

L'iode radioactif et la thyroïde

Les isotopes radioactifs de l'iode ont le même comportement biologique que l'iode stable.

Après une éventuelle contamination, la dose d'irradiation délivrée à la thyroïde, premier organe exposé, est 1 000 à 10 000 fois plus importante que celle délivrée aux autres tissus. Cette glande est aussi l'organe qu'il est possible de protéger le plus rapidement via une saturation par de l'iode stable.

L'iode sert à la synthèse des **hormones** thyroïdiennes, ce qui explique son temps de séjour prolongé dans la thyroïde. L'iode **radioactif** est concentré par cette glande grâce au **symporteur**⁽¹⁾ de l'iode, ou NIS. Or les iodes radioactifs ont le même comportement biologique que l'iode stable (iode 127). L'iode 131, **émetteur bêta** et **gamma** dont la **période** est de 8 jours, est ainsi utilisé en médecine depuis plus de cinquante ans.

Après **contamination** par l'iode radioactif, la **dose** d'irradiation délivrée à la thyroïde est 1 000 à 10 000 fois plus importante que celles reçues par les autres tissus.

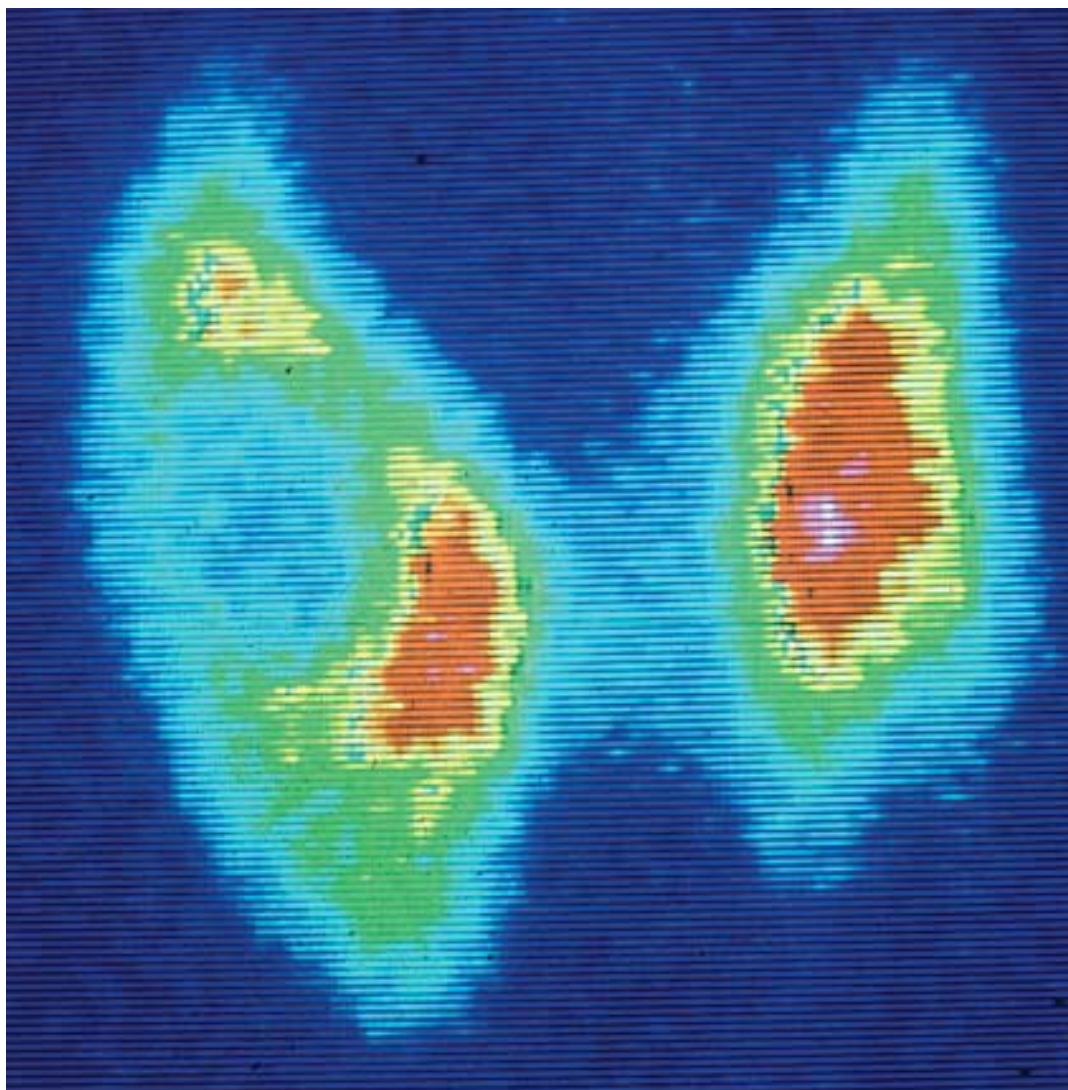
(1) Symporteur: **protéine** de transport membranaire transportant deux espèces solubles à travers la membrane dans la même direction. Le symporteur sodium/iode, symporteur Na/I ou NIS, cloné en 1996, est une molécule clef du fonctionnement de la thyroïde.

