

Réflexions sur la dangerosité des matières et déchets radioactifs pour la santé des individus



I- Présentation de la Société Française de Médecine Nucléaire

La Société Française de Médecine Nucléaire et imagerie moléculaire - SFMN, réunit des médecins spécialistes francophones de Médecine Nucléaire, afin de la promouvoir, ainsi que plus largement l'Imagerie Moléculaire et les techniques associées, de la faire connaître et d'en favoriser le développement.

En particulier dans ces domaines, la SFMN assure l'organisation nationale de la formation continue et de l'évaluation des pratiques professionnelles. Les moyens d'action de la Société sont les publications, les conférences, les cours, les expositions, les groupes d'études, les congrès, les réunions, l'attribution de prix et tous moyens de diffusion, d'éducation ou de formation technique en langue française.

II- Préambule : qu'est-ce que la médecine nucléaire ?

La Médecine Nucléaire est une spécialité médicale fondée sur l'utilisation de médicaments radioactifs, parce que « marqués » par un isotope radioactif, dénommés « médicaments radiopharmaceutiques » (MRP). Cela rend possible l'étude de processus biologiques traduisant les mécanismes des maladies (« physiopathologie »), aide précieuse pour le diagnostic et le suivi de nombreuses pathologies (voir figure 1) et le traitement efficace de certaines maladies (« radiothérapie interne vectorisée »).

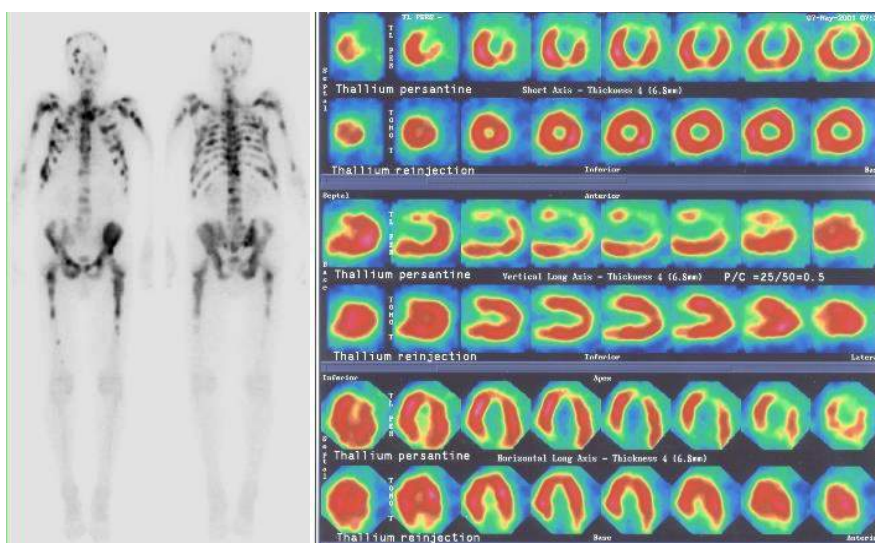


Figure 1 . Exemples de scintigraphies (osseuse à gauche, cardiaque à droite)

III- La radioactivité est-elle toujours nocive ?

Il s'agit d'une question difficile, car ses effets sont complexes, s'inscrivent dans la durée (à l'échelle de plusieurs années...), et dépendent de nombreux facteurs quantitatifs et qualitatifs (Cf plus loin). Pourtant l'attitude spontanée face à une contamination radioactive est de la considérer comme dangereuse dans son principe, quelles que soient ses caractéristiques. Or c'est loin d'être le cas. Il faut donc adapter les réponses, et moduler la crainte, en fonction des nombreux paramètres en jeu ; cela est difficile, et favorise une attitude précautionniste (« on n'est jamais trop prudent ») conduisant à se défier systématiquement de risques supposés (Le Monde daté du 26 avril titrait en première page : « l'inquiétante accumulation des déchets nucléaires »). Ceci est contre-productif, car pouvant induire une surenchère inadaptée si le risque pour la santé est faible, voire inexistant, mais qui paradoxalement ne met pas à l'abri d'un réel danger dans d'autres situations, elles préoccupantes. Autrement dit, à tout considérer sur un même plan, on risque de ne pas identifier les vrais seuls cas où se protéger est nécessaire, induisant ainsi des surcoûts inutiles.

