

NORMES DE RADIOPROTECTION : UNE CONJUGAISON DE DONNEES SCIENTIFIQUES ET SOCIETALES ET UN SUJET PLEIN D'EMBUCHES

Philippe GUETAT

CEA - Collège syndical du HCTISN

Introduction

2016 et 2017 sont les années de la transcription en droit français de la directive européenne 2013-59 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants (RI)[1][2]. Cette réglementation sera celle des 15 prochaines années. Elle concerne toutes les sources de RI, pour les travailleurs, le public, les patients, les radionucléides artificiels et naturels (solides et gaz), les aliments ; les expositions existantes, planifiées et accidentelles et toutes les voies d'exposition.

Ce texte a pour objectif de faire un point sur les données de base scientifiques et sociétales permettant de donner chair aux concepts de dangers et risques d'exposition, d'apprécier les exigences s'appliquant aux RI comparativement à d'autres sources de dangers, d'appréhender les marges de sécurité retenues et quelques conséquences industrielles.

Quantification des doses de rayonnements ionisants

Le premier point est la définition quantitative précise des niveaux d'exposition sans laquelle aucune compréhension n'est aujourd'hui possible.

On retiendra la notion de dose équivalente à un organe et les qualificatifs suivants : exposition forte supérieure à 1 Sv_{eq}, modérée entre 0,2 et 1 Sv_{eq}, faible entre 20 et 200 mSv_{eq}, très faible entre 2 et 20 mSv_{eq}, négligeable entre 0,1 et 2 mSv_{eq}, enfin insignifiante inférieure à 100 µSv_{eq}. [3][4][5].

Le Sievert_{eq} est équivalent au Gy pour les rayonnements à faible transfert d'énergie linéique, mais présente l'avantage d'intégrer l'effet ionisant propre aux différentes particules.

Données de la biologie

Les effets des rayonnements ionisants à dose fortes et modérées ont été très largement décrits à partir d'études épidémiologiques sur lesquelles nous reviendrons plus loin. En absence de données démonstratives pour les faibles doses, et en raison d'une augmentation réelle des probabilités de cancers à forte dose, il a été émis l'hypothèse d'effets non visibles mais parfaitement aléatoires et par conséquent supposer que les risques étaient strictement proportionnels à l'exposition en termes d'occurrence, et additifs. À défaut d'être crédible dès les années 50 [6], l'additivité présentait un caractère très pratique.

Les progrès de la recherche à l'échelle cellulaire ont été soulignés par l'Académie des Sciences et de Médecine incluant la possibilité de réponses non-linéaires ou favorables à de faibles doses [7]. Ils permettent depuis maintenant plus de 20 ans une approche moins fantaisiste, et d'apprécier la nature des altérations et réparations des molécules d'ADN, qu'il s'agisse d'altérations naturelles ou par les rayonnements ionisants.

Rothkamm et Löbrich [8], confirmés par Grudzenski S et al [8], ont montré que 3 ou 4 cellules sur cent ont une cassure double brin induite par une dose de 1 mSv_{eq}, à comparer à un nombre moyen de cassures naturelle d'une dizaine par jour et par cellule en multiplication, pour partie dues au métabolisme oxydatif et à la reproduction cellulaire.

Il apparaît que les cellules sont dotées d'une grande sensibilité aux variations du milieu interne et possèdent plusieurs moyens d'action pour rétablir les bonnes conditions en cas de nécessité (stress et agressions internes et externes) (figure 1)

La détection est rapide et la signalisation des dommages conduit, si besoin est, à l'activation des systèmes de maintenance cellulaire : Les radicaux peuvent être éliminés par les antioxydants et les enzymes de détoxification préexistants ou générés, (défense antioxydante et anti-radicalaire) ; en fonction du nombre de cellules concernées, les cellules endommagées sont soit éliminées par mort naturelle et absence de reproduction, soit par une mort programmée (apoptose) impliquant l'activation des gènes spécifiques. L'élimination des lésions de l'ADN peut être réalisée par 5 systèmes de réparation enzymatiques spécialisés (réparation de mésappariements de bases, excision de bases, excision de nucléotides, recombinaison homologue (pour les réparations parfaites), et religation (suture), non homologue (« endjoining » ou NHEJ) en cas de forte agression. Enfin les cellules aberrantes peuvent être éliminées par le système immunitaire (macrophages).

Le dénombrement des cassures et de leur réparation a permis de montrer l'absence pure et simple de réparation au niveau de 1 mSv_{eq} et un temps de réparation forfaitaire d'environ 24 h pour les altérations résultant d'exposition ponctuelle de 20 mSv ou moins, dans des conditions très éloignées de la saturation et par là-même évitant la propagation de réparations non conformes.

