



# RADIATION

## EFFETS ET SOURCES

Qu'est-ce que la radiation?  
Que fait-nous la radiation?  
D'où vient la radiation?

>1 000 mSv

Dose utilisée en radiothérapie

100 mSv

Dose reçue par les astronautes  
(4 mois)

10 mSv

Tomodensitométrie de l'abdomen

1 mSv

Dose reçue par les travailleurs dans  
l'industrie nucléaire (1 an)

0,1 mSv

Radiographie du thorax ou vol  
(20 heures)

0,01 mSv

Radiologie dentaire

0,001 mSv

Noix du Brésil (30 g)





# **RADIATION**

## **EFFETS et SOURCES**

Qu'est-ce que la radiation?  
Que fait-nous la radiation?  
D'où vient la radiation?

Programme des Nations Unies pour l'Environnement

## AVERTISSEMENT

La présente publication est essentiellement basée sur les constatations du Comité scientifique des Nations Unies sur l'étude des effets des rayonnements ionisants, organe subsidiaire de l'Assemblée générale des Nations Unies, et dont le Programme des Nations Unies pour l'Environnement assure le secrétariat. Cette publication ne présente pas nécessairement l'avis du Comité scientifique ou celui du Programme des Nations Unies pour l'Environnement.

Les dénominations employées dans cette publication et la présentation des documents qui y figurent n'impliquent en aucun cas l'expression d'une quelconque opinion de la part du Programme des Nations Unies pour l'Environnement sur le statut légal de tel ou tel pays, territoire, agglomération ou de leurs autorités, ou sur le tracé de leurs frontières ou limites.

La présente publication peut être reproduite en partie à des fins pédagogiques et non lucratives sans autorisation spéciale du détenteur du droit d'auteur, à condition que la source soit mentionnée. Le Programme des Nations Unies pour l'Environnement souhaiterait recevoir un exemplaire de toute publication utilisant ce matériel comme source.

Aucune utilisation de cette publication ne peut être faite pour la revente ou à d'autres fins commerciales sans l'autorisation préalable écrite du Programme des Nations Unies pour l'Environnement.

Le Programme des Nations Unies pour l'Environnement encourage les pratiques écophiles dans le monde entier et au sein de ses propres activités. Cette publication a été imprimée sur un papier 100 % recyclé et sans chlore. La politique en matière de distribution de la PNUE vise à réduire son empreinte carbonique.

Catalogage: Radiation: effets et sources, Programme des Nations Unies pour l'Environnement, 2016

ISBN No: 978-92-807-3597-0

Job No: DEW/2033/NA

Copyright © Programme des Nations Unies pour l'Environnement, 2016

Version électronique



# **RADIATION**

## **EFFETS et SOURCES**

Qu'est-ce que la radiation?  
Que fait-nous la radiation?  
D'où vient la radiation?

Programme des Nations Unies pour l'Environnement

## REMERCIEMENTS

Cette brochure est essentiellement basée sur les constatations du Comité scientifique des Nations Unies sur l'étude des effets des rayonnements ionisants et sur la publication du Programme des Nations Unies pour l'Environnement *Radiation: doses, effects, risks* éditée initialement en 1985 et en 1991 par Geoffrey Lean.

La présente brochure a été d'abord publiée en anglais. La traduction a été aimablement prise en charge par le Centre d'étude de l'énergie nucléaire (Belgique), la Commission canadienne de sûreté nucléaire (Canada), le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (France) et l'Office fédéral de la santé publique (Suisse). En cas de divergences, le texte original prévaudra.

Edition technique: Malcolm Crick et Ferid Shannoun

Edition du texte: Susan Cohen-Unger et Ayhan Evrensel

Conception graphique et mise en page: Alexandra Diesner-Kuepfer

Par ailleurs les personnes suivantes ont fourni une précieuse contribution et des commentaires sur la présente brochure:

Laura Anderson, John Cooper, Susan Cueto-Habersack, Emilie van Deventer, Gillian Hirth, David Kinley, Vladislav Klener, Kristine Leysen, Kateřina Navrátilová-Rovenská, Jaya Mohan, Wolfgang-Ulrich Müller, Maria Pérez, Shin Saigusa, Bertrand Thériault, Hiroshi Yasuda et Anthony Wrixon.

## PREFACE

Hiroshima, Nagasaki, Three Mile Island, Tchernobyl et Fukushima-Daiichi: ces noms sont à présent associés à la peur des radiations ressentie par le public, provenant soit de l'utilisation d'armes nucléaires ou des accidents dans les centrales nucléaires. En réalité, la population est plus exposée quotidiennement à la radiation provenant d'autres sources, y compris l'atmosphère et la terre ainsi que des applications médicales et industrielles.



En 1955, les tests d'armes nucléaires ont suscité au sein du public des préoccupations sur les effets des rayonnements atomiques sur l'air, l'eau et les aliments. En réponse à cette situation, l'Assemblée générale des Nations Unies a mis sur pied le Comité scientifique des Nations Unies sur l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) pour rassembler et évaluer les informations sur les niveaux et les effets de l'exposition aux radiations. Le premier rapport du Comité a établi les bases scientifiques en vue de la négociation du Traité d'interdiction partielle des essais nucléaires de 1963, traité qui interdit les essais nucléaires atmosphériques. Depuis lors, le Comité a poursuivi la rédaction de rapports de haut niveau sur l'exposition aux radiations, incluant celle associée aux accidents dans les centrales nucléaires de Tchernobyl et de Fukushima-Daiichi. Le Comité a fourni systématiquement un travail remarquable aussi bien à l'intention de la communauté scientifique que des décideurs politiques.

La communauté scientifique publie des informations sur les sources et les effets des radiations. Toutefois, ces informations sont généralement techniques et peuvent être difficiles à comprendre pour le grand public. Plutôt que de l'informer, ceci a souvent créé une confusion qui prévaut encore des dizaines d'années après. La présente publication aborde cette problématique en présentant les informations scientifiques les plus récentes de l'UNSCEAR concernant la radiation, ses sources et ses effets sur l'être humain et l'environnement, et en les rendant ainsi accessibles au grand public.

Aujourd'hui, le secrétariat de l'UNSCEAR agit sous les auspices du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) qui apporte une assistance aux pays dans l'implémentation de politiques et de pratiques respectueuses de l'environnement. Participer à une meilleure compréhension du public concernant la radiation et la manière dont elle affecte la vie sur notre planète fait partie de la mission centrale du PNUE.

Je suis très heureux de féliciter tous ceux qui ont contribué à cette publication ainsi que les membres du Comité et de leurs délégations qui ont travaillé si assidument au cours des six dernières décennies sur ces problématiques critiques.

A handwritten signature in black ink, reading "Achim Steiner". The signature is written in a cursive, flowing style.

Achim Steiner  
Directeur exécutif du PNUE et  
Sous-secrétaire Général des Nations Unies

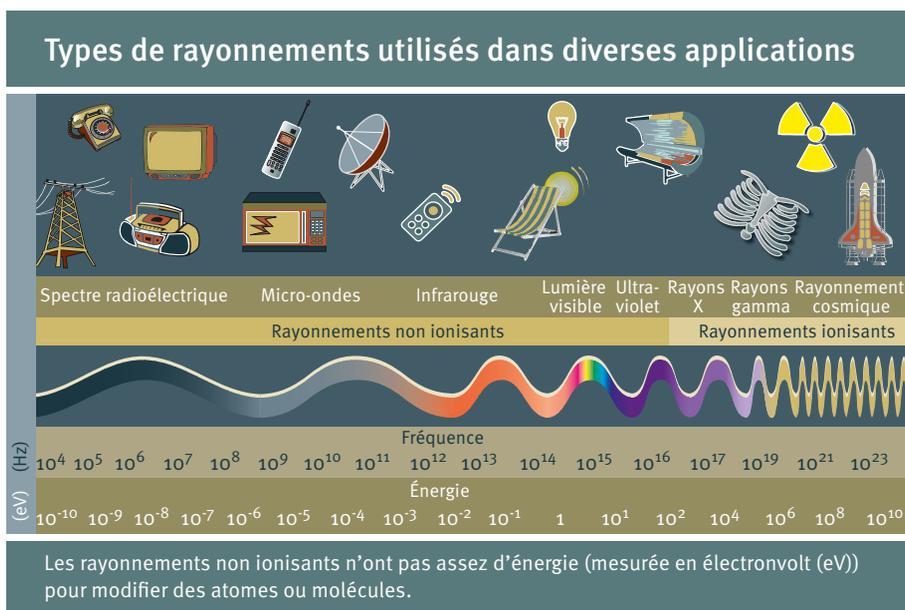
# TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>1. QU'EST-CE QUE LA RADIATION?</b>	<b>3</b>
1.1. Un peu d'histoire	3
1.2. Quelques rudiments	4
Désintégration radioactive et périodes	6
Unités radiologiques	7
1.3. Pouvoir de pénétration de la radiation	9
<b>2. QUE FAIT-NOUS LA RADIATION?</b>	<b>11</b>
2.1. Effets sur l'être humain	13
Effets sanitaires précoces	14
Effets sanitaires retardés	15
Effets sur la descendance	18
2.2. Effets sur les animaux et les plantes	23
2.3. Relation entre les doses et les effets	24
<b>3. D'OU VIENT LA RADIATION?</b>	<b>27</b>
3.1. Sources naturelles	28
Rayonnement cosmique	28
Rayonnement terrestre	29
Sources dans l'alimentation	32
3.2. Sources artificielles	32
Applications médicales	33
Armes nucléaires	37
Réacteurs nucléaires	39
Applications Industrielles et autres utilisations	48
3.3. Exposition moyenne de la population et des travailleurs	54



# INTRODUCTION

Avant de commencer, il nous faut faire une distinction entre rayonnement ionisant et non ionisant. Le *rayonnement ionisant* possède assez d'énergie pour libérer des électrons d'un atome, produisant ainsi un atome chargé, alors que le *rayonnement non ionisant*, tel que les ondes radio, la lumière visible ou l'ultraviolet, ne le peuvent pas. La présente publication concerne les effets de l'exposition aux rayonnements provenant des sources naturelles et artificielles. Dans cette brochure, le terme *rayonnement* ou *radiation* ne se réfère qu'au rayonnement ionisant.



A ce jour, nos connaissances dans le domaine des sources et des effets du rayonnement sont plus complètes que pour la plupart des autres matières dangereuses et la communauté scientifique analyse et actualise constamment ses connaissances. La plupart des personnes sont au courant de l'utilisation des rayonnements dans la production de l'énergie nucléaire et dans les applications médicales. Cependant, beaucoup d'autres utilisations des technologies nucléaires dans l'industrie, l'agriculture, la construction, la recherche et d'autres domaines sont beaucoup moins connues. Il apparaît étonnant à une personne qui s'intéresse pour la première fois à ce sujet que les sources de rayonnement qui conduisent à la plus forte exposition du public ne sont pas nécessairement celles qui attirent le plus l'attention. En réalité, l'exposition la plus importante vient des sources naturelles présentes en continu dans l'environnement et la contribution la plus importante des sources artificielles

est l'utilisation des rayonnements en médecine. En outre, certains facteurs de notre vie de tous les jours, tels que des voyages en avion ou un séjour dans des maisons bien isolées, peut conduire dans certaines parties du monde à une augmentation substantielle de l'exposition aux rayonnements.

La présente publication entend augmenter la sensibilisation et approfondir la compréhension sur les sources, les niveaux et les effets de l'exposition aux rayonnements ionisants, conformément à la mission du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) et du secrétariat du Comité scientifique des Nations Unies sur l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR). Réunissant d'éminents scientifiques de 27 Etats membres des Nations Unies, l'UNSCEAR a été établie par l'Assemblée générale des Nations Unies en 1955 pour évaluer les expositions, les effets et les risques des rayonnements au niveau mondial. Cependant il n'établit ni ne recommande des normes de sécurité. Il apporte des informations scientifiques qui permettent aux autorités nationales et aux autres organismes de le faire. Les évaluations scientifiques établies par l'UNSCEAR au cours des soixante dernières années ont été la principale source d'information à la base de la présente publication.

# 1. QU'EST-CE QUE LA RADIATION?

Afin d'être capable de parler des niveaux, des effets et des risques de l'exposition aux rayonnements, nous devons d'abord aborder les bases de la science des rayonnements. L'activité et la radiation qu'elle produit existaient sur la Terre bien avant l'émergence de la vie. En réalité, elles étaient présentes dans l'espace dès le début de l'univers et les matières radioactives faisaient partie de la terre dès sa formation. Toutefois, l'humanité n'a découvert ce phénomène universel élémentaire que dans les dernières années du dix-neuvième siècle et nous étudions toujours de nouvelles manières de l'utiliser.

## 1.1. Un peu d'histoire

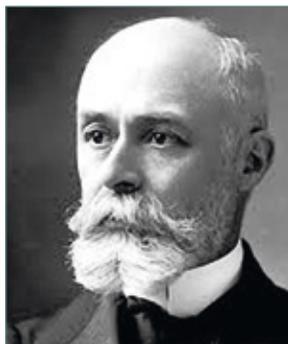
En 1895, **Wilhelm Conrad Roentgen**, physicien allemand, découvre un rayonnement, qu'il nomme rayons X et qui peut être utilisé pour voir à l'intérieur du corps humain. Cette découverte annonce l'utilisation médicale de la radiation, utilisation qui s'est développée sans interruption depuis. Roentgen reçoit le premier prix Nobel de physique en 1901 en reconnaissance des services extraordinaires qu'il a rendus à l'humanité. Une année après la découverte de Roentgen, **Henri Becquerel**, un scientifique français, place des plaques photographiques dans un tiroir avec des fragments d'un minéral contenant de l'uranium. Quand il les développe, il constate à sa grande surprise qu'elles ont été irradiées. Ce phénomène est appelé **radioactivité** ; il intervient quand de l'énergie est émise spontanément par un atome et est mesuré aujourd'hui dans l'unité appelée becquerel (Bq) en hommage à Henri Becquerel. Peu après, une jeune chimiste, **Marie Skłodowska-Curie**, poursuit la recherche et est la première à forger le terme radioactivité. En 1898, elle et son mari **Pierre Curie** découvrent que l'uranium émet des rayonnements en se transformant mystérieusement en d'autres éléments. Ils appellent l'un



Wilhelm C. Roentgen (1845–1923)



Marie Curie (1867–1934)



Henri Becquerel (1852–1908)

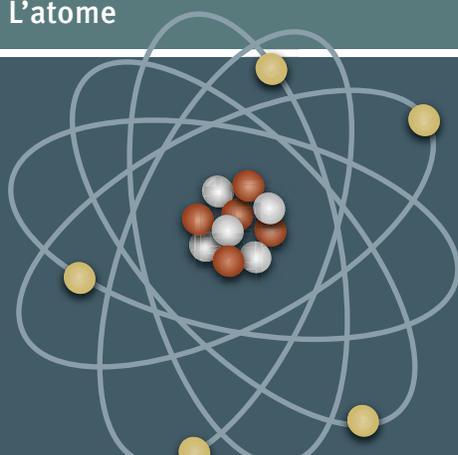
d'entre eux polonium en hommage à la patrie de Marie Curie et un autre radium, l'élément « irradiant ». Marie Curie partage le prix Nobel de physique en 1903 avec Pierre Curie et Henri Becquerel. Elle est la première femme à recevoir le prix Nobel une seconde fois en 1911 pour ses découvertes en chimie des radiations.

## 1.2. Quelques rudiments

La quête des scientifiques était de comprendre l'*atome* et, plus particulièrement, sa structure. Nous savons maintenant que les atomes possèdent un minuscule noyau chargé positivement et entouré d'un nuage d'*électrons* chargés négativement. La taille du noyau est d'environ un cent-millième de celle de l'atome, mais il possède une telle densité qu'il constitue presque la totalité de la masse de l'atome.

Le noyau est généralement constitué d'un amas de particules, des *protons* et des *neutrons*, accrochées très solidement les unes aux autres. Les protons possèdent une charge électrique positive alors que les neutrons n'ont pas de charge. Les éléments chimiques sont caractérisés par le nombre de protons dans leurs atomes (p. ex. l'atome de bore possède 5 protons et celui d'uranium 92). Les éléments possédant le même nombre de protons mais un nombre différent de neutrons sont appelés des *isotopes* (p. ex. la différence entre l'uranium-235 et l'uranium-238 est de trois neutrons dans leurs noyaux). Un atome dans son ensemble n'est normalement ni positivement ni négativement chargé parce qu'il possède le même nombre d'électrons chargés négativement que de protons chargés positivement.

**L'atome**



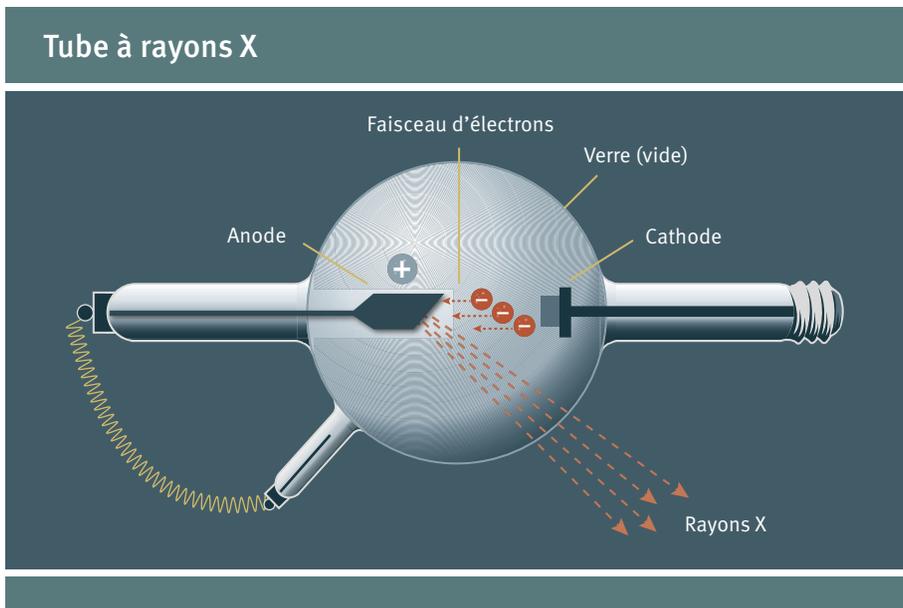
Numéro atomique	5	- nombre d'électrons
Symbole	<b>B</b>	- nombre de protons
Nom	BORE	

● électron ● proton ● neutron

Un atome est constitué d'un noyau de neutrons (sans charge électrique) et de protons chargés positivement entouré d'un nuage d'électrons chargés négativement. Dans un atome de charge électrique neutre, le nombre d'électrons est égal au nombre de protons et représente le numéro atomique de l'élément.

Certains atomes sont naturellement stables alors que d'autres sont instables. Les atomes possédant un noyau instable, qui se transforme spontanément et libère de l'énergie sous forme de rayonnement, sont appelés *radionucléides*. Cette énergie peut interagir avec d'autres atomes et les ioniser. L'*ionisation* est un processus au cours duquel les atomes deviennent positifs ou négatifs en gagnant ou en perdant des électrons. Le rayonnement ionisant transporte assez d'énergie pour expulser des électrons de leur orbite, produisant ainsi des atomes chargés appelés *ions*. L'émission de deux protons et de deux neutrons est nommée une *désintégration alpha* et l'émission d'électrons une *désintégration bêta*. Souvent le nucléide instable sera si énergétique que l'émission de particules ne sera pas suffisante pour le calmer. Il émet alors un vigoureux jaillissement d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques, photons appelés *rayons gamma*.