Des **activités** relativement faibles peuvent ainsi se traduire par des doses d'irradiation significatives à la thyroïde. À l'inverse, seules des activités importantes vont délivrer de telles doses aux organes extra-thyroïdiens.

L'irradiation de la thyroïde à fortes doses peut provoquer, dans les années suivant l'irradiation, une hypothyroïdie liée aux phénomènes de mort cellulaire. La thyroïde est surtout un des organes les plus sensibles à l'action **cancérigène** des **rayonnements ionisants**. Les études **épidémiologiques** chez des sujets irradiés par voie externe ont mis en évidence plusieurs points.

Le premier est que l'**irradiation externe** augmente le risque de tumeur de la thyroïde. Un tiers de ces tumeurs sont des cancers, d'histologie le plus souvent papillaire et donc le pronostic est favorable. Souvent multicentriques, ils doivent être traités par thyroïdectomie

Scintigraphie
thyroïdienne révélant
la présence d'un
nodule froid.



IGR

totale. Les réarrangements **chromosomiques** (en l'occurrence de type RET/PTC) sont trouvés dans 5 à 15 % des cancers papillaires survenus en l'absence d'irradiation et dans 60 à 80 % des cancers papillaires survenus après irradiation cervicale pendant l'enfance, ce qui permet d'effectuer des études d'épidémiologie moléculaire.

L'augmentation des tumeurs de la thyroïde – deuxième point – survient après une période de latence d'une dizaine d'années, passe par un maximum vers 20 ans après l'irradiation, puis le risque diminue mais reste significativement élevé pendant au moins 40 ans.

Il apparaît en troisième lieu que le risque est significatif pour des doses, délivrées à la thyroïde, aussi faibles que 100 mGy, et qu'au-delà le risque augmente de manière linéaire avec la dose jusqu'à quelques dizaines de Gy. Lorsque des doses faibles ont été délivrées à la thyroïde, la majorité des patients sont euthyroïdiens lors de la découverte de la tumeur. Au-delà de quelques dizaines de Gy, en raison des phénomènes de mort cellulaire, le risque global reste élevé mais n'augmente plus avec la dose.

Il s'avère enfin que parmi les facteurs de risque, le plus significatif est l'âge lors de l'exposition aux rayonnements. Les sujets de moins de 5 ans lors de l'irradiation ont un risque maximal. Ce risque diminue avec l'âge lors de l'irradiation et n'est plus significatif au-delà de 15 à 20 ans. Chez le jeune enfant, l'excès de risque après une dose de 1 Gy est de 7,7, ce qui est très élevé.

Les autres facteurs susceptibles de modifier le risque sont : le sexe du sujet, les tumeurs de la thyroïde après irradiation étant 2 à 3 fois plus fréquentes chez la femme que chez l'homme. Il est probable que des facteurs de susceptibilité génétique interviennent. En revanche, les caractéristiques du rayonnement, et en particulier le **débit de dose** et le fractionnement, modifient peu le risque.

Après exposition à l'iode radioactif (iode 131) pour raisons médicales, soit à visée diagnostique pour **scintigraphie** (dose moyenne à la thyroïde d'environ 1 Gy), soit à visée thérapeutique pour hyperthyroïdie (dose à la thyroïde : 100 Gy), aucune augmentation des cancers de la thyroïde n'a été mise en évidence. Ceci s'explique par le fait que les pathologies thyroïdiennes survenant à l'âge adulte, l'exposition à l'iode a eu lieu à un âge où la thyroïde est peu ou pas sensible à l'action cancérogène des radiations. En revanche, les données médicales disponibles chez l'enfant et l'adolescent (jusqu'à 20 ans) sont insuffisantes pour exclure un risque cancérogène, ce qui doit conduire à limiter l'utilisation de l'iode radioactif chez ces jeunes sujets. Soulignons que l'activité d'iode 131 doit être supérieure à 2 MBq pour délivrer à la thyroïde d'un jeune adulte une dose pour laquelle des effets tumorigènes ont été démontrés après irradiation externe, soit environ 100 mGy. Aucun effet cancérogène extra-thyroïdien n'a été observé après exposition à l'iode 131 par scintigraphie ou traitement d'une hyperthyroïdie, et ces effets ont été recherchés chez des patients traités pour cancer de la thyroïde par des activités importantes de plusieurs GBq d'iode 131. Une augmentation du risque de leucémie a été mise en évidence pour des activités élevées, ainsi qu'une augmentation, moins importante, du risque de cancer solide. Par ailleurs, le devenir des grossesses survenues après traitement d'un cancer



