

Annexe 1

Rappels sur la radioactivité et ses effets sur l'organisme

André Aurengo
Académie nationale de médecine

Les rayonnements émis par les substances radioactives sont dits « rayonnements ionisants » (RI) car ils ont une énergie suffisante pour arracher des électrons aux molécules d'eau. Cette « radiolyse de l'eau » peut conduire à l'apparition de produits chimiques très réactifs susceptibles d'endommager les chromosomes de nos cellules.

Les rayonnements ionisants sont certainement le phénomène physique dont les effets sur l'organisme a été le plus étudié et on compte près de 20 000 publications internationales dans ce domaine¹. La France s'y est particulièrement illustrée, depuis les travaux de Becquerel, auquel on doit la découverte des « rayons uraniques » et Marie Curie qui en a compris la nature, a inventé le terme de « radioactivité » et a eu un rôle pionnier en radiothérapie et radiobiologie. Cette tradition se poursuit et plusieurs laboratoires de recherche Inserm et CNRS sont consacrés à ces recherches, souvent en liaison avec le CEA qui a eu un rôle stimulant en liaison avec l'Institut Gustave Roussy et l'Institut Curie. Les travaux et rapports français sont très souvent cités et l'Académie des Sciences a déjà rédigé plusieurs rapports sur ce sujet parmi lesquels deux ont été traduits en anglais² et sont cités fréquemment dans la littérature internationale.

Sources radioactives

Une source radioactive est caractérisée par :

- **la nature de l'émission** : alpha (noyaux d'hélium), bêta (électrons) et gamma (rayonnement électromagnétique/photons) ;
- **l'énergie des rayonnements émis**, exprimée en milliers d'électrons-volts (keV). Par exemple l'iode 131 émet des photons d'énergie 365 keV et des électrons d'énergie maximale 600 keV. Les énergies des émissions radioactives sont très supérieures au seuil permettant l'ionisation de l'eau (13,6 eV) ; elles appartiennent donc au domaine des rayonnements ionisants ;
- **l'activité** qui est le nombre de désintégrations par seconde exprimé en becquerels (Bq). Par exemple un gramme de radium a une activité de $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq, soit 37 milliards de désintégrations par seconde ; en hommage à Pierre et Marie Curie, on a donné le nom de « curie » à cette activité ;
- **la période**, temps nécessaire pour que l'activité diminue de moitié. Par exemple la période de l'iode 131 est de 8 jours, celles des césiums 134 et 137 respectivement de 2 ans et 30 ans.

¹ <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed?term=%22ionizing%20radiation%22>

² Problèmes liés aux effets des faibles doses des radiations ionisantes. Rapport de l'Académie des sciences n° 34, Octobre 1995 Éditions Tec & Doc.

« La relation dose-effet et l'estimation des effets cancérogènes des faibles doses de rayonnements ionisants ». Rapport commun Académie des sciences et Académie nationale de médecine. Mars 2005.

Doses

La quantité de rayonnements ionisants reçue par un organisme peut être quantifiée de trois manières différentes :

- **la dose absorbée**, unité de la physique classique, correspond à l'énergie absorbée par unité de masse qui s'exprime en gray (Gy) : $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$. Elle est très utilisée en radiothérapie et d'une manière générale pour la dose reçue par un organe particulier ou par l'ensemble du corps en cas d'exposition homogène ;
- **la dose équivalente**, exprimée en sievert (Sv) ou millisievert (mSv), est égale à la dose absorbée multipliée par un « *facteur de pondération radiologique* » qui tient compte de la nocivité relative des différents types de rayonnements vis-à-vis du risque de cancer ou d'effet héréditaire. Ce facteur est égal à 1 pour les rayonnements bêta et gamma, mais de 20 pour les particules alpha ;
- **la dose efficace**, également exprimée en sievert (ce qui est une source de confusion fréquente), est égale à la somme, pour chaque organe ou tissu, de la dose équivalente multipliée par un « *facteur de pondération tissulaire* » qui exprime la sensibilité de l'organe ou tissu considéré relative aux rayonnements. Le facteur de pondération tissulaire est, par exemple, égal à 0,12 pour la moelle osseuse et à 0,04 pour la thyroïde. La dose efficace a été introduite pour les besoins de la radioprotection car elle permet d'additionner les doses reçues par différentes régions du corps. En France, l'irradiation d'origine naturelle varie entre 2,4 et 5,5 mSv selon les régions ;
- **le débit de dose** caractérise la rapidité avec laquelle une irradiation est délivrée. C'est un paramètre très important de l'effet que peut avoir une même dose car elle conditionne le nombre de lésions simultanées qui peuvent survenir dans une cellule et les cellules voisines et par ce biais l'efficacité de nos systèmes de défense contre les rayonnements ionisants.

