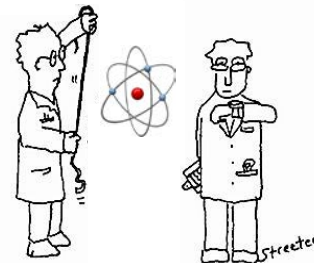


Institut de radiophysique
**Dosimétrie et
grandeurs
d'appréciation**

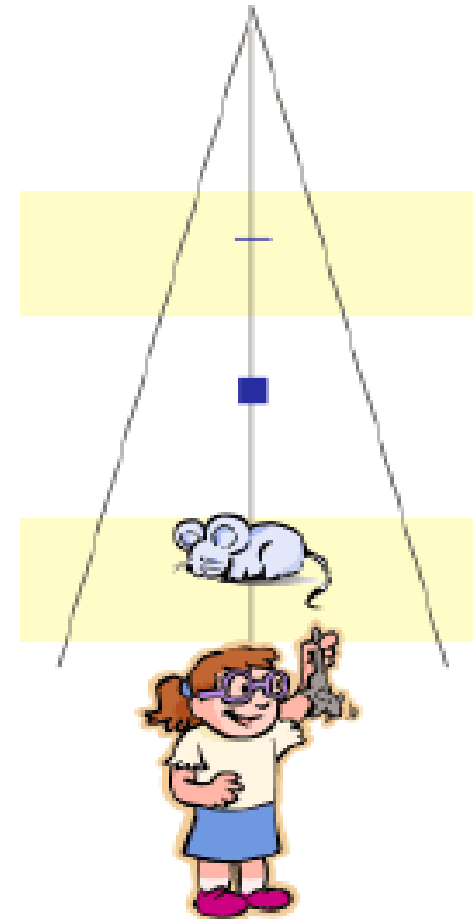


Claude Bailat



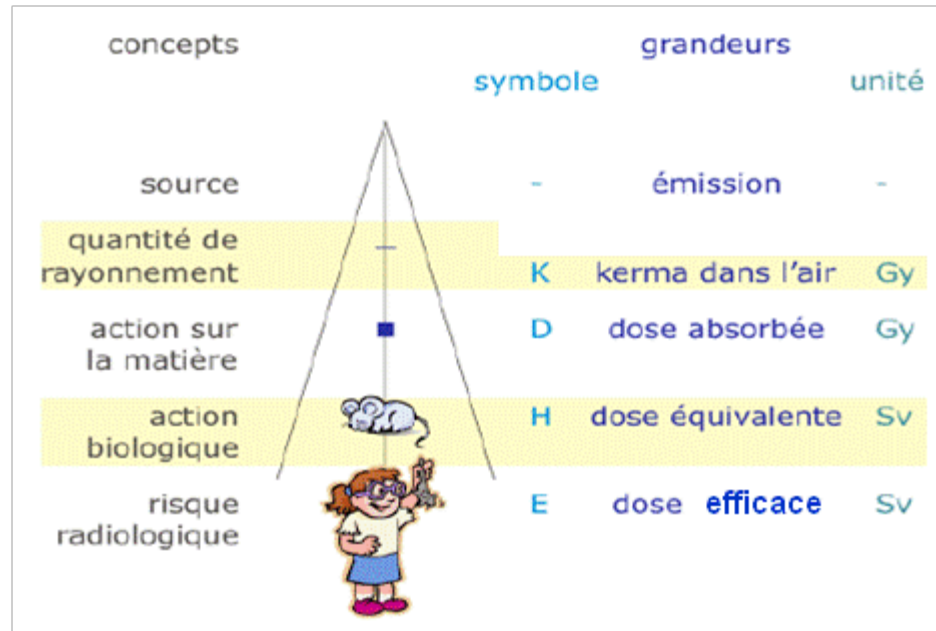
Introduction

- Radioactivité
- Sources de radiation
- Interaction des particules chargées avec la matière
- Interaction des photons avec la matière
- Dosimétrie et grandeurs d'appréciation
- Mesure des radiations



Objectifs du cours de ce chapitre

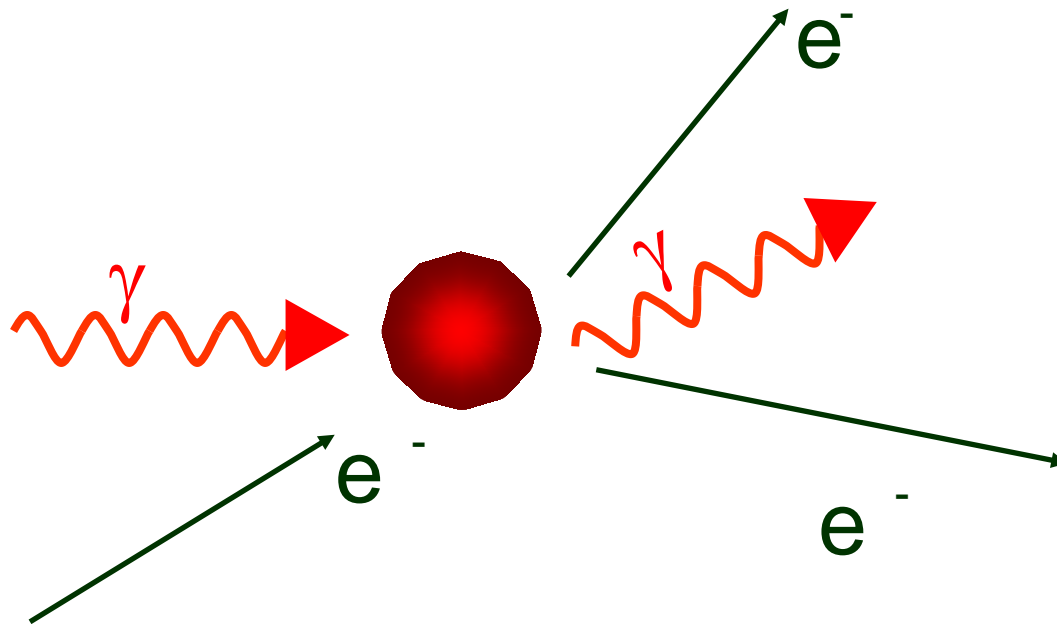
- *Expliquer le concept de dose efficace.*
- *Différencier les grandeurs dosimétriques : dose absorbée, équivalent de dose et dose efficace.*



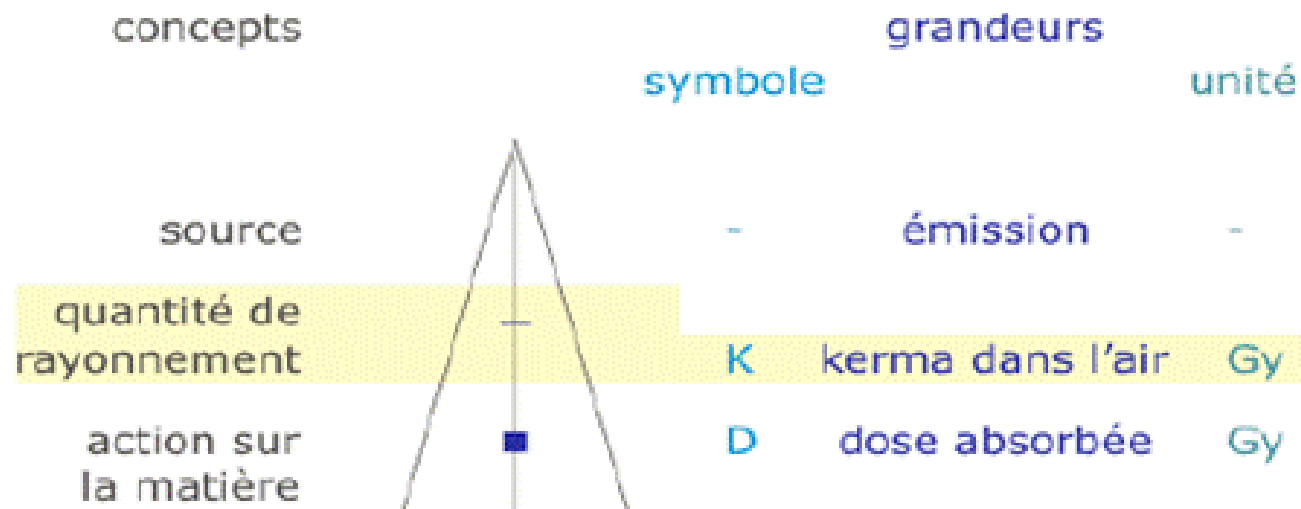
- *Appliquer les grandeurs d'appréciations de l'ORap pour estimer l'équivalent de dose ambiante à proximité d'une source radioactive et la dose efficace engagée.*

Dosimetrie

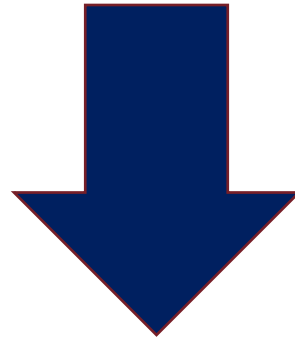
- Dose \leftrightarrow énergie



Résumé des grandeurs dosimétriques



Transfert d'énergie aux particules
secondaires (K, C, X)

