne (base de données « REMdb³ ») et « Radioactive Substance Committee » de la Convention Oskar (base de données « ODIMS⁴ »).

Dans le cadre de ses missions de contrôle des installations nucléaires, l'ASN réalise régulièrement des inspections, dont certaines portent sur le respect des dispositions en matière de maîtrise des rejets et de l'impact sur l'environnement. Parmi celles-ci, l'ASN réalise chaque année entre 10 et 20 inspections inopinées, au cours desquelles elle mandate un laboratoire indépendant de l'exploitant pour effectuer des prélèvements d'échantillons dans les rejets et l'environnement afin de réaliser des analyses contradictoires à celles de l'exploitant. En fonction des résultats de ces mesures, ces inspections peuvent donner lieu à des demandes complémentaires adressées par l'ASN aux exploitants, voire à des sanctions en cas de mise en évidence d'écarts importants vis-à-vis des prescriptions applicables.

Surveillance réalisée sur l'ensemble du territoire

En complément de la surveillance exercée par les exploitants nucléaires au voisinage de leurs installations, la surveillance radiologique de l'environnement effectuée par l'IRSN permet de couvrir l'ensemble du territoire à proximité et hors d'influence des installations nucléaires françaises, y compris en outre-mer, de connaître précisément ces niveaux dans tous les compartiments de l'environnement : atmosphérique, terrestre et aquatique (eaux souterraines, continentales et marines), de déceler des augmentations anormales des niveaux de radioactivité, même très faibles, dans l'environnement et d'évaluer les expositions des populations et des écosystèmes qui en résultent. L'IRSN réalise ainsi chaque année plus de 58 000 mesures sur environ 7 000 prélèvements effectués dans l'environnement, tous compartiments confondus (hors réseaux de télémesures).

Outre les mesures régulières réalisées dans le cadre de son programme annuel de surveillance, l'IRSN a la capacité d'établir rapidement une stratégie d'inves-

¹ Articles R. 1333-25 et R. 1333-26 du code de la santé publique.

² Le contenu minimal de la surveillance de l'environnement prescrite aux exploitants d'installations nucléaires de base est défini par l'arrêté du 7 février 2012 modifié fixant les règles générales relatives aux INB et par la décision de l'ASN n°2013-DC-0360 du 16 juillet 2013 modifiée relative à la maîtrise des nuisances et de l'impact sur la santé et l'environnement des installations nucléaires de base, <https://www.asn.fr/Reglementer/Bulletin-officiel-de-l-ASN/Installations-nucleaires/Decisions-reglementaires/Decision-n-2013-DC-0360-de-l-ASN-du-16-juillet-2013>

³ <https://remap.jrc.ec.europa.eu/>

⁴ <https://odims.ospar.org/fr/>

tigation ou de surveillance spécifique et de déployer les moyens techniques et humains correspondants en cas de survenue d'un événement industriel pouvant conduire à suspecter un rejet radioactif non contrôlé, concrétisé par la détection de niveaux de radioactivité ambiante inhabituels ou pour répondre à des questions particulières des pouvoirs publics ou de la société concernant par exemple l'état radiologique d'un territoire, d'un milieu, qu'il soit lié à des processus naturels ou à des activités anthropiques actuelles ou passées.

Cette capacité revêt une importance particulière et est essentielle à maintenir dans le cadre du dispositif de préparation aux situations d'urgence, pour faire face à un éventuel accident majeur survenant en France ou à l'étranger.

Enfin, en complément de la surveillance de l'environnement réalisée par les exploitants nucléaires, par l'ASN et par l'IRSN mentionnée ci-dessus, il convient de noter que des laboratoires associatifs, publics ou privés réalisent également des mesures de radioactivité dans l'environnement, pour leur propre compte ou à la demande de services publics ou de commissions locales d'information, dans le cadre de suivis réguliers, d'études ponctuelles autour d'installations particulières ou sur des territoires spécifiques. Ces laboratoires sont susceptibles de participer au réseau national de mesure de la radioactivité de l'environnement (RNM), sous réserve de disposer de l'agrément de l'ASN pour ce faire.

Le RNM

Le réseau national de mesure de la radioactivité de l'environnement (RNM) fédère l'ensemble des acteurs réalisant ou faisant réaliser des mesures de surveillance de la radioactivité de l'environnement en France :

- les exploitants d'installations nucléaires civiles ou militaires qui réalisent une surveillance autour de leurs sites en application de leurs obligations réglementaires ;
- l'IRSN, dans le cadre de sa mission légale de surveillance de la radioactivité de l'ensemble du territoire⁵ ;
- l'ASN, en charge du contrôle du respect des prescriptions applicables aux installations nucléaires relatives notamment à la maîtrise de leurs rejets et à la surveillance de l'environnement ;
- les ministères chargés de la santé, de l'alimentation, de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes, les services de l'État et les autres acteurs publics réalisant des missions de surveillance du territoire national ou des denrées alimentaires consommées en France, qu'elles soient produites sur le territoire national ou importées ;

⁵ Notamment pour répondre aux exigences de l'article 35 du traité Euratom : « Chaque État membre établit les installations nécessaires pour effectuer le contrôle permanent du taux de la radioactivité de l'atmosphère, des eaux et du sol ainsi que le contrôle du respect des normes de base ».

- les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air, les associations de protection de l'environnement et les commissions locales d'information (CLI).

Le RNM a pour principal objectif de réunir et de répondre au besoin d'information exprimé par le public en mettant à sa disposition, sur un site Internet spécifique (mesure-radioactivite.fr), l'ensemble des mesures environnementales réalisées par ces acteurs. La qualité de ces mesures est assurée par une procédure d'agrément des laboratoires délivré par l'ASN, après s'être assuré de la compétence métrologique du laboratoire. Les modalités de fonctionnement du RNM et les conditions d'agrément des laboratoires sont définies par une décision⁶ de l'ASN. La liste des laboratoires agréés est disponible sur le site asn.fr.

Depuis sa création en 2009, le site du RNM comporte près de 5 millions de résultats de mesure. Chaque année, outre la transmission réglementaire des résultats de la surveillance à l'ASN, les exploitants transmettent près de 120 000 mesures au RNM.

À partir des résultats de la surveillance de la radioactivité sur l'ensemble du territoire publiés dans le RNM, l'IRSN publie tous les trois ans un bilan de l'état radiologique de l'environnement français. La quatrième édition de ce bilan, relative à la période 2018-2020, a été publiée en décembre 2021 sur le site irsn.fr.

Conclusion

Le dispositif de surveillance de la radioactivité de l'environnement mis en œuvre aujourd'hui par les exploitants nucléaires autour de leurs installations et par l'IRSN sur l'ensemble du territoire français est adapté à la réalité des installations actuellement en exploitation et répond aux exigences légales et réglementaires fixées par le code de la santé publique et le code de l'environnement.

Afin de répondre à une demande d'information croissante de la part de l'ensemble des parties prenantes concernant l'impact des rejets des installations et l'état radiologique du milieu ambiant, les résultats de cette surveillance sont mis à la disposition du public par différents canaux.

Les enjeux à moyen et long terme sont à présent de maintenir dans la durée un dispositif de surveillance approprié, permettant de faire face à d'éventuelles situations d'urgence (nécessitant le déploiement rapide et massif de moyens de surveillance, le développement de nouvelles méthodes de mesure adaptées à la gestion de situation d'urgence et plus rapides...), et d'adapter en tant que de besoin ce dispositif pour faire face aux enjeux futurs associés notamment à la prolongation de la durée de fonctionnement d'installations existantes (évolution de la métrologie), à la création

⁶ Décision n°2008-DC-0099 de l'Autorité de Sûreté Nucléaire du 29 avril 2008 modifiée relative à l'organisation du réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement et fixant les modalités d'agrément des laboratoires.

de nouvelles installations (par exemple : EPR, SMR), à l'évolution de la nature des rejets des installations médicales (par exemple : rejet de nouveaux radionucléides tels que le lutétium 177) et en tenant compte de l'évolution de l'environnement liée au changement climatique. Tel sera un des défis que devra relever dans les prochaines années l'Autorité de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection, créée par la loi du 21 mai 2024 pour rassembler en son sein l'ASN et l'IRSN, à compter du 1^{er} janvier 2025.

Références

ASN (2024), « Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2023 ».

IRSN (2021), « Bilan de l'état radiologique de l'environnement français de 2018 à 2020 ».

Le cycle du combustible nucléaire et la radioprotection

Par Patrick DEVIN
ORANO Recyclage

La France a fait le choix d'un cycle du combustible nucléaire avec traitement et recyclage des combustibles usés dont l'un des acteurs principaux est Orano. La radioprotection tout au long de ce cycle est un enjeu important du fait des émissions radioactives alpha, bêta, gamma et neutroniques des nombreuses matières radioactives manipulées (uranium, produits de fission, produits d'activation, descendants) et de la complexité des processus chimiques utilisés impliquant des tonnages très importants et qui ne sont pas sans risques. La radioprotection est bien maîtrisée car les dosimétries des travailleurs et du public sont faibles à très faibles.

Le cycle du combustible est l'ensemble des activités industrielles qui permettent de produire l'électricité d'origine nucléaire. On distingue les activités en amont du réacteur nucléaire puis en aval. Les activités d'Orano sont centrées sur le cycle du combustible dont la matière première est l'uranium. L'objet de cet article est de présenter le cycle de l'uranium, au cœur du cycle du combustible, depuis la mine jusqu'à son traitement et son recyclage, en passant par la conversion, l'enrichissement et sa fabrication en combustible en France comme illustré sur la Figure 1. Ce parcours initiatique va s'intéresser notamment à la gestion du risque radiologique associé, sans oublier que celui-ci cohabite avec d'autres risques dont le risque classique de sécurité au travail et le risque chimique.

À chaque étape du cycle de l'uranium est associée une ou plusieurs transformations de l'uranium, afin de permettre *in fine* son utilisation optimale dans les réacteurs nucléaires dans l'objectif de produire de l'électricité. Ces différentes transformations conduisent à

modifier les formes physico-chimiques afin de conférer une composition isotopique adaptée pour l'uranium qui sera mis en œuvre dans les réacteurs nucléaires. Ces différentes formes d'uranium vont donc nécessiter des mesures adaptées de gestion des risques chimiques et/ou radiologiques, pour les travailleurs, le public et l'environnement. D'autres substances radioactives sont également présentes dans le cycle du combustible à la suite de l'utilisation de l'uranium dans les réacteurs produisant des produits de fission et des produits d'activation que l'on va retrouver essentiellement dans l'aval du cycle et dans une moindre mesure dans l'amont avec la filière de recyclage de l'uranium de retraitement.

Au-delà des obligations réglementaires dans le domaine de la radioprotection, l'industrie nucléaire en France a adopté le principe de ne pas avoir d'exposition interne en fonctionnement normal et de mettre en place toutes les dispositions de la conception au démantèlement pour que ce principe soit respecté.

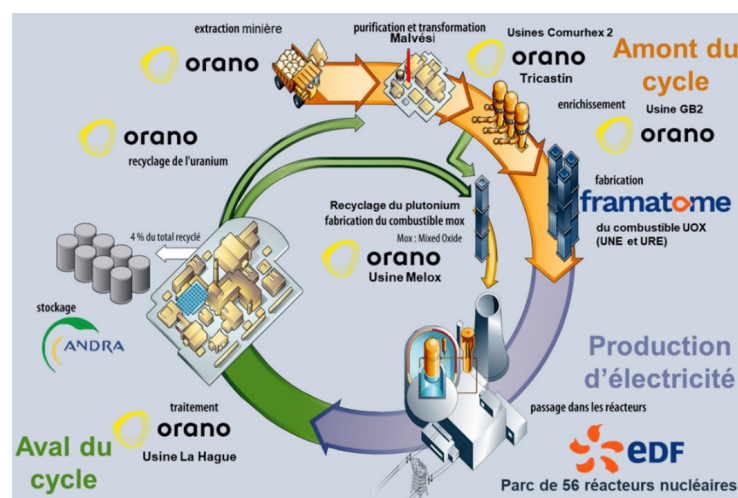


Figure 1 : Le cycle du combustible nucléaire (Source : Orano).

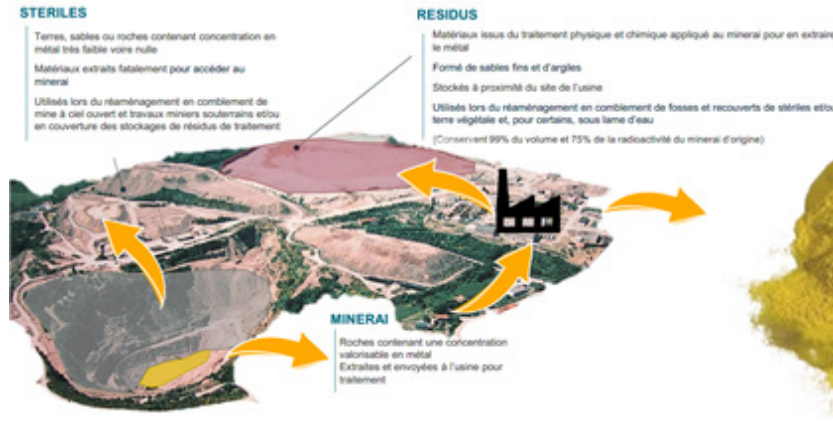


Figure 2 : Les sous-produits de l'activité minière : stériles et résidus (Source : Orano).

L'amont du cycle du combustible nucléaire

Même si l'histoire de l'uranium commence dans les étoiles, la croûte terrestre renferme l'essentiel du stock d'uranium de la Terre avec une teneur moyenne de l'ordre de 3 g/t (Métivier, 2001). L'uranium exploitable s'y trouve alors sous forme de minerai incluant les trois principaux isotopes naturels de l'uranium (^{238}U , ^{234}U , ^{235}U), avec leurs descendants à l'équilibre. C'est à ce niveau que commence la première étape du cycle de l'uranium avec le projet d'exploitation d'un site minier, qui débute par la prospection et le projet minier (15 ans), se poursuit par l'exploitation (10 à 50 ans) et se termine par le réaménagement du site et sa reconversion (10 ans et plus) et le cas échéant la gestion des résidus miniers¹ (voir la Figure 2).

Pour extraire cet uranium, il est nécessaire d'accéder au gisement, soit en décapant la partie de la roche stérile qui le recouvre (mine à ciel ouvert), soit en creusant des galeries dans cette roche stérile si le minerai se situe plus en profondeur (mine souterraine), soit par injection

dans les sols d'une solution lixivante (In-Situ Recovery ou ISR). Après broyage du minerai, l'uranium est extrait par attaque acide (acide sulfurique). La solution uranifère est ensuite purifiée et concentrée puis précipitée sous forme d'uranate qui constitue le concentré marchand : le "yellow-cake". L'uranium, généralement sous forme U_3O_8 , a alors pratiquement perdu tous ses descendants à l'équilibre séculaire, pour ne conserver que les premiers descendants dont les périodes courtes les mettent très vite à l'équilibre avec leur père : Thorium (231 et 234) et Protactinium.

Au niveau de la mine, le minerai d'uranium inclut l'uranium naturel (U238 à 99,28 %, U234 0,0056 %, U235 0,718 %) et ses descendants à l'équilibre. Les têtes de chaîne ou de filiation de l'uranium, l'uranium 235 et l'uranium 238 ont des périodes radioactives du même ordre de grandeur que l'âge de la Terre. Les périodes des pères sont plus longues que celles de leurs fils. Pour une chaîne donnée, tous les produits de filiations sont donc, globalement sur Terre, en équilibre radioactif entre eux comme l'illustre le premier diagramme de la Figure 3.

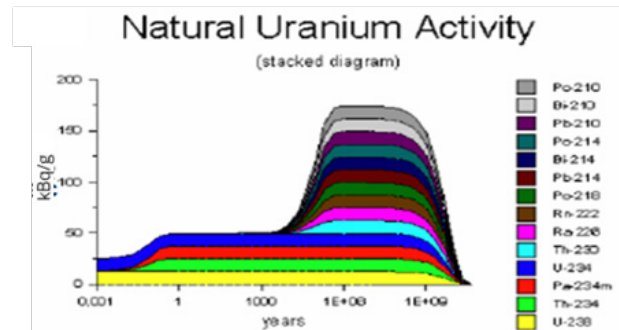
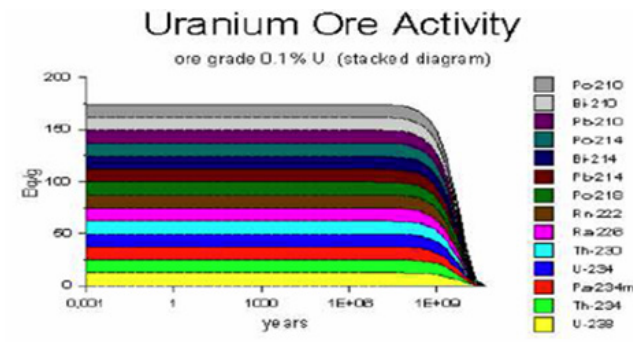


Figure 3 : Équilibre séculaire de l'uranium naturel avec ses descendants dans le minerai (ore) et après extraction en fonction du temps ("yellow cake") (Source : Orano).

¹ Les stériles et résidus miniers sont des sous-produits distincts de l'exploitation des mines : les stériles correspondent aux matières enlevées pour accéder au minerai alors que les résidus correspondent à ce qui reste après extraction de l'uranium du minerai. Les stériles sont grossiers et contiennent de l'uranium en faible quantité et les résidus se présentent sous la forme d'un sable très fin, de la granulométrie de l'argile. Les résidus ont été utilisés pour combler les mines à ciel ouvert, à la fin de leur exploitation, puis recouverts avec des stériles pour former une enveloppe au-dessus, eux-mêmes recouverts d'une terre végétale.

Ainsi, au niveau de la mine, les risques sont principalement dus à l'exposition externe due aux rayonnements bêta et gamma et à l'exposition interne due aux descendants solides à vie courte du radon et aux poussières. Le risque d'exposition interne dû au radon est géré notamment par des systèmes de ventilation dans

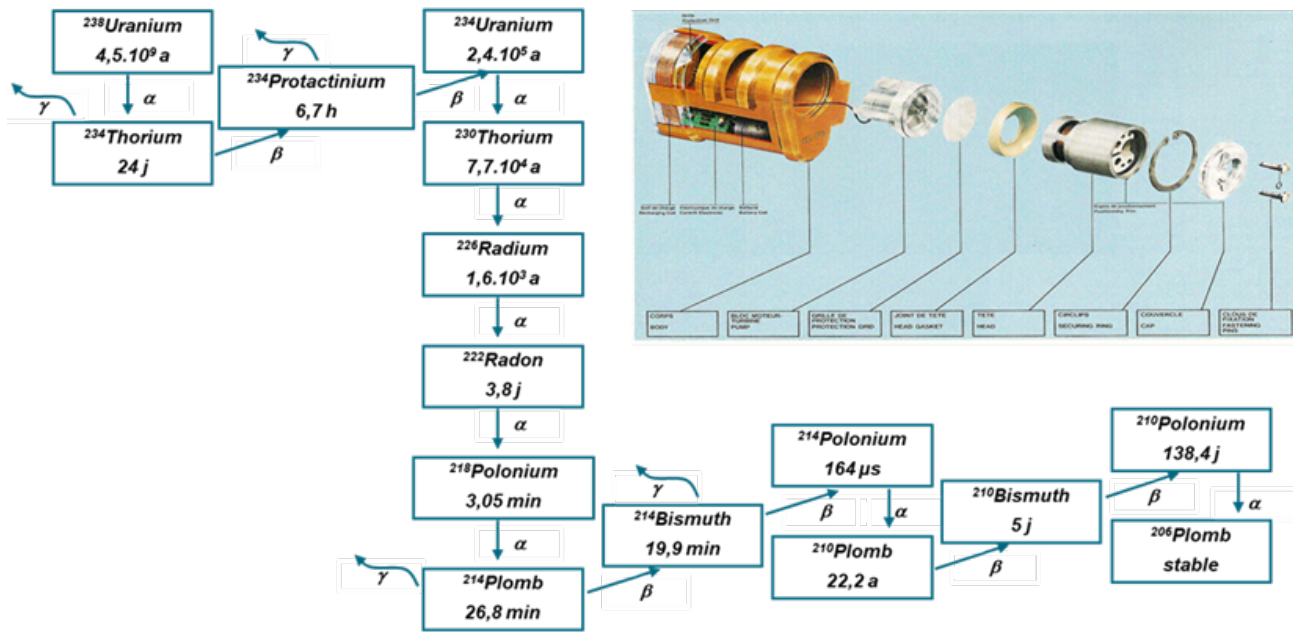


Figure 4 : Chaîne de décroissance de l'uranium 238 et risques associés (Source : Orano).

les lieux où le radon est susceptible de s'accumuler. Ce risque peut toutefois générer des expositions internes notamment dans les mines souterraines, mais ceci reste sériel et maîtrisé. Une surveillance individuelle spécifique est alors mise en place pour certains travailleurs susceptibles d'être exposés à partir d'un dosimètre, porté à la ceinture, muni d'une pompe et d'un filtre permettant de mesurer l'énergie alpha potentielle due aux descendants à vie courte du radon. La Figure 4 présente ce dosimètre réalisant ainsi trois mesures (radon, gamma et poussières) et les natures de risques pour la chaîne de décroissance de l'uranium 238.

En revanche, après extraction, l'uranium sous forme d'uranate a perdu la plupart de ses descendants, son activité spécifique passant de plus de 150 kBq/g à 50 kBq/g (voir le deuxième diagramme de la Figure 3).

L'uranate est ensuite acheminé à l'usine Orano Malvési proche de Narbonne où il est entreposé avant d'être purifié pour obtenir une pureté dite « nucléaire », et subir une transformation en tétrafluorure d'uranium (UF_4) qui nécessite plusieurs étapes. Cette transformation a lieu dans les nouvelles installations COMURHEX II à partir d'un procédé Isoflash de dénitrification thermique (permettant une réduction significative de l'empreinte environnementale en consommant moins de réactifs). À cette étape, les risques chimiques de l'uranium (chimiotoxicité en tant que métal lourd) sont prépondérants sur les risques radiologiques, car il a pratiquement perdu tous ses descendants radioactifs. Compte tenu de la quantité d'uranate présente en entreposage sur le site, l'irradiation externe en bordure de site nécessite des dispositions particulières de surveillance et de gestion.

L' UF_4 est ensuite acheminé sur le site du Tricastin par citerne pour subir une dernière étape de conversion (fluoration) en hexafluorure d'uranium (UF_6), dans la nouvelle usine Philippe Coste qui a démarré en 2018. Cette forme UF_6 est en effet requise car c'est la seule qui présente une phase gazeuse compatible avec les

procédés des usines d'enrichissement actuelles. Les risques chimiques de l'uranium sont toujours prépondérants sur les risques radiologiques, mais il se rajoute un risque spécifique lié au fait que l' UF_6 s'hydrolyse au contact de l'humidité de l'air en générant du fluorure d'hydrogène (HF), ce qui nécessite la mise en œuvre de dispositions particulières de maîtrise du risque chimique associé. Ce risque existe aussi sur l'usine de Malvési. L' UF_6 est alors conditionné dans des cylindres agréés de transports spécifiques.

Ces cylindres sont ensuite acheminés (par transport interne) vers l'usine d'enrichissement Georges Besse II, inaugurée en 2010 et qui a remplacé l'usine EURODIF Production arrêtée en 2012 (permettant de réduire d'un facteur 50 environ l'électricité nécessaire pour réaliser cette opération d'enrichissement et apportant également une réduction des rejets en uranium). L'enrichissement en uranium 235, nécessaire pour les réacteurs à eau légère, passe ainsi de 0,71 % à quelques pourcents (entre 3 et 5 %). L' UF_6 appauvri issu de cet enrichissement présente quant à lui une faible teneur en uranium 235 (de l'ordre de 0,25 %), et est défluoré (sur Tricastin) sous forme d'oxyde stable pour un entreposage de longue durée, à Bessines ou sur Tricastin en tant que matière réutilisable suivant les conditions du marché. Si l' UF_6 présente les mêmes risques qu'à l'étape de conversion (hydrolyse en HF notamment), la radiotoxicité de l'uranium augmente rapidement avec l'enrichissement en ^{235}U , ce qui nécessite des mesures de gestion des risques radiologiques spécifiques. L' UF_6 enrichi est enfin acheminé à l'usine Framatome de Romans, où il est défluoré sous forme UO_2 avant d'être transformé en pastilles pour les assemblages de combustible UOX. Cette usine est également en capacité de fabriquer des combustibles à base d'uranium de retraitement enrichi (URE).

L'uranium enrichi est alors prêt à être utilisé dans les réacteurs électronucléaires, pour produire de l'électricité.

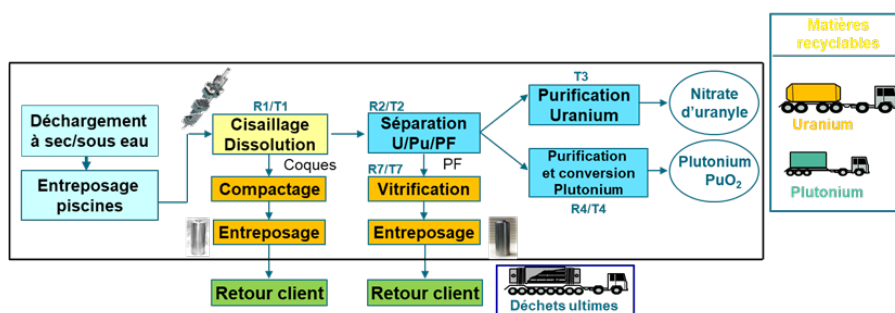


Figure 5 : Schéma simplifié du procédé de traitement recyclage de l'usine Orano La Hague (Source : Orano).

L'aval du cycle du combustible nucléaire

Après un ou plusieurs cycles d'irradiation pour en extraire son énergie, le combustible est ensuite déchargé du cœur du réacteur au bout de 3 ou 4 ans pour être entreposé en piscine et refroidir quelques années. En vue de son recyclage, il est ensuite transporté vers l'usine Orano La Hague dans le Nord Cotentin, où il va être entreposé à nouveau en piscine pour subir une seconde étape de refroidissement avant d'être traité dans les usines UP3 et UP2 800 pour séparer la matière réutilisable (95 % d'uranium environ et 1 % de plutonium) des déchets ultimes (4 % environ de structures activées et de produits de fission) par le procédé PUREX (Plutonium Uranium Refining by EXtraction – USA 1943) comme illustré sur la Figure 5. Après leur mise en solution nitrique acide, l'uranium et le plutonium sont d'abord séparés conjointement de leur mélange des produits de fission, puis séparés entre eux et purifiés en utilisant des techniques d'extraction par solvant. Le solvant utilisé est une solution de TBP (extractant) dans un alcane (diluant). Compte tenu des activités mise en jeu, la plupart des opérations sont téléopérées à travers des cellules blindées. Certaines opérations sont réalisées en boîtes à gants notamment pour la manipulation du plutonium. L'établissement Orano La Hague a ainsi un spectre très complet de radionucléides à gérer selon les étapes du procédé et tout type de rayonnements associés. Le risque de criticité est également présent dans certains ateliers. Orano a développé ses propres

dosimètres passifs permettant de mesurer tous ces phénomènes en différé. Une dosimétrie active/opérationnelle est également mise en place pour une surveillance en temps réel.

Le plutonium sous forme d'oxyde de plutonium, PuO_2 , est entreposé à La Hague quelque temps avant d'être envoyé sur l'usine Melox à Marcoule pour être utilisé pour la fabrication de combustible MOX (Mixed Oxide) par mélange avec de l'uranium appauvri. Dans ce combustible, le ^{239}Pu remplace l' ^{235}U en tant que matière fissile, dans des proportions d'environ 92 % d'uranium appauvri et 8 % de plutonium PuO_2 . Le MOX est utilisé dans certains réacteurs nucléaires d'EDF, et permet également de produire de l'électricité.

Le procédé est réalisé en boîtes à gants radioprotégées afin de pouvoir manipuler et intervenir plus facilement (voir la Figure 6). Les matières sont sous forme de poudre d'oxyde. Le procédé est assimilable à un procédé de fabrication d'une céramique. Cette fabrication reste complexe et difficile à maîtriser. L'usine de Melox est la seule à réaliser cette opération dans le monde.

La protection des boîtes à gants est assurée par des parois en verre au plomb pour la protection contre les rayonnements gamma, notamment dus à l'américium 241 et en polypropylène (PMMA) pour la protection contre les neutrons. Pour certains postes de travail, il est nécessaire d'ajouter des protections individuelles, notamment des vestes radioprotégées pour le corps, des lunettes radioprotégées pour la protection du cristallin parfois nécessaires depuis l'abaissement de la limite

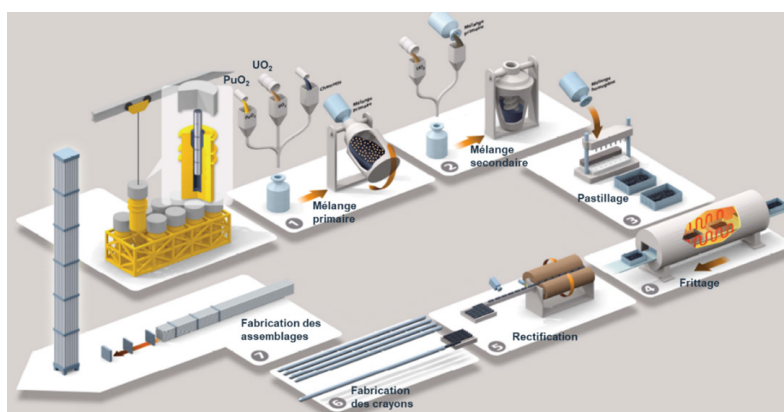


Figure 6 : Illustration du procédé de Melox pour la fabrication du combustible MOX (Source : Orano).

du cristallin en 2018 passant de 150 mSv/an à 20 mSv/an. Ceci a conduit à complexifier certaines interventions et à porter une attention particulière aux risques de troubles musculosquelettiques (TMS). Compte tenu du travail en boîte à gants, il faut également surveiller la dose aux extrémités correspondant à une dose peau donc à un effet déterministe dont la limite est fixée par le régulateur à 500 mGy/h.

L'uranium de retraitement (URT) à la sortie des usines de La Hague est sous forme de nitrate d'uranyle (NU). Il est alors transporté vers le site de Tricastin (installation TU5) afin de subir une dénitruration et être transformé sous une forme stable (U₃O₈) pour entreposage de longue durée dans des parcs dédiés, avant réutilisation sous forme de combustible pour produire à nouveau de l'électricité suivant les conditions de marché comme entre 1994 et 2013 dans les réacteurs exploités par EDF à Cruas, filière qui a récemment été relancée par EDF.

Synthèse de la dosimétrie des différentes étapes du cycle

En synthèse, le Tableau 1 présente l'uranium sous toutes ses formes, pour chaque étape du cycle.

Tableau 1 : Formes physico-chimiques de l'uranium selon le cycle (Source : Orano).

Installations du cycle	Formes physico-chimiques de l'uranium
Mines	U ₃ O ₈ , UO ₂ (NO ₃) ₂ , U ₂ O ₇ (NH ₄) ₂
Orano Malvési	U ₂ O ₇ (NH ₄) ₂ , U ₃ O ₈ , UF ₄
Orano Pierrelatte	UF ₄ , UF ₆ (naturel et enrichi)
Framatome Romans	UF ₆ , UO ₂ (e < 5%)
MELOX	UO ₂ [et PuO ₂]
La Hague	UO ₂ , UO ₂ (NO ₃) ₂ [et Pu(NO ₃) ₄ , PuO ₂]

Les différentes compositions isotopiques des isotopes de l'uranium varient ainsi en fonction des étapes du cycle, et peuvent se résumer comme indiqué dans le Tableau 2.

Chacune de ces formes doit évidemment être prise en compte pour estimer les niveaux d'exposition des travailleurs et du public. En effet, selon la forme physico-chimique de l'uranium, celui-ci se comporte différemment dans l'organisme du fait de ses différences de solubilité :

- Type F (absorption pulmonaire rapide ou composé avec une forte solubilité) : UF₆, UO₂F₂, UO₂(NO₃)₂ ;
- Type M (absorption pulmonaire modérée ou composé avec une solubilité moyenne) : UO₃, UF₄, UCl₄, autres composés hexavalents ;
- Type S (absorption pulmonaire lente ou composé avec une solubilité faible) : UO₂, U₃O₈.

Cette différence de comportement de l'uranium est prise en compte dans les évaluations de doses, notamment au travers de la norme ISO 16638-1 relative au contrôle et à la dosimétrie interne faisant suite à l'inhalation de composés d'uranium. Cette double toxicité (chimique et/ou radiologique), variable en fonction de l'enrichissement en ²³⁵U et de la forme physico-chimique, peut se présenter comme indiqué dans le Tableau 3.

En cas d'exposition interne ou suspicion d'exposition interne, c'est le médecin du travail qui est chargé de prescrire les examens de recherche de la contamination et d'estimer le cas échéant la dose engagée.

En synthèse, on peut retenir qu'il n'y a pas un seul type uranium mis en œuvre dans le cycle du combustible, mais plusieurs qui se présentent à chaque fois sous

Tableau 2 : Compositions isotopiques des isotopes de l'uranium en fonction des étapes du cycle (Source : Norme ISO 16638-1 version 2015).

	U-238		U-235		U-234		Total alpha activity Bq/g	Alpha activity ratio U-234/ U-238
	Isotopic composition by mass	Total alpha activity	Isotopic composition by mass	Total alpha activity	Isotopic composition by mass	Total alpha activity		
	%	%	%	%	%	%		
U-nat	99,275	48,26	0,72	2,25	0,0055	49,49	2,56E+04	1,03
DU	99,799	83,45	0,2	1,07	0,0010	15,48	1,49E+04	0,186
LEU	96,471	14,78	3,5	3,45	0,02884	81,78	8,12E+04	5,54
HEU	6,41	0,042	92,8	3,92	0,79	96,04	1,89E+06	2282

Tableau 3 : Compétition entre la chimiotoxicité et la radiotoxicité de l'uranium en fonction de son enrichissement en uranium 235 (Source : Norme ISO 16638-1 version 2015).

Physicochemical and isotopic characteristics		Toxicity	
Absorption type of uranium compound	U-235 Enrichment by mass	Acute intake or single intake	Chronic intake or multiple intakes
Type F	less than 3 %	Chemical	Chemical
	above 3 %		Radiological
Type M	Less than 30 %	Chemical	Radiological
	above 30 %	Chemical and radiological	
Type S	All enrichment	Radiological	Radiological
All types	With ²³² U and/or ²³⁶ U	Radiological	Radiological

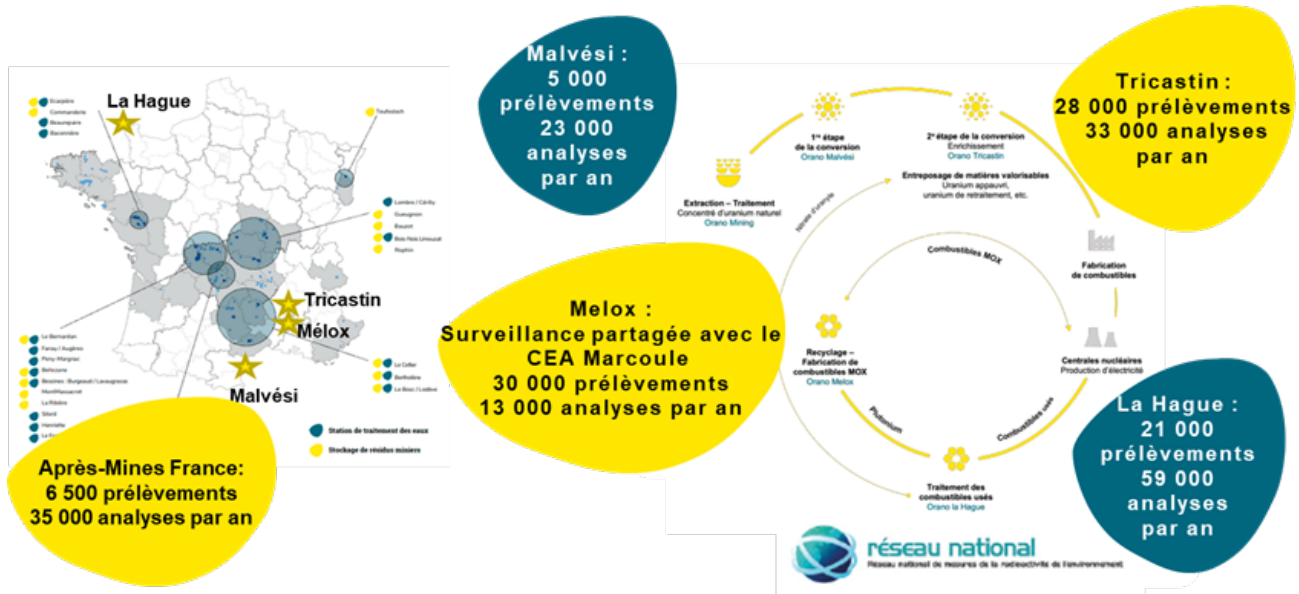


Figure 8 : Analyses environnementales réalisées par les laboratoires Orano en France (Source : Orano).

par des associations dans tous les compartiments de l'environnement sur tous les milieux (atmosphériques, terrestres – eaux de surface, herbe, lait, panier de la ménagère... –, marins et aquatiques – eaux côtières, algues, mollusques, poissons... –). Toutes les mesures sont disponibles sur le site internet du réseau national de mesure de la radioactivité de l'environnement (RNM) www.mesure-radioactivite.fr.

Tous les laboratoires (Orano, EDF, CEA, Andra...) sont agréés par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) à travers un processus basé sur la conformité à la norme ISO CEI 17 025 et la réussite à des essais d'intercomparaisons organisés par l'IRSN.

Le nombre de mesures réalisées annuellement autour des sites Orano par les exploitants est très important comme l'illustre la Figure 8. Il en est de même pour tous les exploitants.

L'IRSN surveille la radioactivité de l'environnement en complément de celle réalisée par l'exploitant et réalise également des expertises et des suivis radioécologiques très détaillés et très fins dont les résultats sont cohérents avec la surveillance des exploitants et qui

permettent de mieux comprendre le comportement des radionucléides dans l'environnement.

L'impact dosimétrique sur les populations riveraines est estimé annuellement sur chaque site par les exploitants à partir des rejets réels et de modèles de calculs validés pour les personnes représentatives ou groupes de référence susceptibles d'être les plus exposés compte tenu des conditions météorologiques et de leurs habitudes de vie (voir la Figure 9). Les impacts sont très faibles, inférieurs au nano sievert à quelques microsievert. Ils sont présentés sur la Figure 9 et le Tableau 5.

Tableau 5 : Impacts dosimétriques annuels de 2021 à 2023 des différents sites nucléaires Orano des populations riveraines (Source : Orano).

Impact dosimétrique pour la personne représentative ou groupe de référence (en mSv/an)	2021	2022	2023
La Hague Agriculteurs de Digulleville	0,0114	0,0099	0,0091
Melox Habitants de Codolet	< 0,0000001	< 0,0000001	< 0,0000001
Tricastin Les Girardes	0,000059	0,00010	0,00008
Malvési	0,025	0,025	0,0053

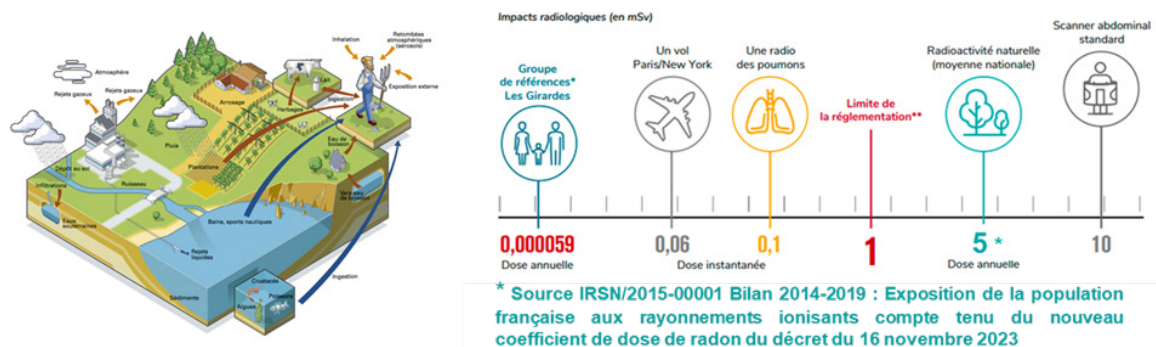


Figure 9 : Impact dosimétrique en 2021 pour le groupe de référence susceptible d'être le plus exposé situé aux Girardes (Source : Orano).

L'impact dosimétrique est également estimé par l'IRSN à partir des mesures dans l'environnement extrait du bilan radiologique 2018-2020 (IRSN, 2023). Le rapport du bilan radiologique 2018-2020 conclut que :

- les doses susceptibles d'être reçues par la population vivant autour des installations nucléaires françaises et estimées à partir des résultats de mesures, sont très faibles ;
- ces doses sont en bon accord avec celles estimées par calcul (modélisation de la dispersion et du transfert) par les exploitants de sites nucléaires, à partir des rejets réels des installations nucléaires ;
- la connaissance de la radioactivité dans l'environnement, basée sur les différents programmes de surveillance environnementale des sites nucléaires français, permet d'estimer la plupart des doses susceptibles d'être reçues par la population locale ;

- il fournit également un élément de validation des calculs effectués par les opérateurs à partir des rejets et des modèles de calcul d'impact dosimétrique.

Le Tableau 6 présente les impacts estimés à partir des mesures des sites Orano.

Conclusion

En conclusion, la radioprotection tout au long du cycle du combustible représente un enjeu d'envergure qui apparaît à ce stade bien maîtrisé et qui conduit à des dosimétries faibles à très faibles tant vis-à-vis des travailleurs que vis-à-vis du public. Il en est de même vis-à-vis de la faune et de la flore, aspect qui n'est pas développé dans cet article mais qui fait régulièrement l'objet d'évaluations. Dans le cadre de la relance du nucléaire, la radioprotection restera un enjeu important en matière de gestion des risques (Bourguignon, 2023).

Tableau 6 : Doses (en $\mu\text{Sv}/\text{an}$) potentiellement reçues par les populations riveraines des installations nucléaires d'Orano à partir des mesures environnementales acquises autour de chacun de ces sites – Doses dues à la radioactivité naturelle en France (Source : Bilan Radiologique 2018-2020 IRSN).

Sites	BR 2011-2014	BR 2015-2017	BR 2018-2020	Radionucléide et voie d'atteinte
	Dose ($\mu\text{Sv}/\text{an}$)			
La Hague	0,6 à 3,5	1,6 à 5,4 ⁽¹⁾ ; 3,3 ⁽²⁾	1,7 à 4,6 ⁽¹⁾ ; 5,0 ⁽²⁾	⁸⁵ Kr – exposition externe
	0,7	0,4 à 2,9	0,7 à 3,6	¹⁴ C – inhalation et ingestion de denrées
	1,1	0,25 – 2,7	0,3 à 2,6	¹²⁹ I – inhalation et ingestion de denrées
	-	0,02 à 0,2	0,05 à 0,2	⁹⁰ Sr – ingestion de lait
	0,62	0,02 à 0,14 ⁽³⁾	0,04 à 0,25 ⁽³⁾	⁶⁰ Co, plutonium et ²⁴¹ Am – ingestion de denrées marines
	-	< 0,03	0,01 à 0,02	³ H – inhalation et ingestion de denrées
Malvési	2	-	0,8	Uranium – inhalation
	0,4	-	-	Uranium – ingestion de légumes
	-	0,002	0,003	Uranium – ingestion ponctuelle de 1 litre d'eau
	-	0,01	-	Uranium – ingestion ponctuelle de 1 kg de blé
			3,5 ⁽⁴⁾	Dose externe à proximité immédiate du site
Tricastin	0,05	0,06	0,03	Uranium – inhalation
	0,003	0,003	0,003	Uranium – ingestion ponctuelle de 1 litre d'eau
Radioactivité naturelle		320		Exposition au rayonnement cosmique
		590		Voyageur aérien fréquent
		360 – 1 100		Exposition au rayonnement tellurique
		300 – 3 100		Ingestion de radionucléides naturels
		10		Consommation de 200 g de moules (²¹⁰ Po essentiellement)
		540 – 3 160		Inhalation de radon (max = Lozère, Cantal...)
		300		Gros fumeur (inhalation de ²¹⁰ Po de la feuille de tabac)

Bibliographie

BOURGUIGNON M. (2023), « Pas de renouveau du nucléaire sans une radioprotection forte ! », *Radioprotection*, 58(3), pp. 157-159, en Open Access.

IRSN (2023), « Bilan de l'état radiologique de l'environnement français de 2018 à 2020 », Publication de l'IRSN disponible sur www.mesure-radioactivite.fr

MÉTIVIER H. (2001), *L'uranium, de l'environnement à l'Homme*, EDP Sciences 2001, coordinateur Henri Métivier.

