

Physique

Rayonnements ionisants

Rayonnements particuliers

Rayons X et gamma

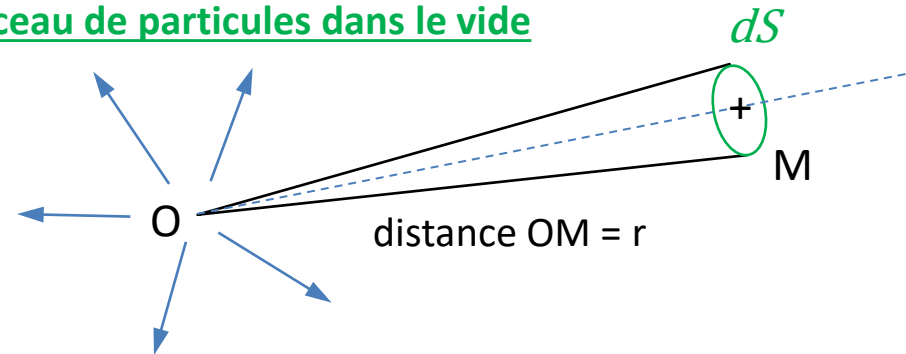
Dosimétrie

Nicolas HUANG

Dosimétrie

Les effets biologiques des rayonnements ionisants dépendent de l'énergie absorbée par unité de volume par les tissus irradiés. La dosimétrie permet de quantifier cette énergie.

Caractérisation d'un faisceau de particules dans le vide



Une source ponctuelle O émet des particules dans toutes les directions de l'espace. La source est dite « **isotrope** » si toutes les directions de l'espace sont équivalentes (les sources radioactives sont isotropes, mais pas les sources de rayons X de freinage).

Soit un faisceau infiniment fin de dN particules mono-énergétiques d'énergie ε traversant une surface élémentaire dS pendant le temps dt . Ce faisceau est émis dans le vide à partir de la source O. La surface élémentaire dS appartient à une sphère de rayon $OM = r$ (la droite OM est normale à la surface dS) et entoure le point M.

- Flux énergétique Φ du faisceau = énergie totale transportée par le faisceau, par unité de temps

$$\Phi(t) = \varepsilon \frac{dN}{dt}$$

Unité SI de Φ : le watt W ($1 \text{ W} \equiv 1 \text{ J.s}^{-1}$)

Dosimétrie

- Éclairement E en un point M = flux d'énergie à travers dS par unité de surface traversée

$$E = \frac{d\Phi}{dS}$$

Unité SI de E : W.m^{-2}

E décroît suivant $1/r^2$ (car l'énergie se répartit sur la surface de la sphère de rayon r , et sa surface augmente suivant r^2 ; de même dS croît en r^2).

- Fluence énergétique F en un point M = énergie totale rayonnée par la source à travers dS pendant Δt par unité de surface traversée

$$F = \int_t^{t+\Delta t} E(t) dt$$

Si E ne dépend pas de t , on a : $F = E \Delta t$

Unité SI de F : J.m^{-2}

F décroît en $1/r^2$.

Dosimétrie

Transferts d'énergie entre un faisceau de particules et la matière

Quand un faisceau de particules pénètre dans un tissu, les effets biologiques dépendent de l'énergie absorbée par unité de volume. On définit ainsi la **dose absorbée D_a qui représente l'énergie dW_a absorbée par unité de masse**. L'énergie absorbée dW_a est due aux interactions rayonnement-matière.

$$D_a = \frac{dW_a}{dm}$$

Unité SI de D_a : le gray Gy $\equiv \text{J.kg}^{-1} \Rightarrow 1 \text{ Gy} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$

- Lien entre la dose absorbée D_a (unités SI : Gy $\equiv \text{J.kg}^{-1}$) et la fluence énergétique F (unités SI : J.m⁻²) :

$$D_a = \left(\frac{\mu_a}{\rho} \right) F$$

D_a décroît en $1/r^2$.