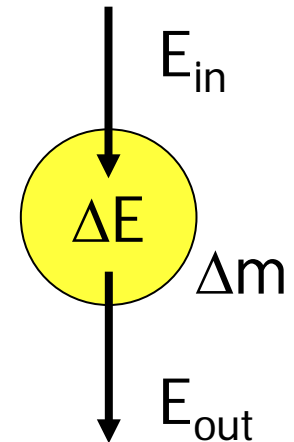


Dépôt d'énergie (D)

Dose absorbée

- Quantité d'énergie déposée localement par unité de masse de matière Δm

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} \quad [J \cdot kg^{-1}] = [Gy]$$



- Peut se définir pour n'importe quel type de rayonnement

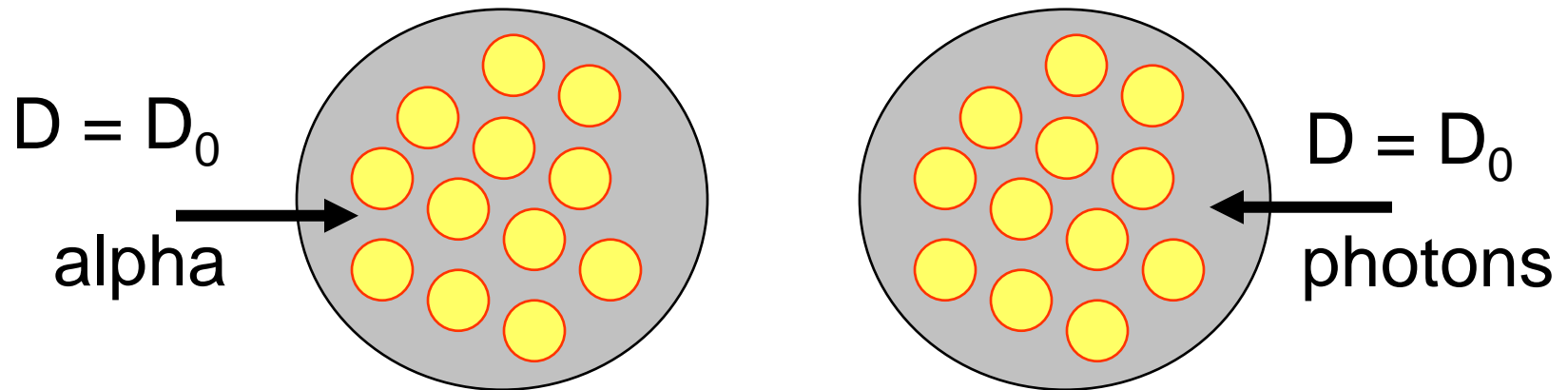
Et au niveau biologique ?

- Dose.... Énergie..... Blablabla.....

?

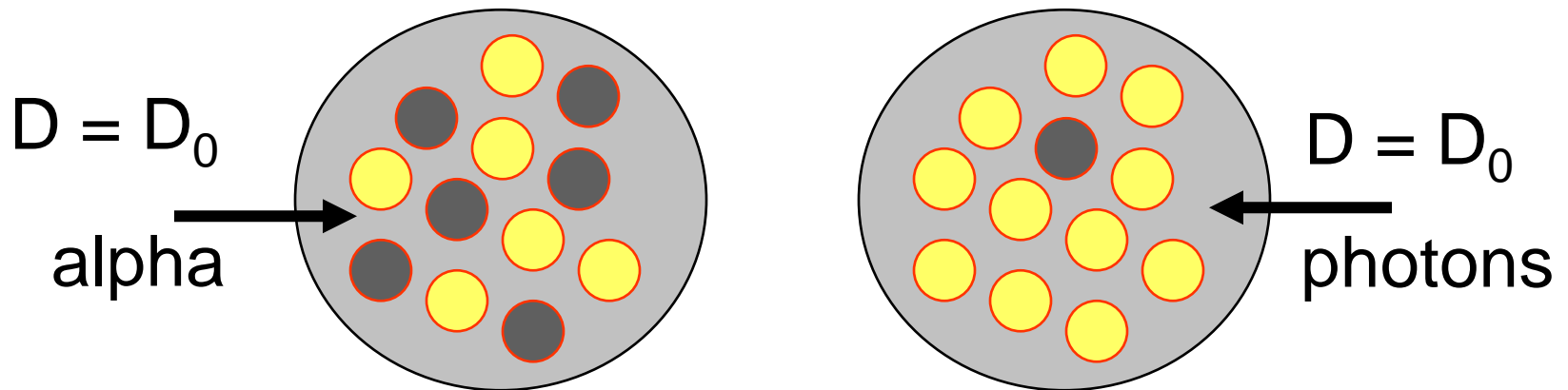
Et au niveau biologique ?

- La dose absorbée et le risque biologique ?



Et au niveau biologique ?

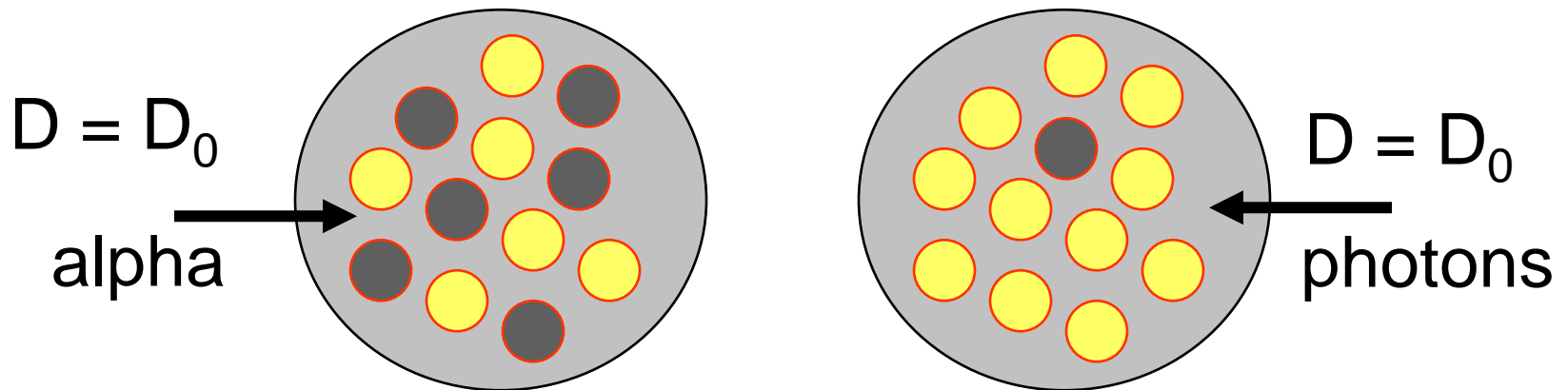
- La dose absorbée n'est pas toujours directement liée au risque biologique



Pas les mêmes effets biologiques

Et au niveau biologique ?

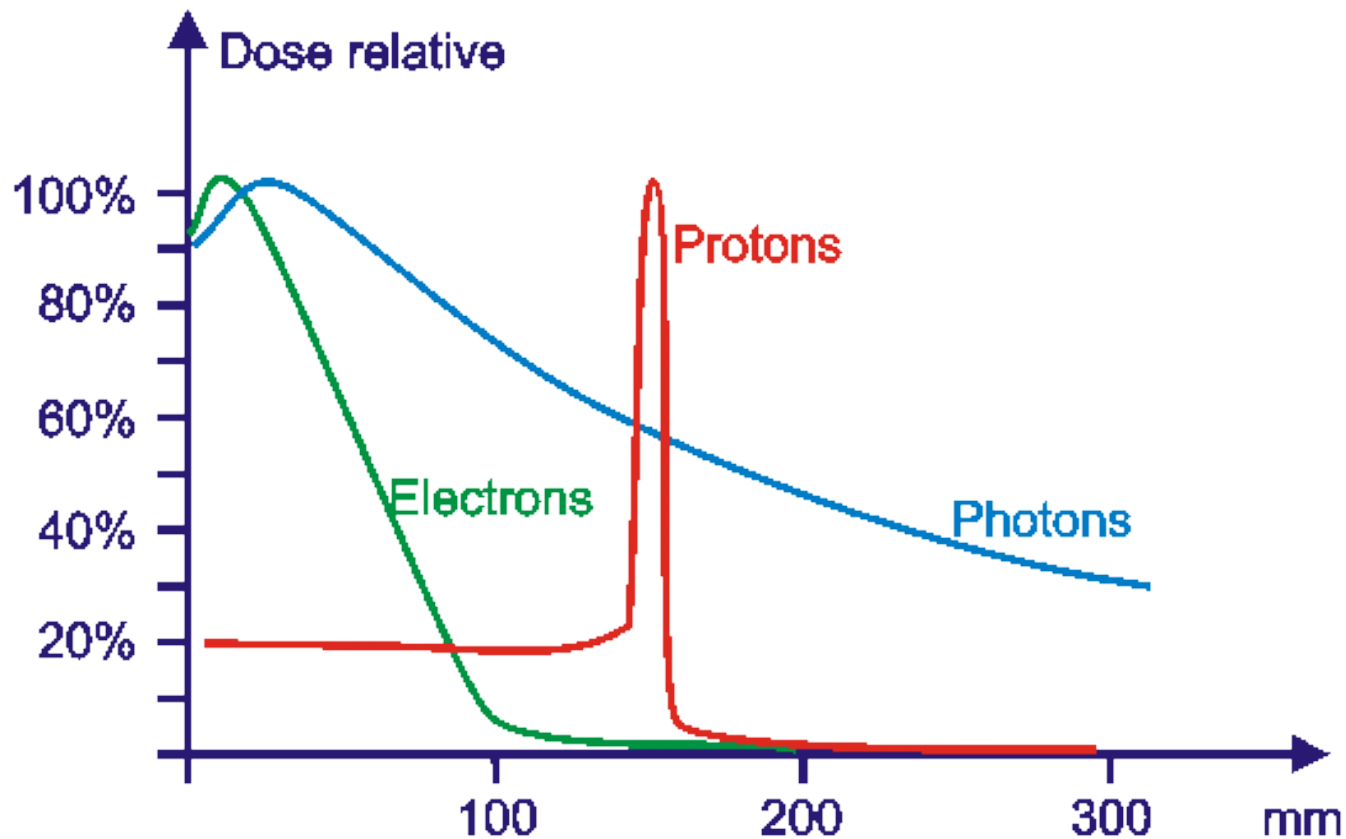
- La dose absorbée n'est pas toujours directement liée au risque biologique



