I. DE LA SOURCE À L'HOMME

Si l'on part de la source, le premier objectif des recherches en toxicologie nucléaire est de décrire, de manière toujours plus précise, les mécanismes de transfert des agents toxiques – radionucléides ou métaux lourds et métalloïdes – entre le milieu externe et l'organisme vivant, de la bactérie à l'homme, de la géosphère à la biosphère. En dehors de l'irradiation externe directe, c'est par le biais de l'air, de l'eau ou de l'alimentation que l'homme peut se trouver exposé, *via* les différentes voies de pénétration dans l'organisme que sont l'inhalation et l'ingestion, voire la blessure.

Il s'agit là d'un domaine de recherche particulièrement multidisciplinaire, puisqu'il mobilise de nombreuses compétences, celles des chimistes, des physico-chimistes, des biochimistes et des biologistes, en passant par des écotoxicologues. Autant de spécialistes qui, chacun dans leur domaine, comme par exemple pour l'étude des cycles biogéochimiques qui impliquent les organismes dans leur environnement, doivent aussi se faire modélisateurs et numériciens pour comprendre et traduire les mécanismes en cause.

L'étude du transfert du sol *vers les plantes* constitue à l'évidence un volet particulièrement important puisque ce transfert peut être à l'origine de la contamination par des polluants de la chaîne alimentaire de l'homme.

Celle du transfert *vers l'animal* présente de son côté un double intérêt, parce que : d'une part l'animal est à la source de produits dérivés essentiels à l'alimentation humaine (lait, viande, œufs, etc.) et, d'autre part, il fournit des modèles de mécanismes biologiques et de métabolismes qui donnent des indications sur leurs équivalents humains.

Lors de l'étude de ces transferts, il est indispensable de pouvoir "suivre à la trace" le devenir des toxiques en cause et d'identifier les différentes formes qu'ils sont susceptibles d'adopter successivement entre la source et l'homme. Pour déterminer cette *spéciation* des toxiques, tant physico-chimique que biologique, les outils théoriques comme les méthodes et les équipements analytiques ont fait des progrès considérables ces dernières années.

Soumis depuis toujours aux rayonnements dans lesquels baigne sa planète, l'homme doit surtout à la médecine d'être aujourd'hui également exposé à une irradiation supplémentaire, bien plus qu'aux autres applications, tant civiles que militaires, de l'énergie nucléaire. Des radionucléides, présents dans tous les compartiments de son environnement, peuvent par ailleurs parvenir jusqu'à lui par l'air, l'eau ou les aliments. L'étude des voies d'absorption par l'organisme humain complète donc celle de leur transfert, chez les plantes comme chez les animaux, dans les recherches visant à maîtriser cette exposition.

Les **voies d'exposition**

Jeremy Woodhouse/PhotoDisc

Présents dans tous les compartiments de l'environnement, les radionucléides, qu'ils soient d'origine naturelle ou artificielle, sont entraînés dans la circulation générale de l'atmosphère et de l'hydrosphère. Les radionucléides émis sous forme de gaz et de particules solides ou liquides très fines se répartissent dans l'air puis se déposent sur le sol et sur les végétaux.

Air, eau et alimentation

Des radionucléides dans tous les compartiments de l'environnement

L'irradiation que subit l'homme sur Terre est due pour plus de 85 % à la **radioactivité naturelle d'origine tellurique** et au **rayonnement cosmique**. À cette composante s'ajoute la **contribution anthropique**, qui résulte des applications médicales des **rayonnements ionisants** et de l'industrie nucléaire civile ou militaire (encadré A, ***Radioactivité naturelle et radioactivité artificielle***, p. 6 ; tableaux 1 et 2).

Si l'**exposition** aux rayonnements naturels s'effectue en partie de manière **externe** pour près de 36 %, lorsque la source d'exposition est en dehors de l'organisme, l'exposition interne (64 % de la dose naturelle) implique le transfert des **radionucléides** jusqu'à l'homme, leur absorption et leur **incorporation** (encadré B, ***Les voies d'atteinte de l'homme***, p. 13). Ces apports en radionucléides découlent principalement des interactions de l'homme avec son environnement, à travers les **compartiments** que sont l'air, l'eau et l'alimentation. Outre les éléments tels que le carbone et le potassium, indispensables à la vie humaine et qui induisent donc une radioactivité incontournable pour les organismes vivants (un être humain d'environ 70 kg contient près de 4 500 **becquerels** (**Bq**) de potassium 40 et 3 700 Bq de carbone 14), l'alimentation véhicule aussi de nombreux autres radionucléides naturels, notamment l'uranium, le thorium et leurs descendants (tableaux 3 et 4).