Remarques

- l'activité d'une source se mesure en becquerels grâce à un compteur approprié. La contamination des sols est ainsi mesurée en becquerels (de tel ou tel produit radioactif) par mètre carré ;
- quand on s'intéresse à un seul organe, il est préférable d'exprimer les doses en grays pour éviter toute confusion entre la dose équivalente et la dose efficace qui s'expriment malheureusement toutes les deux en sieverts !). En radiothérapie, on exprime toujours les doses en grays ;
- passer des becquerels aux grays ou aux sieverts n'est pas simple :
 - o s'il s'agit d'une source radioactive située hors de l'organisme, on dispose de tables donnant le débit de dose efficace en fonction de l'activité de la source. Par exemple, un flacon contenant un million de becquerels de césium 137 délivre à 1 mètre une dose efficace de 0,00009 millisievert (mSv) par heure ;
 - o s'il s'agit d'une contamination interne, il faut connaître le mode de contamination (absorption ou inhalation), la nature et l'activité du produit radioactif et son devenir dans l'organisme. On peut alors calculer, en gray, la dose qui sera absorbée par chaque organe. On calcule la dose efficace en sieverts, en multipliant la dose absorbée par les facteurs de pondération (des rayonnements et tissulaire) et en ajoutant les résultats obtenus pour tous les

organes. Par exemple, on calcule que l'absorption par un adulte d'un million de becquerels d'iode 131 entraîne une dose à la thyroïde d'environ 350 milligrays (mGy) et au reste du corps d'environ 0,19 mGy. Il en résulte une dose efficace d'environ $(350 \times 0,04) + (0,2 \times 0,96) \approx 14,2$ millisieverts. Ce calcul, est fait pour un français dont l'apport d'iode quotidien par l'alimentation est limité ($\approx 100 \mu\text{g}$ par jour). Pour un japonais dont l'apport d'iode est beaucoup plus important ($\approx 1200 \mu\text{g}$ par jour), la dose à la thyroïde est environ dix fois plus faible.

Les effets des rayonnements ionisants sur l'organisme

Les rayonnements ionisants ont sur l'organisme deux types d'effets très différents : *effets déterministes* qui n'apparaissent qu'à partir d'un certain seuil et se produisent toujours quand la dose dépasse une certaine valeur et *effets aléatoires* qui se produisent apparemment au hasard.

Les effets déterministes

Les effets déterministes sont généralement précoces, sont d'autant plus graves que la dose est plus élevée. Ils traduisent la mort de nombreuses cellules constituant les tissus. Ils n'apparaissent qu'à partir d'un certain seuil et se produisent toujours quand la dose dépasse une certaine valeur. Ils peuvent survenir lors d'irradiations de tout l'organisme ou lors d'irradiations localisées.

Les irradiations massives et globales de l'ensemble du corps peuvent être mortelles, après des prodromes (nausées, vomissements, fatigue, diarrhée, malaises) suivis d'une phase de latence d'autant plus courte que la dose est plus élevée :

- pour des doses supérieures à 12 Gy, la mort survient en quelques heures, conséquence d'un oedème cérébral aigu ;
- pour des doses comprises entre 5 et 20 Gy, la mort survient en une semaine environ, conséquence d'une destruction de la paroi du tube digestif ;
- pour des doses de 3 à 5 Gy, la mort peut survenir en quelques semaines, conséquence d'une aplasie médullaire. Dans ce cas, un traitement précoce en centre spécialisé a des chances importantes de sauver la personne irradiée. Des personnes ayant subi accidentellement des irradiations globales jusqu'à 10 Gy étalées dans le temps ont pu être sauvées.

Les conséquences des irradiations localisées dépendent de la dose absorbée et de l'organe considéré. Les irradiations cutanées par exemple permettent une quantification approximative de la dose reçue : un érythème (rougeur et chaleur locales) signe des doses d'environ 5 grays. Une irradiation des gonades entraîne une stérilité définitive pour des doses de 3 grays pour une femme et 4 grays pour un homme.

Les malformations congénitales non héréditaires (non transmissibles à la descendance) sont des effets déterministes secondaires à une exposition pendant la grossesse, avec un risque maximal du 9^e jour à la 9^e semaine de grossesse pour la majorité des organes. Les effets sur le système nerveux central sont observés pendant la phase d'organogenèse entre la 8^e et la 15^e semaine. Ces effets ne sont observés que pour des doses dépassant 100 à 200 mGy à l'embryon ou au fœtus.

Les effets aléatoires

Ces effets aléatoires ne se manifestent que chez certains individus, apparemment au hasard, avec une probabilité qui augmente avec la dose reçue. Ces effets sont tardifs et apparaissent

plusieurs années après l'irradiation. Leur gravité, lorsqu'ils surviennent, est totalement indépendante de la dose reçue.