IV- Contamination radioactive et santé

A- La radioactivité

Toute personne est exposée à une irradiation naturelle, appelée aussi bruit de fond radiologique. Celle-ci provient des rayons cosmiques et de la radioactivité tellurique. Les rayons cosmiques, principalement des protons proviennent des galaxies et de notre soleil. Ils peuvent atteindre directement les personnes ou provoquer la formation d'atomes radioactifs dans l'atmosphère. La radioactivité tellurique correspond aux atomes radioactifs présents sur la terre. Ce sont principalement, les atomes d'uranium 238, d'uranium 235, de thorium 235 (et leurs descendants dont le radon), et l'atome de potassium 40. Ceux-ci sont principalement situés dans l'écorce terrestre. Leur concentration peut varier de façon importante d'un endroit à l'autre, d'une ville à l'autre, d'un pays à l'autre... Ces radioéléments se retrouvent dans les organismes vivants après absorption, assimilation...

La dose reçue par un individu habitant en France est moyenne de 3 mSv par an dont environ 2 mSv par exposition aux rayonnements telluriques (incluant le radon), 0,5 mSv suite à l'ingestion d'atomes radioactifs et 0,3 mSv par les rayons cosmiques. L'exposition des français fait l'objet d'une surveillance et de mesures par l'IRSN.

1) Aspect quantitatif : l'activité en becquerels (Bq)

La quantité de radioactivité est appelée « activité » et se quantifie en becquerels (symbole Bq). Un becquerel correspond à une désintégration par seconde, ce qui est très faible ; aussi utilise-t-on les kilobecquerels (kBq, 10³ Bq), les mégabecquerels (MBq, 10⁶), les gigabq (GBq, 10⁹). On utilisait auparavant le curie (Ci) et le millicurie (mCi) qui correspondaient respectivement à 37 GBq et 37 MBq. Le corps humain contient en permanence de manière naturelle quelques kBq (potassium 40, carbone 14, polonium 210...). En médecine nucléaire, des activités de l'ordre de quelques kBq à quelques dizaines de MBq sont injectées. Pour avoir la même activité d'un radionucléide à vie longue et d'un radionucléide à vie courte, il faut un nombre d'atomes du premier beaucoup plus élevé, puisqu'une proportion beaucoup plus faible se désintègre à chaque seconde.

2) La durée : notion de période radioactive

La période physique (ou « demi-vie ») d'un radioélément est le temps au bout duquel la moitié des atomes se sont désintégrés. Cela varie de quelques secondes à plusieurs milliards d'années (par exemple 112 min pour le fluor 18 utilisé en médecine nucléaire, 4,5 milliards d'années pour l'uranium 238). La distinction entre radioactivité « naturelle » et radioactivité « artificielle » dépend uniquement de la période : seuls les radioéléments à demi-vie très longue sont encore présents dans l'univers, de façon « naturelle », alors que les autres ont disparu par décroissance, et ne peuvent être observés qu'après avoir été artificiellement recréés. Mais il n'y a aucune différence de nature entre les deux.

D'un point de vue biologique, la nocivité d'un radioélément dépend de sa période physique, mais aussi de sa période biologique, c'est-à-dire le temps au bout duquel la moitié aura été éliminée de l'organisme.

On combine les deux en calculant la période « effective », qui est donnée par : $1/\text{période effective} = 1/\text{période physique} + 1/\text{période biologique}$.

