Les fortes expositions aux radionucléides sont caractérisées par l'augmentation du risque d'effets aléatoires et, plus rarement, la manifestation d'effets certains (déterministes) précoces. L'étude des situations effectivement rencontrées montre que la contamination interne s'accompagne souvent d'une irradiation externe, voire d'une composante toxique chimique.

Effets de fortes expositions aux radionucléides : **bilan clinique et épidémiologique**

Les **contaminations internes** ayant donné lieu à de fortes **expositions** ont été observées après un rejet accidentel, unique le plus souvent, mais ont pu aussi résulter d'expositions chroniques professionnelles, médicales ou environnementales de la population (encadré B, ***Les voies d'atteinte de l'homme***, p. 13). Ces fortes expositions sont caractérisées par l'augmentation du risque d'effets aléatoires (effets **stochastiques**) et donnent plus rarement lieu à l'apparition d'effets précoces survenant chez toutes les personnes irradiées au-delà d'une **dose** (encadré F, ***Des rayonnements aux doses***, p. 66) seuil (effets **déterministes**). Dans de nombreuses situations accidentelles, la contamination interne s'accompagne d'une **irradiation externe**, voire d'une composante toxique chimique. Sans prétendre être exhaustifs, nous nous attacherons à décrire des événements ayant entraîné des décès ou des maladies graves et pour lesquels la contamination interne a pu être identifiée comme la cause principale. Les **radionucléides** (RN) en cause sont des **isotopes** de l'iode (^{131}I, ^{132}I, ^{133}I), du césium (^{134}Cs, ^{137}Cs), du radium (^{226}Ra, ^{228}Ra), du plutonium (^{239}Pu), de l'américium (^{241}Am) ou du tritium (^{3}H).

Effets aléatoires (stochastiques)

A priori tous les radionucléides sont susceptibles d'induire des effets stochastiques. Les incorporations humaines montrent que seuls les RN ayant une répartition hétérogène dans l'organisme, capables de se concentrer dans des organes dits cibles (comme les **actinides** ou les iodes) et/ou de s'y accumuler (ceux dont la **période biologique** est longue, comme le plutonium), sont des **cancérogènes** avérés chez l'homme. Nous considérerons essentiellement les conséquences radiologiques de l'incorporation de RN, mais dans certains cas, en particulier lorsque la **période** physique du RN en cause est très longue, il peut être nécessaire de prendre en compte les conséquences liées à sa toxicité chimique (cas des RN dont l'**activité** spécifique est faible).
Les cas cités ci-après illustrent les différentes situations d'exposition rencontrées dans le milieu industriel ou médical, d'origine accidentelle ou non, et qui ont conduit à l'apparition d'effets à court et à long terme. Ce sont des expositions souvent mixtes, internes et externes, dont les conséquences apparaissent au fil du temps.

Des expositions accidentelles

L'essai nucléaire Bravo

L'essai nucléaire atmosphérique américain Bravo (1er mars 1954) à partir de l'atoll inhabité de Bikini, dans le Pacifique, a entraîné la dispersion d'un panache radioactif et l'exposition à doses élevées de 23 pêcheurs japonais embarqués sur le *Fukuryu Maru* et de 240 habitants des îles Rongelap (à 210 km à l'est du site de tir), Ailinginae et Utirik (à 570 km à l'est de Bikini), dans l'archipel des îles Marshall. Des conditions météorologiques imprévues, avec modification du sens des vents, et une puissance inattendue de l'explosion seraient responsables de ces expositions accidentelles. L'ensemble des sujets ont été exposés à une irradiation **gamma** totale, une irradiation **bêta** de surface et des contaminations internes par **inhalation** ou **ingestion**. Les premiers effets observés ont été liés à l'irradiation externe globale par les poussières radioactives : entre 0,1 et 1,75 **gray** (Gy) pour les habitants des atolls, entre 2 et 6 Gy pour les deux tiers des pêcheurs japonais, s'accompagnant rapidement de signes d'hypoplasie médullaire(1), de syndrome digestif, ainsi que de brûlures cutanées dues au dépôt d'émetteurs bêta de haute énergie sur la peau pour un quart des habitants de Rongelap et Ailinginae. Cette symptomatologie précoce a été réversible dans tous les cas, le retour à la normale n'étant intervenu qu'au bout de deux ans pour certaines atteintes hématologiques des habitants de Rongelap et des pêcheurs japonais.
Le deuxième type d'effet est celui dû à l'exposition à des iodes radioactifs, en particulier des isotopes à vie courte (^{132}I…). Des estimations des doses reçues à la thyroïde aboutirent aux résultats suivants : plusieurs grays chez l'adulte et jusqu'à 200 Gy chez le jeune enfant. Chez les habitants des atolls, les premiers signes d'hypothyroïdies et de nodules thyroïdiens ont été identifiés 9-10 ans après l'exposition. Chez les quelque 245 personnes exposées, 55 nodules thyroïdiens ont été finalement observés dont 16 cancers, tandis que, dans le groupe témoin de 1 495 personnes, 22 nodules dont 7 cancers ont été mis en évidence. Les nodules thyroïdiens ont été observés avec une plus grande

(1) Hypoplasie (médullaire) : insuffisance modérée du développement de cellules d'un tissu, en l'occurrence la moelle osseuse, ou d'un organe.

fréquence chez les enfants les plus jeunes. Quatre des six enfants irradiés avant l'âge d'un an ont développé des nodules thyroïdiens. L'ensemble des habitants suit un traitement substitutif depuis 1965, ce qui contribue à diminuer la fréquence des pathologies thyroïdiennes. Pour les pêcheurs japonais, les estimations de dose à la thyroïde ont été réalisées à leur retour au Japon, plusieurs semaines après l'explosion, avec des doses variant de 0,8 à 4,5 Gy.

L'accident de Tchernobyl

Le 26 avril 1986, le réacteur 4 de la centrale de Tchernobyl (Ukraine) explosait, libérant pendant plusieurs jours dans l'atmosphère des quantités très importantes de RN, comme des isotopes de l'iode : ^{131}I (2 exa**becquerels** [Ebq]), ^{132}I, ^{133}I et les **tellures** ; du césium 137 (75 pétabecquerels [PBq]). Il en résulta une irradiation externe gamma et bêta (en particulier des travailleurs) et une contamination par inhalation lors du passage du nuage, puis, à plus long terme, par ingestion et inhalation.

Chez les travailleurs intervenus en urgence la nuit de l'accident, les conséquences de l'irradiation aiguë externe (en particulier due au ^{137}Cs) avec parfois plus de 10 Gy ont été associées à des brûlures plus ou moins étendues imputables au dépôt d'émetteurs bêta et des atteintes pulmonaires dues à l'inhalation de poussières radioactives, 134 ont été hospitalisés pour syndrome d'irradiation aiguë, parmi lesquels 28 sont décédés dans les semaines suivant l'accident.

Pour la population, dans la zone d'exclusion de 30 km, ainsi que dans de larges zones de Biélorussie et Russie, des dépôts importants de ^{131}I ou d'autres iodes à vie plus courte ont conduit à des doses importantes à la thyroïde, pouvant atteindre ou même dépasser 1 Gy pour les enfants d'un an (environ 15 000 enfants). Chez l'adulte, les doses à la thyroïde ont été environ 10 fois plus faibles. Compte tenu des imprécisions dosimétriques, il est estimé que, chez les enfants restés dans les zones contaminées et ayant consommé le lait produit localement, la dose à la thyroïde provenait environ à 85 % de ^{131}I et à 15 % des iodes à vie courte.

La principale conséquence sanitaire dans la population fut une augmentation précoce (dès 1990) et très importante de cancers de la thyroïde chez l'enfant et l'adolescent. Alors qu'après une irradiation externe l'**incidence** des tumeurs thyroïdiennes augmente avec une latence d'au moins 5 ans. Parmi ceux de moins de 18 ans, 1 800 cas de cancers furent diagnostiqués entre 1990 et 1998 au lieu des quelques dizaines attendus (la fréquence normale d'apparition de ces cancers est de un par million et par an chez l'enfant), en majorité de type papillaire, représentatif des cancers radioinduits. Dans la population, des troubles psychologiques ont également été décrits, imputés au stress post-accidentel et aux conditions de vie. Malgré des dépôts importants dans certains villages, le ^{137}Cs n'a pas entraîné de conséquences sanitaires décelables au cours des quinze premières années suivant l'accident (doses de 10 m**Sv** en moyenne).