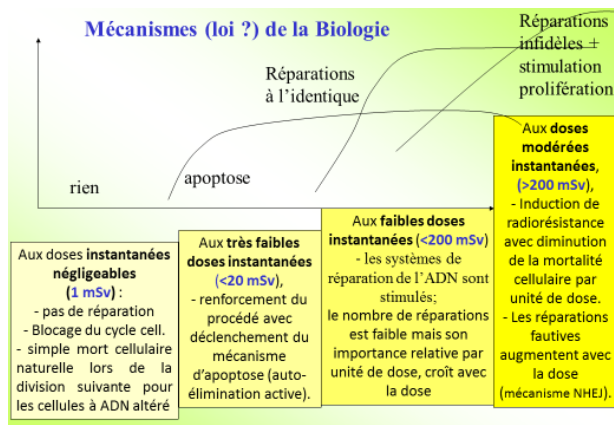


Figure 1 : Mécanismes biologiques en fonction de l'exposition

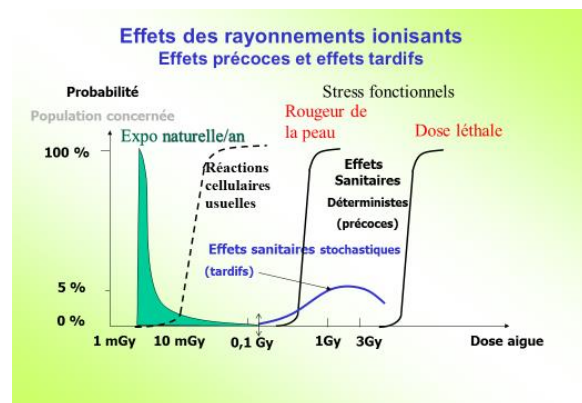


Figure 2 : Représentation schématique des effets en fonction de l'exposition

Il serait souhaitable (figure 2) de faire évoluer la figure traditionnelle reliant doses, effets déterministes et effets aléatoires qui suggère fortement et abusivement l'extrapolation vers zéro par une droite.

De même, l'hypothèse d'une additivité des effets est clairement fautive. [10] a montré que le débit de dose pour lequel le nombre de cassure double brin dû à l'irradiation est égale à celui produit pendant le même temps par le métabolisme cellulaire pour des cellules en prolifération (endogènes) est de 300 mGy/h. On est donc très loin d'un niveau de saturation, sauf dans le cas de traitement médicaux à forte dose.

Données de l'épidémiologie

Il est intéressant de présenter les données épidémiologiques dans leur forme la plus objective de manière à s'affranchir du faux pli induit par l'hypothèse de la Loi linéaire et sans seuil (LSS ou LNT).

La figure 3 montre les données de la cohorte japonaise pour le risque relatif de leucémie. Ainsi présentées, que peut-on dire de l'impact des faibles doses. Est-il négatif, positif, ou nul ?

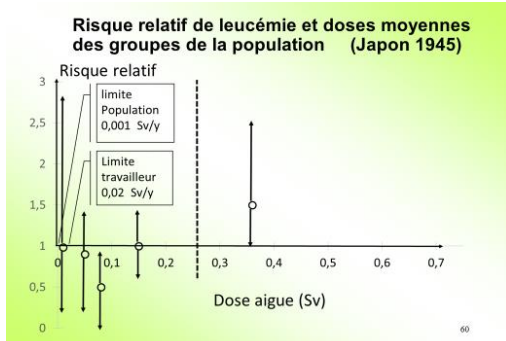


Figure 3 : Présentation non biaisée du risque relatif de leucémie en fonction de l'exposition

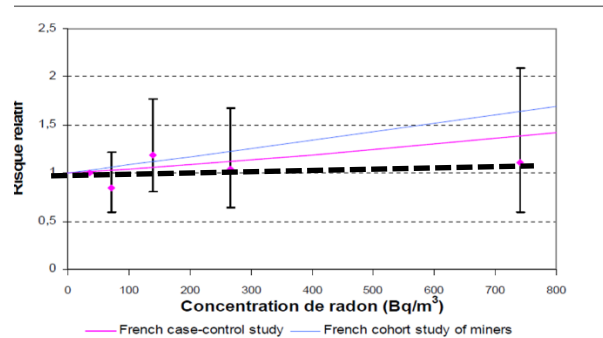


Figure 4 : Présentation biaisée et non biaisée pour l'exposition au radon

Le cas-témoins radon domestique français [11] pour l'impact du radon est également intéressant (figure 4). La focalisation sur le domaine 0-800 Bq/m³ et l'ajout d'une ligne pointillée montrant un risque totalement indépendant de la concentration (et de la dose) modifie sérieusement la vision des choses.

Dans l'étude des 400 000 travailleurs du nucléaire, fondée sur les données dosimétriques et de mortalité de quinze pays, «étude 15 pays» [12] il est indiqué : le pouvoir statistique est inadéquat pour étudier la pente de la relation dose-effet, même dans la gamme d'exposition investiguée.

L'étude INWORKS [13] qui fait suite est réduite à 3 pays : UK, USA et France et 300 000 travailleurs, avec un suivi plus long. L'exposition moyenne ajoutée est de **16 mSv**, (94 % < 100 mSv). L'étude prétend montrer une relation dose-réponse statistiquement significative entre les doses à la moelle osseuse pour les doses inférieures à 300 mGy pour les leucémies (hors LLC), et à 100 mGy pour les tumeurs solides. (Les doses à la moelle osseuse sont recalculées à partir des expositions externes cumulées).

Comme l'indique Aurengo et al. [14] et Maria Blettner [15] dans leurs courriers à l'éditeur, cette étude présente de très graves lacunes méthodologiques :

La dose cumulée naturelle et médicale n'est pas prise en compte alors qu'elles se situent (sur 27 ans de travail en moyenne) entre 60 et 100 mSv, auxquels il faut ajouter les 20 premières années de vie (40 mSv). L'information sur les populations témoin est quasi inexistante. Aucune incertitude n'est associée aux évaluations de doses retenues ; le simple effet de l'âge (la dose augmentant avec l'âge) n'est pas discuté. Hors tabac, (dont les effets augmentent aussi avec l'âge), l'excès de risque relatif n'est plus significatif même au niveau de confiance inhabituel (et très bas) de 90% utilisé par les auteurs pour les doses cumulées <100 mSv. La linéarité n'est démontrée, qu'en imposant un point à l'origine à 1. Ceci ne peut que forcer la pente de la droite de corrélation pour les doses inférieures à 100 mSv, malgré l'affirmation, par contre non démontrée, des auteurs que les ERR déduits «n'étaient pas induits par les catégories d'expositions supérieures».