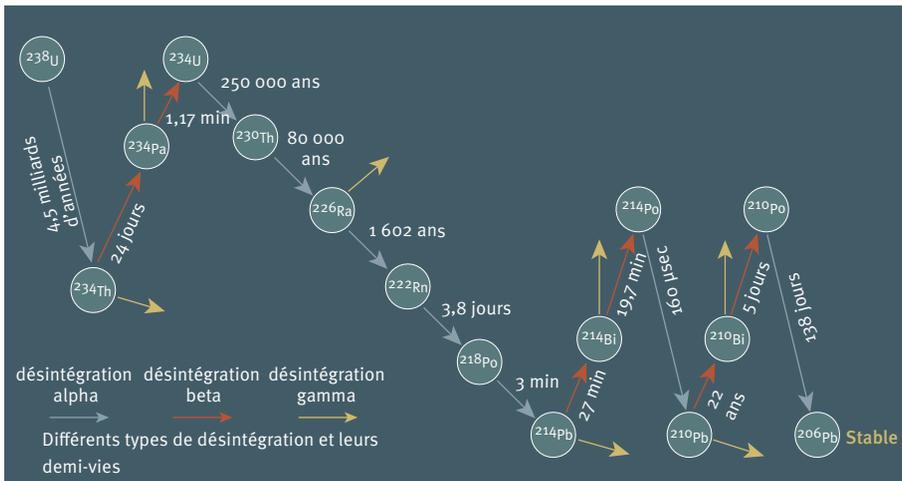
Les *rayons X* sont des rayonnements électromagnétiques comme les rayons gamma, mais ils possèdent une énergie plus faible. Un spectre de rayons X possédant différentes énergies est produit dans un tube de verre sous vide lorsqu'un faisceau d'électrons émis par la *cathode* est envoyé sur un matériau cible appelé *anode*. Le spectre des rayons X dépend du matériau de l'anode et de l'énergie d'accélération du faisceau d'électrons. Ainsi des rayons X peuvent être produits artificiellement à la demande, ce qui est très avantageux dans les applications industrielles et médicales.



## Désintégration radioactive et périodes

Alors que tous les radionucléides sont instables, certains d'entre eux sont plus instables que d'autres. Par exemple, les particules dans le noyau d'un atome d'uranium-238 (comprenant 92 protons et 146 neutrons) sont tout juste capables de s'accrocher les uns aux autres. A un moment donné, un groupe formé de deux protons et de deux neutrons se détache et quitte l'atome sous forme de particule alpha, transformant l'uranium-238 en thorium-234 (comprenant 90 protons et 144 neutrons). Mais le thorium-234 est aussi instable et se transforme par un mécanisme différent. Emettant des électrons de haute énergie en tant que particules bêta et convertissant un neutron en proton, il devient un noyau de protactinium-234 (comprenant 91 protons et 143 neutrons). Celui-ci, à son tour, est extrêmement instable et devient rapidement un noyau d'uranium-234. Ainsi l'atome avance en se débarrassant de particules et en se transformant jusqu'à ce que finalement il termine sur le plomb-206, comprenant 82 protons et 124 neutrons, qui est stable. Il existe de nombreuses séquences de transformation, appelées *désintégrations radioactives*, telles que celle-ci.

### Uranium-238—chaîne de désintégration radioactive



Le laps de temps qu'il faut pour que la moitié de la quantité d'un élément se désintègre est connue sous le nom de *période*. Après une période, sur un million d'atomes en moyenne 500 000 se sont désintégrés en d'autres éléments. Durant la période suivante, environ 250 000 atomes se désintégreront, et ainsi de suite jusqu'à ce que tous se soient désintégrés. Après 10 périodes, il reste environ 1000 atomes du million original, (c'est-à-dire environ 0,1 %). Dans

l'exemple présenté ci-dessus, il faut un peu plus d'une minute pour que la moitié des atomes de protactinium-234 se désintègrent en uranium-234. Par contre, pour l'uranium-238, il faut quatre milliards et demi d'années (4 500 000 000) pour que la moitié des atomes se désintègrent en thorium-234. Cela étant dit, peu de radionucléides apparaissent naturellement dans l'environnement.

## Unités radiologiques

Nous savons aujourd'hui que l'énergie du rayonnement peut endommager le tissu vivant et que la quantité d'énergie déposée dans le tissu s'exprime par la grandeur appelée *dose*. La dose de rayonnement peut provenir de tous les radionucléides, ou d'un certain nombre d'entre eux, qu'ils se trouvent à l'extérieur du corps ou qu'ils l'irradient de l'intérieur, par exemple suite à une inhalation ou une ingestion. Les grandeurs dosimétriques s'expriment de différentes manières selon la fraction du corps irradiée, selon qu'une ou plusieurs personnes sont exposées et selon la durée de l'exposition (p. ex. exposition aiguë).



Harold Gray (1905–1965)  
Rolf Sievert (1896–1966)

La quantité d'énergie provenant du rayonnement absorbée par kilogramme de tissu est appelée la dose absorbée et son unité est appelée le gray (Gy) en hommage au physicien anglais pionnier de la radiobiologie, **Harold Gray**. Cette grandeur ne décrit pas complètement la situation, car la même dose absorbée due à des particules alpha peut produire plus de dommages que celle due aux particules bêta et gamma. Pour comparer les doses absorbées dues à différents types de rayonnement, elles doivent être pondérées par leur capacité à produire certains types de dommages biologiques. Cette dose pondérée est appelée *dose équivalente* et est exprimée en unité appelée sievert (Sv), en hommage au scientifique suédois **Rolf Sievert**. Un sievert correspond à 1 000 millisievert, comme un litre contient 1 000 millilitres et un mètre 1 000 millimètres.

Certaines parties du corps sont plus vulnérables que d'autres. Par exemple une dose équivalente donnée est plus susceptible de causer un cancer du poumon que du foie et l'exposition des organes reproducteurs est particulièrement préoccupante à cause du risque d'effets héréditaires. Ainsi, pour

comparer les doses quand différents tissus et organes sont irradiés, les doses équivalentes délivrées à différentes parties du corps sont aussi pondérées et le résultat est appelé la *dose efficace*, qui s'exprime également en sieverts (Sv). Toutefois la dose efficace est un indicateur de la probabilité de cancer et d'effets génétiques suite à des faibles doses et ne saurait mesurer la sévérité des effets aux hautes doses.

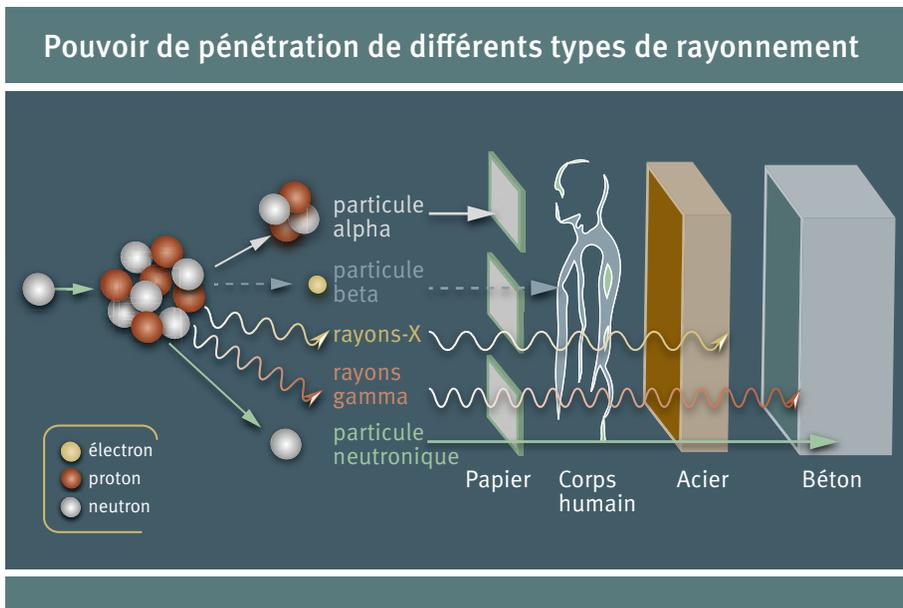
Ce système complexe des grandeurs radiologiques est nécessaire pour constituer une structure cohérente, permettant aux experts en radioprotection d'enregistrer les doses individuelles de manière consistante et permettant la comparaison, ce qui est d'importance majeure pour les personnes travaillant avec des rayonnements et qui sont *professionnellement exposées aux radiations*.

Quantités de rayonnement	
Quantité physique	
Activité	Nombre de transformations nucléaires d'énergie par unité de temps. Elle est mesurée en désintégrations par seconde et s'exprime en becquerels (Bq).
Dose absorbée	Quantité d'énergie déposée par rayonnement en unité de masse de matière, tel qu'un tissu ou un organe. Elle s'exprime en gray (Gy), ce qui correspond à des joules par kilogramme.
Quantité calculée	
Dose équivalente	Dose absorbée multipliée par un facteur de pondération du rayonnement ( $w_R$ ), qui tient compte de la façon dont les divers types de rayonnement causent des dommages biologiques dans les tissus ou organes. Elle s'exprime en sieverts (Sv), ce qui correspond aux joules par kilogramme.
Dose efficace	La dose équivalente multipliée par un facteur de pondération tissulaire ( $w_T$ ), qui tient compte de la radiosensibilité des tissus et des organes. Elle s'exprime en sieverts (Sv), ce qui correspond aux joules par kilogramme.
Dose efficace collective	Somme de toutes les doses efficaces dans une population exposée au rayonnement. Elle s'exprime en homme-sievert (homme Sv).

Ceci ne décrit cependant que les doses individuelles. Si nous additionnons toutes les doses efficaces reçues par chaque individu d'une population, le résultat est appelé la *dose efficace collective* ou simplement la *dose collective* qui s'exprime en hommes-sieverts (homme Sv). Ainsi par exemple la dose annuelle collective de la population mondiale est de plus de 19 millions de homme Sv, correspondant à une dose moyenne par personne de 3 mSv.

### 1.3. Pouvoir de pénétration de la radiation

En bref, le rayonnement peut prendre la forme de particules (comprenant les particules alpha, bêta et les neutrons) ou d'ondes électromagnétiques (rayons X ou gamma), chacune avec différentes énergies. Les différentes énergies d'émission et types de particules présentent des pouvoirs de pénétration différents et ont ainsi des effets différents sur la matière vivante. Le rayonnement alpha, composé de deux protons chargés positivement et de deux neutrons, représente le type de rayonnement le plus chargé. Cette charge importante signifie qu'ils interagissent plus intensément avec les atomes environnants. Cette interaction réduit rapidement l'énergie de la particule et diminue ainsi son pouvoir de pénétration. Les particules alpha peuvent par exemple être arrêtées par une feuille de papier. Les particules bêta, composées d'électrons chargés négativement, portent une charge plus faible et sont ainsi plus pénétrantes que les particules alpha. Elles peuvent traverser un à deux centimètres de tissu vivant. Les rayons gamma et les rayons X sont extrêmement pénétrants et traversent tout ce qui



est moins dense qu'un bloc d'acier épais. Les neutrons produits artificiellement sont émis par un noyau instable issu d'une fission atomique ou d'une fusion nucléaire. Comme les neutrons sont des particules neutres, ils possèdent un haut pouvoir de pénétration lors de leur interaction avec la matière ou le tissu.

## 2. QUE FAIT-NOUS LA RADIATION?

Avant de revenir plus en détails sur les effets d'une exposition aux rayonnements ionisants, il convient de se souvenir des pionniers de la science radiologique, présentés dans le chapitre précédent. Peu après la découverte de la radioactivité, **Henri Becquerel** a lui-même subi les effets les plus néfastes des rayonnements, à savoir les effets sur les tissus vivants. Une fiole de radium qu'il avait mise dans sa poche a endommagé sa peau.

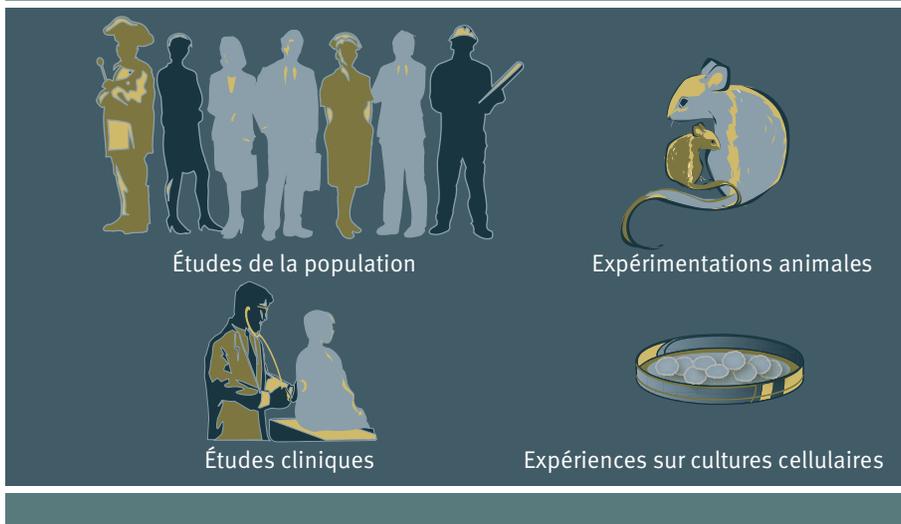
**Wilhelm Conrad Roentgen**, qui avait découvert les rayons X en 1895, est mort d'un cancer de l'intestin en 1923. **Marie Curie**, qui avait aussi été exposée aux rayonnements pendant toute sa vie active, est décédée d'une maladie du sang en 1934.

D'après les chiffres rapportés, au moins 359 des premiers travailleurs exposés aux rayonnements (principalement des médecins et autres scientifiques) sont morts avant la fin des années '50 des suites de leur exposition aux rayonnements ionisants, car ils ignoraient la nécessité de s'en protéger.

Il n'est pas surprenant que les praticiens utilisant les rayonnements pour traiter leurs patients aient été les premiers à formuler des recommandations pour la protection des travailleurs contre les rayonnements. En 1928, le Comité international de protection contre les rayons X et le radium a été créé à l'issue du deuxième Congrès international de radiologie à Stockholm, avec **Rolf Sievert** comme premier président. Après la Seconde Guerre mondiale, le Comité a été restructuré et rebaptisé Commission internationale de protection radiologique pour tenir compte des nouvelles applications des rayonnements en dehors de la médecine. Entre 1958 et 1960, alors que Rolf Sievert était le quatrième président de l'UNSCEAR, émergeait la question des effets génétiques chez l'homme à la suite des essais nucléaires.

Parallèlement à cette prise de conscience grandissante des risques liés à l'exposition aux rayonnements, le 20<sup>e</sup> siècle a également connu un développement grandissant de recherche sur les effets des rayonnements ionisants chez l'homme et sur l'environnement. L'étude la plus importante évaluant les effets des rayonnements sur des populations exposées concerne les 86 500 survivants des bombardements atomiques d'Hiroshima et de Nagasaki survenus en 1945 à la fin de la Seconde Guerre mondiale (que nous appellerons *les survivants des bombardements atomiques*). D'autres données fiables sur ce sujet proviennent de l'observation de patients irradiés et de travailleurs exposés suite à un accident (par exemple l'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl), ainsi que d'expérimentations animales et cellulaires en laboratoire.

## Sources d'information sur les effets des rayonnements



L'UNSCEAR est chargé d'évaluer les données scientifiques relatives aux effets d'une exposition aux rayonnements sur l'homme et l'environnement, et d'établir de la manière la plus fiable possible les effets spécifiques associés aux différents niveaux d'exposition. Comme évoqué précédemment, le niveau d'exposition aux rayonnements ionisants dépend du type de rayonnements, de la durée d'exposition et de la quantité d'énergie reçue par la matière. Pour ses évaluations, l'UNSCEAR utilise actuellement le terme de *dose faible* pour décrire des niveaux entre 10 mGy et 100 mGy et le terme de *dose très faible* pour des niveaux inférieurs à 10 mGy.

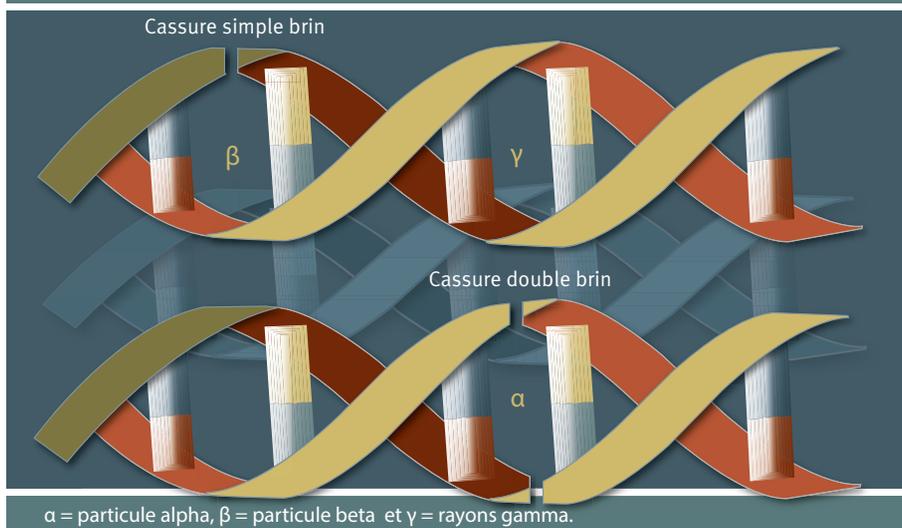
## Dosimétrie utilisée par UNSCEAR

Dose élevée	Supérieure à ~1 Gy	Accidents radiologiques graves (par exemple l'accident de Tchernobyl et ses effets sur les pompiers)
Dose modérée	de ~100 mGy à ~1 Gy	Travailleurs participant aux opérations de relèvement après l'accident de Tchernobyl
Dose faible	de ~10 mGy à ~100mGy	Examens tomodensitométriques multiples
Dose très faible	Inférieure à ~ 10 mGy	Radiographie conventionnelle (c'est à-dire sans tomodensitométrie)

## 2.1. Effets chez l'être humain

Depuis la découverte des rayonnements, plus d'un siècle de recherche a permis de recueillir des informations détaillées sur les mécanismes biologiques par lesquels les rayonnements peuvent affecter la santé. Il est établi que les rayonnements peuvent produire des effets au niveau des cellules, entraînant leur mort ou leur modification en raison de lésions directes sur les brins d'acide désoxyribonucléique (ADN) d'un chromosome. Si le nombre de cellules endommagées voire mortes est important, cela peut perturber le fonctionnement d'un organe ou même la mort. L'ADN peut également être endommagé sans nécessairement provoquer la mort de la cellule. Généralement, ces lésions sont complètement réparées mais dans le cas contraire, la modification occasionnée, appelée *mutation cellulaire*, sera transmise au cours des divisions cellulaires successives avec le risque de causer un cancer à terme. Si les cellules mutées sont celles qui transmettent les informations héréditaires, des anomalies génétiques pourraient apparaître dans la descendance. Les données concernant les mécanismes biologiques et les effets héréditaires sont souvent obtenues à partir d'expériences menées en laboratoire.

### Lésions radio-induites au niveau du brin d'ADN



Sur base de leur délai d'apparition, les effets d'une exposition aux rayonnements sur la santé sont définis comme effets à court terme ou à long terme. De manière générale, les effets à court terme sont mis en évidence par le diagnostic de syndromes cliniques observés chez les individus exposés, tandis que les effets à long terme (comme le cancer) sont révélés par des *études épidémiologiques* montrant une augmentation de la fréquence d'apparition d'une pathologie au sein d'une population. Il faut également porter une attention particulière aux effets chez l'enfant et l'embryon/fœtus et aux effets héréditaires.

## Effets sur la santé à court terme

Les effets sur la santé à court terme sont causés par l'accumulation de nombreuses lésions cellulaires ou par la mort des cellules. Ils incluent entre autres les brûlures cutanées, la chute des cheveux et l'altération de la fertilité. Ces effets se caractérisent par l'existence d'un seuil de dose relativement élevé qui doit être dépassé sur une courte période avant que l'effet ne se produise. Au-delà de ce seuil, la gravité de l'effet croît en fonction de l'augmentation de la dose.