Les conséquences des accidents des îles Marshall et de Tchernobyl peuvent être rapprochées : effets généraux précoces, brûlures cutanées, d'une part, effets tardifs, cancers de la thyroïde chez l'enfant – dont il faut souligner la plus grande sensibilité –, d'autre part. En revanche, les effets apparus chez les pêcheurs japonais sont principalement liés à l'irradiation gamma globale et à la **contamination** cutanée par les émetteurs bêta. Bien qu'ils aient vécu 14 jours dans une atmosphère fortement contaminée, aucun effet tardif n'est décrit dans la littérature.

Jack Niedenthal/DR

Ces enfants de l'île Kili font partie des populations des îles Bikini, vivant actuellement dans les îles Marshall ou ailleurs, qui espèrent obtenir prochainement l'autorisation de réintégrer leurs terres, près de cinquante ans après l'essai nucléaire américain qui, en mars 1954, avait notamment contaminé l'équipage du bateau de pêche *Fukuryu-Maru N° 5* (en médaillon).

Expositions professionnelles : l'exemple de la peinture au radium

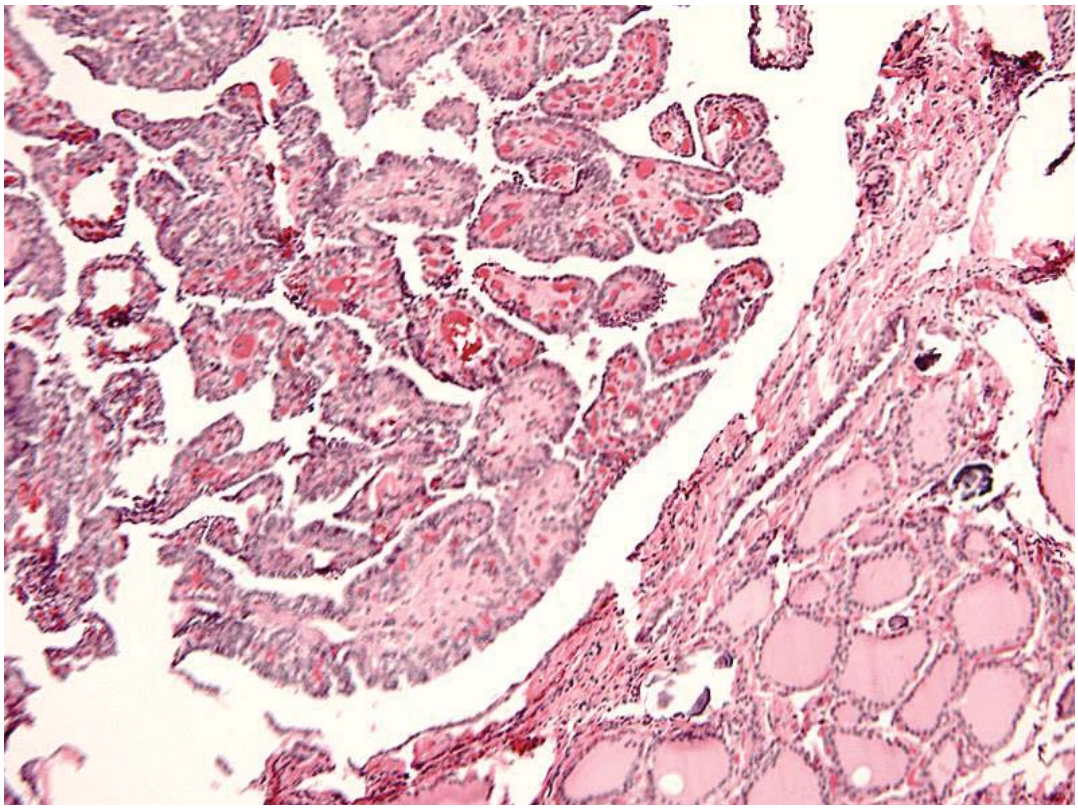
Entre 1920 et 1930, des ouvrières appliquant de la peinture au ^{226}Ra et au ^{228}Ra, pour rendre les cadrans lumineux, avaient pris l'habitude d'affiner leur pinceau en l'humidifiant avec les lèvres ; des milliers d'entre elles ont absorbé des activités de l'ordre de 37 mégabecquerels (MBq). L'ingestion chronique de radium fut responsable de l'excès de décès par cancer osseux. Cependant, les enquêtes **épidémiologiques** ont montré que la probabilité d'induction d'un **ostéosarcome** pour une activité inférieure à 3 MBq est très faible.

Exposition chronique de la population : le cas du complexe Mayak

Le complexe russe de Mayak (Oural) fut construit dès 1947, près de Kyshtym et à environ 100 km de Tcheliabinsk, dans le but de produire le plus rapidement possible des armes nucléaires. C'est ainsi que les rejets furent effectués dans l'environnement sans aucune précaution, en particulier dans la rivière Techa. Plusieurs accidents survenus au cours de cette période, comme celui dit de Kyshtym le 29 septembre 1957, furent révélés plus de vingt ans après. L'ensemble des rejets liquides serait de 40 EBq et aurait exposé près de 250 000 personnes. Les conséquences sur la santé et sur l'environnement des rejets dits "normaux" et des accidents sont considérables. La reconstitution des doses reçues est cependant

radionucléide	période physique	période effective (chez l'adulte)
tritium (^{3} H)	12 ans	12 jours
iode 131 (^{131} I)	8 jours	8 jours
iode 132 (^{132} I)	2 heures	2 heures
iode 133 (^{133} I)	21 heures	21 heures
césium 131 (^{134} Cs)	2 ans	65 jours
césium 137 (^{137} Cs)	30 ans	70 jours
plutonium (^{239} Pu)	24 100 ans	> 100 ans (200 ans)
américium (^{241} Am)	433 ans	> 100 ans (140 ans)

Tableau.
Périodes, physique et effective, de quelques-uns des principaux radionucléides pouvant être rencontrés lors d'expositions accidentelles (valeurs arrondies, cf. tableau pp. 109-110).



Brown University/Providence [Rhode Island]

Cancer papillaire de la thyroïde. Perte de l'architecture normale avec de nombreuses papilles envahies par une masse fibro-vasculaire bordée par une ou plusieurs couches de cellules épithéliales cubiques. En bas à droite, la thyroïde présente un aspect normal avec des follicules remplis de colloïde.

d'autant plus problématique que les faits sont anciens et n'ont pas été suivis précisément. Une augmentation de la fréquence des leucémies a été constatée chez 17 200 personnes suivies depuis 1950 ; l'excès serait de 40 % avec 37 cas observés au lieu de 22 attendus. La mortalité des riverains de la Techa serait plus élevée que la moyenne nationale, en particulier du fait d'une augmentation des tumeurs malignes, mais cette indication n'est pas confirmée par des publications scientifiques.

Exposition de patients : l'affaire du Thorotrast®

Entre les années 1930 et 1950, le thorium 232 (^{232}Th) fut utilisé sous forme de Thorotrast® (ThO_2) comme substance de contraste en **angiographie**. Ces particules très fines sont **phagocytées** dans le système réticulo-**endothélial** du foie, de la rate et de la moelle. Les doses sur 30 ans ont été estimées à 7,5 Gy au foie, 2,7 Gy à la moelle. Ces pratiques appliquées dans plusieurs pays ont entraîné un excès de cancers, principalement du foie mais aussi du pancréas, un excès de leucémies et, plus rarement, d'ostéosarcomes.

Effets certains (déterministes)

Bien que plus rares, des effets déterministes aigus peuvent survenir à la suite d'une contamination interne dans des conditions particulières de contamination : une répartition relativement uniforme du RN dans le corps (comme avec le tritium ou le césium), une accumulation rapide due à des administrations répétées, une contamination de la peau ou la présence de RN émettant un rayonnement gamma important (strontium, yttrium, radium). Les effets déterministes apparaissent précocement après la contamination, et leur gravité augmente avec la dose. Des accidents de ce type ont été décrits dans des situations diverses : explosion dans un site nucléaire, erreurs lors de traitements médicaux (or colloïdal, yttrium), etc. Quand des doses de 1 à 2 Gy sont délivrées au corps entier ou à la moelle osseuse pendant 1 à 3 jours, des signes d'hypoplasie de la moelle ou des syndromes d'**irradiation aiguë** peuvent apparaître. De telles situations ont été décrites suite à une contamination par du tritium, de l'américium 241 (^{241}Am), de l'or 198 (^{198}Au) avec des doses cumulées respectivement de 10 à 12 Gy, 5,5 Gy et 4 Gy.

