

Le becquerel (Bq), le gray (Gy) et le sievert (Sv) sont les principales unités employées pour mesurer la radioactivité et pour estimer ses effets biologiques.

Mesurer l'activité : le becquerel (Bq)

L'**activité** d'une certaine quantité de matière radioactive est définie par le nombre de désintégrations qui se produisent en son sein par unité de temps.

Dans le système international d'unités (SI), l'unité de l'activité est le **becquerel (Bq)**, un becquerel correspondant à **une désintégration d'atome radioactif par seconde**.

Activité massique, volumique, surfacique

L'**activité massique** est l'activité d'une substance radioactive par unité de masse. Dans le SI, elle s'exprime en principe en becquerels par kilogramme (**Bq/kg**).

Attention : les activités massiques sont parfois exprimées en Bq/g, ce qui peut donner l'impression d'une activité moindre, mais il faut garder à l'esprit le fait qu' $1 \text{ Bq/g} = 1\,000 \text{ Bq/kg}$ (à chaque seconde 1 000 atomes se désintègrent dans 1 kilogramme de matière).

L'activité massique d'un échantillon décroît dans le temps en fonction de la période physique des radionucléides : au bout de 30 ans elle sera divisée par 2 dans le cas du césium 137 (période : 30 ans) alors qu'elle ne variera quasiment pas s'agissant du plutonium 239 (période : 24 000 ans)¹.

L'**activité volumique** caractérise l'activité par unité de volume gazeux (**Bq/m³**) ou liquide (**Bq/l**).

L'**activité surfacique** permet de quantifier les dépôts radioactifs sur une surface donnée. Elle s'exprime en principe en **Bq/m²**, mais d'autres multiples peuvent être rencontrés, notamment le Bq/cm² employé pour les limites de contamination sur les colis de substances radioactives ($1 \text{ Bq/cm}^2 = 10\,000 \text{ Bq/m}^2$).

L'activité, exprimée en becquerels, est utilisée pour quantifier la radioactivité, mais elle ne suffit pas à déterminer le risque associé.

En effet, dans le cas d'une exposition externe (lorsque la source de rayonnement se situe à l'extérieur du corps), l'exposition dépend du type de rayonnements émis, de leur quantité ainsi que de leur énergie. Tous ces paramètres varient d'un radionucléide à l'autre.

De plus, dans le cas d'une contamination interne, d'autres facteurs interviennent. Les impacts peuvent fortement différer selon le mode de contamination (inhalation, ingestion), les caractéristiques physico-chimiques du radionucléide, les organes touchés, la durée de séjour du radionucléide dans le corps, etc...

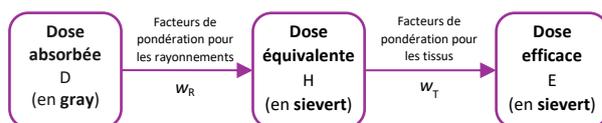
Le risque radiologique n'est pas mesuré mais seulement estimé

La Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) a établi une méthode de détermination du risque radiologique, consistant à :

- a/ **mesurer la quantité d'énergie** déposée en moyenne dans les organes et tissus (**dose absorbée**),
- b/ **évaluer les effets biologiques** de l'énergie déposée, en tenant compte :

- de la nature du rayonnement (alpha, bêta, gamma, neutron, ...) pour estimer la « **dose équivalente** »,
- de la sensibilité aux rayonnements, qui diffère selon les organes et les tissus pour estimer la « **dose efficace** ».

La **dose efficace** est ensuite utilisée pour définir des limites à ne pas dépasser pour différentes catégories d'individus et différentes situations.



¹ Pour plus de renseignements sur cette notion cf. fiche G1.

Mesurer la dose absorbée : le gray (Gy)

La **dose absorbée** est définie comme la **quantité d'énergie moyenne communiquée à la matière par unité de masse**.

L'unité de la dose absorbée est le **gray (Gy)**, un gray correspondant à 1 joule par kilogramme (J/kg).

Cette unité, qui est à la base du système de radioprotection, a été choisie pour évaluer les effets des rayonnements ionisants.

Or considérer une énergie moyenne délivrée de manière homogène au niveau d'un organe ou d'un tissu ne permet pas de rendre compte de l'hétérogénéité des dépôts d'énergie liés aux rayonnements ionisants. Ce problème est limité pour l'exposition externe, mais il joue un rôle important en cas de contamination interne par des émetteurs alpha ou bêta, car lors de leur désintégration, les radionucléides délivrent de l'énergie de manière très localisée (au niveau cellulaire et moléculaire), à partir de l'endroit où ils se sont fixés.

Estimer les effets biologiques : le sievert (Sv)

Dose équivalente

Selon le type de rayonnement émis, l'énergie n'est pas communiquée à la matière de la même façon. La densité d'ionisation des tissus est en effet très différente selon que l'énergie provient d'un rayonnement électromagnétique (gamma, X), d'une particule chargée (alpha, bêta) ou d'une particule non chargée (neutron).

