

L'homme baigné dans les radiations

Alain LAUGIER

Ce titre est doublement discutable :

1) Le terme de "rayonnements ionisants" aurait été plus précis mais ce cycle de conférences du MURS traitant de "Vivre avec les radiations", on comprend qu'il s'agit de tous les rayonnements corpusculaires ou électro-magnétiques d'énergie supérieure aux quelques électrons volts nécessaires pour ioniser un atome, c'est-à-dire lui arracher un électron et transformer ainsi ses propriétés chimiques. Dans la gamme des rayonnements, cela commence au-delà des rayonnements ultra-violets, qui, certes, lèsent les cellules de la peau (puis les pigmentent et finalement peuvent les Cancériser) mais ne vont pas au-delà de quelques dixièmes de millimètres de profondeur, pour englober toutes les variétés de photons X ou gamma et toutes les particules d'énergie supérieure à quelques keV (électrons, alpha, neutrons, etc...).

2) Ce terme "baigner" dans les radiations serait adéquat si les rayonnements ne pénétraient pas dans l'homme. Or ils y pénètrent (s'il s'agit d'exposition dite externe ou transcutanée) plus

ou moins profondément selon leur énergie et peuvent même naître dans son intimité lorsque le corps humain contient des atomes radioactifs qui se désintègrent en lui (on parle d'irradiation interne ou de contamination).

Il faut donc concevoir un bain de radiation qui pénètre à la manière de ces deux illustrations trouvées dans le Trésor de la Langue Française (tome IV, page 27) au mot baigner. "Elle vivait un rêve magique, tout baigné de lumière et de bonheur" (Daniel ROPS); "s'attristent de la médiocrité morale et de l'atonie nationale où baignent trop de français" (De Gaulle). Dans ces deux citations la substance du bain envahit l'homme.

Une seule unité de dose : le gray

L'idée principale de cet exposé est que les rayonnements se dosent et qu'il faut toujours, lorsque l'on en parle, savoir de quelle quantité il s'agit. Or il n'est qu'une unité universelle mesurant la dose de rayonnement absorbée par la matière et, dans le cas présent, par l'homme : c'est le gray du nom du radiobiologiste anglais. Son symbole est Gy.

Cette unité appartient au Système international d'Unités né du système métrique. Elle signifie qu'un joule (unité de travail et d'énergie) de rayonnements ionisants a été absorbée par un kilogramme (unité S.I. de masse) de matière.

Donc le gray définit l'effet biologique. Mais celui-ci est probablement plus difficile à expliquer que les autres domaines de la vie scientifique déjà abordés dans les conférences du MURS et cela pour deux raisons :

a) les rayonnements ionisants ne sont pas, comme la foudre, l'arc-en-ciel, la neige ou l'eau, voire le choc électrique, des phénomènes physiques directement perceptibles.

Ils nous entourent et nous pénètrent. Ils sont inodores, incolores, sans saveur, silencieux et invisibles et différents en

cela de tous les phénomènes physiques auxquels l'humanité a été habituée depuis plusieurs centaines de milliers d'années, c'est-à-dire depuis la formation des mythes culturels (et religieux) qui gouvernent notre entendement et notre vie sociale.

b) Les rayonnements ionisants concernent un domaine très vaste de l'activité humaine. Ils baignent l'homme et l'homme les utilise pour tout.

Beaucoup de spécialistes se limitent à un domaine étroit qu'ils tendent à ériger en nombril du monde. Les segmentations des carrières, la notion de secret (industriel ou militaire) qui expliquent certaines paresse dans la communication, l'étanchéité des diocèses administratifs et politiques, les crispations de beaucoup d'experts sur leur champ de connaissance expliquent bien des incompréhensions. Le physicien des particules, l'ingénieur des centrales, le radiologiste, le contrôleur des douanes ont chacun leur domaine de responsabilité, leur horizon de connaissances et leur langage technique.

La synthèse tentée ici demandera l'indulgence de chaque spécialiste plus expert et, qui plus est, son attention car elle le fera parfois sortir de son domaine familier. Elle surprendra car elle essaiera de présenter sur le même plan les préoccupations familiales des uns et les inquiétudes des autres.

Les facteurs de dix et l'échelle logarithmique

L'idée directrice de cet exposé sera le module logarithmique décimal qui n'est ni naturel ni spontané. On comprend aisément comment compter de un à dix en regardant ses doigts. Mais utiliser comme échelle de pensée les exposants de dix qui gouvernent les ascensions de ces modules logarithmiques, n'est pas naturel. Il faut faire le même effort d'imagination que l'on fait lorsque l'on passe de son argent de poche et de son budget à celui de l'entreprise et à celui de l'Etat.