L'air respiré conduit également à l'inhalation de gaz **radon**, produit de filiation de l'uranium et du radium, en particulier dans les régions granitiques, ou à celle de

Tableau 1.
Dose annuelle de rayonnements ionisants d'origines naturelle et artificielle estimée pour l'année 2000 au niveau mondial. (Rapport UNSCEAR 2000).

source du rayonnement	dose annuelle moyenne par habitant (mSv)	part approximative (%)
bruit de fond naturel (rayonnements cosmiques et telluriques)	2,4*	85,5
examens médicaux	0,4**	14,2
conséquences des essais nucléaires atmosphériques anciens	0,005	0,2
accident de Tchernobyl (1986)	0,002 (hémisphère Nord)	0,07
production d'énergie d'origine nucléaire	0,0002	0,007

* les variations de l'exposition naturelle sont importantes, comprises entre 1 et 100 mSv/an.

** dans les pays industrialisés, l'exposition médicale, liée essentiellement aux doses reçues lors d'examens diagnostiques, dépasse en moyenne 1 mSv/an.

Tableau 2.
Origine et part relative des doses annuelles moyennes au niveau mondial de rayonnements reçues par l'homme, issues de sources naturelles d'irradiation. (Rapport UNSCEAR 2000).

rayonnements cosmiques	rayonnements telluriques	
0,4 mSv/an (17 %)	2,0 mSv/an (83 %)	24 % par exposition externe (sol, roches, etc.)
		63 % par inhalation (particules uranifères et thorifères, radon, etc.)
		13 % par ingestion (particules uranifères thorifères, potassium 40, etc.)

radionucléide	activité dans l'air (mBq/m^3)
tritium (^{3}H)	1,4
béryllium 7 (^{7}Be)	12,5
carbone 14 (^{14}C)	56,3
uranium 238 (^{238}U)	0,001
uranium 235 (^{235}U)	0,00005
uranium 234 (^{234}U)	0,001
plomb 210 (^{210}Pb)	0,5
thorium 232 (^{232}Th)	0,0005
thorium 230 (^{230}Th)	0,0005
thorium 228 (^{228}Th)	0,001
radium 228 (^{228}Ra)	0,001
radium 226 (^{226}Ra)	0,001

Tableau 3.
Concentration (activité) des radionucléides naturels dans l'air au niveau mondial. (Rapport UNSCEAR 2000).

particules minérales entraînées par le vent et contenant naturellement de l'uranium, du thorium et du potassium 40. À titre d'exemple, en France, la concentration du radon dans les habitations est ainsi estimée en moyenne à 90 Bq/m^3 d'air, mais peut fluctuer largement suivant les régions et d'une habitation à l'autre de 1 à environ 5000 Bq/m^3. Ces émanations de radon contribuent à près de la moitié de la dose annuelle d'origine tellurique.

InterNetwork Media/PhotoDisc

Éruption du mont St-Helens, État de Washington (États-Unis). Une éruption volcanique contribue à augmenter la distribution globale des radionucléides dans l'environnement.

Différentes sources de radioactivité pour divers types de transfert

Les radionucléides se trouvent de façon ubiquiste dans tous les compartiments de l'environnement. Quelle que soit leur forme physique, ils sont entraînés dans les mouvements de l'air et de l'eau autour de la planète, sous forme de gaz et d'**aérosols** dans la circulation générale de l'atmosphère, et sous forme d'espèces dissoutes, particulaires et **colloïdales** dans l'écoulement des nappes souterraines, des rivières et dans la circulation océanique. Cette circulation tend à homogénéiser la distribution des radionucléides et les dilue. Cependant, les radionucléides sont aussi soumis, depuis l'atmosphère, à des dépôts sur le sol et, dans l'hydrosphère(1), à la précipitation ou à la sédimentation. Ils peuvent donc s'accumuler localement.

Il existe d'autres apports à la distribution globale des radionucléides. Ils ont pour origine des effets naturels, comme par exemple l'éruption d'un volcan, ou l'utilisation technologique de la radioactivité par l'homme. Toutes les activités anthropiques correspondent à des sources ponctuelles qui produisent un marquage de l'environnement le plus souvent local.

En général, les scientifiques ne cherchent à modéliser le transport des radionucléides dans l'environnement

(1) Hydrosphère : ensemble des compartiments contenant de l'eau sur la Terre (lacs, fleuves, mers, océans).

aliments	uranium 238 (^{238}U)	radium 226 (^{226}Ra)	plomb 210 (^{210}Pb)	thorium 232 (^{232}Th)
produits laitiers	1	5	15	0,3
viandes	2	15	60	1
légumes verts	20	50	80	15
fruits et légumes	3	30	40	0,5
poissons	30	100	200	10
eaux de boisson (mBq/L)	1	0,5	5	0,05

Ces données ne rendent pas compte de l'extrême disparité des teneurs mesurées localement. À titre d'exemple, les teneurs en uranium 238 dans les eaux de boisson peuvent varier en Finlande de 0,5 à 150000 mBq/L. En France, elles s'étendent de 4,4 à 930 mBq/L (à titre comparatif, la concentration de l'uranium 238 dans l'eau de mer est de 30 mBq/L). La teneur en radium 226 d'eaux minérales françaises peut fluctuer de 30 mBq/L à près de 2000 Bq/L suivant l'origine, et en particulier les terrains parcourus par les eaux.