Pour traiter ce problème la CIPR a élaboré des **facteurs de pondération pour les rayonnements** notés w_R .

Type de rayonnement	Facteur de pondération pour les rayonnements w_R
Photons (γ , X)	1
Électrons (β)	1
Particules α	20
Protons	2
Neutrons	2,5 à 20 (en fonction de l'énergie)

Source : CIPR 103 (2007)

Le coefficient le plus élevé (20) est attribué aux particules α .

La CIPR a fait le choix d'attribuer le même coefficient de 1 aux photons (rayonnements γ et X) et aux électrons (β)

² La CIPR reconnaît pourtant que « davantage de données sont désormais disponibles à partir de recherches sur des cellules, qui montrent des différences significatives dans la qualité des rayonnements des photons d'énergies différentes ».

alors que l'effet de ces derniers sur la matière est différent : le trajet des particules β étant plus court que celui des photons, leur effet dépend plus fortement de leur localisation cellulaire et moléculaire.

Par ailleurs, pour un type de rayonnement donné, des études montrent que des rayonnements n'émettant pas la même énergie n'ont pas le même effet sur les cellules impactées. Ceci n'a été pris en compte par la CIPR que pour les neutrons. Pour les rayonnements α , β , γ , X, le facteur de pondération est le même quelle que soit l'énergie².

De façon générale, l'établissement de ces coefficients est basé sur des études expérimentales dont les résultats varient en fonction de nombreux paramètres et ne couvrant pas toutes les situations.

Ainsi, les valeurs des w_R correspondent à la simplification extrême d'une réalité mal connue, résultant d'arbitrages en partie subjectifs, pour des besoins de radioprotection pratique³.

La **dose équivalente** dans un organe ou un tissu, notée H_T , est définie comme la somme des doses absorbées dues aux différents rayonnements, pondérées par les facteurs w_R . Son unité est le **sievert (Sv)**.

Dose efficace

Notre corps est constitué d'organes et de tissus qui présentent des sensibilités variables aux radiations, notamment en fonction de la présence et de l'importance des cellules souches radiosensibles. La même dose équivalente va donc provoquer des dégâts différents suivant la zone exposée.

Afin de tenir compte des **différences de radiosensibilité**, la CIPR a introduit un **facteur de pondération pour les tissus**, noté w_T .

Le plus élevé (0,12) est attribué au poumon, à l'estomac, au côlon, à la moelle osseuse et au sein. Le plus faible (0,01) est attribué à la surface de l'os, à la peau, au cerveau et aux glandes salivaires.

³ Comme l'indique la CIPR : « la simplification est importante pour traduire notre manque d'informations précises sur l'homme ».

Organe/tissu	Facteur de pondération pour les tissus w_T
Poumon	0,12
Estomac	0,12
Côlon	0,12
Moelle osseuse	0,12
Sein	0,12
Gonades	0,08
Thyroïde	0,04
Œsophage	0,04
Vessie	0,04
Foie	0,04
Surface de l'os	0,01
Peau	0,01
Cerveau	0,01
Glandes salivaires	0,01
Autres organes	0,12
Total	1

Autres organes : glande surrénale, tissu extrathoracique, vésicule biliaire, cœur, reins, ganglions lymphatiques, muscle, muqueuse buccale, pancréas, intestin grêle, rate, thymus, prostate (H), utérus (F)

Source : CIPR 103 (2007)

La **dose efficace E** est une dose au corps entier.

Elle intègre les contributions des différents organes en sommant leurs doses équivalentes H_T pondérées par les facteurs de pondération pour les tissus w_T . Son unité est également le **sievert (Sv)**, ce qui peut prêter à confusion. L'évaluation du risque sanitaire associé à la dose efficace est principalement basée sur l'étude des survivants japonais aux bombardements d'**Hiroshima et Nagasaki** (étude Life Span Study ou LSS).

Outre le fait que les bases de l'étude sont critiquables⁴, ses résultats correspondent à l'impact d'une exposition externe à débit de dose élevé pendant un laps de temps très court (flash).

Or l'essentiel de la protection du public et des travailleurs concerne des expositions à faible débit de dose sur des temps longs.

Pour tenir compte de cette différence la CIPR a décidé, pour les expositions à faible dose et faible débit de dose, de se baser sur les coefficients de risque déterminés par l'étude des survivants des bombardements mais de les diviser par 2.

⁴ Les effets n'ont été pris en compte qu'à partir de 1950 soit 5 ans après les bombardements ; la contamination interne a été négligée ...

Ce choix a été critiqué à l'époque par des scientifiques indépendants.

Il est aujourd'hui remis en cause par plusieurs études épidémiologiques de référence qui portent sur des cohortes exposées à de faibles intensités pendant un temps long et qui concluent à des facteurs de risque comparables (voire supérieurs) aux facteurs de risque de l'étude LSS.

