

Annexe 2

Becquerel, gray, sievert, trois unités différentes

Henri Métivier

Professeur émérite à l'INSTN – Ancien membre de la CIPR

Parler de la radioactivité et de ses effets demande de préciser les unités employées.

Le nombre de désintégration d'un atome radioactif se mesure en **becquerel** (Bq) du nom d'Henri Becquerel (1852-1908), savant français qui a découvert la radioactivité. C'est un événement : une désintégration et dans le système international on l'exprimera par l'unité de temps, la seconde. *Le Bq est le nombre de désintégration par seconde.* Rien de plus.

L'énergie des rayonnements émis lors des désintégrations étant diverse, l'effet d'une désintégration varie d'un rayonnement à l'autre. On exprimera l'énergie qu'il délivre dans un organisme ou dans un solide en gray (du physicien britannique Louis Harold Gray, 1905-1965). *1 gray est la dose d'énergie absorbée par un milieu homogène d'une masse de 1 kg lorsqu'il est exposé à un rayonnement ionisant apportant une énergie de 1 joule, 1 Gy = 1 J/kg.* C'est donc une unité de chaleur et lorsqu'on l'emploiera pour étudier les effets des radiations sur le monde vivant, la chaleur sera insignifiante, le risque des rayonnements ionisants est lié à la nature de la cible touchée, la molécule d'ADN par exemple.

L'énergie délivrée lors de l'émission d'un rayonnement alpha, bêta ou gamma est très différente, on l'accompagne d'un facteur de nocivité de chaque rayonnement pour en étudier les effets. Nous employons alors le concept de dose équivalente qui permet de comparer les effets biologiques des différents rayonnements. En effet le médecin ou le radioprotectionniste se préoccupe des effets quel qu'en soit la cause, rayonnement alpha bêta ou gamma. Il a besoin d'une valeur additionnant les effets de tous les rayonnements. Ces facteurs de nocivité, appelés facteur de pondération des rayonnements (W_R) relie un dépôt d'énergie à un effet biologique. Comme on compare des effets, on affectera par définition le coefficient 1 au rayonnement de référence, gamma ou rayons X, le rayonnement alpha se voit attribuer à ce jour un W_R de 20, c'est-à-dire qu'il est jugé, par simplification 20 fois plus toxique. Le produit obtenu, la dose équivalente s'exprimera en sievert (du nom du physicien suédois Rolf Sievert 1914-1966).

Ce W_R est le fruit d'une décision d'experts qui proposent une valeur sur la base de multiples résultats expérimentaux. Si de nouvelles connaissances le justifient, la valeur du W_R pourra changer. C'est ce que fait la CIPR dans ses nouvelles recommandations de 2007 pour les neutrons dont l'énergie est inférieure à 1 Mev.

Si l'on veut faire une comparaison avec une situation mieux comprise par bon nombre de personnes, prenons l'exemple du contrôle d'alcoolémie pratiqué par les services de police au bord de nos routes. Le policier souhaite vérifier si l'éventuel taux d'alcool dans le sang du conducteur, n'altère pas ses capacités à conduire. Peu lui importe ce que vous avez bu, de la bière, du vin ou du whisky, il intègre l'addition d'alcool dans chaque boisson. Le W_R de nos rayonnements pourrait se comparer au degré alcoolique de nos boissons, il faudra plus de vin que de whisky pour atteindre la dose réglementaire, il faudra plus de Bq de rayonnement bêta que de rayonnement alpha pour observer un même effet biologique. La seule différence est que le degré alcoolique se mesure alors que le W_R est le fruit d'un jugement d'experts.