Tableau 4.
Concentrations (activités) moyennes mondiales des radionucléides dans les produits alimentaires (mBq/kg) (Rapport UNSCEAR 2000).

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.

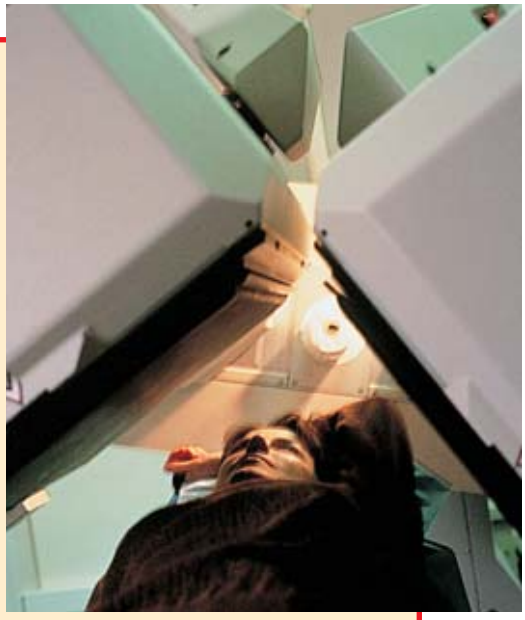
Le radon, descendant radioactif gazeux de l'uranium 238 et du thorium 232, émane du sol et des matériaux de construction et constitue avec ses descendants à vie courte émetteurs alpha une source d'exposition interne par inhalation. Le radon représente la source la plus importante de l'irradiation naturelle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

(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.



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.

PhotoLink/PhotoDisc

Les chutes Havasu, Arizona (États-Unis). L'eau est un vecteur de transport important des radionucléides, qui y circulent sous différentes formes physico-chimiques. Leur comportement en solution est régi par de nombreux paramètres.

que dans les cas dépassant le cadre naturel. La radioactivité ajoutée par les activités humaines est l'objet d'une attention particulière en termes de modélisation physique et de simulation numérique.

Les mécanismes de transfert par l'air

L'atmosphère représente le premier milieu à travers lequel migrent les gaz et les aérosols. Émis par les cheminées des installations, les radionucléides présents sous ces formes physiques se répartissent dans l'air sous l'effet combiné de l'advection(2) par le vent et de la dispersion turbulente(3). En outre, gaz et particules subissent un dépôt humide (par temps de pluie) et un dépôt sec sur le sol et sur les végétaux.

Les mécaniciens des fluides étudient les écoulements atmosphériques et le transport de particules et de gaz dans l'air à l'aide de modèles physiques et de calculs de niveaux de complexité variables. Le choix d'une méthodologie simple ou élaborée est guidé par la précision du résultat et la rapidité d'obtention souhaitées.

Les mécanismes de transfert par l'eau

L'eau, dont la distribution est hétérogène dans les sols et les roches, est un vecteur de transport important parce que potentiellement mobilisable rapidement, par opposition aux sols et aux roches qui la contiennent.
La dispersion ou la re-concentration des radionucléides dans l'eau dépend de nombreux paramètres physiques et chimiques qui contrôlent leur comportement en solution et leurs interactions avec les phases solides. La perméabilité des milieux hydrogéologiques, la composition de l'eau et la présence de colloïdes en sont les facteurs les plus déterminants. La migration des radionucléides est ainsi retardée par rapport à l'eau. Ce retard, qui varie en fonction de la nature des radionucléides, de leur forme physico-chimique et du milieu les renfermant, produit des fractionnements chimiques et **isotopiques**. La mesure de ce retard et de ces fractionnements va renseigner sur les mécanismes de transfert des radionucléides dans l'environnement.

> **Xavier Machuron-Mandard, Patrick Armand** et **Éric Pili**
Direction des applications militaires
CEA centre DAM–Île de France

(2) Advection : déplacement d'une masse de gaz (d'air en l'occurrence) dans le sens horizontal (par opposition à convection, dans le sens vertical).

(3) Turbulence : mode d'écoulement d'un fluide dans lequel se superpose au mouvement moyen un mouvement d'agitation aléatoire.

PhotoLink/PhotoDisc

L'alimentation véhicule jusqu'à l'homme de nombreux éléments nécessaires à la vie, dont certains radionucléides d'origine naturelle. En cas d'un rejet accidentel de radionucléides dans l'environnement, la contamination de la chaîne alimentaire constituerait une composante majeure de l'exposition humaine.

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) : $1 / Te = 1 / Tp + 1 / Tb$.

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 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.

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.