Par ailleurs, **seuls les risques de cancers et les maladies héréditaires sont pris en compte** par la CIPR malgré les nombreuses études qui ont fait état d'autres pathologies.

La CIPR estime que le risque de décès lié à l'exposition aux faibles doses est approximativement de 5% par Sv (ce qui correspond à 50 décès pour 1 million de personnes exposées à une dose efficace de 1 millisievert).

Compte tenu des incertitudes et des simplifications relatives à la détermination des valeurs de dose équivalente et de dose efficace, cet ordre de grandeur doit être pris avec précaution. Il faut souligner que l'évaluation du risque sanitaire associé à une dose efficace donnée s'entend à l'échelle d'une population et non d'un individu.

Ces réserves étant posées, c'est sur la base des concepts de dose équivalente, de dose efficace, et de l'estimation du risque global associé, que reposent les normes de base en matière de radioprotection.

Limites de dose

Les réglementations européenne et suisse, basées sur les préconisations de la CIPR, fixent des limites annuelles qu'un individu quel qu'il soit ne doit pas dépasser.

Les limites de dose s'appliquent au cumul des expositions aux rayonnements ionisants générés par l'ensemble des activités nucléaires⁵. C'est à tort que les exploitants comparent l'impact d'une seule installation à la limite globale. Il convient de tenir compte de toutes les contributions.

Les limites de dose efficace au corps entier sont trop souvent présentées comme des limites en-deçà desquelles l'exposition est sans danger. En réalité, d'un point de vue réglementaire, elles correspondent à un niveau de risque maximum admissible. En-deçà de la limite, le risque perdure et la réglementation oblige à le réduire autant qu'il est raisonnablement possible : c'est le principe d'optimisation (cf. encadré).

⁵ Activités humaines qui augmentent l'exposition aux rayonnements ionisants, à l'exclusion des expositions médicales et d'une grande partie des expositions naturelles (rayonnements telluriques, cosmiques au niveau du sol, ...).

Limites d'exposition aux rayonnements ionisants en vigueur en Suisse et en Union Européenne	Public (y compris les travailleurs non classés)	Travailleurs exposés aux rayonnements ionisants	
		Catégorie A	Catégorie B
Limite de dose efficace (au corps entier) <i>Nombre de cancers mortels radioinduits pour 100 000 personnes recevant la dose limite</i>	1 mSv / an <i>5 décès</i>	20 mSv/an <i>80 décès</i>	6 mSv/an <i>24 décès</i>
Limites de dose équivalente aux extrémités (bras, avant-bras, pieds et chevilles)	-	500 mSv/an	150 mSv/an
Limites de dose équivalente au crystallin (partie de l'œil située derrière la pupille)	15 mSv/an	20 mSv/an	15 mSv/an ⁽¹⁾
Limites de dose équivalente à la peau (dose moyenne sur toute surface de 1 cm ²)	50 mSv/an	500 mSv/an	150 mSv/an

(1) En France : 20 mSv/an

Attention, ces limites sont valables en situation normale.

En situation accidentelle, la CIPR préconise de fixer, pour la dose efficace du public, un niveau de référence dans une fourchette comprise entre 20 et 100 mSv pour la phase d'urgence, et dans une fourchette comprise entre 1 et 20 mSv par an pour la phase post-accidentelle.

La Suisse et la France ont choisi les valeurs hautes de ces fourchettes (100 mSv pour une situation d'urgence et 20 mSv par an pour la phase post-accidentelle).

Il est important de souligner qu'un niveau de référence n'est pas une limite : selon les propres définitions de la CIPR, une limite est une valeur « qui ne doit pas être dépassée », tandis qu'un niveau de référence est un niveau « au-dessus duquel il est jugé inapproprié de permettre la survenue d'expositions [...] ». La CIPR envisage par exemple, en situation post-accidentelle, le dépassement de la référence de dose par un pourcentage notable de la population sur des durées non définies.

Les trois principes de radioprotection

Outre la limitation des doses, la base du système de protection radiologique établi par la CIPR repose sur deux autres principes : la justification et l'optimisation.

Selon le principe de **justification**, une activité nucléaire ne peut être entreprise ou exercée que si « *les avantages [qu'elle] procure sur le plan individuel ou pour la société l'emportent sur le détriment sanitaire qu'elle pourrait causer* »⁶.

D'après le principe d'**optimisation**, « *le niveau de l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants résultant d'une de ces activités, la probabilité de la survenue de cette exposition et le nombre de personnes exposées doivent être maintenus au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre, compte tenu de l'état des connaissances techniques, des facteurs économiques et sociétaux et, le cas échéant, de l'objectif médical recherché* »⁷.

Toute la question est de savoir qui apprécie la justification et l'optimisation, et sur quels critères : comment trouver l'équilibre entre les facteurs économiques à prendre en compte et les facteurs sociétaux ?

⁶ Directive Euratom 2013/59.

⁷ France, article L1333-2 du Code de la santé publique.