μ_a coefficient d'atténuation de l'énergie par le matériau cible (unités SI : m⁻¹)

ρ masse volumique du matériau cible (unités SI : kg.m⁻³)

μ_a/ρ coefficient d'atténuation massique de l'énergie par le matériau cible (unités SI : m².kg⁻¹)

- Débit de dose \dot{D}_a : variation de la dose absorbée avec le temps (unités SI : Gy.s⁻¹)

$$\dot{D}_a = \frac{dD_a}{dt}$$

Dosimétrie

Remarque : pour un faisceau de photons

μ est le **coefficient total d'atténuation linéaire/linéique** (dépend de la nature du matériau).

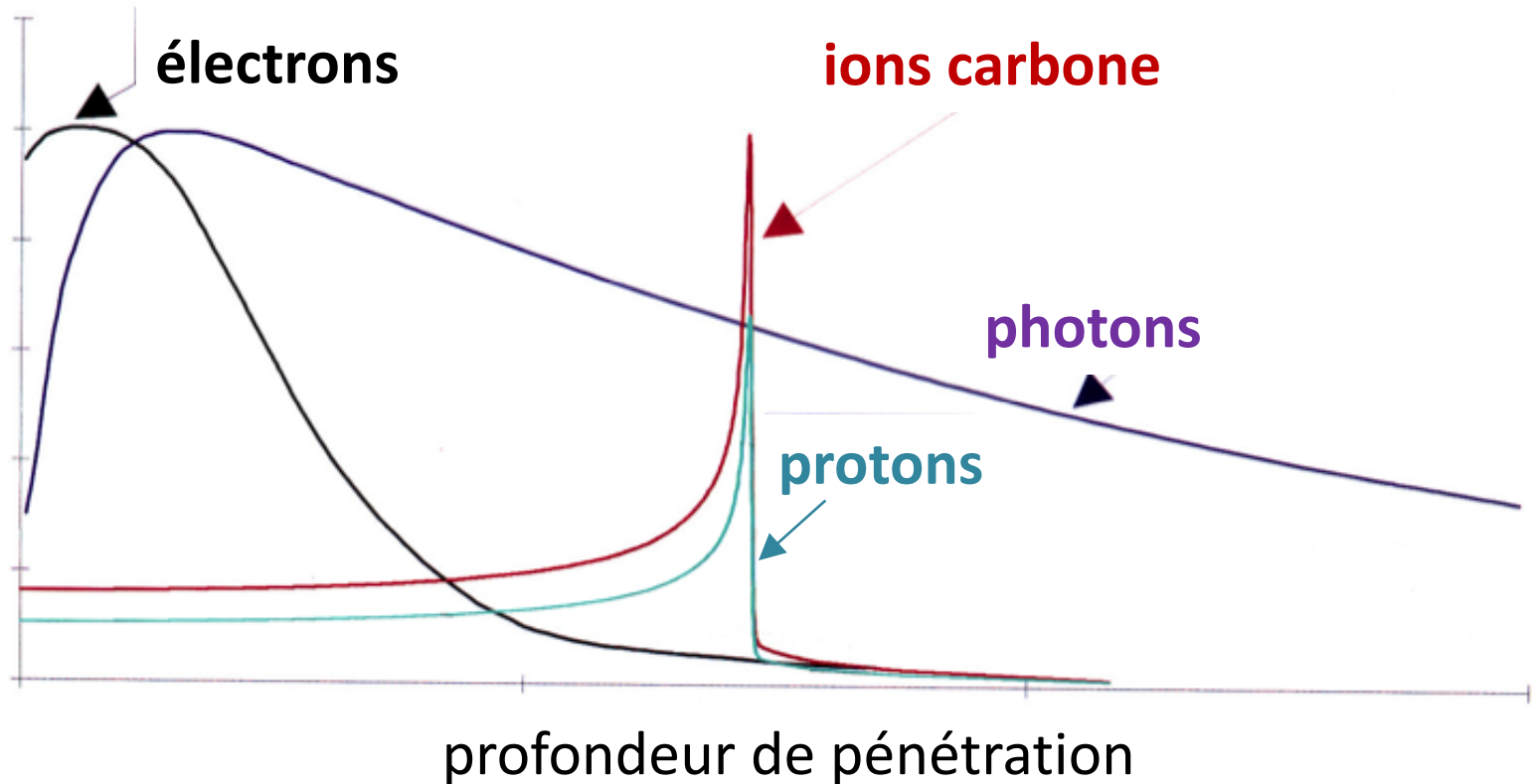
μ traduit la probabilité pour les photons d'interagir avec le matériau, par unité de longueur.

