

Appliquer au cas de populations entières les bases biologiques du calcul de dose au niveau de la cellule, du tissu et de l'homme, avec tout ce que cela comporte d'aléas, revient à relier une radioactivité dispersée dans l'environnement à des effets "ciblés" sur des individus. L'enjeu ? Estimer un éventuel impact sanitaire d'une exposition à la radioactivité et interpréter des études épidémiologiques en termes de relations de cause à effet.

L'application au cas des populations des bases biologiques du calcul de dose



L'usine de La Hague. Cogema s'est engagée à ce que son impact sur les groupes de population de référence ne dépasse jamais la valeur de 30 microsieverts par an.

La **dose** permet d'estimer le risque. À faible dose, les effets attendus sont liés à l'induction de **mutations** de l'ADN. Celles-ci peuvent entraîner l'apparition de cancers et, éventuellement, d'anomalies génétiques transmissibles. Après **contamination interne**, la dose dépend de paramètres physiques (**activité** incorporée, types de **rayonnement** et énergies, **période** radioactive, etc.) et physiologiques (temps de séjour du **radionucléide** dans l'organisme, accumulation dans certains **compartiments**, etc.). Ces facteurs déterminent le **débit de dose** et les dépôts d'énergie au sein des tissus et des cellules. Le noyau des cellules (diamètre d'environ 4 μm) constitue la cible principale directe du rayonnement. Néanmoins, il a été observé

qu'un rayonnement atteignant une cellule a des effets sur les cellules du voisinage ("**effet bystander**"). En termes de conséquences radio-induites, le volume-cible élémentaire est donc sans doute un groupe de cellules plutôt qu'une seule cellule ou une partie de celle-ci. Par ailleurs, seules certaines cellules sont à l'origine des pathologies considérées. Ainsi, une fraction parfois importante de la dose peut s'avérer sans effet si elle concerne des zones ne contenant pas de telles cellules. Ces notions sont en pleine évolution avec les concepts de cellules multi- et pluripotentes qui peuvent se différencier en divers types et **lignées cellulaires**.

La radiosensibilité diffère selon les tissus. Elle a été évaluée chez l'homme à partir d'études **épidémiologiques** sur l'**incidence** des tumeurs après **irradiation**. Les tumeurs fatales et les effets génétiques transmissibles représentent respectivement des fractions de 0,8 et 0,2 du détriment global (voir tableau ci-contre pour la répartition selon les tissus). Après irradiation d'un individu, entre autres à la suite d'une contamination, le détriment subi est évalué en calculant la **dose** dite "**efficace**". Le facteur de risque associé à la dose efficace est de 5 % par **sievert**. Pour comparaison, hors irradiation, le risque spontané de cancer fatal est de 25 % à 30 %.

Le calcul de la dose se fait en deux étapes. Tout d'abord, on détermine la **dose engagée** reçue par les principaux tissus irradiés qui sont différents selon le radionucléide en cause. Le terme "dose engagée" signifie que la dose n'est pas reçue instantanément au moment de l'**incorporation** du produit radioactif mais, au contraire, tout au long du temps de présence du radionucléide dans l'organisme. Ce temps est variable d'un radionucléide à l'autre en fonction des **périodes biologique** et radioactive. Ensuite, il faut pondérer chacune des doses engagées par le **facteur de sensibilité** spécifique des tissus au risque tumoral (tableau). En ce qui concerne les gonades, on applique le facteur 0,2 pour le risque héréditaire. La dose efficace est alors obtenue par sommation de toutes les doses engagées pondérées. Représentative du risque global, elle peut être comparée aux limites de dose réglementaires. En pratique, il est commode de calculer la dose "efficace" par **unité d'activité incorporée (DPUI, dose par unité d'incorporation)** pour des situations d'exposition

G. Halary/Cogema

Prélèvement d'eau de la rivière Sainte-Hélène, dans le cadre du programme de surveillance des rejets radioactifs de l'usine Cogema-La Hague.