“Fantôme” pour l'étalonnage d'un détecteur d'irradiation thyroïdienne au service médical de Cogema Marcoule.

de la thyroïde par l'iode 131 est identique à celui des grossesses survenues en l'absence de traitement.

La thyroïde est l'objet d'un regain d'intérêt depuis l'accident de Tchernobyl. En effet, une augmentation considérable de l'incidence des cancers de la thyroïde a été observée en Ukraine et en Biélorussie chez les enfants fortement contaminés par les iodes radioactifs (iode 131 et iodes à période brève, iode 132 et 133) et dont la dose délivrée à la thyroïde a été de quelques centaines de mGy. La majorité des enfants qui ont développé un cancer de la thyroïde étaient âgés de moins de 10 ans lors de l'accident. Cette augmentation contraste avec l'absence d'augmentation des autres cancers et des leucémies chez ces enfants, ce qui est lié aux faibles doses d'irradiation délivrées aux organes extra-thyroïdiens.

Il faut noter qu'aucune conséquence sanitaire de cet accident n'est décelable en dehors de l'Ukraine, de la Biélorussie et de la Russie ; notamment en France, où la dose à la thyroïde de quelques jeunes enfants a été au maximum d'une dizaine de mGy. Il n'existe aucun argument scientifique suggérant que cet accident y aurait provoqué une augmentation de l'incidence des cancers de la thyroïde.

Ainsi, l'irradiation de la thyroïde de l'enfant peut provoquer l'apparition d'un cancer quelle que soit la nature du rayonnement, et ce, d'autant plus que l'enfant est plus jeune. En cas de contamination atmosphérique, les jeunes enfants doivent être protégés en priorité, ce qui repose sur des mesures générales : confinement, restrictions alimentaires, voire évacuation mais surtout sur la prise d'iodure de potassium (KI).

L'iodure de potassium peut empêcher toute concentration d'iode radioactif par la thyroïde à condition qu'une dose suffisante soit administrée (adultes, y compris les femmes enceintes : 100 mg d'iodure soit 130 mg de KI ; enfants de moins de 13 ans : 50 mg d'iodure ; enfants de moins de 3 ans : 25 mg), soit avant, soit immédiatement après la contamination. Ceci a constitué le rationnel pour la pré-distribution de comprimés de KI autour des centrales nucléaires françaises. Cette administration doit être répétée en cas de contamination prolongée. En évitant toute

concentration par la thyroïde, le KI peut limiter les risques sanitaires de la contamination par les iodes radioactifs.

Les effets secondaires du KI, thyroïdiens et extra-thyroïdiens, sont exceptionnels chez l'enfant et ne s'observent en fait que chez les adultes, chez qui la prophylaxie par l'iodure de potassium a peu d'intérêt.

En conclusion, l'irradiation de la thyroïde pendant l'enfance augmente le risque d'apparition de tumeurs. L'irradiation de la thyroïde doit donc être évitée et, en cas de contamination par les iodes radioactifs, une prophylaxie par l'iodure de potassium doit être effectuée.

> Pr **Martin Schlumberger**

Service de médecine nucléaire
et de cancérologie endocrinienne
Institut Gustave-Roussy
Villejuif (Val-de-Marne)



Cyrille Dupont/CEA

Plaquette de comprimés d'iodure de potassium. L'ingestion de comprimés d'iode permet de saturer la thyroïde en iode stable (non radioactif).

E Quand des radionucléides se substituent à des éléments vitaux

L'organisme humain contient naturellement, parmi les **éléments indispensables à la vie**, un certain nombre d'**isotopes radioactifs**. Il s'agit essentiellement du carbone 14 et du potassium 40, qui induisent une radioactivité d'origine naturelle intrinsèque représentant chez un adulte *plusieurs milliers de becquerels*.