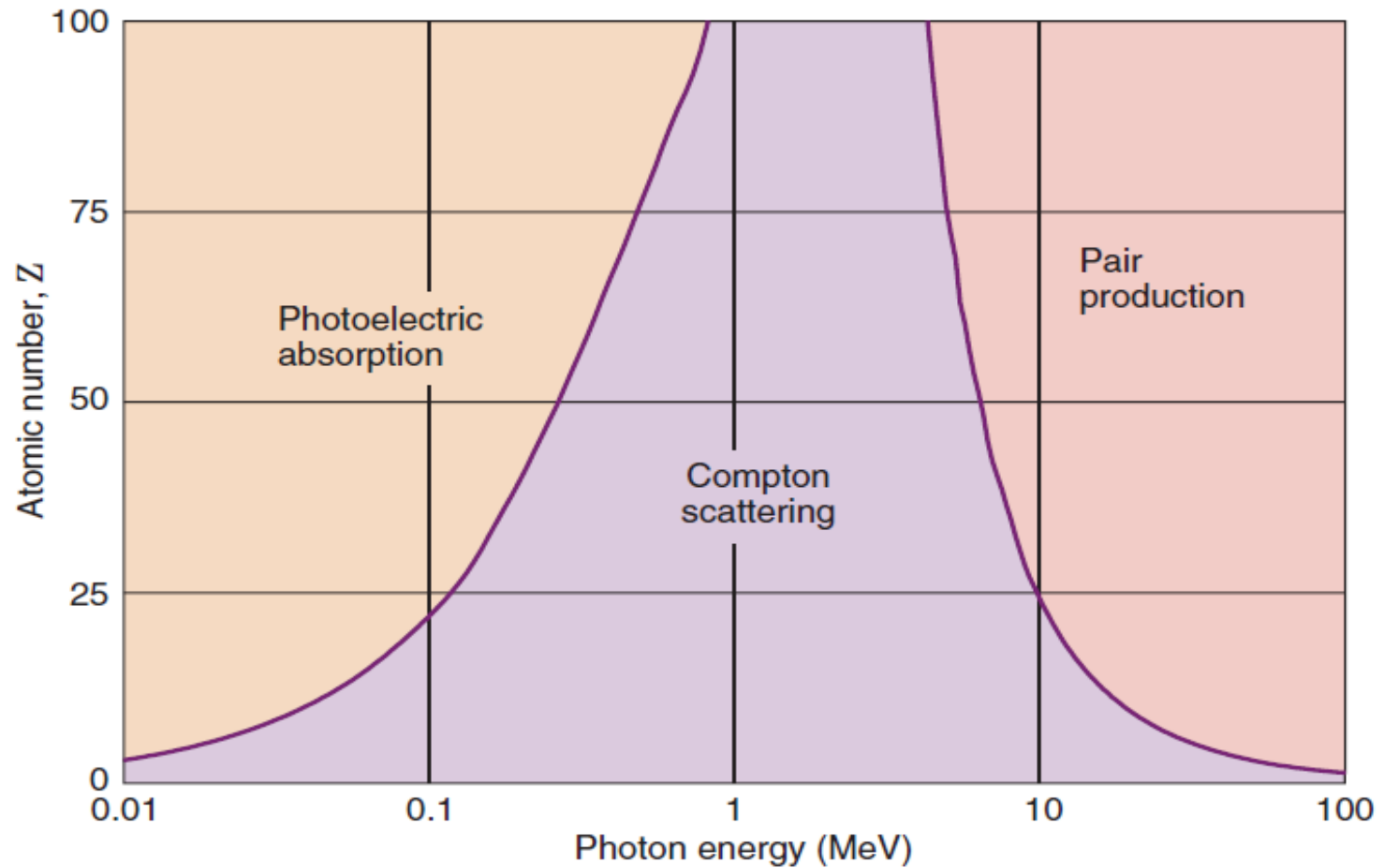
Pas les mêmes effets biologiques
Quelle est la différence??

Effet du type de radiation

- Dose relative en fonction de la profondeur



Prédominance des interactions photoniques



TEL

- TEL : transfert d'énergie linéique
 - Quantité d'énergie perdue par unité de distance dans la matière par collision
 - En anglais
 - Linear energy transfer (LET)
 - Paramètre quantifiant la perte d'énergie dans la matière, analogue à l'inertie de la matière, une force de frottement.

EBR : efficacité biologique relative

- La dose absorbée n'est pas toujours directement liée au risque biologique \leftrightarrow EBR quantification de l'efficacité
- Effets dépendent de la dose, de son débit et des propriétés du rayonnement (qualité).
- EBR a été utilisé comme facteur de pondération de la dose absorbée, mais depuis 1959, son usage se limite à la radiobiologie.

EBR : définition

- Rapport à effet biologique égal, entre
 - Dose du rayonnement de référence (D_R)
 - Dose du rayonnement en question (D_X)