En effet, lorsqu'un discours porte sur des francs, on le situe instinctivement dans son contexte :

- de un franc à mille francs, de 1 à 10^3 , de un franc à un kilofranc, on sait qu'il s'agit d'argent de poche;
- de mille à un million de francs, de 10^3 à 10^6 , d'un kilofranc à un mégafranc, il s'agit d'argent du ménage, de la voiture, de l'appartement ou de la boutique;
- d'un million à un milliard de francs, de 10^6 à 10^9 , du mégafranc en gigafranc, il s'agit de l'entreprise;
- d'un milliard à mille milliards de francs, ou de 10^9 à 10^{12} de gigafranc au tétrafranc, il s'agit de l'argent des Etats.

Dans ces quatre situations représentant des ordres de grandeur très différents, on parle toujours d'argent mais on sait quelle sera la marge de responsabilité de l'homme dans son maniement. Il s'agit de quatre domaines politiques et intellectuels différents et l'interlocuteur situe son discours au niveau de dose financière appropriée.

Avec les rayonnements, tout est confusion spontanée dans les esprits. Il y a irradiation et cela suffit pour phantasmer, pour craindre plus souvent que se réjouir et pour faire les gros titres affolants. Qu'on se souvienne de la une de ce France-Soir avec le "nuage de mort" passant au-dessus du pays après l'accident de Tchernobyl alors qu'il s'agissait d'un nuage radioactif détecté par des appareils très sensibles mais sans conséquence sur la santé.

L'emploi des préfixes des unités est commode dans le langage mais est moins évident que des séries de zéros placés avant ou après la virgule.

Il y a des cas extrêmes : la radioactivité contenue dans une source de télécobalt thérapeutique est de quelques térabecquerels c'est-à-dire 10^{12} désintégrations par seconde.

Pour les sous-multiples, on ne se débarrasse qu'avec difficulté de l'impact psychologique de la valeur qui est devant l'unité : un dixième de gray donnera l'impression d'être moins que cent milli-

grays. De même cent mille micrograys pourront entraîner une frayeur que ne déclencherait pas un dixième de gray. Pourtant il s'agit de la même dose. Le choix des mots par le présentateur n'est donc pas anodin.

La rencontre des rayonnements ionisants et de l'organisme humain est définie par trois paramètres :

- la dose absorbée, c'est primordial,
- le volume de tissu concerné, c'est indispensable,
- la chronologie de l'irradiation ou facteur temps, c'est complexe.

On va les examiner successivement dans l'ordre inverse pour des raisons de clarté.

La chronologie de l'irradiation

Le facteur temps

L'action physique qui consiste à ioniser un atome ou une molécule est quasi instantanée (10^{-6} à 10^{-9} seconde) mais les conséquences biochimiques se font sentir ultérieurement au rythme des réactions chimiques et cellulaires.

L'essentiel de l'action se situe sur l'ADN des noyaux des cellules : son ionisation modifie le code génétique et son expression dans la dynamique cellulaire. La cellule ainsi modifiée peut se réparer complètement et perdre toute trace de son ionisation. Elle peut aussi en conserver le souvenir sous forme d'une mutation, qui marquera définitivement la cellule et ses descendants.

Si la cellule appartient au système reproducteur, sa mutation passera aux générations suivantes. Si non, elle peut perdre sa capacité ultérieure de reproduction et ne participera plus à la régénération normale de tous les tissus. Si la cellule ainsi irradiée est cancéreu-

se, le cancer disparaîtra progressivement et guérira. Si la cellule appartient à un tissu sain, elle entraînera des modifications visibles quelques mois ou années plus tard.

Les relations entre l'irradiation et le temps présentent deux aspects :

- un aspect physique - c'est le débit de dose -. Il s'exprime en gray par seconde. L'amplitude de ce débit est considérable puisqu'il va de celui de l'explosion atomique (de l'ordre du gray par seconde) à celui du rayonnement naturel spontané (qui est de un milligray par an, soit de l'ordre du nanogray par seconde).

- un aspect biologique - c'est le facteur temps des médecins. En effet la chronologie de l'irradiation doit s'exprimer relativement au rythme de renouvellement des tissus car une cellule lésée ne disparaîtra qu'après avoir achevé la période de vie pour laquelle elle était programmée. C'est ainsi que l'irradiation de la moelle osseuse productrice des cellules sanguines n'aura des conséquences détectables que quelques jours plus tard, fonction de la durée de vie des divers éléments cellulaires du sang. Le minimum des polynucléaires sera observé quatre à huit jours, celui des plaquettes dix à vingt jours et celui des hématies près de cent jours après l'irradiation.