La radioprotection : enjeu majeur pour la vie dans l'espace

Par Jean-François BOTTOLLIER-DEPOIS
Ex-IRSN

Les astronautes sont exposés au rayonnement cosmique, constitué essentiellement de particules chargées de haute énergie, pouvant induire des niveaux de doses significatifs en fonction des situations rencontrées. En effet, les situations d'exposition peuvent être très différentes suivant le profil de la mission : en orbite basse ou au-delà, présence de protection par l'environnement, durée... Les risques en orbite basse, comme pour la station spatiale internationale, sont considérés comme acceptables et globalement sous contrôle. En contrepartie, les missions spatiales prolongées, au-delà des orbites basses, présentent de véritables enjeux en termes de radioprotection, en particulier du fait de l'exposition potentielle à de fortes éruptions solaires qui peuvent induire des niveaux de doses significatifs et conduire à des effets sur la santé à court et long terme.

Introduction

La radioprotection représente un enjeu crucial pour la vie dans l'espace. En effet, les astronautes sont exposés au rayonnement cosmique, constitué essentiellement de particules chargées de haute énergie, pouvant induire des niveaux de doses significatifs et conduire à des effets sur la santé à court et long terme. L'exposition dans l'espace est d'autant plus importante que l'on s'éloigne de la Terre lorsque la protection conférée par l'atmosphère et le champ magnétique terrestres disparaissent. Sans cette protection, les doses sont environ 1 000 fois supérieures à celles rencontrées au niveau de la mer, voire beaucoup plus en cas d'éruption solaire.

Les risques pour l'humain sont globalement bien connus pour des situations d'expositions rencontrés sur Terre à des rayonnements ionisants d'origine naturelle ou artificielle (médecine, industrie...). Les effets sur la santé sont généralement regroupés en deux catégories :

- Les effets « stochastiques » se traduisant principalement par l'apparition de cancers avec une augmentation du risque démontrée par des études épidémiologiques pour des doses au-delà de 100 mSv.
- Les effets « déterministes » (réactions tissulaires nocives) étant dus en grande partie à la mort ou au dysfonctionnement de cellules suite à une exposition à de fortes doses (au-delà de 1 Sv). Ces derniers surviennent de façon certaine au-delà d'un certain seuil de dose et peuvent se traduire par une altération fonctionnelle cliniquement significative, voire grave, par exemple une atteinte du système hématopoïétique ou du système gastro-intestinal.

La particularité de l'exploration spatiale est qu'elle conduit à des situations d'exposition variées allant du domaine des faibles doses (< 100 mSv), typiquement une mission de plusieurs mois à bord de l'ISS, à des doses de plusieurs centaines de mSv (un an à bord de la station spatiale internationale – ISS ou un voyage vers Mars sans éruption solaire significative), voire très élevées (> 1 Sv) en cas d'éruption solaire majeure pouvant induire des effets déterministes en l'absence de protection particulière.

En orbites basses (ISS), dans la mesure où les missions sont au maximum de l'ordre d'un an avec des doses associées de 200 à 300 mSv, les aspects liés à la radioprotection sont globalement « sous contrôle » et les risques considérés comme « acceptables ». À cette altitude (~ 400 km), la protection radiologique apportée par le champ magnétique terrestre est encore efficace et les contre-mesures consistent en un suivi dosimétrique et médical.

En contrepartie, les missions au-delà des orbites basses, vers la Lune ou Mars, potentiellement de longue durée de surcroît, présentent un enjeu majeur du point de vue de la radioprotection et nécessitent la mise en place de stratégies et de contre-mesures pour garantir la sécurité et la santé des astronautes.

L'environnement radiatif (ICRP, 2013 ; NCRP, 2006)

Le rayonnement cosmique dit « primaire » est composé de particules chargées de haute énergie, majoritairement des protons, alpha et ions plus lourds. Il a deux composantes, la première d'origine galactique, plutôt

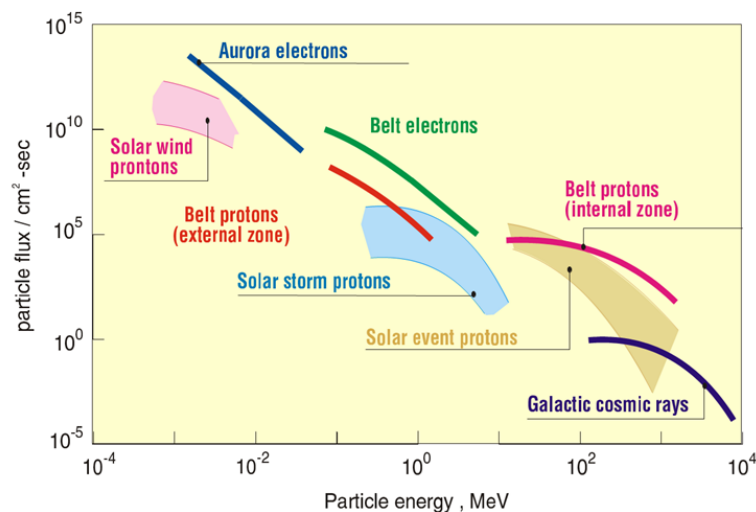


Figure 1 : Synoptique du débit de fluence des différentes composantes du rayonnement cosmique en fonction de l'énergie (Source : IRSN).

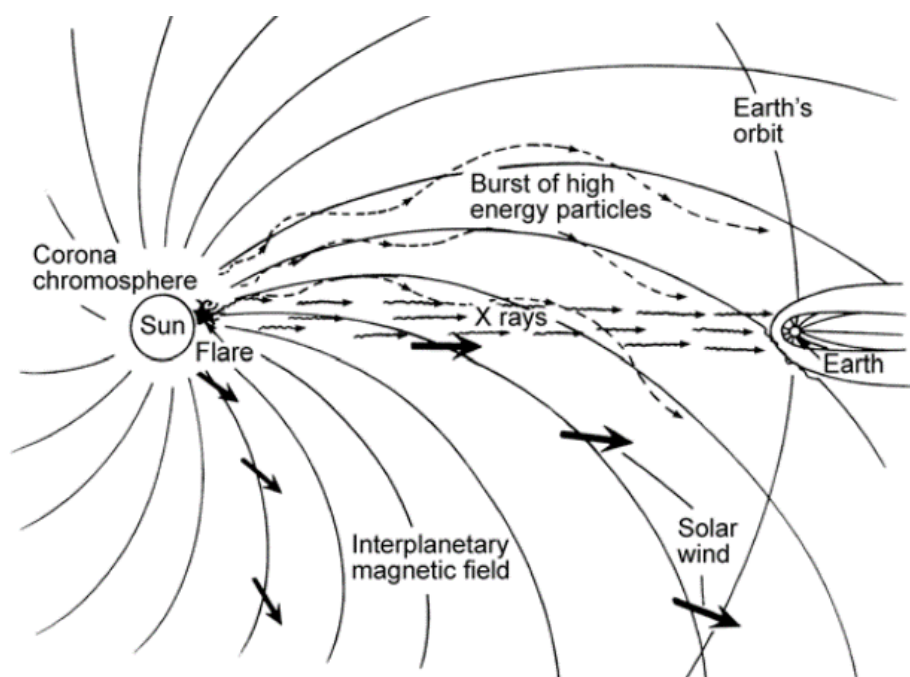


Figure 2 : Vue conceptuelle du champ magnétique interplanétaire (Source : NCRP, 2006).

stable, la seconde produite par le Soleil, plus fluctuante et sporadique. Ce rayonnement cosmique primaire va interagir, d'une part, avec le champ magnétique solaire et terrestre (à l'origine des ceintures de radiation) et, d'autre part, avec les matériaux rencontrés (constituants de l'atmosphère, matériaux des véhicules spatiaux, habitations, tissus du corps humain...) et créer des particules secondaires qui peuvent être de nature différente comme des neutrons. La Figure 1 présente les spectres en énergie des principales composantes.

Le rayonnement cosmique d'origine galactique

Le rayonnement cosmique galactique (*Galactic Cosmic Rays - GCR*) est composé de particules chargées très énergétiques qui proviennent vraisemblablement

d'explosions de supernovas, d'étoiles à neutrons ou de pulsars. Ces particules pénètrent alors dans l'héliosphère et interagissent avec le champ magnétique interplanétaire produit par le « vent solaire » (voir la Figure 2) avec pour effet de moduler leur flux en anti-corrélation à l'activité solaire. Ses composantes se répartissent de la façon suivante : protons (85-90 %), ions d'hélium (10-13 %), électrons (~ 1 %) et ions plus lourds (~ 1 %) jusqu'au fer. Leur énergie est comprise entre 10 MeV/nucléon et plus de 10 GeV/nucléon. Le débit de fluence du rayonnement cosmique galactique pénétrant dans le système solaire est relativement constant dans le temps et isotrope. Le rayonnement cosmique galactique étant très énergétique, il est difficile de s'en protéger ; à titre d'exemple, il pénètre de plusieurs mètres dans le régolite à la surface de Mars.

Le rayonnement cosmique d'origine solaire

Le Soleil émet en continu des particules, principalement des protons et des électrons, avec des énergies relativement faibles (maximum 3,5 keV pour les protons), qui constituent le vent solaire facilement stoppé par quelques microns de matière. Son intensité varie en fonction de l'activité solaire qui suit un cycle moyen d'environ 11 ans.

De façon sporadique, de grandes quantités d'énergie sont libérées à la surface du Soleil, pouvant générer des champs magnétiques intenses et des projections de grandes quantités de matière (éjections de masse coronale – CME). C'est lors de tels événements que des protons peuvent être accélérés à des énergies élevées, généralement inférieures à la centaine de MeV et très rarement au-dessus de 10 GeV. Ces événements, appelés SPEs (*Solar Particle Event*), se produisent à une fréquence plus élevée en période d'activité solaire maximale et sont de courte durée, de quelques heures à quelques jours, avec des intensités et des distributions en énergie très variables. Les plus intenses peuvent induire des doses élevées, potentiellement critiques pour la santé des astronautes sans contre-mesure particulière.

Les ceintures de radiation

Les ceintures de radiation, découvertes par Van Allen, sont le résultat de l'interaction du rayonnement primaire avec le champ magnétique terrestre. Elles sont constituées essentiellement d'électrons et de protons, avec des énergies allant jusqu'à 7 MeV pour les électrons et 700 MeV pour les protons. Ces ceintures, de forme toroïdale, sont centrées sur l'équateur géomagnétique à une distance de la Terre entre environ 200 km

et 75 000 km. À titre d'exemple, l'ISS, dont l'orbite est centrée sur l'axe géographique à une altitude de 400 km, traverse régulièrement les basses couches des ceintures de protons au-dessus de l'Atlantique Sud où l'on observe une augmentation significative du débit de dose.

Le rayonnement secondaire créé dans l'atmosphère terrestre

À l'approche de la surface de la Terre, le rayonnement cosmique est fortement atténué par interaction avec la magnétosphère (voir la Figure 3), et l'atmosphère.

Lorsque les particules primaires possèdent une énergie supérieure à un certain seuil, appelée énergie de coupure magnétique, elles traversent la magnétosphère et arrivent dans les hautes couches de l'atmosphère. À des énergies inférieures, elles ont plus tendance à suivre les lignes de force du champ magnétique, avec d'autant plus de « facilité » que cette énergie est faible. C'est pourquoi le flux de particules à proximité des pôles magnétique est supérieur à celui au niveau des zones équatoriales, mieux protégées par le champ magnétique terrestre.

En arrivant dans les hautes couches de l'atmosphère, les particules primaires interagissent avec les atomes qu'elles rencontrent, produisant un rayonnement secondaire composé essentiellement de particules chargées et de neutrons (voir la Figure 4 page suivante). Celui-ci est visible au niveau du sol lorsque les particules primaires sont suffisamment énergétiques, comme celles d'origine galactique ou de rares éruptions solaires de type GLE. À titre de comparaison, la protection conférée par l'atmosphère correspond à celle d'une hauteur d'eau d'environ 10 mètres ($1\ 000\ \text{g/cm}^2$).

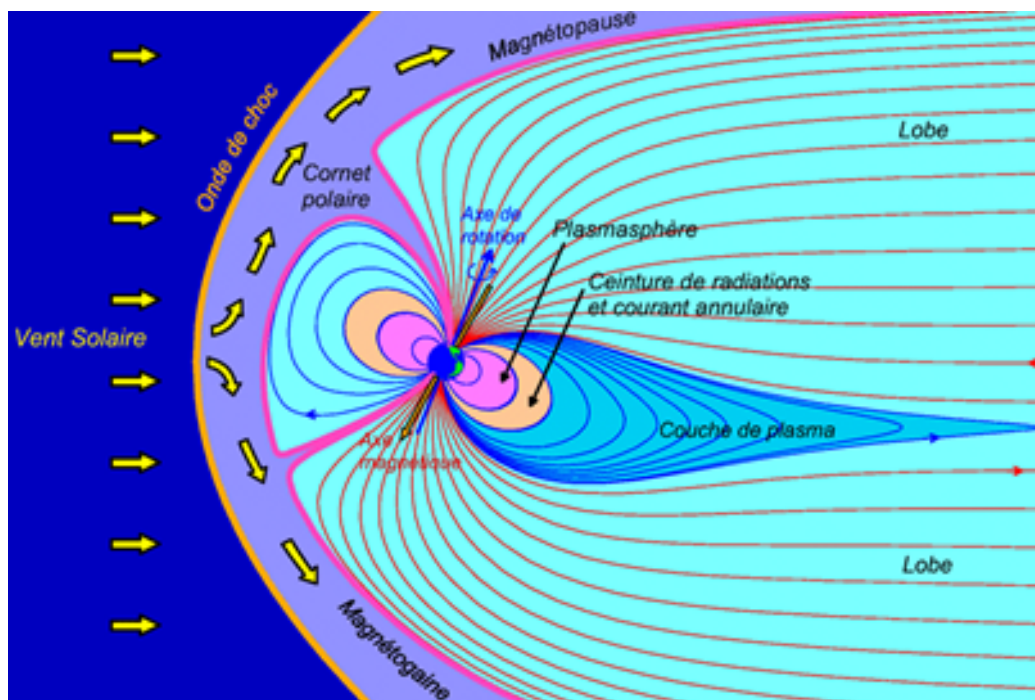


Figure 3 : La magnétosphère terrestre en interaction avec le vent solaire (Source : Laboratoire de Physique des Plasmas).

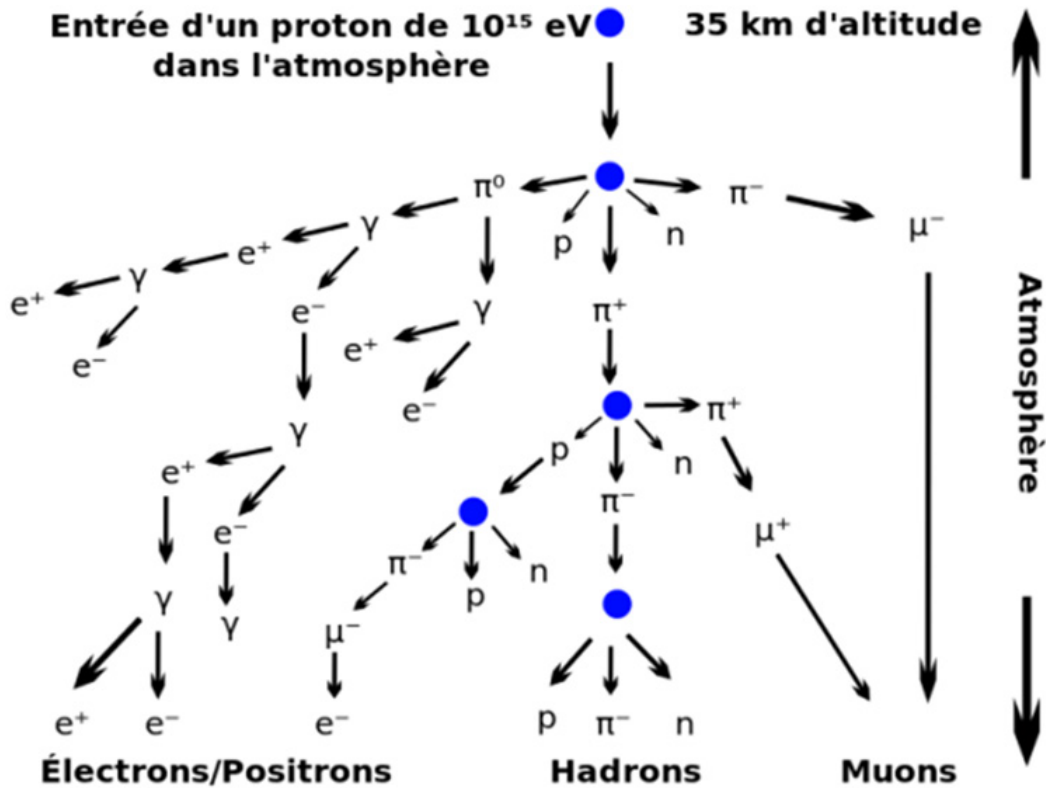


Figure 4 : Interaction du rayonnement cosmique primaire avec les composants de l'atmosphère (Source : frank-lavisolo.fr)

Les différentes situations d'exposition

À proximité de la Terre et pour l'aéronautique

Au niveau de la mer, le débit de dose moyen dû au rayonnement cosmique se situe entre 30-40 nSv/h (0,32 mSv/an) et double à une altitude de 1 500 m. À l'altitude de croisière des avions de ligne, entre 10 000 à 13 000 m, le rayonnement cosmique est environ 100 à 300 fois plus élevé qu'au niveau de la mer, entraînant des débits de dose entre 3 et 10 μ Sv/h en fonction de la latitude et de l'activité solaire. La dose annuelle moyenne des personnels navigants en France est de 1,2 mSv (IRSN, 2024). Cette dose est uniquement due au GCR, à l'exception de rares GLEs (4 depuis le début des années 2000) qui contribuent pour quelques dizaines de μ Sv. À titre d'exemple, la dose sur un vol Paris–Los Angeles, habituellement de l'ordre de 70 à 80 μ Sv, a été doublée lors du GLE68 du 20 janvier 2005.

À bord de la station orbitale

La station spatiale internationale (ISS) orbite autour de la Terre à une altitude d'environ 400 km en 90 minutes, selon une inclinaison de 51,6°. À cette altitude, les composantes de l'exposition sont le GCR, les ceintures de radiation (protons et électrons) lors du passage dans l'anomalie de l'Atlantique Sud (SAA) et les SPEs. La protection radiologique conférée par l'environnement est limitée car il n'y a plus d'atmosphère et seules y contri-

buent la magnétosphère, les structures de la station (~ 20 g/cm²), ainsi que la Terre elle-même, par effet d'ombre pour le GCR. Sans éruption solaire significative, la dose journalière moyenne se situe entre 0,5 et 1 mSv, soit entre 200 et plus de 300 mSv/an en fonction de l'activité solaire. Lors de la traversée de la SAA, le débit de dose peut atteindre plusieurs mSv/h (Bottollier-Depois *et al.*, 2002), contribuant ainsi à hauteur d'environ 25 % (Berger *et al.*, 2008). Les éruptions solaires les plus intenses et les plus énergétiques pourraient générer des doses de plusieurs dizaines de mSv, voire au-delà de la centaine de mSv. Depuis 1955, 5 SPEs d'intensité et d'énergie suffisamment importantes pour mettre en danger la santé de l'équipage ont été observés, dont le GLE5 du 23 février 1956 (ICRP, 2013). De telles éruptions solaires nécessiteraient des blindages tels qu'ils seraient impossibles à mettre en œuvre.

Les missions vers la Lune ou Mars

Les astronautes en mission de longue durée au-delà des orbites basses, vers la Lune ou Mars, sont exposés à des doses qui peuvent facilement dépasser celles reçues à bord de l'ISS car la protection conférée par le champ magnétique terrestre et celle due à l'effet d'écran de la Terre diminuent progressivement. Pour ces missions lointaines, les conditions d'exposition durant le voyage et celles, le cas échéant, à la surface de la Lune et Mars sont différentes et nécessitent une gestion et des contre-mesures appropriées. Ainsi, durant les voyages, la protection est essentiellement conférée par les structures des véhicules spatiaux et, lors de

séjours à la surface, une protection supplémentaire est conférée par l'effet d'écrantage de l'astre, éventuellement son atmosphère et les habitations.

Dans l'espace profond, la fluence des particules d'origine galactique et solaire (GCR et SPE) est environ trois fois plus importante qu'à l'altitude de l'ISS, entraînant des doses plus élevées d'un facteur 2 environ (Berger *et al.*, 2020 ; Stuart, 2024).

À titre d'exemple, la mission vers Mars, partie le 26 novembre 2011 avec le Mars Science Laboratory (MSL) et le rover Curiosity, a permis de faire des mesures avec le système RAD (*Radiation Assessment Detector*) pendant le trajet et à la surface de Mars. Pendant le trajet, le débit d'équivalent de dose moyen est de 1,84 mSv/jour soit 466 mSv pour l'ensemble du voyage (253 jours), dû pour 94,6 % au GCR et 5,4 % à 5 SPEs observés sur la période (Zeitlin *et al.*, 2013). À la surface, le débit d'équivalent de dose est de 0,64 mSv/jour pour la composante GCR et un seul SPE a été observé induisant un équivalent de dose de 50 μ Sv (Donald *et al.*, 2013). Ainsi, pour un séjour sur Mars de 500 jours plus un aller-retour de 2 x 180 jours, l'équivalent de dose total serait de l'ordre de 1 Sv, ceci sans éruption majeure et en période d'activité solaire max (Donald *et al.*, 2013).

À la surface de la Lune, les conditions d'exposition étant comparables à celles rencontrées à la surface de Mars, la dose totale pour un séjour de même durée serait significativement plus faible du fait de la durée du voyage qui est de l'ordre de 6 jours aller-retour.

Un niveau de risque acceptable a été défini pour les missions en orbite basse. Ainsi, la NASA a fixé la limite de la dose efficace carrière à 600 mSv (National Academy of Sciences, 2021). Étant donné les niveaux de dose attendus pour des missions habitées de longue durée vers la Lune ou Mars, la nature du risque, en particulier non-cancer, et son acceptabilité devront être reconsidérées.

Enjeux pour des séjours prolongés dans l'espace

L'enjeu le plus important pour la radioprotection concerne les séjours prolongés au-delà des orbites basses, sur la Lune ou Mars. Les principales contre-mesures à considérer concernent la mise en place de protections radiologiques et d'une organisation de la vie pour diminuer les niveaux d'exposition, la consolidation des modèles de risque, une meilleure connaissance des pathologies attendues et de leur gestion (ICRP, 2013 ; NCRP, 2006 ; Wohrer et Gauquelin Koch, 2021).

Améliorer les protections radiologiques et organiser la vie sur place

Le premier levier évident pour diminuer l'exposition est, d'une part, l'amélioration des protections radiologiques des véhicules spatiaux et des habitations et, d'autre part, une adaptation du mode de vie. Étant données les contraintes fortes pour disposer de matériaux efficaces en quantité suffisante dans un environnement spatial,

il va falloir faire des choix en fonction des matériaux disponibles pour améliorer les protections.

Pour les véhicules spatiaux, il est illusoire de vouloir se protéger efficacement de la composante GCR du fait de son énergie. Lors des voyages, l'enjeu est la protection contre les GLEs intenses qui, même s'ils sont rares, peuvent avoir des conséquences médicales graves, voir létales. Étant donné que les GLEs durent quelques heures et ont des spectres en énergie plus faible que le GCR, il est envisageable de concevoir un espace confiné avec une protection radiologique renforcée dans lequel les astronautes pourraient venir se réfugier, le temps de l'éruption. Un système d'alerte « temps réel » relativement simple pourrait être mis en place dès lors que le débit de dose dépasse un certain seuil, sachant que le temps de montée d'une éruption à son intensité maximale est de l'ordre d'une heure. À titre d'exemple, des mesures, réalisées lors de la mission Artemis vers la Lune en novembre 2022, ont montré l'efficacité d'un module spécialement blindé, Orion, qui réduit d'environ 50 % l'équivalent de dose lors de la traversée des ceintures de radiation (Stuart, 2024).

Pour la vie à la surface de la Lune ou de Mars, l'enjeu est de concevoir des habitats avec des protections utilisant le plus possible les matériaux locaux comme le régolithe. Étant donné la nature du rayonnement cosmique primaire et les particules secondaires créées dans les matériaux (dont des neutrons), les blindages les plus efficaces sont des multicouches constitués de matériaux hydrogénés (eau, polyéthylène) et de Z plus élevés (régolithe). À titre indicatif, en cas de SPE, une diminution de la dose est significative pour des épaisseurs de régolithe de quelques dizaines de g/cm^2 mais, pour le GCR, cette diminution ne commence à être visible qu'au-delà de la centaine de g/cm^2 (Akisheva, 2023 ; Charpentier *et al.*, 2024). De nombreuses études sont en cours pour étudier ces protections multicouches en intégrant l'ensemble des contraintes (efficacité, disponibilité, mise en place...).

Un autre axe de réflexion devra porter sur l'organisation de la vie pour diminuer l'exposition, par exemple en optimisant les activités les plus exposées, à l'extérieur en particulier, en mettant en place des systèmes d'alerte en cas d'éruption solaire et en concevant des espaces confinés pour une mise à l'abri.

Consolider les modèles de risque pour les effets tardifs et précoces

À ce jour, aucun excès d'incidence n'a été observé sur les effets tardifs cancéreux et non-cancéreux, sauf pour les cataractes. Cependant, il est nécessaire d'étudier les possibles effets liés à des expositions prolongées, d'une part, à de faibles doses de protons, particules HZE, neutrons dans une gamme d'énergie correspondant à celle du RC et, d'autre part, dans la gamme de 0,5 à 1,5 Sv sur d'autres systèmes (cristallin, cardiaque, vasculaire, hématopoïétique, immunitaire, nerveux central...).

Concernant les effets précoces, ils ne peuvent pas être exclus en cas d'éruptions solaires significatives qui peuvent entraîner des doses de plusieurs gray

en l'absence de protection. Ces effets, apparaissant au-delà de seuils de dose spécifiques, pourraient être comparables à ceux observés lors d'accidents radiologiques à forte dose sur le système hématopoïétique, gastro-intestinal ou nerveux central. La NCRP recommande en particulier de conduire des études sur les seuils d'apparition de ces effets en prenant en compte les spécificités du RC et sur le maintien de l'intégrité des systèmes touchés.

Par ailleurs, les niveaux de risque « acceptables » pour l'exploration spatiale, au-delà des orbites basses, n'ont pas été définis à ce jour et devront l'être avant d'envoyer des missions habitées vers la Lune ou Mars.

Conclusion

Les risques liés à l'exposition au rayonnement cosmique en orbite basse, comme l'ISS, sont considérés comme acceptables et globalement sous contrôle du fait de la protection conférée par le champ magnétique terrestre et les structures de la station.

En revanche, les missions spatiales prolongées, au-delà des orbites basses, présentent de véritables enjeux en termes de radioprotection, en particulier du fait de l'exposition potentielle à de fortes éruptions solaires. Par conséquent, il est nécessaire de bien définir les possibles effets sur la santé et les contre-mesures à mettre en place en amont des missions et durant les trajets et séjours.

Enfin, les niveaux de risques acceptables pour de telles missions devront être reconsidérés à la hausse et de nouveaux critères pourraient être à prendre en compte pour la sélection des astronautes, comme la radiosensibilité, l'âge ou le sexe, pouvant poser des questions éthiques.

Références

- AKISHEVA Y. (2023), *Utilisation protectrice du régolithe pour l'exploration planétaire et lunaire*, thèse de doctorat, Toulouse ISAE-SUPAERO, 171 pages.
- BERGER T. *et al.* (2020), "Long term variations of galactic cosmic radiation on board the International Space Station, on the Moon and on the surface of Mars", *J. Space Weather Space Clim.*, n°10, 34, pp. 1-20.
- BERGER T. *et al.* (2008), "Radiation dosimetry onboard the International Space Station – ISS", *Z. Med. Phys.*, n°18, pp. 265-275.
- BOTTOLLIER-DEPOIS J.-F. *et al.* (2002), "TEPC measurements obtained on the Mir space station", *Radiation Measurements*, n°35, pp. 485-488.
- CHARPENTIER G. *et al.* (2024), "ARAMIS: a Martian Radiative Environment model built from GEANT4 simulations", Accepted for publication in the *Journal of Space Weather and Space Climate*.
- DONALD M. H. *et al.* (2013), "Mars' Surface Radiation Environment Measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity Rover", *Science Express*, pp. 1-11.
- ICRP (2013), "Assessment of Radiation Exposure of Astronauts in Space", *Annals of International Commission on Radiological Protection*, publication 123.

IRSN (2024), « Exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France : bilan 2023 », Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES (2021), "Space Radiation and Astronaut Health: Managing and Communicating Cancer Risks", The National Academies Press.

NCRP (2006), "Information Needed to Make Radiation Protection Recommendations for Space Missions Beyond Low-Earth Orbit", National Council on Radiation Protection and Measurements, report n°153.

STUART P. G. (2024), "Space radiation measurements during the Artemis I lunar mission", *Nature*, Vol. 634, pp. 48-52.

WOHRER P. & GAUQUELIN KOCH G. (2021), « Présentation du groupe SVE – Soutenir la Vie dans l'Espace », Fondation pour le Recherche Stratégique.

ZEITLIN C. *et al.* (2013), "Measurements of Energetic Particle Radiation in Transit to Mars on the Mars Science Laboratory", *Science*, n°340, pp. 1080-1084.

Convention OSPAR et travaux du Comité des Substances Radioactives (RSC)

Par Benoît BETTINELLI, Brice DELIME
Direction générale de la Prévention des Risques -
Mission de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection

Nathalie REYNAL, Nicolas BAGLAN
Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN)

Coralie NYFFENEGGER, Hélène CAPLIN
Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN)

Catherine BORDIER-OLIVEIRA
Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives

Pierre-Yves HEMIDY
Électricité de France S.A.

Et Patrick DEVIN
Orano

La convention OSPAR a pour objectif la protection du milieu marin de l'Atlantique Nord-Est. Par l'intermédiaire de son comité dédié aux substances radioactives, OSPAR s'intéresse aux rejets des substances radioactives dans le milieu marin, la stratégie d'OSPAR visant à les prévenir, les réduire, voire les supprimer, notamment par le recours aux meilleures techniques disponibles. À ce titre, la France présentera son prochain rapport périodique sur le sujet en 2025.

La convention OSPAR et ses missions

La convention OSPAR (OSlo PARis) pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est a été signée le 22 septembre 1992 et est entrée en vigueur le 25 mars 1998. Elle fusionne et actualise deux conventions régionales de protection de l'environnement : la convention d'Oslo (1974) sur la prévention de la pollution marine par les opérations d'immersion effectuées par les navires et les aéronefs et la convention de Paris (1978) sur la prévention de la pollution due aux rejets de substances dangereuses, charriées par les cours d'eau ou par les plates-formes en *offshore*.

Les limites géographiques de l'Atlantique Nord-Est s'étendent du sud du Portugal à l'océan Arctique (la Baltique et la Méditerranée sont exclues) (cf. Figure 1 page suivante). La zone maritime comprend les eaux intérieures et territoriales, la zone économique exclu-

sive et la haute mer, y compris les fonds marins correspondants et leur sous-sol.

Les parties contractantes qui ont signé et ratifié la convention sont, par ordre alphabétique : l'Allemagne, la Belgique, le Danemark, l'Espagne, la Finlande, la France, l'Irlande, l'Islande, le Luxembourg, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, le Royaume-Uni, la Suède et la Suisse, soit 15 pays situés sur les côtes occidentales d'Europe ou impactant ces côtes *via* les cours d'eau, ainsi que la Commission européenne au titre du Traité instituant la Communauté européenne. Des observateurs sont également invités, qui se composent d'organisations gouvernementales (Organisation maritime internationale, Programme des Nations unies pour l'environnement, Agence internationale de l'énergie atomique, etc.) et non gouvernementales (World Nuclear Association (WNA), Greenpeace, Kommunernes International Miljøorganisation (KIMO), World Wide Fund for Nature (WWF), Robin des Bois, etc.).

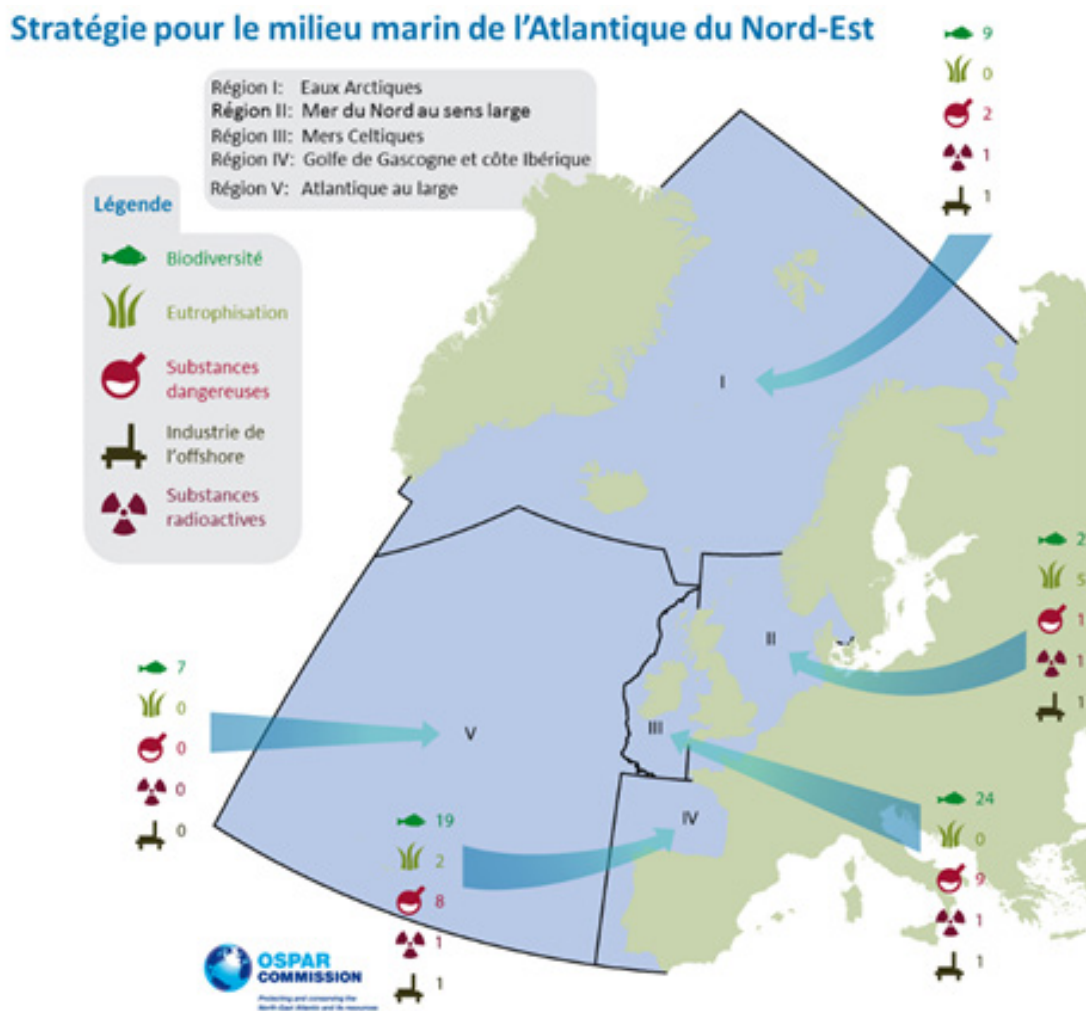


Figure 1 : Stratégie pour le milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est et régions/zones OSPAR (Source : <https://www.ospar.org/>).

Les travaux d'OSPAR sont fondés sur une approche globale du milieu marin orientée « développement durable » qui couvre l'ensemble des pollutions pouvant l'affecter et comportent plusieurs thématiques relatives à la prévention, à la limitation et à la suppression de la pollution :

- d'origine anthropique (rejets industriels, matières nutritives, rejets radioactifs, etc.) ;
- provenant des opérations d'immersions (dont les déchets radioactifs) ;
- provenant des sources *offshore* (rejets des installations pétrolières et gazières au large).

Cette approche se traduit par une surveillance continue de la qualité du milieu marin et une publication régulière de « rapport de bilan de santé »¹, élargie à la protection des écosystèmes marins et de leur diversité biologique.

La convention intègre également les orientations de la Conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement tenue à Rio en 1992, à savoir le

principe de précaution, le principe du pollueur-payeur, la référence expresse à l'utilisation des « meilleures techniques disponibles (MTD : BAT ou *Best Available Techniques* en anglais) » et des « meilleures pratiques environnementales (MPE : BEP ou *Best Environmental Practices* en anglais) », dans la mise en œuvre des programmes et mesures destinés à remplir les objectifs de la convention et également le droit à l'information environnementale : droit d'accès du public aux informations concernant l'état de la zone maritime et la mise en œuvre de la convention.

Les travaux de la convention OSPAR

La convention dispose d'une organisation pyramidale avec au sommet la Commission d'OSPAR composée de représentants des parties contractantes, puis pour chaque type de pollution des comités stratégiques de deuxième niveau, auxquels appartient le Comité des substances radioactives (RSC ou *Radioactive Substances Committee* en anglais), qui préparent et exécutent les travaux de la Commission d'OSPAR et enfin des groupes techniques de troisième niveau. La

¹ <https://oap.ospar.org/en/ospar-assessments/quality-status-reports/qsr-2023/>

Commission d'OSPAR se réunit annuellement et a pour rôle essentiel de suivre et le cas échéant faire évoluer la convention.

Le RSC est constitué de représentants des parties contractantes appartenant à des organismes étatiques ou parapublics spécialisés dans le domaine nucléaire (radioprotection, protection de l'environnement, etc.) et d'observateurs (AIEA, Greenpeace International, WNA (industrie nucléaire), KIMO, WWF, etc.) qui se réunissent *a minima* une fois par an.

La délégation française est pilotée par la DGPR - MSNR (Direction générale de la Prévention des Risques - Mission de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection) et composée d'experts de l'ASN (Autorité de Sûreté Nucléaire), de l'IRSN² (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) et du CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives) dans le cadre de ses missions régaliennes. Des représentants d'exploitants français (EDF S.A. et Orano) participent en tant qu'observateurs sous la bannière du WNA. Les exploitants apportent les données de rejets d'effluents radioactifs liquides des installations concernées (le site Orano La Hague, les centres nucléaires de production d'électricité d'EDF concernés par au moins une zone OSPAR et les sites de Saclay et Fontenay-aux-Roses du CEA Paris-Saclay), qui sont transmises au secrétariat du RSC après vérification par l'ASN et contribuent également à la rédaction du rapport BAT, sous le contrôle des autorités françaises concernées.

Le RSC élabore des projets de programmes conjoints d'évaluation et de surveillance continue (JAMP, *Joint Assessment & Monitoring Programme* en anglais) des rejets de substances radioactives dans le milieu marin et des niveaux de radioactivité dans les compartiments environnementaux. Il recueille et met à disposition du public les données relatives aux rejets radioactifs liquides et aux concentrations environnementales dans la zone maritime³, suit leur évolution annuelle, étudie les rapports des parties contractantes sur la mise en œuvre des dispositions de la convention et notamment les rapports évaluant la mise en œuvre des MTD, dont l'actualisation doit être réalisée tous les 6 ans, apprécie la conformité des actions menées par les parties contractantes au regard de la convention et publie chaque année le résultat de ces évaluations.

Les programmes et dispositions prises sont fondés sur un engagement politique, formalisé par la déclaration de Sintra (réunion des ministres de 1998) avec :

- un objectif de « réductions progressives et substantielles des rejets, le but étant de parvenir à des teneurs dans l'environnement proches de zéro (*i.e.* "close to zero") dans le cas des substances radioactives artificielles », en tenant compte de la faisabilité technique et de l'impact radiologique sur l'homme et le milieu vivant ;

- la volonté que les « rejets, émissions et pertes de substances radioactives soient d'ici 2020 ramenés à des niveaux tels que, par rapport aux niveaux historiques, les concentrations additionnelles en résultant soient proches de zéro ».

Plus récemment, à Cascais en 2021, cet objectif a été globalement reconduit jusqu'en 2030, tout en reconnaissant les progrès accomplis depuis la mise en œuvre de la convention et le besoin de les maintenir dans la durée.

Concernant la stratégie d'OSPAR visant les substances radioactives (1998), le document d'orientation des travaux de la Commission :

- reprend l'objectif de la déclaration de Sintra ;
- mandate la Commission pour :
 - déterminer les substances radioactives définies comme indicateurs du respect des objectifs d'OSPAR, sur la base d'études scientifiques, et notamment le programme MARINA⁴ de la Commission européenne,
 - élaborer des programmes et formuler des propositions visant à faire appliquer les MTD/MPE et la technologie *ad hoc* pour prévenir, réduire ou supprimer les rejets,
 - définir des critères de qualité de l'environnement,
 - procéder à un examen quinquennal des progrès accomplis dans l'application de la stratégie au travers d'un document d'évaluation périodique.

À l'origine, pour la période 1998-2003, les parties contractantes devaient adopter un plan national comportant les modifications apportées aux autorisations de rejets, les perfectionnements techniques pour réduire les rejets et les prévisions de baisses de rejets jusqu'en 2020. Pour la France, ce plan national a été élaboré en 2003. Le programme détaillé de la stratégie OSPAR a été décliné dans la réglementation française à différents niveaux avec des prescriptions spécifiques inscrites dans des décisions réglementaires prises par l'ASN ou dans les textes individuels (arrêtés ministériels ou décisions de prescriptions de l'ASN) encadrant les rejets radioactifs de chaque installation.

Afin d'apprécier les progrès réalisés par rapport aux niveaux historiques, le RSC a défini une « ligne de base » correspondant à la moyenne des valeurs annuelles sur une période allant de 1995 à 2001 (*i.e.* moyenne centrée sur 1998, année de la convention de Sintra) pour les rejets radioactifs réalisés par voie liquide, les concentrations dans l'environnement marin et les impacts dosimétriques résultants. Pour le cas particulier du site Orano de La Hague, il convient de noter que d'importants progrès avaient déjà été réalisés auparavant, notamment avec la mise en service d'une nouvelle station de traitement des effluents liquides en 1989 et la mise en œuvre de la nouvelle gestion des

² La loi du 21 mai 2024 relative à l'organisation de la gouvernance de la sûreté nucléaire et de la radioprotection prévoit de fusionner l'IRSN et l'ASN au 1^{er} janvier 2025.

³ <https://odims.ospar.org/fr/>

⁴ L'étude MARINA II rendue publique en 2002 a notamment permis de mettre en avant la baisse des impacts au cours du temps et la contribution des activités *offshore* dans les rejets de radionucléides émetteurs alpha.

effluents en 1995, fondée sur la construction de plusieurs unités d'évaporateurs capables de décontaminer des effluents actifs.

Concernant les rejets radioactifs liquides des centres nucléaires de production d'électricité, les améliorations apportées aux circuits de collecte et de traitement et les efforts réalisés par l'exploitant pour réduire à la source la production d'effluents expliquent la baisse importante de l'activité rejetée (diminution d'un facteur 100 depuis la mise en service du parc nucléaire d'EDF) et le niveau asymptotique atteint par ces derniers, plus particulièrement vis-à-vis des radionucléides de type produits de fission (PF) et d'activation (PA) vis-à-vis desquels les systèmes de traitement des effluents sont particulièrement efficaces.

Afin d'évaluer si l'objectif de faire tendre vers zéro, "close to zero" (CTZ), les rejets de radionucléides artificiels par voie liquide issus des installations nucléaires était atteint par les parties contractantes, des techniques statistiques permettant d'évaluer les tendances par rapport à la « ligne de base » pour les rejets, les concentrations dans l'environnement marin et les impacts dosimétriques ont été mises en œuvre. Il est à noter que l'évaluation de l'atteinte de l'objectif CTZ porte sur certains radionucléides caractéristiques dont la liste a été établie par le RSC. À noter que le tritium n'entre pas dans l'objectif CTZ dans la mesure où il est admis à ce jour qu'il n'existe pas de technique d'abattement efficace pour ce radionucléide aux niveaux d'activités volu-

miques mesurés dans les effluents liquides produits par les installations à un coût économiquement acceptable. Le tritium est cependant évalué afin de suivre l'évolution de ces rejets et juger des progrès réalisés.

La cinquième évaluation périodique qui porte sur la période 2010-2020 a conclu notamment que les évaluations et les données reportées régulièrement à OSPAR montrent :

- les progrès notables réalisés pour atteindre l'objectif ultime de « concentrations dans l'environnement de radionucléides artificiels proches du zéro » et ;
- que dans la majorité des cas, l'objectif ultime est probablement atteint.