En général, des doses aiguës supérieures à 50 Gy endommagent le système nerveux central de manière si délétère que la mort survient généralement dans les jours qui suivent. Même à des doses inférieures à 8 Gy, les personnes présentent des symptômes de maladie attribuable aux rayonnements ou *syndrome d'irradiation aiguë*, qui peut se manifester par des nausées, des vomissements, des diarrhées, des crampes intestinales, une salivation excessive, une déshydratation, de la fatigue, de l'apathie, de la lassitude, des sueurs, de la fièvre, des maux de tête et une baisse de la pression artérielle. Le terme « aigu » se rapporte à des problèmes médicaux survenant précocement après l'exposition, contrairement à ceux qui se développent après une période prolongée. Les victimes peuvent cependant survivre avant de succomber une ou deux semaines plus tard des suites de lésions gastro-intestinales. Des doses plus faibles ne peuvent pas occasionner des lésions gastro-intestinales, mais entraîner la mort quelques mois après, essentiellement à cause des dommages à la moelle osseuse. Des doses encore plus faibles retardent l'apparition de la maladie et

### Exposition accidentelle en médecine

La radiothérapie implique l'administration de doses élevées aux patients. Par conséquent, la prévention des effets aigus est une priorité.



produisent des symptômes moins graves. Environ la moitié des personnes ayant reçu des doses de 2 Gy souffrent de vomissements au bout de trois heures, mais cela reste rare pour des doses inférieures à 1 Gy.

Heureusement, la moelle osseuse et le reste du système hématopoïétique ont une grande capacité naturelle à se régénérer. S'ils reçoivent moins de 1 Gy, ils peuvent donc guérir complètement. Cependant, on ne peut exclure un risque accru de développer une leucémie dans les années qui suivent. Si seule une partie du corps est irradiée, il restera normalement suffisamment de moelle osseuse saine pour recoloniser les zones endommagées. Les expérimentations animales suggèrent que même si seulement 10 % de la moelle osseuse active échappe à l'irradiation, les chances de survie sont proches de 100 %.

Le fait que les rayonnements ionisants peuvent endommager directement l'ADN des cellules est appliqué en médecine pour détruire intentionnellement les cellules malignes dans le traitement des cancers. Ce traitement à base des radiations s'appelle la *radiothérapie*. La dose reçue en radiothérapie varie selon le type et le stade d'évolution du cancer à traiter. Dans le cas de tumeurs solides, les doses typiques sont comprises entre 20 et 80 Gy, ce qui entraînerait un danger pour le patient si cette quantité était reçue en une seule dose. C'est pourquoi les doses sont appliquées par fractions successives de 2 Gy maximum. Ce fractionnement permet aux cellules des tissus sains de récupérer, alors que les cellules cancéreuses sont détruites car elles sont généralement moins aptes à s'auto-réparer après leur exposition aux rayonnements.

## Effets sur la santé à long terme

Les effets à long terme surviennent longtemps après l'exposition. En général, la plupart des effets à long terme sont également des effets stochastiques, pour lesquels la probabilité d'apparition dépend de la dose reçue. Ces effets seraient attribuables aux modifications du matériel génétique d'une cellule suite à une exposition aux rayonnements. Parmi les effets à long terme, on peut citer les tumeurs solides et la leucémie qui se déclarent chez les personnes exposées, ainsi que les anomalies génétiques dont souffrent les enfants de personnes ayant été exposées aux rayonnements. La fréquence d'apparition (et non pas la gravité) de ces effets dans une population augmente selon la dose reçue.

Les études épidémiologiques sont essentielles pour comprendre l'occurrence des effets à long terme suite à une exposition aux rayonnements. De telles études sont basées sur des méthodes statistiques visant à comparer l'apparition d'un effet sur la santé (le cancer par exemple) au sein d'une population exposée par rapport à une population non exposée. Si on observe une augmentation

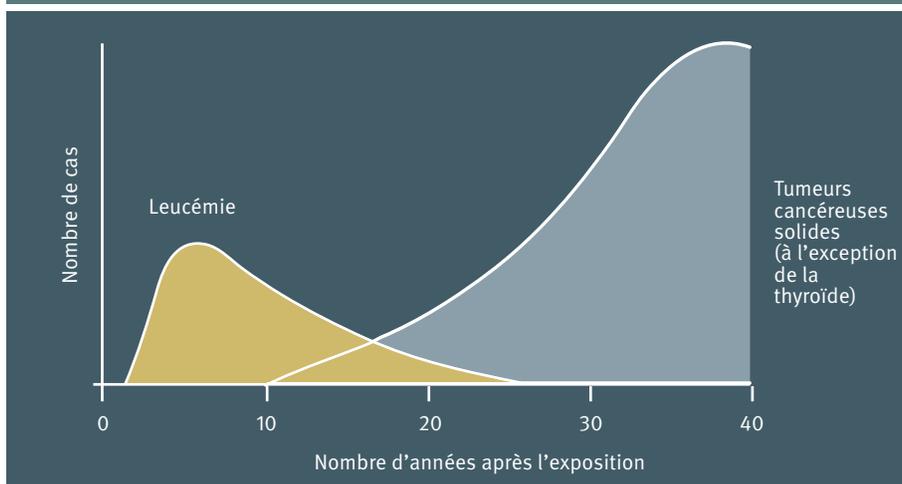
significative de l'effet au sein de la population exposée, cela indique un lien probable avec l'exposition aux rayonnements ionisants.

L'évaluation la plus importante sur le long terme de populations exposées aux rayonnements ionisants est l'étude épidémiologique des survivants des bombardements atomiques. Il s'agit de l'étude la plus complète jamais réalisée en raison du grand nombre de personnes, représentatives de la population en général, ayant reçu des doses d'intensité variable et réparties uniformément au sein de l'organisme. Les estimations des doses de rayonnement reçues par ce groupe sont également assez bien connues. Jusqu'à présent, l'étude a révélé quelques centaines de cas de cancer de plus par rapport au même groupe non exposé aux rayonnements. Bon nombre des survivants des bombardements atomiques étant encore en vie, les études se poursuivent afin d'en compléter l'évaluation.

### Cancer

Le cancer est responsable d'environ 20 % de tous les décès et représente la deuxième cause de mortalité (derrière les maladies cardiovasculaires) dans les pays industrialisés. Environ 40 % des personnes de la population générale seront atteintes d'un cancer à un moment de leur vie, même en l'absence d'exposition aux rayonnements ionisants. Au cours de ces dernières années, les cancers les plus répandus chez les hommes sont le cancer du poumon, de la prostate, le cancer colorectal, le cancer de l'estomac et du foie ; chez les femmes, il s'agit du cancer du sein, du cancer colorectal, du cancer du poumon, du col de l'utérus et de l'estomac.

### Apparition d'un cancer après une exposition aux rayonnements



Le développement du cancer est un processus complexe comprenant différents stades d'évolution. Un phénomène initiateur, affectant très probablement une seule cellule, amorce le processus, mais il faut qu'il soit suivi d'autres événements pour que la cellule devienne maligne et que la tumeur grossisse. Le cancer ne se manifeste que longtemps après le dommage initial, après un temps de latence. La probabilité qu'un cancer apparaisse suite à une exposition aux rayonnements ionisants est une préoccupation majeure et peut être calculée pour un groupe donné si ce dernier était exposé à une dose de rayonnement suffisamment élevée pour entraîner une augmentation de l'apparition du cancer tout en tenant compte notamment des incertitudes statistiques. Le vrai rôle causal que jouent les rayonnements ionisants dans l'apparition d'un cancer reste néanmoins à approfondir.

La leucémie, le cancer de la thyroïde et le cancer des os se déclarent quelques années après l'exposition aux rayonnements, tandis que la plupart des autres cancers n'apparaissent qu'au-delà de 10 ans après l'exposition. Cependant, étant donné qu'il n'existe pas qu'un seul type de cancer qui soit exclusivement causé par l'exposition aux rayonnements ionisants, il est impossible de distinguer une tumeur radio-induite d'autres tumeurs résultant de nombreuses autres causes. Il est néanmoins important d'estimer la probabilité d'apparition du cancer après certaines doses de rayonnement afin de fournir une base scientifique solide permettant de déterminer les limites d'exposition.

Les études portant sur les personnes ayant reçu des doses de rayonnement à titre thérapeutique, les personnes exposées dans le cadre de leur travail et surtout les survivants des bombardements atomiques constituent la base des connaissances en matière de relation entre cancer et exposition aux rayonnements. Ces études couvrent un large échantillon de personnes ayant reçu des doses de rayonnement sur plusieurs parties du corps et qui ont été suivies sur une période raisonnablement longue. Mais certaines études présentent des inconvénients majeurs, principalement une distribution des classes d'âges différente de celle de la population générale ainsi que bon nombre de ces patients étaient déjà malades au moment de l'exposition aux rayonnements et déjà traités pour leur cancer.

Plus important encore, la quasi-totalité des données sont basées sur l'étude de personnes dont les tissus ont reçu des doses de rayonnement relativement élevées, de 1 gray ou plus, soit en une seule dose ou sur des périodes relativement courtes. Il existe peu d'information sur les effets de faibles doses après une exposition étalée sur une longue période de temps. Notons plusieurs études menées sur les effets d'une exposition dans une gamme de doses normalement reçues par les personnes travaillant en présence de rayonnements ionisants.

Mais il n'existe quasiment aucune information directe sur les conséquences de l'exposition à laquelle le grand public est régulièrement soumis. Il faudrait que des études suivent un grand nombre de personnes sur une longue période mais cela pourrait se révéler encore insuffisant pour observer une augmentation de l'apparition de cancer par rapport aux taux de référence des cancers.

Après avoir mené des études complètes sur l'apparition de cancers chez les populations exposées aux rayonnements ionisants, l'UNSCEAR estime que le risque de décéder d'un cancer suite à une exposition à une dose de rayonnement supérieure à 100 mSv est d'environ 3 à 5 % par sievert.

### *Autres effets sur la santé*

De fortes doses de rayonnements ionisants reçues au niveau cardiaque augmentent la probabilité de maladies cardiovasculaires (crises cardiaques par exemple). Une telle exposition risque de se produire pendant les séances de radiothérapie, bien que les techniques d'aujourd'hui réduisent les doses reçues au niveau cardiaque. Il n'existe cependant aucune preuve scientifique suffisante pour conclure que l'exposition aux faibles doses de rayonnement entraîne des maladies cardiovasculaires.

L'UNSCEAR a reconnu qu'il y avait une augmentation des cas de cataractes chez les membres des équipes d'intervention de Tchernobyl, probablement liée à de fortes doses de rayonnement reçues au niveau du cristallin. L'UNSCEAR a également étudié les effets des rayonnements ionisants sur le système immunitaire chez les survivants des bombardements atomiques, chez les membres des équipes d'intervention à la centrale de Tchernobyl et chez les patients traités par radiothérapie. On évalue les effets des rayonnements sur le système immunitaire en estimant les variations du nombre de cellules ou en utilisant diverses analyses biologiques. De fortes doses de rayonnement inhibent le système immunitaire principalement à cause des dommages provoqués sur les lymphocytes. Leur réduction constitue un indicateur précoce pour déterminer la dose de rayonnement après une exposition aiguë.

### **Effets sur la descendance**

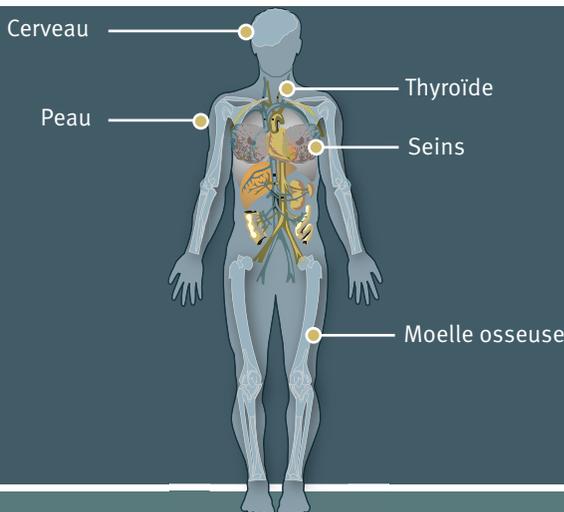
Si les cellules reproductrices, le sperme ou les ovules sont endommagés par le rayonnement, cela peut causer des effets génétiques héréditaires chez les descendants. Les rayonnements ionisants peuvent aussi atteindre directement un embryon ou un fœtus en cours de développement dans l'utérus de leur mère. Il est important de faire la distinction entre l'exposition aux rayonnements ionisants chez les adultes, chez les enfants et chez les embryons/fœtus. L'UNSCEAR a mené des études complètes sur les effets sur la santé dans chacun de ces groupes, y compris sur les effets héréditaires.

## Effets sur les enfants

Les effets sur les êtres humains dépendent de plusieurs facteurs physiques. En raison de leurs différences anatomiques et physiologiques, les effets de l'exposition aux rayonnements chez les adultes et les enfants diffèrent. Étant donné que le corps des enfants est plus petit et qu'ils sont donc moins protégés par les tissus environnants, la dose reçue par leurs organes internes sera supérieure à celle d'un adulte pour une même exposition externe. Les enfants étant également de plus petite taille que les adultes, ils risquent de recevoir des doses plus élevées provenant de radionucléides déposés au sol.

En ce qui concerne l'exposition interne chez les enfants, en raison de leur plus petite taille et du fait que leurs organes sont plus rapprochés les uns des autres, les radionucléides concentrés dans un organe risquent d'irradier un plus grand nombre d'autres organes que chez l'adulte. De nombreux autres facteurs liés à l'âge et relatifs au métabolisme et à la physiologie font également une différence sensible dans les doses reçues à des âges différents. Plusieurs radionucléides sont particulièrement préoccupants quand il s'agit de l'exposition interne chez les enfants. Les rejets accidentels d'iode  $^{131}$  radioactif constituent des sources potentielles d'exposition importante pour la thyroïde. Pour une même exposition, la dose reçue par la thyroïde d'un enfant en bas âge est environ neuf fois supérieure à celle reçue par un adulte. Après l'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl, des études ont confirmé le lien entre le cancer de la thyroïde et l'iode  $^{131}$  qui se concentre principalement dans cet organe.

### Organes particulièrement radiosensibles chez les enfants



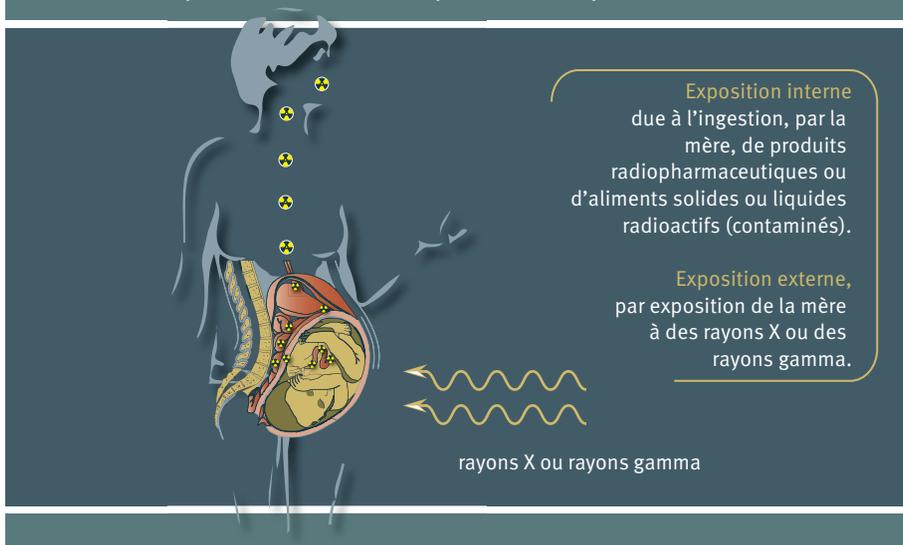
Les enfants exposés aux rayonnements avant l'âge de 20 ans risquent deux fois plus de développer un **cancer du cerveau** que les adultes exposés à la même dose. Un risque similaire a été observé pour le **cancer du sein** lorsque les filles ont été exposées avant l'âge de 20 ans.

Des études épidémiologiques ont montré que les jeunes de moins de 20 ans présentent un risque deux fois plus grand de développer une leucémie que les adultes soumis à la même exposition. Les enfants de moins de 10 ans y sont particulièrement sensibles ; certaines études suggèrent qu'ils présentent un risque trois à quatre fois plus élevé de mourir d'une leucémie que les adultes. D'autres études ont également montré que les filles exposées de moins de 20 ans risquent deux fois plus de développer un cancer du sein que les femmes adultes. Les enfants sont plus susceptibles que les adultes d'être atteints d'un cancer après une exposition aux rayonnements ionisants, mais ce dernier peut se déclarer plus tard, à un âge où il est normal de voir apparaître un cancer.

L'UNSCEAR a examiné des données scientifiques indiquant que l'apparition d'un cancer chez les enfants varie davantage que chez les adultes en fonction du type de tumeur, ainsi que de l'âge et du sexe de l'enfant. Le terme de *radio-sensibilité*, quand on parle de l'induction du cancer, se rapporte au taux de tumeurs causées par les rayonnements ionisants. Des études portant sur les différences de radiosensibilité entre les adultes et les enfants ont conclu que ces derniers sont plus sensibles au développement de cancers de la thyroïde, du cerveau, de la peau, du sein et de la leucémie.

Les différences des effets à court terme sur les enfants ayant reçu de fortes doses (comme celles reçues en radiothérapie) sont complexes et peuvent s'expliquer par l'interaction des différents tissus et les mécanismes biologiques.

## Voies d'exposition des embryons aux rayonnements



Si l'exposition a eu lieu pendant l'enfance, certains effets sont plus évidents qu'à l'âge adulte (par exemple les anomalies du cerveau, cataractes et nodules thyroïdiens) ; il existe aussi quelques effets pour lesquels les tissus d'un enfant sont plus résistants (poumons et ovaires par exemple).

### *Effets sur l'enfant à naître*

Un embryon ou un fœtus peut être exposé à des substances radioactives transférées par la mère à travers les aliments et la boisson (exposition interne) ou directement soumis à une exposition externe. Puisque le fœtus est protégé par l'utérus, la dose de rayonnement reçue tend à être inférieure à la dose reçue par la mère dans la plupart des cas d'exposition aux rayonnements ionisants. Cependant, l'embryon et le fœtus sont particulièrement sensibles aux rayonnements ionisants et les conséquences sur leur santé peuvent être graves, même à des doses de rayonnement inférieures à celles affectant directement la mère. Ces conséquences incluent notamment un retard de croissance, des malformations, des anomalies du fonctionnement cérébral et le cancer.

Le développement intra-utérin des mammifères peut se décomposer en trois grands stades. Il est reconnu que les rayonnements sont capables de tuer un embryon dans l'utérus au cours du premier stade, qui dure de la conception jusqu'au moment où l'embryon se fixe à la paroi utérine, et qui correspond aux deux premières semaines de grossesse chez les humains. Il est très difficile d'étudier ce qui se passe à ce stade ; les données provenant essentiellement d'expérimentations animales confirment néanmoins l'effet mortel sur l'embryon exposé au premier stade de son développement à des doses de rayonnement dépassant certains seuils.

Pendant le stade suivant, entre la deuxième et la huitième semaine chez les humains, le danger principal réside dans le fait que les rayonnements vont entraîner des malformations d'organes pendant leur croissance, voire la mort au moment de la naissance. Les expérimentations animales ont prouvé que des organes (comme les yeux, le cerveau et le squelette) sont particulièrement sujets aux malformations s'ils sont irradiés au moment précis de leur développement.

Après la huitième semaine, c'est-à-dire au début du troisième et dernier stade de la grossesse, l'atteinte la plus grave semble survenir au niveau du système nerveux central. De grands progrès ont été accomplis dans la compréhension des effets de l'exposition aux rayonnements ionisants sur le cerveau des enfants avant la naissance. Prenons comme exemple les enfants des survivants des bombardements atomiques, 30 sur 1 600 des enfants ayant été exposés avant la naissance à une dose de 1 Gy ont souffert de déficiences intellectuelles graves.

Il y a eu une polémique sur le lien entre l'exposition aux rayonnements ionisants au stade embryonnaire et l'apparition d'un cancer plus tard dans la vie. Les expérimentations animales n'ont pas permis de démontrer ce lien de manière formelle. L'UNSCEAR a voulu estimer le risque encouru par les enfants à naître d'être affectés par des effets de l'irradiation, tels que la mort, les malformations, les déficiences intellectuelles et le cancer. Il a conclu que moins de 2 ‰ des enfants nés vivants ayant été exposés à une dose de 0,01 Gy pendant la grossesse risquent d'être affectés, comparé aux 6 ‰ qui souffriront naturellement des mêmes conséquences.