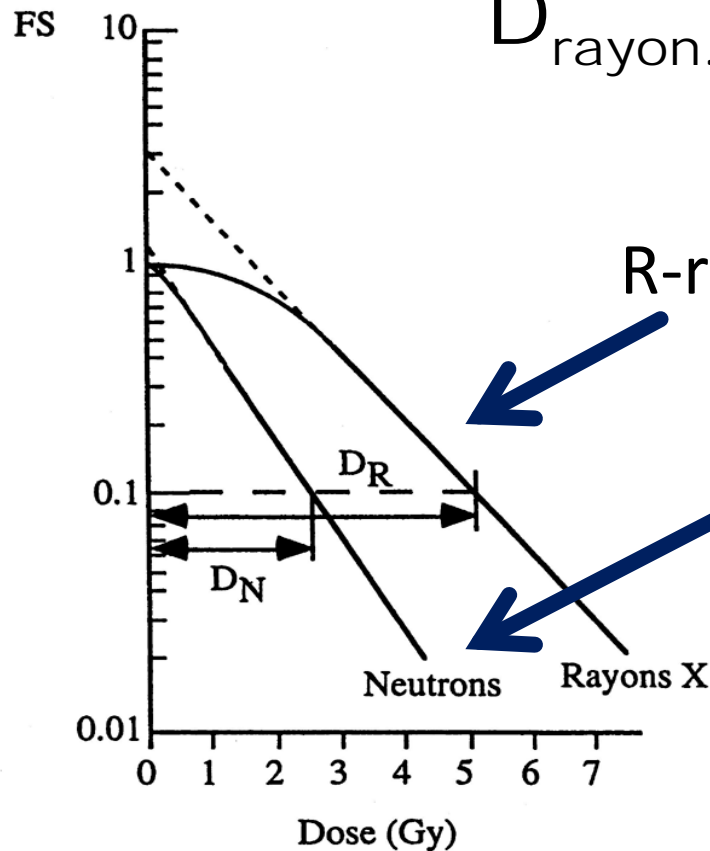
$$EBR = \frac{D_R}{D_X}$$

*Rayonnement de
référence type
(RX de 200 kV)*

EBR : efficacité biol relative

$$EBR = \frac{D_{\text{rayon. réf}}}{D_{\text{rayon. étude}}}$$

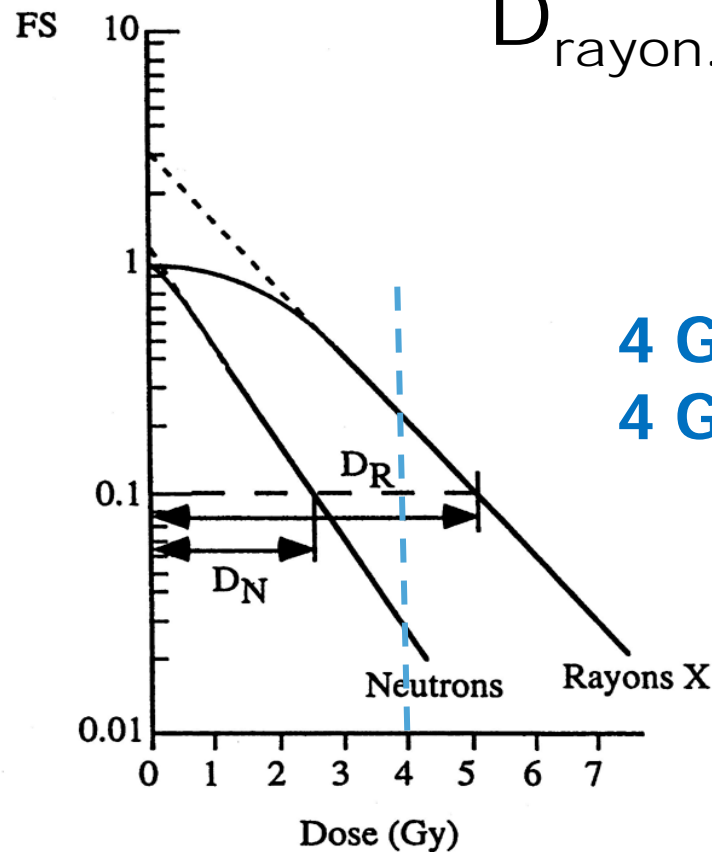
même niveau d'effet



EBR : efficacité biol relative

$$EBR = \frac{D_{\text{rayon. réf}}}{D_{\text{rayon. étude}}}$$

même niveau d'effet



4 Gy n → 0.03 FS
4 Gy X → 0.3 FS

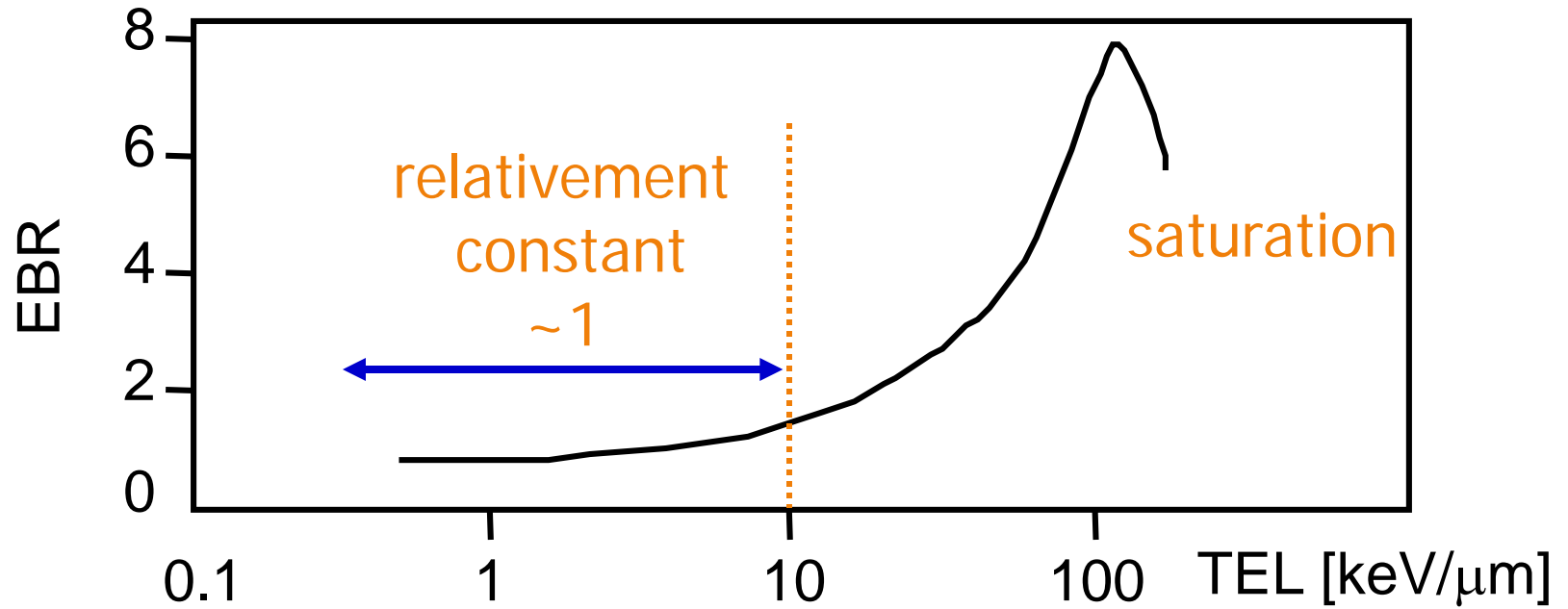
EBR : définition

- Rapport à effet biologique égal, entre
 - Dose du rayonnement de référence (D_R)
 - Dose du rayonnement en question (D_X)

$$EBR = \frac{D_R}{D_X}$$

- Si EBR grand, il faut beaucoup de dose de R pour le même effet qu'avec X → **Radiation agressive**
 - EBR = 2 - 50

EBR / TEL



TEL et effet biologique

- Coupure à environ $10 \text{ keV}/\mu\text{m}$
- Rayonnement de **haut** TEL :
 - Neutrons, alpha, noyaux lourds
- Rayonnement de **faible** TEL :
 - Rayons X, γ , électrons, protons de haute énergie

TEL et effet biologique

- Faible TEL
- Haut TEL

quelle différence pour un organe ?



TEL et effet biologique

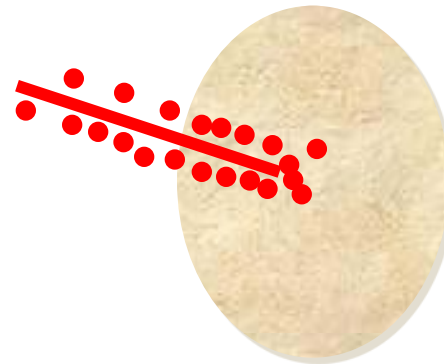
- Faible TEL

- Beaucoup de cellules peu touchées
- Possibilités de réparation
- Effet global peu important (à dose absorbée égale)



- Haut TEL

- Peu de cellules beaucoup touchées
- Moins de possibilités de réparation
- Effet global important (à dose absorbée égale)



Equivalent de dose

- En protection radiologique, il y a de l'intérêt pour une grandeur reflétant les effets biologiques d'une dose absorbée moyennée sur un organe ou un tissu

→ **Equivalent de dose**

Equivalent de dose

Facteur de pondération de la radiation R

$$H = \sum_R w_R D_R \quad [J \cdot kg^{-1}] = [Sv]$$

Radiation R

Dose absorbée délivrée par la radiation R

$$D [Gy] = \frac{\Delta E}{\Delta m}$$

Equivalent de dose

- Facteurs de pondération de la radiation w_R
 - Déterminé en analysant les valeurs d'EBR obtenue expérimentalement (malheureusement souvent in-vitro)
 - Dépend du champ externe à l'organe
 - Forte simplification ! → (H, E) ne peut être utilisé rétrospectivement pour évaluer des risques individuels d'effets stochastiques en rapport avec l'exposition aux rayonnements.
 - Valeurs égales à 1 pour bas TEL.

Equivalent de dose




- Facteurs de pondération de la radiation w_R

Type de rayonnement et domaine d'énergie		w_R
Photons de toute énergie		1
Électrons et muons de toute énergie		1
Neutrons	< 1 MeV	$2,5 + 18,2 e^{-[\ln E]^2 / 6}$
	>1MeV à 50 MeV	$5,0 + 17,0 e^{-[\ln 2E]^2 / 6}$
	> 50 MeV	$2,5 + 3,25 e^{-[\ln 0,04E]^2 / 6}$
Protons et pions chargés		2
Particules α , fragments de fission, noyaux lourds		20