En ce qui concerne les enfants mort-nés ou ayant des anomalies majeures congénitales [G Jaikrshan et al [16], au Kerala, ont conduit une analyse de régression sur 140 000 naissances en considérant les niveaux de dose : ≤1.5, 1.5–3.0, 3.0– 6.0 and >6 mGy/an et les facteurs confondant. Aucune différence significative n'apparaît. L'âge de la mère à la naissance est le seul facteur incontournable associé au syndrome de Down (trisomie 21).

Aucune différence statistiquement significative n'a été observée dans la fréquence des défauts génétiques en accord avec les études de la cohorte des survivants des bombes atomique [17].

Conclusions sur les mécanismes biologiques

Suivant le niveau d'exposition, les mécanismes entrant en jeu constituent un système très élaboré et concerne le dynamisme métabolique vital nécessaire à l'homéostasie et à son maintien (régulation par réaction oxydants antioxydants). Nous sommes très loin d'un système aléatoire et proportionnel. La Vie est un système très complexe, à très haut niveau de sûreté et fonctionnant avec des moyens de contrôles, signalisation, maintenance préventive et curative, forces d'action rapide et dispositifs d'intervention lourds d'une très grande efficacité.

La connaissance des mécanismes biologiques a beaucoup progressée et conduit même à envisager des effets favorables à très faible dose (<100 mSv) (hormesis) par stimulation des défenses immunitaires.

Comme l'indique le rapport de l'Académie des Sciences et de Médecine de 2005 [7], il n'est pas justifié d'utiliser une relation linéaire sans seuil (RLSS) pour estimer le risque cancérigène des faibles doses à partir des observations effectuées pour des doses allant de 0,2 à 5 Sv, puisqu'un même incrément de dose a une efficacité variable en fonction des conditions d'irradiation notamment de la dose totale et du débit de dose.

Le progrès des connaissances en radiobiologie fait apparaître des phénomènes totalement non-linéaires, non-additifs et une variabilité au sein des populations.

Le phénomène de l'hyperradiosensibilité qui conduit à l'augmentation des morts cellulaires est à la fois favorable à faible dose (faible proportion touchée) et défavorable à dose modérée, mais les niveaux d'exposition concernés sont là au-delà des critères standards de la radioprotection. Par ailleurs, cette fraction est déjà implicitement prise en compte dans les études épidémiologiques, concernant des populations importantes.

Dans la population, compte tenu de l'évolution des espèces et de la sélection naturelle, il existe des personnes ayant des « lacunes » génétiques dans les mécanismes d'alerte ou de réparation, et qui sont beaucoup plus sensibles à des doses modérées (et peut-être faibles) de rayonnements ionisants. Cet élément est à considérer dans le développement des méthodes de diagnostics et traitements médicaux personnalisés et comme domaine de recherches très important[18].

Données sociétales

Le rôle de la réglementation est de promouvoir une certaine harmonie de traitement des différentes activités humaines et une certaine équité. Il est bon de fait de replacer notre sujet dans son contexte.

Les risques au travail : En 2015, il y a eu par les accidents du travail 545 morts et 36 000 invalidités permanentes en une année dont on ne parle pas, pour « 2 altérations minimales ou nulles de la qualité de vie » dues aux rayonnements ionisants diffusées à l'AFP, repris par les journaux, radios et télévisions.

Les cancers réels en France : Les taux actuels de cancers sur la vie sont d'environ 30% pour les hommes et de 25% pour les femmes. Il n'est donc pas étonnant dans ces conditions

que les effets des rayonnements ne soient pas observables pour des expositions aiguës inférieures à 100 mSv et à fortiori inférieures à 100 mSv/an, les effets recherchés étant alors de l'ordre ou inférieurs aux moindres fluctuations des nombreuses autres causes, dont le simple vieillissement, qu'il est indispensable de considérer dans toute étude sérieuse.

Les malformations à la naissance en France : Quel que soit le média traitant du sujet de la radioactivité, la référence à l'induction de malformations et d'effets génétiques est presque systématique. Comme pour la question de l'existence ou non de contribution à la cancérogénèse, il est nécessaire de rappeler les causes et « taux naturels » des malformations génétiques et congénitales.

La fréquence des malformations-dysfonctions à la naissance est naturellement très élevée et se situe selon la méthode de calcul entre 5 et 10%, (soit un enfant sur 10 à 20).

Les malformations génétiques ou chromosomiques peuvent se manifester par des modifications morphologiques ou des conséquences fonctionnelles. La fréquence de ces malformations est d'environ 2 % chez les enfants nés vivants, beaucoup plus élevée chez les mort-nés (12–14 %), qui représente 0,3 % des naissances. Les malformations d'origine chromosomique concernent 1 % des naissances. On estime que 20 à 30 % des malformations relèvent de causes génétiques ou endogènes (gènes altérés ou anomalies chromosomiques) et 5 à 10 % de causes exogènes ou environnementales. Dans près de 60 % des cas, l'origine réelle de la malformation reste inconnue. **Aucun effet génétique** n'a pu être mis en évidence du fait de rayonnements ionisants, contrairement aux effets tératogènes sur les embryons directement exposés, à dose modérée et forte.