### *Effets héréditaires*

Les rayonnements sont susceptibles de modifier les cellules chargées de transmettre les informations génétiques aux descendants et risquent ainsi de causer des anomalies génétiques. L'étude de ces anomalies est rendue difficile par le manque d'information sur le type d'anomalies génétiques dont souffrent les êtres humains après une exposition aux rayonnements. En effet, d'une part, il faut attendre plusieurs générations avant de pouvoir faire le compte total d'effets héréditaires déclarés, et d'autre part, il serait impossible de distinguer ces effets de ceux liés à d'autres causes, comme c'est le cas avec le cancer.

De nombreux embryons et fœtus gravement affectés ne survivent pas. Selon les estimations, la moitié des fausses couches sont dues à des anomalies génétiques. Même s'ils survivent à la naissance, les bébés atteints d'anomalies génétiques présentent cinq fois plus de risques de décéder avant l'âge de 5 ans que les enfants normaux.

Les effets héréditaires entrent dans deux grandes catégories : les aberrations chromosomiques affectant le nombre ou la structure des chromosomes et les mutations des gènes eux-mêmes. Ils peuvent apparaître dans les générations suivantes, mais ce ne sera pas toujours le cas.

Les études sur les enfants dont les parents ont survécu aux bombardements atomiques n'ont pas permis de faire ressortir d'effets héréditaires observables. Ceci ne signifie pas qu'aucun dommage n'a été occasionné, mais simplement qu'une exposition modérée aux rayonnements sur un groupe de population relativement important n'a pas eu d'incidence observable. Des études expérimentales sur des plantes et des animaux exposés à de fortes doses de rayonnement ont pourtant clairement démontré que les rayonnements peuvent avoir des effets héréditaires. Il y a de grandes chances que cela s'applique également aux êtres humains.

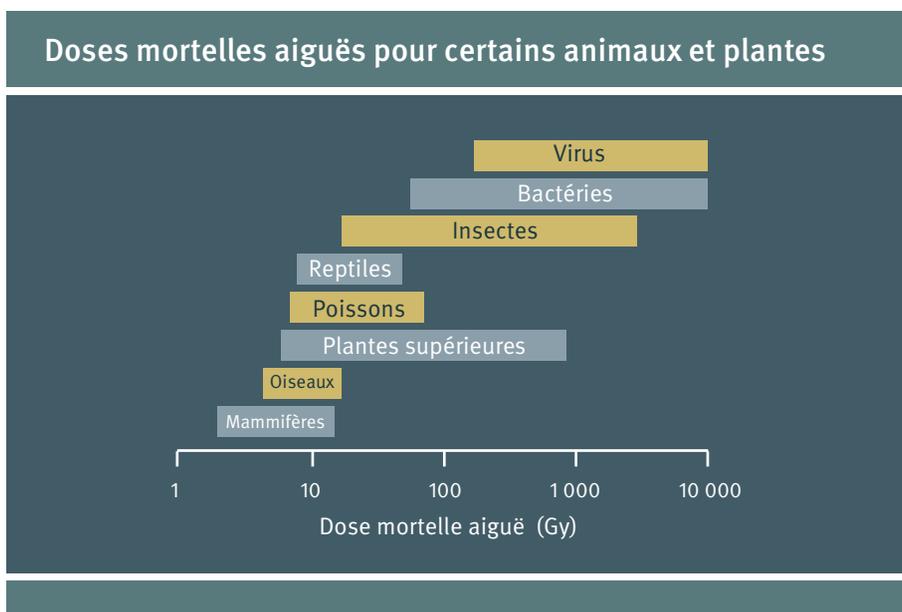
L'UNSCEAR s'est concentré uniquement sur les effets héréditaires graves et a estimé le risque total à environ 0,3 à 0,5 ‰ par gray (ce qui correspond à moins

de 10 % de la probabilité d'apparition d'un cancer mortel) pour la première génération qui suit l'exposition aux rayonnements.

## 2.2. Effets sur les animaux et les plantes

On accorde aujourd'hui plus d'attention qu'auparavant aux effets de l'exposition aux rayonnements ionisants sur les animaux et les plantes. Au cours des dernières décennies, on s'accordait à dire que si la vie humaine était correctement protégée, il en allait de même pour les plantes et les animaux. L'UNSCEAR a évalué les effets de l'exposition aux rayonnements ionisants sur les plantes et les animaux, et les études ont révélé qu'une dose théorique comprise entre 1 et 10 Gy ne devrait pas causer d'effets sur les populations animales et végétales, et que les réponses individuelles à une exposition aux rayonnements variaient (les mammifères étant les plus sensibles de tous les animaux). Les effets supposés être significatifs au niveau de la population concernent la fertilité, la mortalité et l'induction de mutations. Les *modifications au niveau de la reproduction*, comme le nombre de descendants, constituent un indicateur plus sensible des effets des rayonnements que la mortalité.

Les *doses mortelles* correspondent à des doses à partir desquelles 50 % des sujets exposés meurent. Pour les plantes exposées pendant un temps relativement court (*aigu*), les doses concernées commencent en dessous de 10 Gy et vont jusqu'à 1 000 Gy. En général, les grandes plantes sont plus radiosensibles que les petites. Les doses mortelles sont comprises entre 6 et 10 Gy pour



les petits mammifères et environ 2,5 Gy pour les plus gros. Certains insectes, bactéries et virus sont capables de tolérer des doses pouvant dépasser 1 000 Gy.

Une source principale de données a été l'observation des animaux et plantes exposés aux rayonnements ionisants aux alentours de la centrale nucléaire de Tchernobyl. L'UNSCEAR a étudié les voies par lesquelles l'environnement avait été exposé et a mis au point de nouvelles approches pour évaluer les effets potentiels d'une telle exposition.

L'UNSCEAR a récemment estimé les doses et les effets associés à une exposition aux rayonnements ionisants sur un éventail d'animaux et de plantes après l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima-Daiichi, et en a conclu que les expositions étaient, de manière générale, trop faibles pour permettre l'observation d'effets aigus. Cependant, les modifications au niveau des *biomarqueurs*, indicateurs d'une maladie particulière ou de l'état physiologique d'un organisme (en particulier chez les mammifères) ne pouvaient être exclus, mais leur signification pour l'intégrité de la population de ces organismes est demeurée incertaine.

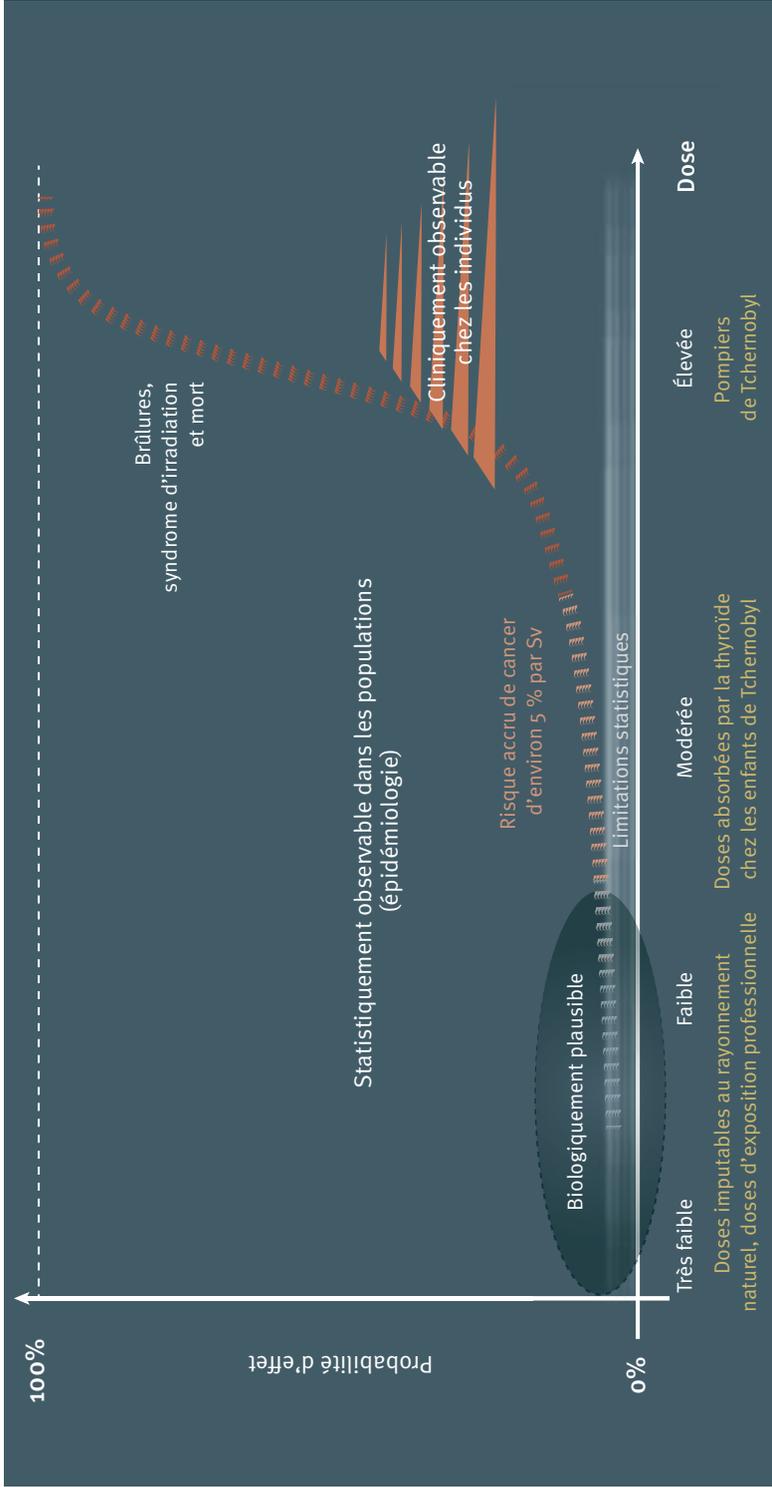
Il est important de noter que les mesures de protection et de correction prises pour réduire l'exposition de l'homme aux rayonnements ionisants peuvent avoir un impact beaucoup plus large. Par exemple, ces mesures peuvent affecter les biens et services environnementaux, les ressources utilisées dans l'agriculture, la sylviculture, la pêche et le tourisme, ainsi que les commodités utilisées dans le cadre d'activités spirituelles, culturelles et de loisirs.

### 2.3. Relation entre la dose de rayonnement et les effets

En résumant la relation entre la dose de rayonnement et les effets sur la santé, l'UNSCEAR a souligné l'importance de la distinction entre les observations d'effets existants sur la santé des populations exposées et les prévisions théoriques des effets éventuels à venir. Dans les deux cas, il est important de tenir compte des incertitudes et des inexactitudes dans les mesures de rayonnement, les considérations statistiques ou autres facteurs.

Dans l'état actuel des connaissances, les effets observés sur la santé ne peuvent être attribués avec certitude à l'exposition aux rayonnements que si les effets précoces (tels que les brûlures cutanées) qui surviennent habituellement chez des individus ayant reçu de fortes doses supérieures à 1 Gy sont effectivement constatés. De telles doses sont possibles lors d'accidents radiologiques, comme celles reçues par les équipes d'intervention à la centrale de Tchernobyl ou par des patients suite à des accidents de radiothérapie.

## Rapport entre les doses de rayonnement et les effets sur la santé



Certaines méthodes épidémiologiques permettent d'attribuer l'augmentation de la fréquence d'effets à long terme (comme le cancer) chez une population exposée à des doses de rayonnement modérées à condition que cette augmentation observée soit suffisamment élevée pour en annuler les incertitudes. Il n'existe cependant aucun biomarqueur permettant de différencier un cancer causé par une exposition aux rayonnements ionisants d'un cancer induit par d'autres facteurs.

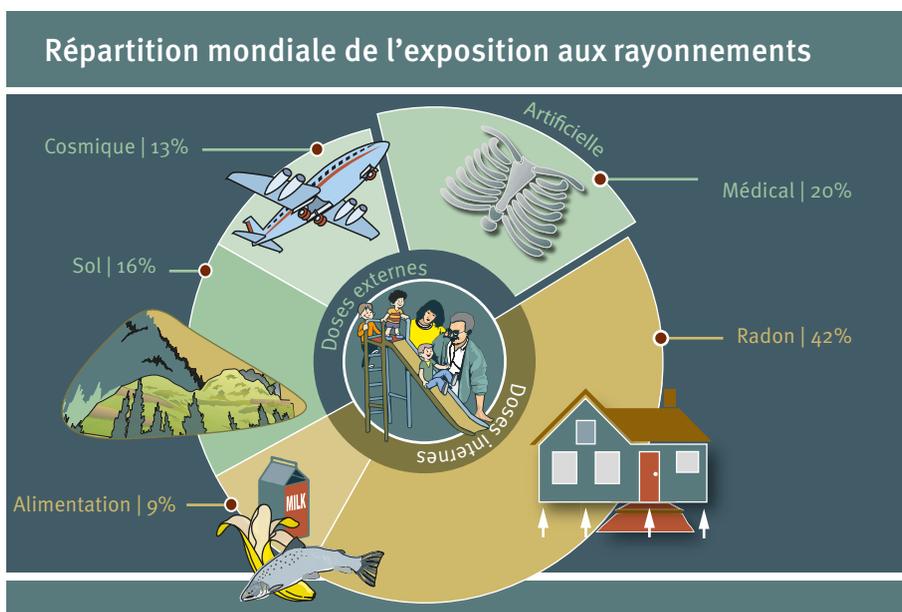
Dans le cas de faibles, voire de très faibles doses de rayonnements — comme c'est le plus souvent le cas lors d'une exposition environnementale et professionnelle —, aucune confirmation quant à une variation dans les risques sanitaires à long terme n'a pu être apportée, compte tenu des incertitudes statistiques et autres. Cependant, de tels effets ne peuvent être écartés.

Quant aux effets potentiels à venir, on sait comment estimer la probabilité d'apparition de ces effets pour des doses élevées et modérées. Mais pour les doses faibles voire très faibles, il est nécessaire de formuler des hypothèses et de recourir à des modèles mathématiques pour estimer la probabilité d'apparition d'effets sur la santé, ce qui donne des valeurs très incertaines. Par conséquent, l'UNSCEAR a décidé, pour les doses de rayonnement faibles et très faibles, de ne pas recourir à de tels modèles pour prévoir le nombre d'effets sanitaires et de décès, suite par exemple aux accidents de Tchernobyl et Fukushima-Daiichi, en raison des incertitudes trop importantes inhérentes à ces évaluations. Ces calculs peuvent néanmoins être utiles dans le cadre de comparaisons dans le domaine de la santé publique ou de définition des mesures de protection contre les rayonnements ionisants, à condition de tenir compte des incertitudes et de bien expliquer les limites.

### 3. D'OU VIENT LA RADIATION?

Nous sommes constamment exposés aux rayonnements provenant de sources différentes. Toutes les espèces vivantes sur la Terre ont existé et évolué dans des environnements où elles ont été exposées à des rayonnements issus du milieu naturel. Plus récemment, les hommes et autres organismes ont été exposés à des sources artificielles développées durant le siècle dernier. Plus de 80 % de notre exposition provient de sources naturelles et seulement 20 % de sources artificielles, principalement d'applications médicales utilisant les rayonnements ionisants. Dans la présente publication qui met l'accent sur le rayonnement reçu par le grand public, l'exposition aux rayonnements ionisants est classée selon sa source. Pour satisfaire aux prescriptions réglementaires (concernant par exemple la radioprotection), l'exposition aux rayonnements ionisants est abordée pour différents groupes. Des informations complémentaires sont fournies ici sur les patients exposés dans le cadre médical et sur les personnes exposées au travail.

Il est également possible de classer l'exposition aux rayonnements selon le mode d'irradiation. Les substances radioactives et les rayonnements issus de l'environnement peuvent irradier notre corps de l'extérieur : c'est ce qu'on appelle une exposition *externe*. Nous pouvons également inhaler ces substances présentes dans l'air, les avaler par l'intermédiaire de l'eau ou de la nourriture, ou encore les absorber par la peau et les plaies, pour nous irradier de l'intérieur : il s'agit d'une exposition *interne*. On considère globalement que les doses provenant d'une exposition interne et externe sont quasiment identiques.

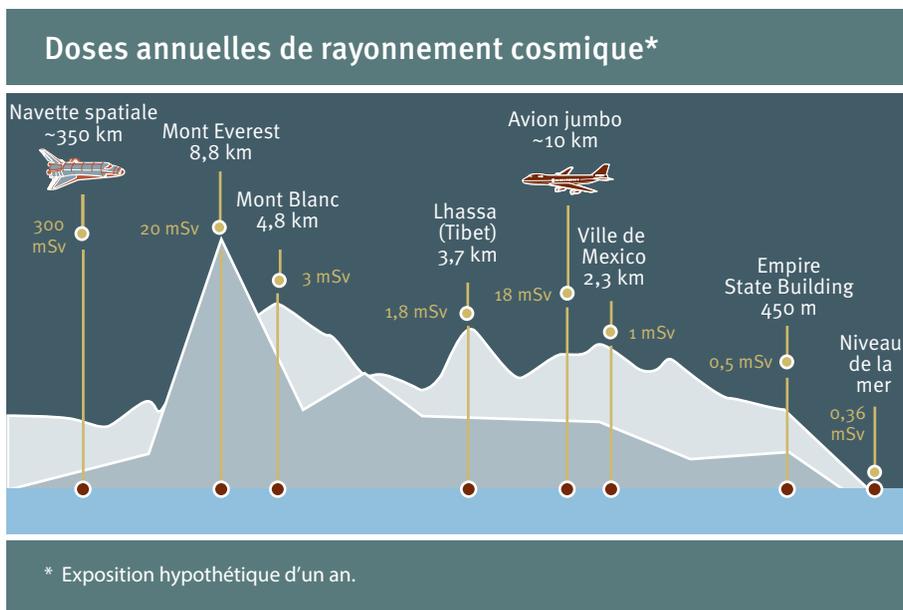


### 3.1. Sources naturelles

Depuis sa création, l'environnement sur Terre a été exposé aux rayonnements provenant de l'espace et des matières radioactives présentes dans la croûte et le noyau terrestre. Il est impossible d'échapper à l'exposition de ces sources naturelles qui représentent en réalité la majorité des cas d'exposition aux rayonnements ionisants de la population mondiale. La dose efficace moyenne annuelle par personne est d'environ 2,4 mSv et varie d'environ 1 à plus de 10 mSv selon le lieu d'habitation. Les bâtiments peuvent retenir un gaz radioactif spécifique, le radon, ou encore les matériaux du bâtiment lui-même peuvent contenir des radionucléides qui augmentent l'exposition aux rayonnements ionisants. Bien que ces sources soient naturelles, notre exposition peut être modifiée par les choix que nous faisons, par exemple notre lieu et mode de vie ou notre nourriture.

#### Sources cosmiques

Les rayons cosmiques représentent la principale source naturelle d'exposition externe aux rayonnements ionisants. La majorité de ces rayons proviennent de l'espace interstellaire lointain ; certains sont émis par le soleil lors d'éruptions solaires. Ils irradient directement la Terre et entrent en interaction avec l'atmosphère, produisant différents types de rayonnement et de substances radioactives. Ils représentent la source de rayonnement dominante dans l'espace. Bien que l'atmosphère et le champ magnétique terrestres réduisent considérablement le rayonnement cosmique, certaines parties du globe sont plus exposées que d'autres. Puisque le rayonnement cosmique est dévié par le



champ magnétique aux pôles Nord et Sud, ces régions reçoivent davantage de rayonnement que les régions équatoriales.