L'objectif ultime de « concentrations dans l'environnement de radionucléides artificiels proches du zéro » étant reconduit comme un des objectifs stratégiques du NEAES (North-East Atlantic Environment Strategy) 2030, il conviendra au cours de la période actuelle de pérenniser et de poursuivre les efforts entrepris⁵.

Il est prévu que la France dépose et présente son prochain rapport périodique sur la mise en œuvre des MTD dans les installations nucléaires françaises aux membres du RSC pour l'année 2025.

⁵ https://www.ospar.org/site/assets/files/1200/briefing_note_neaes2030.pdf

Radioprotection des professionnels en radiologie conventionnelle et interventionnelle

Par Emmanuel MUSEUX

Radiologie et imagerie médicale - Groupe Irimed Nantes Saint-Nazaire, Société française de Radioprotection (Section Santé), groupe de travail Radioprotection du G4 (Conseil national professionnel de Radiologie et Imagerie médicale : Pr H. Ducou Le Pointe, Dr E. Museux, Pr B. Morel et Pr J.-F. Chateil).

Cet article fait le point sur l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants, associée à la réalisation d'actes d'imagerie médicale principalement diagnostiques, mais également thérapeutiques. Il traite de la source des rayonnements ionisants susceptibles d'exposer le personnel, des catégories professionnelles exposées et du niveau de leur exposition, ainsi que des moyens de se protéger. Il expose les principes de la réglementation et de sa mise en œuvre, et aborde la question des enjeux, plaidant pour proportionner raisonnablement l'allocation des ressources de protection aux risques réels.

Les principes de radioprotection

En milieu médical, la radioprotection concerne les différentes catégories de population, avec des implications sur l'environnement, sur le public, sur les patients, éventuellement sur les accompagnants non professionnels, ainsi que sur les personnels, qui peuvent avoir un statut salarié ou indépendant, dans un cadre public ou libéral, et qui sont l'objet de cet article. Toutes ces situations sont prévues par les textes législatifs et réglementaires, issus de la transposition de la directive Euratom 2013/59.

Pour les personnels, l'exposition aux rayonnements ionisants est justifiée par l'activité professionnelle, d'utilité sociétale indiscutable, mais doit être réduite au plus faible niveau raisonnablement possible (optimisation), et en tout état de cause fait l'objet de limitations, qui sont des doses efficaces corps entier, et des doses équivalentes sur les extrémités et les cristallins.

Quels sont les professionnels concernés ?

Les personnels concernés sont multiples : les médecins utilisant les rayonnements ionisants tout d'abord. Il est ici question des médecins spécialisés en radiologie et imagerie médicale (radiologues), mais les rayonnements ionisants sont également utilisés de manière très diverse, depuis des médecins généralistes dans des cabinets de montagne, jusqu'à des radiologues ou d'autres spécialistes médicaux ou chirurgicaux sur des installations lourdes. Les radiologues peuvent être assistés par des manipulateurs, qui sont également

des professionnels de santé spécifiquement formés à l'emploi des rayonnements ionisants. D'autres catégories de personnel peuvent également être amenées à rentrer dans des zones réglementées, par exemple des personnels d'autres services hors radiologie (Samu venant au scanner, aide au brancardage et à l'installation des patients), d'infirmiers non IBODE¹ et même parfois des infirmiers dans les blocs opératoires avec la pénurie de manipulateurs diplômés...

Conformément à l'article R.4451-129 du code du travail, l'IRSN, également en charge de gérer le Système d'Information de la Surveillance de l'Exposition aux Rayonnements Ionisants (SISERI), publie annuellement une synthèse des expositions professionnelles aux rayonnements ionisants, où l'on constate que les doses individuelles reçues en radiologie par le personnel sont extrêmement faibles ; mais qu'il s'agit de l'activité nécessitant le plus grand nombre de surveillances radiologiques, avec une exposition collective finalement non négligeable, comme le montrent la Figure 1 et le Tableau 1, extraits du bilan 2022 de l'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France.

Quels sont les sources d'exposition et comment se protéger ?

En dehors de l'exposition naturelle potentielle au radon sur laquelle nous reviendrons, l'exposition des professionnels en radiologie diagnostique et thérapeutique provient presque exclusivement de rayons X (dont les énergies sont comprises entre 20 et 150 kV selon les

¹ Infirmiers de bloc opératoire diplômés d'État.

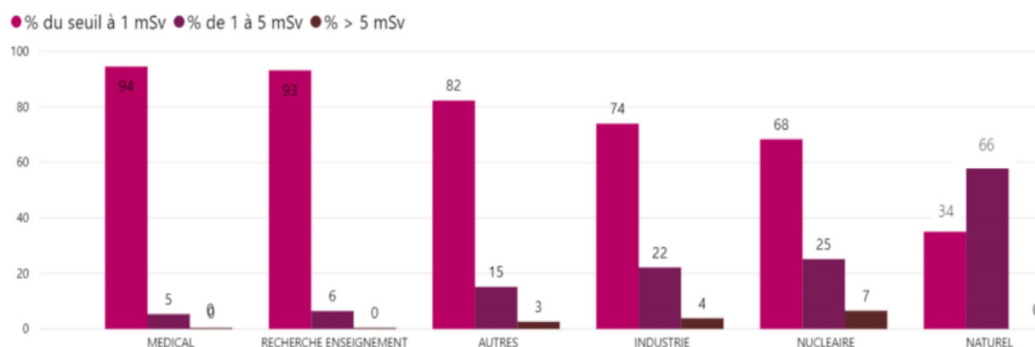


Figure 1 : Répartition de l'effectif exposé par domaine d'activités en fonction de différentes classes de dose efficace en 2022, en %, la catégorie médicale regroupant les domaines médical, dentaire et vétérinaire (Source : IRSN).

Tableau 1 : Surveillance de l'exposition externe (corps entier) dans le domaine des activités médicales (hors secteur dentaire) en 2023 (Source : IRSN).

Secteur d'activité	Effectif suivi	Dose collective (H.Sv)	Dose individuelle moyenne sur l'effectif exposé ^(a) (mSv)	Répartition des effectifs par classe de dose						
				< seuil	du seuil à 1 mSv	de 1 à 5 mSv	de 5 à 10 mSv	de 10 à 15 mSv	de 15 à 20 mSv	≥ 20 mSv
Radiologie interventionnelle	63 122	1,36	0,19	55 928	7 047	143	2	1	0	1
Radiodiagnostic	44 542	1,54	0,21	37 069	7 294	173	1	4	0	1
Médecine nucléaire	7 379	2,56	0,78	4 106	2 334	933	6	0	0	0
Radiothérapie	5 950	0,23	0,26	5 058	857	31	3	1	0	0
Logistique et maintenance	2 103	0,14	0,59	1 866	196	38	3	0	0	0
Autres ^(b)	26 854	0,92	0,31	23 885	2 795	153	17	4	0	0
Total	149 950	6,76	0,31	127 912	20 553	1 471	32	10	0	2

^(a) Dose individuelle moyenne sur l'effectif exposé = dose collective / nombre de travailleurs exposés à une dose supérieure au seuil d'enregistrement

^(b) La catégorie « Autres » regroupe les travailleurs des secteurs des laboratoires d'analyses médicales avec radio-immunologie, de la médecine du travail et dispensaires, de l'irradiation de produits sanguins, du transport de sources à usage médical et des secteurs d'activité non déterminés d'après la nomenclature ainsi que ceux du domaine médical dont le secteur d'activité n'a pas été renseigné par l'employeur.

appareillages), produits par des tubes commandés par des générateurs électriques. Il s'agit donc d'émissions intermittentes parfaitement maîtrisées. Quelques équipes radiologiques – peu nombreuses – réalisent des embolisations de tumeurs hépatiques non opérables par des microsphères marquées à l'Yttrium 90 pouvant exposer à un rayonnement β^- . L'imagerie dont nous parlerons maintenant dans cet article comprend la radiologie conventionnelle, utilisant des tables télécommandées, parfois des tables dédiées (par exemple pour les os, les poumons..., les radiographies au lit du patient) ; la radiologie dentaire, le Cône Beam, les installations EOS ; le scanner. Des pratiques interventionnelles radioguidées peuvent être effectuées sur des tables télécommandées, avec des scanners ou des arceaux, au sein des services de radiologie ou au bloc opératoire, parfois dans des installations hybrides de plus en plus sophistiquées.

En France, 80 millions d'actes sont réalisés chaque année délivrant une dose efficace < 0,1 mSv pour environ 50 % des patients exposés, notamment en radiologie dentaire et des extrémités, déterminant des doses particulièrement faibles et, dans la quasi-totalité des cas, non détectables pour les personnels.

L'exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en radiologie provient de deux sources principales : d'une part le rayonnement diffusé par le patient exposé (le rayonnement rétro diffusé représente entre 30 et 40 % du rayonnement incident, ce qui est donc très loin d'être négligeable) ; la meilleure protection des personnels passe donc par celle des patients ! D'autre part le rayonnement de fuite autour de l'installation radiogène. En pratique, et comme on l'a vu dans le Tableau 1 de l'IRSN ci-dessus, l'exposition des professionnels et en premier lieu des manipulateurs de radiologie est en dessous du seuil de détection en radiologie conventionnelle, sauf s'il faut absolument maintenir des

patients particuliers (par exemple pédiatrie, gériatrie) nécessitant une présence en salle, ce qui peut souvent être évité à l'aide de matériels. Le sujet est évidemment plus délicat en radiologie interventionnelle, où les enjeux les plus marquants concernent les mains et les cristallins.

En médecine comme dans les autres domaines, les grands principes de protection s'appliquent, en s'éloignant autant que possible de la source d'exposition (distance), en réduisant la durée d'exposition (temps), et en interposant des écrans – autant que possible des protections collectives et si nécessaire des protections individuelles ajoutées. En radiologie, les équipements de protection collective sont des paravents, des bavoulets, etc. ; et les équipements de protection individuelle sont représentés par des tabliers, des gants, des lunettes, des caches thyroïdes, tous dits plombés, dont la forme et le coefficient d'atténuation sont adaptés à l'activité pour le meilleur équilibre entre la protection et la gêne qu'ils apportent. Par exemple, un opérateur effectuant des pratiques interventionnelles radioguidées au scanner doit au mieux sortir de la salle lors des acquisitions de repérage, néanmoins il est parfois préférable qu'il se contente de passer derrière le statif de l'appareil, limitant les déplacements, avec un temps d'intervention plus court pour le patient et moins de risque septique en limitant les allées et venues avec des gants stériles. Autre exemple, un tablier de grande taille, épais, sera protecteur mais très lourd, avec un opérateur qui souffrira de la chaleur, transpirera sous son équipement, souffrira de lombalgies et de contractures... On voit déjà à ce niveau qu'il existe toujours un compromis entre les protections mises en œuvre et la possibilité même de réalisation de l'activité radiologique.

Organisation et mise en œuvre de la radioprotection

La radioprotection découle de la législation et de la réglementation, venant en transposition de la directive Euratom 2013/59 notamment dans le code du travail ;

celui-ci était initialement pensé pour les salariés mais des ajustements ont été réalisés pour prendre en compte les travailleurs indépendants. De plus, l'interprétation des textes est aidée sur certains sujets par des questions-réponses, publiées par le ministère du Travail sur son site internet.

La réglementation met en avant la responsabilité de l'employeur, qui est décisionnaire de l'étendue des moyens mis en œuvre, dans un cadre qui reste strict. Elle est extrêmement évolutive, les données présentées sont à jour lors de la rédaction en novembre 2024.

Tout commence par une évaluation des risques avec obligation de désigner un Conseiller en RadioProtection (CRP) si au moins une des conditions suivantes est remplie : il existe un classement des travailleurs et donc une surveillance dosimétrique individuelle ; un zonage de radioprotection au radon est mis en place ; des vérifications initiales et périodiques sur les sources ou les locaux doivent être mis en place. Le code du travail, très remanié par les décrets 2018-437 et 438, prévoit de nombreuses dispositions.

L'aménagement des lieux de travail s'appuie sur la détermination de zones délimitées. Des limites sont fixées concernant l'organisme entier, avec des zones publiques, des zones surveillées, des zones contrôlées vertes, jaunes, oranges, et rouges, ce zonage reposant sur la potentielle dose ou le potentiel débit de dose que l'on peut y recevoir, avec des contraintes associées croissantes (voir la Figure 2). D'autres zonages existent également, pour les extrémités, le cristallin et pour le radon. Il s'agit également des conditions d'aménagement, qui requièrent une conformité soit à la norme NFC 15-160 + NFC 15-161, soit à la décision 2013-DC-349 de l'ASN, ou le plus souvent à la décision 2017-DC-591 de l'ASN, puisque toute modification (même un changement de régime administratif) oblige à respecter le référentiel le plus récent.

Le code du travail prévoit les vérifications de l'efficacité des moyens de prévention, initiales et périodiques, des

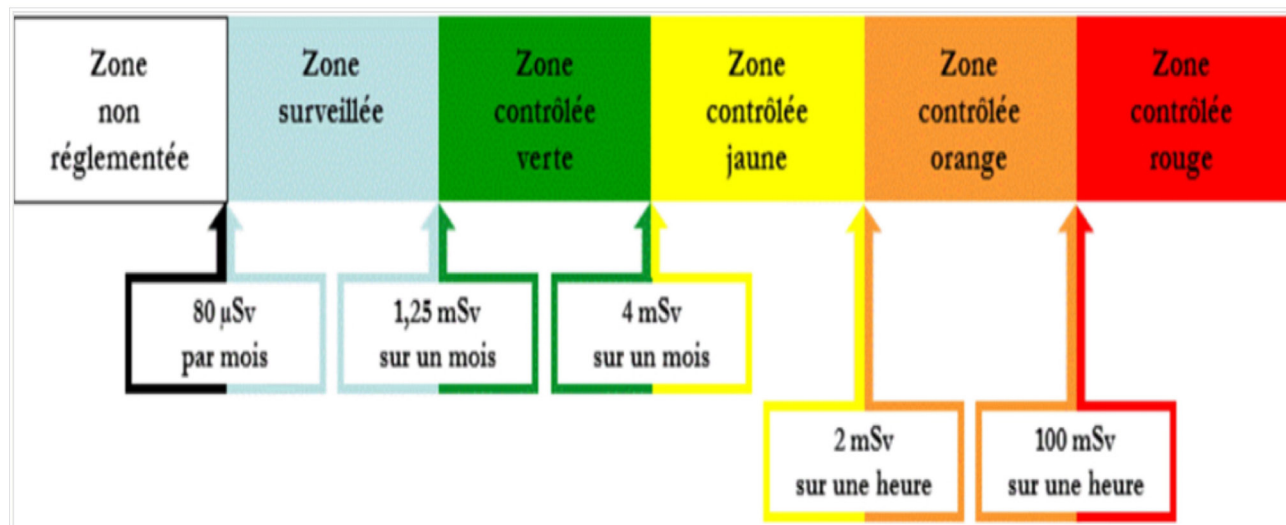


Figure 2 : Limites des doses pour l'organisme entier selon la délimitation des zones du lieu de travail (Source : INRS).

équipements de travail, des lieux de travail et des instruments de radioprotection.

Il cadre les conditions d'emploi des travailleurs avec l'évaluation des risques, l'analyse des postes de travail, le classement des travailleurs. Ce dernier domaine est complexe, le code du travail permettant d'intervenir dans certaines zones réglementées sans que le travailleur soit classé mais à condition d'avoir mis en place une surveillance radiologique ; les contraintes réglementaires sont moindres mais ce cadre ne peut s'appliquer que pour les personnels les plus faiblement exposés ; dans les autres cas, le travailleur sera classé, catégorie A ou B, et bénéficiera d'une surveillance dosimétrique individuelle. Celle-ci est également modulée par le zonage, c'est-à-dire l'ambiance radiologique potentiellement rencontrée sur le lieu de travail.

Les travailleurs doivent bénéficier d'informations (par exemple préalablement à leur prise de poste) et de formations régulières, comme la formation obligatoire délivrée par le CRP à sa propre radioprotection en fonction de son poste de travail, formation qui doit être renouvelée au moins tous les trois ans, en cas d'arrêt de travail de plus de 21 jours et à chaque changement dans le poste de travail.

Les travailleurs (salariés et non-salariés) doivent bénéficier d'une surveillance de leur état de santé, dans le cadre d'un suivi individuel renforcé (SIR) s'il s'agit d'un travailleur classé. Deux cas particuliers de travailleurs doivent être soulignés :

- les femmes enceintes peuvent travailler dans des postes faiblement exposants : l'employeur doit s'assurer que la dose reçue au fœtus n'excède pas 1 mSv entre la déclaration de grossesse à l'employeur et l'accouchement, la femme enceinte ne pouvant pas être classée plus que catégorie B ;
- les travailleurs de moins de 18 ans doivent également être classés au maximum en catégorie B.

Quels sont les enjeux accidentels en radiologie ?

Pour les professionnels, qui dans la quasi-totalité des cas restent hors faisceau primaire de rayons X, une exposition accidentelle n'a pas de conséquence mesurable. Quelques exemples, issus d'expérience personnelle ou de la base RELIR du CEPN :

- environ 7 μSv pour une manipulatrice qui s'est trouvée en salle de scanner lors de son déclenchement intempestif (problème informatique de commande de la machine) ;
- interstice au contact d'une protection vitrée au pupitre de commande d'un scanner, selon un faisceau extrêmement étroit dans un contexte d'émission intermittente, aucune dose surajoutée sur l'ensemble du personnel travaillant sur ce site ;
- exposition dentaire inutile de 26 μSv pour tester un appareil de radiologie dentaire !

- exposition de 14,4 μSv d'un radiologue ayant oublié de porter son tablier plombé.

L'expérience montre que les doses pour le personnel, lors de ces situations incidentelles, restent très faibles dans le domaine de la radiologie. Elles sont susceptibles d'être plus importantes en cas de comportement inadapté avec méconnaissance des prescriptions réglementaires, défaut de protection, défaut de paramétrage du dosimètre opérationnel et de ses alarmes, etc. Les inspections de l'ASN ont montré un certain nombre de non-conformités principalement dans les blocs opératoires avec une connaissance et une application de la réglementation nettement meilleure dans les services de radiologie. Une fragilité est cependant apportée par des organisations de plus en plus complexes en termes de possession des parts de propriété et de dilution des responsabilités dans le cadre de la financiarisation (acquisition de structures de soins, d'imagerie médicale par un groupe financier sans compétence spécifique dans le domaine dédié). De même, les évolutions réglementaires (non concertées) qui ont permis l'externalisation des fonctions de CRP, qui ont permis de nommer comme responsables de l'activité nucléaire des personnes morales, et enfin qui interdisent aux employeurs d'être CRP, ont éloigné les radiologues notamment les libéraux de la gestion quotidienne de la radioprotection. Il est très important de répartir l'allocation des moyens humains, matériels et financiers en fonction des enjeux réels et non fantasmés de la radioprotection, sur la base d'études objectives.

Assurance de la qualité en radiologie

Celle-ci est obligatoire depuis la décision ASN 2019-DC-660 transposée dans le code de la Santé publique. Elle concerne principalement les patients mais n'est pas sans incidence finalement sur les travailleurs par exemple avec l'exigence d'habilitation.

De plus, elle oblige à tracer tous les événements indésirables survenus dans le domaine de la radioprotection. Pour les travailleurs, les critères sont les suivants :

- dépassement d'un quart d'une des limites réglementaires de dose en une seule opération ;
- dépassement d'une limite de dose.

Réduction de l'exposition radon

Pour les centres d'imagerie et services de radiologie implantés en rez-de-chaussée ou en sous-sol dans des zones radon 2 et 3 au sens de la carte de l'IRSN, il existe une obligation de mesure de l'activité radon (installation en hiver – lorsque l'on aère moins – d'un dosimètre). L'activité doit être la plus basse possible et en tout état de cause < 300 Bq par m^3 , sinon des actions de remédiation doivent être entreprises. Si malgré tout un travailleur est susceptible d'être exposé à plus de 6 mSv/an du fait du seul radon, un zonage radon doit être mis en place.

Tableau de maladies professionnelles

Pour mémoire, il existe le tableau n°6 concernant les maladies professionnelles liées aux rayonnements ionisants. Ce tableau est ancien (1984) et plus forcément très adapté aux connaissances et protections des activités actuelles.

En conclusion

Comme on le voit, dans le domaine de la radiologie, les expositions aux rayonnements ionisants sont particulièrement faibles et bien maîtrisées, avec des risques très limités même en situation dégradée. Les enjeux les plus importants sont rencontrés au bloc opératoire et lors des pratiques interventionnelles radioguidées avan-

cées (de grade B, C ou D). Il est cependant très important d'écouter les représentations professionnelles pour que les évolutions réglementaires soient bien corrélées aux réalités du métier, pour une juste allocation des ressources, et afin de continuer à approfondir la culture de radioprotection y compris des personnels, qui est un des aspects de la qualité de prise en charge médicale.

Les enjeux des expositions médicales répétées aux rayons X pour les patients

Par Michel BOURGUIGNON

Professeur émérite de l'Université Paris-Saclay (UVSQ) et
Rédacteur en chef de la revue *Radioprotection* (SFRP)

La radiologie médicale utilise les rayons X qui exposent potentiellement à des effets radio-induits (risque oncogène notamment) comme pour tous les rayonnements ionisants (RI). La répétition des examens radiologiques X constitue donc une problématique particulière du fait de l'addition des doses. Le risque de cancer est très faible aux faibles doses. La balance bénéfique / risque est en faveur du bénéfice de la réalisation des examens pour les patients. Les radiologues sont des médecins responsables formés à la radioprotection des patients et ont développé des guides de bonnes pratiques au niveau national. Une attention particulière doit être portée aux patients ayant une réponse anormale aux RI, et cela se réalise dans le cadre du développement de la médecine personnalisée.

L'imagerie médicale (radiologie et médecine nucléaire) et les examens biologiques de laboratoire sont au cœur de la pratique médicale et largement utilisés car indispensables pour le diagnostic des maladies et leur prise en charge. L'imagerie médicale dispose de trois modalités techniques : la radiologie et la tomodensitométrie avec les rayons X, l'imagerie par résonance magnétique (IRM) qui utilise des champs magnétiques et l'échographie ultrasonore. Les rayons X utilisés ont une énergie de 30 à 130 kV et sont accompagnés des problématiques de risque associées aux rayonnements ionisants (RI), en particulier les cancers, notamment du fait de la répétition des examens. Quels sont les enjeux pour les patients explorés par ces expositions médicales répétées aux rayons X, sachant que le modèle de relation linéaire sans seuil reste, faute de mieux, un bon modèle opérationnel d'évaluation du risque en fonction de la dose de RI, y compris aux faibles doses (Laurier et al., 2023) ?

La radiologie X

La radiologie X conduit à une exposition intentionnelle aux RI. Cette pratique est donc encadrée par des règles rigoureuses (code de la santé publique), sous la responsabilité du radiologue, en application des principes de la radioprotection élaborés par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) : la justification et l'optimisation des expositions auxquelles s'ajoute la possibilité de substitution par une autre technique. Le conseil professionnel de la radiologie française : le G4, qui rassemble le Collège des Enseignants en Radiologie de France (universitaires), la Fédération Nationale des Médecins Radiologues

(médecins libéraux), la Société Française de Radiologie (société savante SFR) et le Syndicat des Radiologues Hospitaliers, a élaboré au début des années 2000 deux guides professionnels mis à jour régulièrement :

- un guide du bon usage des examens d'imagerie médicale (GBU) pour répondre au principe de justification mis à jour en 2013, puis étendu à toutes les spécialités médicales en 2023 et dénommé guide d'Aide à la demande d'examens de radiologie et imagerie médicale (ADERIM) ;
- un guide des procédures de radiologie pour leur meilleure réalisation possible et pour répondre à la question de l'optimisation des expositions aux rayons X (RX), sachant qu'il n'y a pas de limitation des doses délivrées en imagerie radiologique, dans la limite des bonnes pratiques car les images doivent avoir une qualité suffisante pour permettre un diagnostic en toute sécurité et les paramètres de réalisation dépendent des caractéristiques des patients, par exemple leur corpulence.

Le guide ADERIM est à l'attention des médecins généralistes pour les guider dans leurs demandes d'examens de radiologie et d'imagerie médicale. Il est édité par la SFR et a été réalisé en collaboration avec le Collège de la Médecine Générale (CMG). Ce guide a été réalisé dans le but d'optimiser la pertinence des demandes d'examens d'imagerie. Pour chaque situation clinique, le guide mentionne les indications des différents examens d'imagerie (radiologie X, IRM et échographie), et le niveau de doses pour les examens RX. IRM et échographie n'exposent pas à des RI et peuvent être utilisées comme alternative à la radiologie dans des indications particulières. De ce fait, le médecin

demandeur de l'examen d'imagerie est guidé vers les examens non irradiants si ceux-ci sont applicables à la pathologie en question. La numérisation progressive de tous les échanges au sein du dossier médical partagé : « Mon Espace Santé » doit permettre à court terme d'intégrer la demande d'imagerie au sein de l'espace de travail numérique des cliniciens, avec possibilité d'aide informatisée à la pertinence de cette demande.

La répétition des examens de radiologie X

Les besoins de la pratique médicale conduisent à répéter chez certains patients quelques examens dans le temps, et avec un risque d'autant plus grand que les doses sont élevées et que le sujet est plus jeune. Bien sûr, l'indication comme la répétition de ces examens sont encadrées par le guide ADERIM. Mais il faut souligner que le choix d'un examen radiologique dépend d'une analyse bénéfice vs risque qui prend en compte l'importance de réaliser l'examen pour une bonne prise en charge d'un patient à risque d'une pathologie potentiellement grave, mais aussi le risque de ne pas le réaliser et de manquer un diagnostic.

La CIPR a examiné la question de la répétition des doses de RI et estime actuellement que le risque associé à une répétition des expositions aux RI est plus faible que celui d'une seule exposition pour la même dose globale ; un coefficient 2 de réduction de risque est estimé mais fait toujours l'objet de débats (Clement *et al.*, 2022).

Si en pratique, le bénéfice dépasse très largement le risque, les épidémiologistes nous indiquent que les faibles doses de rayonnements ne sont pas sans risque. Par exemple, l'excès de tumeurs cérébrales et de leucémies chez les enfants qui ont eu un scanner est estimé à 1/10 000 dans les 10 ans suivant l'exposition (Hauptman *et al.*, 2023 ; Bosch de Basea Gomez *et al.*, 2023). Les examens de dépistage comme celui du cancer du sein par mammographie conduisent à une répétition des expositions des seins tous les 2 ans entre 50 et 75 ans dans le cadre du dépistage national (cela concerne environ 7 millions de femmes en France). Le risque de cancer du sein associé à ces expositions n'est pas nul mais nous savons qu'il est faible : le bénéfice de diagnostiquer un cancer du sein précocement est plus grand que le risque de contribuer à l'apparition tardive d'un cancer du sein (Pauwels *et al.*, 2016).

Compte tenu des incertitudes liées au risque de cancer du fait d'expositions répétées aux RI, les radiographies systématiques inutiles au sens de la justification ont été stoppées. Par exemple, de nombreuses radiographies systématiques pré-opératoires, la radio pulmonaire chez les fonctionnaires dès qu'ils changeaient d'affectation et la radio pulmonaire de la médecine du travail (toutes deux pratiquées dans le contexte de la recherche de la tuberculose au début du XX^e siècle), la radio annuelle systématique du rachis chez les jeunes sportifs à la recherche d'un spondylolisthésis congénital, avantageusement remplacée par une seule IRM si le médecin du sport décide de la pertinence de cet

examen. De même, les radiographies du bassin chez les nouveau-nés ont été avantageusement remplacées par l'échographie de hanche pour le dépistage des dysplasies développementales de cette articulation.

Des situations spécifiques de risque

Il convient d'évoquer quelques situations spécifiques de risque de répétition des examens radiologiques pour illustrer la problématique mais sans chercher à être exhaustif.

Nous ne sommes pas égaux devant la sensibilité individuelle aux rayonnements ionisants (RX inclus), et près de 20 % de la population serait concernée (Foray *et al.*, 2016). De plus, les personnes qui présentent une réponse anormale vis-à-vis des RI ont une fragilité de signalisation et de réparation des lésions de l'ADN liées aux RI, mais aussi de celles qui sont dues à d'autres génotoxiques (pesticides, alcool...). Ces génotoxiques additionnent leurs effets aux faibles doses.

Dans le cadre du dépistage du cancer du sein, environ 50 % des femmes françaises, parfois très jeunes, ont des mammographies avant l'âge de 50 ans (avant même le début du dépistage national) et pour 25 % d'entre elles alors qu'elles n'ont ni antécédent familial ni signe clinique (Britel, 2020). Les raisons de cette situation ne sont pas actuellement connues avec précision. Une attention particulière doit être portée aux femmes à risque familial de cancer du sein (mutations du gène BRCA) qui présentent une fragilité particulière aux faibles doses de RI délivrées lors de la mammographie, accrue lors de la répétition de doses (Colin *et al.*, 2011). Pour cette population, le dépistage fait appel aux ultrasons et surtout à l'IRM mammaire de première intention complétée par une mammographie avec une seule incidence oblique axillaire.

Les enfants et adolescents souffrant de scoliose bénéficient de radiographies périodiques du rachis pour optimiser leur prise en charge. La question de la répétition des examens est moins prégnante aujourd'hui (elle l'était avec l'exposition des seins chez la jeune fille en pleine puberté) du fait de la disponibilité des appareillages EOS. Ces appareillages de radiologie dédiés permettent l'acquisition simultanée de deux images radiographiques du squelette, de face et de profil, avec de faibles doses de RX. Le système EOS utilise des chambres à fil de grande dimension, le principe de ces détecteurs gazeux ayant été inventé par Georges Charpak.

Il convient de ne pas oublier que la majorité des examens de radiologie sont réalisés chez des personnes âgées ou présentant une espérance de vie limitée du fait d'une pathologie grave. Mais les progrès de la médecine ont transformé l'espérance de vie de patients avec des pathologies cardiaques ou cancéreuses et les principes de radioprotection doivent être respectés chez ces personnes, chez qui le risque de cancer augmente de toute façon exponentiellement avec l'âge.

Conclusion

L'état des connaissances sur les effets des RI, y compris aux faibles doses, invite à rester vigilant dans la répétition des examens radiologiques utilisant des rayons X, en particulier pour le scanner. Le risque de cancer radio-induit est très faible même s'il n'est pas nul. Une attention particulière doit être portée vis-à-vis des enfants et des personnes à risque qu'il conviendrait de dépister afin de les faire bénéficier de techniques alternatives (échographie et IRM) quand cela est possible.

Les radiologues connaissent ces questions, savent y faire face en pesant les bénéfices et les risques et prennent leurs responsabilités. Les radiologues sont formés à la radioprotection des patients, ont développés des guides spécifiques de bonnes pratiques pour eux-mêmes et pour les médecins demandeurs d'examens afin que soient respectés les principes de justification et d'optimisation. Les examens de substitution à la radiologie X que sont l'IRM et l'échographie sont disponibles en France même si le nombre des appareils d'IRM mériterait d'être significativement augmenté pour mieux répondre à la demande.

Références

ADERIM (2024), « Guide d'Aide à la demande d'examens de radiologie et imagerie médicale (ADERIM) », disponible sur le site web de la Société Française de Radiologie et d'Imagerie Médicale, <https://aderim.radiologie.fr/>

BOSCH DE BASEA GOMEZ M. *et al.* (2023), "Risk of hematological malignancies from CT radiation exposure in children, adolescents and young adults", *Nature Medicine*, 29, pp. 3111-3119.

BRITEL (2020), *Analyse psychosociale de la radioprotection en mammographie de dépistage : Perspectives pour l'IRSN*, Thèse de doctorat de l'Université Lumière Lyon 2, <https://theses.fr/2020LYSE2102>

CLEMENT C., RÜHM W. & HARRISON J. (2022), « Maintenir les recommandations de la CIPR adaptées aux besoins », *Radioprotection*, 57(2), pp. 93-106.

CODE DE LA SANTÉ PUBLIQUE (2024), « Chapitre III : Rayonnements ionisants (articles R.1333-1 à R.1333-175) ».

COLIN C., DEVIC C., NOEL A. *et al.* (2011), "DNA double-strand breaks induced by mammographic screening procedures in human mammary epithelial cells", *Int. J. Radiat. Biol.*, 87, pp. 1103-1112.

FORAY N, BOURGUIGNON M & HAMADA N. (2016), "Individual response to ionizing radiation", *Mut. Res.*, 770, pp. 369-386.

HAUPTMAN M. *et al.* (2023), "Brain cancer after radiation exposure from CT examinations of children and young adults: results from the EPI-CT cohort study", *Lancet Oncology*, 24, pp. 45-53.

LAURIER D., BILLARAND Y., KLOKOV D. & LEURAUD K. (2023), « Fondements scientifiques de l'utilisation du modèle linéaire sans seuil (LNT) aux faibles doses et débits de dose en radioprotection », *Radioprotection*, 58(4), pp. 243-260.

PAUWELS E. K. J., BOURGUIGNON M. & FORAY N. (2016), "Breast Cancer Induced by X-Ray Mammography Screening? A Review Based on Recent Understanding of Low-Dose Radiobiology", *Med Princ Pract*, 25, pp. 101-109, doi: 10.1159/000442442

Enjeux des doses délivrées en tomодensitométrie

Par Jean-François CHATEIL

Professeur émérite de radiopédiatrie, Université de Bordeaux, groupe de travail Radioprotection du G4 (Conseil national professionnel de Radiologie et Imagerie médicale : Pr H. Ducou Le Pointe, Dr E. Museux, Pr B. Morel et Pr J.-F. Chateil).

La tomодensitométrie est une modalité d'imagerie médicale très performante, de grande utilité clinique et donc très largement utilisée. Mais elle est aussi celle qui délivre les doses les plus élevées pour atteindre 74 % de toutes les doses médicales. Les radiologues sont donc très vigilants en matière de radioprotection, notamment vis-à-vis des examens scanographiques. L'avènement de nouvelles technologies (protocoles basse dose, reconstruction informatique aidée par IA, scanner à comptage photonique) constitue de ce point de vue un progrès significatif.

Principes de la tomодensimétrie

La tomодensitométrie (TDM, scanner en langage courant, CT pour *Computed Tomography* en anglais) a représenté un progrès majeur en imagerie médicale. La principale limitation de la radiographie conventionnelle est liée à son principe : il s'agit d'une imagerie de projection en 2 dimensions des structures 3D du corps, se superposant sur l'image résultante. La TDM, mise au point par Hounsfield (1972) permet la visualisation « en coupe » d'une portion du corps, en vues axiales natives ou quel que soit le plan d'élection par un processus de reconstruction informatisée (voir la Figure 1). L'acquisition se fait à partir d'expositions axiales multiples du patient positionné entre le tube à rayons X (RX) et les couronnes de détecteurs placées en regard et en rotation synchrone, la table d'examen effectuant une translation progressive. Le traitement informatisé s'appuie sur le théorème de Radon¹ et permet une

reconstruction d'images en coupes à partir de chacune des images enregistrées (les projections) dont l'information est l'atténuation du faisceau de RX selon la densité des tissus. Chaque pixel de l'image en coupe a ainsi une valeur résultante d'atténuation de chaque voxel (volume élémentaire matriciel du sujet), exprimée sur l'échelle définie par Hounsfield. L'examen peut être sensibilisé par une injection de produit de contraste (PdC) à base d'iode, à distribution vasculaire puis interstitielle, permettant d'observer un rehaussement éventuel en densité de la structure étudiée.

Les scanners actuels intégrant plusieurs couronnes contiguës de détecteurs (jusqu'à 256) permettent d'imager avec une excellente résolution spatiale toute une région anatomique en quelques secondes, temps de reconstruction inclus. L'imagerie spectrale permet une analyse complémentaire des pics d'absorption des



¹ https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9or%C3%A8me_de_Radon

Figure 1 : Coupe axiale de l'abdomen et reconstructions dans le plan coronal et sagittal (Source : J.-F. Chateil).

rayons X selon la nature chimique des atomes rencontrés (calcium, iode...).

Appréciation de l'exposition et dosimétrie

Volumétrie des examens TDM

L'apport diagnostique considérable des appareils TDM a conduit à une large diffusion, contribuant à l'augmentation de l'exposition de la population aux rayonnements ionisants artificiels. Le nombre d'appareils TDM est, en France, de 21/million d'habitants (SNITEM, 2023).

En France, les examens tomodensitométriques représentent à eux-seuls 13 % des actes de radiologie médicale mais sont responsables de 74 % de la dose individuelle totale en rapport avec les expositions médicales (1,5 mSv/an en moyenne). Celles-ci contribuent pour 23 % à la totalité de l'exposition moyenne naturelle et artificielle de la population, estimée à 6,5 mSv/an (prise en compte du nouveau coefficient de dose radon) (IRSN, 2019). Mais pour un patient donné, la dose médicale est en moyenne deux fois plus élevée car une personne sur deux n'a pas d'exposition médicale chaque année.

Paramètres de mesure et conversion en dose efficace

Pour un examen TDM donné, l'appréciation de la dose délivrée au patient fait appel à un calcul prenant en compte les paramètres techniques de l'examen (tension du tube, milliampères, épaisseur de coupe...) et la mesure normalisée de l'exposition, réalisée sur fantôme lors du contrôle qualité périodique obligatoire (protocole conforme aux recommandations de l'ANSM). Ceci permet de définir un index de dose scannographique volumique (IDSV, ou $CTDI_{vol}$ en anglais) pour une coupe, que l'on peut factoriser par la longueur explorée chez un patient donné, définissant ainsi le produit dose x longueur (PDL). Ces deux paramètres figurent dans le compte rendu du radiologue, dont c'est une donnée obligatoire (arrêté du 22 septembre 2006). La dose absorbée par les tissus de la région explorée est de l'ordre de 20 mGy pour un seul examen. L'approximation de la dose efficace totale reçue par le patient tient compte de la région anatomique explorée, estimée à 1 mSv pour un examen du crâne et jusqu'à 10 mSv pour un examen thoraco-abdominal comportant une seule acquisition. Ces valeurs sont susceptibles de varier selon la morphologie du patient et le type d'examen réalisé, certains nécessitant plusieurs acquisitions successives (étude dynamique de la perfusion d'un organe après injection de PdC).

Effets potentiels et reconnus des RX en tomodensitométrie

Effets déterministes

Compte tenu des doses, le risque de voir apparaître un effet déterministe (mort cellulaire induite) est inexistant

pour un examen correctement conduit. Néanmoins, des effets secondaires cutanés ont été rapportés lors de mauvaises manipulations de l'appareil induisant un surdosage cutané manifeste : cas d'alopécie observés lors d'acquisitions répétées lors d'études de la perfusion cérébrale. Par ailleurs, le risque tératogène peut apparaître pour une dose à l'utérus supérieure à 100 mGy au cours des 9 premières semaines de la grossesse. Ce seuil théorique est au-delà des doses délivrées normalement par un examen TDM, mais doit d'une part être pris en compte pour limiter l'exposition (voir la Figure 2) ou substituer l'examen avec une autre technique si la grossesse est connue, et d'autre part faire une évaluation dosimétrique précise si la grossesse est découverte secondairement : ceci constitue une des situations les plus fréquentes déclarées par les radiologues à l'ASN en tant « qu'Événement Significatif dans le domaine de la Radioprotection », le plus souvent sans conséquence péjorative.

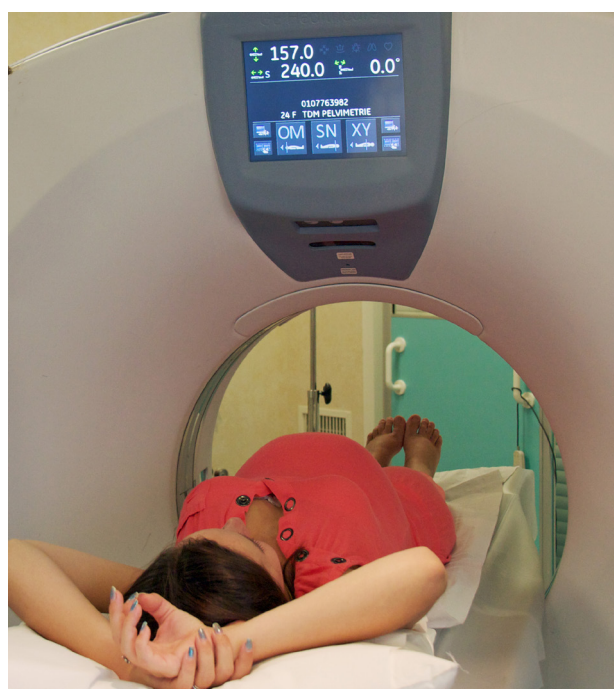


Figure 2 : Examen TDM pelvimétrique avant l'accouchement chez une femme enceinte, nécessitant une adaptation des paramètres : exposition de l'utérus < 1 mSv, sans risque pour le fœtus (Source : J.-F. Chateil).

Effets stochastiques

La probabilité de voir apparaître des anomalies cellulaires tardives secondaires à des cassures double-brin de l'ADN est proportionnelle à la dose. Le risque de mutation génétique affectant la descendance n'est pas documenté. En revanche, l'apparition d'affections tumorales malignes à long terme est certaine pour les doses supérieures à 100 mSv ; la notion de dose-seuil minimale fait toujours l'objet de débats. Compte tenu de la dose délivrée par un examen TDM, ce risque est très faible mais il n'est pas nul, comme le montrent les études récentes de larges populations pédiatriques réputées plus sensibles : le risque de voir apparaître une tumeur cérébrale (Hauptman *et al.*, 2023) ou une

hémopathie maligne (Bosch de Basea Gomez *et al.*, 2023) dans les 10 ans suivant l'examen est estimé à 1 pour 10 000 examens.

Contrôle des doses délivrées

La connaissance du risque stochastique est antérieure à l'avènement de la TDM, et de ce fait, la radioprotection des patients fait depuis très longtemps partie des préoccupations du radiologue. L'observation constante des pratiques et de l'évolution des niveaux d'exposition des patients du fait de l'usage de la tomodensitométrie au cours des 20 dernières années a permis de mettre en place une réglementation conforme aux directives Euratom 97/43 puis 2013/59 et une formation spécifique. Les mots clés utilisés dans ces textes et qu'il faut retenir sont : justification, substitution et optimisation.

Justification de l'examen TDM

L'apport diagnostique de la TDM est capital dans la prise en charge de très nombreuses pathologies (poly-traumatismes, bilans d'extension et de surveillance de nombreuses affections tumorales, etc.). Dans le contexte de l'urgence, la TDM contribue avec acuité à orienter le diagnostic et à procéder à la hiérarchisation de la prise en charge des patients. Le principe fondamental est d'arriver à un consensus entre le médecin clinicien et le radiologue mais aussi avec le patient afin de tenir compte de la balance bénéfice/risque de l'examen TDM (ce qui inclut aussi de peser le risque de ne pas réaliser l'examen et de manquer un diagnostic). Le guide d'aide à la demande d'examens de radiologie et imagerie médicale (ADERIM), développé et validé par la Société Française de Radiologie et le Collège de médecine générale, est disponible en ligne et permet d'orienter la demande d'imagerie pour les situations cliniques les plus fréquentes. Le respect de la justification de l'acte a fait l'objet d'études européennes (European Commission, 2024). Les limites de cet exercice sont liées à la pression parfois exercée par le clinicien et/ou le patient pour la réalisation d'un examen, et aux potentielles difficultés de dialogue, le radiologue restant théoriquement *in fine* responsable de l'acceptation de la demande.

Substitution par un autre type d'examen

Lors de la validation de la pertinence de l'acte d'imagerie, il est toujours possible d'apprécier le remplacement d'un examen TDM par une autre méthode d'imagerie ne faisant pas appel aux RX. Les 2 techniques alternatives sont l'échographie et l'imagerie par résonance magnétique, mais ces 3 techniques ne sont pas équivalentes car, basées sur des principes physiques différents, elles ne montrent pas les mêmes choses, n'ont pas les mêmes performances selon les organes explorés et ne sont pas toujours substituables.

Échographie

Cette technique étudie la propagation, l'atténuation et la réflexion d'un faisceau d'ultrasons, à travers les tissus de l'organisme, visualisant les interfaces acoustiques. Ses avantages sont l'innocuité, sa facilité de mise en

œuvre, la grande disponibilité des appareils, son coût modéré. Elle a fait la preuve de son apport diagnostique dans de nombreuses pathologies (abdominales, gynéco-obstétricales, appareil locomoteur, etc.). C'est un examen « en temps réel » dont la réalisation demande maintenant plus de temps que la durée d'un TDM, avec souvent des compétences spécifiques liées à la disponibilité, la spécialisation et l'expertise du radiologue. Cela constitue un frein à la substitution ; par ailleurs, certains diagnostics échographiques demandent tout de même une confirmation par un TDM dont la lecture secondaire des images paraît plus facile et standardisée.