Unités SI : m^{-1}

μ est souvent exprimé en cm^{-1} .

- Intensité du faisceau de photons $I(x) = I_0 e^{-\mu x}$ souvent en W/m^2 (comme l'éclairement)
- Nombre de photons $N(x) = N_0 e^{-\mu x}$ sans unité
- Dose absorbée D_a ou D ($\text{Gy} \equiv \text{J}/\text{kg}$) $D(x) = D_0 e^{-\mu x}$ en Gy
- Débit de dose \dot{D} $\dot{D}(x) = \dot{D}_0 e^{-\mu x}$ en Gy/s

dose absorbée



Dose absorbée par un matériau (énergie absorbée par unité de masse) en fonction de la profondeur de pénétration pour différents types de particules. Les protons et les ions de carbone déposent la majorité de leur énergie à une profondeur bien précise, alors que les photons des rayons X conventionnels la déposent tout au long de leur parcours, irradiant les tissus sains avant d'atteindre la tumeur. Sur le graphique, le pic de dose absorbée engendré par les protons et les ions carbone à la fin de leur parcours dans le matériau s'appelle le pic de Bragg.

Applications thérapeutiques des particules lourdes : radiothérapie externe

L'**hadronthérapie** est une technique innovante de lutte contre le cancer. Elle permet de détruire les cellules cancéreuses radiorésistantes et inopérables en les irradiant avec un faisceau de particules. La hadronthérapie permet de détruire, à l'aide de protons, des tumeurs situées en profondeur dans le corps, en minimisant les dommages occasionnés aux tissus biologiques environnants.

La radiothérapie conventionnelle utilise essentiellement des rayons X alors que l'hadronthérapie utilise un faisceau de « hadrons », notamment des protons (**protonthérapie**) et des ions carbone (**carbonethérapie**).

Exemples : tumeurs de l'œil, de la base du crâne, du cou, des poumons, du foie.

Remarque :

Hadron : particule composée de quarks. Exemples : proton, neutron.

Quark : particule élémentaire et constituant fondamental de la matière. Par exemple, un proton est composé de deux quarks « up » et d'un quark « down ».

Dosimétrie : radiobiologie

Radiobiologie : étude de l'effet des rayonnements ionisants sur la matière vivante

Quelles sont les grandeurs permettant de quantifier les doses reçues par la matière vivante ?

Dose équivalente

Les différents rayonnements ionisants (photons ou particules matérielles) n'ont pas le même pouvoir nocif sur les tissus de l'organisme. La **dose équivalente H** est l'énergie absorbée par les tissus vivants exposés, en tenant compte de la nocivité des différents types de rayonnements :

$$H = D_{\alpha} W_R$$

W_R : facteur de pondération des rayonnements. Unités SI de H : le sievert (Sv).

W_R tient compte de la nature du rayonnement.

Pour les photons (X ou γ) et les particules β^+ et β^- , $W_R = 1$.

Pour les particules α , $W_R = 20$. Pour les neutrons : W_R entre ~ 5 et 20.

W_R des particules de faible TLE (photons, β) $<$ W_R des particules de fort TLE (α , ions lourds, neutrons)

Attention, gray et sievert sont tous deux équivalent à des $J.kg^{-1}$.

Le gray est toutefois réservé pour la dose absorbée D_{α} .

Le sievert est utilisé pour la dose équivalente H ou la dose efficace E .

Dosimétrie : radiobiologie

Dose efficace

Les différents tissus de l'organisme n'ont pas la même radiosensibilité. La **dose efficace E** est la somme des doses équivalentes reçues par les tissus vivants exposés, en tenant compte de la radiosensibilité des différents tissus exposés :

$$E = \sum_{\text{tissus}} H W_T = \sum_{\text{tissus}} D_a W_R W_T$$

W_T : facteur de pondération tissulaire.