De plus, le niveau d'exposition augmente avec l'altitude, étant donné qu'il y a moins d'air pour servir d'écran. Les personnes habitant au niveau de la mer reçoivent en moyenne une dose efficace annuelle d'environ 0,3 mSv en provenance des sources cosmiques de rayonnement, ce qui représente environ 10 à 15 % de leur dose totale provenant de sources naturelles. Les personnes vivant au-dessus de 2 000 mètres reçoivent plusieurs fois cette dose. A bord des avions, les passagers peuvent être exposés à des doses encore plus élevées puisque l'exposition au rayonnement cosmique dépend non seulement de l'altitude mais aussi de la durée du vol. Par exemple, à une altitude de croisière, la dose efficace moyenne est de 0,03 à 0,08 mSv pour un vol de 10 heures. Autrement dit, un vol aller-retour New York-Paris expose une personne à environ 0,05 mSv. Ceci correspond à peu près à la dose efficace qu'un patient reçoit pendant une radiographie pulmonaire de routine. Même si les doses efficaces estimées reçues individuellement par les passagers d'un vol restent relativement faibles, les doses collectives peuvent être assez élevées vu le grand nombre de passagers et de vols à travers le monde.

## EXPOSITION SUR LE LIEU DE TRAVAIL

---

Les doses provenant de sources cosmiques sont particulièrement importantes pour les personnes qui prennent souvent l'avion comme les pilotes et le personnel de cabine qui reçoivent en moyenne environ 2 à 3 mSv par an. Les doses ont été également mesurées dans le cadre de missions spatiales. Pour les missions courtes, ces doses vont de 2 à 27 mSv, selon l'activité solaire. En revanche, sur une mission de quatre mois vers la Station spatiale internationale, un astronaute en orbite autour de la Terre à 350 km reçoit une dose efficace d'environ 100 mSv.

## Sources terrestres

### *Sol*

Tout ce qui se trouve à la surface de la Terre et dans le noyau terrestre contient des *radionucléides primordiaux*. Ces radionucléides à vie très longue que l'on trouve dans le sol, comme le potassium-40, l'uranium-238 et le thorium 232, ainsi que les radionucléides issus de leur désintégration, comme le radium -226 et le radon-222, ont commencé à émettre des rayonnements avant même la formation de la Terre. Selon les calculs de l'UNSCEAR, chaque personne sur la Terre reçoit en moyenne une dose efficace annuelle d'environ 0,48 mSv liée à l'exposition externe aux sources terrestres.

Cette exposition externe varie considérablement d'un endroit à un autre. Des études menées en France, en Allemagne, en Italie, au Japon et aux États-Unis suggèrent par exemple qu'environ 95 % de leur population vit dans des zones où la dose annuelle moyenne externe varie de 0,3 à 0,6 mSv. Cependant dans certaines régions, les habitants peuvent recevoir des doses supérieures à 1 mSv par an. Il existe d'autres endroits dans le monde où l'exposition aux rayonnements ionisants provenant de sources terrestres est encore plus élevée. Par exemple, sur la côte du Kerala au sud-ouest de l'Inde, une bande de terre fortement peuplée de 55 kilomètres contient des sables riches en thorium, et les habitants y reçoivent en moyenne 3,8 mSv par an. Il existe d'autres régions à haut niveau de rayonnement naturel terrestre, notamment au Brésil, en Chine, en Iran, à Madagascar et au Nigeria.

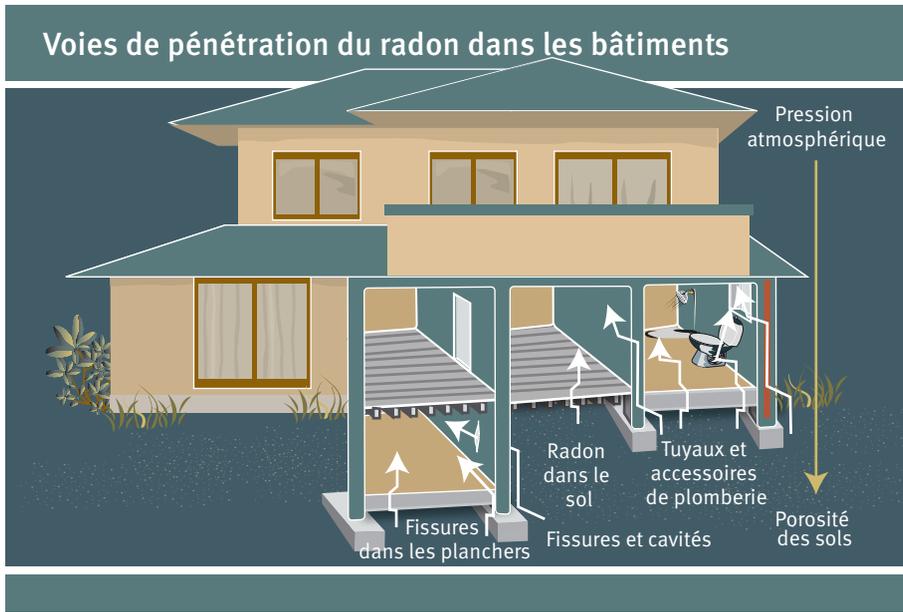
### *Gaz radon*

Le radon 222 est un radionucléide sous forme de gaz qui émane normalement du sol. Il est produit par la série de désintégration de l'uranium-238 présent dans les roches et le sol de la Terre. En cas d'inhalation, certains produits de désintégration à vie courte du radon, principalement le polonium-218 et 214, sont retenus dans les poumons et irradient les cellules des voies respiratoires par émission de particules alpha. Le radon est donc une des causes principales de cancer du poumon chez les fumeurs et les non-fumeurs ; les fumeurs sont néanmoins beaucoup plus vulnérables en raison de la forte interaction entre le tabac et l'exposition au radon.

Le radon est présent partout dans l'atmosphère et peut s'infiltrer directement dans les bâtiments par les caves et les planchers, où sa *concentration*, c'est-à-dire le nombre de désintégrations par mètre cube et par seconde, risque d'augmenter et de s'accumuler. Surtout lorsque les maisons sont chauffées, l'air chaud monte et s'échappe par le haut de la maison à travers les fenêtres ou les fissures, ce qui crée une zone de basse pression au rez-de-chaussée et au sous-sol. Ceci entraîne alors à partir du sous-sol une aspiration active du radon, qui remonte à travers les fissures et les fuites (par exemple autour des branchements de tuyauterie) en bas de la maison.

La concentration mondiale moyenne de radon à l'intérieur des bâtiments est d'environ 50 Bq/m<sup>3</sup>. Cette moyenne cache cependant une grande variabilité d'un endroit à l'autre. En général, les concentrations nationales moyennes varient énormément, de moins de 10 Bq/m<sup>3</sup> à Chypre, en Égypte et à Cuba à plus de 100 Bq/m<sup>3</sup> en République tchèque, en Finlande et au Luxembourg. Dans certains pays comme le Canada, la Suède et la Suisse, certaines habitations contiennent des concentrations de radon entre 1 000 et 10 000 Bq/m<sup>3</sup>. Mais la proportion de ces habitations à haut niveau de concentration reste très faible. Parmi les facteurs expliquant cette variation, on peut citer la géologie locale

sous-jacente, la perméabilité du sol, le type de matériaux de construction utilisé et la ventilation des bâtiments.



La ventilation, qui dépend du climat, est un facteur particulièrement important. Si les bâtiments sont bien ventilés, comme c'est le cas dans les pays de climat tropical, l'accumulation de radon sera probablement limitée. Par contre, dans les pays de climat tempéré ou froid, où les habitations ont tendance à être moins bien ventilées, les concentrations de radon peuvent augmenter considérablement. Par conséquent, l'effet d'une ventilation réduite doit être pris en compte lors de la conception de bâtiments énergétiquement efficaces. De vastes programmes de mesure ont été menés dans de nombreux pays pour soutenir la mise en œuvre de mesures destinées à réduire les concentrations de radon à l'intérieur des bâtiments.

Le niveau de radon dans l'eau est généralement très faible mais certaines sources d'approvisionnement, comme les puits profonds à Helsinki (Finlande) et à Hot Springs dans l'Arkansas (États-Unis), présentent des concentrations très élevées. La présence de radon dans l'eau peut contribuer à une augmentation de la concentration de radon dans l'air, en particulier sous la douche. Mais d'après les conclusions de l'UNSCEAR, la part du radon absorbé dans l'eau potable est faible par rapport au radon inhalé. L'UNSCEAR estime que la dose efficace annuelle moyenne de radon est de 1,3 mSv, ce qui représente près de la moitié de ce que le public reçoit en provenance de toutes les sources naturelles.

## EXPOSITION SUR LE LIEU DE TRAVAIL

---

Sur certains lieux de travail, l'inhalation de radon représente la part dominante de l'exposition aux rayonnements ionisants des travailleurs. Le radon est la source principale d'exposition aux rayonnements dans les mines souterraines de tous types. La dose efficace annuelle moyenne est d'environ 2,4 mSv pour un mineur de charbon et environ 3 mSv pour les autres mineurs. Dans l'industrie nucléaire, la dose efficace annuelle moyenne pour un travailleur est d'environ 1 mSv, due principalement à l'exposition au radon lors de l'extraction d'uranium.

### Sources dans les aliments

Les aliments et les boissons peuvent contenir des radionucléides primordiaux et autres, principalement en provenance de sources naturelles. Ces radionucléides peuvent être transférés aux plantes puis aux animaux à partir des roches et minéraux présents dans le sol et l'eau. Les doses varient selon les concentrations de radionucléides dans la nourriture et l'eau, mais aussi selon les habitudes alimentaires locales.

Par exemple, le poisson et les crustacés contiennent des niveaux relativement élevés de plomb-210 et de polonium-210, par conséquent les gros consommateurs de fruits de mer sont susceptibles de recevoir des doses plus élevées que la population en général. Des doses plus élevées sont également reçues par les habitants des régions arctiques qui consomment de grandes quantités de viande de renne. Les rennes dans l'Arctique présentent des concentrations relativement élevées de polonium-210 provenant du lichen qu'ils broutent. Selon les estimations de l'UNSCEAR, la dose efficace moyenne provenant de sources naturelles et présente dans les aliments et les boissons est de 0,3 mSv, surtout en raison de la présence du potassium-40 et des radionucléides des séries de l'uranium-238 et du thorium-232.

Des radionucléides de sources artificielles peuvent également être présents dans les aliments. Néanmoins, la contribution à la dose des rejets autorisés de ces radionucléides est généralement négligeable.

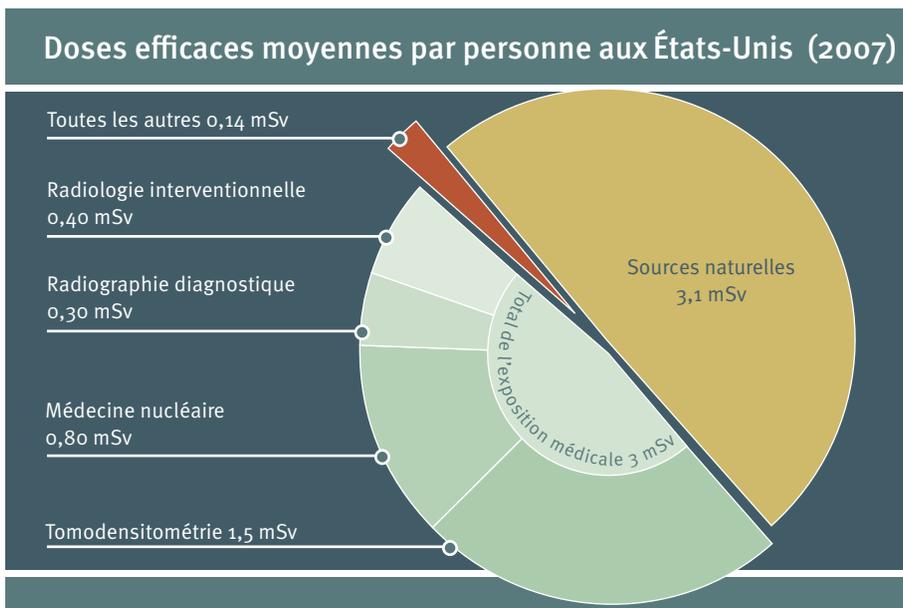
### 3.2. Sources artificielles

Les utilisations des rayonnements ionisants ont considérablement augmenté au cours des dernières décennies, au fur et à mesure que les scientifiques ont appris à maîtriser l'énergie de l'atome pour diverses applications. Du militaire au médical (traitement du cancer par exemple) et de la production d'électricité aux applications domestiques (comme les détecteurs de fumée), ces sources artificielles viennent s'ajouter à la dose de rayonnement provenant des sources naturelles et reçue par les individus et la population en général.

Les doses individuelles venant des sources artificielles varient énormément. La plupart des gens reçoivent une dose relativement faible de ces sources, mais certaines personnes reçoivent plusieurs fois la dose moyenne. De manière générale, les sources de rayonnement artificielles sont bien contrôlées par des mesures de radioprotection.

## Utilisations médicales

L'utilisation de rayonnements en médecine pour diagnostiquer et traiter certaines maladies joue un rôle tellement important qu'elle représente aujourd'hui, et de loin, la principale source artificielle d'exposition dans le monde. En moyenne, elle compte pour 98 % de l'ensemble des expositions provenant de sources artificielles et, après les sources naturelles, représente le deuxième plus important contributeur à l'exposition de la population à l'échelle mondiale, soit environ 20 % du total. La plupart de ces expositions ont lieu dans les pays industrialisés, qui disposent d'un plus grand nombre de ressources en matière de soins médicaux et où, par conséquent, l'équipement radiologique est plus largement utilisé. Dans certains pays, cette utilisation a même fait que la dose efficace moyenne annuelle liée à l'usage médical était semblable à celle provenant de sources naturelles.



Il existe des différences considérables entre les expositions médicales et la plupart des autres types d'exposition. L'exposition médicale ne concerne généralement qu'une partie du corps, alors que les autres expositions concernent souvent le corps entier. En outre, la répartition des âges des patients couvre

normalement une fourchette d'âges plus élevée que celle de la population générale. De plus, les doses provenant d'une exposition médicale doivent être comparées avec prudence à celles provenant des autres sources, étant donné que les patients bénéficient directement de leur exposition.

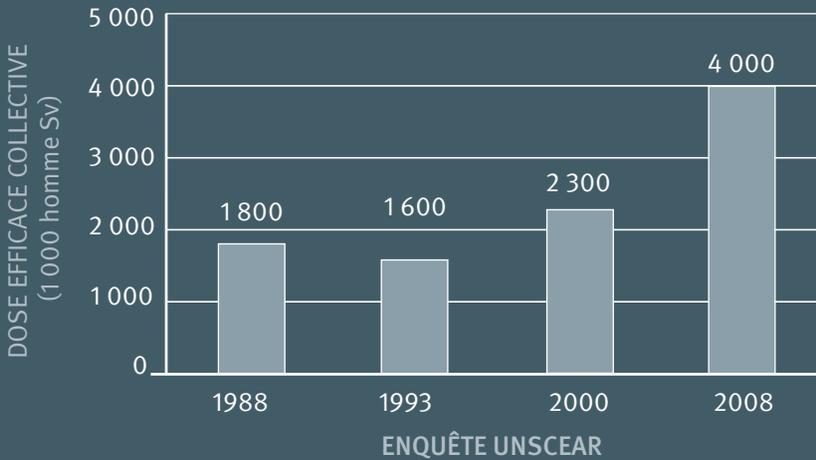
L'urbanisation croissante, conjuguée à l'amélioration progressive du niveau de vie, signifie inévitablement qu'un plus grand nombre de personnes ont accès aux soins de santé. En conséquence, la dose à laquelle la population est exposée par l'intermédiaire des applications médicales continue d'augmenter à l'échelle mondiale. L'UNSCEAR recueille régulièrement des données sur les interventions diagnostiques et thérapeutiques. D'après l'étude qu'il a menée pour la période 1997-2007, environ 3,6 milliards d'interventions médicales radiologiques ont été faites chaque année sur la planète, comparativement aux 2,5 milliards d'interventions recensées lors de la période d'étude précédente de 1991-1996, soit une augmentation de près de 50 %.

Les principales catégories générales de pratiques médicales nécessitant l'utilisation du rayonnement sont la radiologie (y compris la radiologie interventionnelle), la médecine nucléaire et la radiothérapie. Les autres utilisations qui ne sont pas couvertes par les évaluations régulières du Comité UNSCEAR comprennent les programmes de dépistage médical ainsi que la participation bénévole à des programmes de recherche médicale, biomédicale, diagnostique ou thérapeutique.

La **radiographie diagnostique** consiste en l'analyse d'images obtenues au moyen de rayons X, comme la radiographie ordinaire (p.ex. la radiographie thoracique ou dentaire), la radioscopie (p.ex. lors d'un repas baryté ou d'un lavement baryté) et la tomодensitométrie (TDM). Les techniques d'imagerie qui utilisent un rayonnement non ionisant, comme la tomographie par ultrasons ou à résonance magnétique, ne sont pas pris en compte par le Comité UNSCEAR. La **radiologie interventionnelle** fait appel à des procédures guidées par imagerie peu invasive pour diagnostiquer et traiter des maladies (p.ex. pour guider un cathéter dans un vaisseau sanguin).

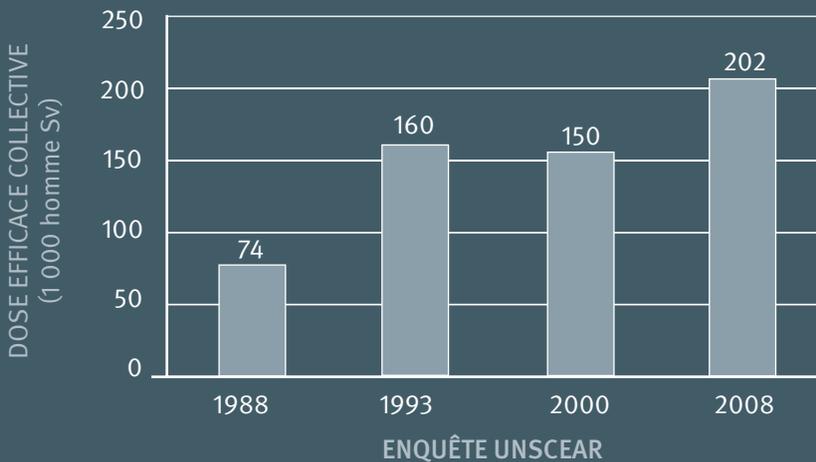
En raison de l'utilisation plus large de la TDM et de la dose importante par examen, la dose efficace moyenne mondiale liée aux interventions de radiographie diagnostique a presque doublé, passant de 0,35 mSv en 1988 à 0,62 mSv en 2007. D'après la dernière étude du Comité UNSCEAR, la TDM représente désormais 43 % de la dose collective totale liée à la radiologie. Ces chiffres varient d'une région à l'autre. Environ deux tiers de toutes les interventions radiologiques sont pratiquées sur 25 % de la population mondiale vivant dans les pays industrialisés. Pour les 75 % de la population mondiale restante, la fréquence annuelle de ces interventions est restée relativement constante, même pour un simple examen radiographique dentaire.

## Exposition mondiale causée par la radiologie (1988–2008)



**La médecine nucléaire** consiste à introduire des substances radioactives *non scellées* (c.-à-d. solubles et non encapsulées) dans le corps, principalement pour obtenir des images qui fournissent des renseignements sur la structure ou la fonction d'un organe, et plus rarement pour traiter certaines maladies, comme l'hyperthyroïdie et le cancer de la thyroïde. En général, un radionucléide

## Exposition mondiale causée par la médecine nucléaire (1988–2008)



est modifié pour former un produit radiopharmaceutique habituellement administré par voie intraveineuse ou orale. Ce produit se disperse ensuite dans l'organisme en fonction de ses caractéristiques physiques ou chimiques, rendant la détection par imagerie possible. Ainsi, le rayonnement émis par le radionucléide présent dans l'organisme est analysé afin de produire des images de diagnostique ou afin de traiter des maladies.