Un becquerel d'un radionucléide alpha n'aura pas le même effet biologique qu'un becquerel d'un radionucléide bêta, *le becquerel n'est donc pas une unité de risque.*

Enfin, les radioprotectionnistes ont établis des normes si sévères, que pour les travailleurs et les populations, le risque n'est plus immédiat mais différé c'est l'apparition d'un cancer. Il ne sera observé que chez quelques personnes, sa fréquence d'apparition augmentera avec la dose reçue, sa gravité restant constante. Mais pour évaluer ce risque de cancer la CIPR a introduit un autre concept; la dose efficace, efficace pour induire un cancer. Le radioprotectionniste ne parlera plus de risque pour un organe mais du risque pour une personne, c'est son métier

Comment calcule-t-on la dose efficace ?

Tout d'abord il faut connaître la dose à l'organe, tenant compte de la nocivité des rayonnements, la dose équivalente, puis ensuite affecter à chaque organe un facteur de pondération tenant compte de la sensibilité de chaque organe à l'apparition d'un cancer: c'est le facteur de pondération tissulaire, W_T . En effet, les scientifiques ont observé que pour une même population irradiée de manière homogène (les survivants des bombardements d'Hiroshima et de Nagasaki par exemple) le taux de cancers variant d'un organe à l'autre, ils ne sont pas tous également sensibles. Chaque organe ou tissu se verra donc affecté d'un coefficient, ou d'un pourcentage, la somme de ces coefficients ou pourcentage sera de 1 ou 100 %, par définition. Malheureusement la CIPR a donné également le nom de sievert à la dose efficace, apportant ainsi une certaine confusion tant au niveau des experts que des personnes affectées.

La dose efficace, est donc un concept qui prend en compte la quantité d'énergie cédée dans un organe, pondérée par la sensibilité de celui ci. La dose efficace est, par précaution, reliée de manière linéaire, à une fréquence d'apparition de cancers, sans effet de seuil. Toute dose peut produire un effet, seule sa fréquence d'apparition varie avec la dose reçue. Ce concept de linéarité sans seuil, permet seul d'additionner des doses reçues dans diverses conditions, c'est donc un concept de gestion du risque: pour un même nombre de sievert on aura par définition, le même nombre de cancers. Ce n'est pas une observation scientifique universelle, mais son aspect pratique fait que lorsqu'on veut éviter un risque (radioprotection) c'est un concept utile. À l'inverse le médecin qui évaluera un risque consécutif à une irradiation pourra utiliser toute autre relation que la science décrit. Il fait alors un métier différent du radioprotectionniste.

Ainsi, le législateur utilise la dose efficace exprimée en sievert pour un risque tardif, et ne l'utilise que pour les effets tardifs consécutifs à des faibles doses d'irradiation. Le radiothérapeute, quant à lui, n'a pas les mêmes objectifs, il exprime la dose qu'il délivre à la tumeur pour l'éradiquer en Gy.

La CIPR est très claire, la limite de dose que le travailleur ou le public ne doit pas dépasser dans la pratique est la somme des irradiations par une source placée à l'extérieur du corps et celle liée à l'incorporation de radionucléides dans l'organisme.

Comment calcule-t-on ces deux composantes ?

Lorsque la source est à l'extérieur du corps, on utilise des dosimètres qui sont conçus de telle manière que la dose qu'ils reçoivent, et que l'on peut mesurer, est comparable à celle que l'organisme reçoit. Le matériau utilisé est pour cela souvent appelé « équivalent tissu ». Dès que la personne est en dehors du champ d'irradiation, celle ci cesse et la lecture du dosimètre qu'il porte permet de connaître la dose qu'il a reçue.

Il en est autrement pour la contamination interne. Si nous inhalons ou ingérons un radionucléide, l'arrêt de l'incorporation ne signifie pas l'arrêt de l'irradiation. Celle-ci continue tant que le radionucléide reste dans l'organisme. La première chose à connaître est

donc le temps de rétention de ce radionucléide dans l'organisme. Les radiotoxicologues définissent des courbes de rétention qui reflètent le temps de résidence d'un radionucléide. Ce temps dépend de la nature de la molécule à laquelle il est lié. Ainsi l'hydrogène radioactif (tritium) s'élimine de l'organisme en quelques jours s'il est incorporé dans la molécule d'eau, mais il y séjourne beaucoup plus longtemps s'il est incorporé dans une molécule se fixant à l'ADN par exemple.