W_T est un facteur de pondération tenant compte de la radiosensibilité du tissu exposé.

Exemples :	gonades	$W_T = 0,20$
	moelle osseuse, poumons	$W_T = 0,12$
	thyroïde	$W_T = 0,05$
	peau	$W_T = 0,01$

La somme de tous les facteurs de pondération tissulaire est égale à 1.

Unités SI de E : le sievert (Sv).

La dose efficace est adaptée aux besoins de la radioprotection du personnel médical et des patients.

Dosimétrie : radiobiologie

Quels sont les effets moléculaires des rayonnements ionisants sur la matière vivante ?

Effets directs

L'énergie apportée par les rayonnements peut provoquer **la rupture d'une liaison covalente A-B d'une molécule d'intérêt biologique (ADN, protéine)** : la molécule dissociée perd sa fonction biologique initiale et ils se forment alors des radicaux libres $A\bullet$ et $B\bullet$. Les radicaux libres possèdent ainsi des électrons célibataires sur leur couche externe, qui vont réagir avec des électrons de molécules ou atomes voisins pour reformer des liaisons chimiques covalentes. **Les radicaux libres sont donc très instables, très réactifs et peuvent déclencher l'apparition d'autres espèces radicalaires.**

Effets indirects

L'eau constituant 80 % de la masse globale des tissus biologiques, la majorité de l'énergie radiative est **absorbée par l'eau**. Il en résulte des altérations biologiques indirectes.

L'énergie apportée par les rayonnements peuvent provoquer la **radiolyse de l'eau** (décomposition de la matière par des rayonnements ionisants), et conduit à **l'apparition à des radicaux libres $H\bullet$ et $OH\bullet$** qui peuvent altérer des molécules d'intérêt biologique ou donner des **oxydants** ($HO_2\bullet$) ou des **peroxydes** (eau oxygénée H_2O_2) **très puissants, qui sont très toxiques et à longue durée de vie : leurs effets peuvent se poursuivre après la fin de l'irradiation.**

Dosimétrie : radiobiologie

Quels sont les effets **tissulaires** des rayonnements ionisants sur la matière vivante ?

Les effets des rayonnements ionisants sur les tissus dépendent de la nature des cellules qui le composent et de la cinétique du renouvellement cellulaire.

Les tissus dont les cellules se renouvellent rapidement sont les plus radiosensibles (exemples : tissus embryonnaires, tissus hématopoïétiques, les tissus séminifères, etc.).

Dosimétrie : radiobiologie

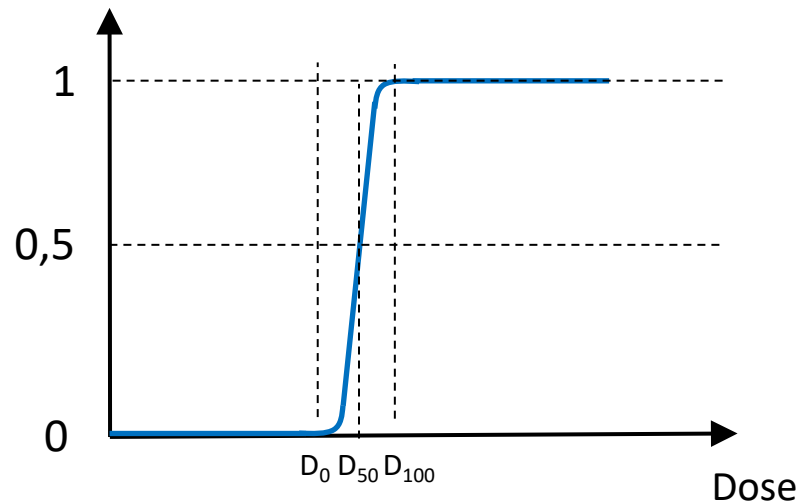
Effets déterministes et stochastiques

Les effets des rayonnements ionisants sur les tissus et sur l'organisme entier sont de deux types : **les effets déterministes et les effets stochastiques.**

Effets déterministes (obligatoires)

Les effets déterministes sont généralement précoces (avant quelques mois) et ne peuvent survenir qu'à partir d'une dose seuil de rayonnement. Ils sont d'autant plus grave que la dose est élevée. Pour des doses supérieures à une dizaine de Sv, la mort d'un individu peut se produire en quelques heures. La dose létale $D_{50/30}$ qui tue la moitié des personnes dans un délai de 30 jours est de l'ordre de 3 à 5 Sv.