Si les irradiations sont multiples, leur action s'additionnera mais entre deux expositions les tissus récupéreront plus ou moins et oublieront en quelque sorte une partie de la dose absorbée.

En thérapeutique, il existe des formules empiriques permettant de définir des équivalences entre la dose totale, le nombre de séances de radiothérapie et le nombre total de jours qu'a duré le traitement.

La radiothérapie fournit justement une bonne présentation de la complexité de ces facteurs chronologiques :

a) une irradiation dure quelques centaines de secondes. Elle est continue avec le télécobalt; elle est discontinue avec les rayons X produits par des accélérateurs linéaires puisque ceux-ci donnent des impulsions à des paquets d'électrons pendant quelques micro-se-

condes et il y a cent cinquante impulsions par seconde. Or, les tissus, à dose totale égale, réagissent également et ne font pas la différence entre ces deux types d'irradiations à ce niveau de débit de dose.

b) une irradiation en une trentaine de séances égales de quelques minutes, étalées sur six semaines, guérit certains épithéliomas à la même dose (60 grays) qu'une irradiation continue, jour et nuit pendant six jours comme celle produite par des corps radioactifs introduits dans l'organisme (curiethérapie).

Dans le premier cas, il y aura eu restauration des cellules irradiées entre deux séances : dans l'autre cas, cette récupération sera très atténuée du fait de l'ionisation permanente. Mais, finalement, on aura obtenu la même guérison.

Les radiothérapeutes savent manier ces différents éléments du facteur temps pour obtenir une action sélective sur les tissus au détriment des cellules cancéreuses.

S'il est incontestablement prouvé que les cellules se restaurent même après des doses relativement importantes (quelques grays) on préfère, lorsque l'on définit des normes de radioprotection, oublier cela et faire comme si toutes les doses s'additionnaient, sans facteurs de réduction. Cela est biologiquement faux mais on se place dans l'hypothèse la plus sûre.

Cette négation du facteur temps est la première des hypothèses conservatrices faites en matière de radioprotection.

Au total, dans l'échelle des temps, l'homme sera exposé à des irradiations d'une durée pouvant aller des millisecondes (une radiographie du thorax) à la vie entière, soit une amplitude de 10^{-3} à 10^9 secondes.

Le facteur volume

Ce paramètre est d'amplitude plus restreinte si on ne considère qu'un individu mais bien plus vaste si on prend en compte les populations.

Si on irradie une population on pourra avoir jusqu'à quelques milliards (10^9) d'hommes exposés au rayonnement de fond.

A - A l'intérieur d'un être humain, la dose de rayonnement ionisant est plus ou moins bien répartie.

On peut dire que toute irradiation quelle qu'elle soit concerne la totalité de l'être humain et que le volume concerné est de 1. Mais il est exceptionnel qu'une irradiation soit homogène et que chaque cellule ou organe reçoive exactement la même dose. Il n'y a guère que dans les irradiations délibérément totales pratiquées dans un but thérapeutique que le médecin s'arrange pour que la totalité de l'organisme reçoive, à quelques pour cent près, la même dose.

Si on ne prend pas en compte le rayonnement diffusé qui est très faible en dehors du volume cible directement irradié, on constate que l'amplitude de ce paramètre va de 1 à 10^{-5} . Il est de 1 pour l'irradiation totale dont un autre exemple intéressant quant aux conséquences biologiques, est fourni par l'examen radiologique de la femme enceinte au début : en radiographiant son bassin pour voir les organes qu'il contient, on peut être amené à irradier l'embryon qui est alors concerné dans sa totalité.

Le volume est de 10^{-1} à 10^{-2} dans le cas des examens radiologiques courants. En examinant un abdomen ou un thorax on expose de grands volumes mais le rayonnement employé en radiodiagnostic (de 50 à 150 kV) est très rapidement absorbé par les tissus superficiels. Environ le millième seulement de la dose à l'entrée se retrouve à la sortie pour impressionner le film.

La dose absorbée décroît très vite avec la profondeur.

En radiothérapie sa décroissance est plus faible car on emploie des rayons X de quelques mégavolts. Tout l'art consiste à utiliser plusieurs faisceaux convergents de manière à donner une dose homogène dans le volume cible contenant les tissus cancéreux et à irradier le moins possible les régions avoisinantes. Ce volume traité peut alors varier de quelques litres (cas des cancers habituels des bronches, de l'utérus, de la gorge, etc...) à quelques millimètres cubes (cancer de la peau). A dose égale, la tolérance immédiate et lointaine dépendra non seulement du volume irradié mais aussi de la nature des organes qu'il contient (intestin, moelle osseuse sont plus sensibles). En radiothérapie, l'amplitude du facteur volume va donc de 1 à 10^{-7} .