Le nombre d'interventions en médecine nucléaire diagnostique a augmenté dans le monde, passant d'environ 24 millions en 1988 à environ 33 millions en 2007. Cette augmentation a entraîné une hausse considérable de la dose efficace collective annuelle, qui est passée de 74 000 à 202 000 homme Sv. Les utilisations thérapeutiques de la médecine nucléaire moderne augmentent également, touchant environ 0,9 million de patients par an à l'échelle mondiale. De plus, l'utilisation de la médecine nucléaire est relativement inégale dans le monde, 90 % des examens s'effectuent dans les pays industrialisés.

La **radiothérapie** fait appel au rayonnement pour soigner certaines maladies, généralement le cancer, mais aussi les tumeurs bénignes. La radiothérapie externe est le traitement du patient au moyen d'une source de rayonnement située à l'extérieure de son corps. On l'appelle également **téléthérapie**. Ce traitement utilise un appareil contenant une source très radioactive (généralement du cobalt-60) ou un appareil à haute tension produisant un rayonnement (ex. un accélérateur linéaire). Le traitement peut également être administré en plaçant des sources radioactives métalliques ou scellées, que ce soit temporairement ou définitivement, dans l'organisme du patient. Ce type de traitement se nomme **curiethérapie**.

À l'échelle mondiale, on estime à 5,1 millions le nombre de patients ayant été traités annuellement à l'aide de la radiothérapie pendant la période 1997-2007, soit une hausse par rapport à l'estimation de 4,3 millions de patients en 1988. Environ 4,7 millions de patients ont été traités au moyen de la téléthérapie et 0,4 million par curiethérapie. Le quart de la population mondiale vivant dans les pays industrialisés a reçu 70 % des traitements de radiothérapie et 40 % des interventions de curiethérapie.

## EXPOSITION SUR LES LIEUX DE TRAVAIL

---

Comme le nombre total d'interventions médicales radiologiques a augmenté de manière importante au cours de la dernière décennie, le nombre de travailleurs de la santé touchés a aussi augmenté, dépassant 7 millions de personnes avec une dose efficace moyenne annuelle d'environ 0,5 mSv par travailleur. Le personnel médical travaillant dans les domaines de la radiologie interventionnelle et de la médecine nucléaire peut recevoir des doses supérieures à la dose moyenne.

## *Accidents liés aux utilisations médicales*

Certaines utilisations médicales du rayonnement (radiothérapie, radiologie interventionnelle et médecine nucléaire) exigent l'administration de doses élevées aux patients. Lorsque ces interventions ne sont pas exécutées correctement, elles peuvent provoquer de graves dommages, voire des décès. Ces risques ne concernent pas seulement les patients, mais aussi les médecins et les autres membres du personnel travaillant à proximité. L'erreur humaine est le plus souvent la cause de ces accidents, comme par exemple l'administration de doses inexactes en raison d'erreurs dans le plan de traitement, l'utilisation inappropriée de l'équipement et l'exposition du mauvais organe, même parfois du mauvais patient.

Bien que les accidents graves de radiothérapie soient rares, plus de 100 cas ont été recensés. Le Comité UNSCEAR a examiné 29 accidents signalés depuis 1967 qui ont causé la mort de 45 personnes et en ont blessé 613. Cependant, il est probable que certains décès et de nombreuses blessures n'aient jamais été signalées.

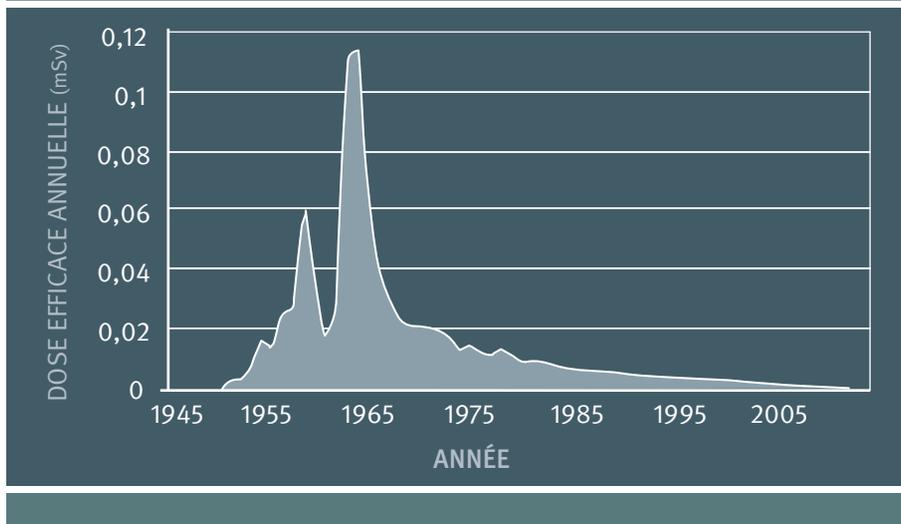
Tout comme la surexposition, la sous-exposition peut avoir de graves conséquences lorsque les patients reçoivent une dose de rayonnement insuffisante pour traiter une maladie mettant en péril la vie d'une personne. Les programmes d'assurance qualité permettent de maintenir des normes de pratique élevées et cohérentes afin de minimiser le risque que de tels accidents se produisent.

## **Armes nucléaires**

En 1945, aux derniers jours de la Seconde Guerre mondiale, deux bombes atomiques ont été larguées sur les villes japonaises d'Hiroshima (le 6 août) et de Nagasaki (le 9 août). L'explosion de ces deux bombes a entraîné la mort de près de 130 000 personnes. Ces événements demeurent les seuls cas d'utilisation d'armes nucléaires au cours d'une guerre. Toutefois, après 1945, de nombreuses armes nucléaires ont fait l'objet d'essais dans l'atmosphère, principalement dans l'hémisphère Nord. Ces essais ont été les plus actifs durant la période de 1952 à 1962. Au total, plus de 500 essais ont été effectués, correspondant à un total de 430 mégatonnes d'équivalents en trinitrotoluène (TNT) ; le dernier de ces essais a eu lieu en 1980. Des personnes du monde entier ont été exposées aux retombées radioactives provenant de ces essais. Le Comité UNSCEAR a été fondé en 1955 en réponse aux préoccupations soulevées concernant l'exposition des êtres humains et de l'environnement au rayonnement.

L'estimation de la dose efficace moyenne annuelle liée aux retombées radioactives mondiales provenant des essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère était à son sommet en 1963, à 0,11 mSv, avant de baisser à son niveau actuel d'environ

## Dose mondiale moyenne par personne provenant des retombées des essais nucléaires



0,005 mSv. À l'avenir, cette exposition ne baissera que progressivement car elle est principalement liée au radionucléide à période longue qu'est le carbone 14.

Jusqu'à 50 % des retombées totales produites par ces essais en surface se sont déposées localement, dans un rayon de 100 km autour des sites d'essai. Par conséquent, les personnes vivant à proximité de ces sites ont principalement été exposées à des retombées atmosphériques locales. Cependant, comme ces essais étaient menés dans des régions relativement éloignées, les populations locales exposées étaient peu nombreuses et n'ont donc pas contribué de manière importante à la dose collective mondiale. Néanmoins, les personnes qui vivaient sous le vent de ces sites d'essai ont reçu des doses bien supérieures à la moyenne.

En 1958, le premier rapport du Comité UNSCEAR a permis de jeter les bases scientifiques sur lesquelles a été négocié le *Traité interdisant les essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère, dans l'espace extra-atmosphérique et sous l'eau*. Après la signature de ce Traité d'interdiction partielle des essais nucléaires en 1963, environ 50 essais souterrains par an ont été faits jusqu'aux années 1990 ; quelques autres ont aussi été effectués après cette date. La plupart de ces essais étaient d'une puissance bien inférieure à celles des essais dans l'atmosphère, et tous les résidus radioactifs étaient généralement confinés, sauf lorsque des gaz étaient rejetés ou s'échappaient dans l'atmosphère. Même si ces essais ont produit de très grandes quantités de déchets radioactifs, ces résidus ne devraient pas entraîner l'exposition du public, car ils sont enfouis à de grandes profondeurs et ont, pour l'essentiel, fusionné avec la roche hôte.

Des préoccupations existent quant à la réutilisation des endroits ayant servi à ces essais nucléaires (p.ex. à des fins de pâturage ou de culture), car certains sont aujourd'hui réutilisés. Les doses liées aux résidus radioactifs de certains sites, comme des aires localisées du site d'essais nucléaires de Semipalatinsk, dans le Kazakhstan d'aujourd'hui, peuvent être considérables, tandis que d'autres sites, comme les atolls de Mururoa et de Fangataufa en Polynésie française, les doses ne représentent pas plus d'une fraction de l'exposition naturelle normale pour la population susceptible d'occuper le site. À d'autres sites, comme les îles Marshall et à Maralinga, où les États-Unis et le Royaume-Uni ont respectivement mené certains de leurs essais, l'exposition des personnes qui y vivent dépend de leur régime alimentaire et de leur style de vie.

## Réacteurs nucléaires

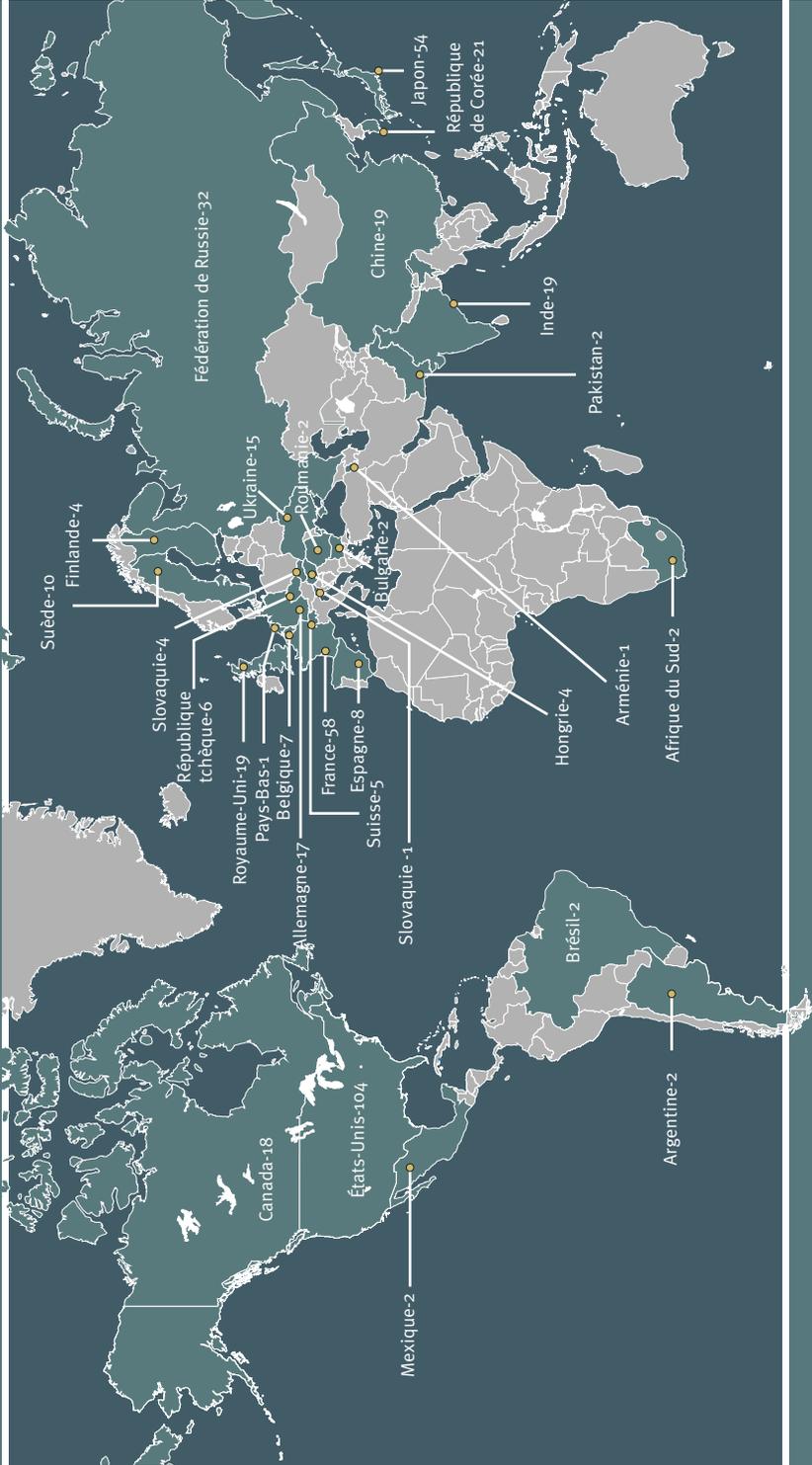
Lorsque certains isotopes d'uranium ou de plutonium sont frappés par des neutrons, leur noyau se sépare en deux noyaux plus petits dans le cadre d'un processus appelé fission nucléaire. Ce processus libère de l'énergie et deux neutrons ou plus. Les neutrons ainsi libérés peuvent également frapper d'autres noyaux d'uranium ou de plutonium et entraîner leur fission, libérant à leur tour plus de neutrons qui peuvent ensuite entraîner la fission d'autres noyaux. Cela s'appelle une réaction en chaîne. Ces isotopes sont normalement utilisés comme combustible dans les réacteurs nucléaires, dans lesquels la réaction en chaîne est contrôlée de manière à l'interrompre si elle va trop vite.

L'énergie dégagée par la fission produite dans un réacteur nucléaire peut être utilisée pour produire de l'électricité dans les centrales nucléaires. Il existe aussi des réacteurs de recherche qui servent à tester le combustible nucléaire et différents types de matériaux, à faire des recherches en physique nucléaire et en biologie et à produire des radionucléides qui seront utilisés en médecine nucléaire et dans l'industrie. Bien qu'il y ait des différences entre ces types de réacteurs, tous deux exigent la mise en place de processus industriels comme l'extraction de l'uranium et l'élimination des déchets radioactifs qui peuvent entraîner l'exposition des travailleurs et du public.

## Centrales nucléaires

La première centrale nucléaire de la planète utilisée à l'échelle industrielle, Calder Hall, a été construite en 1956 au Royaume-Uni. Depuis lors, la production d'électricité par les centrales nucléaires a considérablement augmenté. Malgré l'augmentation des mises hors service de réacteurs plus vieux, la production électrique de source nucléaire ne cesse de croître. À la fin de l'année 2010, environ 440 réacteurs nucléaires étaient exploités dans 29 pays, fournissant environ 10 % de la production d'électricité mondiale, et il y avait 240 réacteurs de recherche situés dans 56 pays.

## Centrales nucléaires dans le monde entier (2010)



Même si la production d'électricité à partir d'énergie nucléaire est souvent sujette à controverse, en condition d'exploitation normale, cette production ne contribue que très faiblement à l'exposition mondiale au rayonnement. En outre, les niveaux d'exposition au rayonnement diffèrent grandement d'un type d'installation à une autre, entre les divers emplacements et au fil du temps.

Les niveaux d'exposition liés aux rejets normaux provenant des réacteurs ont eu tendance à baisser malgré l'augmentation de la production électrique des centrales. Cette baisse est due, d'une part, aux améliorations technologiques et d'autre part, à la mise en place de mesures de radioprotection plus strictes. En général, les rejets en provenance des installations nucléaires ne produisent que de faibles doses de rayonnement. La dose collective annuelle au sein des populations vivant près des centrales nucléaires est estimée à 75 homme Sv. Par conséquent, une personne vivant dans le voisinage d'une centrale nucléaire est exposée en moyenne à une dose efficace annuelle d'environ 0,0001 mSv.

La principale composante de l'exposition au rayonnement liée à l'exploitation de l'énergie nucléaire est l'extraction. L'extraction et la concentration de l'uranium produisent des quantités importantes de résidus miniers qui contiennent des niveaux élevés de radionucléides naturels. En 2003, la production mondiale d'uranium a atteint environ deux millions de tonnes, tandis que la production de résidus connexes atteignait plus de deux milliards de tonnes. Les amas de résidus miniers actuels sont bien entretenus, mais il existe un bon nombre d'anciens sites abandonnés, dont peu ont fait l'objet de mesures d'assainissement. Le Comité UNSCEAR a estimé la dose collective annuelle reçue par les groupes de population vivant autour des sites d'extraction et de concentration et des amas de résidus miniers à environ 50 à 60 homme Sv.

Le combustible usé provenant des réacteurs peut être retraité de manière à récupérer l'uranium et le plutonium en vue de leur réutilisation. La majorité du combustible usé est aujourd'hui conservé dans le cadre d'un stockage intermédiaire, mais environ un tiers du combustible produit jusqu'à ce jour a été retraité. L'estimation de la dose collective annuelle liée au retraitement se chiffre entre 20 et 30 homme Sv.

## EXPOSITION SUR LES LIEUX DE TRAVAIL

---

Dans l'industrie nucléaire, le rejet de radon dans les mines d'uranium souterraines contribue de façon importante à l'exposition professionnelle. L'extraction et la concentration des minerais radioactifs qui peuvent contenir des niveaux élevés de radionucléides sont des activités répandues. La dose efficace moyenne annuelle par travailleur dans l'industrie nucléaire a progressivement baissé depuis les années 1970, passant de 4,4 mSv à 1 mSv aujourd'hui. Cette baisse est principalement attribuable à la réduction importante de l'extraction d'uranium et à l'utilisation de techniques d'extraction et de ventilation plus perfectionnées.

## Principaux procédés dans l'industrie nucléaire

Pour être utilisé comme combustible, l'uranium passe par des opérations de **conversion, d'enrichissement et de raffinage.**

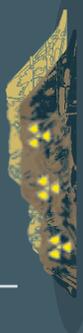


Lors de la **fabrication des combustibles**, des crayons de combustible sont produits, généralement à partir de l'uranium contenu dans des pastilles céramiques, insérées dans des tubes métalliques.



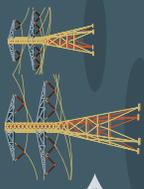
**Le retraitement** des combustibles usés produit de l'uranium et du plutonium qui peuvent être recyclés en combustible après des opérations de conversion et d'enrichissement.

L'uranium est extrait du **minéral** par broyage. Les résidus deviennent des stériles miniers, contenant des radionucléides à vie longue en faibles concentrations.



L'**uranium naturel** est extrait principalement à ciel ouvert ou dans des mines souterraines.

Dans les **réacteurs de recherche et de puissance** se produit la réaction de **fission** des noyaux des atomes d'uranium, qui libère de l'énergie, ensuite utilisée pour chauffer l'eau.



**Les radioisotopes** produits dans les réacteurs peuvent être séparés pour être utilisés en médecine et dans l'industrie.



Les sous-produits radioactifs réduisent l'efficacité du combustible. Après une période de 12 à 24 mois, **le combustible usé** est retiré du réacteur.

**Les déchets de haute activité**, y compris le combustible usé, sont entreposés dans des installations de stockage provisoires en attendant leur stockage définitif en couche géologique profonde.



Dépôt dans des couches géologiques profondes

**Les déchets d'activité faible et moyenne** sont généralement entreposés dans des sites d'enfouissement peu profonds.



Entreposage en surface

Profondeur faible ou intermédiaire



Les déchets de faible activité et certains déchets de moyenne activité sont aujourd'hui stockés dans des installations près de la surface, alors qu'autrefois, ils étaient parfois rejetés en mer. Les déchets de haute activité et le combustible usé (s'ils ne sont pas retraités) sont quant à eux stockés, mais devront au final être enfouis de façon définitive. L'évacuation appropriée des déchets ne devrait pas entraîner d'exposition à la population, même dans un lointain avenir.

### *Accidents dans des installations nucléaires*

Les niveaux d'exposition lors de l'exploitation normale des installations civiles de l'industrie nucléaire sont très faibles. Cependant, certains accidents graves ont eu lieu. Ces accidents ont fortement attiré l'attention du public et leurs conséquences ont été étudiées par le Comité UNSCEAR. L'installation de recherche de Vinča, en ex-Yougoslavie (1958), la centrale nucléaire de Three Mile Island, aux États-Unis (1979) et l'installation de conversion du combustible de Tokai-Mura, au Japon (1999) en sont trois exemples.