Imagerie par résonance magnétique (IRM)

Elle fait appel aux propriétés électromagnétiques du proton (spin) de l'atome d'hydrogène. Le sujet est placé dans un champ magnétique statique très puissant (1,5 à 3 Tesla), permettant l'orientation des spins dans l'axe du champ. L'excitation de chaque proton est réalisée par une onde de radiofréquence. Une fois l'excitation arrêtée, la relaxation des protons restitue le surplus d'énergie par une onde de fréquence spécifique enregistrée par une antenne placée dans l'aimant, et traitée de façon informatique. En simplifiant, les images d'IRM sont d'abord basées sur la densité des protons, c'est-à-dire de l'eau des tissus, ainsi que sur leurs interactions. L'IRM, technique sans radiation ionisante, est d'introduction plus récente (années 1980) et présente un apport diagnostique dans la majorité des spécialités médicales. Sa diffusion reste un peu moins grande que pour la TDM : contraintes d'installation plus lourdes, coût initial et de maintenance, durée moyenne d'acquisition d'une série qui se compte en minutes et pas en secondes et compétence des professionnels. Le nombre d'appareils IRM est de l'ordre, en France, de 19/million d'habitants (SNITEM, 2023) et du fait du temps de réalisation assez long, cet examen est moins disponible que ne le souhaiteraient les praticiens, tant cliniciens que radiologues. Le choix entre TDM et IRM dépend avant tout de l'indication clinique (en neurologie par exemple, l'IRM est irremplaçable), de l'âge du patient pour éviter l'exposition aux RX chez le sujet jeune, mais également du délai d'obtention du rendez-vous, des contre-indications éventuelles à l'IRM pour le patient (matériel ferromagnétique, implants actifs tels que pacemaker, obésité...). De nouveau, le dialogue clinicien-radiologue doit permettre d'adapter au mieux le choix de l'examen à réaliser, au moindre risque et au meilleur bénéfice diagnostique.

Optimisation de l'examen TDM

Le choix de réaliser un examen TDM étant arrêté, il est essentiel que celui-ci soit mené au mieux sur le plan qualitatif et au moins-disant sur le versant dosimétrique, tout en permettant bien sûr le diagnostic attendu. L'optimisation de la dose délivrée résulte de choix des opérateurs :

- choix d'un protocole technique adapté à la situation clinique ;
- positionnement adéquat et confortable du patient dans la machine pour éviter le flou de bougé ;

- mise en place de filtres, émission pulsée des RX protégeant certaines régions anatomiques (œil) ;
- choix de constantes adaptées à la morphologie du patient ;
- modulation de ces constantes selon la zone corporelle et le rapport signal/bruit analysé en temps réel lors de l'acquisition ;
- choix d'un algorithme de reconstruction permettant d'amoinrir le bruit (méthode itérative et apprentissage profond d'intelligence artificielle) ;
- reconstruction d'images « virtuelles » simulant un examen sans injection de produit de contraste grâce à l'utilisation d'un TDM spectral.

Cette optimisation est encadrée par la publication périodique des Niveaux de Référence diagnostiques par l'ASN, permettant à chacun d'adapter sa pratique.

Progrès potentiels en tomodensitométrie

En sus des progrès réalisés sur le plan technique depuis 50 ans pour améliorer la qualité des images sans augmenter la dose délivrée au patient, de nouvelles évolutions sont en cours :

- le développement de logiciels permettant l'aide à la « demande d'examen complémentaire assistée » (*Clinical Decision Support*) pour le clinicien en amont afin d'approcher au mieux la justification de l'acte demandé ;
- la poursuite du développement de protocoles TDM « basse dose » assortis d'une validation clinique, permettant de réduire significativement les doses délivrées pour s'approcher de niveaux d'exposition observés en radiographie conventionnelle ;
- la diffusion plus large des appareils de type « spectral », permettant plusieurs visualisations possibles d'une même région à l'aide d'une seule acquisition ;
- la validation médicale de nouveaux algorithmes de post-traitement faisant appel à l'intelligence artificielle, permettant d'une part un meilleur rapport signal/bruit, et d'autre part une aide à la détection des anomalies ;
- l'avènement d'un nouveau type d'appareils : TDM à comptage photonique, basé sur le concept du scanner spectral, mais utilisant un nouveau type de détecteurs, à la fois plus fins et plus sensibles (Horst *et al.*, 2023).

Conclusion

La TDM est une modalité d'imagerie médicale qui a complètement transformé la pratique médicale. Cela va se poursuivre car les progrès attendus sont très significatifs et contribueront à diminuer les doses de RX et le risque associé, sous la vigilance constante des radiologues, tout en augmentant le bénéfice de sa puissance diagnostique.

Références

Aide à la demande d'examens de radiologie et imagerie médicale (ADERIM), Société Française de Radiologie et d'Imagerie Médicale, <https://aderim.radiologie.fr/>

ASN (2006), « Arrêté du 22 septembre 2006 relatif aux informations dosimétriques devant figurer dans un compte rendu d'acte utilisant les rayonnements ionisants ». JORF n°226 du 29 septembre 2006, <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2006/9/22/SANY0623888A/jo/texte>

ASN (2019), « Décision n°2019-DC-0667 de l'Autorité de Sûreté Nucléaire du 18 avril 2019 à la mise à jour des niveaux de référence diagnostiques », JORF du 31 mai 2019, <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000038529178/>

BOSCH DE BASEA GOMEZ M. *et al.* (2023), "Risk of hematological malignancies from CT radiation exposure in children, adolescents and young adults", *Nature Medicine*, 29, pp. 3111-3119, <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02620-0>

IRSN (2019), « Exposition de la population française aux rayonnements ionisants – Bilan 2014-2019 », <https://www.irsn.fr/rapport-dexpertise/bilan-lexposition-population-francaise-rayonnements-ionisants-2014-2019>

EUROPEAN COMMISSION (2024), Directorate-General for Energy, Brkljačić, B *et al.*, "European co-ordinated action on improving justification of computed tomography – Results and recommendations from a first-time multi-national study on CT justification in the EU", Publications Office of the European Union 2024, <https://data.europa.eu/doi/10.2833/80267>

HAUPTMAN M. *et al.* (2023), "Brain cancer after radiation exposure from CT examinations of children and young adults: Results from the EPI-CT cohort study", *Lancet Oncology*, 24, pp. 45-53, [https://doi.org/10.1016/s1470-2045\(22\)00655-6](https://doi.org/10.1016/s1470-2045(22)00655-6)

HORST K. K. *et al.* (2023), "Pilot study to determine whether reduced-dose photon-counting detector chest computed tomography can reliably display Brody II score imaging findings for children with cystic fibrosis at radiation doses that approximate radiographs", *Pediatr Radiol*, Vol. 53, Issue 6, pp. 1049-1056, <https://doi.org/10.1007/s00247-022-05574-6>

SNITEM (2023), « L'imagerie en France – état des lieux », octobre 2023, https://www.snitem.fr/wp-content/uploads/2023/10/Dossier-de-presse-_Limagerie-en-France.pdf

La médecine nucléaire : spécificités et enjeux particuliers en radioprotection

Par Jean-Philippe VUILLEZ

Professeur honoraire de biophysique et médecine nucléaire
de l'Université Joseph Fourier (Grenoble)

La radioprotection en médecine nucléaire s'applique aux activités diagnostiques et thérapeutiques. Les examens diagnostiques ont un rapport bénéfice/risque très favorable, sont encadrés par des règles strictes et délivrent pour une durée limitée et courte des faibles doses de rayonnements ionisants aux patients sans effets stochastiques (cancers) selon les données épidémiologiques. Pour le personnel, le risque de contamination, particulier à la médecine nucléaire, nécessite une attention spéciale. Pour les applications thérapeutiques, les règles sont à renforcer, du fait de l'utilisation de radionucléides de période plus longue émetteurs alpha ou bêta et des activités plus élevées que pour les examens diagnostiques. C'est le seul cas où la grossesse est une contre-indication formelle, et où l'on peut être amené à conseiller une éviction des proches pendant quelques jours.

La médecine nucléaire

La médecine nucléaire (MN) est une spécialité médicale définie par l'utilisation de médicaments marqués par un isotope radioactif, appelés médicaments radiopharmaceutiques (MRP), administrés par voie générale (intraveineuse, parfois orale), parfois locale (sous-cutanée, intradermique, intra-articulaire). Après administration aux patients, les MRP diffusent et se distribuent dans l'organisme en fonction de leurs propriétés biologiques : on parle de biodistribution. Leur intérêt, qui en justifie l'usage, distingue deux domaines d'application revêtant des enjeux très différents, y compris en radioprotection : des utilisations diagnostiques d'une part, thérapeutiques d'autre part. Du fait des progrès techniques réalisés, de la qualité et de l'intérêt des examens et traitements réalisés, les activités de médecine nucléaire sont en pleine croissance en France (+ 15 %/an) avec du côté diagnostique 1,1 million d'examen scintigraphiques ou TEMP (tomographie par émission mono-photonique), 800 000 examens TEP (tomographie par émission de positons), et du côté thérapeutique près de 10 000 traitements (CNPMMN, 2022).

La médecine nucléaire diagnostique

Les applications diagnostiques ont été jusqu'à une période récente très largement prépondérantes dans l'activité de MN. Les examens scintigraphiques reposent sur l'étude statique ou dynamique (en répétant l'enregistrement des images au cours du temps) de la biodistribution des MRP. Les MRP étant radiomarqués avec des isotopes radioactifs de courte période, émetteurs gamma d'énergie entre 50 et 400 keV (le

plus utilisé, le ^{99m}Tc émet des photons de 140 keV) ou des émetteurs de positon (lesquels génèrent des photons d'annihilation de 511 keV détectés en coïncidence), leur biodistribution peut être visualisée en trois dimensions au moyen de gamma-caméras (imagerie gamma ou TEMP) ou de caméras à positons (TEP). Cette biodistribution renseigne sur le fonctionnement cellulaire en visualisant *in vivo* les processus biologiques, apportant *via* une imagerie fonctionnelle et métabolique des informations physiopathologiques, différentes et complémentaires des informations anatomiques de l'imagerie médicale (radiologie X, IRM, échographie). Un examen scintigraphique est donc défini par le MRP utilisé et ses propriétés biologiques. Il existe, grâce aux progrès de la chimie, de l'ingénierie des biomolécules et de la radiochimie, de plus en plus de MRP ciblant des biomarqueurs variés, autorisant l'étude de diverses pathologies en cardiologie, neurologie, oncologie, rhumatologie, pneumologie, gastro-entérologie, hématologie...

La médecine nucléaire thérapeutique

Les applications thérapeutiques (Lepareur *et al.*, 2023 ; St James *et al.*, 2021 ; Kraeber-Bodéré *et al.*, 2015) ont longtemps été limitées aux cancers de la thyroïde après chirurgie, avec l'iode ^{131}I (^{131}I). Depuis une vingtaine d'années, le couplage de MRP, au départ conçus pour le diagnostic, à des émetteurs de particules chargées, électrons puis particules alpha, de période plus longue permet de traiter certains cancers multiples ou métastasés (Chatal, 2018). En irradiant *in situ* les cellules cancéreuses par leur ciblage sélectif, la radiothérapie interne vectorisée (RIV) agit selon des mécanismes

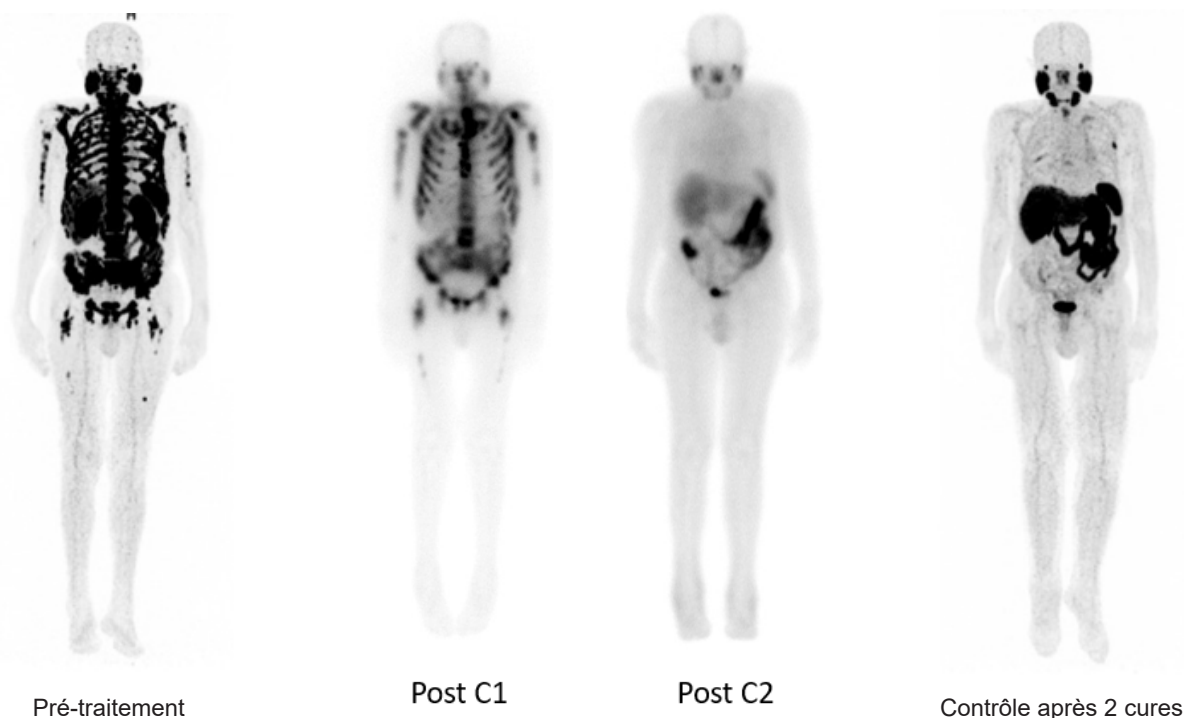


Figure 1 : Illustration d'une application « théranostique » de la médecine nucléaire, combinant diagnostic et traitement avec un même MRP marqué soit par un émetteur de positon, soit un émetteur d'électrons (bêta -) (Source : Images fournies par le Dr Nicolas De Leiris, Service de Médecine Nucléaire, et le Pr Loïc Djaileb, CHU Grenoble Alpes). Patient de 83 ans suivi pour un adénocarcinome prostatique de haut grade (Gleason 9), avec dès le départ des atteintes osseuses et ganglionnaires. Il a d'abord bénéficié d'un traitement par plusieurs hormonothérapies et corticothérapie. Après 2 ans, il présente une progression de sa maladie avec augmentation du marqueur sanguin (PSA), des douleurs osseuses diffuses (stabilité des lésions en scintigraphie), et une chute des plaquettes sanguines témoignant d'un envahissement de la moelle osseuse. Son état général et son état respiratoire ne permettent pas une chimiothérapie. Une tomographie par émission de positons est réalisée avec du PSMA (« Prostate Specific Membrane Antigen », qui se fixe sur les cellules des cancers prostatiques) marqué avec du gallium 68. C'est l'image notée « pré-traitement », qui montre l'envahissement massif du squelette et des ganglions par les cellules cancéreuses. Il est alors décidé en réunion de concertation pluridisciplinaire de faire un traitement par du PSMA marqué cette fois avec du lutétium 177, émetteur d'électrons détruisant les cellules. Les images permises par l'émission gamma du lutétium montrent une forte fixation dans les lésions après la première injection (image « PostC1 ») ; cette fixation est très fortement diminuée après la deuxième cure (image « PostC2 »), ce que confirme une nouvelle scintigraphie diagnostique avec du PSMA-gallium 68 (image de droite « Contrôle après 2 cures ») où les lésions ont pratiquement disparu (les images du foie, des glandes salivaires et du tube digestif sont physiologiques), montrant une excellente efficacité du traitement, qui prévoit 4 cures supplémentaires.

radiobiologiques singuliers et connaît un fort développement. Elle a des résultats significatifs en améliorant la survie de patients atteints de tumeurs endocrines et de cancers de la prostate. D'autres cancers devraient bénéficier d'avancées semblables.

Pour autant que la radioprotection nécessite la plus grande rigueur, elle s'adresse en MN à des risques d'exposition qu'il faut relativiser, car conduisant à des doses faibles ou très faibles en diagnostic, plus conséquentes mais parfaitement maîtrisées en thérapie (Vuillez, 2019).

La radioprotection en médecine nucléaire

La médecine nucléaire pose des questions de radioprotection bien spécifiques qui découlent de l'utilisation de sources non scellées que sont les MRP, tant pour la radioprotection du personnel (préparation des MRP,

injections aux patients, gestion des patients après injection) que la radioprotection des patients (RPP). De plus, la MN produit des déchets radioactifs, dont on doit se préoccuper des conséquences, d'où un volet de radioprotection de l'environnement.

Radioprotection du personnel

L'exposition des personnels et leur protection

Les sources d'exposition pour les personnels sont liées à la préparation des MRP, leur injection, puis à la proximité des patients injectés tout au long de leur prise en charge. Ainsi les personnels de médecine nucléaire sont fréquemment exposés au cours de la journée, ce qui oblige à des actions spécifiques.

La préparation des MRP par les radiopharmaciens, préparateurs en pharmacie ou manipulateurs en électroradiologie médicale [MERM], puis des seringues pour l'injection aux patients, est effectuée dans

des enceintes plombées fermées et ventilées (boîtes à gants), privilégie la manipulation à distance (pinces longues) et l'automatisation car il s'agit de se protéger de rayonnements gamma pénétrants et de la possibilité de contamination externe et interne par des éléments volatils.

L'injection des MRP nécessite toujours une intervention humaine. L'exposition des personnels peut être efficacement diminuée par l'usage de protège-seringues plombés, d'écrans plombés mobiles et d'injecteurs automatiques, ainsi qu'en étant le plus rapide possible, ce qui requiert une permanente adaptation des procédures afin d'optimiser le temps d'exécution tout en garantissant la qualité et la sécurité des actes.

Les patients injectés étant devenus des sources radioactives, l'exposition des personnels résulte de la nécessité de prendre soin des personnes soignées, impliquant une certaine proximité, pendant un temps incompressible. Afin de limiter le temps auprès des patients (dans la mesure où les soins ne le nécessitent pas), il convient de réaliser les échanges d'informations le plus possible avant l'injection. À noter que le port de tablier plombé apporte peu de gain de radioprotection avec les rayonnements en jeu : atténuation d'un facteur 2 seulement avec les gamma du ^{99m}Tc (140 keV) (contre 50 en radiologie), encore plus faible pour les énergies plus élevées ; il devient totalement inutile, tombant à 7 %, pour l' ^{131}I (364 keV), et en TEP, n'atténuant que 5 % pour les photons d'annihilation de 511 keV. Le tablier plombé en TEP peut même être délétère en générant des électrons responsables d'une irradiation de la peau.

En cas de MN thérapeutique, les risques d'exposition des personnels sont majorés, impliquant *de facto* une plus grande vigilance à chaque étape. Notamment, il est indispensable de disposer de systèmes de perfusion ou d'injection radioprotégés pour l'administration des MRP. La surveillance, notamment immédiate, des patients utilisera des dispositifs déportés (par exemple, pour la prise de tension artérielle), des chambres aménagées avec des paravents en verre plombés, des caméras vidéo, etc.

Les MRP étant des sources non scellées, la prévention du risque de contamination par voie orale, respiratoire ou cutanée est un impératif. Elle est assurée par le port de protections appropriées (blouses, masques, charlottes, gants), la gestion rigoureuse des déchets, le respect de circuits de distribution et d'élimination des sources et des objets potentiellement contaminés, les contrôles réguliers des surfaces, des pieds et des mains.

L'installation

Pour les mêmes raisons de radioprotection, l'installation de MN obéit à des contraintes techniques (St James *et al.*, 2021 ; ASN 2020) qui contribuent significativement à la radioprotection :

- hiérarchisation des locaux, en fonction du niveau d'activité des sources (« zonage » approprié avec des zones contrôlées et des zones surveillées) ;

- locaux de détention et de manipulation des sources à l'écart des circulations générales, regroupés et signalés ;
- l'accueil, le secrétariat, les bureaux et la salle de détente du personnel doivent être implantés en zone non réglementée ;
- enfin les vestiaires du personnel sont aménagés en deux zones afin de séparer les vêtements de ville des vêtements de travail (y compris les chaussures), et doivent comporter douche et lavabo. Un dispositif de contrôle des contaminations externes des pieds et des mains est disposé à l'entrée des vestiaires (côté « travail »).

Les locaux classés en zones contrôlée et surveillée doivent avoir des revêtements de sols remontant sur les plinthes), des murs et des surfaces de travail en matériau lisse, imperméable, dépourvus de joint et facilement décontaminables.

Limitation des doses

La radioprotection des personnels exposés est réglementée par le décret n°2003-296 du 31 mars 2003 « relatif à la protection des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants », complété par les décrets n°2018-437 et 2018-438 du 4 juin 2018. La dose efficace reçue par exposition externe et interne sur 12 mois consécutifs ne doit pas dépasser 20 mSv pour les travailleurs de catégorie A, et 6 mSv pour les travailleurs de catégorie B.

Les études de poste montrent que les doses reçues en MN sont faibles, (< 6 mSv/an), justifiant un classement en catégorie B ; pour autant, l'optimisation doit rester un souci constant, non pour encore abaisser ces doses déjà faibles, mais pour les maintenir à ce niveau et éviter toute dérive.

Des limites de doses équivalentes existent pour certaines parties du corps : l'exposition au cours de 12 mois consécutifs ne doit pas dépasser 500 mSv pour les mains et avant-bras, les pieds et chevilles, et la peau ; pour le cristallin la limite est 20 mSv en catégorie A, (150 mSv auparavant) et 15 mSv (auparavant 45) en catégorie B (nouvel article R4451-6 du code du travail). La dose au cristallin est un point de vigilance du fait de la manipulation et du contrôle visuel des sources.

Tous les personnels concernés doivent être formés à la radioprotection des travailleurs.

De plus amples informations techniques peuvent être trouvées dans des fiches de l'Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS, 2011 ; INRS, 2012).

Radioprotection des patients (RPP)

La radioprotection des patients est sous la responsabilité des médecins nucléaires, aidés par leurs personnels et le conseiller en radioprotection, et suit les recommandations de l'ASN (ASN, 2021) et de la CIPR (ICRP 103, ICRP 105). Elle repose sur deux des trois principes de la radioprotection, la justification et l'optimisation, le principe de limitation des doses ne s'appliquant

pas aux patients car il convient de disposer d'un niveau de rayonnement suffisant pour réaliser des images de qualité adéquate, assurant de bonnes performances diagnostiques de l'examen. Un mauvais examen, ininterprétable ou n'apportant pas les informations attendues, devra être refait ou complété par un autre examen pouvant être irradiant, conduisant à majorer la dose en voulant la diminuer. Dans le domaine thérapeutique, on recherche la meilleure efficacité, ce sont les effets secondaires qui limitent l'activité administrée, sans limite réglementaire.

Les examens diagnostiques

La justification

La justification de la réalisation d'un examen est liée au fait qu'il contribue à changer la prise en charge du patient en apportant un bénéfice. Le guide du bon usage des examens d'imagerie médicale (ADERIM) contribue à guider la justification de la demande d'un examen diagnostique scintigraphique en le situant par rapport aux autres examens de radiologie dans une stratégie globale (le « parcours patient »). Ce guide prend en compte la balance bénéfice risque, et inclut le risque de ne pas réaliser un examen utile au prétexte de la radioprotection.

L'optimisation

L'optimisation de la protection des patients repose sur l'activité injectée du MRP. Celle-ci est fixée lors des autorisations de mise sur le marché du médicament, les industriels devant déterminer l'activité à injecter lors du dépôt de leur dossier à l'Agence Nationale de Sécurité du Médicament (ANSM). Cette valeur résulte d'un compromis entre tous les paramètres disponibles notamment la période du radionucléide et la biodistribution du MRP et son élimination, et permet de respecter le principe ALARA¹ : l'activité injectée (dose délivrée) doit être la plus faible possible tout en garantissant les meilleures qualités et performances diagnostiques de l'examen. L'optimisation de l'activité injectée n'est donc pas sa diminution à tout prix.

À noter que depuis une vingtaine d'années, l'imagerie fonctionnelle de médecine nucléaire est fréquemment couplée à une imagerie anatomique par scanner X permettant de localiser précisément les foyers radioactifs détectés. La radioprotection des patients prend en compte la dose additionnelle du scanner.

Les traitements RIV

L'indication du traitement d'un cancer est justifiée, avec un bénéfice important pour le patient, car toujours posée dans le cadre d'une réunion de concertation pluridisciplinaire. Hors oncologie, l'¹³¹I est utilisé pour traiter des pathologies thyroïdiennes bénignes (nodules toxiques, maladie de Basedow) et des radionucléides sont utilisés en rhumatologie (synoviorthèses isotopiques).

L'optimisation fait l'objet d'intenses recherches car la relation dose-effet qui guide toute approche thérapeutique est ici, du moins en apparence, prise en défaut.

¹ "As Low As Reasonably Achievable" = « Aussi bas que raisonnablement possible ».

Il n'y a pas de relation simple entre l'activité injectée (¹³¹I, ⁹⁰Y, ¹⁷⁷Lu, ²²³Ra, ²¹¹At, etc.) et la réponse tumorale car :

- les doses délivrées (en Gy) dans les tissus cibles (lésions tumorales) et les tissus sains (à l'origine de la toxicité) dépendent de la biodistribution du MRP thérapeutique et de son évolution dans le temps, et ;
- les individus ne réagissent pas de la même façon à un même dépôt d'énergie dans les tissus.

Personnaliser l'activité injectée, son fractionnement et son étalement est un objectif majeur d'optimisation, pour maîtriser la toxicité et améliorer l'efficacité (Dieudonné *et al.*, 2024 ; Strosberg *et al.*, 2024 ; Cicone *et al.*, 2024).

Les femmes enceintes

La grossesse n'est pas une contre-indication absolue à la réalisation d'examen scintigraphiques (ICRP 84, 2000) qui peuvent être réalisés s'ils sont justifiés, dans le cadre d'une analyse bénéfice-risque. L'embryon puis le fœtus sont à protéger et ne doivent pas recevoir une dose supérieure à 100 mSv.

En revanche la RIV est contre-indiquée chez la femme enceinte. Toute grossesse doit être évitée pendant un certain temps suivant le traitement par radionucléide, par exemple 6 mois pour l'iode radioactif, le radionucléide le plus couramment utilisé (ICRP 94, 2004).

L'entourage du patient

Après les procédures de MN, les patients sont provisoirement des sources radioactives et peuvent exposer leur entourage (INRS, 2006) dans les heures suivant un examen diagnostique de MN (TEMP comme TEP). Cette exposition est très faible, de l'ordre de la dizaine de μ Sv/h dans un rayon de 1 mètre autour des patients et décroît rapidement. En aucun cas la dose maximale d'exposition du public fixée à 1 mSv par an ne peut être atteinte.

Après RIV, les patients restent confinés pendant quelques jours et leur sortie est soumise à une contrainte de dose afin de ne pas dépasser la limite réglementaire du public. Pour les parents, visiteurs et soignants à domicile, la CIPR a recommandé une contrainte de dose raisonnable de 5 mSv (ICRP 73, 1996).

Médecine nucléaire et radioprotection de l'environnement

Le ^{99m}Tc est le radionucléide le plus présent dans les rejets dans l'environnement par les excréta des patients de MN, mais sa courte période de 6 heures limite son importance. Le deuxième radionucléide le plus abondant dans les rejets, l'¹³¹I de 8 jours de période, est facilement détecté dans l'environnement après utilisation médicale, mais sans impact mesurable. Le stockage de l'urine des patients après thérapie limite cet impact, au prix d'une gestion rigoureuse des cuves de rétention.

La question va croissant avec le développement de la RIV et l'utilisation du ^{177}Lu de période 6,7 jours. Mais les radionucléides rejetés exposent le public à des doses bien inférieures à la limite de 1 mSv par an.

Conclusion

La MN diagnostique délivre des doses faibles ou très faibles tant au personnel qu'aux patients. L'enjeu de radioprotection est à relativiser (Vuillez, 2019), dominé par la spécificité des risques de contamination. En thérapie, les enjeux sont plus importants, maîtrisables pour le personnel et gouvernés par le rapport bénéfice/risque pour les patients.

Références

- ASN (2020), « Guide de l'ASN n°32 : Installations de médecine nucléaire *in vivo* : règles techniques minimales de conception, d'exploitation et de maintenance ».
- ASN (2021), « Assurance de la qualité en imagerie médicale mettant en œuvre des rayonnements ionisants ».
- CHATAL J.F. *et al.* (2018), "Alphatherapy, the new impetus to targeted radionuclide therapy?", *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 45(8), pp. 1362-1363.
- CICONE F. *et al.* (2024), "The contest between internal and external-beam dosimetry: The Zeno's paradox of Achilles and the tortoise", *Phys Med*, 117:103188.
- CNPMN (2022), « Conseil national professionnel de la médecine nucléaire. Enquête nationale de la Médecine nucléaire française 2022 ».
- DIEUDONNÉ A. *et al.* (2024), "Dosimetry for targeted radionuclide therapy in routine clinical practice: experts advice vs. clinical evidence", *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 51(4), pp. 947-950.
- ICRP 73 (1996), "Radiological protection and safety in medicine", *Ann. ICRP*, 26(1).
- ICRP 84 (2000), Pregnancy and medical radiation, *Ann. ICRP*, 30(1).
- ICRP 94 (2004), "Release of nuclear medicine patients after therapy with unsealed sources", *Ann. ICRP*, 34(2).
- ICRP 103 (2007), "The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection", *Ann ICRP*, 37(2-4).
- ICRP 105 (2007), "Radiological protection in medicine", *Ann. ICRP*, 37(6).
- INRS (2011), « Documents pour le médecin du travail. Médecine nucléaire hors TEP ».
- INRS (2012), « Documents pour le médecin du travail. Médecine nucléaire. TEP au Fluor 18 ».
- INRS (2006), « Fiche radioprotection. Médecine nucléaire. Prise en charge des patients sortant d'une unité de médecine nucléaire ».
- KRAEBER-BODÉRE F. *et al.* (2015), "Tumor immunotargeting using innovative radionuclides", *Int J Mol Sci.*, 16(2), pp. 3932-3954.
- LEPAREUR N. *et al.* (2023), "Clinical advances and perspectives in targeted radionuclide therapy", *Pharmaceutics*, 15(6):1733.
- ST JAMES S. *et al.*, (2021), "Current status of radiopharmaceutical therapy", *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 109(4), pp. 891-901.

STROSBERG J. *et al.* (2024), "Rethinking dosimetry: the perils of extrapolated external-beam radiotherapy constraints to radionuclide therapy", *J Nucl Med*, 65(3), pp. 362-364.

VUILLEZ J.P. (2019), « Faibles doses de rayonnements : quand l'hormésis et l'effet abscopal se rencontrent... », *Médecine Nucléaire - Imagerie Fonctionnelle et Métabolique*, 43, pp. 354-359.

Diminution des rayonnements ionisants en milieu médical, l'intelligence artificielle est-elle la solution ?

Par Anaïs BARATEAU

Physicienne médicale au Centre Eugène Marquis (Centre régional de lutte contre le cancer) à Rennes, Université de Rennes, CLCC Eugène Marquis, INSERM, LTSI - UMR 1099, Rennes

Les applications de l'intelligence artificielle (IA) ont connu au cours de la dernière décennie une explosion dans de nombreux domaines. Le milieu médical n'y échappe pas et voit l'éclosion de nombreuses solutions commerciales. Les méthodes d'intelligence artificielle surpassent dans de nombreux domaines les méthodes plus classiques et offrent souvent un gain de temps notable. Certaines applications permettent une diminution de la dose reçue par le patient, une meilleure préservation des tissus sains ou même la suppression de certains examens impliquant des rayonnements ionisants. Néanmoins, l'utilisation de l'intelligence artificielle dans les services cliniques soulève de nouvelles questions notamment en termes de validation, de formation ou encore d'éthique.

L'intelligence artificielle : décryptage

L'intelligence artificielle est un ensemble de techniques qui ont pour objectif de reproduire automatiquement à partir d'une machine certaines tâches cognitives (e.g., la perception, la vision, le raisonnement, le traitement du langage, etc.) réalisées par un humain (ou tout autre animal). L'apprentissage statistique (*machine learning*) est un ensemble de méthodes d'intelligence artificielle qui ont pour particularité d'imiter partiellement l'apprentissage cognitif humain pour effectuer les tâches pour lesquelles elles ont été développées. Ces méthodes sont constituées d'une étape d'apprentissage et d'une étape d'application. La phase d'apprentissage consiste à déterminer de manière itérative les paramètres optimaux d'un modèle à l'aide d'informations extraites d'un jeu de données (pertinent pour le problème à résoudre) et d'un algorithme d'optimisations mathématiques. La phase d'application vise à appliquer le modèle optimisé sur de nouvelles données afin de réaliser la tâche donnée.

Les réseaux de neurones sont un sous-ensemble de méthodes d'apprentissage statistique. Ces méthodes, aussi appelées méthodes d'apprentissage profond (*deep learning* en anglais), sont composées d'un ensemble d'unités simples (fonctions mathématiques appelées neurones artificiels) qui mises en connexion permettent de résoudre une tâche, à l'instar des neurones biologiques et des synapses. La théorie a été

fondée dans les années 1980, son développement a pu se faire récemment grâce à l'augmentation des performances des systèmes informatiques, notamment les processeurs graphiques (GPU) : ses auteurs ont reçu le prix Nobel de physique 2024.

Dans la plupart des cas, les études utilisant l'IA fournissent des résultats remarquables en comparaison des méthodes plus standards. C'est pourquoi elles sont si attrayantes ces dernières années.

L'intelligence artificielle en milieu médical

L'IA est maintenant présente dans de nombreux domaines et le milieu médical, notamment hospitalier, ne fait pas exception. Les modèles (produits lors de la phase d'apprentissage) reposent sur l'utilisation d'une masse conséquente de données afin de personnaliser et d'accompagner au mieux les traitements des patients.

Applications en lien avec les rayonnements ionisants

Les rayonnements ionisants sont généralement utilisés en milieu médical dans les services suivants :

- radiologie : appareils avec des tubes à rayons X (scanner, table de radiologie, mammographe, etc.) ;

- médecine nucléaire : pour des examens diagnostiques mais aussi de la thérapie, le tout basé sur l'injection d'un produit radiopharmaceutique (isotope radioactif + vecteur) ;
- radiothérapie : ciblage des cellules cancéreuses à l'aide de faisceaux de rayonnements ionisants de haute énergie, tout en épargnant au mieux les tissus sains.

Dans ces trois domaines, l'IA s'est développée pour réaliser de nombreuses tâches à différentes étapes (Najjar, 2023 ; Seifert *et al.*, 2021 ; Landry, Kurz et Traverso, 2023) :

- en radiologie, l'utilisation de l'IA est envisagée notamment pour : l'aide au diagnostic, la segmentation d'images, l'estimation de la dose reçue, l'amélioration de la qualité d'image (contraste, résolutions, etc.), le suivi du patient, etc. ;
- en médecine nucléaire, les applications d'IA sont diverses : l'aide au diagnostic, la quantification des images acquises, l'optimisation des protocoles d'acquisition, la reconstruction d'images, la segmentation d'images, ou encore l'amélioration de la qualité d'image ;
- en radiothérapie, les applications d'IA sont envisagées à toutes les étapes de la chaîne de traitement. De manière non exhaustive, nous pouvons citer : l'acquisition d'images de planification, le recalage d'images, la segmentation d'images, la planification dosimétrique, l'assurance qualité, le suivi du patient avec notamment la prédiction de toxicité, etc.

De nombreuses applications de l'IA en milieu médical portent sur le traitement d'images, notamment avec la détection automatique d'images tumorales de petite taille. Un autre champ de recherche très actif est l'analyse des examens de patients avec différentes modalités d'imagerie pour créer des modèles de prédiction afin par exemple de personnaliser les traitements des patients en oncologie.

L'intelligence artificielle pour diminuer la dose de rayonnement ionisant pour le patient

L'optimisation de l'imagerie médicale ionisante (rayons X ou radioactivité) repose sur un équilibre subtil entre la dose reçue par le patient et la qualité d'image requise dans un but donné (diagnostic, guidage du geste chirurgical, etc.). Plusieurs méthodes d'IA ont été mises en œuvre pour améliorer la qualité des images tout en diminuant la dose reçue par les patients (Singh *et al.*, 2020). Des exemples classiques sont la suppression des *artefacts* sur les images ou la réduction du bruit (aspect « poivre et sel » des images) sur les images de tomographie par émission de positons (TEP) en médecine nucléaire. Afin d'obtenir une image médicale interprétable (par exemple, un scanner thoracique), deux étapes sont nécessaires : l'acquisition et la reconstruction. C'est lors de la phase d'acquisition qu'une dose de rayonnement est reçue par le patient, la phase de reconstruction étant effectuée par des logiciels. Dorénavant, des algorithmes de reconstruction

basés sur l'apprentissage profond sont disponibles, permettant la réduction du nombre ou des durées d'acquisition. Les avancées technologiques combinées à l'utilisation de l'apprentissage profond promettent une diminution significative de la dose reçue par le patient. Certaines méthodes montrent une réduction de dose d'examen scanographique de 50 % pour le patient.

La diminution de la dose de rayonnement ionisant délivrée aux patients est un enjeu majeur, en particulier en pédiatrie, car elle permettrait de réduire le risque de cancer radio-induit. Dans cet objectif, une application particulièrement utile de l'IA vise à créer une imagerie de densité des tissus, équivalente d'une imagerie ionisante à partir d'une imagerie non ionisante, typiquement générer une image scanner à partir d'une image d'image par résonance magnétique (IRM) (Boulangier, 2021).

Deux applications pratiques :

- la première concerne la médecine nucléaire et permet de s'affranchir de l'image obtenue par scanner qui est utilisée comme correction de l'image TEP pour l'atténuation ;
- la seconde concerne la radiothérapie afin de supprimer à terme le scanner de la chaîne de traitement car l'IRM offre un meilleur contraste pour visualiser la tumeur et les organes à risque, mais ne génère pas la cartographie de la densité des tissus nécessaire pour le calcul de la dose à la tumeur et aux tissus sains à risque.

Des machines de radiothérapie intégrant une IRM en salle de traitement ont fait leur apparition depuis 2018 en France (machine IRM-linac). Elles présentent un enjeu technique fort : combiner un champ magnétique permanent dans la salle avec un faisceau de rayons ionisants de haute énergie (gestion des interactions électromagnétiques) et permettent de réaliser chaque jour une image de repositionnement du patient non ionisante, *i.e.* sans ajout d'une dose liée à l'imagerie.

Les évolutions techniques et technologiques ont permis ces 30 dernières années d'améliorer grandement les traitements de radiothérapie. Ils sont plus précis (de l'ordre du millimètre) et plus conformés à la tumeur (réduction du volume irradié), permettant ainsi d'épargner les tissus sains. Le challenge majeur en radiothérapie est maintenant la gestion des variations anatomiques (progressives ou anatomiques) en cours de traitement, puisque le traitement était basé jusque récemment seulement sur une image prise à un instant *t* (photo de l'anatomie). Dorénavant les solutions d'IA peuvent être mises à profit afin d'adapter le traitement en cours si besoin et ainsi de mieux épargner les organes à risque, dans l'optique de réduire les toxicités.

Les défis à venir de l'intelligence artificielle

L'intégration des solutions d'IA dans le domaine médical peut susciter à la fois enthousiasme et scepticisme. Elles peuvent être perçues comme des boîtes noires par les utilisateurs. Cependant, des solutions d'IA sont

maintenant commercialement disponibles pour la clinique et celles-ci ne sont pas magiques : elles reposent sur des principes mathématiques.

Pour rappel, l'étape d'entraînement est indispensable aux méthodes d'apprentissage statistique et elle est souvent effectuée par le fournisseur d'une solution commerciale, le logiciel étant intégré dans les équipements. Plusieurs questions se posent alors sur cette étape : quelles sont les caractéristiques des données qui ont servi à l'entraînement ? Quelle masse de données a été utilisée ? Quelle était la diversité des données ? Est-ce qu'un modèle spécifique ne serait pas plus adapté à ma situation ?

Les solutions d'IA doivent être utilisées avec précaution. Il est recommandé d'effectuer des tests préalables à l'implémentation ainsi que des tests périodiques ou lors d'un changement de pratique (Hurkmans *et al.*, 2024). De plus, tout résultat obtenu doit être vérifié et analysé. Un regard critique sur les résultats doit être conservé car des biais peuvent apparaître, notamment liés à l'entraînement des modèles. Les tâches effectuées par une solution d'IA peuvent être utilisées en complément mais ne doivent pas remplacer les compétences des experts, il est de la responsabilité de chacun de maintenir ses compétences à un haut niveau. L'IA est un puissant outil à la disposition des professionnels médicaux mais elle ne doit pas être utilisée aveuglement, et ne les remplace pas.

Les formations portant sur l'intelligence artificielle sont maintenant très répandues sous différents supports : formations professionnelles, littérature scientifique, congrès, *e-learning*, etc. Il est important que tous les acteurs utilisant des solutions d'IA aient des connaissances basiques sur leur fonctionnement et soient sensibilisés aux limites inhérentes à l'IA.

D'autre part, les aspects réglementaires et éthiques sont majeurs dans le cadre d'une utilisation clinique d'outils basés sur l'IA. Certains fournisseurs proposent de créer des modèles d'IA avec des données fournies par le centre hospitalier client de la solution, dans ce cas la réglementation en vigueur concernant le consentement du patient et la protection des données doit être respectée, selon le règlement général sur la protection des données (RGPD)¹.

Conclusion

L'IA ouvre de belles perspectives notamment dans une optique de réduction des doses de rayonnement ionisant reçues par les patients que ce soit en radiologie, médecine nucléaire ou radiothérapie. L'IA deviendra certainement indispensable en milieu hospitalier afin d'améliorer la prise en charge des patients, dont la radioprotection. Les solutions d'IA doivent cependant toujours être utilisées à bon escient.

Références

- BOULANGER M., NUNES J.C., H CHOURAK H., LARGENT A., TAHRI S., ACOSTA O., DE CREVOISIER R., LAFOND C. & BARATEAU A. (2021), "Deep learning methods to generate synthetic CT from MRI in radiotherapy: A literature review", *Physica Medica*, 17, <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2021.07.027>
- HURKMANS C., BIBAULT J.-E., BROCK K.K., VAN ELMPT W., FENG M., DAVID FULLER C. *et al.* (2024), "A joint ESTRO and AAPM guideline for development, clinical validation and reporting of artificial intelligence models in radiation therapy", *Radiotherapy and Oncology*, 197, 110345, <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2024.110345>
- LANDRY G., KURZ C. & TRAVERSO A. (2023), "The role of artificial intelligence in radiotherapy clinical practice", *BJR Open*, 5(1), 20230030, <https://doi.org/10.1259/bjro.20230030>
- NAJJAR R. (2023), "Redefining Radiology: A review of artificial intelligence integration in medical imaging", *Diagnostics*, 13(17), 2760, <https://doi.org/10.3390/diagnostics13172760>
- SEIFERT R., WEBER M., KOCAKAVUK E., RISCHPLER C. & KERSTING D. (2021), "Artificial intelligence and machine learning in nuclear medicine: Future perspectives", *Seminars in Nuclear Medicine*, 51, pp. 170-177, <https://doi.org/10.1053/j.semnuclmed.2020.08.003>
- SINGH R., WU W., WANG G. & KALRA M.K. (2020), "Artificial intelligence in image reconstruction: The change is here", *Physica Medica*, 79, pp. 113-125, <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.11.012>

¹ <https://www.cnil.fr/fr/reglement-europeen-protection-donnees>

La radioprotection des patients est une exigence première de la radiothérapie

Par Jean-Marc SIMON

Service de radiothérapie, APHP, CHU Pitié-Salpêtrière

La radiothérapie est une modalité remarquable de traitement des cancers. Il s'agit d'une technique de très haute technicité qui permet de cibler les tissus tumoraux avec une précision de plus en plus sélective. Néanmoins, des tissus sains sont également irradiés au cours des séances de radiothérapie, et afin de réduire au maximum le risque d'effets secondaires ou de séquelles à long terme, il est primordial d'une part de contrôler l'effet biologique différentiel entre les tissus tumoraux et les tissus sains, et d'autre part de respecter des contraintes de dose que peuvent tolérer les organes à risque. Si ces principes ne sont pas respectés, notamment en cas d'erreur (le plus souvent dans le domaine des facteurs humains et organisationnels), des incidents, voire des accidents de radioprotection des patients peuvent survenir, comme cela a été le cas avec les accidents sériels de radiothérapie d'Épinal en 2006 et de Toulouse en 2007. Rarement, des patients traités dans les règles de l'art subiront néanmoins des complications inattendues en raison de leur radiosensibilité particulière (environ 5 % de la population), et leur identification avant traitement est un challenge, qui reste pour le moment du domaine de la recherche. La radioprotection des patients est ainsi une exigence première, réglementaire et constante pour les oncologues radiothérapeutes.