Probabilité d'apparition des effets déterministes



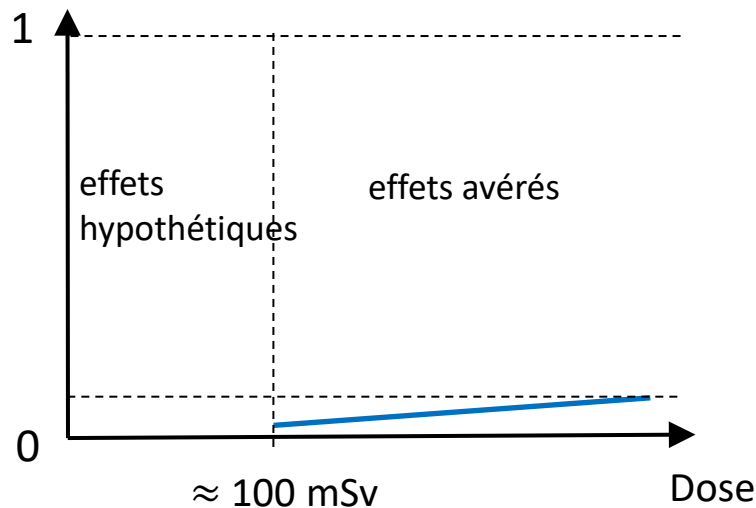
Dosimétrie : radiobiologie

Effets déterministes et stochastiques

Effets stochastiques (aléatoires)

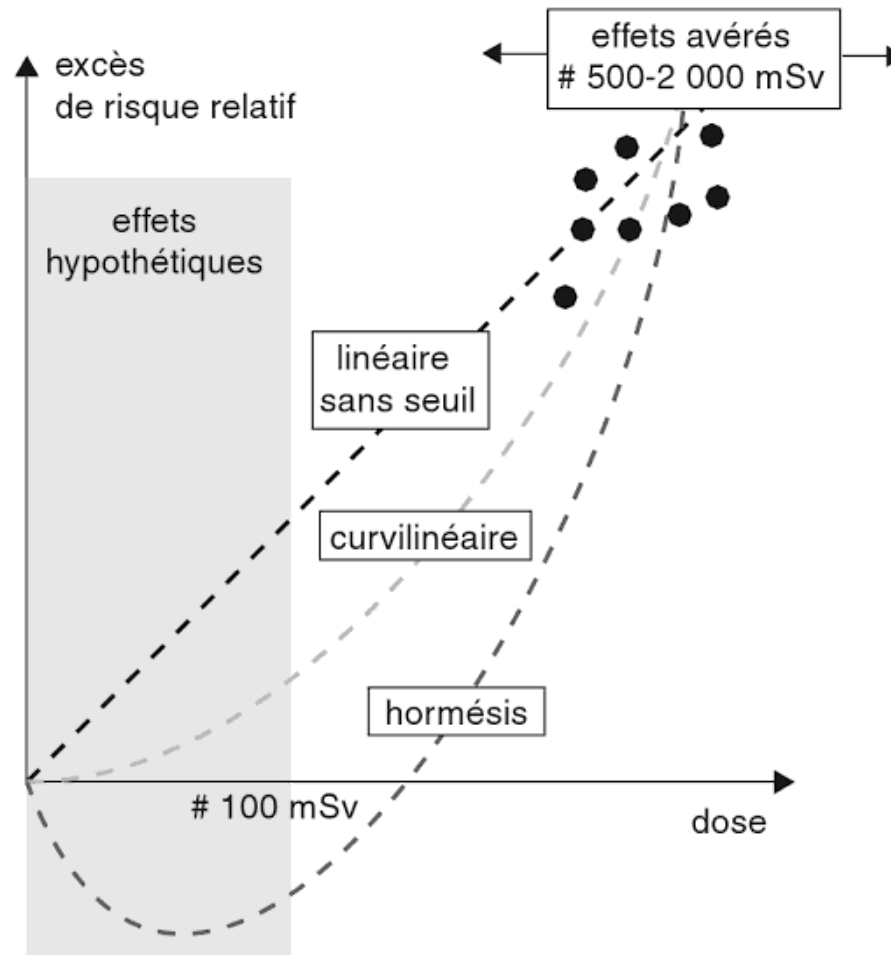
Les effets stochastiques sont tardifs. Leur gravité est indépendante de la dose reçue. Les cellules du tissu irradié peuvent subir une mutation, létale ou non létale. La mutation non létale peut provoquer des cancers (avec une période de latence qui peut être longue : de l'ordre de 2 à 10 ans) ou des anomalies génétiques. Les effets stochastiques ne se manifestent que chez certains individus, apparemment au hasard, avec une probabilité qui augmente avec la dose reçue.