Les conséquences des irradiations sur l'homme dépendent, et du volume relatif irradié et de la nature des organes exposés. Deux d'entre eux présentent un intérêt particulier :

a) Les organes reproducteurs de part les conséquences génétiques que leur irradiation peut entraîner. On les assimile à des points et on détermine la dose absorbée par le milieu du pelvis pour évaluer la dose à l'ovaire. Mais pour les testicules on est amené à mesurer une dose moyenne car leur irradiation est très hétérogène s'ils sont exposés aux rayons X peu pénétrants de radiodiagnostic. C'est ainsi qu'en radiographiant un bassin (sans protection par cache plombé des testicules) on les irradie plus fortement en employant un faisceau antérieur qu'en prenant un faisceau postérieur qui aura été considérablement atténué par la traversée des tissus.

En radiographiant le thorax on emploie un faisceau postérieur limité en bas à la ceinture : le testicule ne reçoit que du rayonnement diffusé latéral ayant été lui-même très absorbé par la traversée de la totalité de l'abdomen.

b) La moelle osseuse, de par le risque de radio-leucémie qui peut survenir, cinq à dix ans après son exposition aux rayonnements. Elle est située dans tout le squelette mais est plus active, surtout chez l'adulte dans les vertèbres et le bassin. Si l'on veut savoir quel risque cancérigène elle a encouru du fait de son irradiation,

on détermine ce que chaque segment élémentaire de moelle osseuse active a reçu que ce soit du fait de la fixation de corps radioactifs absorbés ou d'une irradiation extérieure transcutanée. On fait alors la somme de ces doses élémentaires pondérées par la part relative de chaque segment dans l'ensemble de la moyenne : on détermine ainsi une dose moyenne (ce qui est permis car les cellules souches circulent dans tout l'organisme).

Sur tous les organes sensibles (cristallin, thyroïde, intestin) on peut calculer la dose moyenne absorbée. On peut même estimer la dose intégrale reçue par tout l'organisme : elle s'exprime en grays kilogrammes, c'est-à-dire en joules.

B - Au-delà de l'individu, il y a les populations. Si certaines conséquences de l'irradiation lui sont directement imputables lorsqu'elles surviennent directement dans le volume irradié à des doses fortes, dans la plupart des cas on n'arrive pas, pour un individu donné à imputer exactement un cancer ou une anomalie à une irradiation. On se contente d'une liaison statistique, d'une augmentation de la probabilité de survenue d'une anomalie liée à l'irradiation dans un groupe de sujets que l'on compare à une population témoin non irradiée. L'épidémiologie a acquis dans ce domaine ses lettres de noblesse comme cela est présenté par Maurice TUBIANA dans sa conférence.

La dimension des populations exposées aux rayonnements ionisants varie très largement selon les pays et les circonstances.

1) Un premier groupe de sujets très étudiés est constitué par ceux soumis à une irradiation thérapeutique, c'est-à-dire à une dose très précise. Il y a de nombreuses années, on irradiait des sujets, notamment des enfants atteints d'affections non cancéreuses, ce qui a permis de prouver que certains cancers observés de nombreuses années plus tard étaient statistiquement liés à l'irradiation.

Maintenant, on n'irradie que des sujets cancéreux, c'est-à-dire des patients chez qui l'enjeu est tel que la recherche de la guérison l'emporte sur d'éventuelles radiolésions tardives.

En France il y a 326 appareils de radiothérapie traitant plus de cent mille malades par an. Parmi ceux-ci, près de cinq cents subissent une irradiation totale comme préparation à une transplantation de moelle osseuse : c'est-à-dire que l'expérience des médecins est très grande dans les conséquences des irradiations accidentelles graves.

2) Un second groupe est celui des irradiations accidentelles qui concernent alors, non des patients atteints d'affections cancéreuses mais des sujets sains.

Deux grandes populations sont soumises à une surveillance médicale de très longue durée :

- les survivants d'Hiroshima et de Nagasaki
- les populations irradiées dans les environs de Tchernobyl.

Chaque groupe est de l'ordre de cent mille (10^5) personnes et les deux groupes ainsi constitués sont d'un intérêt radiobiologique considérable. Un organisme américano-japonais assure la surveillance des premiers, les spécialistes russes en font autant de leur côté et tous les résultats sont régulièrement publiés dans la littérature spécialisée.