Une molécule d'eau radioactive incorporée s'élimine beaucoup plus vite qu'un oxyde d'uranium ou de plutonium. Si leur activité, exprimée en Bq est la même, on voit bien qu'un Bq d'eau tritiée n'aura pas les mêmes effets qu'un Bq d'uranium ou de plutonium, compte tenu de la nature de l'émission radioactive et de son temps de séjour dans l'organisme.

Le becquerel n'est donc, définitivement, pas une unité de risque.

Les fonctions de rétention sont définies au niveau de chaque organe. En fonction du temps, le radioprotectionniste peut donc ainsi calculer la dose que reçoit chaque organe, en tenant compte de la nature du rayonnement (W_R), il fait ensuite la somme des doses reçues par chaque organe en la pondérant par sa sensibilité (W_T) et obtient ainsi la dose efficace. Mais comme le radionucléide peut rester longtemps dans l'organisme, le radioprotectionniste fera le calcul sur une période fixée arbitrairement à 50 ans et le résultat de ce calcul s'appelle la dose efficace engagée; elle n'est pas encore délivrée, mais elle le sera, d'où le nom d'engagement. Cette notion d'engagement a été proposée par la CIPR, pour protéger le travailleur d'un éventuel oubli, dans l'estimation de la dose qu'il va recevoir les années après sa contamination. Elle peut, ne jamais être délivrée, c'est le cas par exemple pour une personne âgée, qui serait contaminée; le calcul sur 50 ans pourra dépasser son espérance de vie. En revanche, pour les personnes de moins de 20 ans, la CIPR propose de faire le calcul jusqu'à 70 ans.

Le temps, mis pour éliminer un radionucléide d'un organisme est défini par sa période biologique (élimination de 50 %), si la période radioactive (50 % de désintégration) est d'un ordre comparable à la période biologique, on tiendra compte de la combinaison de ces deux phénomènes pour définir une période effective.

La simplicité n'est pas toujours du côté du radioprotectionniste. Si le parcours du rayonnement est faible, rayonnement alpha par exemple, il se contente du calcul défini ci dessus. Mais si le rayonnement est très pénétrant, le cas du rayonnement gamma du ^{137}Cs par exemple, il ne faut pas se contenter de calculer la dose reçue par un organe par sa seule contamination, mais aussi par la contamination des organes voisins qui l'irradient. Quelques équations supplémentaires prenant en compte le parcours de chaque rayonnement, lié à son énergie, et le calcul est fait. Mais rassurons nous, l'opérateur, tout comme le médecin du travail ou le législateur n'a rien à faire, la CIPR a calculé pour lui des coefficients de dose par unité d'incorporation. Ainsi chaque isotope sous une forme chimique définie se voit attribué un coefficient de dose par unité d'incorporation que nous appelons DPUI. Ces coefficients sont repris par les instances de radioprotection du monde entier.

Ce temps de calcul fixe, 50 ans, a été voulu par la CIPR. Tout comme la limite de dose, elle évite qu'un calcul et des décisions en découlant soient basés sur l'âge. Si cette possibilité existait il y a quelques décennies, elle a été supprimée pour des raisons sociales, on n'envisage pas d'envoyer les personnes âgées effectuer des tâches irradiantes.

Pour illustrer ces démarches nous allons décrire brièvement comment la CIPR fait ses calculs pour l'ingestion de deux isotopes qui jouent un rôle majeur après un accident de réacteur, ^{131}I et le ^{137}Cs . Les résultats de ces calculs sont exprimés sous la forme de coefficient de doses par unité d'incorporation que nous appelons DPUI. Ces valeurs calculées

par al CIPR sont reprises dans les documents de base de l'AIEA, dans les directives de l'Union européenne et dans les textes règlementaires français.