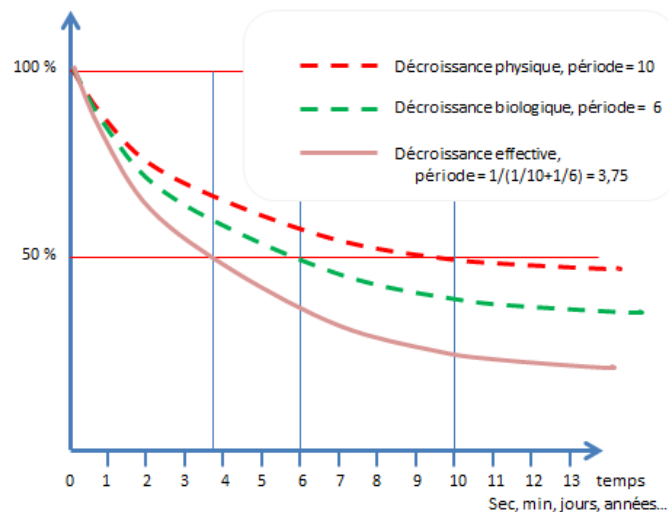


Figure 2 : période physique, période biologique, période effective. L'échelle de temps peut varier, mais le schéma illustre qu'avec une période physique de 10 unités et une demi-vie biologique de 6 unités, l'exposition de l'organisme au radionucléide se fait avec une période « effective » de 3,75 unités.

Autrement dit, on peut par exemple être moins irradié par un radioélément à vie longue mais rapidement éliminé, que par un radioélément à vie courte mais qui n'est pas éliminé du tout.

3) Le débit de dose

Une même dose de rayonnements, que ce soient des rayons X ou gamma, ou que ce soit une irradiation interne par contamination bêta ou alpha, peut être délivrée sur une durée variable, allant d'une fraction de seconde à plusieurs semaines ou mois... Plus cette durée est longue, moins les effets de l'irradiation seront graves. Cela se traduit par le débit de dose, exprimé en Gy/unité de temps. L'irradiation délivrée par contamination interne sera nécessairement avec un débit de dose faible, voire très faible, puisque dépendant de la période effective. De plus ce débit de dose décroît au cours de temps. Il faut en effet considérer l'activité cumulée au cours du temps pour évaluer la dose reçue.

4) L'activité cumulée (au cours du temps)

C'est l'activité à laquelle est exposé l'organisme contaminé sur la période allant de la contamination à la disparition de toute radioactivité, du fait de l'action combinée de la décroissance physique, radioactive, et de l'élimination biologique. La figure 3 illustre cette notion. On voit qu'il peut être préférable d'être contaminé par une forte activité d'un radioélément à période brève, que par une faible activité d'un radioélément de période très longue, car cette activité, bien que faible, perdurera beaucoup plus longtemps dans l'organisme.

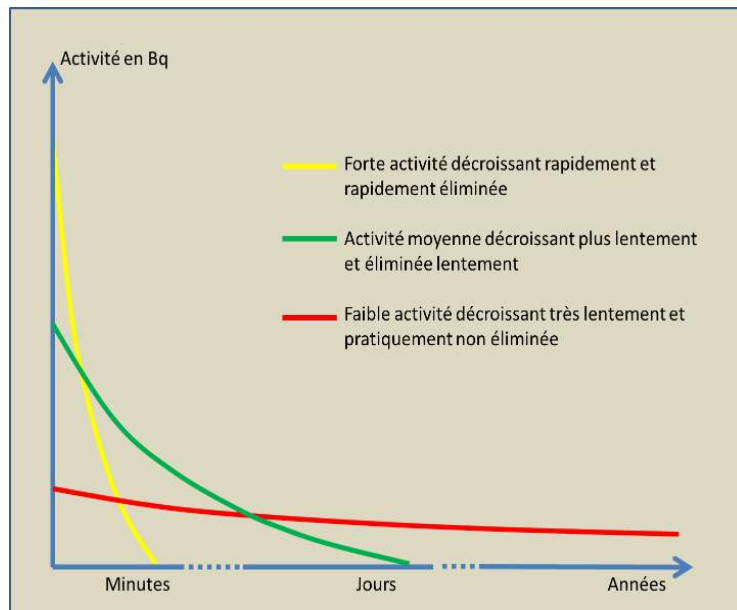


Figure 3 : activité cumulée au cours du temps. En jaune, exemple d'un débit de dose élevé mais bref ; en rouge un débit de dose faible mais très prolongé ; en vert un cas intermédiaire. Il faut considérer la surface sous la courbe (activité cumulée) mais aussi le niveau moyen qui traduit le débit de dose auquel sont confrontés les tissus

On comprend aisément que plus l'activité est élevée et plus la période effective est longue, plus les conséquences seront graves. A l'inverse, une faible contamination peut être sans conséquence significative sur la santé, et ce d'autant plus que la période est brève ; une très faible activité n'aura aucune conséquence. Rappelons que le corps humain est radioactif en dehors de toute contamination, du fait de la présence obligée de potassium 40, de carbone 14, de polonium 210...