Le **syndrome d'alcoolisation** fœtale est certainement la principale cause de malformations en rapport avec la prise d'un produit toxique. **Les causes infectieuses** sont nombreuses, bactériennes (streptocoque B, colibacille, listériose, syphilis), virales (rubéole, varicelle, VIH...), parasitaires (toxoplasmose...). Parmi les **facteurs métaboliques maternels**, on peut citer des troubles tels que certaines carences vitaminiques (acide folique), ou le diabète gestationnel. L'hyperthermie maternelle (fièvre supérieure à 38,5°C) peut avoir un effet tératogène. Le tabagisme maternel est associé à un risque d'avortement, de prématurité et de retard de croissance intra-Utérin, mais pas d'effet tératogène. D'autres toxicomanies (LSD, cocaïne) sont aussi associées à un risque accru de malformations. Certains médicaments peuvent entraîner l'apparition de malformations chimio-induites.

Le tabac : Si l'on appliquait la relation linéaire et sans seuil au tabac, avec 30 000 cancers du poumon par an en France dont 90% lié au tabac et 60 milliards de cigarettes, on obtiendrait l'équivalence 1 cigarette - 10 µSv. C'est l'ordre de grandeur des impacts annuels des rejets des réacteurs.

Les déplacements : Il est possible d'effectuer un parallèle très pédagogique par comparaison des risques relatifs à une exposition et à la vitesse de déplacement sur la base d'une équivalence 1mSv - 1 km/h. On peut alors se demander s'il faut vraiment réglementer en dessous de 1km/h ?

Les risques naturels et industriels.

La comparaison entre risques naturels et industriels classiques et risques nucléaires fait apparaître une hypersensibilité sociétale aux rayonnements ionisants. Sans autres commentaires : L'accident d'union carbide à Bhopal en 1984 qui a fait 3500 morts immédiates et environ 25 000 morts au total et 250 000 blessés avec rejet d'isocyanate de méthyle, est nettement plus grave que l'accident de Tchernobyl en 1986 (43 morts et >12000 blessés (thyroïde)). En France, l'accident d'AZF à Toulouse en 2001, a fait 30 morts et plus de 3 000 blessés. Le séisme-tsunami de Sumatra en 2004 a fait 230 000 morts 125 000 blessés et 1,7 million de déplacés, par absence d'alerte. Pour une même intensité, au Japon,

le séisme-Tsunami de mars 2011 a fait environ 20 000 morts, 2600 blessés et 550 000 évacués, montrant l'efficacité de l'intervention nipponne. En comparaison cependant, l'accident induit à Fukushima n'a fait ni mort ni blessé lié aux rayonnements. Par contre, le déplacement de population (150 000 évacués) et surtout son prolongement dans le temps a généré des conséquences sanitaires très réelles et graves.

Définition et signification des critères d'exposition des individus

Cet ensemble de données sociétales et biologiques montre que la protection relative aux rayonnements ionisants est particulièrement élevée, et il convient de s'assurer que ce haut niveau ne génère pas dans nos sociétés des effets négatifs plus communs mais bien réels.

La CIPR [19] et l'union européenne [1] qui traitent désormais de toutes les possibilités d'exposition retiennent finalement un nombre limité de critères d'exposition, et s'articulent autour de 100, 20 et 1 mSv/an, correspondant à une marge de précaution administrative de 2, 10 et 200 vis-à-vis du seuil d'apparition d'effets statistiquement significatifs, en exposition aiguë, et beaucoup plus en exposition annuelle.

Pour les expositions planifiées la limite retenue pour la population est de 1 mSv/an, qui ne présente pas de difficulté à être respectée même s'il s'agit d'un niveau d'exposition « sans aucun effet biologique néfaste » d'autant plus qu'il est relatif à un cumul sur l'année. Pour les travailleurs, la limite est de 20 mSv/an, là aussi elle peut sans trop de contrainte être respectée. Elle autorise en situation incidentelle une exposition aiguë qui n'induit pas de réparation « d'urgence » de l'ADN et par là même n'a pas de raison d'induire des réparations fautives. La France avait proposée en 1993 que l'on puisse autoriser une exposition sur une année de 50 mSv pour autant que la dose sur 5 ans consécutifs ne dépasse pas 100 mSv. Cette possibilité reste inscrite dans la directive 13-59. Elle peut apporter de la souplesse dans un domaine ne présentant pas d'effets. S'y ajoute des limites pour la peau, 500 mSv/an, valeur pour laquelle il n'apparaît ni rougeur ni irritation en dose aiguë, ainsi que pour les extrémités et pour le cristallin (100 mSv sur 5 ans sans dépasser 50 mSv/an). La forte réduction de la limite « cristallin » entre 1996 et 2013 résulte d'observations sur les intervenants à Tchernobyl et à des marges de précautions très larges... Nous sommes là aussi très éloignés des niveaux d'expositions à risque pour les populations. Il convient par contre de s'assurer que ces marges ne conduisent pas à des difficultés inutiles en interventions médicales.

Pour les situations d'exposition existantes, les niveaux de référence exprimés en dose efficace sont à fixer dans l'intervalle de 1 à 20 mSv par an (très faibles doses). Ces niveaux sont dans la gamme naturelle observée à la surface de la planète, et des expositions pour diagnostic médical, et n'ont pas révélé d'effets particuliers pour toute population, incluant tous les âges et une grande diversité génétique.