Un accident médical

Ainsi, en 1968 aux États-Unis (Wisconsin), une patiente de 73 ans ayant reçu une injection intraveineuse de 200 mCi (7,4 gigabecquerels [GBq]) au lieu de 200 µCi (7,4 MBq) d'or colloïdal 198, pour une **scintigraphie** hépatique dans un but diagnostic, décéda 69 jours plus tard. Dans ce cas, il n'y eut pas de syndrome d'irradiation aiguë ; en revanche, la chute dramatique du nombre des plaquettes déclencha des hémorragies généralisées. En dépit des transfusions, ce nombre ne put être augmenté au-delà de 8 000/mm^3.

L'accident de Hanford

À Hanford (États-Unis) en 1976, un travailleur manipulant de l'américium 241 se contamina gravement lors de l'explosion de la boîte à gants qu'il utilisait. Il subit des brûlures cutanées (à cause de l'acide nitrique), reçut des éclats sur la face et le cou, le patient fut de ce fait contaminé au niveau de ses blessures et par inhalation. Le patient fut traité rapidement : après les soins d'urgence, on lui injecta du DTPA calcique d'abord (environ 2 heures après l'accident), puis du DTPA zincique jusqu'en 1980. Reconnu comme non toxique et efficace pour réduire la dose radiologique,

le DTPA est depuis lors disponible aux États-Unis. Le patient fut désormais suivi médicalement, et ce jusqu'à son décès survenu, onze ans après l'accident, par suite des complications d'une maladie coronarienne chronique ayant débuté deux ans avant l'accident. Le patient fut suivi sur le plan dosimétrique de son vivant. Après autopsie, des contrôles radiochimiques furent réalisés : les principales cibles furent le squelette et le foie. La **dosimétrie** fut également faite au niveau du poumon et de la peau à l'endroit des blessures initiales. Les **débits de dose** évoluèrent comme suit : au poumon de 0,12 Gy/j le jour de l'accident à 0,0001 Gy/j le jour de sa mort ; au foie de 0,36 Gy/j à 0, 0017 Gy/j. Le seul effet finalement attribué aux radiations fut une diminution transitoire du nombre de **lymphocytes** et plaquettes, sans conséquence sur la santé.

Une exposition aiguë grave au tritium ?

Deux cas de décès ont été attribués à une exposition professionnelle au tritium en Allemagne (en 1961 et 1964). La première personne avait travaillé avec des quantités importantes de tritium (de l'ordre de 6 térabecquerels [TBq]). Son autopsie mit en évidence une nette diminution du nombre des cellules de la moelle osseuse. Des dosages biologiques de tritium révélèrent des concentrations élevées dans l'urine (4 kilobecquerels [kBq]/ml) et près de 1 kBq/g au niveau de la moelle osseuse. Le deuxième travailleur, exposé entre autres à des peintures au tritium, a présenté au bout de deux ans et demi les signes d'une irradiation aiguë ; des dosages urinaires faisaient état d'une quantité de tritium 2 à 5 fois supérieure à la concentration maximale permise. Dans ces deux cas, l'auteur souligne que la responsabilité du tritium n'est pas prouvée et que les dosages sont très approximatifs du fait de la période biologique relativement courte de l'eau tritiée.

L'accident de Goiania

Nous sommes là en présence d'un accident mixte d'irradiation externe et interne. En 1987, à la suite du démantèlement par des ferrailleurs d'une source de chlorure de césium abandonnée (50,9 TBq, soit 1 375 Ci) normalement utilisée en téléthérapie, de nombreux habitants de Goiania au Brésil subirent des irradiations globales ou localisées ou furent contaminés, essentiellement par ingestion. Au total, 112 800 personnes furent examinées : 120 cas furent identifiés avec de simples dépôts sur les vêtements, 139 personnes furent reconnues comme ayant subi une irradiation externe et interne. Les quantités de césium incorporées furent comprises entre 1 kBq et 1 GBq. Quatre personnes sont décédées dans les semaines suivant l'accident d'un syndrome d'irradiation aiguë. Un enfant de 6 ans reçut la **dose engagée** la plus forte, environ 6 Gy. Environ 30 personnes ont reçu des doses engagées sur la vie comprises entre 0,1 et 1 Gy ; l'étude épidémiologique d'éventuelles conséquences sanitaires tardives se poursuit.

Des mesures analytiques précoces indispensables

Dans le cas de contamination interne avec fortes expositions, les effets sont le plus souvent d'apparition tardive, même en cas de dose engagée élevée pouvant dépasser le gray. Cependant, dans certains cas, des effets déterministes sont survenus précocement. Qu'il s'agisse d'une exposition soudaine ou d'une exposition longue, la durée réelle de celle-ci est souvent mal connue. De plus, la connaissance incomplète du **terme source** pose le problème de la reconstitution de la dose absorbée par un individu. Ainsi, les dosages biologiques sont souvent réalisés plusieurs semaines après l'accident ou l'exposition. Il est indispensable de mettre en place tant des mesures analytiques précoces dans l'environnement et la chaîne alimentaire (en particulier dans des contaminations avec des iodes à vie courte), que des mesures directes humaines.

DR

Contrôle radiologique d'un très jeune enfant suite à l'accident survenu en septembre 1987 à Goiana (Brésil), où un groupe de personnes furent contaminés au césium 137.

POUR EN SAVOIR PLUS

Yves Belot, Monique Roy et Henri Métivier, *Le tritium, de l'environnement à l'Homme*, éd. EDP Sciences, coll. IPSN, 200 p., 1996.

Pierre Galle, *Toxiques nucléaires*, éd. Masson, 1997.

Igor A. Gusev, Angelina K. Guskova et Fred A. Mettler, *Medical management of radiation accidents*, ed. CRC Press, 2001.

J.-C. Nenot, Bilan des accidents d'exposition interne, in *Radioprotection*, 28 [3], pp. 265-277, 1993.

Daniel Robeau, *Catastrophes et accidents nucléaires dans l'ex-Union soviétique*, éd. EDP Sciences, coll. IPSN, 198 p., 2001.

United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, *Report to the General Assembly*, vol. 2, 2000.

> **Florence Ménétrier**, Dr **Anne Flüry-Hérard***
Direction des sciences du vivant-Cellule Carmin
CEA centre de Fontenay-aux-Roses
*Cabinet du Haut-commissaire à l'énergie atomique
> **Daniel Schoulz**
Direction des applications militaires
CEA centre DAM–Île de France

F Des rayonnements aux doses

La radioactivité est un processus par lequel certains nucléides naturels ou artificiels (en particulier ceux créés par fission, scission d'un noyau lourd en deux morceaux) subissent une désintégration spontanée, avec dégagement d'énergie, aboutissant généralement à la formation de nouveaux nucléides. Appelés pour cette raison radionucléides, ils sont instables du fait de leur nombre de nucléons (protons, d'une part, neutrons, de l'autre) ou de leur état énergétique. Ce phénomène s'accompagne de l'émission d'un ou de plusieurs types de rayonnements, ionisants ou non et/ou de particules. Les rayonnements ionisants sont des rayonnements électromagnétiques ou corpusculaires suffisamment énergétiques pour ioniser sur leur passage certains atomes de la matière traversée en leur arrachant des électrons. Ils peuvent l'être *directement* (c'est le cas des particules alpha) ou *indirectement* (cas des rayons gamma et des neutrons).

Le rayonnement alpha, formé de noyaux d'hélium 4 (deux protons et deux neutrons), est très peu pénétrant. Il est arrêté par une feuille de papier ou par les couches superficielles de la peau. Son trajet dans les tissus biologiques ne dépasse pas quelques dizaines de micromètres. Ce rayonnement est donc fortement ionisant, c'est-à-dire qu'il arrache facilement des électrons aux atomes du matériau traversé, car ses particules cèdent toute leur énergie sur un faible parcours. Pour cette raison, le risque présenté par les radionucléides émetteurs alpha est celui d'une exposition interne.