La radiothérapie est, avec la chirurgie et l'oncologie médicale, une modalité incontournable de traitement des cancers pour deux raisons : d'une part, parce que 50 à 60 % des patients atteints de cancer reçoivent une radiothérapie à un moment donné au cours de leurs soins, ce qui participe à leur guérison dans plus de 80 % des cas, et d'autre part, parce que le coût de la radiothérapie est particulièrement bas, ne représentant qu'environ 8 % des dépenses de santé liées au traitement des cancers.

Le nombre de patients atteints de cancers est en nette augmentation, en particulier du fait du vieillissement de la population et du contrôle insuffisant des facteurs de risque : environ 60 % des cancers sont liés à des facteurs de risque évitables, comme la consommation de tabac, d'alcool, une alimentation non équilibrée, la sédentarité, ou les maladies sexuellement transmissibles. Le cancer reste la première cause de mortalité malgré les progrès très significatifs de la médecine. Pour la France métropolitaine, l'Institut National du Cancer estime à 433 136 le nombre de nouveaux cas de cancers en 2023, dont 245 610 hommes et 187 526 femmes (INCa, 2023). L'activité globale des 176 centres de radiothérapie français est en augmentation et le nombre de séances de radiothérapie dépasse les 4 millions par an, soit plus de 16 000 séances par jour ouvré.

Les appareils de radiothérapie ont beaucoup évolué ces dernières années avec l'apparition de machines

dédiées et spécialisées, par exemple pour l'irradiation avec modulation d'intensité comme Tomotherapy® ou Radixact®, et Halcyon®, pour la radiothérapie en conditions stéréotaxiques comme Cyberknife®, et Novalis®, et plus récemment des appareils de radiothérapie guidée par IRM, comme MRIdian® de Viewray ou Unity® de Elekta. Le renouvellement du parc a été important, notamment au cours des dix dernières années. Ces nouvelles machines sont des accélérateurs linéaires d'électrons permettant des flux intenses de rayons X de 6 à 25 MV (en fonction des besoins du traitement), ayant mis définitivement au rebut depuis les années 2010 les derniers irradiateurs au cobalt 60 émetteurs de rayons gamma de 1,17 et 1,33 MeV, à l'exception du Gammaknife spécialisé dans la radiothérapie en conditions stéréotaxiques intracrânienne. Historiquement, les doses délivrées étaient de l'ordre de 2 Gy (Joules/kg) par séance, renouvelées jusqu'à 40 fois selon les indications de radiothérapie. Ce dogme des 2 Gy par séance est maintenant battu en brèche avec le développement des schémas de radiothérapie hypofractionnée, qui ont été développés grâce à la recherche clinique. Ainsi, la radiothérapie pour un cancer de la prostate est passée de 40 à 20 séances, puis même récemment à 5 séances avec des techniques de radiothérapie en conditions stéréotaxiques (van As *et al.*, 2024). Pour le cancer du sein, la radiothérapie qui nécessitait 33 séances il y a quelques années, ne justifie plus que 15 séances dans la plupart des cas, voire seulement 5 pour les maladies les plus

favorables (Brunt *et al.*, 2020). Ces modifications de fractionnement ne peuvent se concevoir que si l'effet différentiel de la radiothérapie, entre l'efficacité sur les tissus tumoraux et la tolérance des tissus sains, est maintenu, voire amélioré : ces diminutions du nombre de séances s'accompagnent non seulement d'une baisse de la dose totale délivrée, mais également d'une adaptation des contraintes de dose que peuvent tolérer les organes à risque.

La radiothérapie externe est une technique de très haute technicité qui permet de cibler les tissus tumoraux avec une précision de plus en plus sélective, avec l'objectif de délivrer la dose efficace à la cible tumorale, tout en délivrant la dose la plus faible possible aux organes de voisinage, qui sont à risque de complications radiques. La conjonction d'une plus grande précision dans le ciblage des tumeurs grâce aux progrès techniques des machines modernes, du contrôle des mouvements de la cible tumorale, notamment au cours du cycle respiratoire, et de la connaissance des équivalences biologiques des nouveaux schémas thérapeutiques hypofractionnés, a permis de faire des progrès considérables dans la prise en charge des patients, notamment en ce qui concerne leur qualité de vie : à efficacité égale, ils se déplacent moins fréquemment pour venir à leurs séances, avec souvent moins de séquelles à long terme de leur traitement.

La radiothérapie n'a pas le droit à l'erreur, et il est primordial, et maintenant réglementaire, que toute modification d'une technique de radiothérapie soit préparée, anticipée, avec une analyse *a priori* des risques de dysfonctionnement qui pourraient se produire tout au long du parcours de soins, et dont le patient pourrait être la victime. Ce travail est long et fastidieux mais nécessaire. Il permet d'identifier les points faibles qui peuvent jaloner le parcours patient, et d'ajouter des points de contrôle spécifiques sur telle étape identifiée à risque, pour ainsi renforcer la sécurité de la prise en charge. Si ce travail d'anticipation n'est pas fait, une erreur peut s'insérer dans la chaîne de traitement et ne jamais être détectée avant que la première séance de radiothérapie ne soit délivrée. Nombre d'événements significatifs de radioprotection se sont produits dans les services de radiothérapie parce que ce principe n'avait pas été respecté. Par exemple, avec ces modifications de fractionnements, les professionnels ne sont plus surpris lorsque la dose par séance est élevée (ce qui alertait auparavant lorsque toutes les séances étaient à 2 Gy...); mais si la prescription est 10 séances de 3 Gy, il n'est pas concevable que le patient reçoive 3 séances de 10 Gy ! Il faudra donc identifier le moment où une telle confusion peut être possible, et renforcer la robustesse de la validation de la prescription.

Rarement, des patients traités dans les règles de l'art subiront néanmoins des complications inattendues en raison de leur radiosensibilité particulière (environ 5 % de la population), et leur identification avant traitement est un challenge, qui reste pour le moment du domaine de la recherche (voir Foray, article « Réponse individuelle aux radiations ionisantes : nous ne sommes pas égaux face aux dommages de l'ADN » de ce numéro).

La radioprotection des patients est ainsi une exigence première, réglementaire et constante pour les oncologues radiothérapeutes. Il est nécessaire de mettre en place les barrières qui permettent de détecter une erreur qui pourrait apparaître au cours du déroulement des préparations entre la prescription de la radiothérapie et sa réalisation. Si ces barrières sont défaillantes, l'erreur peut se propager jusqu'à ce que le patient reçoive la radiothérapie, ce qui peut s'avérer être un événement significatif de radioprotection. Dans la très grande majorité des cas, la survenue des événements et accidents est liée à des facteurs organisationnels ou humains, les humains pouvant être défaillants et faire des erreurs qui ne sont pas rattrapées quand le contexte organisationnel est lui-même défaillant. Identifier les erreurs n'a pas pour but de chercher et de pointer du doigt un bouc émissaire, mais vise à réaliser un retour d'expérience nécessaire pour prévenir la survenue de nouveaux accidents (Peiffert *et al.*, 2007 ; Marchesi *et al.*, 2009). Une erreur n'est pas une faute mais la répétition d'une erreur, dès lors qu'elle a été identifiée, devient une faute. Il peut s'agir d'une erreur ponctuelle qui ne concerne qu'un seul patient, mais il a été observé des accidents sériels qui concernent tous les patients traités selon une méthode ou une technique. C'est ce type d'erreur qui a été à l'origine des deux accidents sériels survenus en France, à Épinal en 2006 et à Toulouse en 2007, les plus importants de ces 20 dernières années dans le monde (Bourguignon *et al.*, 2009).

Cinq événements de surirradiation au Centre Hospitalier Jean Monnet d'Épinal (1987-2006)

Cinq événements de surirradiation différents sont survenus au Centre Hospitalier Jean Monnet d'Épinal entre 1987 et 2006, concernant plus de 5 500 patients. À la suite de la déclaration en 2006 par l'Agence régionale d'hospitalisation (ARH) Lorraine de l'accident sériel le plus récent d'entre eux, et du plus grave, quatre autres ont été identifiés rétrospectivement après la déclaration par des patients de symptomatologies qui n'entraient pas dans le cadre de l'accident déjà identifié. C'est ainsi que les 4 autres accidents sériels ont été mis en évidence en remontant dans le temps. Si les causes de ces accidents sériels sont différentes, ils ont tous un point commun : ils trouvent leur origine dans la mise en place non préparée d'une nouvelle technique de radiothérapie. Cinq cohortes de patients ont été définies en fonction de la cause de leur surirradiation et de la date de leur découverte.

Première cohorte de patients surirradiés

En 2004, les deux radiothérapeutes et le seul physicien de ce service, décident d'utiliser une nouvelle technique de modulation de l'intensité des faisceaux de radiothérapie, qui permet de remplacer des filtres en coin physique (pièces métalliques placées manuellement entre la source et le patient pour atténuer le rayonnement dans une partie du faisceau), par des filtres en coin dynamique, utilisant le collimateur mul-

tilame dont est équipé l'accélérateur linéaire. Entre mai 2004 et août 2005, 99 patients ont été traités avec cette technique pour un cancer de la prostate, parmi lesquels 24 patients l'ont été avec un surdosage variant de 20 à 50 %, un patient ayant reçu jusqu'à 120 Gy en 39 séances. Douze patients ont été grièvement blessés, et dix d'entre eux sont décédés des suites de leurs blessures induites par la surirradiation. La cause initiale est une mauvaise utilisation du logiciel de planification de la radiothérapie qui s'est répétée pour les 24 victimes. Le nombre d'Unité Moniteur (UM, correspondant au temps d'exposition du patient par faisceau de rayons X) était calculé pour des filtres en coin physique, alors que le patient était traité avec des filtres en coins dynamiques. L'analyse des causes de cet accident a révélé un glissement de tâches entre le physicien et des manipulateurs de radiothérapie qui étaient chargés de réaliser ces dosimétries complexes, et dont la formation de certains d'entre eux a été insuffisante et entachée d'erreurs. Aucune vérification n'a été faite pour valider ce calcul. Les barrières de sécurité qui avaient été mise en place dans ce service et placées au long du déroulement des préparations de la radiothérapie, et qui auraient pu détecter l'erreur, ont été levées spécialement pour ces traitements complexes :

- le programme informatique, qui avait été écrit localement pour effectuer une vérification du nombre d'UM par un double calcul indépendant, n'a pas été mis à jour pour l'utilisation de filtres dynamiques : il n'y a pas eu de vérification du nombre d'UM pour ces traitements ;
- un autre programme informatique écrit localement pour établir une communication entre le logiciel de planification et l'appareil de radiothérapie, n'a pas non plus été mis à jour pour l'utilisation de filtres dynamiques : le nombre d'UM était directement saisi manuellement à la console de traitement ;
- la dosimétrie *in vivo*, qui a mesuré la dose de radiothérapie effectivement reçue par le premier patient, a bien montré le surdosage, mais le résultat de cette mesure a été mal interprété : l'écart par rapport à la dose calculée était tel qu'il en a été déduit que la dosimétrie *in vivo* ne pouvait pas s'appliquer à l'utilisation de filtres en coin dynamique : les patients n'ont pas bénéficié de cette vérification ultime avant de recevoir la surirradiation.

Les patients n'étaient pas suivis par les radiothérapeutes, et c'est un gastroentérologue du CHU de Nancy qui, observant des rectites radiques gravissimes chez plusieurs patients traités à Épinal, va donner l'alerte. L'arrêt de l'utilisation de cette technique ne survient qu'en août 2005, mais l'alerte nationale n'a été effective qu'en juillet 2006 du fait de retards à tous les niveaux de la chaîne administrative.

Deuxième cohorte de patients surirradiés

À la suite de la déclaration de l'accident n°1, une enquête de l'Inspection générale des affaires sociales (IGAS) a identifié des patients traités entre octobre 2000 et octobre 2006 pour un cancer de la prostate qui avaient des séquelles post-radiques dans une pro-

portion qui dépassaient le faible pourcentage habituellement observé. Une analyse réalisée par l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) a montré que ces patients avaient été traités par radiothérapie conformationnelle avec un contrôle quotidien de leur positionnement réalisé avec le faisceau de l'appareil de radiothérapie. Ces images apportaient une dose d'irradiation supplémentaire de 8 à 10 % à chaque séance dont il n'était pas tenu compte : 0,17 à 0,38 Gy supplémentaires s'ajoutait à la dose de la séance (2 Gy). Pour des doses prescrites comprises entre 70 et 78 Gy, ces patients ont reçu entre 76 et 85 Gy. Cette deuxième cohorte est constituée de 411 patients, dont près de 40 % ont des séquelles modérées à graves. Deux patients sont décédés des suites de leurs blessures induites par la surirradiation.

Troisième cohorte de patients surirradiés

À la suite de la découverte des 2 premiers accidents de radiothérapie, un numéro vert a été mis à disposition des patients et une mission de suivi a été mise en place par le ministère de la Santé. C'est ainsi que, lors de l'analyse en juillet 2007 du dossier d'un patient traité en juillet 2000, qui se plaignait de complications de rectite radique hémorragique, alors qu'il n'appartenait à aucune des deux cohortes connues, il a été mis en évidence une anomalie dans la dose délivrée à chaque séance de radiothérapie. L'équipe de physique du Centre Alexis Vautrin a permis de découvrir qu'une erreur s'était insérée dans le programme informatique écrit par le physicien pour effectuer le calcul de la dose délivrée par les appareils de radiothérapie du service. L'existence de cette erreur de calcul a été confirmée par des experts de l'Agence de Sécurité Nucléaire (ASN) et de l'RSN. L'enquête a montré que cette erreur est apparue au moment de l'écriture de ce programme « maison » en 1987, et qu'elle n'a été corrigée qu'en juillet 2000 (au milieu des séances de radiothérapie du patient qui s'était signalé). Au cours de cette période, au moins 5 000 patients ont été traités avec une surexposition, de 3 % (1 100 patients), de 5,5 % (3 600 patients) ou de 7,1 % (306 patients), selon l'énergie des photons utilisés pour leur traitement. La mesure de la dosimétrie *in vivo*, mise en place dans ce service en 1995, aurait pu permettre de détecter ces erreurs, si l'écart entre la dose calculée et la dose mesurée n'avait pas été négligé. Deux patients sont décédés des suites de leurs blessures induites par la surirradiation.

Quatrième cohorte de patients surirradiés

L'examen systématique de dossiers a permis de mettre en évidence une erreur de calcul de la dose délivrée avec des filtres en coins lors de radiothérapies de cancers du sein en 1993. Cette erreur est survenue lors de l'utilisation d'un nouvel accélérateur linéaire chez les 8 premières patientes traitées pour un cancer du sein avec cette machine. Les doses délivrées ont été de 60 à 84 Gy au lieu de 50 Gy.

Cinquième cohorte de patients surirradiés

Pour 37 patientes traitées pour cancer du sein en 1999, une utilisation inappropriée d'une technique de radio-

thérapie a conduit à une surexposition du cœur à des doses excessives. Pendant les quatre mois au cours duquel un appareil de radiothérapie a été changé, le service ne disposait plus de faisceaux d'électrons. Certaines patientes traitées pour un cancer du sein ont reçu une radiothérapie de la chaîne ganglionnaire mammaire interne par un faisceau direct de rayons X de 6 MV délivrant 50 Gy en 25 séances. Des complications cardiaques graves ont été observées chez 9 de ces patientes (24 %) : accidents coronariens, péricardite hémorragique, valvulopathies et insuffisances cardiaques. Aucune patiente n'est décédée des suites de cette surirradiation cardiaque.

L'accident de radiothérapie de Toulouse (avril 2006-avril 2007)

L'accident de radiothérapie de Toulouse entre avril 2006 et avril 2007) mérite une mention particulière car il a conduit à la surirradiation de 145 personnes lors de traitements de radiochirurgie stéréotaxique de tumeurs cérébrales dont des tumeurs bénignes. L'erreur a consisté en la mauvaise calibration de l'intensité du microfaisceau de rayons X de l'appareil Novalis (accélérateur robotisé) du fait de l'utilisation d'une chambre d'ionisation de trop grande dimension par rapport à la petite taille du faisceau. L'alerte a été donnée par le constructeur qui avait observé par hasard, un an après l'installation de l'appareillage, que les paramètres de calibration du Novalis de Toulouse différaient fortement des paramètres des autres installations du même type. Le suivi des patients n'avait pas généré d'alerte alors même que certains d'entre eux avaient reçu 3 fois la dose prescrite lors d'une seule séance. Mais le taux de paralysie faciale chez les patients traités pour un neurotome de l'acoustique (tumeur bénigne) a été *in fine* de l'ordre de 40 %.

Les autres événements significatifs de radiothérapie survenus en France ces dernières années

Parmi les autres événements de radiothérapie survenus en France ces dernières années, on peut identifier les problèmes significatifs suivants :

- mauvaise interface machine/logiciel : jamais testée dans une configuration inédite, cette interface a conduit à réaliser une irradiation grand champ au lieu de petit champ (le logiciel n'a pas transmis l'instruction), avec des conséquences graves pour un seul patient (intervention chirurgicale mutilante) ;
- mauvaise interface humaine : une erreur de compréhension concernant la taille du champ d'irradiation (confusion entre cm et mm lors d'une instruction orale) a conduit au décès d'un patient ;
- la survenue d'une myélite radique (surdosage sur la moelle épinière) est toujours redoutée de la part des radiothérapeutes : un accident survenu a résulté de

la superposition de deux champs consécutifs, la non superposition des champs ayant bien été scrupuleusement vérifiée de face mais non de profil ;

- des erreurs d'identification de patients surviennent, du fait d'une erreur d'homonymie sur la personne physique ou sur le fichier informatique associé ;
- un cas de ré-irradiation dans une zone préalablement irradiée pour lequel il n'a pas été tenu compte du cumul de dose apporté par la radiothérapie précédente.

De nombreuses leçons ont été tirées de tous ces événements

L'installation et la mise en œuvre de nouveaux appareillages de radiothérapie (nouveaux accélérateurs, robots, etc.) doivent faire l'objet d'un projet de groupe anticipé, mûri et préparé avec des procédures dédiées incluant : formation et entraînement des personnels (avec une vérification de la bonne acquisition des connaissances), élaboration de protocoles, assurance qualité, en particulier lors de la recette de l'installation qui doit faire l'objet d'une attention toute particulière. Ces équipements de radiothérapie doivent être totalement intégrés (il n'y a plus de logiciels « faits maison »), de la planification jusqu'à la réalisation du traitement, pour bénéficier de l'assurance qualité logicielle des constructeurs et éviter les anomalies possibles aux interfaces informatiques. Le guide des procédures de radiothérapie réalisé par les professionnels (SFRO) est une référence et doit être largement utilisé.

La mise en place d'un niveau critique en termes de ressources humaines et du nombre de patients traités : pour qu'un centre de radiothérapie soit autorisé à traiter des patients par les autorités sanitaires, l'équipe doit comporter au minimum deux oncologues radiothérapeutes et deux médecins médicaux, et le centre doit traiter au moins 600 patients par an. En deçà, un jumelage avec un centre de référence régional doit être formalisé.

Le suivi des patients doit être rigoureux de la part des radiothérapeutes comme de celle des médecins référents avec une attention particulière à porter aux symptômes susceptibles de générer une alerte. L'information des patients est obligatoire.

La mise en place d'un registre des événements bénins et d'une cellule de retour d'expérience dans chaque service doit susciter les professionnels à porter une plus grande attention aux phénomènes précurseurs qui doivent être identifiés et analysés avec rigueur. La déclaration des événements indésirables est obligatoire, doit être réalisée rapidement tant au niveau national que local, afin de mettre en place une prise en charge de l'envergure voulue, en particulier en cas de problème générique.

La dosimétrie *in vivo*, lorsqu'elle est utilisable, ou une méthode dosimétrique équivalente, doivent pouvoir apporter un contrôle que la dose délivrée est bien celle

qui a été calculée. En conséquence, toute anomalie de concordance de résultat doit être explorée et expliquée totalement, et non pas banalisée.

Les interfaces humaines ou hommes/machines ou machines/logiciel sont sources de nombreuses erreurs possibles du fait de la multiplicité des relations et des situations. Il convient donc de faire une analyse précise de toutes les situations d'interfaces et les considérer comme situations à risque potentiel. Notamment la transmission orale et la transmission papier d'instructions doivent faire l'objet d'une assurance de qualité. Des procédures doivent être mises en place à tous les niveaux et respectées afin d'éviter les erreurs d'identification des patients, la mauvaise comptabilité des sources, etc.

Perspectives

Comme on a pu le voir, la radioprotection est bien une exigence première de la radiothérapie car les erreurs sont en grande majorité du domaine du facteur organisationnel et humain et du domaine de l'assurance qualité. Leurs conséquences possibles chez les patients sont du domaine du surdosage de la zone saine péri-tumorale avec des effets tissulaires (brûlures radiologiques). Les leçons à tirer des accidents d'Épinal et de Toulouse sont complétées par les observations résultant des événements de radiothérapie qui sont déclarés à l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) et par celles que l'ASN effectue lors de ses inspections systématiques de tous les services de radiothérapie. Ont été rendus obligatoires la déclaration à l'ASN des événements indésirables et un retour d'expérience pour y mettre fin. Le nombre des événements indésirables déclarés à l'ASN reste faible, environ 200 événements par an, en grande majorité de niveau 0 et 1 (sans conséquences pour les patients) de l'échelle de communication ASN-SFRO (Société française de radiothérapie oncologique) qui en comporte 7, et environ 5 événements de niveau 2 (avec faibles conséquences pour les patients). La déclaration d'évènement de niveau 3 est exceptionnelle, et aucun accident de niveau 4 ou plus n'a été déclaré depuis les accidents d'Épinal. La communauté de radiothérapie française est engagée de façon responsable dans une démarche de prévention des risques. Elle est sortie grandie de ce grand traumatisme des accidents d'Épinal et de Toulouse et la radiothérapie reste considérée par tous comme une excellente méthode de traitement des cancers, efficace et sécurisée.

Références

BOURGUIGNON M., SIMON J.M., PEIFFERT D. & KREMBEL D. (2009), « Radiothérapie : les leçons à tirer des accidents d'Épinal et de Toulouse », *Radioprotection*, 44(4), pp. 417-429.

BRUNT *et al.* (2020), "Hypofractionated breast radiotherapy for 1 week versus 3 weeks (FAST-Forward): 5-year efficacy and late normal tissue effects results from a multicentre, non-inferiority, randomised, phase 3 trial", *Lancet*, 395, 1613e1626.

FORAY N. (2025), « Réponse individuelle aux radiations ionisantes : nous ne sommes pas égaux face aux dommages de l'ADN », article 5 de ce numéro.

INCA (2023), « Panorama des cancers en France », Institut National des Cancers, <https://www.e-cancer.fr/Expertises-et-publications/Catalogue-des-publications/Panorama-des-cancers-en-France-edition-2023>

MARCHESI V., AIGLE D., PEIFFERT D., NOEL A. & SIMON J.M. (2009), « Sécurisation de l'activité de radiothérapie bi-site dans le cadre de la reprise des traitements au centre hospitalier d'Épinal par l'équipe du centre Alexis-Vautrin de Nancy », *Cancer Radiothérapie*, 13(8), pp. 740-743.

PEIFFERT D., SIMON J.M. & ESCHWEGE F. (2007), « L'accident d'Épinal : passé, présent, avenir », *Cancer Radiothérapie*, 11, pp. 309-312.

VAN AS *et al.* (2024), "Phase 3 Trial of stereotactic body radiotherapy in localized prostate cancer", *N Engl J Med*, 391(15), pp. 1413-1425.

La réponse gouvernementale en cas d'urgence radiologique

Par Sylvie SUPERVIL

Conseillère auprès du directeur général de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), précédemment chargée de mission au secrétariat général de la Défense et de la Sécurité nationale (SGDSN)

Et Lionel LACHENAUD

Chef du bureau de la réponse gouvernementale au SGDSN

L'utilisation de la radioactivité, que ce soit dans le domaine médical, de l'industrie ou de la recherche, nécessite des précautions au regard des effets sur la santé que la radioactivité peut générer en cas d'usage inapproprié, d'accident ou d'acte malveillant. Dans ces situations d'urgence, l'enjeu est de limiter l'exposition aux rayonnements ionisants autant que cela est raisonnablement possible au travers, d'une part, de la mise en place de mesures de protection, d'autre part, d'une prise en charge adaptée des personnes susceptibles d'être exposées à la radioactivité. Dans tous les cas, les décisions et les actions doivent prendre en compte le contexte de l'évènement, sans oublier, le cas échéant, la primauté de l'urgence médico-chirurgicale sur l'urgence radiologique.

Introduction

Au-delà de leur contribution au développement et à la protection de la société, les propriétés des rayonnements ionisants, que ce soit dans le domaine médical, de l'industrie ou de la recherche, sont susceptibles de générer des situations d'urgence du fait d'usages inappropriés ou d'accidents fortuits ou criminels. Aussi, l'utilisation de la radioactivité est-elle encadrée par une réglementation ayant vocation à préserver de ses effets indésirables sur la santé et l'environnement. L'État français a néanmoins prévu des stratégies de réponse en cas d'exposition inappropriée (accidentelle ou malveillante) à la radioactivité. Ces stratégies sont notamment explicitées dans des plans de gestion de crise de niveau gouvernemental ou territorial.

Le contexte accidentel

L'exposition de personnes à la radioactivité, en situation d'urgence nucléaire ou radiologique définie comme une situation de risque suspecté ou avéré respectivement liée à la libération d'énergie résultant d'une réaction nucléaire en chaîne ou de la désintégration des produits d'une réaction en chaîne, ou en situation d'urgence radiologique définie comme une situation d'exposition aux rayonnements ionisants (AIEA, 2018) peut avoir pour origine :

- un accident : industrie nucléaire, équipement médical de radiothérapie, source abandonnée, accident de laboratoire, transport de substances radioactives, etc.

- une action malveillante impliquant un agent explosif (« bombe sale ») avec dispersion de substances radioactives, dispersion de radioactivité dans l'environnement, exposition à une source scellée de haute activité, etc.
- un acte de guerre : utilisation d'armes nucléaires tactiques, etc.

Ces évènements nucléaires ou radiologiques (NR) peuvent concerner toutes les catégories de personnes : travailleurs, personnes du public, patients, etc. et impliquer un ou plusieurs individus en fonction des cas. Elles nécessitent la mise en œuvre d'une réponse adaptée au cas par cas, *via* des mesures allant de la prévention à la prise en charge sanitaire et médicale.

Les risques engendrés par ces situations relèvent de :

- la contamination (exposition interne par voie d'inhalation, d'ingestion, ou par incorporation du fait d'une blessure) ;
- l'irradiation (exposition externe du fait de la présence d'une source de rayonnement proche ou autour de l'individu).

La planification gouvernementale

Dans le cadre de la Directive générale interministérielle relative à la planification de défense et de sécurité nationale (SGDSN, 2023), le Gouvernement a prévu des dispositifs susceptibles de répondre à ce type de situations. On peut ainsi citer :

- Le plan gouvernemental NRBC « Nucléaire, radiologique, biologique, chimique » est plutôt axé sur la prise en compte d'un acte malveillant (SGDSN, 2016). Il est une aide à la décision gouvernementale lors d'une menace ou de l'exécution d'un acte de terrorisme NRBC, sur la base de quelques situations de référence. Ce plan gouvernemental est classifié. Il est décliné au niveau territorial, zones de défense et de sécurité et départements. En situation d'urgence, le plan gouvernemental NRBC peut s'articuler avec d'autres plans, notamment pour la gestion des conséquences d'un événement, comme les plans de la famille « Pirate » ou le « plan national de réponse à un accident nucléaire ou radiologique majeur ».
- Le plan national de réponse à un accident nucléaire ou radiologique majeur concerne davantage les événements touchant l'industrie nucléaire (SGDSN, 2014). Il a pour objectif de préciser l'organisation des pouvoirs publics en termes de préparation et de réponse à une situation d'urgence radiologique qu'elle soit consécutive à un accident industriel, à un accident lors d'un transport, à une catastrophe naturelle ou bien encore à un acte de malveillance sur un site nucléaire ou un transport. Il se base sur six situations de référence sur site nucléaire, lors d'un transport de substances radioactives, y compris en mer, ou en cas d'accident survenant à l'étranger.

Ces plans, comme tous les outils d'aide à la décision, proposent des dispositions qui ont vocation à être adaptées par les décideurs, en fonction de chaque situation concrète rencontrée. Cette planification est déclinée au sein des périmètres ministériels ainsi qu'au niveau territorial et une organisation spécifique est ainsi mise en place à travers les dispositifs suivants :

- ORSEC (organisation de la réponse de sécurité civile), avec notamment le plan ORSEC NOVI (NOmbreuses VICTimes) ;
- ORSAN (organisation de la réponse du système de santé en situations sanitaires exceptionnelles), avec notamment le plan ORSAN NRC (Nucléaire, radiologique, chimique), le plan ORSAN AMAVI (Accueil MASSIF de VICTimes non contaminées) et le plan ORSAN MÉDICO-PSY (prise en charge psychologique) (ORSAN, 2024).

Toujours au niveau territorial, des dispositions spécifiques (Plans particulier d'intervention - PPI - plans ORSEC Iode ou ORSEC Transport de Matière Dangereuses, ORSEC maritime) peuvent être mobilisés afin de déployer les mesures qui seraient justifiées par la situation.

Les stratégies de réponse

Pour ces situations d'urgence radiologique accidentelles ou intentionnelles, l'objectif est de limiter autant que possible l'exposition des personnes et d'assurer, s'il y a lieu, leur prise en charge dans le cadre d'un parcours structuré et cohérent avec la priorisation de l'urgence médico-chirurgicale sur la prise en charge de l'exposition radiologique.

La protection

En cas de menace ou de rejet radioactif avéré, la stratégie de protection des personnes vise à limiter l'exposition des personnes à la radioactivité. Selon les situations, les actions sont mises en œuvre sur décision du Gouvernement ou de son représentant sur le territoire concerné, voire en mode réflexe dans certains cas.

Selon la nature et la cinétique des rejets constatés ou susceptibles de se produire dans un délai donné, et selon les conditions météorologiques, la stratégie de protection repose sur la combinaison et/ou le séquençage des principales mesures suivantes :

- la mise à l'abri dans un bâtiment : dans les cas où le rejet intervient rapidement et est de courte durée ;
- l'évacuation, en cas de rejets dont la cinétique est lente et/ou qui peuvent durer dans le temps, si possible avant que le rejet ne débute, ou tant qu'il est de faible intensité ;
- la prise de comprimés d'iode de potassium, uniquement en cas de rejet d'iode radioactif ;
- la restriction d'activités dans l'environnement et de consommation de denrées alimentaires locales.

Ces actions sont déclinées et organisées dans le cadre de plans d'urgence territoriaux complétés par des dispositions départementales ou zonales spécifiques. La mise en œuvre de ces mesures de protection est guidée par des valeurs repères issues du code de la santé publique (CSP, 2024) et par une évaluation des risques prenant en compte les différents paramètres disponibles de la situation, dont la météorologie.

Une information du public et des populations concernées est réalisée tout au long du processus de gestion de crise.

Dans le cas de la présence d'une source radioactive susceptible d'exposer des personnes aux rayonnements (blocage d'une source scellée de haute activité dans l'industrie, source abandonnée, acte malveillant, etc.), les mesures de protection visent principalement à sécuriser le périmètre et à éloigner les personnes non impactées de la source.

La prise en charge sanitaire et médicale

L'objectif est de limiter les impacts de l'exposition radiologique sur la santé de la ou des personnes concernées, quelles que soient les mesures de protection déjà mises en œuvre. Il s'agit d'organiser la prise en charge optimale des personnes susceptibles d'avoir été exposées à des rejets ou à des rayonnements. Il convient de prioriser les éventuelles victimes en état grave (urgences absolues) tout en limitant au maximum le risque de transfert de contamination par la mise en place de mesures appropriées, sur le terrain et dans les établissements de santé.

La prise en charge sanitaire

Selon les situations, la prise en charge sanitaire peut s'articuler autour de quatre actions :

- les soins aux éventuels blessés et aux urgences médicales induites par le contexte ;
- l'identification et la prise en charge des populations concernées par :
 - le contrôle d'une éventuelle contamination externe avec la possibilité d'effectuer un tri rapide d'un grand nombre de personnes,
 - la décontamination externe des personnes contaminées,
 - la mesure individuelle d'une éventuelle contamination interne (SG, 2022),
 - la mise en œuvre des mesures thérapeutiques individuelles adaptées, le cas échéant.
- la prise en charge médico-psychologique à court et à long terme ;
- la mise en place du suivi médical et épidémiologique des personnes exposées.

L'organisation des secours et des soins

En raison des enjeux spécifiques liés à la prise en charge de blessés, l'organisation des secours et des soins (SGDSN, 2011b) prévoit deux phases.

La phase préhospitalière avec une organisation des secours et des soins médicaux d'urgence qui relève du dispositif ORSEC déclenché par le préfet (PPI, plan ORSEC NOVI, etc.) et de la déclinaison territoriale de plans gouvernementaux (plan NRBC, PNRANRM). Cette organisation permet la prise en charge rapide et adaptée des victimes et des impliqués sur le lieu de l'événement, notamment leur décontamination s'il y a lieu, puis leur orientation dans les établissements de santé disposant des compétences requises après régulation médicale par le service d'aide médicale d'urgence (SAMU) territorialement compétent.

Il est important de noter que, quelles que soient les circonstances de l'événement NR, l'urgence médico-chirurgicale prime sur l'urgence radiologique dans la prise en charge des victimes.

La phase hospitalière fait appel au dispositif ORSAN précité : ORSAN NRC, ORSAN AMAVI. Cette organisation permet la prise en charge des victimes dans le système de santé et s'inscrit en complémentarité du dispositif ORSEC. Dans le cadre de l'organisation de la réponse opérationnelle face aux situations sanitaires exceptionnelles (SSE), l'objectif est d'organiser la montée en puissance du système de santé. Le dispositif ORSAN permet ainsi de coordonner la mobilisation des opérateurs de soins et définit le parcours de soin des victimes. Il structure les filières de prise en charge et permet la prise en charge rapide des patients victimes d'un agent nucléaire ou radiologique dans les établissements de santé. La typologie des victimes est tributaire de la nature de l'événement causal, ou de son mode opératoire pour les actes de malveillance.

Dans le cadre du plan ORSAN NRC, les établissements de santé de première ligne, en particulier les « établissements de santé de référence pour le risque NR », sont identifiés pour accueillir les victimes blessées-irradiées-

contaminées. La mobilisation des établissements de santé repose sur le « plan de gestion des tensions hospitalières et des situations sanitaires exceptionnelles » notamment le volet NRC du « plan blanc ».

La prise en charge médico-psychologique des victimes impliquées est, quant à elle, définie dans le plan ORSAN MEDICO-PSY. Ce plan opérationnel doit être déclenché en complément du plan ORSAN NRC afin d'assurer une prise en charge médico-psychologique des blessés, de leurs proches ainsi que de l'ensemble des intervenants ayant pris part à la gestion de l'événement sous l'autorité de l'État.

Les stratégies d'intervention médicale

Les stratégies d'intervention médicale (ASN, 2023) répondent aux cas :

- d'irradiation externe ;
- de contamination.

Pour ces deux cas, des procédures spécifiques sont mises en œuvre tant sur les lieux de l'événement que dans les établissements de santé. Des équipements et des dispositifs de protection des intervenants sont nécessaires et sont prépositionnés à cet effet dans les établissements de santé ou dans des dotations dédiées.

- La prise en charge de victimes irradiées non contaminées (exposition accidentelle à une source radioactive scellée par exemple) ne présente pas de risque de transfert de contamination. Pour ce cas, la priorité est la réalisation de l'enquête dosimétrique (reconstitution des circonstances de l'exposition aux rayonnements ionisants et évaluation de la dose reçue) permettant ensuite l'intervention médicale et thérapeutique adaptée.
- Lors de la prise en charge de victimes radio-contaminées, les actions de protection des personnes consistent à ne pas étendre la contamination et à ne pas transformer une contamination externe en contamination interne. Cette priorité est également déclinée au niveau organisationnel pour limiter le risque de contamination des intervenants et des établissements de santé, afin de limiter au maximum l'impact de la situation d'urgence radiologique sur la continuité d'activité des activités critiques pour la résilience de la Nation.

Les acteurs

Les principaux contributeurs à ces actions de protection et de prise en charge sont les suivants :

- aux niveaux gouvernemental et sectoriel : la Cellule Interministérielle de Crise (CIC), les ministères et leurs établissements publics nationaux. Les acteurs du domaine nucléaire : autorités de sûreté civile et de défense, Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, s'y associent ;
- au niveau territorial : le préfet compétent et l'ensemble des services dont il dispose, les forces de sûreté et de sécurité, les services de secours (dont secours médicaux), les maires. Les agences régionales de santé, les opérateurs de soins avec les établissements de santé de référence pour le risque nucléaire

ou radiologique (régionaux ou nationaux) ainsi que les établissements de santé de première ligne. Les professionnels de santé de ville peuvent également apporter leur concours.

Les acteurs opérationnels de la réponse à un événement NR doivent ainsi travailler en étroite collaboration, y compris avec les services des opérateurs nucléaires, s'il y a lieu. Une doctrine interservices (SGDSN, 2011b) a été établie par le secrétariat général à la Défense et la Sécurité nationale (SGDSN) et des exercices permettent d'entretenir une synergie entre les différentes équipes concourantes.

La réglementation confie également au Gouvernement la responsabilité d'évaluer les conséquences d'une situation d'urgence radiologique. Bien que celles-ci soient fortement dépendantes de la nature de l'évènement, une doctrine est établie pour organiser la gestion des zones de territoires, si celles-ci ont été contaminées, et l'accompagnement des personnes concernées, dans une approche « Une Seule Santé ».

En fonction de la situation, une surveillance épidémiologique peut être mise en place pour permettre un suivi dans le temps de l'état de santé des populations concernées, de contribuer à l'évaluation sanitaire globale des conséquences de l'évènement et prioriser les problèmes de santé publique liés à la situation. L'ensemble des données d'évaluation, des résultats dosimétriques des personnes et d'épidémiologie contribue, par ailleurs, à l'évolution des recommandations et normes, en complétant les connaissances scientifiques internationales dans ce domaine.

Références

- AIEA (2018), « IAEA Safety Glossary » édition 2018 (ISBN 978-92-0-104718-2).
- ASN (2023), Guide national d'intervention médicale en situation d'urgence nucléaire ou radiologique.
- CSP (2024), Articles R.1333-81 à 89 du code de la santé publique.
- ORSAN (2024), Guide méthodologique « dispositif ORSAN - Organisation de la réponse du système de santé aux situations sanitaires exceptionnelles – régional ».
- SGDSN (2009a), Circulaire interministérielle n°007/SGDN/PSE/PPS (8/10/2009) : dispositif interministériel d'intervention face à la menace ou à l'exécution d'actes de terrorisme nucléaire, radiologique, biologique ou chimique (NRBC).
- SGDSN (2009b), Circulaire interministérielle n°747/SGDN/PSE/PPS (30/10/2009) : doctrine de l'État pour la prévention et la réponse au terrorisme nucléaire, radiologique, biologique, chimique et par explosifs (NRBC-E).
- SGDSN (2011a), Circulaire n°750/SGDSN/PSE/PPS (18/02/2011) : découverte de colis, colis, contenants et substances, suspectés de renfermer des agents radiologiques, biologiques ou chimiques dangereux.
- SGDSN (2011b), Circulaire n°800/SGDSN/PSE/PPS (18/02/2011) : doctrine nationale d'emploi des moyens de secours et de soins face à une action terroriste mettant en œuvre des matières radioactives.
- SGDSN (2014), Plan national de réponse à un accident nucléaire ou radiologique majeur n°200/SGDSN/PSE/PSN (02/2014) (en cours de refonte).

SGDSN (2016), Plan gouvernemental NRBC n°10222/SGDSN/PSE/PPS/CD (23/12/2016).

SGDSN (2023), Directive générale interministérielle relative à la planification de défense et de sécurité nationale n°320/SGDSN/PSE/PSN (23/01/2023).

SG (2022), Circulaire n°6388-SG du 28 décembre 2022 relative à la réalisation de mesures de la contamination interne des personnes en situations d'urgence radiologique et d'exposition durable, à l'exploitation et à la diffusion de leurs résultats.

Pour en savoir plus

PHILIPPE J.-M., DELVECCHIO E., FOFANA V. (2023), « Organisation de la réponse médicale en cas d'évènement radiologique », *Médecine de Catastrophe – Urgences Collectives*, 7(2), pp. 86-91.

<https://www.irsn.fr> - rubrique savoir-comprendre/crise :

- Face à un accident d'urgence radiologique
- Qu'est-ce qu'une situation d'urgence nucléaire ou radiologique ?
- La gestion des situations d'urgence nucléaire ou radiologique
- État des connaissances sur les conséquences sanitaires d'un accident nucléaire
- Organisation et acteurs de la gestion d'une crise nucléaire ou radiologique
- Livret à destination des professionnels de santé : Risques associés aux rayonnements ionisants en situation accidentelle

<https://www.sgdsn.gouv.fr> - rubrique missions/anticiper et prévenir et rubrique publications / guides.

Le Service de Protection Radiologique des Armées : la radioprotection dans le cadre de la dissuasion

Pr Jean-Christophe AMABILE

Directeur du Service de Protection Radiologique des Armées (SPRA)

Dr Emilie JAMET-ANSELME

Chef de la division médicale du SPRA

Dr Annabelle BONNIN DUSSAUD

Chef de la division intervention formation du SPRA

Lieutenant-colonel Ingrid RICHARD

Chef de la division contrôle du SPRA

Dr Manon CHANTRE

Pharmacien spécialisé en toxicologie et environnement, assistante des hôpitaux des Armées

Dr Denis CHIANÉA

Directeur-adjoint du SPRA

Et Guillaume GARNIER

Ingénieur, chef de la cellule de reconstitution dosimétrique opérationnelle du SPRA

Le Service de Protection Radiologique des Armées a été créé en 1973 dans le cadre de la dissuasion nucléaire française. Situé à Clamart, il fait partie de l'Académie de santé des Armées. Sa devise, « La radioprotection au service des Forces en tout temps et en toutes circonstances », témoigne de la volonté de garantir la radioprotection du personnel du ministère des Armées exposé aux rayonnements ionisants, tant en situation normale de travail qu'en situation d'urgence radiologique (SUR). Ses activités opérationnelles incluent la surveillance de l'exposition des personnels et de leur environnement de travail, le contrôle des installations, l'intervention, le conseil et l'enseignement. Organisé en pôles spécialisés et divisions métier, le SPRA s'appuie sur un système de management de la qualité qui fait de lui un acteur clé dans la gestion des risques radiologiques au sein des Armées.

La France, à travers la dissuasion nucléaire nationale, est en mesure depuis 50 ans, de mettre en œuvre à tout moment ses armements nucléaires. Elle est ainsi susceptible de faire subir des dommages inacceptables à un adversaire qui s'en prendrait à ses intérêts vitaux.

Le Service de Protection Radiologique des Armées (SPRA) est né de l'aventure de la dissuasion française en 1973 (Amabile *et al.*, 2015). Basé sur l'îlot Percy, à Clamart (92), c'est un établissement de l'Académie

de santé des Armées (ACASAN). Sa mission d'appui technique en radioprotection des exploitants du ministère des Armées (Cazoulat *et al.*, 2014) concerne principalement :

- le contrôle de la surveillance médico-radiobiologique et dosimétrique du personnel du ministère des Armées exposé aux rayonnements ionisants ;
- les vérifications des installations ;

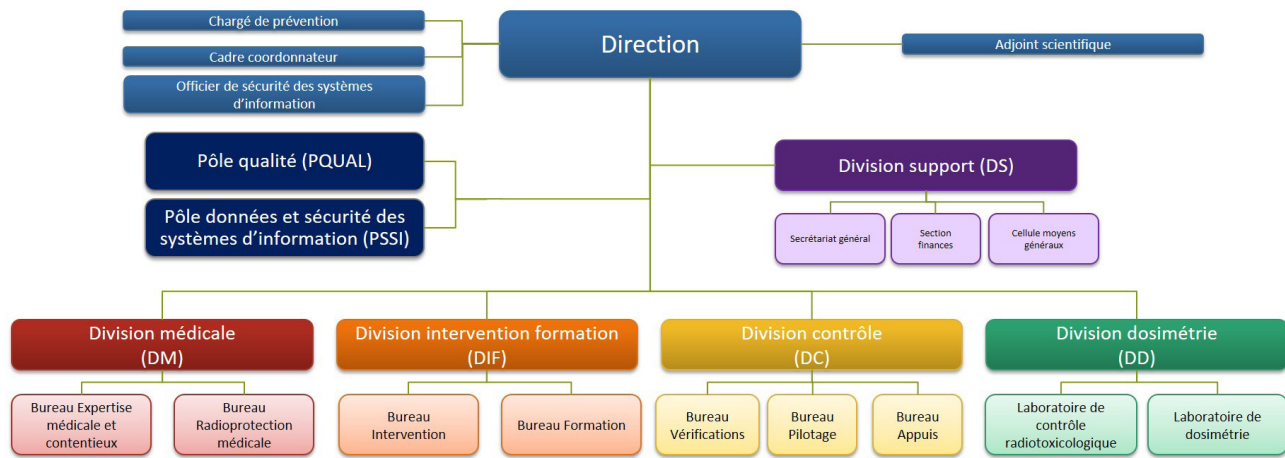


Figure 1 : Organigramme du Service de Protection Radiologique des Armées (Source : SPRA).