Autrement dit une contamination qui n'augmente que de quelques % la radioactivité naturelle du corps humain peut être considérée comme insignifiante.

5) La prise en compte de la nature des radionucléides et de leurs émissions

Pour une même activité, certains radionucléides sont plus dangereux que d'autres. Cela tient au type de rayonnement émis, et pour un même type de rayonnement à l'énergie de celui-ci.

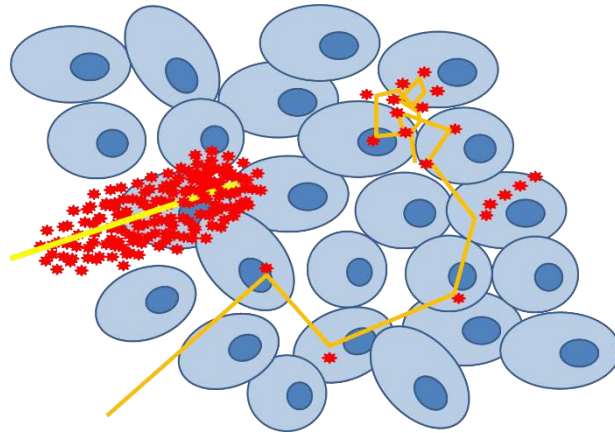


Figure 4 : ionisations par les bêtas (en orange) et les alpha (en jaune) sur une population de cellules. Les points rouges symbolisent la densité d'ionisations.

Schématiquement, les radionucléides pouvant contaminer l'organisme peuvent émettre :

- Des rayons gamma (photons) qui irradient peu le sujet contaminé, car ils ont tendance à s'échapper (et peuvent irradier l'entourage)
- Des électrons, qui délivrent une énergie faible le long d'une trajectoire complexe et sur une distance qui varie avec leur énergie (quelques mm à quelques cm)
- Des particules alpha, qui délivrent une énergie élevée sur une courte distance (quelques microns à quelques dizaines de microns), donc de façon très concentrée.

B- Quelles sont les actions toxiques d'une contamination radioactive de l'organisme et de quoi dépendent-elles ?

Les rayonnements résultant de la radioactivité sont dits « ionisants » car en arrachant des électrons aux molécules (phénomène d'ionisation) ils les rendent réactives chimiquement, conduisant à des altérations de ces molécules, et ce proportionnellement à la quantité d'énergie déposée par ces rayonnements.

Il faut dans un premier temps s'affranchir des contaminations massives, qui conduisent en quelques jours, semaines ou mois au maximum des effets déterministes graves, liées à la toxicité aiguë de fortes doses de rayonnements au niveau de la moelle osseuse, du tube digestif, du foie et des reins. Cela peut aller jusqu'au décès en dépit de tout traitement, comme cela avait été le cas avec l'empoisonnement d'origine criminelle au Polonium 210 d'Alexandre Litvinenko en 2006. Ce sont des situations exceptionnelles. Les contaminations des populations qui résulteraient d'une dissémination de matières ou déchets radioactifs génèreraient plutôt une contamination faible d'un grand nombre d'individus. C'est ce que nous allons détailler.

1) Comment réagissent les cellules ?

Il n'existe pas de relation simple et automatique entre les modifications moléculaires induites par les rayonnements ionisants, et les altérations des fonctions cellulaires : celles-ci reposent sur un grand nombre de phénomènes dynamiques, métaboliques et enzymatiques, résultat d'équilibres entre des

processus d'activation et d'inhibition, redondants, complémentaires, soumis à de multiples régulations négatives et positives, qui assurent le maintien de l'intégrité cellulaire. De ce fait les cellules ont des capacités de réparation très performantes, très supérieures aux lésions qui surviennent en permanence dans les cellules.