Le rayonnement bêta, constitué d'électrons (radioactivité bêta moins) ou de positons (radioactivité bêta plus), est moyennement pénétrant. Les particules émises par les émetteurs bêta sont arrêtées par quelques mètres d'air, une feuille d'aluminium ou sur quelques millimètres d'épaisseur dans les tissus biologiques. Ils peuvent donc traverser les couches superficielles de la peau.

Le rayonnement gamma, composé de photons de haute énergie peu ionisants mais très pénétrants (plus que les photons des rayons X utilisés en radiodiagnostic), peut parcourir plusieurs centaines de mètres dans l'air. D'épais écrans de béton ou de plomb sont nécessaires pour s'en protéger.

Pour le **rayonnement neutronique**, l'interaction est aléatoire et, de ce fait, il n'est arrêté que par une forte épaisseur de béton, d'eau ou de paraffine. Non chargé électriquement, le neutron n'est en effet arrêté dans l'air que par des noyaux d'éléments légers, noyaux dont la masse est proche de celle du neutron.

La quantité d'énergie délivrée par un rayonnement se traduit par une dose qui est évaluée de différentes manières, suivant qu'elle prend en compte la quantité d'énergie absorbée, son débit ou ses effets biologiques :

- la dose absorbée est la quantité d'énergie absorbée en un point par unité de masse de matière (inerte ou vivante), selon la définition de la Commission internationale des unités et des mesures radiologiques (ICRU). Elle s'exprime en grays (Gy) : 1 gray correspond à une énergie absorbée de 1 joule par kilogramme de matière. La *dose absorbée à l'organe* est obtenue en faisant la moyenne des doses absorbées en différents points, selon la définition de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) ;
- le débit de dose, quotient de l'accroissement de dose par l'intervalle de temps, définit l'intensité d'irradiation (énergie absorbée par la matière par unité de masse et de temps). L'unité légale est le gray par seconde (Gy/s), mais le Gy/mn est couramment utilisé. Par ailleurs, un rayonnement a une **efficacité biologique relative (EBR)** plus grande qu'un autre lorsque l'effet obtenu pour une même dose est plus important ou quand la dose nécessaire pour observer cet effet est plus faible ;
- la dose équivalente est la quantité de dose absorbée entendue comme le produit de la dose absorbée dans un tissu ou un organe par un facteur de pondération, différent selon la nature et à l'énergie du rayonnement et qui varie de 1 à 20 : les rayonnements alpha sont ainsi considérés comme 20 fois plus nocifs que les rayonnements gamma en fonction de leur efficacité biologique pour des effets aléatoires

F (suite)

Foulon/CEA

Techniciens aux télémanipulateurs d'une des chaînes de l'installation Atalante, au centre CEA de Marcoule. Blindées, ces chaînes arrêtent les rayonnements. Les opérateurs portent les dosimètres qui permettent d'en vérifier l'efficacité en permanence.

(ou stochastiques). Une dose équivalente s'exprime en sieverts (Sv) ;

• la dose efficace est une grandeur introduite pour tenter d'évaluer le détriment en terme d'effets stochastiques au niveau du corps entier. C'est la somme des doses équivalentes reçues par les différents organes et tissus d'un individu, pondérées par un facteur propre à chacun d'entre eux (facteurs de pondération) en fonction de sa sensibilité propre. Elle permet d'additionner des doses provenant de sources différentes, d'irradiation externe ou interne. Pour les situations d'exposition interne (inhalation, ingestion), la dose efficace est calculée sur la base du nombre de becquerels incorporés pour un radionucléide donné (DPUI, dose par unité d'incorporation). S'exprime en sieverts (Sv).

• la dose engagée, à la suite d'une exposition interne, est la dose cumulée reçue dans les cinquante années (pour les travailleurs et les adultes) ou jusqu'à l'âge de soixante-dix ans (pour les moins de 20 ans) suivant l'année de l'incorporation du radionucléide, si celui-ci n'a pas disparu auparavant par décroissance physique ou élimination biologique ;

• la **dose collective** est la dose reçue par une population, définie comme le produit du nombre d'individus (par exemple ceux travaillant dans une installation nucléaire où c'est un outil utile dans le cadre de l'organisation et de l'application du principe ALARA) par la dose moyenne équivalente ou efficace reçue par cette population ou comme la somme des doses efficaces individuelles reçues. Elle s'exprime en homme-sieverts (H.Sv). Elle ne devrait s'utiliser que pour des groupes relativement homogènes quant à la nature de leur exposition.

B Les voies d'atteinte de l'homme

L'**exposition** de l'homme, c'est-à-dire la mise en présence (par contact ou non) de l'organisme et d'un agent chimique, physique ou radiologique, peut s'effectuer de manière externe ou interne. Dans le cas des **rayonnements ionisants**, elle se traduit par un dépôt d'énergie sur tout ou partie du corps. Ils peuvent causer une **irradiation externe** directe lorsque le sujet se trouve placé sur la trajectoire d'un rayonnement émis par une source radioactive située à l'extérieur de l'organisme. L'individu peut être atteint directement ou après réflexion sur les surfaces environnantes. L'irradiation peut être **aiguë** ou **chronique**. Le terme de **contamination** est employé en cas de dépôt de matières (en l'occurrence **radioactives**) sur des structures, des surfaces, des objets ou, en l'occurrence, un organisme vivant. La contamination radiologique, imputable à la présence de **radionucléides**, peut s'effectuer par voie **externe**, à partir du milieu récepteur (air, eau) et des milieux vecteurs (sols, sédiments, couvertures végétales, matériels), par contact avec la peau et les cheveux (contamination cutanée), ou par voie **interne** lorsque les radionucléides sont **incorporés** soit par **inhalation** (gaz, particules) à partir de l'atmosphère, soit par **ingestion**, principalement à partir de produits alimentaires ou de boissons (eau, lait), soit encore par pénétration (blessure, brûlure ou passage à travers la peau). Il est question d'**intoxication** lorsque c'est essentiellement la toxicité chimique qui est en cause.

Dans le cas d'une **contamination interne**, la dose délivrée (appelée **dose "engagée"**) au sein de l'organisme, au cours du temps, est calculée sur 50 ans pour l'adulte, et jusqu'à l'âge de 70 ans pour l'enfant. Les paramètres pris en compte pour le calcul sont les suivants : la nature, la quantité incorporée de radionucléide (RN), la forme chimique du composé, la **période effective**[1] du RN dans l'organisme (fonction de la **période** physique et de la **période biologique**), le type de **rayonnement**, le mode d'exposition (inhalation, ingestion, blessure, passage cutané), la répartition dans l'organisme (dépôt dans des organes cibles ou répartition homogène), ainsi que la radiosensibilité des tissus et l'âge du sujet contaminé.

La **radiotoxicité**, enfin, est la toxicité due aux rayonnements ionisants émis par un radionucléide inhalé ou ingéré. C'est d'un tout autre ordre d'idée que relève la notion trompeuse de **radiotoxicité potentielle**, qui est en fait un *inventaire radiotoxique* difficile à évaluer et entaché de nombreuses incertitudes.

(1) La période effective (Te) est évaluée comme suit en fonction de la période physique (Tp) et de la période biologique (Tb) : $1 / Te = 1 / Tp + 1 / Tb$.

A Radioactivité naturelle et radioactivité artificielle

Tout ce qui se trouve à la surface de la Terre a toujours été soumis à l'action de rayonnements ionisants provenant de sources naturelles. L'irradiation naturelle, qui représente près de 85,5 % de la radioactivité totale (naturelle et artificielle), est due, pour plus de 71 %, aux rayonnements telluriques et, pour environ 14,5 %, aux rayonnements cosmiques.

Les radionucléides formés par interaction des **rayonnements cosmiques**, issus des étoiles et surtout du Soleil, avec les noyaux des éléments présents dans l'atmosphère (oxygène et azote) sont, dans l'ordre d'importance des doses (encadré F, *Des rayonnements aux doses*, p. 66) qu'ils engendrent pour l'homme : le carbone 14, le béryllium 7, le sodium 22 et le tritium (hydrogène 3). Ces deux derniers entraînent des doses extrêmement faibles.