Nos connaissances sur les effets aléatoires des rayonnements reposent en grande partie sur le suivi, depuis cinquante ans, de la cohorte des survivants des bombardements nucléaires d'Hiroshima et Nagasaki. Cette cohorte comportait à son début près de 86 000 personnes (Life Span Study³). Pour 60 % d'entre elles, les doses efficaces reçues, reconstituées en fonction de la distance à l'explosion et de l'environnement immédiat, étaient d'au moins 5 mSv. Le dernier rapport⁴ fait état, pour un suivi de 47 ans, de 9 300 morts d'un cancer dont environ 355 cas de cancer solide et 85 cas de leucémie secondaires à l'irradiation reçue et dits « radioinduits ».

Les leucémies radioinduites ont été observées chez des survivants d'Hiroshima-Nagasaki avec un maximum de fréquence 6 à 7 ans après les bombardements nucléaires. Dans le rapport de 2003, on dénombrait 85 leucémies radioinduites, représentant environ 10 % de l'ensemble des leucémies observées dans ce groupe. Rappelons que Marie Curie elle-même est décédée d'une leucémie probablement radioinduite. Des cancers solides sont apparus dix ans environ après l'irradiation ; leur incidence a augmenté avec les années. Des doses inférieures à 100 mSv n'entraînent aucune augmentation significative du risque de leucémie ou de cancer solide.

Ce seuil pratique de 100 mSv pourrait ne traduire que l'incertitude statistique inhérente à la très faible efficacité de l'effet cancérigène radioinduit. Mais il s'explique par le fait que les mécanismes de défense de l'organisme contre les faibles et fortes doses sont très différents et sont proportionnellement beaucoup plus efficaces à faible dose. Schématiquement, quand il s'agit de faibles doses ayant endommagé l'ADN d'un petit nombre de cellules, celles-ci sont simplement éliminées et ne dégèneront donc pas en cancer. Pour des doses efficaces dépassant 100 à 200 mSv, le nombre de cellules lésées ne permet plus leur élimination pure et simple. Les systèmes de réparation de l'ADN sont alors activés pour permettre la survie cellulaire et préserver les fonctions des tissus. Mais il arrive que la réparation de l'ADN soit imparfaite, avec des erreurs qui peuvent conduire à la cancérogenèse avec un risque d'autant plus grand que la dose est plus élevée.

Le cancer thyroïdien radioinduit est le seul cancer dont l'augmentation d'incidence (massive) a été observée après l'accident de Tchernobyl. Ce cancer touche des personnes qui étaient très jeunes ou *in utero* lors de l'accident. Les études épidémiologiques montrent que le risque n'est significativement augmenté que pour des doses à la thyroïde dépassant 100 mGy.

Des affections congénitales héréditaires, transmissibles à la descendance, ont été observées chez l'animal (souris, drosophile), mais jamais chez l'homme, en particulier au cours du long suivi des personnes irradiées à Hiroshima-Nagasaki. Parmi les hypothèses expliquant cette différence celles de la proximité chez l'homme de gènes indispensables à la vie jouxtant les gènes responsables des pathologies héréditaires observées chez les animaux est la plus plausible.

Le traitement des effets des rayonnements ionisants

Le traitement des effets des rayonnements ionisants est avant tout préventif. La prévention est simple pour les effets déterministes (il suffit de rester au-dessous du seuil de leur apparition avec une marge de sécurité), plus délicate pour les effets aléatoires car la relation

³ http://www.rerf.or.jp/library/archives_e/lsstitle.html

⁴ Preston DL, Shimizu Y, Pierce DA, Suyama A, Mabuchi K. Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997. *Radiat Res* 160(4):381-407, 2003.

dose-risque pour les faibles doses n'est pas connue avec assez de précision (même si on sait que le risque est proportionnellement plus faible que pour de fortes doses). Par prudence on a fixé la dose efficace maximale admissible annuelle à 20 mSv pour les personnes utilisant les rayonnements ionisants à titre professionnel, et à 1 mSv par an pour les personnes du public (sans compter l'irradiation naturelle, ni les irradiations résultant d'éventuels examens ou traitements médicaux).

Situations accidentelles

L'échelle INES

Créée pour qualifier la gravité des accidents nucléaires, l'échelle INES⁵ mise en place en 1991, comporte huit niveaux, de 0 à 7. Les critères de classement d'un incident ou d'un accident prennent en compte la dégradation ou les défaillances des systèmes de sûreté (défense « en profondeur »), les conséquences humaines et matérielles à l'intérieur du site et les effets à l'extérieur du site, sur la santé et sur l'environnement.