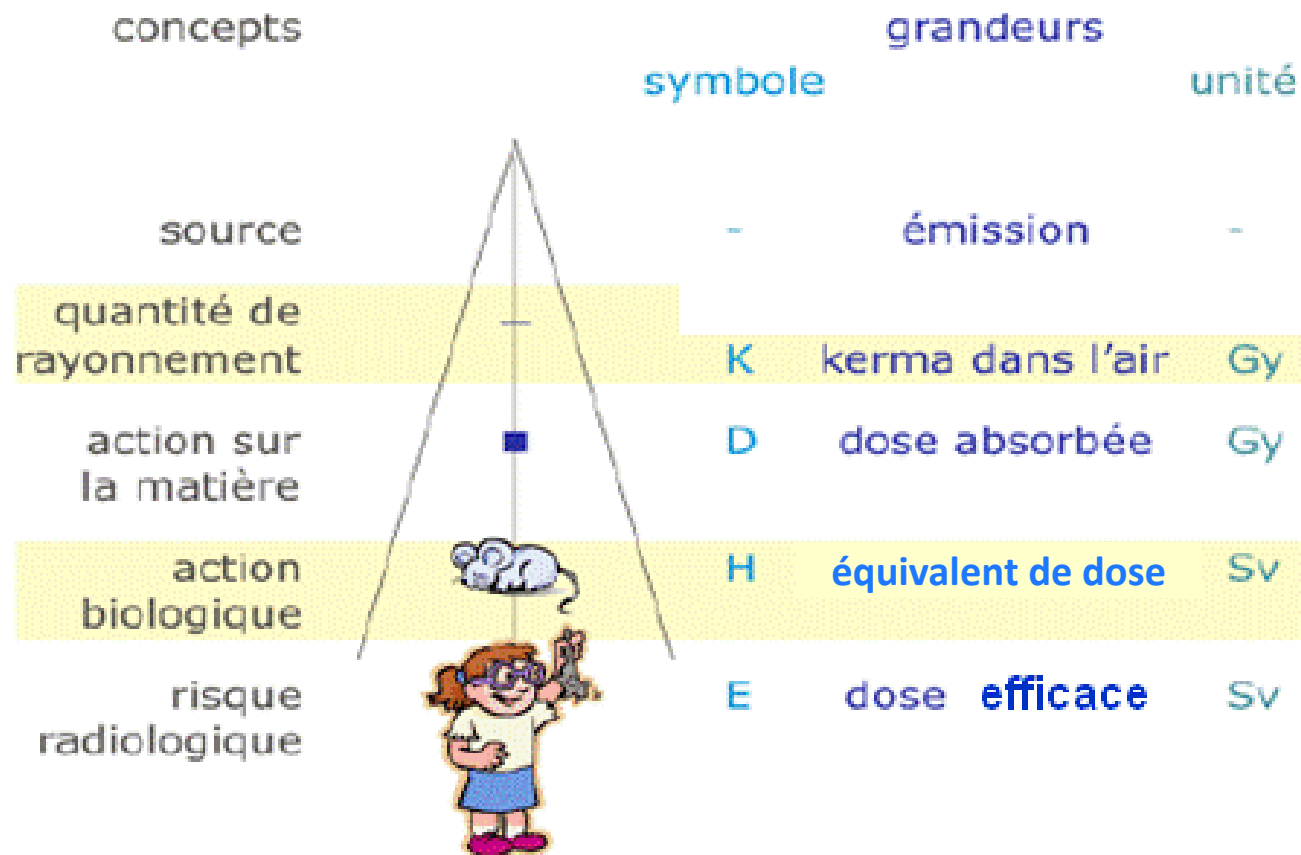
Equivalent de dose

- Unité de la dose absorbée D
 - Gray = [J/kg]
 - Effets physiques pris en compte
- Unité de l'équivalent de dose H
 - Sievert = [J/kg]
 - Effets physiques et biologiques pris en compte

Résumé des grandeurs dosimétriques

concepts		symbole	grandeurs	unité
source		-	émission	-
quantité de rayonnement		K	kerma dans l'air	Gy
action sur la matière		D	dose absorbée	Gy
action biologique		H	équivalent de dose	Sv
risque radiologique		E	dose efficace	Sv

Résumé des grandeurs dosimétriques



Dose efficace

- Permet ainsi de comparer des situations d'irradiation hétérogène qui conduisent à différentes distributions de la dose équivalente dans l'organisme

$$E = \sum_T w_T H_T \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right] = [\text{Sv}]$$

tissus fact. de pondération équivalent de dose

- → limite, radioprotection, ...

Dose efficace

- Normalisée à tout l'organisme

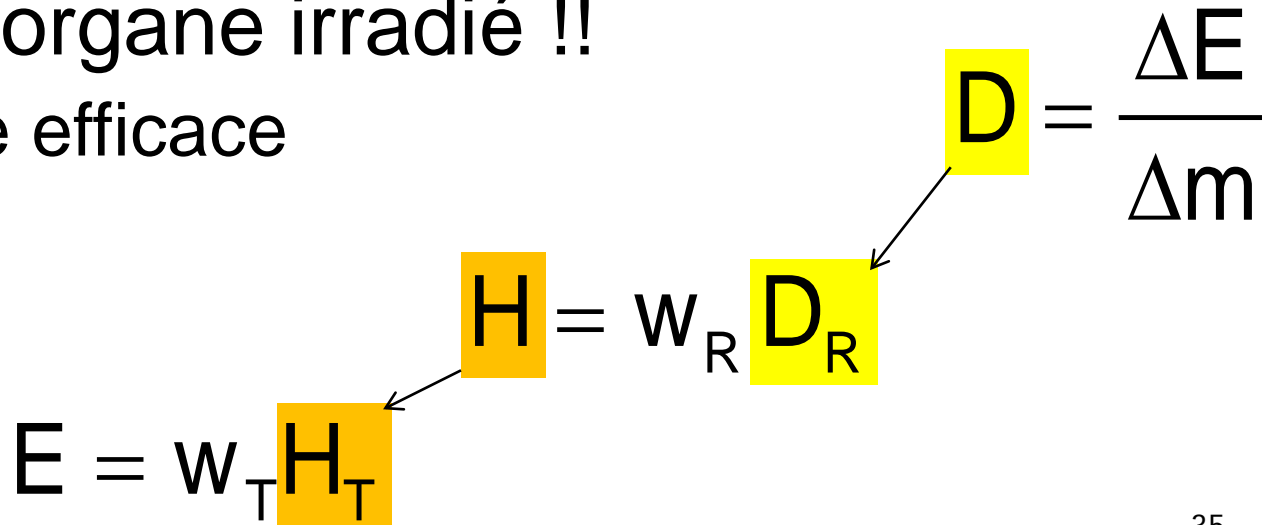
$$E = \sum_T w_T H_T$$

Tissu	w_T	Σw_T
Moelle osseuse (rouge), côlon, poumon, estomac, sein, tissus restants* (w_T nominal appliqué à la dose moyenne de 14 tissus)	0,12	0,72
Gonades	0,08	0,08
Vessie, œsophage, foie, thyroïde	0,04	0,16
Surface de l'os, cerveau, glandes salivaires, peau	0,01	0,04

* Tissus restants (14 au total) : glande surrénale, région extrathoracique (ET), vésicule biliaire, cœur, reins, ganglions lymphatiques, muscle, muqueuse buccale, pancréas, prostate, intestin grêle, rate, thymus, utérus/ col de l'utérus.

Lien entre les doses en pratique

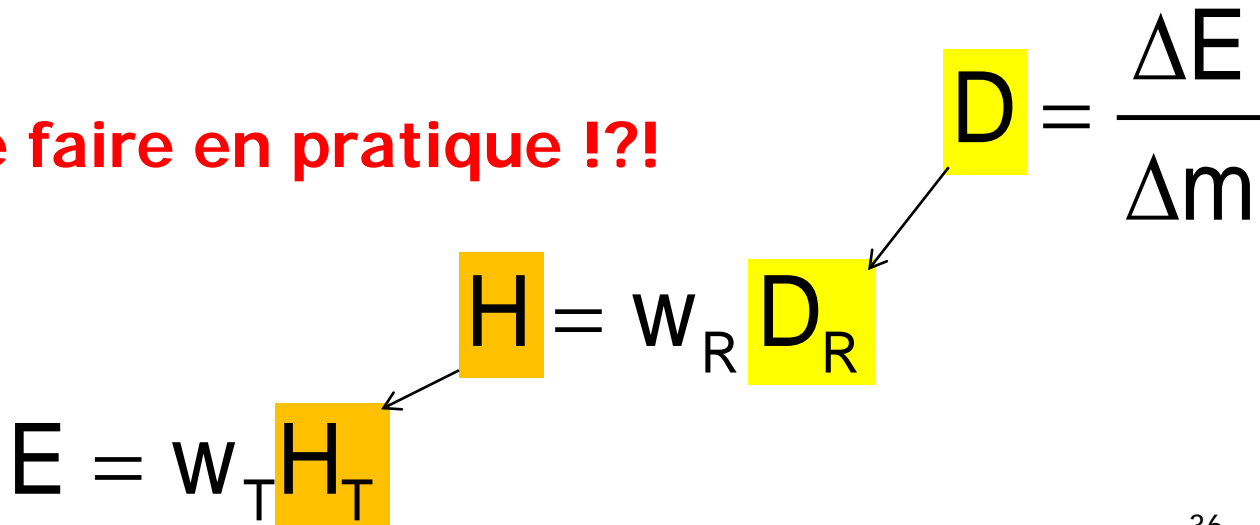
- Prendre en compte l'effet biologique du type de radiation !!
 - Equivalent de dose
- Prendre en compte l'effet biologique du type d'organe irradié !!
 - Dose efficace

$$E = w_T H_T$$
$$H = w_R D_R$$
$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m}$$