Le **carbone 14**, de période **5 730 ans**, se retrouve dans l'organisme humain. Son activité par unité de masse de carbone a varié au cours du temps : elle a diminué avec les rejets de gaz carbonique provenant de la combustion des combustibles fossiles puis augmenté avec les essais nucléaires atmosphériques.

Le **béryllium 7**, de période **53,6 jours**, se dépose sur les surfaces foliaires des végétaux et pénètre par ingestion dans l'organisme humain (encadré B, *Les voies d'atteinte de l'homme*, p. 13). Environ 50 Bq (becquerels) par an de béryllium 7 sont ainsi ingérés.

Les principaux **radionucléides** dits **"primordiaux"** sont le potassium 40, l'uranium 238 et le thorium 232. Avec leurs descendants radioactifs, ces éléments sont présents dans les roches, les sols et dans beaucoup de matériaux de construction. Leur concentration est généralement très faible mais elle est variable selon la nature des roches. Les rayonnements gamma émis par ces radionucléides constituent le **rayonnement tellurique** qui entraîne une exposition externe de l'organisme. Les radionucléides primordiaux et beaucoup de leurs descendants à vie longue se retrouvent également à l'état de traces dans les eaux de boisson et les végétaux : d'où une exposition interne par ingestion à laquelle peut s'ajouter une faible exposition par inhalation après une remise en suspension dans l'air par les poussières.

Émetteur bêta et gamma de période **1,2 milliard d'années**, le **potassium 40** n'a pas de descendants radioactifs. Présent à raison de 0,0118 % dans le potassium naturel, cet isotope radioactif pénètre dans l'organisme humain par ingestion. La masse de potassium naturel dans le corps humain est indépendante de la quantité ingérée.

Émetteur alpha de période **4,47 milliards d'années**, **l'uranium 238** a treize principaux descendants radioactifs émetteurs alpha, bêta et gamma, dont le **radon 222** (**3,82 jours**) et l'**uranium 234** (**0,246 million d'années**). L'uranium 238 avec ses deux descendants, le **thorium 234** (**24,1 jours**) et le **protactinium 234m**[1] (**1,18 minute**), et l'**uranium 234** sont essentiellement incorporés par ingestion et se concentrent majoritairement dans les os et les reins. Le **thorium 230**, engendré par l'uranium 234, est un émetteur alpha de période **80 000 ans**. C'est un ostéotrope, mais il pénètre surtout par la voie pulmonaire (inhalation). Le **radium 226**, descendant du thorium 230, est un émetteur alpha de période **1 600 ans**. C'est également un ostéotrope et son apport à l'organisme dépend avant tout de sa présence dans l'alimentation. Un autre ostéotrope, le **plomb 210** (**22,3 ans**), est incorporé par inhalation et surtout par ingestion.

Émetteur alpha de période **14,1 milliards d'années**, le **thorium 232** compte dix principaux descendants radioactifs émetteurs alpha, bêta et gamma, dont le **radon 220** (**55 secondes**). Le thorium 232 pénètre surtout dans l'organisme par inhalation. Le **radium 228**, descendant direct du thorium 232, est un émetteur bêta et a une période de **5,75 ans**. Son apport à l'organisme est essentiellement dû à l'alimentation.

Le radon, descendant radioactif gazeux de l'uranium 238 et du thorium 232, émane du sol et des matériaux de construction et constitue avec ses descendants à vie courte émetteurs alpha une source d'exposition interne par inhalation. Le radon représente la source la plus importante de l'irradiation naturelle (de l'ordre de 40 % de la radioactivité totale).

L'organisme humain contient près de 4 500 Bq de potassium 40, 3 700 Bq de carbone 14 et 13 Bq de radium 226, essentiellement apportés par l'alimentation.

À l'irradiation naturelle s'ajoute la composante due aux activités humaines, qui résulte des applications médicales des rayonnements ionisants et dans une moindre mesure de l'industrie nucléaire. Elle représente environ 14,5 % de la radioactivité totale au niveau global, beaucoup plus dans les pays les plus développés. Dans le domaine médical (plus de 1 mSv/an en moyenne en France), l'irradiation par des sources externes est prépondérante : radiodiagnostic (rayons X) et radiothérapie, qui après avoir utilisé des sources de césium 137 et de cobalt 60, est réalisée de plus en plus souvent des accélérateurs linéaires. L'irradiation par des voies internes (curiethérapie par iridium 192) a des indications plus restreintes (cancer du col de l'utérus par exemple). Les propriétés métaboliques et physicochimiques d'une vingtaine de radionucléides sont utilisées pour des **activités médicales** et en **recherche biologique**. Les applications médicales en sont, d'une part, les radiodiagnostics (scintigraphies et radio-immunologie) et,

d'autre part, les traitements, parmi lesquels ceux de pathologies de la thyroïde par l'iode 131, la radio-immunothérapie dans certaines maladies hématologiques (phosphore 32) ou le traitement de métastases osseuses par du strontium 89 ou des phosphonates marqués, à côté d'autres utilisations de produits radiopharmaceutiques. Parmi les radionucléides les plus employés : le **technétium 99m**[1] de période **6,02 heures** et le **thallium 201** de période **3,04 jours** (scintigraphie), l'**iode 131** de période **8,04 jours** (traitement de l'hyperthyroïdie), l'**iode 125** de période **60,14 jours** (radio-immunologie), le **cobalt 60** de période **5,27 ans** (radiothérapie), l'**iridium 192** de période **73,82 jours** (curiethérapie). La contribution des examens radiologiques à la radioactivité totale représente en moyenne 14,2 %.

Les **anciens essais nucléaires dans l'atmosphère** ont engendré des retombées sur l'ensemble du globe et ont donné lieu à une exposition des populations et à une **contamination** de la chaîne alimentaire par un certain nombre de radionucléides, dont la plupart ont aujourd'hui complètement disparu, étant donné leur période radioactive. Subsistent le **césium 137** (**30 ans**), le **strontium 90** (**29,12 ans**), partiellement le **krypton 85** (**10,4 ans**) et le **tritium** (**12,35 ans**), et les isotopes du **plutonium** (période de **87,7 ans** à **24 100 ans**). Actuellement, les doses correspondant aux retombées de ces essais sont essentiellement imputables aux **produits de fission** (césium 137) et au carbone 14, loin devant les **produits d'activation** et le plutonium.

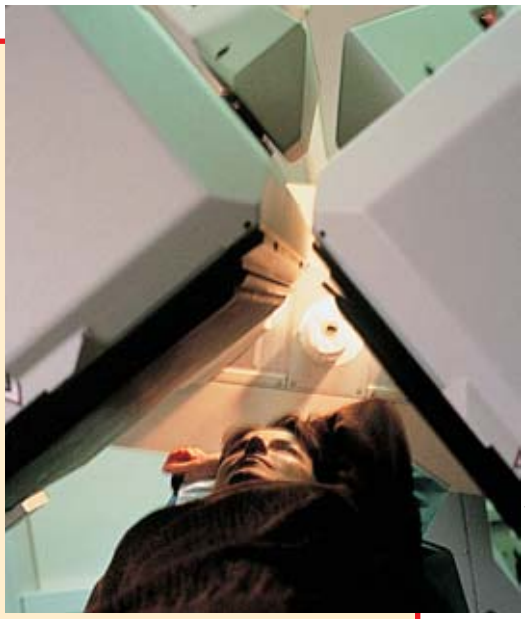
Lors de l'**accident de Tchernobyl** (Ukraine), survenu en 1986, la radioactivité totale rejetée dans l'atmosphère a été de l'ordre de 12 milliards de milliards de becquerels sur une durée de 10 jours. Des radionucléides appartenant à trois catégories ont été disséminés. La première est constituée des produits de fission volatils tels que l'**iode 131**, l'**iode 133** (**20,8 heures**), le **césium 134** (**2,06 ans**), le **césium 137**, le **tellure 132** (**3,26 jours**). La deuxième catégorie est composée par les produits de fission solides et les **actinides** qui ont été relâchés dans des proportions beaucoup plus faibles, en particulier les isotopes du strontium (^{89}**Sr** de période **50,5 jours** et ^{90}**Sr**), les isotopes du ruthénium (^{103}**Ru** de période **39,3 jours** et ^{106}**Ru** de période **368,2 jours**) et le **plutonium 239** (**24 100 ans**). La troisième catégorie se rapporte aux gaz rares qui, bien que représentant la majorité de l'activité émise, se sont rapidement dilués dans l'atmosphère. Ce sont principalement le **xénon 133** (**5,24 jours**) et le **krypton 85**.