Pour les situations d'exposition d'urgence, la gamme proposée est de 20 à 100 mSv (aiguë ou annuelle). Ces valeurs couvrent la gamme des faibles doses, sans incidence sanitaire, ni à court ni à long terme. Même dans la situation de rejets accidentels majeurs à Fukushima, les niveaux hauts ont été et sont respectés sur la quasi-totalité du territoire japonais, du fait qu'il n'y a pas eu consommation d'herbe fraîche par les bovins ni de légumes verts par les humains, et réalisation de labours des terrains agricoles et jardins. Le choix d'un critère ne doit pas relever alors de l'arbitraire mais d'une comparaison des différents dangers en présence, les remèdes ne devant pas être pire que le mal. Il en va de même de l'extension des zones des plans particuliers d'intervention.

En ce qui concerne la radioactivité naturelle, le niveau de référence applicable à l'exposition externe provenant de matériaux de construction est de 1 mSv/an. Cette valeur

porte sur les matériaux à commercialiser et non sur les habitations existantes et les matériaux en place. Cette valeur est assez basse par rapport à la gamme de variations de l'irradiation externe de certaines roches et n'est guère justifiée pour des matériaux traditionnels tels que des blocs de granite.

Exposition au radon : La directive européenne retient la valeur de 300 Bq.m^{-3} , comme référence, pour les lieux de travail et les habitations comme seuil d'intervention. Rien n'apparaît moins évident que l'impact du radon dans la gamme $20\text{-}1000 \text{ Bq.m}^{-3}$. Seule l'augmentation des risques avec une exposition dominante et concomitante au tabac ressort des études (tableau 1). L'observation des données brutes ne révèle un effet qu'au-delà de 1000 Bq.m^{-3} (figure 5). Selon l'IRSN, 60 000 bâtiments ont une concentration dépassant 1000 Bq.m^{-3} et 300 000 bâtiments dépassent 400 Bq.m^{-3} . Des interventions généralement coûteuses portant sur la ventilation voire sur le remplacement de matériaux sont alors recommandées. En pratique, la seule recommandation d'action valable serait une information obligatoire au-dessus de 1000 Bq.m^{-3} et un très fort encouragement à ne pas fumer, les non-fumeurs étant pour leur part en pratique très peu ou pas concernés (tableau 1).

		Estimation de risques d'exposition au Tabac			
Cig./jour		0	<15	15 à 25	>25
Risque de cancer du poumon	abs	0,41%	5,4%	10%	16%
	H	1	13 (11-16)	26 (21-31)	40 (32-49)
	F	1	6 (5-7)	11(9-14)	17 (12-26)
20 Bq/m ³		0,41%	800 Bq/m ³ correspondrait, avec l'hypothèse LLSS à une augmentation du risque de 0,5% équivalente à une cigarette/j !		
100 Bq/m ³		0,47%?			
400 Bq/m ³		0,67%?			
800 Bq/m ³		0,93%?			

Tableau 1 : Risque absolus et relatifs en fonction de la consommation de tabac

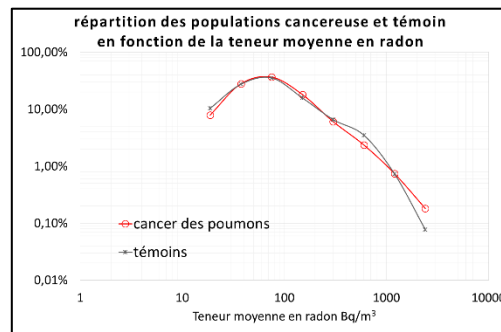


Figure 5 : Répartition des populations malade et témoin en fonction de la teneur en radon

Considérations mathématiques et physiques

La règle d'or qu'est la loi linéaire et sans seuil et des doses cumulables relève du paradoxe de Zénon d'Élée qui constate qu'avant qu'une flèche ne puisse atteindre sa destination, elle doit d'abord atteindre la moitié de son parcours, puis après avoir atteint la moitié, elle doit de nouveau atteindre la moitié de la distance restante, et ainsi de suite. Ainsi la flèche n'atteint-elle jamais sa destination ! Car en fait on considère des temps qui sont tous avant le temps de l'impact. Il existe une infinité d'infinis et la Loi LSS n'est pas une interpolation à 0 mais une extrapolation vers l'infiniment petit. Ainsi la présentation d'une relation dose-effet sous forme de droite passant par zéro (en excluant par ailleurs l'exposition naturelle) est une absurdité mathématique.

L'hypothèse - fausse - que les doses sont cumulables conduit inévitablement à s'abstraire de la dépendance au temps et à considérer la dose comme une grandeur intensive. Si la dose collective a finalement été limitée à des comparaisons de technologies concurrentes (somme sur plusieurs individus), la dose cumulative dans le temps sur un individu n'a pas été abolie. Pourtant un verre de vin par jour pendant un an n'a pas les effets négatifs de 365 verres de vin dans une même soirée ! On se trompe ici lourdement de modèle mathématique.

Un autre problème mathématique qui apparaît dans la réglementation est que toute valeur seuil ou limite doit bien évidemment être associée à une signification précise. La référence à

une valeur nécessite de préciser s'il s'agit d'un maximum à ne pas dépasser, ou d'une moyenne en précisant la masse surface ou volume considéré. Ces informations annexes sont indispensables et dépendent de la distribution des substances radioactives dans les substrats, de la méthode de nettoyage et de la méthode de mesure, celle-ci ayant également ses incertitudes.