On rassemble aussi les quelques observations d'accidents où sont impliqués des rayonnements : un registre international en a recensé une centaine de cas en une trentaine d'années. Il se trouve qu'on en parle beaucoup dans les journaux que ce soit en Algérie, au Mexique ou au Brésil.

3) L'exposition médicale du fait du radiodiagnostic concerne beaucoup de sujets dans les pays développés. La consommation d'actes radiologiques a augmenté régulièrement de 10 % par an en France depuis trente ans et, maintenant, chaque français subit, en moyenne, un examen par an. Ces examens sont de différents types et contribuent très inégalement à l'irradiation des gonades ou de la moelle osseuse. On distingue ceux qui portent sur le pelvis et contribuent par le rayonnement direct à l'irradiation des gonades et, en particulier, ceux effectués chez la femme enceinte.

4) L'exposition aux rayonnements naturels concerne toute l'humanité (10^9 individus). Elle est le fait de deux types d'irradiation :

- le rayonnement externe d'origine cosmique (rayons cosmiques très pénétrants) ou terrestre (provenant des corps radioactifs de la famille du thorium et du radium contenus dans les roches granitiques, eux aussi bien pénétrants);

- le rayonnement interne, du fait de la présence dans l'organisme d'atomes radioactifs naturels (potassium, carbone, etc.).

On admet que, en première approximation, la distribution des doses absorbées se fait d'une manière homogène encore que le radon, qui est un gaz radioactif dérivé du radium, irradie plus spécialement les poumons.

5) A ce rayonnement naturel concernant toutes les populations s'ajoutent les retombées, sous forme de poussières radioactives dispersées dans l'atmosphère, des explosions atomiques effectuées au sol ou en altitude (les champignons atomiques, riches en produits de fission des atomes lourds) de 1945 à 1962, date où les puissances dotées de l'arme atomique ont décidé de ne se livrer qu'à des explosions souterraines.

La distribution dans l'organisme de ces atomes est fonction de leur nature. L'iode se concentre dans la thyroïde, le césium suit le cycle du potassium (les muscles) et le strontium celui du calcium (le squelette).

L'irradiation qu'ils déterminent est donc hétérogène et on calcule une dose moyenne rapportée à ces organes critiques.

6) Les retombées des pratiques civiles (réacteurs nucléaires d'expérimentation, de création de corps radioactifs ou surtout producteurs de chaleur engendrant l'électricité) sont très étroitement contrôlées et maintenues à un niveau très bas, tant sur le site, qu'à l'extérieur de la zone contrôlée.

Cette police des conditions de travail a beaucoup fait parler d'elle. Elle est exemplaire dans les grandes institutions (Commissariat à l'Energie Atomique, Electricité de France) mais ses fondements sont les mêmes pour toutes les activités concernant les rayonnements et en particulier celles des radiologistes médicaux.

Le Service Central de Protection contre les Rayonnements Ionisants (S.C.P.R.I.) contrôle tous les mois les dosimètres individuels de près de cent mille personnes (10^5) qui, en France, travaillent près de générateurs de rayonnements. Ces films dosimétriques, portés sur la poitrine, donnent une idée de la dose éventuellement reçue par le travailleur, car ils renseignent aussi sur le degré de pénétration des rayonnements et permettent, par l'enquête sur les conditions de travail, de reconstituer, si nécessaire, les paramètres de l'irradiation.

De plus le S.C.P.R.I. entretient dans chaque département des stations de surveillance de la radioactivité de l'air, de l'eau et du lait : on peut ainsi indirectement, savoir où se situe le niveau d'irradiation de l'organisme du fait de la concentration de strontium et de cesium susceptibles d'entrer dans le circuit de la respiration ou de la digestion.

Le facteur dose

C'est délibérément qu'on le situe en dernier, non seulement pour aller crescendo dans l'importance, mais pour que l'on comprenne dans quels volumes il s'applique et pendant quel temps.

Le domaine des rayonnements ionisants est vaste, compliqué. C'est en le segmentant quant au facteur temps et au facteur volume qu'on situe chaque rencontre, chaque bain. Mais c'est en l'unissant grâce à la dosimétrie qu'on apprécie mieux la relativité des actions et des risques.

En allant des doses fortes aux doses faibles, toutes exprimées en gray, on situera mieux les différentes "baignades".