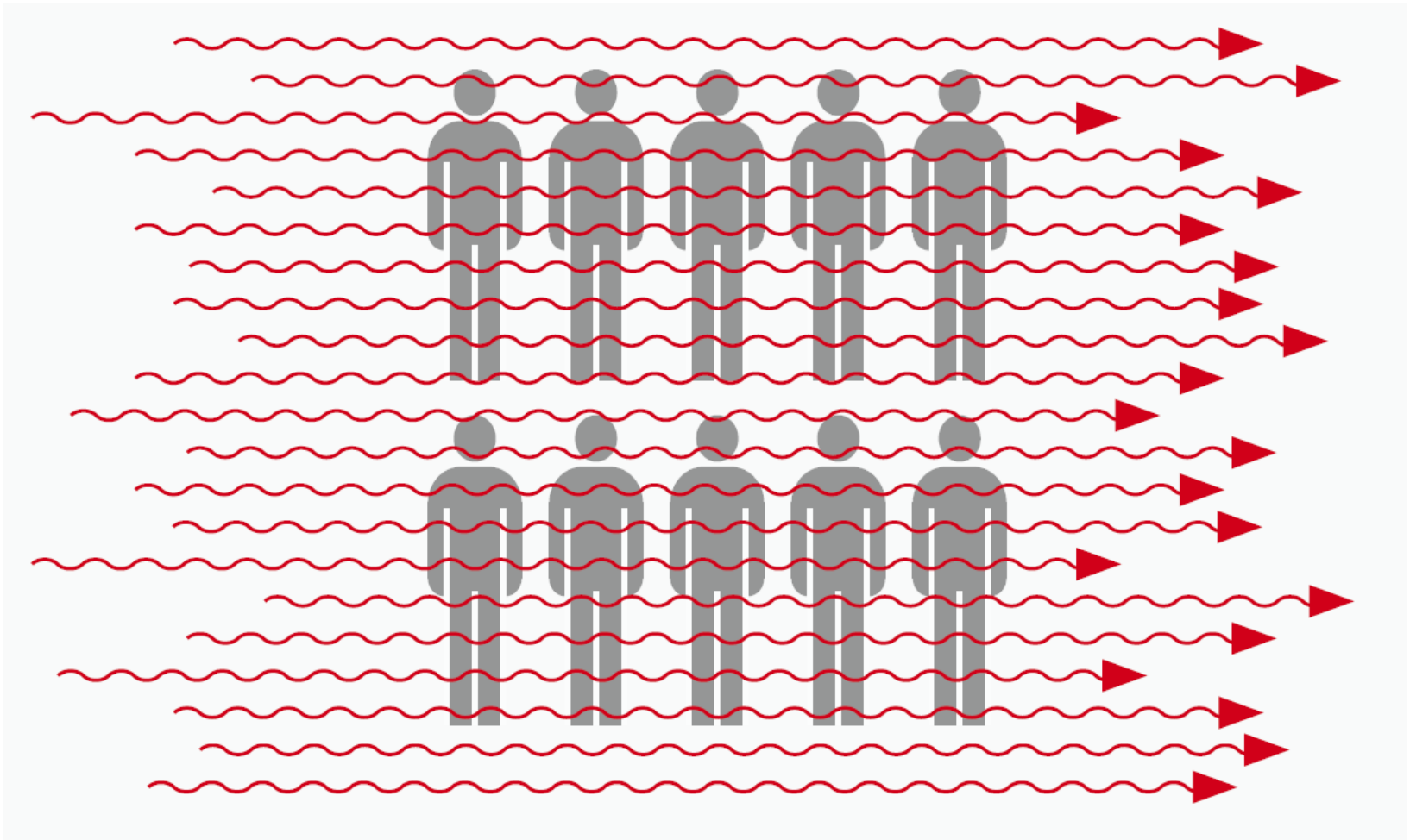
Lien avec la dose pratique

- Cas pratique \leftrightarrow radioprotection opérationnelle
- Pas de possibilité de faire de la poésie !

Que faire en pratique !?!

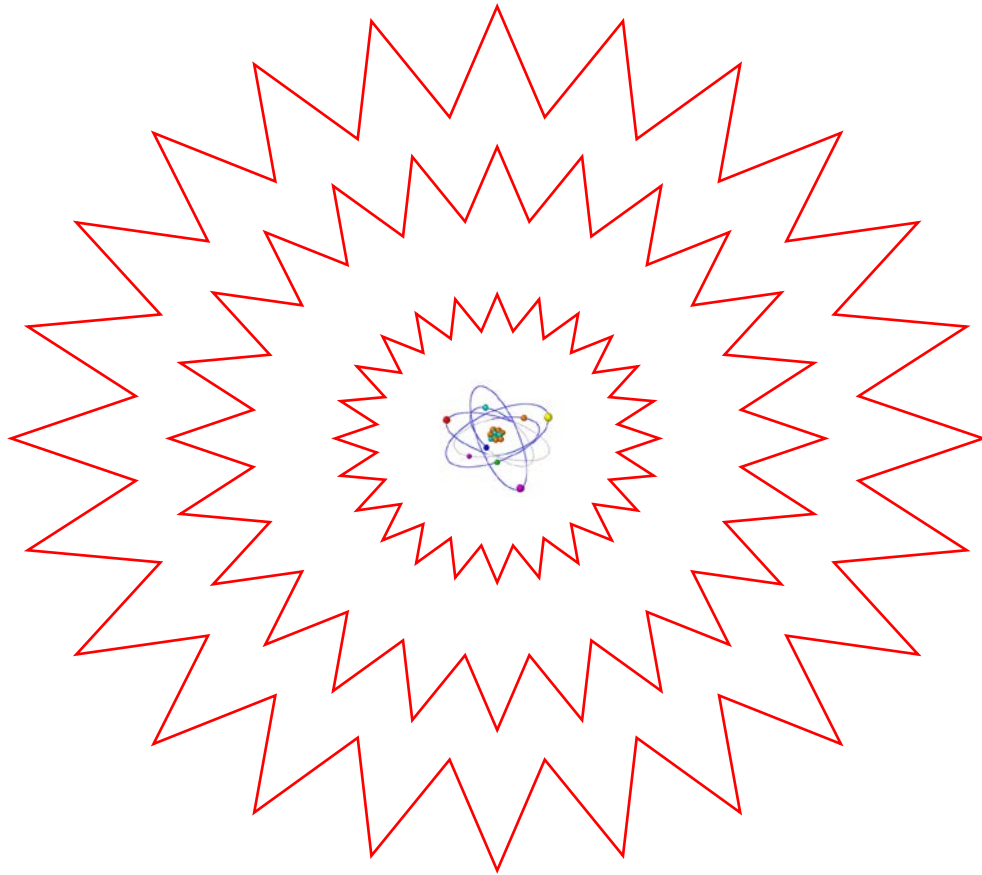
$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m}$$
$$H = w_R D_R$$
$$E = w_T H_T$$


Question: quelles sont les sources d'irradiation?

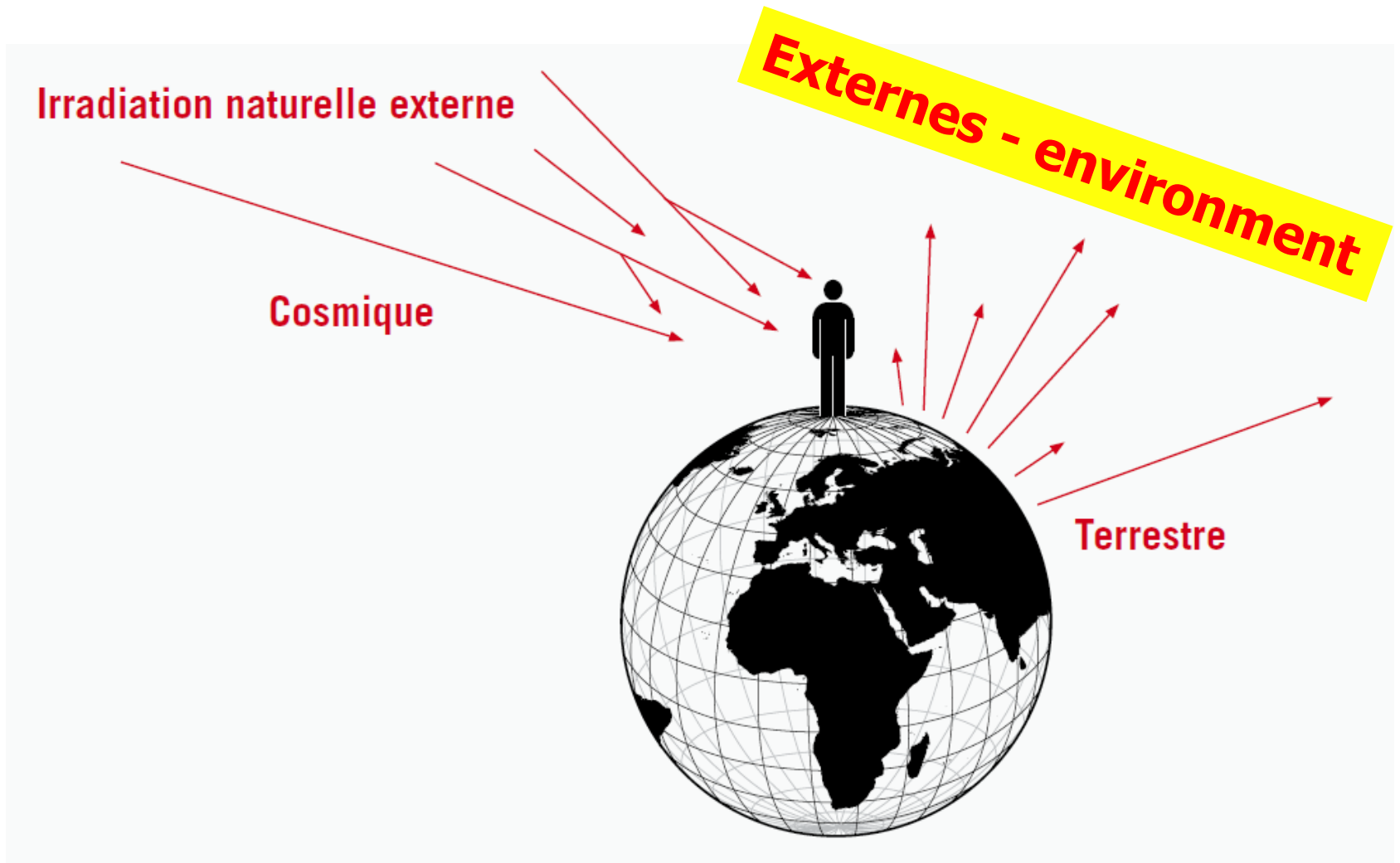


Catégorie d'irradiation ionisante

- Irradiation interne ou externe ?