Probabilité d'apparition des effets stochastiques



Pour une dose inférieure à 100 mSv, les effets des rayonnements sont hypothétiques (on ne sait s'ils sont nuls, négligeables ou indiscernables des autres causes).

Dosimétrie : radiobiologie



Estimation des risques des faibles doses

Selon le modèle retenu, l'excès des risque relatif des faibles doses est très différent.

Source : Aurengo, Petitclerc, Kas, *Biophysique*, Flammarion, 2013.

Dosimétrie : irradiations naturelle et artificielle

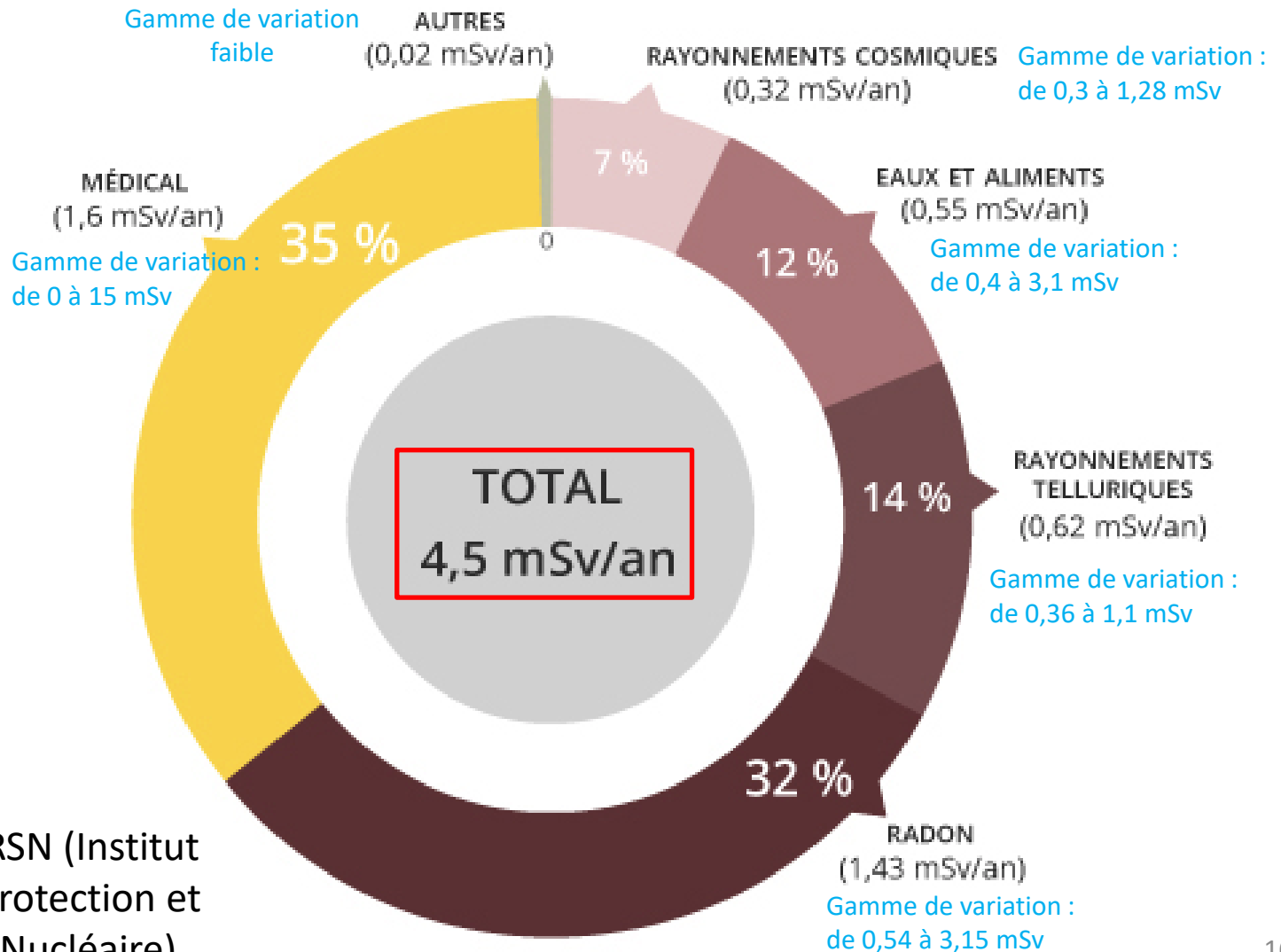
Quelle est la dose annuelle moyenne de radioactivité reçue en France ?

