

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

radionucléide	émission	période physique ⁽¹⁾	activité massique [Bq/g] ⁽²⁾	période effective ⁽³⁾	DPI ⁽⁴⁾ [Sv] ⁽¹⁾ inhalation 5 µm, travailleurs (organe cible) ⁽⁵⁾	DPI ⁽⁴⁾ [Sv] ⁽¹⁾ ingestion 1 µm, public (organe cible) ⁽⁵⁾	facteur ingestion ⁽¹⁾ f ₁ adulte
³ H tritium (eau tritiée)	bêta	12,35 ans	3,57·10 ¹⁴	12 j	1,8·10 ⁻¹¹ (corps entier)	1,8·10 ⁻¹¹ (estomac)	1
⁷ Be béryllium	gamma	53,6 j	1,29·10 ¹⁶	41 j	4,8·10 ⁻¹¹ [ET] ⁽⁶⁾	2,8·10 ⁻¹¹ (côlon)	5·10 ⁻³
¹⁴ C carbone	bêta	5730 ans	1,65·10 ¹¹	40 j	6,5·10 ⁻¹² (poumon)	5,8·10 ⁻¹⁰ (estomac)	1
⁴⁰ K potassium	bêta, gamma	1,2·10 ⁹ ans	2,63·10 ⁵		2,4·10 ⁻⁹ (côlon)	6,2·10 ⁻⁹ (côlon)	1
⁵⁸ Co cobalt	bêta, gamma	70,8 j	1,18·10 ¹⁵	8,4 j	1,7·10 ⁻⁹ [ET] ⁽⁶⁾	7,4·10 ⁻¹⁰ (côlon)	0,1
⁶⁰ Co cobalt	bêta, gamma	5,27 ans	4,18·10 ¹³	9,5 j	9·10 ⁻⁹ (poumon)	3,4·10 ⁻⁹ (côlon)	0,1
⁷⁹ Se sélénium	bêta	1,1·10 ⁶ ans	1,52·10 ⁸		3,1·10 ⁻⁹ (rein)	2,9·10 ⁻⁹ (rein)	0,8
⁸⁵ Kr krypton	bêta, gamma	10,4 ans	1,5·10 ¹³				
⁸⁹ Sr strontium	bêta	50,5 j	1,07·10 ¹⁵	50,3 j	5,6·10 ⁻⁹ (poumon)	2,6·10 ⁻⁹ (côlon)	0,3
⁹⁰ Sr strontium	bêta	29,12 ans	5,05·10 ¹²	15,6 ans	7,8·10 ⁻¹¹ (poumon)	2,8·10 ⁻⁸ (os)	0,3
⁹⁰ Y yttrium	bêta, gamma	2,67 j	2,01·10 ¹⁶	64 h	1,7·10 ⁻⁹ (côlon)	2,7·10 ⁻⁹ (côlon)	10 ⁻⁴
⁹⁹ Tc technétium	bêta, gamma	2,14·10 ⁵ ans	6,25·10 ⁸	≈ 3 j	4·10 ⁻¹⁰	6,4·10 ⁻¹⁰	0,5
^{99m} Tc technétium	gamma	6,02 h	1,95·10 ¹⁷	6 h	2,9·10 ⁻¹¹ [ET] ⁽⁶⁾	2,2·10 ⁻¹¹ (côlon)	0,5
¹⁰³ Ru ruthénium	bêta, gamma	39,3 j	1,19·10 ¹⁵	2,38 j		7,3·10 ⁻¹⁰ (côlon)	0,05
¹⁰⁶ Ru ruthénium	bêta, gamma	368,2 j	1,24·10 ¹⁴	2,4 j	3,5·10 ⁻⁸	7·10 ⁻⁹ (côlon)	0,05
^{110m} Ag argent	bêta, gamma	249,9 j	1,75·10 ¹⁴	4,8 j	7,3·10 ⁻⁹ (poumon)	2,8·10 ⁻⁹ (côlon)	0,05
¹²⁴ Sb antimoine	bêta, gamma	60,2 j	6,47·10 ¹⁴	23 j	4,7·10 ⁻⁹ (poumon)	2,5·10 ⁻⁹ (côlon)	0,1
¹²⁵ I iode	gamma	60,14 j	6,42·10 ¹⁴		1,4·10 ⁻⁸ (thyroïde)	1,5·10 ⁻⁸ (thyroïde)	1
¹²⁹ I iode	bêta, gamma	1,57·10 ⁷ ans	6,54·10 ⁶		5,1·10 ⁻⁸ (thyroïde)	1,1·10 ⁻⁷ (thyroïde)	1
¹³¹ I iode	bêta, gamma	8,04 j	4,6·10 ¹⁵	7,6 j	2·10 ⁻⁸ (thyroïde)	2,2·10 ⁻⁸ (thyroïde)	1
¹³² I iode HB	bêta, gamma	2,3 h	3,82·10 ¹⁷	2 h	3,1·10 ⁻¹⁰ (thyroïde)	2,9·10 ⁻¹⁰ (thyroïde)	1
¹³³ I iode	bêta, gamma	20,8 h	4,19·10 ¹⁶	0,87 j	4·10 ⁻⁹ (thyroïde)	4,3·10 ⁻⁹ (thyroïde)	1
¹³³ Xe xénon	bêta, gamma	5,24 j	6,6·10 ¹⁵				
¹³⁴ Cs césium	bêta, gamma	2,06 ans	4,78·10 ¹³	65 j	9,6·10 ⁻⁹ [ET] ⁽⁶⁾	1,9·10 ⁻⁸ (corps entier)	1
¹³⁵ Cs césium	bêta, gamma	2,3·10 ⁶ ans	4,26·10 ⁷		3,1·10 ⁻⁹	2·10 ⁻⁹	1
¹³⁵ Xe xénon	bêta, gamma	9,2 h	9,33·10 ¹⁶				
¹³⁷ Cs césium	bêta, gamma	30 ans	3,22·10 ¹²	69,5 j	6,7·10 ⁻⁹ [ET] ⁽⁶⁾	1,3·10 ⁻⁸ (côlon)	1
¹⁴⁴ Ce cérium	bêta, gamma	284,3 j	1,18·10 ¹⁴	191 j	2,9·10 ⁻⁸ (poumon)	5,2·10 ⁻⁹ (côlon)	5·10 ⁻⁴