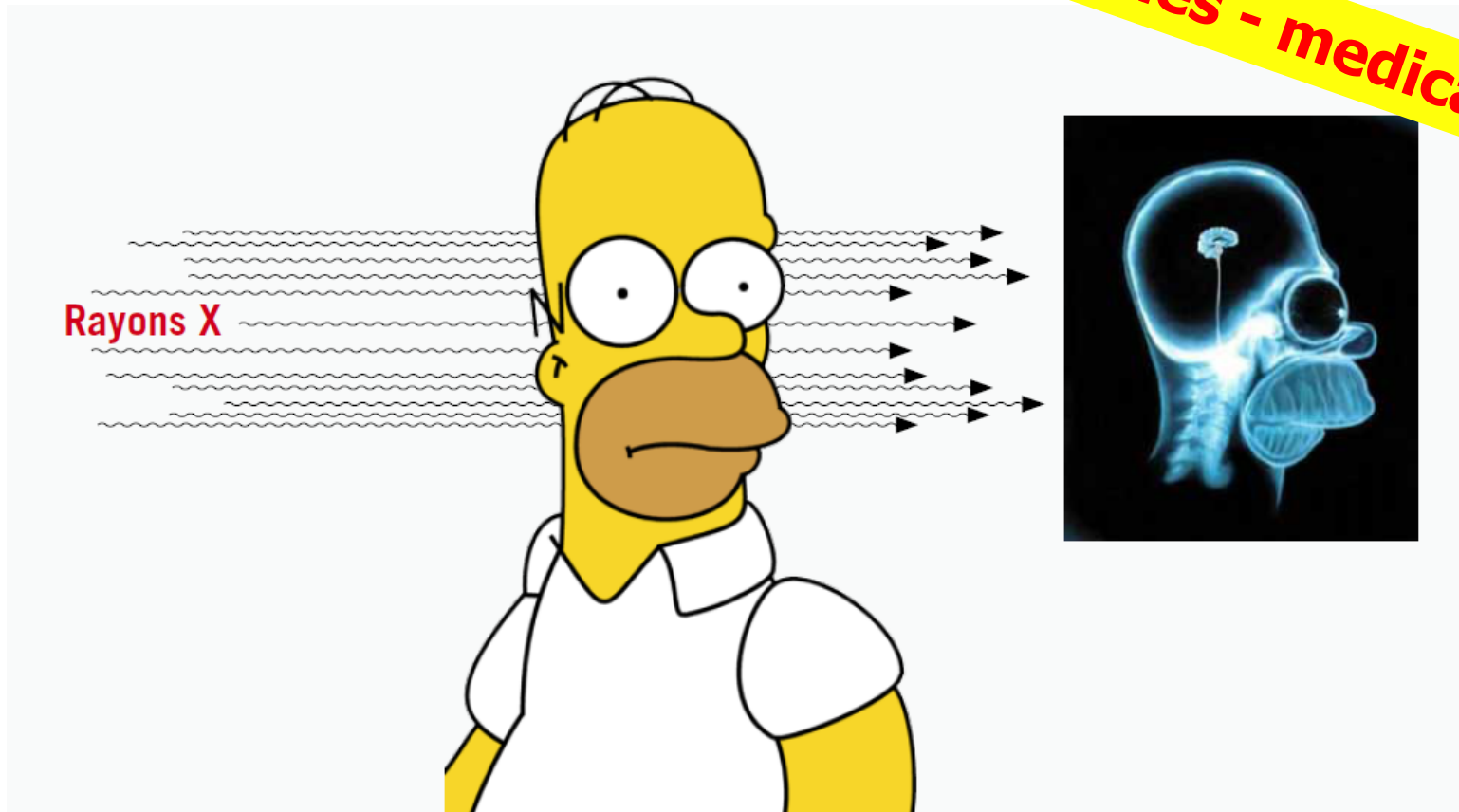


Sources d'irradiation



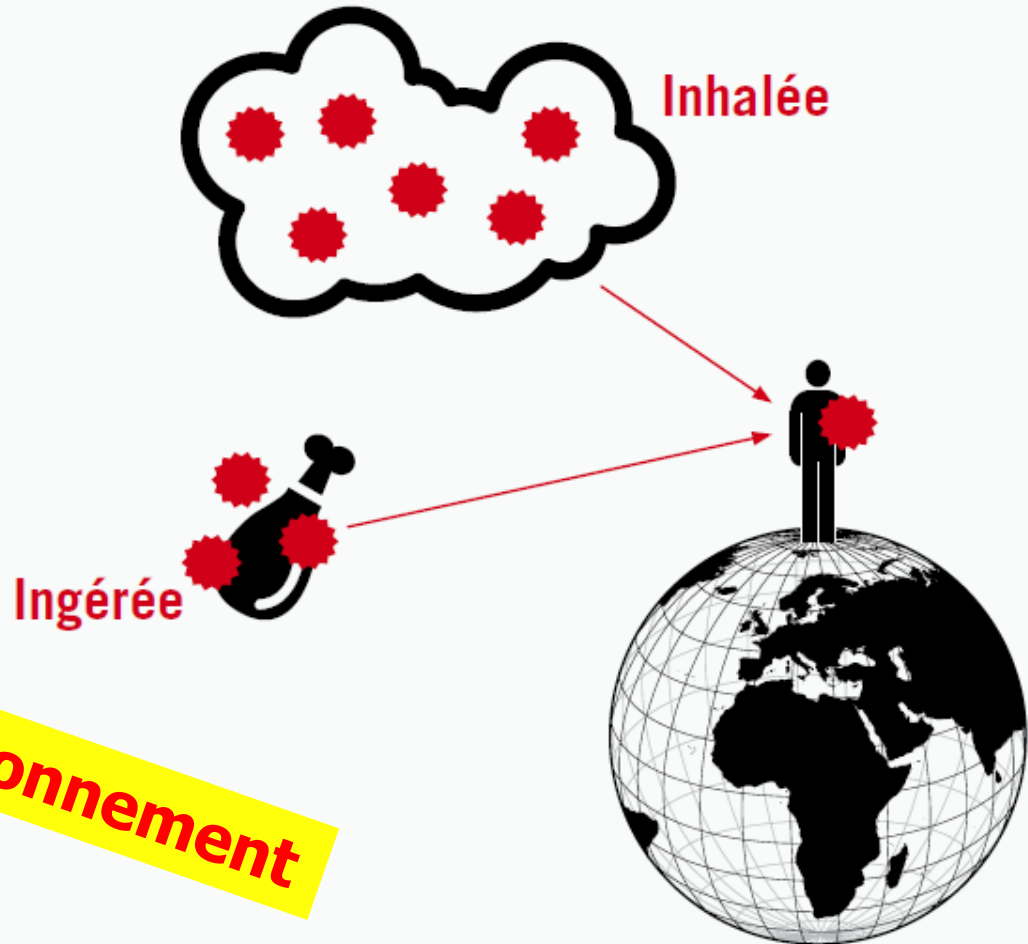
Sources d'irradiation

Externes - medical



Sources d'irradiation

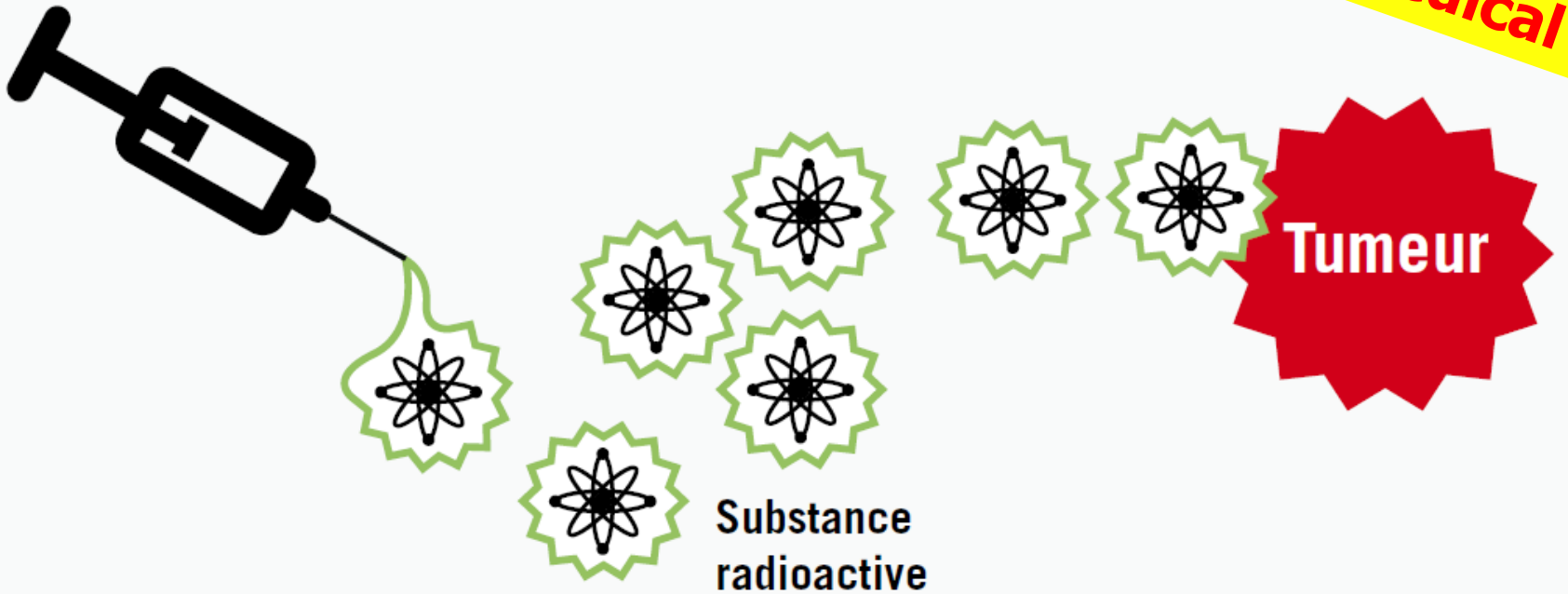
Contamination interne



Sources d'irradiation

Radiothérapie

source de radiation insérée dans l'organisme



Grandeurs dosimétriques

- En pratique → utilisation de grandeurs opérationnelles
 - ICRP 103
 - ICRU 51

Tâche	Grandeur de dose opérationnelle pour	
	La surveillance d'ambiance	La surveillance individuelle
Contrôle de la dose efficace	Équivalent de dose ambiant, $H^*(10)$	Équivalent de dose individuel, $H_p(10)$
Contrôle des doses à la peau, aux mains, aux pieds et au cristallin	Équivalent de dose directionnel, $H'(0,07, \Omega)$	Équivalent de dose individuel, $H_p(0,07)$

Tableau B.5. Application des grandeurs de dose opérationnelles pour la surveillance des expositions externes.

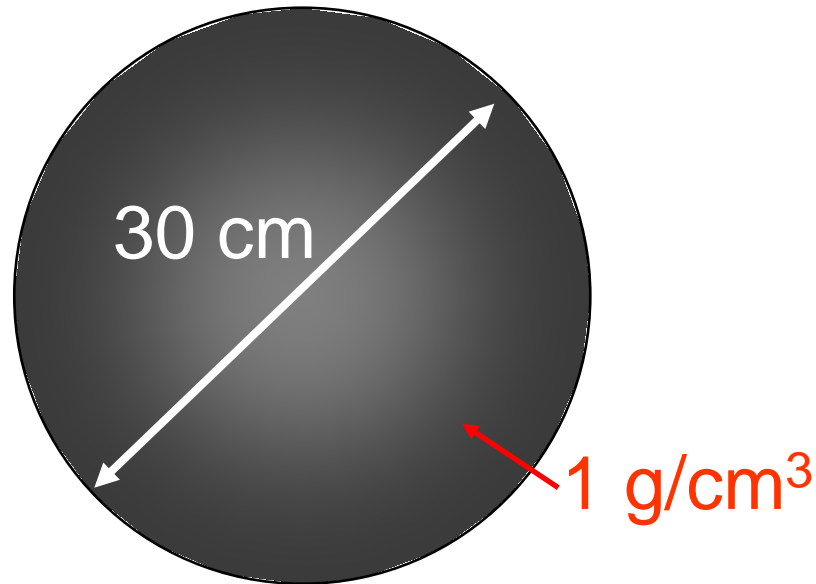
Grandeurs opérationnelles

- Radioprotection
 - Estimer le danger pour l'être humain