Les contributions des anciens essais nucléaires atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl à la radioactivité totale avoisinent respectivement 0,2 % (0,005 mSv) et 0,07 % (0,002 mSv).

La **production d'énergie d'origine nucléaire**, pour l'ensemble de son cycle, ne représente qu'environ 0,007 % de la radioactivité totale. La quasi-totalité des radionucléides reste confinée dans les réacteurs nucléaires et les installations du cycle du **combustible**. Dans un réacteur nucléaire, les réactions ayant lieu au sein du combustible conduisent à la formation de **transuraniens**. L'**uranium 238**, non **fissile**, peut capturer des neutrons, donnant notamment naissance à des isotopes du plutonium (^{239}**Pu**, ^{240}**Pu** de période **6 560 ans** et ^{241}**Pu** de période **14,4 ans**) et à de l'**américium 241** (**432,7 ans**). Les produits de fission les plus importants engendrés lors des réactions de fission de l'**uranium 235** (**704 millions d'années**) et du **plutonium 239** sont l'**iode 131**, le **césium 134**, le **césium 137**, le **strontium 90** et le **sélénium 79** (**1,1 million d'années**).

Les principaux radionucléides présents dans les rejets, s'effectuant dans un cadre réglementaire très strict, sont, pour les rejets liquides, le **tritium**, le **cobalt 58** (**70,8 jours**), le **cobalt 60**, l'**iode 131**, le **césium 134**, le **césium 137** et l'**argent 110m** (**249,9 jours**). Pour les rejets gazeux, le **carbone 14** est le radionucléide le plus fréquent, émis dans la plupart des cas sous la forme de gaz carbonique. Pour l'ensemble des réacteurs dans le monde, la production totale de gaz carbonique correspond au dixième de la production naturelle annuelle d'origine cosmique.

Par ailleurs, certains radionucléides liés à la filière nucléaire présentent une **toxicité chimique** (encadré D, *Toxicité radiologique et toxicité chimique*, p. 32).



Laurence Médard/CEA

Scintigraphie conventionnelle réalisée au Service hospitalier Frédéric Joliot (SHFJ). La gamma caméra permet d'obtenir une imagerie fonctionnelle d'un organe après administration, le plus souvent par voie intraveineuse, d'un médicament radioactif (radiopharmaceutique) au patient. Les radionucléides utilisés sont spécifiques de l'organe étudié : par exemple, le technétium 99m pour les reins et les os, le thallium 201 pour le myocarde. Le radiopharmaceutique injecté émet de simples photons gamma captés par deux détecteurs plans qui sont placés à 180° ou à 45° selon l'examen.

(1) m pour métastable. Un nucléide est dit métastable lorsqu'il existe un retard de transition entre l'état excité et l'état stable de l'atome.

Caractéristiques **physiques** et **toxicologiques** de **radionucléides** significatifs