J.-M. Tallat/Cogema

moelle osseuse	0,12
colon	0,12
poumons	0,12
estomac	0,12
vessie	0,05
sein	0,05
foie	0,05
œsophage	0,05
thyroïde	0,05
peau	0,01
surface osseuse	0,01
autres tissus	0,05
gonades (ovaires, testicules)	0,20
total	1,00

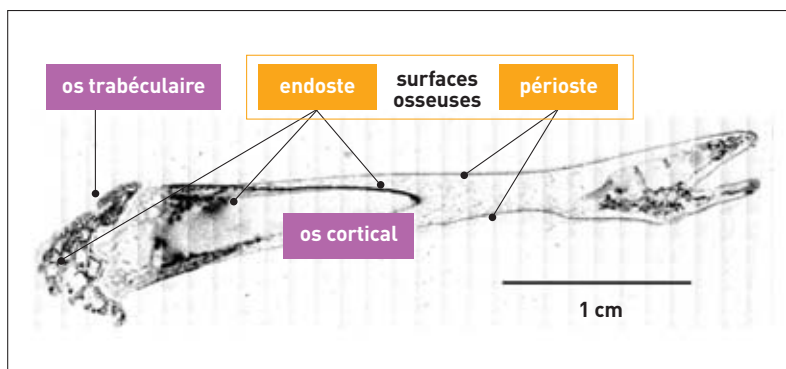
Tableau.
Facteurs de pondération du risque de cancer pour les divers tissus et du risque héréditaire pour les gonades.

bien définies. Connaissant, à partir des mesures de rétention et d'excrétion, l'activité incorporée I dans ces situations spécifiques, la dose "efficace" s'obtient directement par le produit $I \times \text{DPUI}$.

Les processus **métaboliques** subis par les radionucléides incorporés dépendent de la voie de contamination (**inhalation**, **ingestion** ou blessure) et de leurs propriétés physico-chimiques. La taille des particules inhalées ou la nature chimique du contaminant, par exemple, ont un impact décisif sur les paramètres de la **modélisation**. Des étapes importantes sont l'absorption sanguine et la distribution dans les tissus en fonction du tropisme du radionucléide. La compilation de nombreuses données expérimentales et humaines a permis d'établir des modèles **bio-cinétiques** (distribution, rétention et excrétion) et **dosimétriques** dont la sophistication et la précision nécessitent des moyens de calcul performants. La difficulté habituelle en pratique est liée aux caractéristiques spécifiques des individus et des modes de contamination. Selon l'importance de la dose prévisible, on utilise soit une modélisation simplifiée, soit une modélisation adaptée au cas considéré. Tout est mis en œuvre pour obtenir l'ordre de grandeur de la dose (approche logarithmique) avec un facteur d'incertitude ne dépassant pas deux à trois.

Relier "becquerels dispersés" et "sieverts ciblés"

L'impact des installations nucléaires sur les populations constitue un élément essentiel dans l'évaluation de la maîtrise du risque. En situation normale, des rejets sous forme de liquides, gaz et poussières sont émis de manière rigoureusement contrôlée. Leur impact radiologique est estimé à partir de scénarios impliquant des groupes de population représentatifs



CEA

(âge, mode de vie) en prenant en compte les diverses voies d'exposition (air, eau, sols, produits végétaux et animaux). L'évolution dans le temps des radionucléides rejetés est complexe et il existe des phénomènes de dilution et d'accumulation. La prévision des modèles doit être vérifiée par des mesures régulièrement pratiquées. Ce domaine d'expertise nécessite une grande expérience pratique et une bonne maîtrise de la modélisation, puisqu'il s'agit de relier des **becquerels** "dispersés" dans l'environnement, avec tout l'aléa que cela suppose, à des sieverts "ciblés" sur des individus. Outre la vérification du respect des obligations réglementaires, l'impact sanitaire ainsi estimé constitue un élément décisif dans l'interprétation des études épidémiologiques en termes de vraisemblance pour d'éventuelles relations de cause à effet entre l'exposition à la radioactivité et certaines pathologies.

Autoradiographie d'une section de fémur de rat, trois mois après administration intraveineuse de ^{238}Pu -citrate. L'essentiel du plutonium est retrouvé à proximité des surfaces osseuses. Deux cibles sont considérées, l'**endoste** sur une épaisseur de $10\ \mu\text{m}$ (risque d'**ostéosarcome**) et la moelle **hématopoïétique** localisée dans l'os trabéculaire (risque de leucémie).

> Dr Jean Piechowski
Cabinet du Haut-commissaire
à l'énergie atomique
CEA Siège (Paris)

G Les limites de dose réglementaires

La protection des individus contre les dangers des **rayonnements ionisants** repose sur deux principes : faire en sorte qu'une source de rayonnement donnée irradie le moins possible les personnes exposées (principe d'optimisation) et que l'**exposition** d'un individu donné reste en dessous d'un certain niveau, quelles que soient les sources de rayonnement. C'est le principe des **limites de dose**.