- l'enseignement ;
- le conseil auprès des professionnels de santé et des conseillers en radioprotection (CRP) ;
- l'intervention en situation d'urgence radiologique (SUR).

La plupart de ces activités est régie par un système de management de la qualité qui évolue dans le cadre d'une démarche d'amélioration continue. L'établissement (90 employés militaires et civils) est réparti sur trois bâtiments et contribue, avec les autres services de l'îlot (les services de l'Hôpital National d'Instruction des Armées Percy, dont le service d'Hématologie clinique et le Centre de traitement des brûlés, le Centre de transfusion sanguine des Armées et le Centre de traitement des blessés radiocontaminés), à la prise en charge des blessés irradiés et/ou contaminés.

Le SPRA est organisé en une direction (voir la Figure 1), deux pôles (pôle qualité ; pôle données et sécurité des systèmes d'information), une division support, et quatre divisions « métier » (médicale, dosimétrie, intervention/formation, et contrôle).

La direction du SPRA, ses deux pôles et sa division support

Le SPRA est dirigé par un praticien militaire (médecin ou pharmacien). Il est secondé par un directeur-adjoint et s'appuie sur deux pôles et une division support (DS) pour coordonner et soutenir les missions du SPRA.

Le pôle qualité (PQUAL) organise le système de management de la qualité (SMQ) qui évolue dans le cadre d'une démarche d'amélioration continue. Ce SMQ est arrivé à maturité et représente un outil de management solide pour la direction du SPRA.

Le pôle données et sécurité des systèmes d'information (PSSI) participe au bon fonctionnement des outils informatiques, à l'application de la sécurité des systèmes d'information et au bon traitement des données « métier » du SPRA. Il est renforcé par un officier de

sécurité des systèmes d'information (OSSI) directement rattaché à la direction de l'établissement. En collaboration avec l'OSSI, le PSSI pilote notamment le projet SIRA (Système d'Information Radiologique des Armées), qui a vocation à devenir le système de référence pour le suivi radiologique du personnel du ministère des Armées.

La division support apporte un soutien financier et logistique à l'ensemble des services et divisions de l'établissement. Elle élabore et suit notamment le budget de l'établissement, assure le maintien en bon état du parc de véhicules et suit les travaux d'infrastructure.

La division médicale (DM)

La DM est l'interlocuteur des états-majors, directions et services pour ce qui concerne les questions en lien avec l'application du code du travail dans les Armées. Elle est pilote pour la formation des professionnels de santé en charge du suivi du personnel exposé aux rayonnements ionisants dans les Armées.

Elle est organisée en deux bureaux.

Le bureau de radioprotection médicale (BRM)

Il contrôle l'exécution de la surveillance médico-radiobiologique et dosimétrique du personnel du ministère des Armées, ce qui implique des activités de validation :

- contrôle pour validation des fiches d'évaluation et d'aptitude du personnel exposé aux rayonnements ionisants, FEAPERI (voir la Figure 2 page suivante), qui n'existent sous cette forme que dans le ministère des Armées ;
- conseil et aide aux CRP et professionnels de santé dans l'interprétation des données ;
- validation des dossiers relevant des campagnes de mesures de référence (MESREF) sur les armes et les chaufferies nucléaires embarquées, notamment les sous-marins nucléaires.

FICHE D'ÉVALUATION ET D'APTITUDE DU PERSONNEL EXPOSÉ AUX RAYONNEMENTS IONISANTS			
N°		Exemplaire destiné au dossier médical	
À REMPLIR PAR LE CHEF D'ORGANISME			
Catégories : <input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> RADON		Nom de l'organisme :	
Nom de naissance :		Prénom :	
N° INSEE :		Date de naissance : J J M M A A	
POSTE DE TRAVAIL ET FRÉQUENCE DES EXPOSITIONS			
Affectation :	Secteur d'activité SISERI	N° SPRA	Emploi :
Fréquence des expositions :			
CARACTÉRISTIQUES DES SOURCES ÉMETTRICES ET NATURE DES RAYONNEMENTS IONISANTS			
Irradiation	<input type="checkbox"/> γ ou X de faible énergie < 150 keV	<input type="checkbox"/> Neutrons rapides	<input type="checkbox"/> β > 100 keV
	<input type="checkbox"/> γ ou X de forte énergie > 150 keV	<input type="checkbox"/> Neutrons thermiques	
Risque de contamination	<input type="checkbox"/> Produits de fission et d'activation (réacteur)	<input type="checkbox"/> Petit radiologique de défense :	
	<input type="checkbox"/> Médecine nucléaire :	<input type="checkbox"/> Autres :	
ÉVALUATION DE LA DOSE PRÉVISIONNELLE ANNUELLE			
Dose efficace (corps entier)	<input type="text"/> mSv	Non concerné <input type="checkbox"/>	Dose efficace liée au radon <input type="text"/> mSv
			Non concerné <input type="checkbox"/>
Dose équivalente extrémités	<input type="text"/> mSv	Non concerné <input type="checkbox"/>	Dose équivalente cristallin <input type="text"/> mSv
			Non concerné <input type="checkbox"/>
Date :	Cachet nominatif et signature du chef d'organisme ou du conseiller en radioprotection :		Date :
J J M M A A	CACHET NOMINATIF ET SIGNATURE OBLIGATOIRES		J J M M A A
			Signature de l'intéressé(e) :
			Signature OBLIGATOIRE
À REMPLIR PAR LE MÉDECIN			
RÉSULTATS DES EXAMENS PARACLINIQUES			
Radiotoxicologie :	Nom du laboratoire :	N° d'examen :	Date :
<input type="checkbox"/> Urines <input type="checkbox"/> Saliva			J J M M A A
Examen	Nature de l'anomalie :		
<input type="checkbox"/> Normal <input type="checkbox"/> Anormal			
Anthroporadiométrie :	Installation :	N° d'examen :	Date :
			J J M M A A
Examen	Nature de l'anomalie :		
<input type="checkbox"/> Normal <input type="checkbox"/> Anormal			
Hématologie :	Nature de l'anomalie :		
Examen	Date :		
<input type="checkbox"/> Normal <input type="checkbox"/> Anormal	J J M M A A		
Cumul de dose efficace sur 12 mois	TYPE D'EXAMEN MÉDICAL :		CONCLUSION :
	<input type="checkbox"/> Aptitude initiale		
	<input type="checkbox"/> Visite médicale périodique		
	<input type="checkbox"/> Visite fin de catégorisation		
	<input type="checkbox"/> Autre :		
	À revoir avant le :		J J M M A A
DATE :	Décision d'aptitude : <input type="checkbox"/> APTE <input type="checkbox"/> AUTRE ↓		Cachet nominatif et signature du médecin :
J J M M A A			CACHET NOMINATIF ET SIGNATURE OBLIGATOIRES

Figure 2 : Fiches d'évaluation et d'aptitude du personnel exposé aux rayonnements ionisants (Source : SPRA).

Le BRM conseille le commandement et réalise, dans certains cas complexes, un appui technique pour l'évaluation des risques professionnels. À titre d'exemple, il peut superviser, avec les autres divisions, des études dosimétriques des postes de travail afin d'optimiser l'exposition radiologique du personnel soignant des hôpitaux militaires comme au bloc opératoire (Castagnet *et al.*, 2009), lors d'activités de cardiologie interventionnelle et de chirurgie endovasculaire (Abou Anoma *et al.*, 2012 ; Wassilieff *et al.*, 2012) ou bien en médecine nucléaire (Gervot *et al.*, 2024). Les travailleurs du ministère des Armées hors hôpitaux sont également concernés par l'évaluation de ces risques professionnels liés à l'exposition aux rayonnements ionisants, comme le personnel navigant des Armées (Amabile *et al.*, 2007). Il participe enfin à l'élaboration de la réglementation, ainsi qu'aux rares adaptations propres au ministère des Armées, en collaboration avec la direction des ressources humaines du ministère de la Défense (DRHMD) et du contrôle général des Armées (CGA).

Le bureau expertise médicale et contentieux (BEMC)

Le BEMC est chargé de traiter les demandes à caractère médico-légal ou contentieux : établissement des passés radiologiques individuels, conseil aux médecins d'unité pour des avis d'aptitude à travailler au contact des rayonnements ionisants, avis technique dans l'instruction des dossiers d'indemnisation au

profit du Service des pensions militaires d'invalidité ou du Comité d'indemnisation des vétérans des essais nucléaires (CIVEN), expertise médicale judiciaire dans le cadre de contentieux, etc.

La division dosimétrie (DD)

La DD comporte deux laboratoires qui participent à la surveillance dosimétrique de l'exposition des travailleurs du ministère des Armées exposés aux rayonnements ionisants (Lecompte *et al.*, 2014).

Elle dispose également de moyens de terrain permettant de répondre à des problématiques propres à l'urgence radiologique ou à la caractérisation de sources gamma ou neutron.

Le laboratoire de dosimétrie (LDOS)

Il participe à la surveillance de l'exposition externe. Il s'occupe de la mise à disposition et l'analyse des dosimètres à lecture différée adaptés aux types d'irradiation (gamma, X, bêta et neutrons). Il réalise des bilans dosimétriques annuels au profit des différents états-majors et du conseil technique au profit des CRP.

Le laboratoire de contrôle radiotoxicologique (LCR)

Il assure la surveillance de l'exposition interne du personnel et de leur environnement de travail. Celle-ci s'effectue chez l'homme à l'aide d'examen directs (anthroporadiométrie) (voir la Figure 3) ou indirects (analyses sur excréta) et sur l'environnement à travers l'analyse de diverses matrices telles que des eaux, des terres, des végétaux, des frottis, etc.



Figure 3 : Installation d'anthropogammamétrie fixe du SPRA (Source : SPRA).

La division intervention formation (DIF)

Au sein de cette division, le SPRA réunit dans une même entité deux missions convergentes :

- l'organisation de la réponse sanitaire à l'urgence radiologique (bureau intervention) ;
- l'organisation des formations adaptées à chaque type d'emploi (bureau formation).

Le bureau intervention (BI)

Il organise la permanence opérationnelle du SPRA, en lien avec la DD et la division contrôle (DC) qui fournissent la majeure partie des moyens humains et matériels de l'établissement en matière d'urgence radiologique (Gagna *et al.*, 2016 ; Amabile *et al.*, 2022). Garant de l'entraînement des équipes en interne et de l'ensemble des intervenants du SSA en SUR, le BI participe aux groupes de travail d'organisation et de scénarisation des exercices nucléaires nationaux, ainsi qu'à leur évaluation (voir la Figure 4).

Le BI a donc pour missions :

- la préparation des audits et des expertises des structures sanitaires dédiées à la prise en charge des blessés radiocontaminés ;
- l'appui technique aux travaux de modernisation de l'infrastructure dédiée du Service de Santé des Armées (SSA) ;
- l'aide à l'élaboration de la réglementation relative à la SUR au sein du ministère des Armées, mais égale-



Figure 4 : Prise en charge d'un blessé radio-contaminé au cours d'un exercice de sécurité nucléaire (Source : Base opérationnelle de l'île Longue).

ment dans les domaines liés à la sécurité intérieure (Autorité de Sûreté Nucléaire et secrétariat général de la Défense et de la Sécurité nationale) ;

- l'expertise en cas d'accident à caractère radiologique grâce à la cellule de reconstitution dosimétrique opérationnelle. À cet effet, il met en œuvre un puissant calculateur mobile et un logiciel de calcul de dose (voir la Figure 5) : SEED, simulation des expositions externes & dosimétrie (Entine *et al.*, 2022 ; Garnier *et al.*, 2022). Cet équipement permet de réaliser, sur site, la simulation d'expositions externes à de fortes doses de rayonnements ionisants.

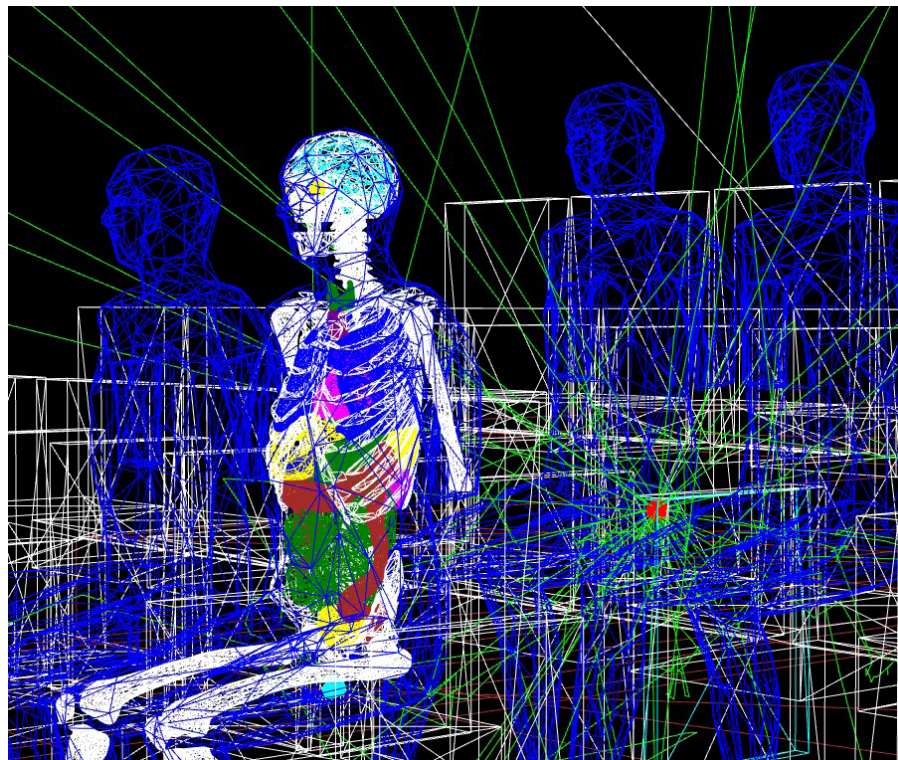


Figure 5 : Interface du logiciel SEED au cours d'une simulation de calcul de dose aux organes (Source : SPRA).

Le bureau formation (BF)

Il veille à la constance de la qualité des formations proposées aux métiers concernés : CRP, soignants, ou militaires mettant en œuvre des dispositifs émetteurs de rayonnements ionisants. À cet effet, il coordonne la formation des CRP des Armées en tant qu'organisme de formation certifié par le Comité français de certification des entreprises pour la formation et le suivi du personnel travaillant sous rayonnements ionisants (CEFRI). Il coordonne notamment la formation du personnel du SSA destiné à intervenir en SUR. L'offre de formation comprend la situation normale de travail et la situation d'urgence radiologique, en ciblant les médecins et les infirmiers. Il réalise aussi les jurys des examens nécessaires à l'obtention du certificat pour la manipulation d'appareils de radiologie industrielle (CAMARI) au profit du ministère des Armées et utilisés principalement dans le cadre de la neutralisation, l'enlèvement et la destruction d'explosifs.

La division contrôle (DC)

La DC, dirigée par un officier des armes, est organisée en trois bureaux mis en œuvre par des officiers, sous-officiers provenant des trois Armées et de personnels civils, ingénieurs et techniciens.

Cette division satisfait à la norme NF EN ISO/CEI 17020 relative à l'inspection et réalise les vérifications réglementaires en radioprotection au titre du code du travail (accréditation COFRAC depuis février 2022) ainsi que du code de la santé publique (agrément de l'Autorité Sûreté Nucléaire et de Sûreté Nucléaire de défense).

Ces vérifications réglementaires, opérées par les bureaux pilotage (BP) et vérifications (BV), concernent :

- les générateurs X fixes et mobiles des domaines industriels, médicaux et vétérinaires ;
- les sources scellées intégrées ou non à un équipement fixe ou mobile (source d'étalonnage, irradiateurs médicaux...) ;
- les lieux de travail présentant un zonage radiologique (risque d'exposition aux rayonnements ionisants ;
- les lieux ou zones entreposant des déchets ou effluents radioactifs.

Le bureau vérifications

Il est chargé de l'ensemble de la gestion métrologique de la division (maintenance, entretien, renouvellement du parc matériel et vérifications périodiques) et de la vérification des rapports avant leur approbation. Le personnel du BV réalise les missions de vérifications réglementaires en radioprotection.

Le bureau pilotage

Il réalise la veille réglementaire, le pilotage du suivi des dossiers d'agrément et d'accréditation de la DC. Il garantit également le maintien des compétences du personnel. Ce bureau élabore également le programme annuel des missions de la division.

Le bureau appuis (BA)

Il apporte des appuis techniques aux Forces en assurant la pré-instruction des dossiers de demande d'autorisation ou d'enregistrement avant transmission aux autorités de sûreté compétentes. Par ailleurs, il tient à jour deux inventaires nationaux, celui des sources émettrices de rayonnements ionisants et celui des matières et déchets radioactifs détenus dans les organismes de la Défense. Il supervise la participation du SPRA aux campagnes de MESREF pour les chaufferies nucléaires des bâtiments de la marine nationale.

Il participe également aux campagnes de MESREF et d'intercomparaison sur les armes nucléaires dans le cadre de la convention entre le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) et le SPRA et les installations nucléaires de base secrète (INBS) situées à l'Île Longue.

Il conseille aussi les unités de la Défense par des rappels réglementaires aux codes du travail et de la santé publique dans le domaine de la radioprotection (à l'exclusion des réglementations étrangères, du code de l'environnement et du code du transport).

Il réalise aussi des missions sur le terrain de mesurages, révisions techniques et expertises, ainsi que des calculs dits de radioprotection consistant à évaluer l'efficacité des équipements de protection collective en cas d'irradiation.

À terme, de nouvelles activités sont prévues, telles que des bilans en radioprotection auprès des unités de la Défense.

Conclusion

Le SPRA a su évoluer pour répondre aux besoins spécifiques des Forces armées en matière de radioprotection (Amabile JC *et al.*, 2014).

Porté par sa devise « La radioprotection au service des Forces en tout temps et en toutes circonstances », le SPRA joue un rôle fondamental dans la surveillance du personnel exposé aux rayonnements ionisants, en situation normale (dans le cadre de la réglementation française : code du travail et code de la santé publique) ou en SUR. Cette mission est d'autant plus essentielle dans le contexte actuel qui impose une préparation rigoureuse et une capacité d'intervention sans faille.

Grâce à une expertise technique éprouvée et des divisions hautement spécialisées, le SPRA assure la surveillance dosimétrique et médico-radiobiologique du personnel du ministère des Armées. Il est également en mesure de réaliser des interventions rapides en cas de crise radiologique. L'intégration de véhicules laboratoires et d'outils avancés comme le logiciel SEED, permet la reconstitution de doses reçues sur site, offrant ainsi une réponse efficace et adaptée en cas d'accident radiologique.

Le SPRA met un point d'honneur à organiser la formation du personnel et des conseillers en radioprotection du ministère. Dans ce cadre, l'utilisation de méthodes pédagogiques novatrices telles que les MOOC

(massive open online course) (Amabile JC et al., 2023) permet d'élargir l'accès à la formation, tout en assurant une montée en compétences constante des acteurs de la radioprotection.

Bibliographie

- AMABILE J.C., GRANGER-VEYRON N. & DE CARBONNIÈRES H. (2015), « Dissuasion : les missions du Service de Protection Radiologique des Armées », *Revue de la Défense nationale*, n°782, pp. 56-61.
- CAZOULAT A., LECOMPTE Y., GAGNA G., ENTINE F., MICHEL X., AMABILE J.C. & DE CARBONNIÈRES H. (2014), « Les capacités d'expertise du Service de Protection Radiologique des Armées : historique et actualités », *Médecine et Armées*, 42(5), pp. 389-394.
- CASTAGNET X., AMABILE J.C., CAZOULAT A., BOHAND S. & LAROCHE P. (2009), « Radioprotection du personnel au bloc opératoire », *Archives des maladies professionnelles et de l'environnement*, 70, pp. 373-384.
- ABOU ANOMA G., MICHEL X., BRETON D., SCHOULZ D., PENNACINO., AMABILE J.C. & LAROCHE P. (2012), « Cardiologie interventionnelle : évaluation de l'exposition aux rayonnements ionisants et zonage radiologique », *Archives des maladies professionnelles et de l'environnement*, 73, pp. 849-859.
- WASSILIEFF S., CAZOULAT A., BOHAND S., MERAT F., GONTIER E., GAGNA G., AMABILE J.C. & LAROCHE P. (2012), « Évaluation de l'exposition interne aux rayonnements ionisants du personnel du service de médecine nucléaire du Val-de-Grâce », *Archives des maladies professionnelles et de l'environnement*, 73, pp. 860-867.
- GERVOT H., LETESSIER W., LOESS J., BAYLE-ESCURAT C., MÉTIVIER D., SAURAT D. & JAMET-ANSELME E. (2024), "Occupational internal monitoring in nuclear medicine service of Sainte-Anne military hospital: previous considerations and results", *Radiat Prot Dosimetry*, 200(3), pp. 294-304.
- AMABILE J.C., CASTAGNET X., DE CARBONNIÈRES H. & LAROCHE P. (2007), « Exposition aux rayonnements cosmiques : surveillance du personnel de l'Armée de l'air navigant sur E-3F », *Radioprotection*, 42(2), pp. 197-210.
- LECOMPTE Y., GAGNA G., ENTINE F., MICHEL X., CAZOULAT A., ANZIANI P., DE CARBONNIÈRES H. & AMABILE J.C. (2014), « Le Service de Protection Radiologique des Armées et la surveillance de l'exposition externe et interne aux rayonnements ionisants », *Médecine et Armées*, 42(5), pp. 395-404.
- GAGNA G., PÉGORIÉ A., ENTINE F., MICHEL X., DONDEY M. & AMABILE J.C. (2016), "Missions of the French Defense Radiation Protection Service concerning the medical management of radio-contaminated patients", *Health Physics*, 111(2), pp. 223-226.
- AMABILE J.C., RICCOBONO D., MÉTIVIER D., DROUET M., LATAILLADE J.J., BEY E. & ENTINE F. (2022), « Menace nucléaire ou radiologique : prise en charge des victimes radiocontaminées et irradiées », *Dans le chapitre de l'ouvrage intitulé « Blessures par armes de guerre »*, Éditions Lavoisier, pp. 35-46.
- ENTINE F., GARNIER G., DONDEY M., RIZZI Y., GOBERT A., BASSINET C., PAPIN S., PENNACINO I., CAZOULAT A., AMABILE J.C. & HUET C. SEED (2022), "An operational numerical tool for dosimetric reconstruction in case of external radiological overexposure", *Health Physics*, 122(2), pp. 271-290.
- GARNIER G., ENTINE F., BONNIN A., GELLIE G., JAMET E., CAZOULAT A., PAPIN S., DHYSER J.C., GAFFE N., HUET C. & AMABILE J.C. (2022), "Dosimetric diagnosis by numerical

simulation in the event of a radiation accident: an innovative tool within the French Defense Radiation Protection Service", *International Review of the Armed Forces Medical Services*, Vol. 95, n°3, September 2022, pp. 45-51.

AMABILE J.C. (2014), « Radioprotection en environnement extrême : leçon du concours d'agrégation dans la chaire d'Imagerie médicale appliquée aux Armées et risque radio-nucléaire », *Dans le chapitre de l'ouvrage intitulé « Leçons des concours d'agrégation du Val-de-Grâce – Livre de l'École du Val-de-Grâce – Annales 2013-2014 »*, pp. 235-250 (329 pages).

AMABILE J.C., FERRER M.H., RICCOBONO D., MÉTIVIER D., GERVOT H., VALENTE M. & ENTINE F. (2023), « MOOC nucléaire et radiologique : une méthode simplifiée de prise en charge des blessés radiocontaminés ou irradiés », *Médecine de catastrophe – Urgences Collectives*, Vol. 7, n°2, juin 2023, pp. 92-98.

La gestion post-accidentelle des conséquences d'un accident nucléaire : le CODIRPA

Par Olivier RIVIÈRE

Directeur de l'environnement et des situations d'urgence
au sein de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN)

Le Comité directeur pour la Gestion de la phase post-accidentelle d'un accident nucléaire ou d'une situation radiologique (CODIRPA) est un comité pluraliste piloté par l'ASN. Agissant dans le cadre d'un mandat du Premier ministre, il a pour mission de proposer au Gouvernement des recommandations pour renforcer la stratégie nationale de gestion à long terme des conséquences d'un accident nucléaire. Ses dernières recommandations, transmises au Gouvernement pour alimenter la planification de crise nationale, intègrent notamment les enseignements tirés de l'accident de Fukushima. Malgré la technicité des sujets traités, ce comité a proposé des dispositifs d'association des différentes parties prenantes à ses travaux, en particulier les riverains des installations nucléaires. Enfin, le CODIRPA a élaboré différents supports pédagogiques à destination de différents publics : professionnels de santé, entreprises, grand public.

Un accident nucléaire se caractérise par l'émission de rejets radioactifs non maîtrisés sur une période variable selon le type d'accident. Ces rejets entraînent en se déposant une contamination potentiellement durable de l'environnement autour de l'installation concernée.

Le plan national de réponse à un accident nucléaire ou radiologique majeur (PNRANRM)¹, distingue trois principales phases dans la réponse à un accident nucléaire (voir la Figure 1 page suivante) :

- une phase de préparation qui permet d'élaborer et mettre à jour les plans de réponse pour les deux phases suivantes ;
- une phase d'urgence qui débute dès lors qu'il y a une menace de rejets radioactifs sur une installation nucléaire et qui couvre la période des rejets radioactifs ;
- une phase post-accidentelle qui débute une fois les rejets terminés et l'état de l'installation à nouveau stabilisé.

Pendant la phase d'urgence la priorité est de protéger les personnes de l'exposition à court terme liée au passage des rejets radioactifs. La population est alors susceptible d'inhaler des particules radioactives présentes dans l'air et est soumise à une irradiation externe par les rejets.

La réponse apportée relève alors principalement du domaine de la sécurité civile : selon le degré d'exposition évalué, la population peut être mise à l'abri, évacuée ou doit ingérer des comprimés d'iode stable.

Une fois les rejets terminés, la phase post-accidentelle concerne la gestion des conséquences de la contamination radioactive de l'environnement.

Du point de vue de la radioprotection, le risque est alors l'exposition de la population par ingestion d'aliments contaminés par les dépôts radioactifs ainsi que par irradiation externe. Par ailleurs, selon la nature des radionucléides rejetés, cette contamination peut être potentiellement durable, jusqu'à plusieurs dizaines d'années dans certains cas (par exemple avec le césium 137 de 30 ans de période).

Enfin, cette situation d'exposition durable affecte différents domaines de la vie de la population, comme la vie sociale et culturelle, la vie professionnelle, l'économie locale etc. La gestion post-accidentelle doit alors intégrer l'ensemble de ces enjeux sur les territoires concernés.

¹ Disponible sur le site du SGDSN, https://www.sgdsn.gouv.fr/files/files/Nos_missions/plan-national-nucleaire-fevrier2014.pdf

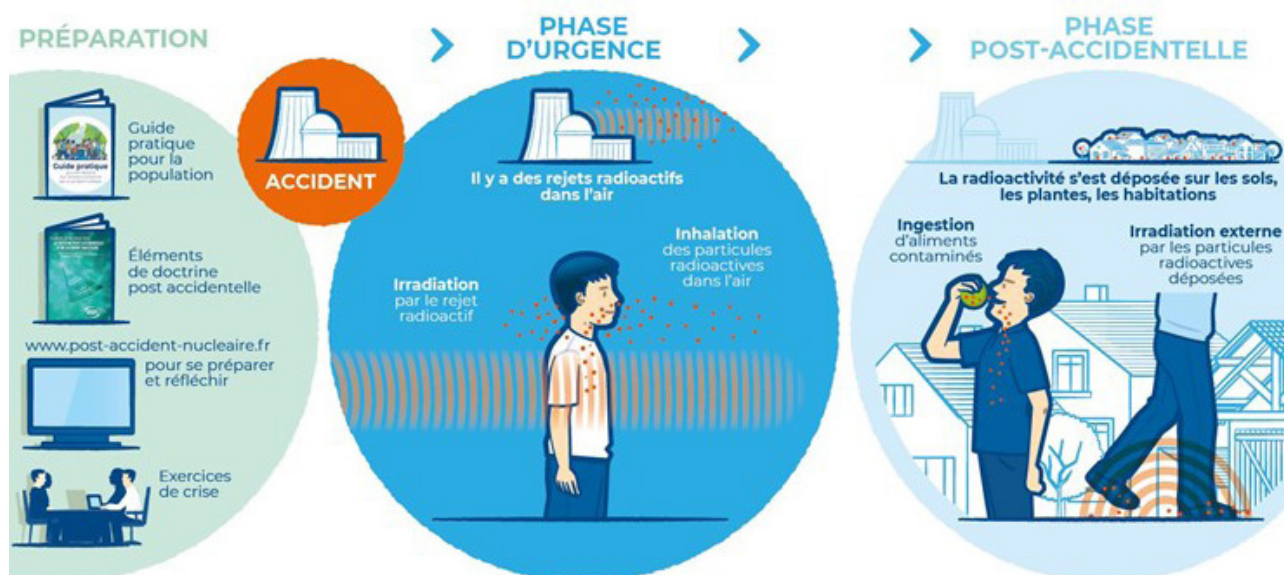


Figure 1 : Les différentes phases d'un accident nucléaire (Source : recommandations 2022 du CODIRPA : <https://post-accident-nucleaire.fr/sites/default/files/2022-11/Recommandations%20pour%20la%20gestion%20post-accidentelle%20d%E2%80%99un%20accident%20nucl%C3%A9aire.pdf>).

Une réflexion pluraliste pilotée par l'ASN dans le cadre d'un mandat du Premier ministre

Pour ces raisons, il était naturel que la réflexion sur la gestion des conséquences d'un accident nucléaire soit conduite en associant de manière large l'ensemble des parties prenantes, au-delà du cercle des experts de la radioprotection et de la sûreté nucléaire.

Ces considérations ont conduit en 2005 le Premier ministre à confier à l'ASN le soin de réunir des représentants des différentes parties prenantes au sein d'un comité pluraliste en charge de proposer au Gouvernement une stratégie de gestion post-accidentelle, sujet alors peu présent dans la planification de crise. C'est ainsi que le Comité directeur pour la gestion de la phase post-accidentelle (CODIRPA) est né.

Depuis, ce comité, qui travaille dans le cadre d'un mandat du Premier ministre renouvelé tous les 5 ans, a régulièrement transmis des propositions au Gouvernement pour alimenter la stratégie de réponse nationale aux conséquences d'un accident nucléaire. En particulier, les recommandations du CODIRPA, regroupées en 2012 dans un guide unique, ont alimenté le volet post-accident du PNRANRM publié la même année. Dix ans après, les nouvelles recommandations du CODIRPA, revues et enrichies notamment pour intégrer le retour d'expérience de l'accident de Fukushima, ont été prises en compte dans les travaux récents de révision de ce plan dont la nouvelle version devrait être publiée prochainement.

Une implication croissante des parties prenantes dans les travaux du CODIRPA

La composition du CODIRPA est pluraliste : ce comité regroupe en effet des experts publics, des représentants des services de l'État, de l'ANCCLI² et des CLI, des élus locaux, des exploitants nucléaires, des membres d'associations ainsi que des experts étrangers.

Afin de renforcer l'implication des parties prenantes locales en associant aux travaux des publics non acculturés, le CODIRPA a développé en 2020 une politique de consultation de la population sur les recommandations issues des groupes de travail du comité.

Les premières rencontres ont eu lieu en 2021 et 2022, sous la forme de panels de citoyens et sur le thème des restrictions alimentaires qui pourraient être mises en place à la suite d'un accident nucléaire. Ces premiers panels ont été organisés en collaboration avec les CLI de Paluel-Penly, de Golfech, du Tricastin et de Dampierre. Les retours des participants ont conduit à adapter les recommandations avant de les proposer au Gouvernement, grâce à ce regard extérieur neuf sur la compréhension et l'acceptabilité de celles-ci par le grand public.

² L'ANCCLI, Association Nationale des Comités et Commissions Locales d'Information, fédère les expériences et les attentes des 35 CLI et porte leurs voix auprès des instances nationales et internationales. L'une des missions essentielles des CLI est de relayer l'information auprès du grand public et de permettre ainsi, au citoyen, de se forger sa propre opinion sur le sujet du nucléaire.

Ce retour positif des premiers panels a par la suite conduit le CODIRPA à généraliser cette approche à l'ensemble des travaux de ses groupes : différents panels se sont tenus en 2024 sur les thèmes de la stratégie de remédiation et de gestion des déchets, de la protection de la population en cas de rejets de radio-nucléides émetteurs de rayonnements alpha et sur la gestion du milieu marin.

L'information et la sensibilisation des publics, une priorité³

Au-delà des actions d'association des publics à ses travaux, le CODIRPA conduit une action d'information et d'accompagnement à la prise en compte de ses recommandations. Elle se traduit par la production de guides et outils d'information, permettant de mieux préparer la gestion d'une telle situation et de renforcer la culture de radioprotection des personnes situées autour des installations nucléaires. Après le site internet www.post-accident-nucleaire.fr, mis en ligne au début de l'année 2020, et qui propose des informations par catégorie de population (élus locaux, éducation nationale, personnels de santé, acteurs économiques, membres d'association), un Guide pour les habitants d'un territoire contaminé par un accident nucléaire a été publié en juin 2020. Ce guide a été utilisé à différentes occasions (réunions de CLI, exercices nationaux, rencontres avec le public) pour renforcer la sensibilisation au risque nucléaire.

Pour permettre aux professionnels de santé de répondre aux questions que leur poserait leur patientèle à la suite d'un accident nucléaire, un Guide questions-réponses pour les professionnels de santé a également été publié en début d'année 2022⁴. Ce guide a inauguré une nouvelle méthode de travail pour les groupes de travail du CODIRPA, consistant à identifier les attentes du public visé puis à créer des contenus correspondants. Ainsi, les 200 questions rassemblées dans ce guide ont été proposées par des professionnels de santé exerçant dans les environs de la centrale nucléaire de Civaux, et les réponses ont ensuite été proposées par un groupe d'une dizaine d'experts.

Des actions spécifiques ont également été menées auprès d'entreprises voisines d'installations nucléaires fixes dites de base (INB). En effet, afin de mieux cerner les besoins de celles-ci pour favoriser leur reprise d'activité à la suite d'un accident nucléaire, des rencontres ont été notamment organisées, en collaboration avec les CLI de Dampierre et de Paluel-Penly, la

chambre de métiers et de l'artisanat du Loiret, et les communautés de communes Falaises du Talou et Côte d'Albâtre. Les participants ont ainsi pu discuter de leur vision de l'accident nucléaire, des actions de protection à mettre en œuvre pour leur personnel et la préservation de leur outil de travail. Les conditions de reprise d'activité rapide après les rejets radioactifs ont également été l'objet d'échanges.

Ces rencontres avec des entreprises ont permis de créer un livret pédagogique sur la préparation au risque nucléaire, répondant à leurs attentes, qui pourra être déployé auprès des entreprises dans les rayons du Plan particulier d'intervention (PPI) des installations nucléaires.

Ces travaux de sensibilisation et de préparation des parties prenantes locales s'inscrivent dans les objectifs du CODIRPA de diffusion d'une culture de sécurité et de radioprotection autour des installations nucléaires. En réponse au mandat du Premier ministre lui demandant de faire des propositions pour « renforcer, au stade de la préparation, l'information et la sensibilisation de la population et des élus, sur la base notamment d'une valorisation des supports d'information qu'il a déjà développés », le CODIRPA a publié en 2024 un rapport sur la culture du risque nucléaire en France. Ce document⁵ dresse un état des lieux des différentes actions de sensibilisation et outils pédagogiques existants et formule également un ensemble de recommandations, à destination de 4 cibles principales : la population, les élus, le monde de l'éducation et le monde de l'entreprise.

Parmi les leviers identifiés pour renforcer la culture du risque nucléaire en France, le CODIRPA recommande notamment de pérenniser les actions de « culture de sécurité et de radioprotection » lors des journées nationales de la résilience et de renforcer l'association des parties prenantes locales (CLI, élus, scolaires, grand public, etc.) aux exercices de crise. Enfin certaines recommandations ont déjà été mises en œuvre comme le développement d'outils à destination des entreprises pour prendre en compte le risque nucléaire dans leur activité ou l'élaboration d'un guide pour fournir une méthode aux citoyens afin qu'ils puissent mesurer la radioactivité.

Les dernières recommandations du CODIRPA

Les dernières recommandations du CODIRPA pour la gestion des situations post-accidentelles ont été rassemblées dans un guide publié en 2022⁶.

³ Les documents cités sont disponibles au lien suivant : Les documents d'accompagnement - 03/10/2022 - ASN, <https://www.asn.fr/l-asn-informe/post-accident/les-documents-d-accompagnement#livret-preparer-mon-entreprise-au-risque-nucleaire>

⁴ Guide pratique pour les habitants d'un territoire contaminé par un accident nucléaire - mars 2021, https://www.post-accident-nucleaire.fr/sites/default/files/2021-06/ASN-ecran_mai%202021.pdf

⁵ <https://www.post-accident-nucleaire.fr/sites/default/files/2022-06/Rapport%20culture.pdf>

⁶ <https://www.post-accident-nucleaire.fr/sites/default/files/2022-11/Recommandations%20pour%20la%20gestion%20post-accidentelle%20d%E2%80%99un%20accident%20nucl%C3%A9aire.pdf>



Figure 2 : Illustration des principes de zonage post-accidentel. Zone d'éloignement (rouge) : il n'est pas possible de résider ; zone d'interdiction de consommation (jaune) : les particuliers ne doivent pas manger les denrées fraîches produites localement ; zone de contrôle avant commercialisation (bleue) : les denrées agricoles doivent être contrôlées avant mise sur le marché (Source : Recommandations 2022 du CODIRPA pour la gestion post-accidentelle d'un accident nucléaire).

À l'issue des travaux effectués entre 2014 et 2020, le CODIRPA a recommandé plusieurs évolutions des éléments de doctrine post-accidentelle. Proposées au Gouvernement en 2021 qui en a accepté les principes, elles intègrent notamment les enseignements de l'accident de Fukushima mais également le retour d'expérience de nombreux exercices de crise qui avaient mis en évidence le caractère insuffisamment opérationnel de la précédente doctrine post-accidentelle, publiée en 2012.

La principale évolution consiste en une simplification du zonage post-accidentel servant de base aux mesures de protection de la population. Par souci d'opérationnalité, une zone est désormais associée à une unique action de protection de la population.

Pour protéger la population du risque d'exposition externe, un périmètre d'éloignement des populations (zone non habitable) est créé, sur la base d'une valeur de dose efficace annuelle de 20 mSv/an pour la première année. Il est interdit à la population de résider dans cette zone pour la protéger du risque lié à l'exposition externe.

Pour limiter l'exposition de la population au risque de contamination par ingestion, un périmètre de non consommation des denrées fraîches produites localement est proposé au-delà du périmètre d'éloignement. Dans un premier temps, ce périmètre est défini à partir du plus grand des périmètres de protection de la population (mise à l'abri, prise d'iode, etc.) établi lors de la phase d'urgence. Il est ensuite affiné à partir des mesures de contamination environnementale et des modélisations disponibles.

Concernant la commercialisation des denrées alimentaires produites localement, le CODIRPA propose la mise en place d'une approche territorialisée par filière de production agricole et d'élevage, s'appuyant sur les Niveaux maximaux admissibles⁷ Euratom de contamination radioactive définis au niveau européen pour le commerce des denrées alimentaires. Au sein de cette zone de contrôle avant commercialisation, les denrées agricoles ne peuvent être mises sur le marché qu'après avoir été contrôlées afin de garantir le respect des niveaux de contamination autorisés au niveau européen.

⁷ Règlement Euratom 2016-52 du 15 janvier 2016.

Dans un objectif de précaution et d'optimisation, le CODIRPA propose également que puisse être introduite selon le contexte une zone de recommandations alimentaires au-delà de la zone d'interdiction de consommation. Dans cette zone, sont encouragées des pratiques alimentaires reposant sur une alimentation diversifiée, incluant une consommation occasionnelle des denrées produites localement.

Enfin, le CODIRPA recommande que cette démarche de zonage s'accompagne de la mise en œuvre progressive d'actions de protections proposées par le CODIRPA et retenues dans la démarche de refonte du PNRANRM (réduction de la contamination avec nettoyage des zones urbaines, gestion des déchets, surveillance radiologique des denrées alimentaires et des biens de consommation, etc.), après identification des territoires concernés, en tenant compte de l'ampleur de l'accident, du résultat des mesures et de la perception de la situation par la population.

Perspectives

Dans le cadre du mandat qui lui a été confié par le Premier ministre sur la période 2019-2024, le CODIRPA est sur le point d'achever la prise en compte des enseignements de l'accident de Fukushima dans différents domaines, en particulier la gestion des déchets générés par un accident nucléaire et la gestion des milieux marins contaminés.

En complément, des travaux récents du CODIRPA ont montré que la doctrine post-accidentelle actuelle était suffisamment robuste pour être étendue à des situations autres que les accidents sur des centrales nucléaires, par exemple sur les installations rejetant des émetteurs de type alpha en cas d'accident.

Enfin, ce mandat a été marqué par une volonté d'associer plus largement les différents publics à l'ensemble des travaux du CODIRPA en s'appuyant notamment sur des panels de citoyen. Pour la période à venir, l'enjeu est d'arriver à maintenir cette dynamique d'association croissante des différentes parties prenantes locales.

Les conséquences sociétales des accidents nucléaires et le processus de co-expertise

Par Jacques LOCHARD

Vice-président émérite de la Commission principale de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) et Professeur à l'Université de Nagasaki

Thierry SCHNEIDER

Directeur du Centre d'étude sur l'Évaluation de la Protection dans le domaine Nucléaire (CEPN) et membre de la Commission principale CIPR

Jean-François LECOMTE

Membre émérite de la CIPR

La présence de radioactivité dans l'environnement des populations impactées par un accident nucléaire de grande ampleur conduit inévitablement à l'émergence de conséquences socio-économiques durables qui perturbent la vie quotidienne. Les accidents de Tchernobyl et de Fukushima ont montré l'importance d'engager des processus de résilience afin de répondre aux préoccupations de ces populations. Après une présentation des principales conséquences sociétales des accidents nucléaires, l'article décrit le processus de co-expertise destiné à accompagner la résilience et discute les enjeux pour les experts de la radioprotection dans une perspective d'amélioration de la qualité de vie des populations impactées par l'accident.

Les conséquences d'un accident nucléaire pour les populations

L'expérience de l'accident nucléaire de Fukushima, comme de celui de Tchernobyl, a montré qu'un tel événement a un impact très fort sur les populations concernées. L'irruption de la radioactivité dans la vie quotidienne représente une rupture qui crée une situation sans précédent et qui bouleverse profondément la relation de l'homme à lui-même, aux autres et à son environnement. Vivre dans un environnement contaminé est une situation complexe qui affecte toutes les dimensions de la vie quotidienne et qui génère beaucoup de questions et de préoccupations au sein de la population.

En premier lieu, ce sont les effets sanitaires radio-induits potentiels (risque accru de cancer) qui préoccupent les personnes impactées par la présence de radioactivité dans l'environnement, même si ces effets sur la population sont restés relativement modérés, à l'exception des cancers de la thyroïde à la suite de l'accident de Tchernobyl. Au-delà des préoccupations sur la santé, un accident nucléaire engendre des perturbations éco-

nomiques (contraintes organisationnelles, techniques et financières, modification des productions et des marchés, altération de l'image des productions, dégradation des conditions de travail, pertes matérielles plus ou moins compensées...), sociétales (altérations de la qualité de la vie personnelle, familiale et communautaire, perte des repères, conflits interfamiliaux ou intergénérationnels...) et psychologiques (dépression et autres troubles mentaux dus au stress en lien avec la situation). Ces perturbations sont elles-mêmes à l'origine d'effets sanitaires, ou sont des facteurs aggravants pour des effets tels que le diabète, les maladies cardiovasculaires, l'obésité, l'aggravation de troubles préexistants, etc.