Les lésions moléculaires sont en effet extrêmement fréquentes dans les cellules, et dues à bien d'autres facteurs que les rayonnements. On estime qu'entre 5000 et 10 000 lésions par heure se produisent dans l'ADN de chaque cellule, dues à l'agitation thermique, à l'oxygène et de nombreux facteurs chimiques ayant pour point commun de générer des radicaux libres. Notons dès à présent que les radiations d'origine naturelle (dont on rappelle qu'elles représentent une dose efficace de 2 à 5 mSv par an en France) ne sont responsables que d'une infime partie ($\ll 1\%$) du total de ces lésions. Pourtant les cellules maintiennent leur intégrité, grâce à de très efficaces systèmes de détoxification des radicaux libres, et de non moins efficaces mécanismes enzymatiques de réparation, de l'ADN en particulier.

Lorsque les capacités de réparation des cellules sont dépassées, ce qui peut se produire mais pour des doses et débits de dose déjà élevés par rapport à l'irradiation naturelle, un deuxième niveau de protection entre en jeu : il s'agit de l'apoptose, ou mort cellulaire programmée. Ce mécanisme qui est très actif durant le développement embryonnaire et fœtal, entre en jeu lorsque les cellules ont perdu les caractéristiques d'un fonctionnement normal. De sorte que la plupart des cellules « transformées », c'est-à-dire en cours de cancérisation, sont éliminées.

2) Comment réagissent les tissus et organes ?

Les cellules d'un tissu communiquent entre elles, expliquant ce qu'on appelle les « effets de voisinage » (« bystander effect »). Ceci implique que les cellules faiblement irradiées, voire non irradiées, évoluent préventivement vers l'apoptose en réponse à des « signaux de danger » émis par les cellules irradiées. La réponse tissulaire est donc intégrée, en continuité mais amplifiée avec la réponse cellulaire.

3) Comment réagit l'organisme ?

Une troisième barrière de défense essentielle contre le développement des cellules transformées en cellules cancéreuses, à l'origine des tumeurs, est constituée par le système immunitaire, plus précisément l'immunité cellulaire portée par les lymphocytes T. En permanence les cellules qui ont subi des mutations cancérigènes non réparées, et qui ont échoué à se mettre en apoptose, sont éliminées par les cellules du système immunitaire. Cette surveillance immunologique est stimulée, et maintenue en éveil, par les faibles doses de rayonnements, en particulier l'irradiation d'origine naturelle, jouant ainsi un rôle protecteur contre l'apparition de cancers, quelles qu'en soient les causes, y compris les doses de rayonnements plus élevées...

Ce rôle protecteur des faibles doses, appelé hormésis, conduit à relativiser la nocivité des faibles doses, *a fortiori* celle des très faibles doses, et donc à relativiser la dangerosité des contaminations radioactives en dessous d'un seuil qui dépend des radionucléides en cause.

C- Il est impératif de quantifier la contamination possible en cas de dissémination et d'en estimer les paramètres

1) Prise en compte de l'activité en jeu, du type de radioélément.

L'irradiation, sur le plan quantitatif (dose) et cinétique (débit de dose) ainsi que qualitatif (différence des lésions induites par les différents types de rayonnement) sera très différente selon les cas. Il n'est donc pas possible d'édicter des règles générales, chaque cas de figure doit être étudié séparément.

2) Prise en compte du métabolisme des agents contaminants, des voies de contamination, en fonction des radioéléments en jeu.

C'est à ce niveau que doivent être considérés les vecteurs de contamination (alimentation, cultures, eau contaminée...), le cycle suivi par l'agent contaminant avec ses facteurs de dilution ou de concentration, ainsi que les mesures qui pourraient être prises pour limiter la contamination humaine.

D- Les risques ne sont pas toujours immédiats

Les effets déterministes qui surviennent rapidement sont liés à de très fortes contaminations.

Cela correspondrait à des situations accidentelles ne concernant qu'un petit nombre d'individus, et on imagine mal un tel scénario en lien avec le stockage des déchets.