Ces principes ont été exposés dans la recommandation CIPR 60 publiée en novembre 1990⁽¹⁾ par la **Commission internationale de protection radiologique**, qui constitue la référence internationalement reconnue en la matière, et repris dans la directive européenne **Euratom** 96/29 du 13 mai 1996. Les dispositions de cette dernière ont été transposées en droit français par les textes suivants qui modifient les codes de la santé publique et du travail par une ordonnance du 28 mars 2001, un décret du 8 mars 2001 (modifiant celui du 20 juin 1966) et un décret du 31 mars 2003.

Exprimées en **sieverts** (Sv), les limites sont de deux ordres, global et local. Lorsqu'elle est globale, la limite est exprimée en **dose efficace** (encadré F, p. 66). Elle représente le niveau de risque acceptable vis-à-vis de l'effet **cancérigène** des rayonnements ionisants. Elle est de 20 mSv sur 12 mois pour les travailleurs du nucléaire⁽²⁾ et de 1 mSv par an pour les personnes du public. Pour un certain nombre de tissus et d'organes (peau, mains et pieds, cristallin), une limite locale est établie en référence aux risques **déterministes** des rayonnements ionisants : radiodermite, cataracte. Cette **dose équivalente** est ainsi égale à 500 mSv pour la peau et pour les extrémités des membres et à 150 mSv pour le



Le passage sous un portique de détection de la contamination des personnes en sortie de zone contrôlée – ici le réacteur Osiris au CEA/Saclay – est une obligation réglementaire.

cristallin. Les valeurs sont dix fois plus faibles pour le public. Ces limites sont relatives aux expositions résultant des activités humaines à l'exclusion des expositions médicales⁽³⁾.

La dose efficace tient compte de l'**exposition externe** mais aussi **interne**.

Dans ce dernier cas, des tables fixent, pour chaque **radionucléide**, le mode d'exposition (**inhalation-ingestion**) et l'âge, et tiennent compte de leur plus ou moins grande "transférabilité" dans les milieux biologiques, ainsi que des coefficients de **dose par unité d'incorporation** (DPUI) exprimés en sieverts par **becquerel** (Sv/Bq), le becquerel étant l'unité d'**activité**.

Ils permettent d'établir la dose interne qui, pour tenir compte de la **période effective** du radionucléide en cause, est "engagée" sur 50 ans pour les adultes et jusqu'à l'âge de 70 ans pour les enfants. Du fait de la plus grande susceptibilité des enfants aux rayonnements et de la possibilité d'une exposition plus longue pour les radionucléides à grande période effective, les limites annuelles

d'incorporation les plus restrictives concernent les enfants de 0 à 1 an et les moins restrictives les adultes à partir de 17 ans, conformément à la publication CIPR 67 de 1993.

Les DPUI "inhalation" et "ingestion" prennent respectivement en compte de nouvelles valeurs d'absorption digestive et le dernier modèle pulmonaire⁽⁴⁾ de la CIPR.

À partir de ces limites réglementaires, les radioprotectionnistes établissent, en matière de risque d'exposition interne, des limites "dérivées" de concentration dans l'air ou surfacique, par exemple.



Dosimètre Dosicard permettant le suivi dosimétrique en temps réel.

(1) Se substituant à la CIPR 26 publiée en 1977.

(2) Personnes directement affectées aux travaux sous rayonnements ionisants dans l'industrie, la recherche et la médecine.

(3) Le traitement d'une hyperthyroïdie par irradiation, par exemple, correspond en effet à une dose délivrée à cet organe de 70000 mSv!

(4) Publication CIPR 66 de 1994 sur la modélisation du tractus respiratoire humain pour la protection radiologique, et qui se substitue au modèle pulmonaire établi par la CIPR 30.

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 (T_e) est évaluée comme suit en fonction de la période physique (T_p) et de la période biologique (T_b) : $1 / T_e = 1 / T_p + 1 / T_b$.

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



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 des 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.

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** 5730 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 physico-chimiques 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 (⁸⁹Sr de période 50,5 jours et ⁹⁰Sr), les isotopes du ruthénium (¹⁰³Ru de période 39,3 jours et ¹⁰⁶Ru 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 (²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu de période 6 560 ans et ²⁴¹Pu 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**



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.

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).

(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.

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'é-

lément (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 **génétoxique**, du sélénium (Se) (naturellement incorporé dans des **protéines** ou des **ARN**), du technétium (Tc) et de l'iode (I).



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.