¹⁹⁸ Au or	bêta, gamma	2,69 j	9,07·10 ¹⁵	2,6 j	1,1·10 ⁻⁹ [ET] ⁽⁶⁾	1·10 ⁻⁹ (côlon)	0,1
²¹⁰ Pb plomb	bêta, gamma	22,3 ans	2,83·10 ¹²	3,29 ans*	1,1·10 ⁻⁶ (os)	6,9·10 ⁻⁷ (os)	0,2
²¹² Po polonium	alpha	138,38 j	1,66·10 ¹⁴	45 j	2,2·10 ⁻⁶ (poumon)	1,2·10 ⁻⁶ (rein)	0,5
²²² Rn radon	alpha, gamma	3,82 j	5,70·10 ¹⁵				
²²⁴ Ra radium	alpha, gamma	3,66 j	5,88·10 ¹⁵	3,6 j	2,4·10 ⁻⁶ (poumon)	6,5·10 ⁻⁸ (os)	0,2
²²⁶ Ra radium	alpha, gamma	1 600 ans	3,64·10 ¹⁰	≈ 15 ans*	2,2·10 ⁻⁶ (poumon)	2,8·10 ⁻⁷ (os)	0,2
²²⁸ Th thorium	alpha, gamma	1,91 ans	3,03·10 ¹³	1,89 an	2,5·10 ⁻⁵ (poumon)	7,2·10 ⁻⁸ (os)	5·10 ⁻⁴
²²⁸ Ra radium	bêta, gamma	5,75 ans	1,01·10 ¹³	5,7 ans*	1,7·10 ⁻⁶ (poumon)	6,9·10 ⁻⁷ (os)	0,2
²³² Th thorium	bêta, gamma	14,1·10 ⁹ ans	4,04·10 ³	> 100 ans*	5,9·10 ⁻⁹ (poumon)	2,3·10 ⁻⁷ (os)	5·10 ⁻⁴
²³⁴ U uranium	alpha	246 000 ans	2,3·10 ⁸	100 j	6,8·10 ⁻⁶ [ET] ⁽⁶⁾	4,9·10 ⁻⁸ (os)	0,02
²³⁵ U uranium	alpha, gamma	7,04·10 ⁸ ans	8·10 ⁴	100 j	6,1·10 ⁻⁶ [ET] ⁽⁶⁾	4,7·10 ⁻⁸ (os)	0,02
²³⁸ U uranium	alpha, gamma	4,47·10 ⁹ ans	1,24·10 ⁴	100 j	5,7·10 ⁻⁶ [ET] ⁽⁶⁾	4,5·10 ⁻⁸ (os)	0,02
²³⁷ Np neptunium	alpha, gamma	5,4·10 ⁶ ans	2,61·10 ⁷	> 100 ans*	1,5·10 ⁻⁵	1,1·10 ⁻⁷	5·10 ⁻⁴
²³⁸ Pu plutonium	alpha, gamma	87,7 ans	6,34·10 ¹¹	61,9 ans*	1,1·10 ⁻⁵ [ET] ⁽⁶⁾	2,3·10 ⁻⁷ (os)	5·10 ⁻⁴
²³⁹ Pu plutonium	alpha, gamma	24 100 ans	2,3·10 ⁹	> 100 ans*	2,3·10 ⁻⁶ (os)	2,5·10 ⁻⁷ (os)	5·10 ⁻⁴
²⁴⁰ Pu plutonium	alpha, gamma	6 560 ans	8,41·10 ⁹	> 100 ans*	8,3·10 ⁻⁶ (os)	2,5·10 ⁻⁷ (os)	5·10 ⁻⁴
²⁴¹ Am américium	alpha, gamma	432,7 ans	1,27·10 ¹¹	> 100 ans*	2,7·10 ⁻⁵ (os)	2·10 ⁻⁷ (os)	5·10 ⁻⁴
²⁴¹ Pu plutonium	alpha, bêta, gamma	14,4 ans	3,81·10 ¹²	12,33 ans*	8,4·10 ⁻⁸ (os)	4,8·10 ⁻⁹ (os)	5·10 ⁻⁴
²⁴³ Am américium	alpha, gamma	7 370 ans	7,39·10 ⁹	> 100 ans*	2,7·10 ⁻⁵ (os)	2·10 ⁻⁷ (os)	5·10 ⁻⁴

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

(2) $A_i = (N \times \ln 2) / (M_i \times T_{1/2})$ avec N = nombre d'Avogadro 6,023·10²³, M_i la masse molaire, $T_{1/2}$ la **période physique** en secondes.

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

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

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

(6) ET : extra-thoracique.

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

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

(7) La mention "corps" correspond à une distribution uniforme ou homogène.

(8) RfD : dose de référence, correspond en toxicologie chimique à la valeur quotidienne admissible sans effet toxique. Les valeurs indiquées sont celles retenues par l'EPA.

(9) TGI : tractus gastro-intestinal.

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.

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.