A - Niveau de 10^4 à 10^3 grays (kilograys)

Il faut des doses aussi élevées de rayonnements ionisants pour détruire toute vie dans le régime végétal et dans les formes primitives de vie animale (virus, microbes). On utilise de plus en plus largement l'irradiation pour conserver les aliments, empêcher les fruits et légumes de germer et détruire les champignons et parasites qui entraînent leur pourriture : les conséquences économiques en sont considérables dans les circuits internationaux de l'agroalimentaire (épices, fruits exotiques, viandes préparées, etc.). On utilise pour cela des sources de télécobalt (photons gamma) ou des accélérateurs d'électrons de 10 MeV.

Les atomes des aliments ainsi irradiés ne sont pas transmutés et ne deviennent pas radioactifs : il n'y a aucun risque de transmission de l'irradiation au consommateur.

B - Niveau de 10^1 grays

C'est le domaine de la radiothérapie des cancers. Avec des doses de 40 à 70 grays délivrés en 30 à 60 jours on détruit électivement les cellules malignes en respectant celles des tissus environnants.

Chaque année plusieurs millions de malades sont ainsi traités dans le monde grâce à quelques 2000 accélérateurs linéaires d'électrons et 4000 unités de télécobalthérapie. En France, c'est près de cent mille malades qui sont traités chaque année par l'un des 328 appareils de radiothérapie de mégavoltage en fonctionnement.

On connaît le niveau de tolérance des tissus et la dose optimale à donner pour chaque variété de cancers.

Les séquelles se rencontrent uniquement dans les volumes irradiés, pigmentation de la peau, sclérose des tissus et parfois,

de nombreuses années plus tard des cancers d'une autre nature, que l'on attribue à l'effet tardif de l'irradiation.

En cas d'irradiation totale de l'organisme, on constate des troubles précoces qui peuvent entraîner la mort en quelques jours par aplasie sanguine et par désordres intestinaux. Cela a été le cas à Hiroshima et Nagasaki : s'y ajoutaient à l'irradiation des brûlures cutanées et l'absence de tous moyens médicaux. A Tchernobyl, par contre les quelques 200 irradiés à des doses de l'ordre du gray ont tous survécu. Seuls les 31 sauveteurs ayant reçu plus de dix grays et brûlés de surcroît, sont décédés malgré les soins.

On a maintenant la pratique de ces irradiations totales à des doses de l'ordre de 10 grays en quelques heures (ou de 12 grays en six séances en trois jours) dans le but de guérir certaines leucémies. Mais on y associe toujours une transplantation de moelle osseuse compatible qui permet de reconstituer les lignées hématologiques.

C - Niveau du gray

Dans un volume réduit, une dose de quelques grays n'entraîne guère de conséquences individuellement décelables. Mais si l'on étudie une population, on trouve qu'elle développe, quelques années plus tard, davantage de leucémies et de cancers qu'une population comparable non irradiée. Cela a été constaté dans diverses enquêtes portant notamment sur :

- les survivants d'Hiroshima et Nagasaki
- les malades irradiés pour affections non cancéreuses chez l'adulte (rhumatismes) ou l'enfant (hypertrophie du thymus).

On a apprécié ainsi une liaison, non pas individuelle mais statistique, entre le niveau de dose et la probabilité d'apparition de cancers en nombre plus élevé que ceux que l'on aurait spontanément observés dans la même population.

Toutes nos connaissances ont été acquises par les observations de sujets irradiés à des doses de l'ordre du gray. En dessous

de 0,5 gray, il n'y a rien de probant et cela pour une raison simple. Pour montrer d'une manière statistiquement significative une augmentation de fréquence des cancers, il faudrait observer des dizaines ou centaines de milliers de personnes afin de détecter un faible accroissement : cela n'est pas possible.

En étudiant la relation entre la dose et les conséquences (radio-cancers), on peut faire passer une droite (relation linéaire), une courbe plus complexe (relation quadratique), ou même penser qu'il existe un seuil de dose (de l'ordre de quelques centigrays) en dessous duquel il ne se passe rien. Mais on préfère postuler qu'il y a une relation linéaire entre la dose et les radio-conséquences et que un million de personnes irradiées à un milligray auront autant de chances (statistiques) de développer un cancer ultérieur qu'un millier de personnes exposées à un gray.

Ce postulat, compatible avec l'observation, a le mérite d'être conservateur et de faire entraîner le maximum de précaution. Il est à l'origine de toutes les mesures de radioprotection.

D - Niveau de 10^{-1} à 10^{-2} grays

Aucune action individuelle sur l'organisme n'est détectable à ces niveaux de dose. On admet que, par extrapolation avec ce qui est observé sur les animaux de laboratoire, une dose de 300 à 800 milligrays donnés à un embryon, peut doubler la fréquence des malformations observées à la naissance. Par mesure de précaution, on envisage des mesures médicales si la dose a dépassé 100 mGy. Mais il est exceptionnel que des doses aussi importantes soient données dans l'utérus à l'occasion d'examens radiologiques.