Le ressenti négatif de la situation par la population se traduit par une perte de confiance dans les autorités et les experts, une forte inquiétude vis-à-vis de la santé, en particulier celle des enfants, et un sentiment général de discrimination, d'exclusion, d'impuissance et d'abandon. La perte du contrôle de leur vie quotidienne par les personnes impactées conduit aussi à une forte appréhension pour l'avenir. Dans ce contexte, après la phase d'urgence et les déplacements de personnes auxquels elle a donné lieu, celles-ci ont été confrontées à un difficile dilemme : rester ou partir, pour celles qui sont

encore dans les territoires contaminés, ou bien revenir ou non pour celles qui les ont déjà quittés.

Dès lors, les enjeux sont multiples pour les personnes et les communautés qui restent ou qui ont quitté ces territoires (Crouaïl *et al.*, 2020). *In fine*, ils visent tous la restauration de la qualité de la vie quotidienne, de façon à retrouver autant que faire se peut un état de bien-être équivalent à celui précédant l'accident, même si le retour à la situation antérieure n'est plus possible. La qualité de la vie englobe le logement, la nourriture, l'accès au soin, l'activité professionnelle et les conditions de travail, l'école, les déplacements, les loisirs, les relations sociales, etc. (Murakami *et al.*, 2020). Plus de 10 ans après l'accident de Fukushima, malgré des actions de décontamination importantes, les stigmates de la région se lisent encore notamment dans les difficultés de la vie sociale et économique tant pour les personnes qui sont revenues que pour celles qui ont choisi de ne pas rentrer. La contamination radiologique reste une préoccupation mais elle n'est plus centrale pour la plupart des personnes concernées. La santé des enfants et celle des générations reste néanmoins un souci.

Le processus de co-expertise

Malgré une altération de la confiance, les experts en radioprotection peuvent jouer un rôle crucial pour aider la population à surmonter ses difficultés. Dans le cas de l'accident de Fukushima, de nombreux experts, locaux, nationaux ou internationaux, se sont engagés auprès des collectivités locales ou des communautés (Kai *et al.*, 2020). Plusieurs municipalités ont pris des initiatives en partenariat avec des équipes universitaires avec qui elles étaient déjà en lien avant l'accident. Des experts ont aussi proposé leurs services à titre individuel, parfois avec le soutien de leur organisme d'appartenance. Tous n'étaient pas des spécialistes de la radioprotection mais, en tant que scientifiques, ils ont pu aider les profanes à comprendre les phénomènes liés à la radioactivité. Le dialogue direct avec des communautés a aussi eu lieu sur place avec l'organisation de rencontres ou de réunions « tatami » (l'expert se place au milieu des gens, écoute leurs questions et s'efforce d'y répondre). Dans certains cas, les experts ont également apporté une assistance technique. Les réseaux sociaux ont largement contribué au développement de ces échanges. Sur le plan international, il est possible de noter, entre autres, l'initiative de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) qui a soutenu pendant des années un dialogue structuré avec des habitants dans la préfecture de Fukushima (ICRP, 2016. ; Lochard *et al.*, 2019).

Les conditions de la réussite résident tout d'abord dans l'engagement personnel de l'expert sur le long terme (venir sur place et revenir). De plus, plutôt que d'adopter une posture de sachant, il doit être à l'écoute des gens, se focaliser sur leurs préoccupations et leurs attentes afin de contribuer à y répondre. Son discours doit s'aligner sur l'état des connaissances scientifiques tout en restant humble face aux incertitudes et aux limites de la

science. L'expert doit adapter son expertise aux spécificités locales tout en restant équitable.

Pour être efficace, l'expert doit se placer en soutien des initiatives locales mises en place par des communautés ou des groupes de citoyens. La restauration de la qualité de vie dépassant le champ de la radioprotection, il importe de promouvoir une approche globale associant des experts de différentes disciplines (Schneider *et al.*, 2021). Le dialogue avec les autorités, locales et nationales, doit aussi être restauré, afin notamment d'éviter les décisions conflictuelles et les discriminations. L'expert n'a pas réponse à tout. Faire preuve d'humilité et d'empathie est indispensable, de même qu'accepter des compromis. Pour regagner la confiance des gens, l'expert doit tout d'abord leur faire confiance.

Apporter un soutien aux populations vivant dans un territoire contaminé ne va pas de soi sur le plan éthique. Cette attitude peut être perçue comme une manœuvre pour banaliser l'accident nucléaire et ses conséquences. Il convient tout d'abord de reconnaître que la situation n'aurait pas dû se produire, que la radioactivité disséminée était non désirée et n'est pas légitime, et que le processus de reconstruction prendra du temps. L'expert se doit de fournir une information claire et honnête, en distinguant les éléments qui sont établis scientifiquement de ceux qui restent incertains. Il ne doit pas chercher à manipuler ou à influencer les décisions des personnes affectées. À cet égard, la pluralité des sources d'information doit être privilégiée, même s'il convient de discerner la qualité de chacune. Il est aussi primordial de respecter les décisions et l'autonomie de chacun. L'expert doit accompagner toutes les personnes qui font des choix qu'ils estiment raisonnables en fonction de leur situation, et apporter un soutien particulier aux populations vulnérables qui sont susceptibles d'être isolées.

Les soutiens apportés aux populations impactées à la suite de l'accident nucléaire de Fukushima, après celui de Tchernobyl, ont permis d'étayer le concept de co-expertise. Celui-ci désigne un processus de coopération dans lequel les experts travaillent avec la population plutôt que pour elle (voir la Figure 1 page suivante). Pour ce faire, un dialogue doit être établi dans lequel chaque partie apporte et partage ses connaissances, son savoir-faire et son expérience sans faire de distinction entre ceux qui savent et les non-sachants. Une des premières étapes du processus consiste à « rendre visible l'invisible ». La radioactivité est invisible, inodore et sans saveur, le seul moyen de la rendre visible est de la mesurer. Les experts doivent ainsi encourager les personnes impactées à effectuer elles-mêmes des mesures de radioactivité dans leur environnement, à faire mesurer leurs produits (notamment alimentaires) ainsi que leur propre contamination interne et à en partager les résultats au sein de la communauté locale avec le soutien des experts pour comprendre les enjeux. En comprenant où, quand et comment elles sont exposées, la mesure permet à chacune de ces personnes de recouvrer une certaine autonomie et de prendre des décisions mieux informées, visant à réduire les expositions aux rayonnements à un niveau aussi bas que raisonnablement possible (principe d'optimisation).



Figure 1 : Le processus de co-expertise (Source : Thu Zar W., Lochard J., Kalinovski M., Collinson A. & Schneider T. (2024), "What on-site inspectors under the comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty can learn from the 'co-expertise process' experiences implemented after the Chernobyl and Fukushima nuclear power plant accidents?", *Pure Appl. Geophys.*, doi.org/10.1007/s00024-024-03501-4).

Outre la caractérisation de la situation radiologique et la compréhension des enjeux correspondants, le processus de co-expertise est utile pour établir un plan de surveillance radiologique en tenant compte des spécificités et des besoins des communautés au niveau local. Il permet aussi d'identifier les actions de protection possibles – y compris d'autoprotection – pour améliorer la situation au niveau individuel ou collectif. Ce processus est un vecteur important pour la promotion et la diffusion d'une culture pratique de radioprotection qui permet progressivement aux personnes impactées de regagner leur autonomie, reprendre le contrôle de leur situation et restaurer leur dignité. C'est une des conditions de l'amélioration des conditions de vie (Lochard, 2021).

Dans la région de Fukushima, plusieurs processus de co-expertise ont été développés. On peut souligner en particulier :

- l'initiative des habitants du village de Suetsugi avec le soutien de l'association « Ethos à Fukushima » et l'implication de l'université médicale de Fukushima (Lochard *et al.*, 2020) ;
- l'initiative de la municipalité de Kawauchi avec le soutien de l'université de Nagasaki (Takamura *et al.*, 2018) ;
- l'initiative conjointe de la ville de Tomioka et de l'université de Nagasaki après la levée de l'ordre d'évacuation (Takamura *et al.*, 2018) ;
- l'initiative des habitants du village de Yamakiya à la suite de la levée de l'ordre d'évacuation, avec le soutien de l'Institut national des sciences et technologies industrielles avancées (AIST) (Yasutaka, 2020) ;
- l'initiative des habitants de Kashiwa avec le soutien d'un groupe de volontaires coordonnés par un sociologue (Igarachi, 2022) ;

- l'initiative de la municipalité du village d'Iitate dans le contexte de la préparation de la levée de l'ordre d'évacuation, avec le soutien de l'université médicale de Fukushima (Crouail *et al.*, 2020) ;
- l'implication des résidents du village de Miyakoji dans la mesure de leurs expositions individuelles avec le soutien de l'université médicale de Fukushima (ICRP, 2016).

Plus de 10 ans après l'accident, plusieurs questions restent néanmoins en suspens dans la relation entre les experts et la population. Au Japon, des expériences de co-expertise ont eu lieu mais elles restent ponctuelles et limitées. Un des enjeux est d'en partager les résultats et de multiplier ces expériences. Une autre préoccupation est le maintien de la vigilance citoyenne sur le long terme dans les territoires contaminés (Ando *et al.*, 2023). Avec le temps et alors que la contamination diminue, les populations impactées aspirent à ne plus se préoccuper des pratiques qui rappellent constamment les stigmates endurés, alors que la qualité de la protection en dépend. La question se pose également de tirer les enseignements de ces approches dans le cadre de la préparation à la gestion post-accidentelle, comme c'est le cas en France avec le CODIRPA (Comité directeur pour la Gestion post-accidentelle) (ASN, 2022).

Conclusion

Les experts en radioprotection ont indéniablement un rôle à jouer pour aider les populations affectées par un accident nucléaire à restaurer la qualité de leur vie quotidienne (Schneider *et al.*, 2019). Leur efficacité dépend néanmoins de plusieurs conditions en termes d'engagement, de responsabilité, de respect de valeurs éthiques et de posture vis-à-vis des individus et des communautés avec lesquels il leur faudra travailler

ensemble. Les expériences menées au Japon, à la suite de celles autour de Tchernobyl, ont permis de dégager les grandes lignes du processus de co-expertise dont les principales étapes, en premier lieu la mesure de la radioactivité, facilite la promotion d'une culture pratique de radioprotection au sein de la population. Grâce à ce processus, les personnes et communautés affectées sont en mesure de prendre des décisions mieux informées, de retrouver leur autonomie et de restaurer la qualité de leur vie quotidienne.

Un quart de siècle sépare les accidents de Tchernobyl et de Fukushima. Du point de vue technique, les modalités de la gestion post-accidentelle de Fukushima ont non seulement bénéficié de l'expérience acquise à Tchernobyl, mais également du déploiement d'innovations organisationnelles et techniques. Pour autant, les dialogues initiés par la CIPR dans la préfecture de Fukushima ont montré que sur le plan des conséquences humaines il n'y a pas de différences significatives entre les sentiments généraux et les attitudes des personnes impactées par l'un ou l'autre de ces deux accidents.

Comme pour l'accident de Tchernobyl, celui de Fukushima montre l'importance des conséquences démographiques, psychologiques, éthiques et socio-économiques d'un accident nucléaire majeur. La réhabilitation des conditions de vie à long terme n'est pas qu'une question de science et de technologie, c'est aussi une question de respect de valeurs telles que la prudence et l'équité dans la gestion de la radioprotection, et des valeurs fondamentales de dignité des personnes concernées et de solidarité avec elles (Lochard, 2021).

Références

- ANDO R., KOYAMA Y., KOBAYASHI T., SASAKI D., AKIMOTO N., SCHNEIDER T., LOCHARD J. & KANAI Y. (2023), "Report on the 24th Fukushima dialogue 'Creating the future of Fukushima together with the next generation'", *Radioprotection*, 58(3), pp. 161-167.
- ASN (2022), « Recommandations pour la gestion post-accidentelle d'un accident nucléaire », Comité directeur pour la Gestion post-accidentelle d'un accident nucléaire (CODIRPA), <https://www.post-accident-nucleaire.fr/acces-thematiques-codirpa/les-rapports-et-actualites-du-codirpa-2020-2024>
- CROUAIL P., SCHNEIDER T., GARIEL J.C., TSUBOKURAM., NAITO W., ORITA M. & TAKAMURA N. (2020), "Analysis of the modalities of return of populations to the contaminated territories following the accident at the Fukushima power plant", *Radioprotection*, 55(2), pp. 79-93, <https://doi.org/10.1051/radiopro/2020049>
- ICRP (2016), "Proceedings of the International Workshop on the Fukushima Dialogue Initiative", *Annals of the ICRP*, 45(2S), 151 pages.
- IGARACHI Y. (2022), "The Round-Table project in Kashiwa: a dialogue to reconcile consumers and farmers in the Tokyo suburbs after the Fukushima accident", *Radioprotection*, 57(3), pp. 209-215.
- KAI M., HOMMAT., LOCHARD J., SCHNEIDER T., LECOMTE J.F., NISBETA., SHINKAREV S., AVERIN V. & LAZO E. (2020), "Radiological protection of people and the environment in the event of a large nuclear accident: update of ICRP Publications 109 and 111", ICRP Publication 146, *Annals of the ICRP*, 49(4), (version française disponible sur icrp.org).
- LOCHARD J. (2021), "The ethics of the co-expertise process in the post-nuclear accident context", in *Research Ethics for Environmental Health*, Edited by Friedo Zölzer and Gaston Meskens, Routledge, London and New York, 16 pages.
- LOCHARD J., ANDO R., TAKAGI H., MOMMA M., MIYAZAKI M., KURODA Y., KUSUMOTO T., ENDO M., ENDO S. & KOYAMA Y. (2020), "The post-nuclear accident co-expertise experience of the Suetsugi community in Fukushima Prefecture", *Radioprotection*, 55(3), pp. 225-235.
- LOCHARD J., SCHNEIDER T., ANDO R., NIWA O., CLEMENT C., LECOMTE J.F. & TADA J. (2019), "An overview of the dialogue meetings initiated by ICRP in Japan after the Fukushima accident", *Radioprotection*, 54(2), pp. 87-101.
- MURAKAMI M., TAKEBAYASHI Y., ONO K., KUBOTA A. & TSUBOKURA M. (2020), "The decision to return home and wellbeing after the Fukushima disaster", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 47, <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101538>
- SCHNEIDER T., LOCHARD J., MAÎTRE M., BAN N., CROUAIL P., GALLEGO E., HOMMA T., KAI M., LECOMTE J.F. & TAKAMURA N. (2021), "Radiological protection challenges facing business activities affected by a nuclear accident: some lessons from the management of the accident at the Fukushima-Daiichi nuclear power plant", *Radioprotection*, 56(3), pp. 181-192.
- SCHNEIDER T., MAÎTRE M., LOCHARD J., CHARRON S. *et al.* (2019), "The role of radiological protection experts in stakeholder involvement in the recovery phase of post-nuclear accident situations: some lessons from the Fukushima-Daiichi NPP accident", *Radioprotection*, 54(4), pp. 259-270.
- TAKAMURA N., ORIRA M., TAIRA Y. *et al.* (2018), "Recovery from nuclear disaster in Fukushima: collaboration model", *Radiation Protection Dosimetry*, 182, pp. 49-52.
- YASUTAKA T., KANAI Y., KURIHARA M., KOBAYASHI T., KONDOH A., TAKAHASHI T. & KURODA Y. (2020), "Dialogue, radiation measurements and other collaborative practices by experts and residents in the former evacuation areas of Fukushima: a case study in Yamakiya District, Kawamata Town", *Radioprotection*, 55(3), pp. 215-224.

Ionising radiation: risks and management

Preface

Frank Deconinck, Professor Emeritus, Vrije Universiteit Brussel and Honorary President of the Belgian Centre for the Study of Nuclear Energy (SCK CEN)

Introduction

Patrick Devin, President of the French Society for Radioprotection (SFRP) and Head of Radioprotection Safety Environment (Orano)

Radiological protection is a discipline in its own right, associated with all situations of exposure to ionizing radiation (IR) and in particular nuclear industrial applications and medical applications. The French Society for Radiological Protection (SFRP) brings together all the players in the field and contributes through its actions to high-quality radiation protection in France. This issue of the *Annales des Mines* on radiological protection offers a relatively complete overview of a very large number of situations and areas where radiation protection is present and necessary. The articles are written by well-known and recognized experts, each in their own field.

Nature and issues

Non-ionising radiation and ionising radiation, false brothers?

Emmanuel Nicolas, Société Française de Radio-Protection (SFRP, RNI section)

This article presents the fundamental differences between ionizing radiation (IR) and non-ionizing radiation (NIR) in terms of physical nature, interactions with matter, and health effects. The notion of dose is also addressed for these two fields: while it is a fundamental quantity for IR, it is not relevant for NIR. IR have carcinogenic effects, while NIR do not (apart from UV, but by a different mechanism than IR). This allow us to conclude that the two fields of IR and NIR are fundamentally different and that the use of similar or even identical vocabulary for both is misleading.

No nuclear revival without strong radiation protection - and nuclear safety

Géraldine Pina, Commissioner of the French Nuclear Safety Authority (ASN)

Nuclear revival is one of the responses to the challenges of energy sovereignty and decarbonization. This worldwide phenomenon is based on the extension of

existing facilities and the construction of new ones, as well as the development of “new nuclear”: small modular reactors, fusion reactors... Does this require a profound change or rather an evolution in the doctrine of nuclear safety and radiation protection? The question behind is that of social acceptability of this nuclear revival. This requires that priority be given to the protection of people and the environment. In a context where institutional frameworks are sometimes suspected of not embodying the general interest, it is essential to create trust and foster a culture of radiation protection. There can be no nuclear revival without strong radiation protection (and nuclear safety).

Maintaining and renewing radiation protection skills as part of the revival of the French nuclear power industry

Éric Gadet, Director of the French National Institute for Nuclear Science and Technology (INSTN)

Today, the French nuclear power industry relies on its 125,000 direct jobs and 220,000 indirect jobs to meet its skills needs. However, the construction projects of 6 to 14 new reactors announced by the President of the Republic on February 10, 2022 in Belfort, together with plans to extend the lifespan of current fleet of reactors to 60 years and beyond, are changing the situation. The sector estimates that it will need to recruit 100,000 people over the next ten years to achieve its objectives. Radiation protection occupations are not to be outdone.

Maintaining and renewing skills in radiation protection therefore require all stakeholders – manufacturers, training bodies and educational establishments, professional branches and unions, staff representative organizations, government services – in order to meet these requirements in the short, medium and long term in order to Meet the industrial challenge of tomorrow while ensuring the safety and security of installations, personnel and the environment at the highest level.

Ionising radiation

Natural and artificial sources of ionising radiation: how exposed are people?

Éric Blanchardon, Head of radiological and nuclear risk management assessment at the radiation protection expertise office of the Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) (French Institute for Radiation Protection and Nuclear Safety) and **Philippe**

Renaud, Special advisor to the Director of Environment at IRSN

We are all exposed to cosmic radiation and radionuclides present in our environment, whether natural radionuclides (cosmogenic or telluric) or artificial radionuclides remaining from past fallout from atmospheric nuclear weapons tests or the Chernobyl accident, or radionuclides released by the nuclear industry. We may also be exposed to ionizing radiation used in medical imaging and for the treatment of certain pathologies. Finally, workers in certain professional sectors (medical and nuclear industry workers, aeronautical flight personnel, etc.) are subject to specific exposures. The average dose received by the French population during the period 2015-2019 was estimated at 6.5 mSv/year, this average hiding significant variability linked to place of residence, lifestyle or even medical procedures.

Individual response to ionising radiation: we are not all equal when it comes to DNA damage

Nicolas Foray, Inserm, UMR1296 "Radiation: defence, health and the environment"

"We are not equal face of radiation". This sentence could have been pronounced in 1906 at the congress which brought together in Lyon all the "electroradiologists" of the time who signed a common motion: "with equal doses evaluated with current indicators, certain individuals in special conditions can present somewhat different reactions".

One hundred and twenty years later, the radiobiological data accumulated since then support two facts: 1) the individual response to radiation varies continuously from a few skin redness to the almost immediate death of patients suffering from rare genetic syndromes; 2) approximately 20% of individuals show an abnormal individual response to radiation associated with a higher risk of tissue toxicity, radiation-induced cancers and/or accelerated aging. Today, the challenge is to manage such a difference for the patient, the citizen or the worker.

The challenge of multiple exposures in addition to that of IR

Michel Bourguignon, Professor Emeritus at the University of Paris-Saclay (UVSQ) and Editor-in-Chief of the journal Radioprotection (SFRP)

The biological and health effects of ionizing radiation (IR) are well documented at high doses. Exposures to low doses are now the most frequent and are the subject of significant research, particularly on their capacity to promote the appearance of cancers via their genotoxicity. But each individual is exposed to a wide variety of genotoxic substances at more or less low doses, which form their exposome.

Until now, each of these genotoxicants has been considered separately from the others, while they add their effects, or even act synergistically. The risk assessment of multiple exposures in addition to that of IR is therefore a real challenge.

Progress in personal dosimetry: towards real-time dosimetry

Filip Vanhavere and **Olivier Van Hoey**, SCK CEN, Belgian Nuclear Research Centre

Personal dosimetry is essential to ensure that workers exposed to ionizing radiation are adequately monitored and protected. Over the years, this field has seen significant technological advances aimed at improving accuracy, real-time feedback, and ease of use.

This paper provides a comprehensive overview of the state of the art in personal dosimetry, with a particular focus on advances that enable real-time monitoring, such as active personal dosimeters (APDs), hybrid dosimeters, and computational dosimetry methods. The goal of these advances is to address the limitations of traditional passive dosimeters, increase the accuracy of dose assessments, and improve radiation protection practices.

Monitoring the internal exposure of workers at EDF nuclear facilities

Dr Thomas Ehret, Occupational physician at the Cattenom nuclear power plant and assistant to the medical officer in charge of the Ionising Radiation and Anthropogammametry Department, EDF Nuclear Generation Division, Saint-Denis, France; **Dr Solenn Letalon**, Occupational Physician, Penly Nuclear Power Plant and Assistant to the Medical Officer in charge of Ionising Radiation and Anthropogammametry, EDF Saint-Denis Nuclear Generation Division; **Dr Agnès Kirby**, Doctor specialising in medical biology, Director of the EDF Medical Biology Laboratory, specialising in radiotoxicological analyses; and **Dr Éric Laporte**, Occupational physician at the Saint-Alban Saint-Maurice nuclear power plant and referent physician for the Ionising Radiation and Anthropogammametry field, EDF Saint-Denis Nuclear Generation Division

Monitoring of the internal exposure workers at EDF nuclear facilities: issues, principles, procedures, and prospects.

Producing 70% of nuclear electricity safely and securely requires collective and individual control of the risk associated with exposure to ionizing radiation in a nuclear facility.

This requirement responds to both regulatory and ethical obligations.

The principles are based on the implementation of monitoring programs established jointly by the risk Prevention and Occupational Health and Safety Departments.

In the case of internal exposure monitoring, the aim is to guarantee the absence of internal exposure among workers and, where necessary, to assess the dosimetric or even health impact.

The communication of events in a rigorous and transparent manner to personal is essential to guarantee the success of internal exposure monitoring and preserve the acceptability of nuclear energy.

Effects of low doses of ionising radiation on human health: a brief review of knowledge from epidemiological studies

Corinne Mandin, Énora Cléro and Dominique Laurier, Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety (IRSN)

While the health effects of ionizing radiation on human health at high doses (> 100 mGy) are well known, the effects at low doses (< 100 mGy) have remained controversial for several decades. Epidemiological studies show an excess risk of cancer associated with exposure to low doses of ionizing radiation, without it being possible to confirm or not the existence of a dose threshold for these effects. Excess risks of cardio-cerebro-vascular or central nervous system diseases, or crystalline opacities at low doses have not been ruled out, but the results of epidemiological studies remain contradictory. Finally, hereditary effects are observed in animals but not in humans, although epidemiological studies remain limited.

International and regulatory aspects

International players in radiation protection and their roles

Laurence Lebaron Jacobs, International consultant in radiobiology, radiopathology and nuclear toxicology at the French Atomic Energy and Alternative Energies Commission (CEA)

Radiation protection originated at international level in the medical field in the years following the First World War, well before the advent of nuclear research reactors, the atomic bomb, and then nuclear electricity generation. There are many international players in radiation protection, many of whom play complementary roles and many of whom are at the origin of national legislation and regulations.

The evolution of the international radiation protection system

Werner Rühm, President of the International Commission on Radiological Protection (ICRP) and Head of the Future of Radiation Protection Unit at the Federal Office for Radiation Protection, Germany

For many decades, international radiological protection regulations have been based on the recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP). With the general recommendations of ICRP Publication 103 [1] in 2007, those of Publications 26 [2] and 60 [3] were updated. Given that it is more than 20 years ago that work on Publication 103 began in the early 2000s, in the view of ICRP it is timely now to review these recommendations and, if necessary, to improve them. In that process, any new scientific findings on radiation-related health effects, and any further

developments in social values and society's perception of risk should be taken into account.

The Association pour le Contrôle de la Radioactivité dans l'Ouest (ACRO), a citizens' watchdog for radioactive pollution of the environment

Pierre Barbey, Vice-Chairman of ACRO; **David Boilley**, President of ACRO; and **Mylène Josset**, ACRO Coordinator and Research Officer

In the wake of the Chernobyl disaster, the need for independent information and contradictory expertise became very apparent, as citizens began to distrust both nuclear operators and institutions. This led to the creation of the Association pour le Contrôle de la Radioactivité dans l'Ouest (Association for the Control of Radioactivity in the West), a region heavily nuclearized. Drawing on the potential of its laboratory, ACRO's main mission is to produce and deliver information, with the aim of "making citizens the authors and actors in monitoring and informing their environment, as well as actors in consultation processes".

Environmental radiation protection

The challenges of monitoring environmental radioactivity

Nathalie Reynal, Assistant to the Director of Environment and Emergencies at the ASN, **Céline Augeray** and **Nicolas Baglan**, Project managers in the ASN Environment and Emergencies Department

The environmental radioactivity monitoring program implemented today by nuclear operators around their installations and by the IRSN throughout France is adapted to the reality of the installations and meets the legal and regulatory requirements set by the public health code and the environment code. Its main objectives are to help monitor changes in the radiological state of the environment, detect an abnormal increase in environmental radioactivity, verify compliance with the requirements applicable to installations and help evaluate their impact.

The results of this monitoring program are made available to the public, notably on the website of the national radioactivity measurement network (RNM) mesure-radioactivite.fr and communicated to the competent international authorities.

The main challenges are now to maintain an appropriate monitoring program over the long term, making it possible to deal with possible emergency situations, and to adapt this system as necessary to deal with future challenges associated in particular with the extension of the operating life of existing installations, the creation of new installations, the evolution of the nature of discharges from medical installations and to take

into account the evolution of the environment linked to climate change.

The nuclear fuel cycle and radiation protection

Patrick Devin, Orano Recyclage

France has chosen a nuclear fuel cycle with reprocessing of spent fuel, one of the main players of which is Orano. Radiation protection throughout this cycle is an important issue due to the alpha, beta, gamma and neutron radioactive emissions of the many radioactive materials handled (uranium, fission products, and descendants) and the complexity of the chemical processes used involving very large tonnages and which are not without risks. Radiation protection is well controlled because the dosimetric values of workers and the public are low to very low.

Radiation protection: a major challenge for life in space

Jean-François Bottollier-Depois, former IRSN

Astronauts are exposed to cosmic rays, which are essentially made up of high-energy charged particles, which can induce significant dose levels depending on the situations encountered. Indeed, the exposure situations can be very different depending on the profile of the mission: in low orbit or beyond, presence of environmental protection, duration, etc. Risks in low Earth orbit, such as for the International Space Station, are considered acceptable and generally under control. On the other hand, prolonged space missions, beyond low Earth orbit, present real challenges in terms of radiation protection, in particular because of the potential exposure to strong solar flares that can induce significant dose levels and lead to short- and long-term health effects.

The OSPAR Convention and the work of the Radioactive Substances Committee (RSC): its origins, objectives, implications and prospects

Benoît Bettinelli, **Brice Delime**, Directorate General for Risk Prevention - Nuclear Safety and Radiation Protection Mission; **Nathalie Reynal**, **Nicolas Baglan**, Nuclear Safety Authority (ASN); **Coralie Nyffenegger**, **Hélène Caplin**, Institute for Radiation Protection and Nuclear Safety (IRSN); **Catherine Bordier-Oliveira**, Atomic Energy and Alternative Energies Commission; **Pierre-Yves Hemidy**, Électricité de France S.A.; and **Patrick Devin**, Orano

The OSPAR Convention aims to protect the marine environment of the Northeast Atlantic. Through its Radioactive Substances Committee (RSC), OSPAR is concerned by discharge of radioactive substances into the marine environment, the OSPAR strategy seeks to prevent, reduce or even eliminate them, amongst others through the use of best available techniques. In this regard, France will present its next periodic report on the subject in 2025.

Medical radiation protection

Radiation protection for professionals in conventional and interventional radiology

Emmanuel Museux, Radiology and medical imaging - Groupe Irimed Nantes Saint-Nazaire, Société française de Radioprotection (Section Santé), G4 Radioprotection working group (National Professional Council for Radiology and Medical Imaging: Pr H. Ducou Le Pointe, Dr E. Museux, Pr B. Morel and Pr J.-F. Chateil)

This article reviews the occupational exposure to ionizing radiation associated with the performance of medical imaging procedures that are mainly diagnostic, also therapeutic, on the source of ionizing radiation likely to expose personnel, the occupational categories exposed and the level of their exposure, and the means of protection. It sets out the principles of regulation and its implementation, and addresses the issue of the stakes, arguing for the reasonable allocation of protection resources to the real risks.

The impact of repeated medical exposure to X-rays on patients

Michel Bourguignon, Professor Emeritus at the University of Paris-Saclay (UVSQ) and Editor-in-Chief of the journal Radioprotection (SFRP)

Medical radiology uses X-rays, which, like all ionizing radiation, carry a risk of cancer. Consequently, the repeated performance of X-ray examinations poses a specific concern due to the accumulation of radiation doses. The risk of cancer is very low at low doses. The benefit-risk ratio favors the advantages of conducting examinations for patients. The responsible radiologists are trained in patient radiological protection and have developed national guidelines for best practices. Special attention must be given to patients who exhibit an abnormal response to ionizing radiation, which start to be addressed within the context of personalized medicine development.

Dose-related issues in computed tomography

Jean-François Chateil, Emeritus Professor of Radiopediatrics, University of Bordeaux, G4 Radioprotection Working Group (National Professional Council for Radiology and Medical Imaging: Pr H. Ducou Le Pointe, Dr E. Museux, Pr B. Morel and Pr J.-F. Chateil)

Computed tomography (CT) is a very powerful and therefore widely used medical imaging modality of great clinical utility. But it is also the one that delivers the highest doses, reaching 74% of all medical doses. Radiologists are therefore very vigilant in terms of radiological protection, particularly with regard to CT examinations. The advent of new technologies ("low dose" CT, artificial intelligence algorithms for denoising, Photon-counting Detector CT Systems) constitutes significant progress from this point of view.

Nuclear medicine: specific features and particular radiation protection issues

Jean-Philippe Vuillez, Honorary Professor of Biophysics and Nuclear Medicine at Joseph Fourier University (Grenoble)

Radiation protection in nuclear medicine applies to diagnostic and therapeutic activities. Diagnostic examinations have a very favorable benefit/risk ratio, are governed by strict rules and temporarily deliver low doses of ionizing radiation to patients without stochastic effects (cancers) according to epidemiological data. For staff, the risk of contamination, particular to nuclear medicine, requires special attention. For therapeutic applications, the rules need to be strengthened, due to the use of longer-lived alpha or beta-emitting radionuclides and higher activities than for diagnostic examinations. This is the only case where pregnancy is a formal contraindication, and where it may be necessary to advise avoiding relatives for a few days.

Reducing ionising radiation in the medical environment: is artificial intelligence the solution?

Anaïs Barateau, Medical physicist at the Eugène Marquis Centre (Regional Cancer Centre) in Rennes, University of Rennes, CLCC Eugène Marquis, INSERM, LTSI - UMR 1099, Rennes

Applications of artificial intelligence (AI) have considerably grown during the last decade in many fields. Medical sector is not an exception, with the emergence of numerous AI-based commercial software. Artificial intelligence methods outperform more traditional methods in many areas and often offer significant time savings. Some applications allow a dose reduction for the patient due to ionizing radiation, a better preservation of healthy tissues or even the elimination of ionizing image exam. However, the use of artificial intelligence in clinical services raises new questions, particularly in terms of validation, training and also ethics.

Accidental and post-accidental situations

Radiation protection of patients is a key requirement in radiotherapy

Jean-Marc Simon, Radiotherapy Department, APHP, CHU Pitié-Salpêtrière

Radiotherapy is a remarkable modality for cancer treatment. It is a highly technical modality that allows for increasingly selective targeting of tumor tissues. However, healthy tissues are also irradiated during radiotherapy sessions, and to minimize the risk of side effects or long-term consequences, it is essential to control the differential biological effects between tumor tissues and healthy tissues, as well as to adhere to dose constraints that at-risk organs can tolerate. If

these principles are not followed, especially in cases of error (most often related to human and organizational factors), incidents or even accidents involving patient radiation protection can occur, as seen in the serial radiotherapy accidents in **Épinal** in 2006 and **Toulouse** in 2007. Rarely, patients treated according to the standard may experience unexpected complications due to their particular radiosensitivity (about 5% of the population), and identifying these patients before treatment remains a challenge that is still a focus of research. Thus, patient radiation protection is a primary, regulatory, and ongoing requirement for radiation oncologists.

Government response to radiological emergencies

Sylvie Supervil, Advisor to the Director General of the Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), previously special advisor to the General Secretariat for Defence and National Security (SGDSN) and **Lionel Lachenaud**, Head of the Government Response Office at the SGDSN

The use of radioactivity, whether in the medical field, industry, or research, requires precautions due to the effects on health that radioactivity can cause in the event of inappropriate use, accidents, or malicious acts. In such emergency situations, the challenge is to limit exposure to ionizing radiation as much as reasonably possible through, on the one hand, the implementation of protective dispositions, and on the other hand, appropriate care for individuals who may be exposed to radioactivity. In all cases, decisions and actions must consider the context of the event, without overlooking, if necessary, the priority of medical-surgical emergencies over radiological emergencies.

The Armed Forces Radiation Protection Service: radiation protection in the context of deterrence

Pr Jean-Christophe Amabile, Director of the Armed Forces Radiological Protection Service (SPRA); **Dr Émilie Jamet-Anselme**, Head of the SPRA medical division; **Dr Annabelle Bonnin Dussaud**, Head of the SPRA intervention and training division; **Lieutenant-Colonel Ingrid Richard**, Head of the SPRA control division; **Dr Manon Chantre**, Pharmacist specialising in toxicology and the environment, assistant at army hospitals; **Dr Denis Chianéa**, Deputy Director of the SPRA; and **Guillaume Garnier**, Engineer, head of the operational dosimetric reconstitution unit at the SPRA

The French defense radiation protection service (SPRA) was established in 1973 as part of France's nuclear deterrence strategy. Located in Clamart, it is part of the Armed Forces Health Academy. Its motto, "Radiological protection at the service of the forces at all times and in all circumstances", reflects its commitment to ensuring the radiological protection of armed forces ministry personnel exposed to ionizing radiation, both during routine work and in radiological emergency situations. Its activities include medical radiobiological monitoring, personnel and workplace dosimetry, facility

inspections, intervention and training. Organized into specialized units and divisions, the SPRA relies on a quality management system, making it a key player in managing radiological risks within the armed forces.

Post-accident management of the consequences

of a nuclear accident: CODIRPA

Olivier Rivière, Director of Environment and Emergencies at the French Nuclear Safety Authority (ASN)

The Steering Committee for the management of the post-accident phase of a nuclear accident or a radiological situation (CODIRPA) is a pluralist committee led by the nuclear safety Authority (ASN). Acting under a mandate from the French Prime Minister, its mission is to propose recommendations to the Government to strengthen the national strategy for long-term management of the consequences of a nuclear accident. Its latest recommendations, transmitted to the Government to feed into national crisis planning, include in particular the lessons learned from the Fukushima accident. Despite the technical nature of the subjects covered, this committee has proposed mechanisms for involving the various stakeholders in its work, in particular those living near nuclear facilities. Finally, the CODIRPA has developed various educational materials for different audiences: health professionals, businesses, and the general public.

The societal consequences of nuclear accidents and the co-expertise process as a mechanism for resilience in post-accident situations

Jacques Lochard, Emeritus Vice-Chairman of the Main Commission of the International Commission on Radiological Protection (ICRP) and Professor at Nagasaki University; **Thierry Schneider**, Director of the Centre d'étude sur l'Évaluation de la Protection dans le domaine Nucléaire (CEPN) and member of the ICRP Main Commission; and **Jean-François Lecomte**, Emeritus member of the ICRP

The presence of radioactivity in the environment of populations affected by a large-scale nuclear accident inevitably leads to the emergence of long-lasting socio-economic consequences that disrupt daily life. The Chernobyl and Fukushima accidents demonstrated the importance of initiating resilience processes to address the concerns of these populations.

After presenting the main societal consequences of nuclear accidents, this paper describes the co-expertise process and discusses the issues at stake for radiation protection experts, with a view to improving the quality of life of populations affected by accidents.

Issue editors:

Michel Bourguignon and Valérie Chambrette

Ont contribué à ce numéro



D.R.

Jean-Christophe AMABILE intègre l'école du Service de santé des Armées de Lyon-Bron en 1988.

En 1996, il débute sa carrière dans les forces sous-marines (quatre patrouilles opérationnelles à bord du sous-marin nucléaire lanceur d'engins L'Inflexible dans le cadre de la dissuasion). À partir de 2002, il est responsable du

fonctionnement du centre de traitement des blessés radio-contaminés de la base opérationnelle de l'Île Longue ainsi que du centre d'expertise du personnel sous-marinier.

En 2004, il débute son cursus de praticien confirmé en hygiène nucléaire et radioprotection médicale et est affecté au Service de Protection Radiologique des Armées (SPRA). Il organise en 2008 une mission à Warehouse Camp (Kaboul) pour contrôler les installations émettrices de rayonnements ionisants du groupement médico-chirurgical ainsi que les matériels de déminage. En 2013, il obtient le titre de praticien professeur agrégé en médecine d'armée, dans la discipline hygiène nucléaire et radioprotection médicale, puis devient directeur-adjoint du SPRA.

De 2016 à 2017, il est auditeur de la 53^e session « Armement et économie de défense » de l'Institut des hautes études de la défense nationale (IHEDN). Il est alors affecté en 2017 à la direction centrale du Service de santé des Armées à Balard au poste d'adjoint au chef de la division « Expertise et stratégie santé de défense ».

Le 1^{er} septembre 2020, il est nommé médecin chef des services et est muté au SPRA en tant que directeur. Il est notamment membre du Conseil scientifique de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) et directeur pédagogique du diplôme d'université de radioprotection appliquée à la médecine du travail (DURAMT).

Il est l'auteur de plus de 200 publications et communications nationales et internationales dans le domaine de la radioprotection, de la médecine de prévention et de l'intervention en situation d'urgence radiologique.



D.R.

Céline AUGERAY, de formation ingénieur chimiste et radiochimiste, a rejoint l'Autorité de Sûreté nucléaire à la direction de l'Environnement et des Situations d'urgence mi-2024. Elle occupait précédemment le poste de cheffe du laboratoire d'expertise, de radiochimie et de chimie analytique du service d'analyses et de métrologie pour l'environnement

de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

au Vésinet (78) et animait la communauté de la métrologie « METRIC » de l'IRSN.

Elle intervient actuellement auprès de groupes d'experts, notamment à ISO TC147-SC3 « Qualité de l'eau/ Méthodes radiologiques » et au BNEN M60-3 « Mesure de la radioactivité dans l'environnement ». Elle assure également la présidence du GT18 « Analyse de l'eau » de la CETAMA (consortium CEA, Orano, EDF et IRSN).



D.R.

Nicolas BAGLAN a une formation universitaire en chimie (plus précisément radioéléments, rayonnements, radiochimie) qui s'est achevée en décembre 1992 après l'obtention de son doctorat. Depuis cette date, ses postes successifs au KfK (Kernforschungszentrum Karlsruhe), au CEA et à l'ASN lui ont permis d'établir une expérience couvrant les divers aspects

de la surveillance de l'environnement (réglementation, définition des plans de surveillance, réalisation de la surveillance, transmission des résultats aux autorités compétentes...).

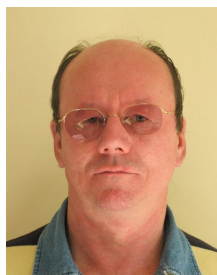
La reconnaissance de ses compétences lui a permis de présider des groupes de travail nationaux (CETAMA) ou internationaux (OBT-WG), mais également d'être membre de sociétés savantes (SFRP), du comité scientifique du LNE – LNHB (laboratoire primaire pour les rayonnements ionisants en France), du conseil d'administration de l'association PROCORAD et d'instances normatives (BNEN – ISO).

Anaïs BARATEAU est physicienne médicale exerçant en radiothérapie au Centre Eugène Marquis à Rennes. Elle est titulaire d'un doctorat en traitement d'images médicales obtenu au sein du laboratoire du traitement du signal et de l'image (LTSI) de l'Université de Rennes.

Ses thématiques de recherche portent sur l'amélioration de la prise en charge des traitements par radiothérapie, notamment la radiothérapie personnalisée à la séance et la radiothérapie guidée par imagerie par résonance magnétique (IRM) avec la génération d'images synthétiques par des méthodes d'intelligence artificielle.

Pierre BARBEY était, jusqu'à une date récente, Maître de Conférences Universitaire en Biologie cellulaire à l'Université de Caen Normandie. Spécialiste de la radioprotection, il a été responsable de la prévention des risques radiologiques au sein de son Université pendant un peu plus de 33 ans.

Il est l'un des fondateurs de l'Association pour le Contrôle de la Radioactivité dans l'Ouest (ACRO), créée à la suite



D.R.

de la catastrophe de Tchernobyl. Depuis sa création, il agit comme conseiller scientifique bénévole au sein de l'ACRO. C'est à ce titre qu'il a participé activement aux travaux d'expertise pluraliste du Groupe Radioécologie du Nord-Cotentin (GRNC) et du GEP consacré aux mines d'uranium.

À la demande des autorités compétentes, il s'est impliqué dans divers groupes de travail ou groupes d'experts sur différents sujets en lien avec la radioprotection : livre blanc sur le tritium, nouveaux coefficients de dose pour le radon, le zonage radiologique, le livre blanc sur la surveillance radiologique des travailleurs...

Il a été membre du Haut Comité pour l'Information, la Transparence et la Sécurité Nucléaire (HCTISN) de février 2008 à février 2021. Plus récemment, à la demande de l'ASN, il a animé le groupe d'experts en charge de refonder le Guide national Intervention médicale en situation d'urgence nucléaire ou radiologique.



D.R.

Benoît BETTINELLI, Ingénieur général des Mines, occupe actuellement le poste de chef de la mission sûreté nucléaire et radioprotection au sein de la DGPR du ministère de la Transition écologique. Auparavant, il a exercé les postes de directeur délégué de la DRIRE Picardie et de chef de développement industriel – énergie à la DRIRE Franche-

Comté. Il est diplômé de l'École polytechnique et de l'École Nationale Supérieure des Télécommunications.



D.R.

Éric BLANCHARDON est Ingénieur et docteur en biologie. Il travaille à l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) depuis 2002, d'abord comme chercheur en dosimétrie interne jusqu'en 2019 puis comme chargé d'évaluation de la maîtrise des risques radiologiques et nucléaires, au bureau d'expertise en radioprotection de la population.



D.R.

David BOILLEY est physicien nucléaire dans l'enseignement supérieur et président de l'ACRO. Il a participé aux travaux du GRNC et a siégé au Comité d'Orientation des Recherches de l'IRSN. Il participe actuellement aux travaux du CODIRPA et représente l'ACRO au HCTISN.



D.R.

Annabelle BONNIN DUSSAUD intègre l'école du Service de santé des Armées de Lyon-Bron en 1998.

En 2008, elle débute sa carrière comme médecin des forces au profit de l'antenne médicale du 2 RD à Fontevraud. Pour soutenir les forces lors de ses projections en Guyane, au Liban et en

Afghanistan, elle passe la capacité de médecine d'urgence en 2009-2010. Servant au profit d'une unité spécialisée NRBC, elle entame un cursus de spécialisation et participe aux différents exercices nationaux ou internationaux en toxiques réels.

En 2015, elle poursuit son parcours vers la 118^e antenne à Angers, avec une prise de poste de médecin responsable d'antenne en 2019. Entre les différentes missions au Liban ou à Djibouti, elle effectue le soutien des personnels de l'armée de terre et de la gendarmerie ainsi que la médecine de prévention des personnels civils de la défense. Poursuivant le maintien de compétences NRBC, elle est formateur Unité médicale de décontamination des Armées depuis 2020.