Le tableau suivant⁶ précise ces critères :

Conséquences à l'extérieur du site	Conséquences à l'intérieur du site	Défense en profondeur	
Rejet majeur : effets considérables sur la santé et l'environnement			7
Rejet important susceptible d'exiger l'application intégrale des contre-mesures prévues			6
Rejet limité susceptible d'exiger l'application partielle des contre-mesures prévues	Endommagement grave du cœur du réacteur / des barrières radiologiques		5
Rejet mineur : exposition du public de l'ordre des limites prescrites	Endommagement important du cœur du réacteur / des barrières radiologiques / exposition mortelle d'un travailleur		4
Très faible rejet : exposition du public représentant une fraction des limites prescrites	Contamination grave / effets aigus sur la santé d'un travailleur	Accident évité de peu / perte des barrières	3
	Contamination importante / surexposition d'un travailleur	Incidents assortis de défaillances importantes des dispositions de sécurité	2
		Anomalie sortant du régime de fonctionnement autorisé	1
Aucune importance du point de vue de la sûreté			0

⁵ International Nuclear Event Scale : échelle internationale de événements nucléaires

⁶http://www.irs.fr/FR/base_de_connaissances/Installations_nucleaires/La_surete_Nucleaire/organisation_surete_nucleaire/echelle-ines/Pages/sommaire.aspx

Les accidents de Tchernobyl et de Fukushima ont tous deux été classés au niveau 7, mais pour des raisons différentes : pour Tchernobyl, les effets considérables sur la santé et sur l'environnement ont été pris en compte ; seuls les effets sur l'environnement et l'importance des rejets radioactifs ont été pris en compte pour Fukushima.

En cas d'accident nucléaire, comme celui de Fukushima, la prévention des conséquences repose sur des installations spécifiques, présentes sur les centrales françaises : recombineur d'hydrogène destiné à éviter les explosions d'hydrogène libéré par la réaction chimique entre le zirconium qui engaine le combustible et l'eau en cas de surchauffe ; filtres à sable retenant la plus grande partie du césium radioactif, pièges à iode faisant de même avec les isotopes radioactifs de l'iode.

Si des rejets surviennent, la conduite à tenir dépend de la dose efficace globale et de la dose absorbée par la thyroïde, susceptibles d'être reçues par la population :

- si la dose efficace à l'ensemble du corps peut atteindre 10 mSv, une mise à l'abri, confiné à domicile ou sur le lieu de travail, est préconisée ;
- si la dose à la thyroïde peut atteindre 50 mSv, la prise d'iode stable pour éviter la concentration de l'iode radioactif par la thyroïde est nécessaire. Cette mesure est particulièrement importante pour les enfants et les femmes enceintes ;
- si la dose efficace à l'ensemble du corps peut atteindre 50 mSv, il faut procéder à une évacuation.

Le traitement des effets déterministes des doses massives doit être conduit par des équipes spécialisées.

Les expositions à des doses significatives nécessitent une surveillance régulière, tout particulièrement des enfants contaminés par l'iode radioactif, pour le dépistage et la prise en charge précoces des cas de cancer thyroïdien radioinduit.

L'utilisation médicale des rayonnements ionisants

En médecine, les rayonnements ionisants sont utilisés à des fins diagnostiques ou thérapeutiques.

Irradiations diagnostiques

Ces irradiations résultent d'exams radiologiques (radiographie standard, scanner à rayons X, radiographie interventionnelle), isotopiques (scintigraphie) ou mixtes (TEP-scanner).

En moyenne, un Français adulte subit une irradiation diagnostique par an, mais ces examens concernent principalement des personnes de plus de 50 ans.

Les doses sont faibles, de l'ordre du millisievert, sauf pour les scanners, pour lesquels la dose peut atteindre 15 à 20 mSv. Ces doses sont trop faibles pour entraîner un risque cancérigène, même chez les enfants. Néanmoins il faut chez eux limiter les indications du scanner aux cas où le bénéfice escompté de l'examen est notable. On considère généralement que les faibles doses (< 100 mSv) n'ont pas d'effet cancérigène. L'effet cumulatif de faibles doses est controversé.

Irradiations thérapeutiques

Environ 70 000 français bénéficient chaque année d'une irradiation thérapeutique pour cancer. Le risque d'un cancer secondaire, dû au traitement et survenant 15 à 30 ans après l'irradiation anticancéreuse, est faible (environ 3 % chez les adultes). Chez les enfants, le

risque est plus élevé du fait d'une plus grande radiosensibilité et d'une espérance de vie plus longue. C'est pourquoi on a tendance à réduire chez les jeunes les indications de la radiothérapie au profit de la chimiothérapie quand celle-ci est efficace.