Dans des situations inusuelles ou accidentelles, l'organisme peut en outre être **exposé** à des éléments et des isotopes toxiques pour lui. Parmi ceux utilisés ou générés par l'industrie nucléaire, certains sont des isotopes d'éléments physiologiques indispensables, comme l'iode, d'autres des éléments non physiologiques tels que le cadmium, le strontium, le césium, le plomb et les **actinides**, etc.

D'autre part, certains constituants essentiels de la matière vivante, sous la forme d'éléments stables comme le fer, le manganèse ou le soufre, ont des équivalents radioactifs parmi certains **produits d'activation** ou de corrosion.

Trois groupes principaux de **radionucléides** représentent des radiocontaminants potentiels majeurs : l'iode (^{131}I et ^{133}I), le strontium (^{89}Sr et ^{90}Sr) et le césium (^{134}Cs et ^{137}Cs). L'iode, qui joue un rôle biologique, est très facilement absorbé et **métabolisé**, tandis que le strontium et le césium suivent les mêmes voies métaboliques que des

éléments **biogènes** indispensables. C'est ainsi que le strontium (^{90}Sr), se comportant sensiblement comme le calcium, se retrouve dans le tissu osseux dont ce dernier est un des constituants majeurs, et que le césium (^{137}Cs) diffuse dans le tissu musculaire, suivant pratiquement les mêmes voies métaboliques que le potassium, principal élément intracellulaire.

Si ces nucléides empruntent des voies similaires à celles par lesquelles s'opère le transfert vers le sang des éléments indispensables à la vie, transfert souvent facilité par des processus spécifiques (respiration, digestion, transports ioniques), l'efficacité de leur transport est néanmoins souvent beaucoup plus faible que celle de leurs analogues biologiques.

Lors d'une **contamination** par des radionucléides, ceux-ci peuvent donc se substituer à des éléments minéraux et à des oligo-éléments vitaux. Après **ingestion**, la fraction métabolisée du radionucléide est répartie dans l'organisme ou se concentre dans des organes particuliers. Si la distribution de la plupart des éléments essentiels et d'une partie de leurs analogues (sodium, chlore, potassium, césium, etc.) apparaît sensiblement homogène au sein des **tissus mous**, certains sont capables de s'accumuler dans des **compartiments** de stockage extracellulaires

tels la thyroïde pour l'iode, le foie pour le plutonium et la matrice osseuse pour les éléments appelés **ostéotropes** (calcium, baryum, strontium, radium, **transuraniens**).

Ainsi, les transporteurs membranaires facilitent l'entrée de césium et de rubidium dans les cellules. De même, le strontium peut être efficacement accumulé dans les compartiments de confinement subcellulaire. Par ailleurs, certains co-transporteurs responsables de la capture de métaux **divalents** (ions de fer, de cuivre ou de zinc) transfèrent aussi le cadmium. Enfin, il ne faut pas sous-estimer l'éventualité de **séquestration** des toxiques (physiologiques ou non) dans chaque compartiment par tout un ensemble de **protéines** solubles. Le piégeage peut être **covalent** (par exemple, la thyroglobuline iodée). Le calcium ou les protéines **réduisant** les formes libres, toxiques, de certains **métaux de transition** vitaux dans l'organisme (fer, cuivre, sélénium, etc.), sont des **complexants** potentiels d'éléments non physiologiques comme l'uranium ou le cadmium. Ce dernier métal a peu d'effets propres mais a tendance à se substituer au calcium, au zinc, au cuivre. Son comportement opportuniste, qui peut entraîner de graves désordres physiologiques, est d'ailleurs celui de beaucoup de métaux **exogènes**.

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 6560 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.

c Les éléments vitaux de l'organisme humain

L'alimentation apporte chaque jour les sels minéraux et les oligo-éléments indispensables à la vie. Les légumes frais en constituent une source importante.



C Squared Studios/Photo Disc

Outre ses constituants principaux que sont le carbone, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote (C, H, O, N), à l'origine de toutes les molécules organiques, la substance des organismes vivants est composée d'**éléments minéraux** et d'**oligo-éléments** indispensables à la vie, et tout particulièrement nécessaires à la croissance et au développement. Lorsque les besoins de l'organisme en ces éléments ne sont pas satisfaits, celui-ci est affecté par des maladies de carence. En revanche, leur absorption en quantité excessive peut avoir des effets toxiques. Parfois, la marge est très étroite entre l'apport optimal et le seuil de toxicité.