La question posée est celle de contaminations faibles de l'environnement (atmosphérique, des nappes phréatiques, des sols de culture...). Dans ces cas, clairement ce qui est redouté est l'induction de cancers en nombre statistiquement supérieur à l'incidence et prévalence habituelles des cancers en général (rappelons qu'un décès sur 4 environ est dû à un cancer). Or il est établi qu'une telle surincidence n'est démontrée que lorsqu'un grand nombre d'individus a reçu une dose, en l'occurrence une dose cumulée supérieure à 200 mSv. Et ce seulement après plusieurs années (au moins 3 pour les leucémies, une dizaine au moins pour les tumeurs solides).

Le message, en résumé, peut être formulé ainsi : il n'y a **pas de relation automatique entre contamination de l'environnement et conséquences sur la santé**. Beaucoup de facteurs doivent être pris en compte pour estimer à terme ces dernières. Une très forte contamination de l'environnement peut avoir des conséquences limitées, alors qu'une contamination plus faible peut avoir des conséquences dramatiques. **C'est la contamination des individus, non simplement celle de l'environnement, qui est déterminante.** Par exemple, une forte contamination fixée dans le sol et qui ne passe pas dans les végétaux, peut être sans conséquence. A l'inverse, des contaminants radioactifs dans l'eau de mer, concentrés par les poissons et les coquillages, rendent éventuellement la consommation de ceux-ci dangereuse.

V- Conclusion

Les médecins nucléaires réalisent quotidiennement dans leur pratique des contaminations « volontaires » de patients pour réaliser des examens scintigraphiques utiles au diagnostic et au traitement des maladies.

Ils ont donc une idée pertinente des conséquences d'une contamination radioactive de l'organisme, les examens scintigraphiques qui utilisent des radionucléides de période radioactive courte, et des activités modérées, étant d'une totale innocuité.

C'est pour cela que nous nous pensons autorisés à rappeler que, quelle que soit la matière radioactive, fut-ce des déchets, on ne doit pas la considérer comme *a priori*, systématiquement et obligatoirement dangereuse et pouvant générer des cancers avec une fréquence anormalement élevée dans une population qui y serait accidentellement exposée ; il est impératif de se focaliser sur les situations qui pourraient conduire à des contaminations élevées (par de fortes quantités de radioactivité), avec des radionucléides à période longue, n'étant pas ou peu éliminés de l'organisme (y compris à l'aide de traitements) et émettant des rayonnements dangereux (notamment alpha). A l'inverse les matières à faible et *a fortiori* très faible activité, de période faible ou s'éliminant rapidement, et émettant des rayonnements de faible nocivité, nécessitent certainement des protections moins drastiques. Bien sûr tous les intermédiaires sont possibles, et les mesures de protection doivent s'adapter à chaque cas ; mais l'estimation des conséquences possibles ou non sur la santé doivent absolument être considérées pour adapter les mesures de protection à court comme à long terme.

VI- L'essentiel à retenir

- **Il n'y a pas de lien direct, proportionnel, entre les lésions moléculaires et les effets cellulaires, et *a fortiori* les effets sur la santé de l'organisme**

- **Seules les très fortes doses, donc les très fortes contaminations, peuvent donner des effets déterministes, immédiats et graves (syndrome d'irradiation aigue).**

- **Pour les faibles contaminations, c'est l'induction de cancers au bout d'un temps long (années) qui justifie les craintes.**

- **Cela ne se produirait de façon significative (c'est-à-dire identifiable comme facteur causal supérieur aux autres causes de cancer) que pour des contaminations susceptibles de délivrer une dose de plus de 200 mSv (soit 50 fois l'irradiation naturelle reçue en une année).**

- **Les déchets qui pourraient induire une telle contamination doivent faire l'objet des plus grandes précautions ; la dangerosité des autres est très faible, voire insignifiante.**

Pour davantage d'informations, n'hésitez pas à contacter la SFMN :

- secretariat@sfmn.org
- Tél : 01 44 75 88 16
- Maison de la Médecine Nucléaire 5 rue Ponscarne 75013 PARIS
- <https://www.sfmn.org/>