Il est courant de constater que l'activité moyenne d'un lot d'assainissement tel qu'un écroutage se situe entre 1 et 10% de l'activité prise en référence pour le retrait des tâches significatives. À titre d'exemple, en éliminant tous les points se situant à plus de 10 Bq/g de césium vers le stockage de l'ANDRA, le grattage final se situera au voisinage de 0,1 Bq/g, et les expositions correspondantes des travailleurs des installations avales et populations voisines aux niveaux d'insignifiance. Ce point a été clairement identifié au centre CIREs de l'ANDRA avec une limite acceptable maximale de 100 Bq/g calculée sur une base théorique de 1 mSv/an et une exposition réelle des travailleurs concernés de quelques centièmes de millisievert. [20].

Définition des seuils d'exemption de la réglementation, critères d'acceptation dans les installations et seuils de libération

Les 3 niveaux de valeurs de référence, exprimées en dose, font l'objet d'un assez large consensus au sein du secteur nucléaire. Elles correspondent à une absence de danger et garantissent une marge de sécurité plus ou moins grande en fonction de la population concernée et des probabilités d'accidents possibles, cette marge restant d'un facteur 1000 à 10.

A ces critères de dose, s'ajoutent nécessairement des critères d'activité. Il s'agit tout d'abord de préciser, dans les différentes matières et matériaux les substances qu'on peut appeler **lexradioactives**, c'est-à-dire qui ne peuvent être négligées d'un point de vue de la protection des populations, puis de définir les critères pour l'exercice d'activités humaines par installation ou type d'installations.

Ceci doit s'effectuer dans un principe clair énoncé dans la directive 13-59 :

« Les États membres devraient tirer avantage de l'application d'une approche graduée du contrôle réglementaire, qui devrait être proportionnelle à l'ampleur et à la probabilité des expositions résultant des pratiques exercées, et à la mesure des effets que le contrôle réglementaire peut avoir sur la réduction de ces expositions ou sur l'amélioration de la sûreté des installations. »

La définition du champ d'application de la réglementation de radioprotection pour des activités déclarées ou autorisées devrait s'effectuer sur la base de la possibilité de dépasser respectivement la valeur de 1 et 20 mSv/an pour des travailleurs qui relèvent alors de la catégorie « travailleur exposé » et sur la base d'expositions du grand public de l'ordre, dans des conditions usuelles de vie, de quelques dizaines de μ Sv/an sans excéder 1 mSv, pour les rayonnements de radionucléides artificiels et quelques mSv/an pour les rayonnements de radionucléides naturels non gazeux.

On rappellera qu'aucun effet sanitaire n'a jamais été observé pour des expositions ponctuelles allant jusqu'à 200 mSv, ni pour des expositions naturelles de plusieurs dizaines de millisieverts par an allant jusqu'à 260 mSv/an au maximum en Iran.

Les valeurs actuelles d'exemption de la réglementation française sont celles de la directive 96-29 qui sont reprises par la directive 13-59 dans son tableau B pour des quantités dites modérées, (c'est-à-dire des quantités qu'on peut estimer de plusieurs milliers à dizaines de milliers de tonnes d'après l'ensemble des études réalisées sur ce sujet depuis 25 ans).

Ceci dépasse les besoins, finalement très faibles, pour une gestion rationnelle, durable et écologique des matériaux des futurs démantèlements.

Ces valeurs sont également celles utilisées pour l'exemption pour les transports. Elles sont également cohérentes avec les normes pour les produits alimentaires en situation post accidentelle, et même les normes retenues pour la gestion post accidentelles des sols par le Japon.

La directives 13-59 introduit par ailleurs la notion de seuils de libération, établis pour une exposition 100 fois plus faible dite négligeable et conduisant de fait à des concentrations environ 100 fois plus faibles. Les autorités françaises n'ont pas souhaité jusqu'à présent fixer de critères réglementaires mais demandent aux exploitants de définir au cas par cas un critère de propreté pour l'assainissement, ceci dans un contexte de très faible production. Le contexte prévu pour les 50 prochaines années sera assez différent, quantitativement et qualitativement (béton acier aluminium cuivre, plomb...) [20]

Pour la transposition de la directive 13-59 en droit français, il pourrait être envisagé d'utiliser les seuils de libération comme seuil d'exemption et donc d'abaisser d'un facteur 100 les seuils d'exemption exprimés en activité massique, sauf en ce qui concerne les radionucléides naturels. Pour ceux-ci, il n'est matériellement pas possible de se limiter à une exposition de 10 $\mu\text{Sv}/\text{an}$, ce niveau étant très largement dépassé en tout point du territoire français.

Le cumul d'une réduction de l'exposition à 10 $\mu\text{Sv}/\text{an}$ soit d'un facteur 100, une limitation drastique des masses considérées (1t de matériau, 10 m^3 de déchets), se traduirait par des valeurs d'activités massiques très faibles, mesurables mais par des méthodes coûteuses, et très disproportionnées aux enjeux sanitaires, en coût, matériels et personnel, rendant alors le système illusoire, complexe et en pratique inopérant.

Ceci introduirait par ailleurs

- une incohérence forte entre réglementation des installations et celle internationale des transports, ce secteur ayant statué sur le maintien des valeurs du tableau B, fondées avec raison sur 1 mSv/an ,
- une incohérence entre rayonnements ionisants issus de radionucléides naturels ou artificiels, et une discrimination d'un facteur 100 sans justification sanitaire,
- enfin les valeurs des normes alimentaires internationales en situation post-accidentelle se situeraient au-dessus des valeurs d'exemption d'environ un facteur 10, ce qui constitue également une incohérence importante et générerait des problèmes sérieux bien qu'inutiles en cas d'accident.

Une confusion fréquente existe entre la notion de critères d'acceptation dans des installations industrielles, et la notion de critères de libération, l'une correspondant à l'entrée dans une installation et l'autre à sa sortie vers un usage public ou industriel.