Les **sels minéraux**, présents en quantité importante dans le corps humain (environ 4 % du poids), se rencontrent sous la forme d'ions : calcium (Ca^{2+}), potassium (K^+), sodium (Na^+), magnésium (Mg^{2+}) pour les **cations**, chlorure (Cl^-), radicaux phosphorés et soufrés pour les **anions**. Éliminés quotidiennement par le rein, ils doivent être apportés chaque jour en quantité suffisante par l'alimentation. Ces **électrolytes** et l'eau jouent un rôle irremplaçable dans de nombreux phénomènes biochimiques et biophysiques : édification de l'organisme, maintien de l'hydratation cellulaire, participation à de nombreux processus **enzymatiques**, intervention dans les **métabolismes** des glucides (sucres) et des protides (**peptides**, **protéines**), etc. Certains déplacements des cations sont étroitement liés aux activités cérébrales, nerveuses, musculaires, cardiaques et glandulaires.

Le **calcium** est l'un des constituants majeurs des os. Il joue aussi un rôle important dans la coagulation du sang, la contraction musculaire et le fonctionnement du muscle cardiaque. En association avec le calcium, le **phosphore** est indispensable à la constitution du tissu osseux. Il intervient également dans

l'absorption et la transformation de certains nutriments (molécules assimilables dérivant de l'alimentation). Le **sodium** est l'élément minéral le plus important des liquides du corps humain (le sang et tous les autres liquides extra-cellulaires). Il participe à l'équilibre du "milieu intérieur" et son élimination ou sa rétention, au niveau rénal, constitue l'un des mécanismes de la régulation de la pression artérielle. Une alimentation trop riche en sodium est souvent à l'origine d'une augmentation de la pression artérielle. À la différence du sodium, le **potassium** est le principal élément minéral intracellulaire. Il est utile au maintien de l'automatisme cardiaque et à l'activité musculaire en général. Une carence en potassium, outre des effets nocifs sur le cœur, entraîne parfois des crampes. Le **magnésium** est impliqué dans de nombreux phénomènes biologiques au niveau de la cellule. Une insuffisance en magnésium peut engendrer des faiblesses musculaires, des crampes, des crises de tétanie ou des troubles digestifs.

Les **oligo-éléments** sont des éléments minéraux indispensables, en très faible quantité, aux organismes vivants : leur absence entraîne des carences nutritionnelles et, pour certains d'entre eux, empêche l'accomplissement d'une fonction particulière. Présents à l'état de traces, ils entrent dans la composition de molécules organiques nécessaires à des réactions fondamentales du métabolisme cellulaire. Parmi les oligo-éléments essentiels se trouvent des métaux (fer, zinc, cuivre, manganèse, molybdène), des **métalloïdes** (sélénium), des **halogènes** (iode, fluor). Les oligo-éléments métalliques sont importants car appelés à entrer dans la constitution des molécules de haute activité biochimique telles que les **enzymes**. Dans les métalloprotéines enzymatiques, l'atome de métal fait partie intégrante

de la molécule de protéine et se trouve au centre du site actif⁽¹⁾ de l'enzyme. Sous forme ionisée, le métal se comporte en activateur d'une protéine enzymatique sans participer à sa composition.

Le **fer**, par exemple, constitue la fraction active de l'hémoglobine, protéine des globules rouges, et des cytochromes, protéines qui transfèrent des électrons pendant la respiration cellulaire. À l'état de métalloprotéines enzymatiques, il est présent dans les ferrédoxines, substances biochimiques intervenant dans le transport des électrons, ou dans diverses enzymes. Un défaut en fer conduit à une anémie, tandis qu'un excès peut être dangereux pour le cœur. Une carence en **zinc** est parfois la cause du nanisme et de l'hypodéveloppement des organes sexuels mâles. Une insuffisance en **cuivre**, élément indispensable à la génération des cellules sanguines dans la moelle osseuse (hématopoïèse), est également source d'anémie. Le **sélénium** semble protéger contre certains cancers ; par ailleurs, un défaut en cet élément risque de provoquer des maladies du muscle cardiaque. L'**iode** est indispensable au fonctionnement de la thyroïde. Il est présent dans la molécule d'une hormone (la thyroglobuline) qui en contrôle le métabolisme. Une carence en cet élément entraîne une hypertrophie de la thyroïde (goitre) et un retard du développement physique et mental chez l'enfant. Une insuffisance en **fluor** est associée à des défauts de minéralisation des os et des dents (caries).

Lors d'une **contamination** par des **radio-nucléides**, ceux-ci peuvent se substituer aux éléments minéraux et aux oligo-éléments (encadré E, *Quand des radionucléides se substituent à des éléments vitaux*, p. 47).

(1) Site actif : région d'une enzyme permettant la **catalyse** d'une réaction particulière.

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.