Entre 1945 et 2007, trente-cinq accidents radiologiques graves se sont produits dans des installations nucléaires et ont entraîné de graves blessures ou la mort d'employés ; sept accidents ont quant à eux provoqué des rejets de substances radioactives à l'extérieur des sites ainsi qu'une exposition de la population à des niveaux détectables. De graves accidents ont également eu lieu dans des installations liées à des programmes d'armement nucléaire. À l'exclusion des accidents de Tchernobyl en 1986 et de Fukushima-Daiichi en 2011 (abordés ci-après), 32 décès et 61 cas de blessures causées par le rayonnement et exigeant des soins médicaux sont connus.

Avant l'accident de Tchernobyl, l'accident le plus grave ayant touché une installation civile était celui de la centrale nucléaire de Three Mile Island, qui a eu lieu le 28 mars 1979. Une série d'événements a entraîné la fusion partielle du cœur du réacteur. Cet accident a rejeté de grandes quantités de produits de fission et de radionucléides en provenance du cœur du réacteur défaillant dans l'enceinte de confinement, mais des quantités relativement faibles ont été rejetées dans l'environnement. Par conséquent, le public a été très faiblement exposé.

### *Accident à la centrale nucléaire de Tchernobyl*

L'accident qui s'est produit à la centrale nucléaire de Tchernobyl le 26 avril 1986 n'a pas seulement été le plus grave de l'histoire de l'industrie nucléaire civile, mais a également été le plus sérieux en matière d'exposition de la population générale au rayonnement. La dose collective liée à l'accident correspondait à plusieurs fois la dose collective combinée des autres accidents radiologiques.

Deux travailleurs sont morts d'un traumatisme immédiatement après l'accident, et 134 autres ont souffert du syndrome d'irradiation aiguë, qui s'est avéré mortel pour 28 d'entre eux. Les lésions cutanées et les cataractes liées au rayonnement ont été parmi les principaux problèmes de santé chez les survivants. Outre les travailleurs des services d'urgence, plusieurs centaines de milliers de personnes ont participé aux activités de récupération subséquentes. À l'exception d'une apparente augmentation du nombre de leucémies et de cataractes chez les personnes ayant reçu des doses élevées en 1986 et en 1987, aucune preuve n'indique à ce jour d'autres effets sur la santé liés au rayonnement dans ce groupe.

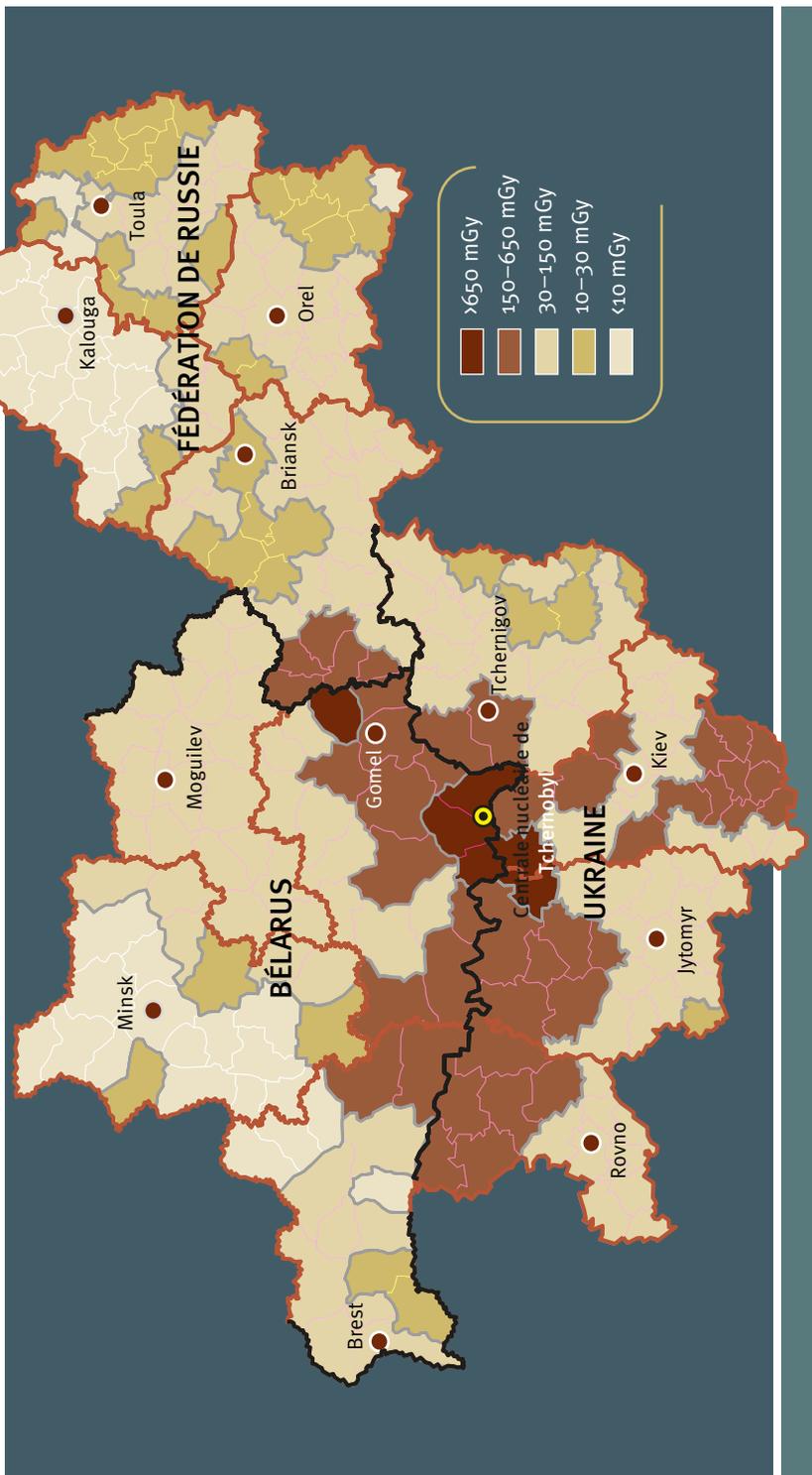
Cet accident a provoqué le plus grand rejet radioactif non contrôlé dans l'environnement jamais enregistré pour une installation civile. De grandes quantités de substances radioactives ont été rejetées dans l'atmosphère pendant environ 10 jours. Le nuage radioactif créé par l'accident s'est dispersé sur l'ensemble de l'hémisphère Nord et a déposé des quantités importantes de substances radioactives sur de larges régions de l'ancienne Union soviétique et d'autres parties de l'Europe, contaminant les terres et l'eau, notamment dans les pays qui sont aujourd'hui le Bélarus, la Russie et l'Ukraine, et provoquant ainsi des perturbations sociales et économiques pour de larges segments de la population.

La contamination du lait frais par le radionucléide à courte durée de vie, l'iode-131 (période de huit jours), et l'absence de contremesures rapides a provoqué l'exposition de la thyroïde à de très fortes doses, surtout chez les enfants, dans certaines parties de l'ex-Union soviétique. Depuis le début des années 1990, les cas de cancers de la thyroïde chez ces personnes exposées en 1986, alors qu'ils n'étaient que des enfants ou des adolescents, ont augmenté au Bélarus, en Ukraine et dans quatre des régions les plus touchées de Russie. Pour la période 1991-2005, plus de 6 000 cas ont été signalés, dont 15 se sont avérés mortels.

À plus long terme, la population a également été exposée au rayonnement, que ce soit de manière externe, par l'intermédiaire des dépôts radioactifs, ou de manière interne, en consommant des produits alimentaires contaminés, principalement par du césium-137 (période de 30 ans). Cependant, les doses à long terme qui en ont résulté ont été relativement faibles. La dose efficace individuelle moyenne au cours de la période 1986-2005 dans les zones contaminées du Bélarus, de la Russie et de l'Ukraine se chiffrait à 9 mSv. Cette dose ne devrait pas provoquer d'effets importants sur la santé chez la population générale. Pourtant, les graves perturbations engendrées par l'accident ont eu des répercussions socioéconomiques majeures sur les populations touchées et ont provoqué un grand désarroi chez elles.

Le Comité UNSCEAR a étudié en détail les conséquences radiologiques de cet accident dans plusieurs rapports. La communauté internationale a entrepris des

# Doses moyennes absorbées par la thyroïde après l'accident de la centrale nucléaire de Tchernobyl



efforts sans précédent pour évaluer l'ampleur et les caractéristiques des conséquences liées à cet accident, de manière générale et dans différents domaines d'intérêt, afin d'améliorer la compréhension des répercussions radiologiques et des autres conséquences liées à l'accident dans le but de faciliter leur atténuation.

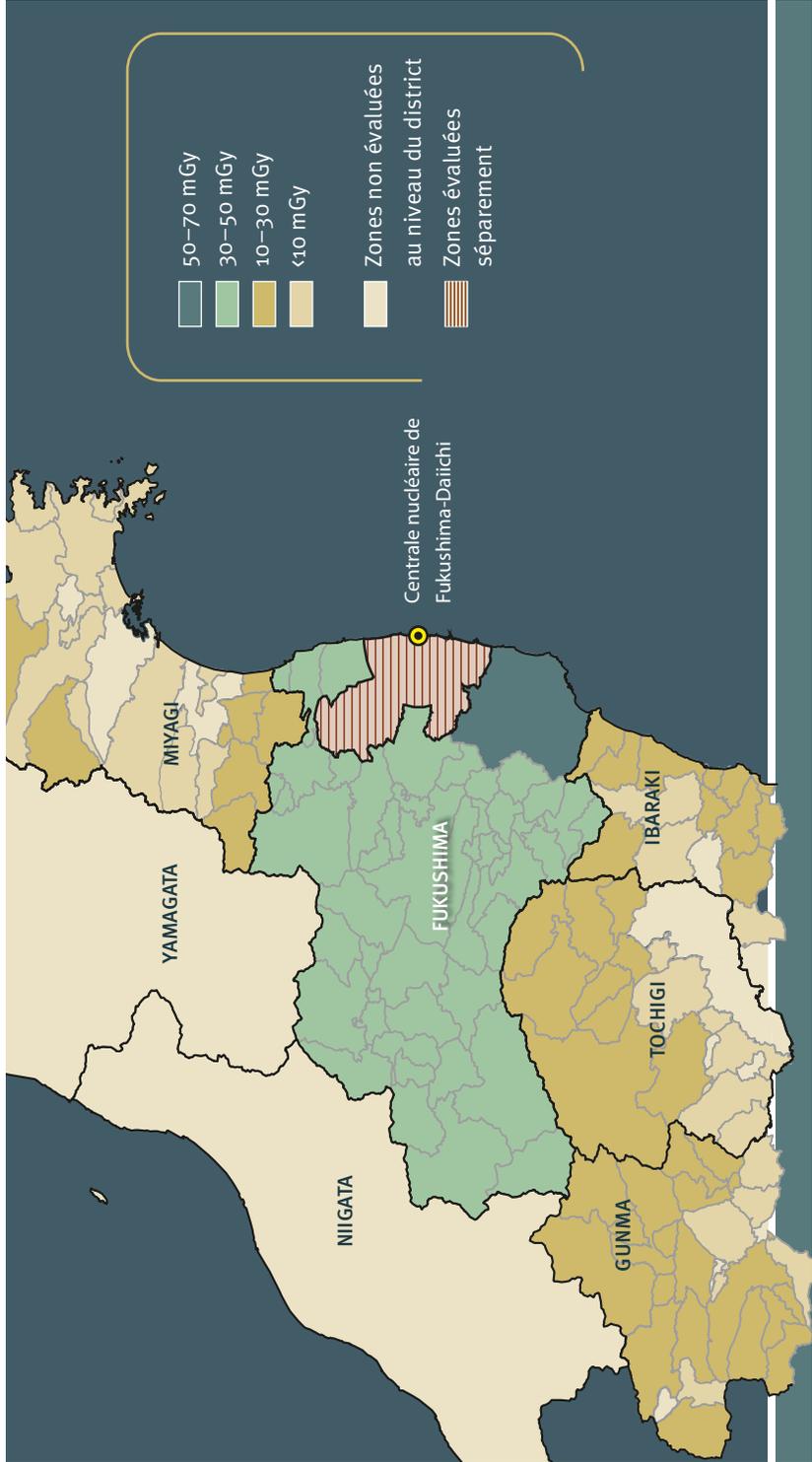
Pour l'essentiel, les études menées depuis 1986 indiquent que les personnes qui ont été exposées dans leur enfance à l'iode-131 ainsi que les travailleurs des services d'urgence et des activités de récupération qui ont reçu des doses élevées de rayonnement présentent un risque plus élevé de subir des effets induits par le rayonnement. Cependant, la plupart des résidents de la région ont été exposés à des niveaux de rayonnement comparables au niveau de rayonnement naturel annuel ou quelques fois plus élevés.

### *Accident à la centrale nucléaire de Fukushima-Daiichi*

Après le grand séisme de magnitude 9 et le tsunami qui ont frappé la côte Est du Japon le 11 mars 2011, les graves dommages subis par la centrale nucléaire de Fukushima-Daiichi ont provoqué le rejet de substances radioactives dans l'environnement. Environ 85 000 personnes vivant dans un rayon de 20 km autour du site de la centrale nucléaire et dans des régions avoisinantes ont été évacuées par précaution, entre le 11 et le 15 mars, tandis que les personnes vivant à une distance de 20 à 30 km de la centrale ont été confinées dans leurs propres habitations. Plus tard, en avril 2011, l'évacuation de 10 000 autres personnes vivant plus au nord-ouest de la centrale a été recommandée en raison des niveaux élevés de radionucléides relevés au sol. Ces évacuations ont permis de réduire fortement les niveaux d'exposition qui auraient autrement été reçus par les personnes touchées. La consommation d'eau et de certains produits alimentaires a temporairement été restreinte afin de limiter l'exposition du public au rayonnement. En gérant la situation d'urgence à la centrale nucléaire, certains membres du personnel opérationnel et du personnel d'intervention d'urgence ont été exposés.

Le Comité UNSCEAR a réalisé une évaluation des doses de rayonnement et de leurs effets connexes sur la santé et l'environnement. Environ 25 000 travailleurs ont participé aux activités d'atténuation et aux autres opérations sur le site de la centrale nucléaire de Fukushima-Daiichi au cours des 18 mois qui ont suivi l'accident. La dose efficace moyenne reçue par ces travailleurs était à l'époque d'environ 12 mSv. Toutefois, 6 travailleurs ont reçu des doses cumulées de plus de 250 mSv ; la dose cumulée la plus élevée signalée se chiffrait à 680 mSv chez un travailleur, une dose reçue principalement en raison d'une exposition interne (environ 90 %). On estime que douze travailleurs ont reçu des doses à la thyroïde de l'ordre de 2 à 12 Gy. Aucune mortalité ou maladie aiguë en lien avec le rayonnement n'a été observée chez les travailleurs exposés au rayonnement provoqué par l'accident.

## Doses moyennes à la thyroïde chez les nourrissons après l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima-Daiichi



Les doses efficaces moyennes pour les adultes dans les zones évacuées de la préfecture de Fukushima se chiffraient de 1 mSv à environ 10 mSv au cours de l'année suivant l'accident. Les doses efficaces pour les bébés d'un an ont été estimées à environ deux fois ces doses. Dans les zones de la préfecture de Fukushima qui n'ont pas été évacuées et dans les préfectures voisines, les doses étaient plus faibles.

Les estimations des doses moyennes à la thyroïde chez les personnes les plus exposées, principalement à l'iode-131, atteignaient 35 mGy chez les adultes et 80 mGy chez les enfants d'un an. La dose annuelle à la thyroïde, liée principalement à des sources externes de rayonnement naturel, est généralement de l'ordre de 1 mGy. Le Comité UNSCEAR a conclu qu'il existait une possibilité théorique que le risque de cancers de la thyroïde chez le groupe d'enfants le plus exposé au rayonnement puisse augmenter. Toutefois, le cancer de la thyroïde est une maladie rare chez les jeunes enfants ; ainsi, d'un point de vue statistique, aucun effet observable n'est attendu dans ce groupe.

Même si des comparaisons sont faites avec le désastre de Tchernobyl, l'accident à la centrale nucléaire de Fukushima-Daiichi était tout à fait différent, que ce soit sur le plan du type de réacteur, du déroulement de l'accident, des caractéristiques des rejets de radionucléides et de leur dispersion que des mesures de protection prises. Dans les deux cas, de grandes quantités d'iode-131 et de césium-137 (les deux radionucléides les plus importants dans le cadre d'une exposition après un accident nucléaire) ont été rejetées dans l'environnement. Les rejets d'iode-131 et de césium-137 provenant de l'accident de Fukushima-Daiichi représentaient respectivement environ 10 et 20 % de ceux observés lors de l'accident de Tchernobyl.

## Applications industrielles et autres applications

Les sources de rayonnement sont utilisées dans un vaste éventail d'applications industrielles. Ces applications comprennent l'irradiation industrielle pour stériliser les produits médicaux et pharmaceutiques, assurer la conservation des produits alimentaires ou éradiquer des infestations d'insectes ; la gammagraphie industrielle pour examiner les soudures métalliques à la recherche de défauts ; les émetteurs alpha ou bêta utilisés dans les composés luminescents des viseurs d'armes et à titre de sources lumineuses de faible intensité pour les signaux de sortie et les illuminateurs de cartes ; les sources radioactives ou les machines à rayons X miniatures utilisées dans la diagraphie des puits afin de mesurer les caractéristiques géologiques

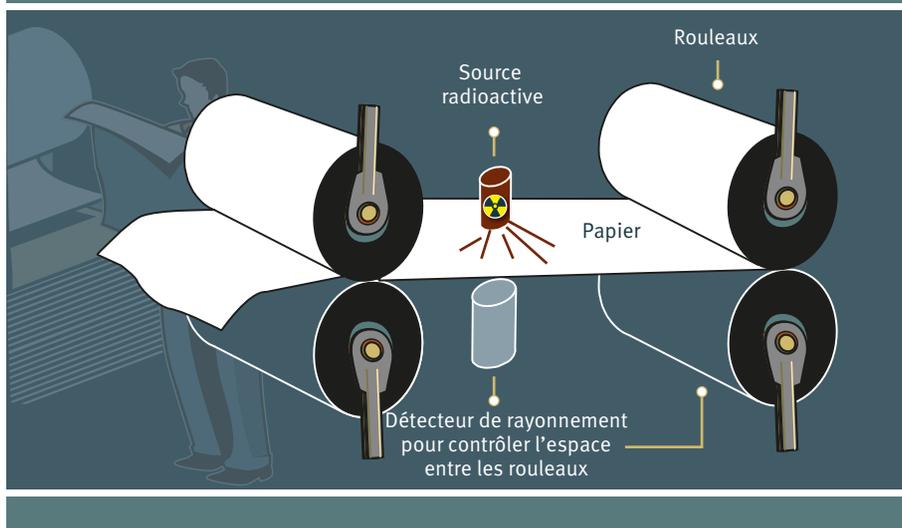
### EXPOSITION SUR LES LIEUX DE TRAVAIL

---

Le nombre de travailleurs concernés par les utilisations industrielles du rayonnement se chiffrait à environ un million de personnes au début des années 2000, avec une dose efficace moyenne annuelle par travailleur de 0,3 mSv.

dans les trous de forage réalisés à des fins d'exploration minière, pétrolière ou gazière ; les sources radioactives utilisées dans les appareils permettant de mesurer l'épaisseur, l'humidité, la densité et les niveaux des matériaux ; et d'autres sources radioactives scellées utilisées lors de travaux de recherche.

## Dispositif de mesure d'épaisseur par rayonnement



Bien que répandue, la production de radionucléides dans le cadre d'utilisations industrielles et médicales provoque de très faibles niveaux d'exposition pour le grand public. Cependant, en cas d'accident, des endroits plus localisés peuvent être contaminés et des niveaux d'exposition élevés peuvent se produire.