Ingestion d'Iode

Le modèle de la CIPR estime qu'après ingestion d'iode radioactif l'absorption dans le sang est pratiquement complète aussi bien chez l'adulte que chez l'enfant. Une fois dans le sang, environ 30 % de l'iode circulant se dépose dans la glande thyroïde, le reste (70 %) est éliminé par les urines pour un individu adulte. Cette valeur de 30 % varie en réalité en fonction des individus et du niveau naturel d'iode présent dans la nourriture. En cas d'accident libérant de l'iode radioactif, la thyroïde captera plus de cet iode radioactif dans les pays carencés en iode naturel que dans les pays ayant une alimentation riche en iode.

Le renouvellement pour moitié de l'iode dans le corps humain de l'adulte est d'environ 12 jours. Il est plus rapide chez l'enfant; la CIPR l'estime à 1,12 jour pour un nourrisson et à 5,8 jours pour un enfant de 10 ans. Au niveau de la seule glande thyroïde, ces temps de renouvellement sont de 80 jours chez l'adulte; 11 jours chez le nourrisson et 58 jours chez l'enfant de 10 ans.

Ainsi, en tenant compte de l'énergie du rayonnement la CIPR calcule qu'après l'ingestion de 1 Bq d' ^{131}I , la dose engagée à la thyroïde sera de $4,4 \cdot 10^{-7}$ Sv pour un adulte et de $3,7 \cdot 10^{-6}$ Sv chez un nourrisson et de $1,1 \cdot 10^{-6}$ chez un enfant de 1 an. Pour une incorporation égale, la dose au nourrisson sera donc près de 10 fois plus élevée que chez l'adulte.

Ingestion de césium

Le modèle de la CIPR estime qu'après ingestion de césium radioactif l'absorption dans le sang est rapide et complète quel que soit l'âge. Cette décision est volontairement conservatrice puisque on observe des valeurs d'incorporation, allant selon les études de 56 à 99 %.

Une fois dans le sang, le césium suit le même cheminement biologique que le potassium et se répartit dans tout l'organisme principalement au niveau du muscle. Pour des raisons de dosimétrie la CIPR estime qu'il est uniformément réparti. Pour l'isotope ^{137}Cs , émetteur gamma, prendre en compte une faible inhomogénéité ne conduirait pas à un résultat dosimétrique différent, c'est la raison pour laquelle la CIPR a pris cette hypothèse simplificatrice.

Une fois dans l'organisme, chez l'adulte, 90 % du césium s'éliminent pour moitié de l'organisme en 110 jours 10 % en 2 jours. Une fois de plus la CIPR pour des raisons conservatrices ne prend pas en compte la différence entre hommes et femmes, celles-ci éliminant la moitié du césium en environ 80 jours, la masse musculaire étant moindre. En faisant ce choix, la CIPR prend une fois de plus la mesure la plus protectrice.

Chez le nourrisson, le césium s'élimine pour moitié en 16 jours, chez l'enfant de 10 ans, 70 % du césium s'élimine avec une période de 50 jours, 30 % avec une période de 6 jours.

Ainsi, en tenant compte de l'énergie du rayonnement du ^{137}Cs la CIPR calcule qu'après l'ingestion de 1 Bq de cet isotope, la dose efficace engagée sera de $1,3 \cdot 10^{-8}$ Sv pour un adulte et de $2 \cdot 10^{-8}$ Sv chez un nourrisson, et de $9,8 \cdot 10^{-9}$ Sv chez un enfant de 1 an. Contrairement à l'iode la différence entre enfant et adulte est inférieure à un facteur 2. L'homogénéité de l'irradiation due à la nature du rayonnement en est la cause principale.

Ces deux exemples montrent, une fois de plus, que le Becquerel n'est pas une unité de risque.