Un Français reçoit au total une dose annuelle moyenne **de l'ordre de 4,5 mSv**. Cette dose est due à l'exposition à la radioactivité naturelle (radon, rayonnements telluriques, rayonnements cosmiques), à l'exposition médicale et à l'exposition aux radionucléides artificiels.

Cette valeur, qui dépend de l'emplacement géographique et du mode de vie, est à considérer comme un indicateur macroscopique – à l'échelle de la France entière – et n'est pas applicable à un groupe de personnes en particulier.

Dosimétrie : irradiations naturelle et artificielle

Exposition moyenne de la population aux rayonnements ionisants Bilan IRSN 2015



Source : IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire)

Dosimétrie : irradiations naturelle et artificielle

Sources d'irradiation naturelles

Rayonnements cosmiques : protons, α , noyaux lourds (Fe, Ni), γ provenant de l'espace.

Eaux et aliments : Tous les aliments sont légèrement radioactifs, car contenant des éléments comme le carbone 14 ou le potassium 40, isotopes inséparables du carbone et potassium naturels.

Carbone 14 : les neutrons cosmiques réagissent avec l'azote de l'air pour former du carbone 14, qui réagit avec l'oxygène pour former du dioxyde de carbone radioactif de manière constante dans le temps. Ce gaz circule dans l'atmosphère, les océans, mais aussi dans la biosphère : il est absorbé par les plantes et les organismes marins.

Le rapport $^{14}\text{C}/\text{C}_{\text{total}}$ dans l'atmosphère, la biosphère et les organismes est uniforme du fait des échanges entre ces milieux.

À la mort d'un organisme, tout échange avec le milieu extérieur cesse et la quantité de carbone 14 se met à décroître exponentiellement (décroissance radioactive), ce qui permet de savoir depuis combien de temps l'organisme est mort.

Rayonnements telluriques : Radionucléides naturels présents dans le sol : uranium, thorium, actinium, potassium 40.

Radon : La filiation du l'uranium 238 donne naissance au radon (^{222}Rn), qui constitue la principale source d'exposition naturelle à la radioactivité à cause de son état gazeux. Son inhalation peut être nocive à cause de l'émission d'un rayonnement alpha. La quantité de radon est très variable suivant les régions, et est plus présent dans les régions granitiques (massif central, Corse).

Autres : Les centrales nucléaires de production d'électricité et les usines de retraitement des déchets qui génèrent ou gèrent des éléments radioactifs relâchent dans l'environnement des rayonnements radioactifs. Les doses de rayonnement sont très faibles.