Le niveau de dose de 50 milligrays est important pour la politique de radioprotection. On admet que cette irradiation, étalée sur une année, est sans aucune conséquence immédiate ou tardive chez l'adulte et que les travailleurs exposés peuvent recevoir chaque année cette dose sans aucun risque.

Il découle de cet accord des spécialistes - et aucune observation nouvelle depuis vingt ans m'a amené à réduire cette dose maximale admissible - tout un ensemble de réglementations nationales s'imposant à tous ceux et celles qui travaillent dans les services de radiologie ou les centres nucléaires, soit près de cent mille personnes en France.

Une surveillance individuelle très étroite est effectuée (port de dosimètres, alarmes diverses) et les dossiers d'exposition radiologiques de chaque travailleur sont conservés toute leur vie.

En pratique, si le sujet est exposé au dixième de la dose admissible (soit 5 milligrays par an), une enquête est déclenchée.

E - Niveau de 10^{-3} grays (milligrays)

Le niveau du milligray concerne toute l'humanité et pas seulement les personnes au contact des rayonnements nés de l'ingéniosité humaine; car, si le rayonnement de fond naturel est de l'ordre de grandeur du milligray, il s'y ajoute une irradiation qui, en moyenne, est du même ordre de grandeur provenant de l'utilisation sur l'homme des rayonnements à des fins médicales.

1) Il existe des sources naturelles d'irradiation externe (par les photons gamma et cosmiques) et interne (par les photons gamma les électrons et les particules alpha nés de la désintégration des isotopes naturels). Comme les particules alpha ont une efficacité biologique relative supérieure aux autres on multiplie leur dose par un facteur de qualité (de vingt en l'occurrence) pour obtenir une dose dite équivalente et exprimée alors non pas en grays, mais en Sieverts (Sv). C'est un raffinement de la part des experts. Il faut simplement retenir qu'en une année et d'une manière continue l'organisme, dans sa totalité, reçoit une dose de l'ordre du mGy. Dans certaines régions ce rayonnement de fond est plus élevé, parfois jusqu'à un facteur 10 du fait de l'altitude (les rayons cosmiques ont moins d'atmosphère à traverser), du terrain (le granit contient plus d'uranium et de thorium), et de l'aération (le radon, qui est gazeux, stagne dans les endroits clos).

2) Dans les pays développés, le recours aux examens radiologiques est très courant.

La dose absorbée lors des procédures radio-diagnostiques dépend des paramètres de l'exposition, eux-mêmes fonction de l'épaisseur de la région à examiner et de la sensibilité de la détection (films, écrans renforçateurs, amplificateurs de luminance), du nombre d'expositions, etc.

Pour chaque famille d'examens, on connaît l'ordre de grandeur de la dose à la moelle osseuse, de la dose à la thyroïde et surtout aux gonades. L'ordre de grandeur est le milligray, beaucoup moins s'il y a peu de clichés, parfois plus si on irradie des régions épaisses et/ou si, par nécessité diagnostique on fait plusieurs expositions ou une radioscopie de longue durée : c'est le cas des examens du cœur et des vaisseaux.

S'agissant de la dose aux gonades, on distingue trois grands groupes d'examens :

- ceux qui concernent directement le pelvis et la dose peut atteindre quelques milligrays, surtout à l'utérus et aux ovaires (plus difficiles à protéger que les testicules);

- ceux qui concernent indirectement les organes reproducteurs s'ils ne sont pas compris dans le faisceau direct et ne reçoivent que du rayonnement diffusé, vite absorbé. La dose aux gonades est bien inférieure au mGy;

- ceux qui, enfin, concernent des zones lointaines : la dose aux gonades est tout juste mesurable et proche du microgray (millionième de gray).

Au cours des trente dernières années l'expansion de la radiologie médicale a été rapide, de l'ordre du doublement chaque sept ans, du nombre des examens. Or, cette expansion s'est faite en coût radique constant en moyenne pour deux raisons :

- les médecins ont fait très attention aux examens pratiqués chez les enfants et les femmes jeunes et ont redoublé de protection lorsque les examens concernaient l'abdomen;

- les systèmes de détection ont augmenté leur sensibilité au rythme de la progression de la consommation.

F - Niveau de 10^{-6} grays (microgray)

Les moyens de mesure très sensibles dont on dispose permettent d'apprécier aisément ce niveau d'irradiation. Les conséquences médicales individuelles sont indétectables; les conséquences statistiques ne le sont pas davantage mais, par extrapolation, on peut toujours supposer qu'elles ne sont pas nulles et que toute irradiation, même minime, peut entraîner quelque chose.