radionucléide	émission	période physique(1)	activité massique (Bq/g)(2)	période effective(3)	DPUI(4) (Sv)(1) inhalation 5 µm, travailleurs (organe cible)(5)	DPUI(4) (Sv)(1) ingestion 1 µm, public (organe cible)(5)	facteur ingestion(1) f_1 adulte
^{3}H tritium (eau tritiée)	bêta	12,35 ans	$3{,}57 \cdot 10^{14}$	12 j	$1{,}8 \cdot 10^{-11}$ (corps entier)	$1{,}8 \cdot 10^{-11}$ (estomac)	1
^{7}Be béryllium	gamma	53,6 j	$1{,}29 \cdot 10^{16}$	41 j	$4{,}8 \cdot 10^{-11}$ (ET)(6)	$2{,}8 \cdot 10^{-11}$ (côlon)	$5 \cdot 10^{-3}$
^{14}C carbone	bêta	5 730 ans	$1{,}65 \cdot 10^{11}$	40 j	$6{,}5 \cdot 10^{-12}$ (poumon)	$5{,}8 \cdot 10^{-10}$ (estomac)	1
^{40}K potassium	bêta, gamma	$1{,}2 \cdot 10^{9}$ ans	$2{,}63 \cdot 10^{5}$		$2{,}4 \cdot 10^{-9}$ (côlon)	$6{,}2 \cdot 10^{-9}$ (côlon)	1
^{58}Co cobalt	bêta, gamma	70,8 j	$1{,}18 \cdot 10^{15}$	8,4 j	$1{,}7 \cdot 10^{-9}$ (ET)(6)	$7{,}4 \cdot 10^{-10}$ (côlon)	0,1
^{60}Co cobalt	bêta, gamma	5,27 ans	$4{,}18 \cdot 10^{13}$	9,5 j	$9 \cdot 10^{-9}$ (poumon)	$3{,}4 \cdot 10^{-9}$ (côlon)	0,1
^{79}Se sélénium	bêta	$1{,}1 \cdot 10^{6}$ ans	$1{,}52 \cdot 10^{8}$		$3{,}1 \cdot 10^{-9}$ (rein)	$2{,}9 \cdot 10^{-9}$ (rein)	0,8
^{85}Kr krypton	bêta, gamma	10,4 ans	$1{,}5 \cdot 10^{13}$				
^{89}Sr strontium	bêta	50,5 j	$1{,}07 \cdot 10^{15}$	50,3 j	$5{,}6 \cdot 10^{-9}$ (poumon)	$2{,}6 \cdot 10^{-9}$ (côlon)	0,3
^{90}Sr strontium	bêta	29,12 ans	$5{,}05 \cdot 10^{12}$	15,6 ans	$7{,}8 \cdot 10^{-11}$ (poumon)	$2{,}8 \cdot 10^{-8}$ (os)	0,3
^{90}Y yttrium	bêta, gamma	2,67 j	$2{,}01 \cdot 10^{16}$	64 h	$1{,}7 \cdot 10^{-9}$ (côlon)	$2{,}7 \cdot 10^{-9}$ (côlon)	10^{-4}
^{99}Tc technétium	bêta, gamma	$2{,}14 \cdot 10^{5}$ ans	$6{,}25 \cdot 10^{8}$	$\simeq$ 3 j	$4 \cdot 10^{-10}$	$6{,}4 \cdot 10^{-10}$	0,5
^{99m}Tc technétium	gamma	6,02 h	$1{,}95 \cdot 10^{17}$	6 h	$2{,}9 \cdot 10^{-11}$ (ET)(6)	$2{,}2 \cdot 10^{-11}$ (côlon)	0,5
^{103}Ru ruthénium	bêta, gamma	39,3 j	$1{,}19 \cdot 10^{15}$	2,38 j		$7{,}3 \cdot 10^{-10}$ (côlon)	0,05
^{106}Ru ruthénium	bêta, gamma	368,2 j	$1{,}24 \cdot 10^{14}$	2,4 j	$3{,}5 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-9}$ (côlon)	0,05
^{110m}Ag argent	bêta, gamma	249,9 j	$1{,}75 \cdot 10^{14}$	4,8 j	$7{,}3 \cdot 10^{-9}$ (poumon)	$2{,}8 \cdot 10^{-9}$ (côlon)	0,05
^{124}Sb antimoine	bêta, gamma	60,2 j	$6{,}47 \cdot 10^{14}$	23 j	$4{,}7 \cdot 10^{-9}$ (poumon)	$2{,}5 \cdot 10^{-9}$ (côlon)	0,1
^{125}I iode	gamma	60,14 j	$6{,}42 \cdot 10^{14}$		$1{,}4 \cdot 10^{-8}$ (thyroïde)	$1{,}5 \cdot 10^{-8}$ (thyroïde)	1
^{129}I iode	bêta, gamma	$1{,}57 \cdot 10^{7}$ ans	$6{,}54 \cdot 10^{6}$		$5{,}1 \cdot 10^{-8}$ (thyroïde)	$1{,}1 \cdot 10^{-7}$ (thyroïde)	1
^{131}I iode	bêta, gamma	8,04 j	$4{,}6 \cdot 10^{15}$	7,6 j	$2 \cdot 10^{-8}$ (thyroïde)	$2{,}2 \cdot 10^{-8}$ (thyroïde)	1
^{132}I iode HB	bêta, gamma	2,3 h	$3{,}82 \cdot 10^{17}$	2 h	$3{,}1 \cdot 10^{-10}$ (thyroïde)	$2{,}9 \cdot 10^{-10}$ (thyroïde)	1
^{133}I iode	bêta, gamma	20,8 h	$4{,}19 \cdot 10^{16}$	0,87 j	$4 \cdot 10^{-9}$ (thyroïde)	$4{,}3 \cdot 10^{-9}$ (thyroïde)	1
^{133}Xe xénon	bêta, gamma	5,24 j	$6{,}6 \cdot 10^{15}$				
^{134}Cs césium	bêta, gamma	2,06 ans	$4{,}78 \cdot 10^{13}$	65 j	$9{,}6 \cdot 10^{-9}$ (ET)(6)	$1{,}9 \cdot 10^{-8}$ (corps entier)	1
^{135}Cs césium	bêta, gamma	$2{,}3 \cdot 10^{6}$ ans	$4{,}26 \cdot 10^{7}$		$3{,}1 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-9}$	1
^{135}Xe xénon	bêta, gamma	9,2 h	$9{,}33 \cdot 10^{16}$				
^{137}Cs césium	bêta, gamma	30 ans	$3{,}22 \cdot 10^{12}$	69,5 j	$6{,}7 \cdot 10^{-9}$ (ET)(6)	$1{,}3 \cdot 10^{-8}$ (côlon)	1
^{144}Ce cérium	bêta, gamma	284,3 j	$1{,}18 \cdot 10^{14}$	191 j	$2{,}9 \cdot 10^{-8}$ (poumon)	$5{,}2 \cdot 10^{-9}$ (côlon)	$5 \cdot 10^{-4}$
^{198}Au or	bêta gamma	2,69 j	$9{,}07 \cdot 10^{15}$	2,6 j	$1{,}1 \cdot 10^{-9}$ (ET)(6)	$1 \cdot 10^{-9}$ (côlon)	0,1
^{210}Pb plomb	bêta, gamma	22,3 ans	$2{,}83 \cdot 10^{12}$	3,29 ans*	$1{,}1 \cdot 10^{-6}$ (os)	$6{,}9 \cdot 10^{-7}$ (os)	0,2
^{212}Po polonium	alpha	138,38 j	$1{,}66 \cdot 10^{14}$	45 j	$2{,}2 \cdot 10^{-6}$ (poumon)	$1{,}2 \cdot 10^{-6}$ (rein)	0,5
^{222}Rn radon	alpha, gamma	3,82 j	$5{,}70 \cdot 10^{15}$				
^{224}Ra radium	alpha, gamma	3,66 j	$5{,}88 \cdot 10^{15}$	3,6 j	$2{,}4 \cdot 10^{-6}$ (poumon)	$6{,}5 \cdot 10^{-8}$ (os)	0,2
^{226}Ra radium	alpha, gamma	1 600 ans	$3{,}64 \cdot 10^{10}$	$\simeq$ 15 ans*	$2{,}2 \cdot 10^{-6}$ (poumon)	$2{,}8 \cdot 10^{-7}$ (os)	0,2
^{228}Th thorium	alpha, gamma	1,91 ans	$3{,}03 \cdot 10^{13}$	1,89 an	$2{,}5 \cdot 10^{-5}$ (poumon)	$7{,}2 \cdot 10^{-8}$ (os)	$5 \cdot 10^{-4}$
^{228}Ra radium	bêta, gamma	5,75 ans	$1{,}01 \cdot 10^{13}$	5,7 ans*	$1{,}7 \cdot 10^{-6}$ (poumon)	$6{,}9 \cdot 10^{-7}$ (os)	0,2
^{232}Th thorium	bêta, gamma	$14{,}1 \cdot 10^{9}$ ans	$4{,}04 \cdot 10^{3}$	> 100 ans*	$5{,}9 \cdot 10^{-9}$ (poumon)	$2{,}3 \cdot 10^{-7}$ (os)	$5 \cdot 10^{-4}$
^{234}U uranium	alpha	246 000 ans	$2{,}3 \cdot 10^{8}$	100 j	$6{,}8 \cdot 10^{-6}$ (ET)(6)	$4{,}9 \cdot 10^{-8}$ (os)	0,02
^{235}U uranium	alpha, gamma	$7{,}04 \cdot 10^{8}$ ans	$8 \cdot 10^{4}$	100 j	$6{,}1 \cdot 10^{-6}$ (ET)(6)	$4{,}7 \cdot 10^{-8}$ (os)	0,02
^{238}U uranium	alpha, gamma	$4{,}47 \cdot 10^{9}$ ans	$1{,}24 \cdot 10^{4}$	100 j	$5{,}7 \cdot 10^{-6}$ (ET)(6)	$4{,}5 \cdot 10^{-8}$ (os)	0,02
^{237}Np neptunium	alpha, gamma	$5{,}4 \cdot 10^{6}$ ans	$2{,}61 \cdot 10^{7}$	> 100 ans*	$1{,}5 \cdot 10^{-5}$	$1{,}1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-4}$
^{238}Pu plutonium	alpha, gamma	87,7 ans	$6{,}34 \cdot 10^{11}$	61,9 ans*	$1{,}1 \cdot 10^{-5}$ (ET)(6)	$2{,}3 \cdot 10^{-7}$ (os)	$5 \cdot 10^{-4}$
^{239}Pu plutonium	alpha, gamma	24 100 ans	$2{,}3 \cdot 10^{9}$	> 100 ans*	$2{,}3 \cdot 10^{-6}$ (os)	$2{,}5 \cdot 10^{-7}$ (os)	$5 \cdot 10^{-4}$
^{240}Pu plutonium	alpha, gamma	6 560 ans	$8{,}41 \cdot 10^{9}$	> 100 ans*	$8{,}3 \cdot 10^{-6}$ (os)	$2{,}5 \cdot 10^{-7}$ (os)	$5 \cdot 10^{-4}$
^{241}Am américium	alpha, gamma	432,7 ans	$1{,}27 \cdot 10^{11}$	> 100 ans*	$2{,}7 \cdot 10^{-5}$ (os)	$2 \cdot 10^{-7}$ (os)	$5 \cdot 10^{-4}$
^{241}Pu plutonium	alpha, bêta, gamma	14,4 ans	$3{,}81 \cdot 10^{12}$	12,33 ans*	$8{,}4 \cdot 10^{-8}$ (os)	$4{,}8 \cdot 10^{-9}$ (os)	$5 \cdot 10^{-4}$
^{243}Am américium	alpha, gamma	7 370 ans	$7{,}39 \cdot 10^{9}$	> 100 ans*	$2{,}7 \cdot 10^{-5}$ (os)	$2 \cdot 10^{-7}$ (os)	$5 \cdot 10^{-4}$

(1) Référence : cédérom de la **CIPR**, publications 68 et 72.

(2) $A_i = (N \times \ln 2) / (M_i \times T_{i1/2})$ avec N = nombre d'Avogadro $6{,}023 \cdot 10^{23}$, M_i la masse molaire, $T_{i1/2}$ la **période physique** en secondes.

(3) La *période effective* est le temps au bout duquel la moitié du radionucléide incorporé a disparu du corps humain ; elle dépend donc à la fois de la *période physique* et de la *période biologique*, temps au bout duquel la moitié de l'élément correspondant, stable ou non, a été éliminé par voies biologiques. En pratique, la période physique est connue avec précision. La période biologique (pour laquelle les données proviennent de plusieurs sources) dépend de la **biocinétique** de l'élément, avec des composantes d'élimination rapide et lente (due à la rétention prolongée dans les organes de rétention). Ceci explique que la période effective est une grandeur souvent très approximative dont l'intérêt est d'indiquer le temps de séjour moyen dans l'organisme, souvent bien inférieur à la période physique. Les chiffres suivis de * correspondent aux périodes correspondant à la rétention dans le squelette.

(4) **DPUI** : dose par unité d'incorporation.

(5) Les organes cibles indiqués sont ceux résultant d'une **incorporation** du **radionucléide** après passage dans le sang. Quand la **contamination** est consécutive à une **inhalation**, le poumon, organe de dépôt est aussi très fréquemment un organe cible pour les effets, à la fois pour la toxicité chimique et radiologique. Un élément est d'autant plus retenu dans le poumon qu'il s'agit d'une forme insoluble.