Les critères d'acceptation par les installations de traitement sont a minima égaux aux seuils d'exemption de la réglementation, et devrait très généralement être supérieurs, comme l'indique la directive 13-59, pour des raisons de flux relatifs, de temps de présence et configuration de postes de travail. Les critères de libération de matériaux radioactifs n'ont pas de raison d'exister et l'on ne devrait parler que de critères d'acceptation par les installations de traitement/recyclage. Rien n'interdit cependant d'utiliser ces valeurs « minimales par défaut » pour la réutilisation directe de matériels sortant d'installations utilisant des substances lexradioactives, (ICPE déclarées ou autorisées). C'est probablement le sens des diverses formulations traitant des valeurs de libération dans la directive 13-59.

Pour être complet il convient d'indiquer qu'il n'y a aucune raison de réglementer les substances contenant du potassium 40, tant qu'il n'existe pas d'enrichissement isotopique de cet élément, ce qui n'a pas de sens aujourd'hui.

Conséquences sociétales

Le choix des valeurs quantitatives n'est pas un choix anodin. Il a nécessairement des conséquences psychologiques dans la perception d'un phénomène quelconque, (le tout ou rien étant généralement une mauvaise approche), des conséquences économiques (réalité des enjeux vis-à-vis des coûts et bénéfiques), et des conséquences administratives (il faut porter le contrôle de l'état sur ce qui présente un intérêt).

Plusieurs secteurs importants peuvent être impactés directement avec des conséquences importantes :

- L'enjeu collectif porte évidemment sur la possible génération d'une **radiophobie** par excès de protection, s'appuyant sur un phénomène d'inversion par ailleurs parfaitement logique : si vous prenez beaucoup de précautions, c'est que c'est très dangereux, et non pas parce que vous êtes précautionneux, surtout si l'excès est couteux.
- un premier enjeu porte sur les **choix énergétiques** à venir et risquerait de conduire à l'abandon d'une filière française d'excellence, en totale contradiction avec les enjeux environnementaux actuels (beauté des paysages de France, conservation des surfaces agricoles et forestières) et à venir (évolution climatique, usage de transports électriques). Imaginons que l'on considère comme dangereuse une vitesse dépassant non pas 100 km/h sur route mais 1 km/h, voire même 10m/h, il est bien évident que l'industrie de l'automobile disparaîtrait, et pas seulement cette industrie. De plus, la gestion des matériaux des démantèlements d'installations nucléaires dépend directement du choix des valeurs d'activité pour la définition de la lexradioactivité et des contraintes associées aux statuts des installations réceptrices. Les déchets susceptibles d'être radioactifs qui représentent une très grosse proportion des déchets peuvent selon le choix effectué coûter le prix des déchets toxiques (comme en France) ou être vendus pour recyclage, (comme en Angleterre par exemple). Il est clair que les efforts de nettoyage, y compris par simple décroissance, sont aujourd'hui administrativement bloqués.
- Un second enjeu tout aussi important porte sur **l'usage des rayonnements dans le secteur médical**, à titre de diagnostic ou de traitement. Même si les patients savent qu'ils ont un enjeu personnel de santé, ils peuvent se priver d'outils très performants et se nuire par radiophobie. (aujourd'hui plusieurs milliards de radiodiagnostic par an sont effectués sur terre).
- Le troisième enjeu porte sur les **habitations traditionnelles** dans lesquelles il y a des teneurs en radon de plusieurs centaines de Becquerels par mètre cube d'air. Le nombre de ces habitations seraient de l'ordre du million selon l'IRSN [21], le radon pouvant impliquer une dépréciation des biens, sans rapport avec l'inexistence d'un quelconque risque démontré pour des individus non-fumeurs. Et il pourrait être imposé des travaux plus ou moins importants, d'intérêt mineur par rapport à d'autres besoins d'amélioration des habitats. Notons que les fumeurs ont pour leur part choisi d'assumer un risque considérablement plus élevé, et qu'il est nettement préférable que l'état se consacre à la réduction du tabagisme.
- D'autres enjeux d'une nature un peu différente car uniquement préventive ou/et ne concernant qu'une population restreinte sont à considérer :
- Notamment la baisse drastique de la limite d'exposition du cristallin à la fois pour le seuil d'apparition et la limite annuelle qui semble résulter de surenchères à la baisse

entre organismes internationaux, et qui pourrait conduire à une réduction du nombre d'actes interventionnels qu'un cardiologue pourrait exécuter [22].

- Un autre enjeu est aujourd'hui directement observable au Japon et porte sur la perception de ce qu'est une situation post-accidentelle par le public. Le Japon dépense autant pour les dépôts radioactifs qui n'ont eu et n'auront aucun effet sanitaire que pour les 400 km de côtes océaniques détruites par le tsunami et source de 20 000 morts ; ces côtes pour lesquelles d'ailleurs le risque de tsunami restera identique. D'autres conséquences telles que la prolongation du retrait des populations sur plusieurs années, qui a généré des problèmes sociétaux importants, ou le boycott des denrées alimentaires produites, sont en fait beaucoup plus nuisibles que la « pollution » imaginée (une augmentation de concentration n'étant pas forcément une pollution).
- L'extension des rayons d'action dans les plans d'intervention en cas d'accident autour des installations nucléaires, pour l'information locale du public, les distributions préventives de pastille d'iode, conduisent à mobiliser de manière continue des équipes pour des impacts improbables, non observés même en cas d'accidents majeurs (et gérables par simple arrêt de consommation de lait et légumes verts), alors que dans le même temps les campagnes d'information pour la vaccination des jeunes enfants (DT-polio, BCG, ROR) apparaissent insuffisantes, et que la non vaccination a aujourd'hui des conséquences graves et tangibles.