1) Les retombées des explosions nucléaires faites dans l'atmosphère entre 1945 et 1962. Leur mesure est complexe car l'irradiation provient de nombreuses catégories d'atomes radioactifs dont la demi-vie, le cycle biologique sont variables, de la situation météorologique de la position géographique par rapport au site d'expérimentation et de la latitude (quatre fois moins dans l'hémisphère sud).

On constate que l'irradiation par retombées a été maximale en 1963, atteignant 7 % de l'irradiation naturelle et qu'elle se situe maintenant à 1 % soit environ 10 mGy/an.

2) Les rejets dans l'atmosphère et les eaux des isotopes artificiels créés dans les centrales nucléaires (qui sont plus de quatre cents dans le monde) et les contaminations à chacune des étapes du cycle du combustible (extraction, transport, retraitement, stockage des déchets) ont été étudiés avec une très grande attention dans tous les pays du monde. Les informations ont été largement diffusées dans la littérature scientifique internationale et notamment sous l'égide de la Commission spécialisée de l'O.N.U. et de l'Agence Atomique Internationale.

On évalue à quelques dizaines de micrograys seulement leur contribution moyenne du nucléaire civil à l'irradiation des populations. Seuls les travailleurs du nucléaire reçoivent plus mais la dose reçue reste bien inférieure aux limites réglementaires. C'est ainsi que le personnel des centrales de l'E.D.F. a, en 1982, reçu en moyenne

A. LAUGIER

2 mGy dans l'année, alors que la dose admissible était vingt-cinq fois supérieure et qu'elle est elle-même une dose réglementaire d'action administrative et non un niveau de risque médical réel.

Au total, on voit donc que le facteur dose a, lui aussi, une grande amplitude allant de quelques dizaines de grays à quelques micrograys, soit 1 à 10^{-7} .

*

* *

La rencontre de trois facteurs

Si on place chaque situation à l'interaction des axes des trois paramètres considérés : la dose, le volume et le temps, on peut mesurer la distance qui sépare des autres chaque rencontre de l'homme et des rayonnements.

On peut, pour simplifier, rester dans un seul plan des trois plans de projection de cet espace à trois dimensions.

a) Si l'on décrit une situation par la dose et le temps, on définit un débit de dose, par seconde, par jour ou par année.

On peut même cumuler une dose sur une période de temps déterminée :

- soit sur la vie de l'individu et on calculera un risque cumulé de cancérisation sur environ cinquante ans, ou un risque cumulé d'anomalies génétiques sur plusieurs générations;

- soit sur la vie d'un corps radioactif et on calculera une dose dite engagée, c'est-à-dire intégrée sur toute la vie physique de cet

isotope dont la décroissance est exponentielle mais d'inégale rapidité selon les atomes.

b) Si l'on associe le volume et la dose, on aboutit :

- soit à une dose intégrale dans un individu alors exprimée en joules;

- soit à une dose collective dans une population exprimée en homme-gray, c'est-à-dire le produit du nombre d'individus par la dose que chacun a absorbé;

- soit à une dose collective dans un organe donné, par exemple les gonades pour toute une population. Si on ne tient compte que des sujets de moins de trente ans, cette dose-gonades moyenne devient la dose génétiquement significative.

c) Si l'on associe le temps et le volume, on peut aisément situer chaque situation d'irradiation. Il y a une grande distance entre elles et on ne peut pas mettre au même niveau de conséquences la radiographie d'une main, une irradiation totale thérapeutique ou le rayonnement de fond.

Ces triturations statistiques font les délices des experts, à la fois parce qu'elles aboutissent à des concepts généraux de manie-ment facile pour les initiés et parce qu'elles passent aisément au-dessus de la compréhension de l'honnête citoyen.

Il faut néanmoins faire avec. On a essayé, en se contentant de trois paramètres, de montrer qu'il y avait irradiation et irradiation et que, si l'on était dans le même bain de rayonnements, l'amalgame n'était pas permis entre des situations biologiquement très différentes mais décrites par les mêmes mots. Il faut faire intervenir des notions quantitatives et ne pas se faire avoir par les mots du qualitatif. S'il n'est de science que du mesurable, réjouissons-nous de voir que le rayonnement ionisant se dose qu'il soit électromagnétique ou particulaire et dans ce cas rapide ou lent, qu'il soit fort ou faible ici ou là.

Alain LAUGIER
Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie
Chef de service de radiothérapie à l'Hôpital Tenon