(6) ET : extra-thoracique.

Caractéristiques **physiques** et **toxicologiques** de **radionucléides** significatifs

radionucléide	distribution corporelle organes cibles*	type de toxicité
^{3}H tritium	corps[7]	Toxicité sur la moelle osseuse à très forte dose (> TBq). L'effet cancérogène n'est pas démontré chez l'homme.
^{7}Be béryllium	corps[7], os	Toxique chimique par inhalation (bérylliose pulmonaire), réaction immuno-allergique. RfD[8] : 0,002 mg/kg/j.
^{14}C carbone	corps[7]	Pas de toxicité connue, même à forte dose, chez les mammifères.
^{40}K potassium	corps[7]	Pas de toxicité.
^{58}Co cobalt ^{60}Co cobalt	foie, os, rein TGI[9]	Élément essentiel. Toxicité chimique : cœur, foie.
^{79}Se sélénium	corps[7], rein, foie	Élément essentiel. Toxicité chimique : sélénose clinique (ongles, peau, troubles sensitifs, diminution de l'hémoglobine). RfD[8] : 0,005 mg/kg/j.
^{85}Kr krypton	corps[7]	
^{89}Sr strontium ^{90}Sr strontium	os	Toxicité chimique : rachitisme. RfD[8] : 0,6 mg/kg/j. Toxicité radiologique : expérimentalement, à forte dose, hypoplasie médullaire, ostéosarcomes, leucémies (~ 5 Sv).
^{90}Y yttrium	TGI[9]	
^{99}Tc technétium ^{99m}Tc technétium	corps[7], thyroïde, glandes salivaires, foie, TGI[9]	Expérimentalement, toxicité chimique du technétium : altérations fonctionnelles et histologiques de la thyroïde. Dose létale 50 : 13 mg/kg. Pour le technétium 99, toxicité chimique > toxicité radiologique.
^{103}Ru ruthénium ^{106}Ru ruthénium	corps[7], TGI[9]	Toxicité chimique ? (vapeurs irritantes). Toxicité radiologique : cancérogène à forte dose.
^{110m}Ag argent	corps[7], foie, TGI[9]	Toxicité chimique : argyrie (coloration de la peau). RfD[8] : 0,005 mg/kg/j.
^{124}Sb antimoine	os, foie	Expérimentalement, réduction de longévité, atteinte squelette.
^{125}I iode ^{129}I iode ^{131}I iode ^{132}I iode HB ^{133}I iode	thyroïde	Le déficit en iode stable est responsable d'hypothyroïdie. L'iode radioactif peut, pour des doses supérieures à 100 mGy chez l'enfant, augmenter le risque de cancer de la thyroïde. À tout âge, pour des doses supérieures à ~10 Gy, risque d'hypothyroïdie radio-induite définitive.
^{133}Xe xénon	corps[7]	
^{134}Cs césium ^{135}Cs césium	corps[7], parois artérielles, surrénales	Césium 134 : pas d'observation chez l'homme. Pas de toxicité connue du césium 135.
^{135}Xe xénon	corps[7]	
^{137}Cs césium	corps[7], parois artérielles, surrénales	Toxicité radiologique du césium 137 : à forte dose (> 4,5 Gy), responsable de syndrome aigu d'irradiation avec aplasie médullaire. Expérimentalement, sarcomes observés (dose de quelques Gy).
^{144}Ce cérium	foie, os, TGI[9]	Pas d'observation sur l'homme. Expérimentalement, dose > 5 Gy effets aigus, cancers (poumon, os, foie).
^{198}Au or	rein, TGI[9]	
^{210}Pb plomb	os, foie, rein	Toxicité chimique : troubles du développement neurocomportemental chez l'enfant, modifications enzymatiques.
^{212}Po polonium	foie, rein	
^{222}Rn radon	poumon	Gaz, produits de filiation émetteurs alpha de période courte, qui, fixés sur poussières restent dans le poumon. Cancer du poumon.
^{224}Ra radium ^{226}Ra radium	os	Ostéosarcomes.
^{228}Th thorium	os	Effets sur l'homme connus par le produit de contraste sous forme colloïdale Thorotrast®, piégé par certaines cellules du foie : excès de leucémies et de cancers hépatiques, dose et débit de dose dépendant.
^{228}Ra radium	os	Ostéosarcomes.
^{232}Th thorium	os	*Idem* thorium 228.
^{234}U uranium ^{235}U uranium ^{238}U uranium	os, rein	Toxicité chimique : néphrotoxique. RfD[8] : 0,003 mg/kg/j (formes solubles). Toxicité radiologique pour les isotopes 232 et 233. Attention, au niveau du poumon, l'action cancérogène est de multiples origines : empoussiérage, exposition conjointe au radon et ses descendants, irradiation externe...
^{237}Np neptunium	os, rein, foie	Pas d'observation sur l'homme. Génotoxique chimique et radiologique. Expérimentalement, toxicité chimique pour une dose > mg/kg (dose létale en quelques jours pour dose > 10 mg/kg), lésions hépatiques, fibrose (rein, poumon) ; cancérogène (sarcomes) par toxicité radiologique et chimique.
^{238}Pu plutonium ^{239}Pu plutonium ^{240}Pu plutonium	os, rein, foie, gonades	Toxicité radiologique, organes cibles : poumon (par inhalation), squelette et foie (après incorporation systémique).
^{241}Am américium	os, rein, foie, gonades	Expérimentalement, à forte dose, cancers osseux et hépatiques.
^{241}Pu plutonium	os, rein, foie, gonades	*Idem* plutonium 238, 239 et 240.
^{243}Am américium	os, rein, foie, gonades	*Idem* américium 241.

(7) La mention "corps" correspond à une distribution uniforme ou homogène.
(8) RfD : dose de référence, correspond en toxicologie chimique à la valeur quotidienne admissible sans effet toxique. Les valeurs indiquées sont celles retenues par l'EPA.
(9) TGI : tractus gastro-intestinal.

D Toxicité radiologique et toxicité chimique

Parmi les toxiques chimiques liés à la filière nucléaire se trouvent, outre l'**uranium** (U) et le **cobalt** (Co), le **bore** (B), utilisé pour ses propriétés d'absorption des neutrons dans les fluides caloporteurs des centrales nucléaires, le **béryllium** (Be), employé pour ralentir ces mêmes neutrons, et le **cadmium** (Cd), servant à les capturer. Or le bore est un élément essentiel pour la croissance des plantes. Le cadmium, tout comme le plomb (Pb), a des effets toxiques sur le système nerveux central.

Pour un même élément dont la toxicité peut être à la fois radiologique et chimique, par exemple le plutonium (Pu), l'uranium, le neptunium, le technétium ou le cobalt, il s'agit de déterminer, quand cela est possible, ce qui relève de la toxicité radiologique et ce qui relève de la toxicité chimique, l'une n'étant évidemment pas exclusive de l'autre (voir *Limites de la comparaison du risque radiologique et du risque chimique*, p. 77).

Pour les éléments **radioactifs** à longue **période** physique, la toxicité chimique est un risque beaucoup plus grand que la toxicité radiologique, comme le montre l'exemple du rubidium (Rb) ou de l'uranium naturel. Ainsi la toxicité chimique de l'uranium, qui prévaut sur sa toxicité radiologique, a conduit la réglementation française à fixer des limites de masse **ingérée** ou **inhalée** de composés chimiques d'uranium à respectivement 150 mg et 2,5 mg par jour quelle que soit la composition **isotopique** de l'élément (voir *L'uranium, chaque jour mieux connu*, p. 31).

Certains métaux ou **métalloïdes** non toxiques à faible concentration peuvent le devenir à forte concentration ou sous leur forme radioactive. C'est le cas du cobalt, pouvant agir comme **génotoxique**, du sélénium (Se) (naturellement incorporé dans des **protéines** ou des **ARN**), du technétium (Tc) et de l'iode (I).

Cyrille Dupont/CEA

Analyse d'images de gels d'électrophorèse bidimensionnelle réalisée dans le cadre d'études de toxicologie nucléaire au centre CEA de Marcoule, dans la vallée du Rhône.