Conclusions

L'ensemble de ces éléments biologiques, mathématiques et sociétaux réunis ici pour argumenter le choix du champ de la réglementation de radioprotection montre lorsqu'on aborde les enjeux, qu'il devient nécessaire d'une part de rappeler avec force que l'usage des rayonnements a une utilité sanitaire importante pour chacun d'entre nous, et d'autre part qu'il n'y a aucune raison d'abaissée les normes actuelles tant en dose qu'en activité mais de lever quelques verrous administratifs aussi puissants que stérilisants, ce qui permettra de resituer les risques à leur juste niveau comparativement aux risques courants. Enfin qu'il est temps de revoir à minima les règles inappropriées de cumuls et d'absence de seuil.

Remerciements : Tous mes remerciements à Dietrich Averbek pour son attention, sa documentation, et sa lecture attentive et constructive.

Références

[1] >UE (2013) Directive 2013/59/Euratom du Conseil du 05/12/2013 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements

[2] Ordonnance n°2016-128 du 10 février 2016 portant diverses dispositions en matière nucléaire -Chapitre III "activités nucléaires relevant du code de la santé publique".

[3] UNSCEAR 2015 Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation (UNSCEAR 2012 Report) (New York: United Nations)

[4] Wakeford R - 2010 The meaning of low dose and low dose-rate J. Radiol. Prot. 30 1–3 doi:10.1088/0952-4746/30/1/E02

[5] Smith G.M. Thorne M C - J. Radiol. Prot. 36 (2016) 1004–1007 - doi:10.1088/0952-4746/36/4/1004

[6] Bill Sacks, Gregory Meyerson, Jeffrey A. Siegel - Epidemiology Without Biology: False Paradigms, Unfounded Assumptions, and Specious Statistics in Radiation Science (with Commentaries by Inge Schmitz-Feuerhake and Christopher Busby and a Reply by the Authors), Biol Theory (2016) 11:69–101 DOI 10.1007/s13752-016-0244-4

[7] Tubiana M, Aurengo A, Averbek D, Bonnin A, Le Guen B, Masse R, Monier R, Valleron A J and de Vathaire F (2005) - La relation dose-effet et l'estimation des effets cancérogènes des faibles doses de rayonnements ionisants -Dose-effect relationships and the estimation of the carcinogenic effects of low doses of ionizing

radiation Joint Report n°2, Académie Nationale de Médecine, Institut de France–Académie des Sciences (2005) Edition Nucleon (Paris) (ISBN 2-84332-018-6) (www.academiedemedecine.fr/actualites/rapports.asp)

[8] Rothkamm et Löbrich, PNAS 2003 ; 100 :5057-5062

[9] Grudzenski S et al, PNAS 2010;107(32) 14205-14210

[10] Vilenchick MM ; Knudson A.G. Endogenous DNA double-strand breaks : production, fidelity of repair, and induction of cancer. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2003, 100, 12871-6

[11] H. Baysson, G. Tymen, S. Gouva, D. Caillaud, J.C. Artus, A. Vergnenegre, F. Ducloy, D. Laurier. (2004) Case-control study on lung cancer and indoor radon in France. Epidemiology 2004: 15 : 709-716

[12] E. Cardis et Al. The 15-Country Collaborative Study of Cancer Risk among Radiation Workers in the Nuclear Industry: Estimates of Radiation-Related Cancer Risks, RADIATION RESEARCH 167, 396–416 (2007).

[13] David B Richardson, et Al.- Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS); BMJ. 2015; 351: h5359. Published online 2015 Oct 20. doi: 10.1136/bmj.h5359 PMID: PMC4612459

[14] André Aurengo, Pierre Laroche, Bernard Le Guen, Roland Masse, François Pic - Comments on Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS) by David B Richardson et Al. Lettre à l'éditeur.

[15] Maria Blettner- The merits and limits of pooling data from nuclear power worker studies. Lettre à l'éditeur

www.thelancet.com/haematology/Vol2July2015

[16] G. Jaikrishan, K. R. Sudheer, V. J. Andrews, P. K. M. Koya, M. Madhusoodhanan, C. K. Jagadeesan, M. Seshadri - Study of stillbirth and major congenital anomaly among newborns in the high-level natural radiation areas of Kerala, India J, Community Genet (2013) 4:21–31 DOI 10.1007/s12687-012-0113-1

[17] Neel JV, Schull WJ, Awa AA, Satoh C, Kato H, Otake M et al (1990) The children of parents exposed to atomic bombs: estimates of the genetic doubling dose of radiation for humans. Am J Hum Genet 46:1053–1072

[18] M. Bourguignon P. Bérard, J.M. Bertho, J. Farah, C. Mercat . Radioprotection : quel avenir ? - Radioprotection 2017, 52(1), 13-20 - DOI: 10.1051/radiopro/2017007

[19] ICRP (2007) Publication 103 ISBN : 978-2-7430-1120-8

[20] EDF CEA AREVA ANDRA – rapport PNGMDR PI.NT .ADI.12-0003 – étude sur l'intérêt et la faisabilité technicoéconomique de la valorisation dans la filière nucléaire de déchets métalliques TFA (2012)

[21] IRSN brochure radon

[22] CEA Prosinfo n° 11 juin 2012 « La limite de dose au cristallin de 20 mSv. »