Dosimétrie : radioprotection

Les normes réglementaires

Au niveau européen, les normes légales donnent :

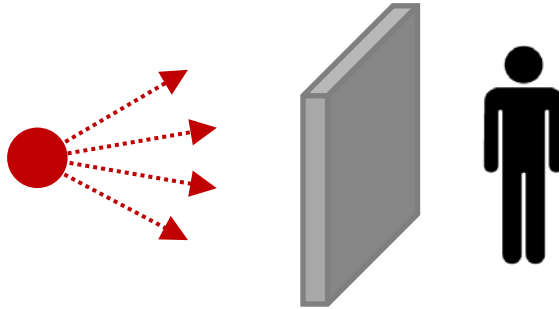
- une **limite de dose efficace de 1 mSv/an pour la population (en dehors de la radioactivité naturelle et des doses reçues en médecine) ;**
- une **limite de dose efficace de 20 mSv/an pour les populations directement affectées aux travaux sous rayonnements ionisants** (radiologie médicale, médecine nucléaire, radiothérapie).
- L'incertitude sur l'incidence des faibles doses est ignorée par les textes législatifs qui fixent les doses d'exposition légales dans un souci de risque zéro et pour appliquer le principe de précaution. Par ailleurs, ces modèles sont très simplifiés et négligent des facteurs aussi cruciaux que le débit de dose, l'âge et l'hérédité des personnes qui subissent l'exposition. Les normes de radioprotection ne tiennent pas compte d'une réaction différente des individus à des doses identiques.

Dosimétrie : radioprotection

Règles de base

La protection contre l'exposition externe repose sur 3 facteurs : l'utilisation d'écran de protection, le temps et la distance.

Écran



- α , γ : matériaux lourds (plomb, acier, béton, etc.)
- β : matériaux légers (verre, plexiglas, etc.)

Distance



- S'éloigner de la source
- Utiliser des pinces

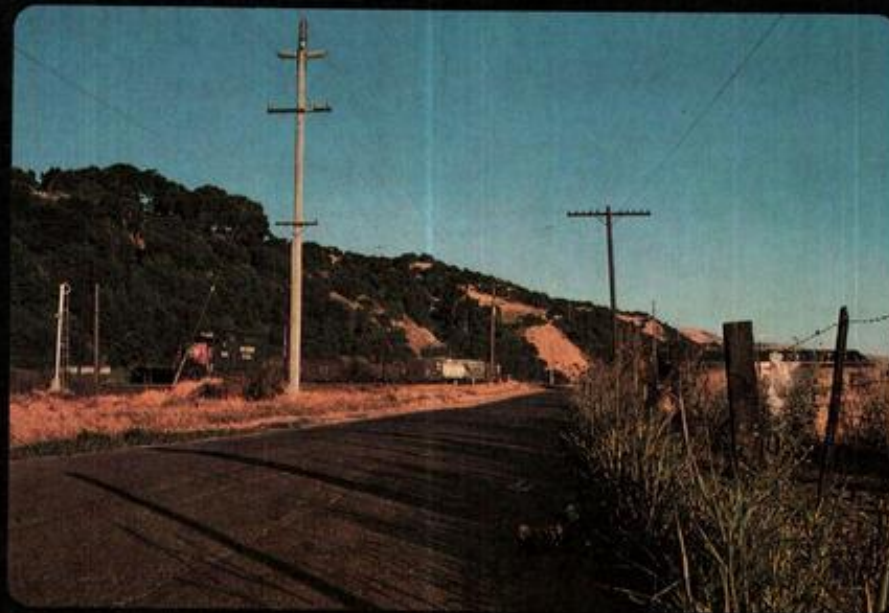
Temps



- Réduire le temps d'exposition
- Optimiser la gestuelle
- Pas d'improvisation !



Stay hungry. Stay foolish.



ISBN 0 14 003950 3

Source :
The Whole Earth Catalog
Stewart Brandt
1974

À écouter :
Steve Jobs Stanford
Commencement
Speech 2005