Le 30 août 2021, après obtention du titre de praticien confirmé en médecine d'Armées et du certificat de personne compétente en radioprotection, elle est affectée comme chef de la division intervention et formation au Service de Protection Radiologique des Armées. Elle passe le diplôme universitaire « Risques sanitaires Radionucléaires, Biologiques, Chimiques et Explosifs » Option « NR » en 2022-2023. Dans le domaine de l'intervention, elle participe aux exercices de sécurité nucléaire de niveau 4 en tant que scénariste et évaluateur et collabore à la cellule de reconstitution dosimétrique opérationnelle. Elle contribue à différentes formations notamment celle des personnels du Service de santé des Armées dans le domaine de la radioprotection et de l'intervention en situation d'urgence radiologique.



D.R.

Catherine BORDIER-OLIVEIRA est titulaire depuis 1995 d'un Doctorat de chimie de l'Université Paris VI, durant lequel elle a réalisé plusieurs publications scientifiques et communications en analyses bio-organiques, plus particulièrement en chromatographie et techniques couplées. Elle est depuis juin 2023 coordinatrice environnement du centre Paris-

Saclay du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) pour les sites de Saclay et de Fontenay-aux-Roses. Expert senior depuis 2018 dans le domaine de l'environnement, spécialités évaluation environnementale, instrumentation, métrologie et contrôle, elle assure la direction technique des actions de surveillance de l'environnement du service de Protection contre les rayonnements et de surveillance de l'environnement (SPRE), unité de la direction

du centre CEA Paris-Saclay. Elle est par ailleurs le garant de la bonne réalisation des exigences réglementaires dans le cadre des pôles de compétences en radioprotection. Elle a effectué sa carrière au sein du CEA, en débutant en 1996, en tant que chargée d'affaires à l'Institut de Protection et de Sûreté nucléaire (IPSN) pour la mise en application nationale de la Convention sur l'Interdiction des Armes Chimiques. À ce titre, elle a effectué des missions nationales d'expertise et de conseil auprès des industriels de la chimie, et internationales auprès d'Autorités étrangères et des instances de l'Organisation pour l'interdiction des armes chimiques (OIAC) basée à la Haye aux Pays-Bas.

En 2003, elle accède à un poste de responsable de laboratoire d'analyses radiochimique et chimique agréé par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) pour la mesure de la radioactivité de l'environnement et accrédité par le Comité français d'accréditation (COFRAC) pour plusieurs paramètres nucléaires et chimiques. Expert technique dans le domaine de la mesure physico-chimique, elle intervient dans des audits de laboratoires et devient membre adhérent de la Commission de normalisation AFNOR T90A sur la qualité de l'eau et participe à des groupes de travail dans le domaine de l'analyse physico-chimique.

En 2013, elle intègre ensuite la Direction de la sécurité et de la sûreté nucléaire, une direction fonctionnelle du CEA, en tant que chargé de gestion environnementale, où elle travaille sur la définition de la politique du CEA en matière de protection de l'environnement, élabore le référentiel de sécurité et de sûreté nucléaire associé, conseille, assiste, soutien les directions de centres et les directions opérationnelles, et coordonne le réseau des acteurs en charge de la gestion environnementale au CEA. Durant cette période, elle devient membre adhérent de la Commission M60-3 sur la mesure de la radioactivité dans l'environnement du Bureau de Normalisation d'équipements nucléaire (BNEN). Dans le cadre de l'engagement CEA dans la Convention OSPAR pour la protection du milieu marin de l'Atlantique Nord-Est, elle intervient en tant qu'expert environnement auprès de la délégation française dans le cadre des réunions et des travaux du Comité des substances radioactives (RSC).

En 2016, elle est nommée par l'administrateur général du CEA, expert des commissions de sûreté CEA dans le domaine des études d'impact sanitaire et environnemental. En 2018, elle devient sur Décision ASN, représentante titulaire des laboratoires agréés à la Commission d'agrément des laboratoires de mesure de la radioactivité de l'environnement.

Jean-François BOTTOLIER-DEPOIS, après l'obtention d'un doctorat d'Université en Physique, spécialité instrumentation et mesures, option nucléaire à l'Université scientifique et médicale de Grenoble (1985), débute sa carrière au CERN comme post-doctorant sur la conception d'un moniteur e⁺/e⁻ utilisant le rayonnement synchrotron puis comme ingénieur d'étude (1988) pour la mise en œuvre de codes pour le calcul de protection radiologique.



D.R.

Il intègre l'IPSN en 1992 comme chercheur puis chef de l'unité de dosimétrie d'accident et de criticité (1997) en charge de la reconstitution dosimétrique en cas d'accident radiologique et de la dosimétrie du rayonnement cosmique dans le spatial et l'aéronautique.

À la création de l'IRSN, il est nommé en 2003 chef du service de dosimétrie externe en charge des activités de recherche et d'expertise en dosimétrie externe concernant les travailleurs, les patients, la reconstitution dosimétrique en cas d'accident radiologique et la métrologie des RI.

De 2016 à 2024, il est adjoint à la direction de la Santé en charge des activités de R&D et d'expertise dans les différents domaines concernés par les rayonnements ionisants (industrie, médecine, aéronautique, recherche, défense...). Il est plus particulièrement impliqué dans la définition de la stratégie pour la R&D, la coordination de l'expertise en cas d'accident radiologique, l'organisation de crise et les relations avec les organismes nationaux et internationaux...

Il est impliqué dans différentes organisations dont l'ISO (président TC85/SC2 Radiological Protection 2018-2024 et animateur du WG21 Dosimetry for Exposures to Cosmic Radiation in Aircraft 2006-2017), la CIPR (membre du TG 83 RP Cosmic Radiation in Aviation - publication 132), l'EURADOS (membre du conseil et secrétaire 2010-2022) et le CNES (membre du GT Soutien à la Vie dans l'Espace (SVE) 2020-2022).



D.R.

Michel BOURGUIGNON est Docteur d'État en médecine (1978), spécialiste en médecine nucléaire (1983), Docteur d'État en Physique (1995) et Professeur des Universités en biophysique et médecine nucléaire, Praticien hospitalier (1996).

Il est actuellement Professeur émérite de l'Université Paris Saclay (UVSQ), Directeur médical de l'unité Inserm UMR 1296 « Radiations : Défense, Santé, Environnement » (Lyon) et Rédacteur en chef du journal *Radioprotection*.

Il a débuté sa carrière professionnelle dans le domaine de la biophysique et de la médecine nucléaire comme chercheur post-doctoral puis *visiting professor* à l'Université Johns Hopkins de Baltimore aux États-Unis. De 1981 à 1996, il est médecin nucléaire, chercheur titulaire à la direction des sciences du vivant du Commissariat à l'Énergie Atomique.

En 1996, Michel Bourguignon exerce des responsabilités nationales en matière de radioprotection à l'Office de protection contre les rayonnements ionisants (OPRI) puis à la direction générale de la Sûreté Nucléaire et de la Radioprotection (DGSNR) et à l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) comme commissaire de 2006 à 2014,

et enfin comme conseiller du directeur général de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) jusqu'en 2019.

Il a été membre actif de différentes sociétés savantes (SFBMN, EANM) et organisations internationales (UNSCEAR, EURATOM, CIPR).

Il est l'auteur de 2 thèses, de 189 articles scientifiques publiés dans des revues à comité de lecture, et de 22 chapitres de livres scientifiques. Il est également titulaire de 3 brevets. Il a reçu le Prix International Jean Debiesse 1990 délivré par CIS Bio International. Il a reçu la médaille d'honneur du Service de santé des Armées, échelon argent, en 2021.



D.R.

Hélène CAPLIN est ingénieur procédés, spécialisée dans le traitement des effluents. Elle démarre en tant qu'ingénieur-formateur, puis rejoint le domaine du nucléaire à travers diverses prestations au sein d'EDF et de SGN (Orano).

Elle arrive à l'IRSN comme chargée d'affaires en radioprotection de la population. Ses missions consistaient principalement à étudier l'impact sur

la population des rejets de substances radioactives et chimiques d'installations (cycle du combustible, crématorium, hôpitaux, industries NORM) pour différentes situations.

Aujourd'hui, elle travaille toujours à l'IRSN en tant que chargé d'application de la Convention sur l'interdiction des armes chimiques.



D.R.

Valérie CHAMBRETTE est, depuis 2013, directrice de la Société française de radioprotection (SFRP), association loi 1901 regroupant près de 1 000 professionnels de la radioprotection venant d'horizons variés. Elle coordonne les activités de cette société savante auprès des 150 membres présents dans les différentes sections et commissions.

Elle est titulaire d'un doctorat en biologie de l'Université technologique de Compiègne (France).

Elle a commencé sa carrière scientifique en 1992, à l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) dans le laboratoire de dosimétrie biologique pour identifier à partir d'un prélèvement sanguin les doses d'irradiation reçues accidentellement. Après 10 ans, elle prend la direction du bureau d'exploitation du centre technique d'urgence de l'IRSN et a acquis la culture de gestion des situations d'urgence radiologique. En 2013, attirée par le besoin du partage des informations, elle accepte de coordonner la Société française de radioprotection.



D.R.

Manon CHANTRE, Pharmacien des Armées, entre à l'école du Service de santé des Armées de Lyon-Bron en 2012.

Diplômée depuis 2018, elle débute sa carrière au sein d'un laboratoire d'Analyses, de Surveillance et d'Expertise de la Marine en tant qu'adjointe au chef du laboratoire de chimie analytique.

Praticien confirmé en Toxicologie & Environnement depuis 2021, elle poursuit sa spécialisation dans le domaine de la chimie analytique en complétant son cursus universitaire par un master 2 « Toxicologie-Environnement-Santé ».

Arrivée au Service de Protection Radiologique des Armées en 2023, elle partage son temps entre la division Dosimétrie pour la surveillance de l'exposition interne des travailleurs exposés aux rayonnements ionisants et au sein de la division Intervention Formation avec la cellule de reconstitution dosimétrique. Elle suit également pour l'année 2024-2025, le master 2 « Risques sanitaires NRBC-e » co-hébergé par Sorbonne Université et l'École du Val de Grâce.



D.R.

Jean-François CHATEIL est radiologue des hôpitaux au CHU de Bordeaux (1990-2023), Professeur de radiologie et imagerie médicale depuis 2001 à l'Université de Bordeaux.

Il est également membre de la Société Française de Radiologie, de la Société Francophone d'Imagerie Périnatale et Pédiatrique, de la Société Française de

Radioprotection, de la Société Européenne de Radiologie (ESR), de la Société Européenne de Radiologie pédiatrique (ESPR).

Par ailleurs, il est membre du groupe de radioprotection du G4 (Collège professionnel de la radiologie) et expert auprès de l'ASN (Groupe de Travail pour la Radioprotection des Patients).



D.R.

Denis CHIANÉA acquiert son diplôme d'État de docteur en pharmacie en 1991.

En 1991, après une année de service national au laboratoire de biochimie-toxicologie de l'hôpital d'instruction des Armées (HIA Desgenettes), il intègre le Service de santé des Armées (SSA) comme officier d'active et rejoint l'école d'application du SSA de

1991 à 1992. De 1992 à 1995, il sert comme adjoint au laboratoire de biochimie-toxicologie du centre hospitalier des Armées René-le-Bas (Cherbourg). De 1995 à 1996, il est affecté comme adjoint au laboratoire de

biochimie-toxicologie de l'HIA Val-de-Grâce (Paris). Durant cette période il est reçu au concours de praticien confirmé des hôpitaux des Armées, discipline biologie médicale (équivalent internat).

À l'issue de sa réussite au concours, il est nommé assistant en formation en biologie médicale à l'HIA Clermont-Tonnerre (Brest) de 1996 à 2002. En 2001, il obtient le diplôme d'études spécialisées Biologie médicale (Université de Bretagne Occidentale, Brest). En 2002, il est reçu au concours de praticien certifié des hôpitaux des Armées, discipline biologie médicale (équivalent PH).

De 2002 à 2007, il est affecté à l'HIA Laveran (Marseille), comme biologiste adjoint et responsable qualité au laboratoire de biochimie-toxicologie. De 2007 à 2018, il est affecté à l'HIA Percy (Clamart), comme biologiste adjoint et responsable qualité au laboratoire de biologie médicale. En 2010, il est reçu au concours de responsable de spécialité des hôpitaux des Armées, discipline biologie clinique en 2010.

De 2018 à 2022, il est affecté à l'Inspection du Service de santé des Armées (Paris), comme chef du bureau audit interne. De 2022 au 31 mai 2024, il est nommé au Département accompagnement et gestion des ressources humaines (DAGRH) du SSA, comme chef du bureau pilotage et contrôle interne.

Depuis le 1^{er} juin 2024, il occupe la fonction de directeur adjoint au Service de Protection Radiologique des Armées.

Il est titulaire d'un Master II Pro Mention Ingénierie pour la santé et le médicament, spécialité pharmacie et cosmétologie industrielle, management de la qualité des organisations (Université Claude Bernard, Lyon I) obtenu en 2009 et d'un Diplôme universitaire Qualité et audit d'efficacité dans les organisations de santé et à haute fiabilité (Université Paris Est-Créteil, IAE Gustave Eiffel) validé en 2014.

Énora CLÉRO est épidémiologiste depuis plus de 10 ans à l'IRSN dans le domaine des rayonnements ionisants, en particulier sur l'évaluation des risques sanitaires à long terme après exposition aux rayonnements ionisants dans l'environnement.

Elle est impliquée dans plusieurs groupes d'experts au niveau national et international, notamment pour la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) et le Centre International de Recherche sur le Cancer.

Frank DECONINCK a obtenu son doctorat en physique médicale à la Vrije Universiteit Brussel (VUB). Il a été chercheur associé à l'Université de Californie (UCSF) et collaborateur de recherche au Brookhaven National Laboratory. Il est professeur émérite de physique biomédicale à la VUB et codirige BrIAS, l'Institut bruxellois d'études avancées, depuis 2018.

Dans le domaine nucléaire, il est président honoraire du conseil d'administration du Centre d'Étude de



D.R.

dans les soins de santé.

Dans le domaine socioculturel, il a organisé, avec Mme Deconinck-De Ries, l'exposition « Art graphique tactile », accessible à tous, y compris aux aveugles et aux malvoyants, et sélectionnée en 1989 par l'Unesco pour la décennie mondiale des Nations unies pour le développement culturel. Des expositions ont eu lieu en Belgique, à Paris (Unesco), à Cologne, à Taïpei, à Osaka, à Tokyo... ; il a co-organisé le Festival international des arts très spéciaux à Bruxelles, en 1994.

Il est l'auteur, le co-auteur ou l'éditeur de 6 livres, de plus de 100 articles, de plus de 200 communications et de plus de 300 conférences invitées. Il a reçu le prix Hewlett-Packard pour l'informatique médicale en 1984, le prix Famille Bruers-Colbert et sa fille pour ses travaux sur la fluorescence des rayons X en 1987 et le prix honorifique Tech-Art pour l'art tactile destiné aux aveugles en 1988. Il a reçu le titre d'Officier de l'Ordre de Léopold par S.M. le Roi Philippe.



D.R.

Brice DELIME est Ingénieur divisionnaire de l'industrie et des mines. Il occupe actuellement le poste d'adjoint au chef de la mission sûreté nucléaire et radioprotection au sein de la DGPR du ministère de l'Écologie.

Auparavant, il a exercé différents postes en tant qu'inspecteur de la sûreté nucléaire au sein de l'ASN et inspecteur de l'environnement au sein de la DREAL. Il est diplômé des Mines de Douai et du cursus « Génie atomique » de l'Institut national des sciences et techniques nucléaires.



D.R.

Patrick DEVIN a une formation scientifique et d'ingénieur dans les domaines du génie physique et du génie atomique et travaille dans le nucléaire depuis environ 35 ans dans le groupe Orano (ex-Areva et ex-Cogema).

Il a travaillé dans l'ingénierie puis au sein de la maîtrise d'ouvrage dans les domaines de la sûreté, l'environnement et la radioprotection. Plus précisément, ses domaines de compétences portent sur la radioprotection des travailleurs et de l'environnement, la mesure nucléaire, la sûreté

nucléaire et la réglementation, les études d'impacts radiologique et chimique sur l'homme et sur la faune et la flore, le démantèlement des installations nucléaires, la gestion des sols marqués par des substances radioactives et la gestion des déchets radioactifs.

Il a une bonne connaissance de toutes les installations du cycle du combustible (des mines d'uranium au traitement et recyclage des combustibles usés) à toutes les phases de vie d'une installation (conception, exploitation, démantèlement). Afin d'avoir une approche de terrain, il a réalisé de nombreuses missions sur sites Orano, Framatome, CEA, Andra et EDF. Il a ainsi participé à différents projets, de la conception des installations à leur démantèlement, sur toutes les étapes du cycle du combustible nucléaire.

Patrick Devin réalise aussi des formations pour l'INSTN, le CNAM et en licence Pro à l'Université de Cherbourg. Il a été nommé récemment expert fellow/niveau 3, plus haut niveau d'expertise d'Orano, dans le domaine de l'environnement et de la radioprotection. Il participe à de nombreux groupes de travail techniques dans le cadre du PNGMDR, du CODIR PA... Il a aussi participé à des groupes d'expertise pluralistes comme le GRNC (Groupe Radioécologie Nord-Cotentin) et le GEP (Groupe d'Expertise Pluraliste) sur les anciennes mines d'uranium en France. Il est expert au GPRP (groupe permanent de radioprotection) de l'ASN, membre du COPIL du RNM (Réseau national de mesures de la radioactivité de l'environnement), il est au CA de PROCORAD qui organise des intercomparaisons pour les laboratoires de radiotoxicologie.

Il publie régulièrement et réalise des présentations dans différents congrès en France et à l'international. Et enfin, il est membre et actuellement président de la SFRP (Société Française de Radioprotection) et ex-président de la section environnement de la SFRP.



D.R.

Thomas EHRET est médecin du travail au Centre Nucléaire de Production d'Électricité (CNPE) de Cattenom depuis 2008. En 2011, il devient médecin référent adjoint du domaine Rayonnements Ionisants (RI) et Anthropogammamétrie d'EDF, démontrant son expertise dans ces domaines spécifiques. À

partir de 2019, il occupe le poste d'évaluateur technique du Cofrac pour les essais en anthroporadiométrie selon la norme NF EN ISO/IEC 17025. En 2023, le Dr Ehret élargit ses activités en devenant enseignant vacataire au DURAMT (Diplôme Universitaire de Radioprotection Appliquée aux Métiers de la Technique). L'année 2024 marque son adhésion à la section Santé et Recherche de la SFRP ainsi que sa nomination comme membre de la Commission de normalisation M60-1 Protections contre les Rayonnements Ionisants, où il participe au groupe d'experts GE 2 sur la dosimétrie interne et biologique. Son parcours illustre un engagement continu dans la spécialisation et

l'expertise en médecine du travail et en radioprotection dans l'industrie nucléaire.

Nicolas FORAY, Radiobiologiste, physicien de formation, est rentré à l'Inserm en 2003 comme Chargé de Recherche à l'Unité 247 Inserm sur la ligne biomédicale du synchrotron de Grenoble. En 2009, il forme un groupe de radiobiologie au sein du Centre de Recherche en Cancérologie de Lyon situé sur le Centre Léon-Bérard puis fonde en 2019 l'Unité 1296 « Radiations : Défense, Santé, Environnement » dont il est le directeur. L'U1296 est associée à l'Inserm, au Service de santé des Armées et à l'Université Lyon 2 (www.radiobiologie.fr).

Président de la Société Francophone de Radiobiologie pendant 8 ans, il a focalisé ses recherches sur la réponse individuelle aux radiations dans un contexte clinique, environnemental ou accidentel. Il a été lauréat de l'Académie des Sciences en 2009 et de l'Académie de Médecine en 2021. Il est l'auteur de 4 ouvrages, d'une dizaine de chapitres de livres et d'environ 150 publications en *peer-review*.



© Laurence Godart

Éric GADET est diplômé de l'École nationale supérieure de chimie et physique de Bordeaux et titulaire d'un DESS Management de l'IAE (Institut d'administration des entreprises) de Paris. Il a commencé sa carrière au CEA en 1994, au sein de la direction des Relations humaines de la Direction des applications militaires (DAM).

En 1997, il est nommé chef du bureau « emploi-carrières » du Service du personnel et des affaires sociales du centre CEA-DAM Île-de-France, puis, adjoint au chef de service en 1999.

En 2001, Éric Gadet quitte la DAM pour la DRT où il est nommé responsable des ressources humaines. En 2003, il rejoint la DRHRS et prend la direction du service « Compétences et parcours professionnel ». Il est notamment en charge de la définition de la politique de recrutement et de mobilité interne et externe, et du développement d'outils de gestion des compétences (GPEC, revues de personnel, entretiens annuels).

En 2010, après une expérience de 2 ans comme directeur des ressources humaines du Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), il réintègre le CEA en tant que directeur adjoint des ressources humaines et des relations sociales. En 2016, il est nommé directeur des relations humaines de la DAM.

En 2018, Éric Gadet rejoint l'INSTN comme adjoint au directeur.

Sa nomination en tant que directeur de l'INSTN fait suite à la parution au bulletin officiel du ministère de la Transition écologique et solidaire du 22 octobre 2019 d'un arrêté interministériel (ministère de la Transition écologique et solidaire, ministère de l'Économie et des

Finances et ministère de l'enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation) du 14 octobre 2019 portant nomination du directeur de l'INSTN.



D.R.

Guillaume GARNIER intègre le ministère des Armées en 2018 en tant qu'ingénieur en radioprotection au sein de la Division Intervention/Formation du Service de Protection Radiologique des Armées (SPRA).

Il occupe la fonction de responsable de la Cellule de reconstitution dosimétrique opérationnelle et devient adjoint scientifique du SPRA en 2024.

Il est membre du conseil scientifique du Réseau national des laboratoires Biotox Piratox Piratome (RNLB2P).

Il est titulaire du diplôme de Master Sciences, technologies, santé mention Physique et technologies des rayonnements pour l'industrie et la physique médicale de l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand en 2017 ; titulaire du diplôme d'État à l'Institut de Formation de Manipulateurs d'Électroradiologie Médicale de Saint-Germain-en-Laye en 2015 ; et lauréat du Prix Henri Jammet de la Société Française de Radioprotection en 2021 avec la présentation « Reconstitution expérimentale d'une exposition externe accidentelle liée à une source de gammagraphie ».

Il a représenté la France en 2022 lors du sixième congrès européen de radioprotection à Budapest, Hongrie, en participant à la Young Scientists Competition avec le sujet "Experimental reconstruction of an external exposure: how the dosimetric methods complement each other?".



D.R.

Pierre-Yves HÉMIDY est Docteur en Pharmacie, ancien interne des Hôpitaux et lauréat de l'Académie Nationale de Pharmacie.

Entré à EDF en 1998 dans un service médical de radioprotection, il est ensuite passé par la CNPE de Penly et a rejoint les services centraux de la Division Production Nucléaire dans une unité d'appui au parc en exploitation.

Chargé de Missions & Expert Environnement Groupe EDF, ses missions actuelles sont principalement orientées sur l'appui aux CNPE et à la DPN sur le volet réglementaire, les aspects techniques et scientifiques, la défense des intérêts de la DPN et d'EDF en France et à l'international.

Il est aussi représentant d'EDF et des exploitants nucléaires dans différentes instances et groupes de travail en France et à l'international et membre du Groupe Permanent d'Experts en Radioprotection de l'ASN.

Il est également membre du conseil d'administration de la Société Française de Radioprotection et ex-président de la Section Environnement.



D.R.

Émilie JAMET-ANSELME intègre l'école du Service de santé des Armées de Lyon-Bron en 1998.

En tant qu'interne, elle effectue un stage au sein de l'unité d'instruction et d'intervention de la sécurité civile de Nogent-le-Rotrou, où elle est amenée à faire de la formation au profit des compagnies dans le domaine des effets biologiques des rayonnements ionisants. En

2009, elle débute sa carrière en tant que médecin adjoint du centre médical principal de Châlons-en-Champagne. Médecin référente pour la région de gendarmerie de Champagne-Ardenne, et médecin en charge de la prévention pour le centre médical des Armées de Mourmelon-Mailly, elle est amenée à suivre des agents exposés aux rayonnements ionisants (gendarmes, vétérinaires et dentistes).

En 2016, elle participe au cours « radioprotection des forces » au Service de Protection Radiologique des Armées et prépare le concours de praticien confirmé en radioprotection médicale et hygiène nucléaire. Elle s'engage dans des études aussi bien du domaine de la gestion de situations normales de travail (DES de médecine et santé au travail, diplôme universitaire de radioprotection appliquée à la médecine du travail, master II en toxicologie environnement et santé) que de gestion de crise (cours supérieurs de sécurité nucléaire, diplôme universitaire d'expertise dans la gestion des interventions d'urgence sanitaire).

Après ses années de formation lui ayant permis de côtoyer le monde du nucléaire civil (Orano, IRSN, CEA), elle prend le poste de chef de bureau radioprotection médicale au SPRA en 2021 et de chef de la division médicale en 2022.



D.R.

Mylène JOSSET est docteure en physique nucléaire et coordinatrice de l'ACRO. En particulier elle est intervenue en Biélorussie et plus récemment au Japon, pour aider l'installation d'équipements de mesure de laboratoires citoyens et former les équipes bénévoles.

Elle représente l'association au comité de pilotage du réseau national de mesure de la radioactivité de l'environnement (RNM) et a participé aux travaux du CODIRPA pour la réalisation d'un guide sur la mesure citoyenne.

Le **Dr Agnès KIRBY** est médecin spécialisée en biologie médicale. Elle est actuellement directrice du laboratoire EDF de biologie médicale, où elle se concentre sur



D.R.

les analyses radiotoxicologiques. Grâce à son expertise, elle contribue à l'évaluation des risques liés à l'exposition aux radiations. Le Dr Kirby joue un rôle clé dans la gestion de la santé et de la sécurité au sein de l'industrie énergétique. Son travail au laboratoire EDF est essentiel pour assurer des normes élevées en matière de sécurité biologique.



D.R.

Lionel LACHENAUD est administrateur de l'État, chef du bureau de la réponse gouvernementale à la direction de la protection de l'État au sein du secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale. Médecin urgentiste de formation, avec un parcours au sein de différents établissements de santé ainsi que du bataillon de marins-pompiers de Marseille toujours avec un fort lien dans le domaine NRBC au niveau territorial et au niveau national.



D.R.

Éric LAPORTE est un médecin du travail spécialisé dans l'industrie nucléaire, exerçant au Centre Nucléaire de Production d'Électricité (CNPE) de Saint-Alban depuis 1999. En 2021, il devient médecin référent national et pilote stratégique du domaine Rayonnements Ionisants (RI) et Anthropogammamétrie (ATP) d'EDF, confirmant son expertise technique.

En 2022, il renforce son engagement scientifique en devenant membre de la section Santé et Recherche de la Société Française de Radioprotection (SFRP). Son parcours illustre une carrière dédiée à la sécurité et à la santé des travailleurs dans le secteur nucléaire.



D.R.

Dominique LAURIER est épidémiologiste impliqué dans la recherche sur les effets sanitaires des rayonnements ionisants depuis plus de 25 ans.

Il est actuellement adjoint au Directeur de la santé à l'IRSN. Il préside le Comité 1 de la CIPR et est co-représentant de la délégation française à l'UNSCEAR.

Laurence LEBARON-JACOBS est docteur en radiobiologie-radiopathologie de l'Université Paris XI (1994) et docteur en médecine de l'Université Pierre et Marie Curie (1996). Pendant son doctorat à l'Insti-



D.R.

tut de Protection et de Sécurité Nucléaire (IPSN), elle a participé à un projet de dosimétrie externe en temps réel à bord de la station orbitale russe MIR. De 1995 à 2001, elle a travaillé à l'IPSN dans les domaines de la prise en charge médicale des victimes irradiées et des recherches liées aux effets des rayonnements ionisants (gamma, ions lourds) sur le système nerveux central. Depuis 2002, elle travaille au CEA et est actuellement médecin-conseiller international en radiobiologie, radiopathologie et toxicologie nucléaire au CEA à la direction de la Recherche Fondamentale (DRF) au sein de l'Institut de Biologie François Jacob (IBFJ), unité de Protection Sanitaire contre les Rayonnements Ionisants et les Toxiques Nucléaires (CEA/Cadarache). Elle est maître de conférences depuis 2022 pour ses activités d'enseignement en radiobiologie, radiopathologie et radiotoxicologie.

Par ailleurs, Laurence Lebaron-Jacobs participe à de nombreux organismes. Elle est vice-présidente du Comité d'Indemnisation des Victimes des Essais Nucléaires depuis 2024. Elle est membre de la Société Française de Radioprotection, et du comité éditorial du journal *Radioprotection*. Elle est membre du groupe d'experts Article 31 de la Commission européenne depuis 2005 et présidente du groupe de travail « Implications de la recherche sur les normes de santé et de sécurité » depuis 2021. Elle est membre de la délégation française auprès de l'UNSCEAR depuis 2010 et représentante de la France lors de 8 sessions dont la soixante et onzième en 2024. Elle a participé à des projets de recherche européens (H2020, Horizon) dédiés au développement de nouvelles stratégies de mitigation des rejets de tritium et à une meilleure compréhension des impacts sanitaires et environnementaux du tritium.



D.R.

Jean-François LECOMTE a été fonctionnaire du ministère chargé de l'énergie puis affecté au comité technique interministériel pour les questions relatives au traité Euratom. Il a ensuite intégré l'Institut français de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) où il est devenu expert senior. Il est membre émérite de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR). Il a contribué à de nombreux travaux portant sur la gestion du risque associé à l'exposition au radon et aux substances radioactives d'origine naturelle, sur la gestion des sites contaminés et sur celle de situations post-accidentelles, en France ou à l'international, en particulier dans le cadre de travaux de la CIPR.

Le **Dr Soleen LETALON** est médecin du travail au Centre Nucléaire de Production d'Électricité (CNPE)



D.R.

de Penly depuis 2020. Elle exerce ses fonctions au sein du Service de Prévention et de Santé au Travail de la centrale nucléaire. Le Dr Letalon joue un rôle crucial dans la surveillance et la protection de la santé des travailleurs du site, confrontés aux enjeux spécifiques de l'industrie nucléaire. Son expertise contribue à maintenir des normes élevées de sécurité

et de bien-être pour le personnel du CNPE. Basée à Dieppe, elle participe activement à la mise en place de stratégies préventives et à l'amélioration continue des conditions de travail dans ce secteur sensible.



D.R.

Jacques LOCHARD a suivi une formation en économie. Il a rejoint le Centre d'évaluation de la Protection nucléaire (CEPN), un organisme à but non lucratif de recherche et d'études sur l'évaluation des dimensions techniques, sanitaires, économiques et sociétales de la radioprotection en 1977. Il a été directeur du Centre de 1989 à 2016. À partir de 1990, il s'est engagé dans la protection des personnes affectées par les accidents nucléaires de Tchernobyl puis de celles affectées par l'accident de Fukushima. Depuis 2017, il est professeur à l'université de Nagasaki et également professeur invité à l'université d'Hiroshima.

Au cours de sa carrière, il a été impliqué dans plusieurs organisations internationales dans la radioprotection, parmi lesquelles la CIPR, qu'il a rejoint en 1993. Il a été vice-président de la Commission principale de 2013 à 2021 et il en est actuellement l'un des membres émérites.



D.R.

Corinne MANDIN est ingénieure chimiste et docteure en biologie et sciences de la santé. Elle a rejoint l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) en 2022 comme responsable du laboratoire d'épidémiologie des rayonnements ionisants.

Elle collabore régulièrement avec l'Organisation mondiale de la Santé et préside actuellement le Comité d'experts des risques liés à l'air à l'Anses.

Emmanuel MUSEUX est médecin spécialisé en Radiologie et Imagerie Médicale, exerçant en secteur libéral au sein du groupe Irimed à Nantes Saint-Nazaire en Loire-Atlantique, dont il est gérant. Il est également administrateur de la Fédération Nationale des Médecins Radiologues (FNMR), de la Société Française de Radioprotection (SFRP), du Réseau des Maternités et des Professionnels de la Périnatalité de



D.R.

la région Pays-de-la-Loire, expert en radioprotection pour le Conseil National Professionnel de la radiologie (G4), membre du bureau exécutif de la Société Française de Radiologie et d'imagerie médicale (SFR), vice-président de l'organisme de formation ODPC RIM, chargé d'enseignement à l'université de Montpellier pour le Diplôme Universitaire « management en imagerie médicale libérale », et appartient au groupe de travail « sécurité en IRM » de la SFR.

Toujours passionné par la qualité au service des patients et par la protection des personnels, ses différentes représentations professionnelles lui permettent de participer à des études ou à des concertations avec les tutelles et d'autres organismes, et à la formation et à l'information auprès des mandants radiologues.



D.R.

Emmanuel NICOLAS est président de la section rayonnements non ionisants de la Société Française de Radioprotection.

Il détient une expertise dans le domaine de l'exposition aux champs électromagnétiques acquise au sein de TDF pendant 15 ans, puis après un master en radioprotection en 2011, il coordonne depuis les activités

de contrôles réglementaires en radioprotection pour Bureau Veritas.



D.R.

Coralie NYFFENEGGER est une docteure/ingénieure chimiste, spécialisée dans le domaine de la synthèse organique.

Elle arrive à l'IRSN comme chargée d'affaires pour la Convention sur l'interdiction des armes chimiques dans l'industrie française. Par la suite, elle travaille dans la sûreté nucléaire et expertise des dossiers d'analyse

de risques nucléaires pour des installations de traitement de déchets.

Aujourd'hui, ses missions consistent principalement à étudier les rejets de substances radioactives et chimiques d'installations mettant en jeu des activités nucléaires et à évaluer l'impact de ces installations sur la population pour différentes situations.

Géraldine PINA est commissaire de l'Autorité de Sécurité Nucléaire. Titulaire d'une double formation d'ingénieur en génie électrique et de médecin, spécialiste en médecine nucléaire ainsi qu'en biologie médicale, elle est maître de conférences universitaire aux Hospices Civils de Lyon. Expert pour les risques NRBC



D.R.

(nucléaires, radiologiques, biologiques et chimiques) et leur prise en charge médicale, elle a été référente zonale pour la zone de défense civile sud-est et médecin rapporteur pour le Comité d'indemnisation des victimes des essais nucléaires (CIVEN).

Passionnée par la transmission des savoirs, elle a développé l'enseignement par simulation à taille réelle en situations sanitaires exceptionnelles (risques chimiques, Ébola, attentats) auprès de la faculté de médecine de Lyon et a reçu le prix de la commission armées-jeunesse dans la catégorie « Armées dans la cité ».

Engagée dans la vie militaire comme dans la vie civile, elle est réserviste opérationnelle du Service de santé des Armées et formatrice au centre de formation opérationnelle santé (CeFOS) pour les unités mobiles de décontamination des Armées et la prise en charge médicale en contexte NRBC. Elle a reçu la médaille d'honneur du Service de santé des Armées (échelon bronze) et est chevalier de l'Ordre national du mérite.



D.R.

Philippe RENAUD est expert senior dans le domaine de la radioactivité environnementale et de l'exposition des populations qu'elle induit. Il est chargé de mission auprès du directeur de l'environnement de l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) depuis 2015.

Entré au Commissariat à l'énergie atomique en 1987, il a été responsable de différents projets relatifs notamment au développement d'outils de calculs de radioprotection et aux expositions radiologiques post-accidentelles, avant de devenir en 2003, chef du laboratoire d'études radioécologiques en milieu continental et marin de l'IRSN. Il est co-auteur d'un livre, publié en 2009, sur les conséquences radiologiques en France de l'accident de Tchernobyl.



D.R.

Nathalie REYNAL est Ingénieur diplômée de l'École des Mines d'Alès en environnement industriel, titulaire d'un Master of Science en santé publique et management environnemental de l'Université de Strathclyde (Glasgow, Ecosse). Elle a occupé différents postes au sein de l'Autorité de Sécurité Nucléaire,

dans le domaine de la gestion des déchets radioactifs, de la sûreté des installations de stockage, du démantèlement des installations nucléaires et de l'environnement.

Au cours de sa carrière, elle a également exercé des fonctions au sein de la direction régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement d'Île-de-France dans le domaine de l'inspection des installations classées pour la protection de l'environnement, ainsi qu'à l'Agence fédérale de contrôle nucléaire à Bruxelles en Belgique.

Depuis 2015, elle est l'adjointe du directeur de l'environnement et des situations d'urgence de l'ASN, en charge du bureau de l'Environnement et de la Prévention des nuisances, qui intervient sur l'ensemble des installations nucléaires pour encadrer la maîtrise des risques, des inconvénients et de l'impact liés aux installations, ainsi que la protection et la surveillance de l'environnement.



D.R.

Ingrid RICHARD, après l'obtention d'une licence de biologie cellulaire et physiologie, intègre le IV^e bataillon de l'École spéciale militaire de Saint-Cyr en 2002 puis l'École supérieure d'application du génie en 2004.

À l'issue de son cursus de formation, elle intègre les formations militaires de la sécurité civile (ForMiSC) et est affectée en 2005 à l'unité d'instruction et d'intervention de la sécurité civile n°1 de Nogent-le-Rotrou. Chef de section puis commandant de la 3^e compagnie d'intervention, elle acquiert de hautes compétences dans le domaine des risques naturels et technologiques et se spécialise dans la gestion des risques NRBC.

Diplômée de l'École d'état-major de Saumur, elle rejoint la direction générale de la Sécurité civile et de la Gestion des crises en 2014 (DGSCGC). Dans un premier temps expert NRBC des ForMiSC, elle devient l'expert NRBC de la DGSCGC en 2018, renforçant régulièrement de son expertise le centre opérationnel interministériel de la gestion des crises (COGIC), la cellule nationale de conseil (CNC) ou la cellule interministérielle de crise (CIC).

En parallèle, elle assure les fonctions d'officier en charge des opérations du détachement central interministériel d'intervention technique (DCI-IT) de 2014 à 2019, de membre de la cellule interministérielle spécialisée dans la décontamination des infrastructures (CISDI) comme du centre national civile et militaire de formation et d'entraînement NRBC-E, contribue aux travaux NRBC du secrétariat général de la Défense et de la Sécurité nationale (SGDSN) et concourt au développement d'une réponse capacitaire opérationnelle NRBC au sein du mécanisme européen de protection civile.

En 2022, elle rejoint le Service de Protection Radiologique des Armées (SPRA) en qualité de chef du bureau vérification puis de chef de la division contrôle en 2024.



D.R.

Olivier RIVIÈRE, chercheur de formation, a exercé pendant 12 ans différentes fonctions au sein de Météo-France, notamment celle de directeur de la stratégie. À la suite de ce parcours dans le domaine des risques météorologiques et climatiques, il a rejoint l'ASN en 2019 en tant que directeur de l'environnement et des situations d'urgence au sein de l'Autorité de Sûreté Nucléaire.

À ce titre, il a été particulièrement impliqué dans l'animation des travaux pluralistes du CODIRPA sur le post-accident.



D.R.

Werner RÜHM est directeur de l'unité d'état-major (Stabstelle) sur l'avenir de la radioprotection à l'Office fédéral de radioprotection (BfS) en Allemagne. Il est également professeur à la faculté de médecine de l'université de Munich. En 2005, il a rejoint le Comité 1 (C1) sur le « risque radiologique » de la Commission internationale de protection radio-

logique (CIPR), a été secrétaire du C1 de 2012 à 2016, puis président de ce comité de 2016 à 2021. En 2021, il a été élu président de la CIPR. De 2014 à 2020, il a été président du groupe européen de dosimétrie des rayonnements (EURADOS), de 2020 à 2022, président de la Commission allemande de radioprotection (SSK), et de 2020 à 2022, membre du Comité national allemand de surveillance citoyenne (Nationales Begleitgremium, NBG).

Depuis 2005, Werner Rühm est l'un des rédacteurs en chef de la revue *Radiation and Environmental Biophysics*. Il a publié sur divers sujets, notamment la quantification de l'exposition aux neutrons des survivants des bombes atomiques d'Hiroshima et Nagasaki et l'évaluation de leur rôle dans l'évaluation des risques, l'exposition aux rayonnements cosmiques des équipages aériens, les risques liés aux expositions à de faibles doses de rayonnements ionisants, le comportement des radionucléides dans l'environnement, les expositions internes aux radionucléides incorporés et les techniques de mesure des rayonnements.



D.R.

Thierry SCHNEIDER est directeur du Centre d'étude sur l'évaluation de la Protection dans le domaine nucléaire (CEPN) depuis janvier 2017. Il est titulaire d'un doctorat en économie, dans le domaine de la santé et de l'assurance. Il est actuellement membre de la Commission principale de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR)

et président du Comité 4 (chargé de l'application des recommandations de la CIPR).

Il a participé à plusieurs projets de recherche liés à l'évaluation et à la gestion du risque radiologique, y compris les questions sociétales et éthiques. Depuis 1990, il est impliqué dans des projets de gestion post-accidentelle aux niveaux national, européen et international, dans le cadre des accidents de Tchernobyl et de Fukushima.



D.R.

Le **Pr Jean-Marc SIMON** est praticien hospitalier, ancien chef du service d'Oncologie Radiothérapie du GH Pitié-Salpêtrière, Professeur Associé à l'Université Sorbonne Université, et expert près de la cour d'appel de Paris. En mars 2007, il a été missionné par le ministre chargé de la Santé pour être mis à disposition du Centre Hospitalier Jean Monnet d'Épinal

(CHJM) pour contribuer au maintien de l'offre de soins en radiothérapie au CHJM, où les praticiens titulaires avaient été suspendus après la découverte de l'accident de surirradiation. Il lui a été également demandé de participer à l'élaboration d'un projet médical permettant de réintégrer ce service dans les objectifs du Plan Cancer.

Enfin, il devait participer à la mission confiée à l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) par le ministre aux fins d'établir la liste exhaustive des patients concernés, de réaliser une estimation précise des doses d'irradiation reçue par chaque patient, de rechercher les séquelles et les complications iatrogènes de la radiothérapie chez tous les patients concernés, et d'organiser leur prise en charge médicale. Au cours de cette mission, outre le premier accident connu à son arrivée qui concernait 23 patients, il a contribué à découvrir quatre autres dysfonctionnements de surirradiation sériels survenus au cours des 20 années précédentes, et qui ont concerné au total plus de 5 500 patients.



D.R.

Sylvie SUPERVIL est ingénieur de l'industrie et des mines, et a acquis plus de 30 ans d'expérience dans le domaine de la sûreté nucléaire et de la radioprotection. Elle a notamment occupé les postes de directrice de gestion de crise, de directrice de la stratégie et d'inspectrice générale à l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN).

Entre 2021 et 2024, elle a occupé le poste de chargée de mission à la direction de la Protection et de la Sécurité de l'État du Secrétariat général de la Défense et de la Sécurité nationale (SGDSN), service du Premier ministre. Elle a rejoint l'IRSN en septembre 2024 comme conseillère auprès du directeur général.



Filip VANHAVERE est ingénieur civil et nucléaire et titulaire d'un doctorat en sciences appliquées de l'Université de Gand en Belgique. Il dirige le groupe Radioprotection Dosimétrie et Calibrage du Centre d'Étude de l'Énergie nucléaire en Belgique.

D.R.

Il est professeur au département d'oncologie de l'Université de Louvain et est actuellement président du groupe d'experts européens d'EURADOS (European Radiation Dosimetry Group).



Olivier VAN HOEY est titulaire d'un Master en physique et astronomie et d'un doctorat en ingénierie physique de l'Université de Gand. Il travaille depuis 2014 dans le groupe Radioprotection Dosimétrie et Calibrage du Centre d'Étude de l'Énergie nucléaire en Belgique.

D.R.

Il mène des recherches principalement dans les domaines de la dosimétrie de neutrons, de la dosimétrie par protonthérapie, de la dosimétrie computationnelle et de la dosimétrie des accidents.



Jean-Philippe VUILLEZ est professeur de biophysique et médecin nucléaire, retraité depuis août 2023. Ayant obtenu son diplôme de docteur en médecine en 1988, il a commencé en 1989 une carrière hospitalo-universitaire de Biophysique et Médecine nucléaire (MN) à la Faculté de Médecine et au CHU de Grenoble. Devenu professeur

D.R.

d'université et praticien hospitalier (PUPH) en 1999, il a été chef de service de MN de 2017 à 2023 au CHU Grenoble Alpes.

Par ailleurs, il a été président de la Société Française de Médecine nucléaire et imagerie moléculaire (SFMN) de 2011 à 2017. Il a également été impliqué dans l'équipe de direction de l'UFR de médecine de Grenoble, devenant Assesseur du Doyen en 2001 puis Vice-Doyen Formation de 2011 à 2017. Il a participé à divers groupes de travail en tant qu'expert à l'AFS-SAPS (devenue ANSM), ainsi qu'à l'ASN où il siège toujours au Groupe Permanent de RadioProtection (GPRP) et du Groupe de Travail sur la RadioProtection des Patients (GTRPP). Il a enfin été membre du Haut Comité de Transparence et d'Information sur le Sureté nucléaire (HCTISN) de 2011 à 2017.