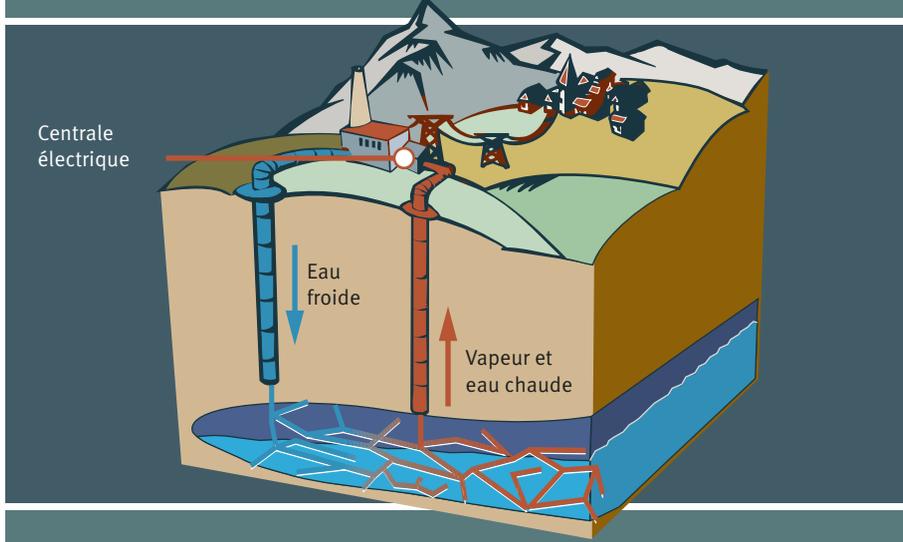
### *Matières radioactives naturelles*

Plusieurs types d'installations dans le monde peuvent, bien qu'elles ne soient pas liées à l'utilisation de l'énergie nucléaire, exposer le public au rayonnement en raison de concentrations *accrues de matières radioactives naturelles* dans leurs produits, sous-produits et déchets industriels. Parmi ces installations les plus importantes, citons celles qui sont liées à l'exploitation minière et au traitement des minerais.

Les activités liées à l'extraction et au traitement des minerais peuvent également provoquer une augmentation des niveaux de matières radioactives naturelles. Parmi ces activités, il y a l'extraction et la fusion des métaux ; la production de phosphate ; l'extraction du charbon et la production d'énergie électrique alimentée au charbon ; les forages pétroliers et gaziers ; les industries des terres rares et du dioxyde de titane ; les industries du zirconium et de la céramique ; et des applications utilisant des radionucléides naturels (typiquement des isotopes de radium et de thorium).

Le charbon, par exemple, contient des traces de radionucléides primordiaux. La combustion libère ces radionucléides dans l'environnement, où ils peuvent exposer la population. Cela signifie que pour chaque gigawatt-année d'électricité produit par les centrales thermiques alimentées au charbon dans le monde, on estime l'augmentation de la dose collective pour la population mondiale à environ 20 homme Sv par an. En outre, les cendres volantes (des résidus produits par la combustion) sont utilisées dans des sites d'enfouissement et la construction de routes, mais leur utilisation dans la construction de bâtiments entraîne une exposition radioactive liée à la fois à une irradiation directe et à l'inhalation de radon. En outre, le déchargement des cendres volantes sur un site peut accroître les niveaux d'exposition au rayonnement autour du site.

### Production d'énergie géothermique



La production d'énergie géothermique est une autre source d'exposition au rayonnement pour le grand public. Des réservoirs souterrains de vapeur et d'eau chaude sont exploités pour produire de l'électricité ou chauffer des immeubles. L'estimation des émissions découlant de l'utilisation de cette technologie en Italie et aux États-Unis laissent entendre qu'elle représente environ 10 % de la dose collective par gigawatt-année d'électricité produit par les centrales thermiques alimentées au charbon. L'énergie géothermique représente aujourd'hui une part relativement faible de la production d'énergie à l'échelle mondiale, et ne contribue donc que faiblement à l'exposition au rayonnement.

Diverses autres pratiques humaines peuvent exposer les personnes à des matières radioactives naturelles, comme l'épandage des boues d'épuration en agriculture. Cependant, les niveaux d'exposition de la population sont très faibles, d'un ordre inférieur à quelques millièmes de millisievert par an.

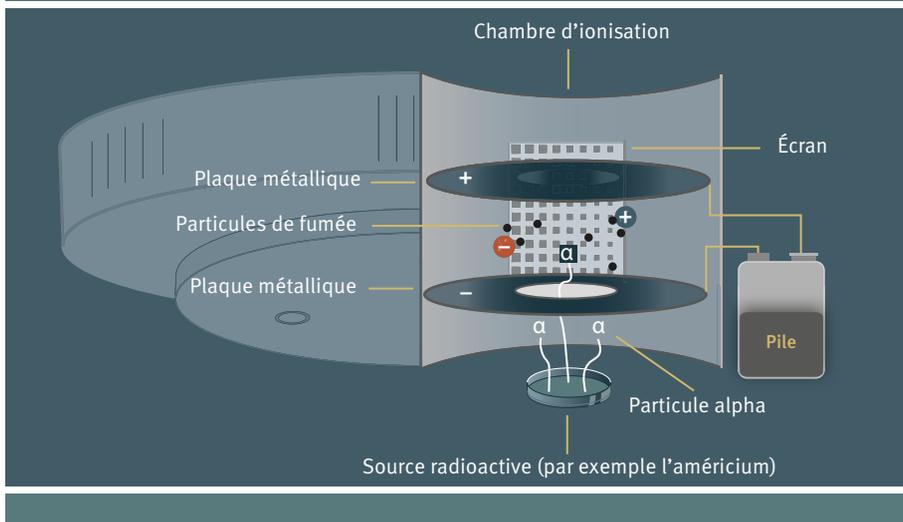
L'un des sous-produits de l'enrichissement de l'uranium est l'uranium appauvri, qui est moins radioactif que l'uranium naturel. L'uranium appauvri a été utilisé pendant de nombreuses années à des fins civiles et militaires. En raison de sa densité élevée, il est utilisé dans les écrans de blindage contre le rayonnement ou en tant que contre-poids dans les avions. L'utilisation militaire de l'uranium appauvri, notamment dans les munitions perforantes, a soulevé des préoccupations liées à une contamination résiduelle. Sauf dans le cadre de quelques scénarios précis, comme la manipulation à long terme, l'exposition au rayonnement provenant de l'uranium appauvri est extrêmement faible. En fait, la toxicité chimique est sa propriété la plus dangereuse.

### Produits de consommation

Un certain nombre de produits de consommation contiennent de faibles niveaux de radionucléides, lesquels sont délibérément ajoutés pour tirer parti de leurs propriétés chimiques ou radioactives. Par le passé, le radionucléide le plus utilisé dans les produits de consommation d'éclairage était le radium-226. Cette utilisation a pris fin il y a plusieurs décennies, le radium ayant été remplacé par le prométhium-147 et l'hydrogène-3 (tritium), qui sont moins radiotoxiques. Malgré cela, certaines fuites de tritium peuvent s'être produites dans des horloges ou des montres contenant du tritium en raison de sa nature très mobile. Cependant, le tritium n'émet que de très faibles particules bêta qui ne peuvent pas pénétrer la peau, et n'expose les personnes que s'il est ingéré dans leur organisme.

Certains détecteurs de fumée modernes consistent en une chambre d'ionisation comprenant des feuilles d'américium-241, qui émettent des particules alpha et

### Détecteur de fumée utilisant une source de rayonnement



produisent un courant ionique constant. L'air ambiant peut pénétrer librement dans le détecteur et, si de la fumée y pénètre, elle réduit ce courant et déclenche l'alarme.

La radioactivité de la source d'américium dans un détecteur de fumée est très faible. Cet élément se dégrade très lentement, ayant une période d'environ 432 ans. Cela signifie qu'un détecteur, après une période d'utilisation de 10 ans, conserve pour l'essentiel la totalité de son activité initiale. Du moment que la source d'américium demeure dans le détecteur, l'exposition reste négligeable. Bien qu'ils soient détectables par du matériel sensible, les niveaux d'exposition reçus à partir de tels produits sont extrêmement faibles. Une personne se positionnant à deux mètres du détecteur en question pendant huit heures par jour recevrait une dose estimée de moins de 0,0001 mSv par an.

### *Accidents industriels*

Les accidents mettant en cause des sources de rayonnement industrielles se produisent plus souvent que les accidents dans les centrales nucléaires. Pourtant, ils ne font généralement pas l'objet d'autant d'attention, alors qu'ils peuvent provoquer d'importantes expositions au rayonnement pour les travailleurs et les membres du public.

Entre 1945 et 2007, environ 80 accidents ont été signalés dans des installations industrielles utilisant des sources de rayonnement, des accélérateurs et des appareils à rayons X. Neuf personnes y ont trouvé la mort et 120 travailleurs ont été blessés. Certains des travailleurs blessés ont contracté un syndrome d'irradiation aiguë. Les mains étaient un site de blessure courant, et ont souvent dû être amputées. Le Comité UNSCEAR juge probable que certains accidents qui ont eu lieu dans des installations industrielles et qui ont provoqué des morts et des blessés n'aient pas été signalés.

Les causes et les effets de tels accidents sont divers et variés. Nous ne citons ici que deux exemples. En 1978, en Louisiane (États-Unis), un radiographe industriel travaillant sur une barge a subi une radiolésion sur la main gauche liée à une exposition à 3,7 TBq d'iridium-192, probablement en raison du dysfonctionnement d'un dosimètre. Environ trois semaines plus tard, sa main était rouge et enflée, puis a présenté des cloques. Cinq à huit semaines plus tard, sa main était guérie. Six mois plus tard, cependant, une partie de son index a dû être amputé. En 1990, à Shanghai, en Chine, en raison de mesures de sécurité inappropriées, sept travailleurs ont été exposés au rayonnement d'une source de cobalt 60 dans une installation industrielle. Un travailleur, exposé à une dose estimée à 12 Gy, est décédé 25 jours plus tard. Un autre, exposé à une dose estimée à 11 Gy, est décédé 90 jours plus tard. Les cinq autres travailleurs, exposés à des doses estimées entre 2 à 5 Gy, se sont rétablis après un traitement médical.

## Sources orphelines

Entre 1966 et 2007, 31 accidents ont été attribués à des sources radioactives perdues, volées ou abandonnées, que l'on nomme aussi *sources orphelines*. Nous savons que ces accidents ont entraîné la mort de 42 membres du public, y compris des enfants. En outre, des centaines de personnes ont dû être soignées pour des problèmes liés au syndrome d'irradiation aiguë, à de graves lésions locales, à des contaminations internes ou à des problèmes psychologiques. Six accidents étaient liés à des appareils de radiothérapie médicale abandonnés.

Il est impossible de connaître le nombre exact de sources orphelines dans le monde, mais on estime qu'elles se comptent en milliers. La *Nuclear Regulatory Commission* des États-Unis rapporte que les entreprises des États-Unis ont perdu la trace de près de 1 500 sources radioactives entre 1996 et 2008, la moitié de ces sources n'ayant jamais été récupérées. Une étude menée par l'Union Européenne a estimé que le nombre de sources échappant au contrôle réglementaire à l'intérieur de ses frontières pouvait atteindre 70 par an. Bien que la majorité de ces sources orphelines ne représentent pas un danger radiologique important, les accidents demeurent la préoccupation majeure.

### Accidents radiologiques graves: estimations mondiales\*

Type d'accident	1945–1965	1966–1986	1987–2007
Accidents dans des installations nucléaires	19	12	4
Accidents industriels	2	50	28
Accidents, sources orphelines	3	15	16
Accidents, universités/recherche	2	16	4
Accidents, secteur médical	inconnu	18	14

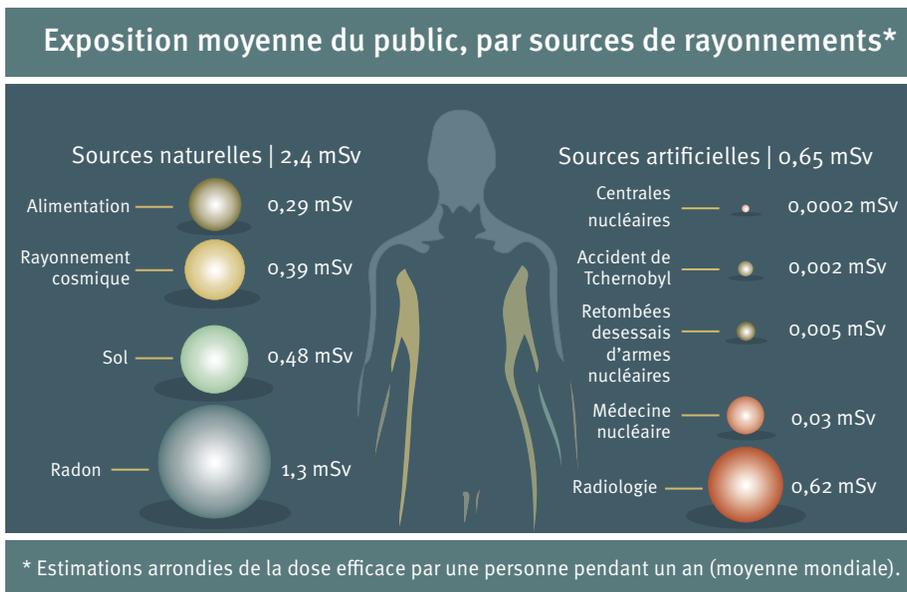
\* Sur la base des accidents signalés ou officiellement déclarés. Le nombre d'accidents non déclarés, en particulier dans le secteur médical, est probablement beaucoup plus élevé.

Les sources scellées ou leurs contenants peuvent présenter un attrait pour les personnes qui récupèrent la ferraille dans le but de la revendre, car ces éléments semblent être composés de métaux précieux et ne comportent pas toujours d'étiquette de mise en garde contre le rayonnement. Dans certaines situations, des travailleurs peu méfiants, voire des membres du public, ont altéré ces sources qui ont provoqué des lésions graves et dans certains cas, des décès, comme cela s'est produit à Goiânia, au Brésil, en 1987. Un appareil de téléthérapie abandonné présentant une source très radioactive (50,9 TBq) de césium-137 a été volé et l'enveloppe de la source s'est fissurée. Au cours des deux semaines suivantes, de la poudre de chlorure de césium s'est répandue dans l'ensemble

d'un parc à ferrailles et des maisons environnantes. De nombreuses personnes ont contracté des maladies et des lésions cutanées, 110 000 personnes ont dû faire l'objet d'un suivi pour contamination radioactive, dont un bon nombre avaient été contaminées de manière interne par du césium-137. Cet accident a provoqué la mort de quatre personnes, dont un enfant.

### 3.3. Exposition moyenne du public et des travailleurs au rayonnement

En général, l'exposition du public au rayonnement à partir de sources naturelles domine l'exposition totale. Le Comité UNSCEAR a estimé la dose efficace moyenne annuelle pour une personne à environ 3 mSv. En moyenne, la dose annuelle provenant de sources naturelles s'élève à 2,4 mSv, dont les deux tiers proviennent des substances radioactives se trouvant dans l'air que nous respirons, dans la nourriture que nous mangeons et l'eau que nous buvons. La principale source artificielle d'exposition provient des utilisations en médecine, avec une dose efficace moyenne annuelle par personne de 0,62 mSv. L'exposition radiologique d'origine médicale varie en fonction de la région, du pays et du système de soins de santé. Le Comité UNSCEAR a estimé que la dose efficace moyenne annuelle provenant des utilisations médicales du rayonnement dans les pays industrialisés à 1,9 mSv et, dans les pays non industrialisés à 0,32 mSv. Cependant, ces valeurs peuvent varier considérablement (p.ex. 3 mSv aux États-Unis contre seulement 0,05 mSv au Kenya).



Jusqu'aux années 1990, l'attention concernant l'exposition des travailleurs était portée sur les sources de rayonnement artificielles. Aujourd'hui, on réalise que de

très nombreux travailleurs sont exposés à des sources de rayonnement naturelles, principalement dans l'industrie minière. Pour certains emplois dans ce secteur, l'inhalation de radon domine l'exposition professionnelle au rayonnement. Même si le rejet de radon dans les mines d'uranium souterraines contribue fortement à l'exposition professionnelle dans l'industrie nucléaire, la dose efficace moyenne annuelle à laquelle est exposé un travailleur de cette industrie a baissé à l'échelle globale, passant de 4,4 mSv dans les années 1970 à environ 1 mSv aujourd'hui. Cependant, la dose efficace moyenne annuelle à laquelle est exposé un houilleur reste importante (environ 2,4 mSv), tandis que les autres mineurs sont exposés à environ 3 mSv.

L'estimation actuelle du nombre total de travailleurs suivis est d'environ 23 millions à l'échelle mondiale, dont environ 10 millions sont exposés à des sources artificielles. Trois travailleurs sur quatre exposés à des sources artificielles évoluent dans le secteur médical, avec une dose efficace annuelle de 0,5 mSv par travailleur. L'évaluation des tendances de la dose efficace moyenne annuelle par travailleur révèle une augmentation des expositions liées à des sources naturelles, principalement en raison de l'exploitation minière, et une réduction des expositions liées à des sources artificielles, principalement grâce à la mise en œuvre réussie de mesures de protection.

### Tendances mondiales de l'exposition des travailleurs aux rayonnements (en mSv)\*

Des années	1970	1980	1990	2000
<b>Sources naturelles</b>				
Personnel navigant	—	3,0	3,0	3,0
Extraction houillère	—	0,9	0,7	2,4
Autres secteurs miniers**	—	1,0	2,7	3,0
Divers	—	6,0	4,8	4,8
<b>Total</b>	—	1,7	1,8	2,9
<b>Sources artificielles</b>				
Utilisations médicales	0,8	0,6	0,3	0,5
Industrie nucléaire	4,4	3,7	1,8	1,0
Autres industries	1,6	1,4	0,5	0,3
Divers	1,1	0,6	0,2	0,1
<b>Total</b>	1,7	1,4	0,6	0,5

\* Estimations de la dose efficace par un travailleur pendant un an.

\*\* L'extraction de l'uranium est comprise dans l'industrie nucléaire.

## PUBLICATIONS DU COMITE UNSCEAR

Depuis sa mise sur pied, le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants a publié plus de 25 rapports importants, avec plus de 100 annexes scientifiques, qui font autorité en ce qui concerne l'évaluation de l'exposition liée aux essais d'armes nucléaires et à la production d'énergie nucléaire, à l'utilisation du rayonnement dans le secteur médical, aux sources d'exposition professionnelle au rayonnement et aux sources naturelles. Il évalue également les études détaillées portant sur les cancers radio-induits et les maladies héréditaires, ainsi que les conséquences radiologiques des accidents sur la santé et l'environnement. Les rapports du Comité UNSCEAR et les annexes scientifiques sont publiés en tant que publications des Nations Unies destinées à la vente ([unp.un.org](http://unp.un.org)) et sous la forme de téléchargements gratuits ([unscear.org](http://unscear.org)) pour diffuser ses conclusions au bénéfice des États membres des Nations Unies, de la communauté scientifique et du grand public.

Toutes les réactions ou tous les commentaires peuvent être envoyés à l'adresse suivante :

Secrétariat de l'UNSCEAR  
Centre international de Vienne  
Case postale 500  
1400 Vienne (Autriche)  
Courriel : [unscear@unscear.org](mailto:unscear@unscear.org)



En 1955, l'Assemblée générale des Nations Unies a créé le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) chargé de recueillir et d'évaluer des renseignements sur les niveaux et les effets des rayonnements ionisants.

Il s'agissait alors de répondre aux préoccupations sur les effets des rayonnements ionisants sur la santé humaine et sur l'environnement, car, à cette époque, les retombées radioactives provenant des essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère atteignaient les populations par l'air, l'eau et la nourriture. Le premier rapport du Comité UNSCEAR a servi de base scientifique à la négociation, en 1963, du Traité d'interdiction partielle des essais nucléaires interdisant les essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère.

La présente publication tente de présenter de manière objective et accessible au grand public les dernières connaissances à propos des niveaux et des effets des rayonnements. Elle s'appuie sur les rapports scientifiques du Comité UNSCEAR comme principale source d'information.