- Situation réelle très complexe
 - Simplifications
 - Par ex. : L'être humain est simplifié... équivalent à une sphère
 - On s'intéresse à des doses "simples"
 - Dose en surface
 - Dose en profondeur
 - Dose efficace à tout l'organisme

Spère ICRU

- Modélisation simple d'un humain lorsqu'on ne sait rien

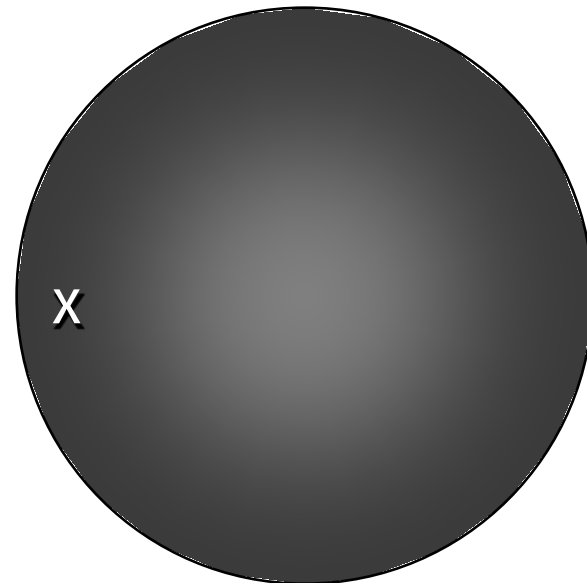
- 76.2% O
- 11.1% C
- 10.1% H
- 2.60% N



Dosimétrie d'ambiance

- $H^*(10)$
 - Équivalent de dose ambient
 - Représentatif de la dose délivrée à un organe en profondeur

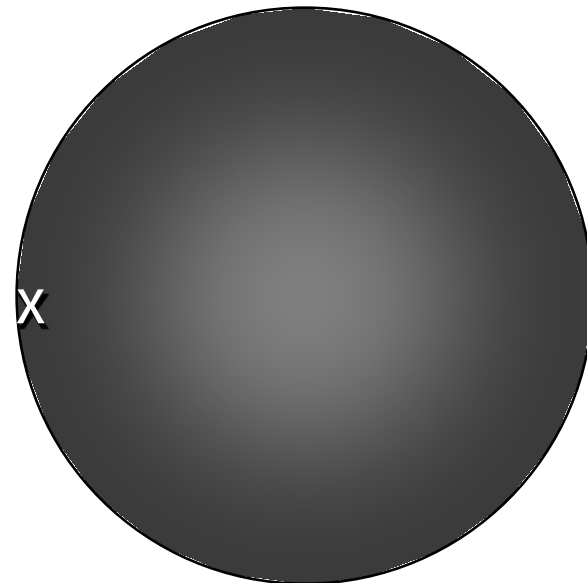
Équivalent de dose à
10 mm de profondeur



Dosimétrie d'ambiance

- $H'(0.07)$
 - Équivalent de dose directionnel
 - Représentatif de la dose délivrée à la peau

Équivalent de dose à
0.07 mm de profondeur



Estimation de H via ORap

$$\dot{H}^*(10) = A \cdot h_{10} \cdot \frac{1}{r^2}$$

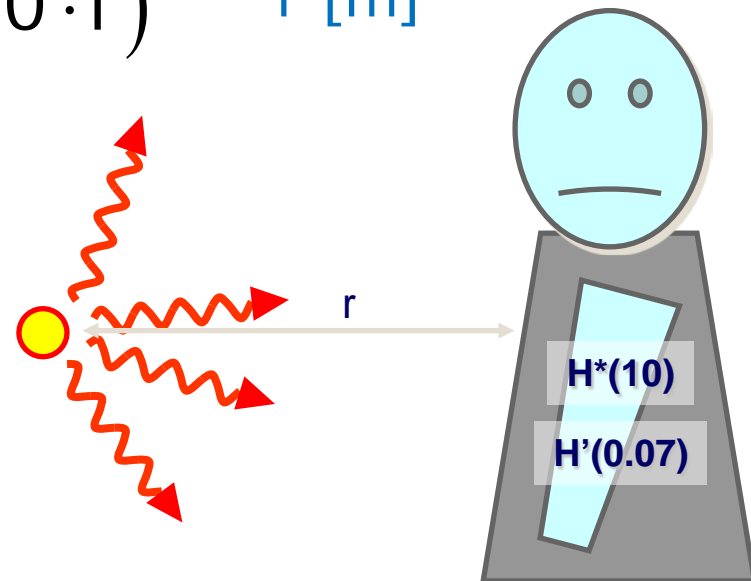
\dot{H} [mSv/h]

A [GBq]

$$\dot{H}'(0.07) = A \cdot h_{0.07} \cdot \frac{1}{(10 \cdot r)^2}$$

r [m]

h : index de dose



Estimation de H via ORap

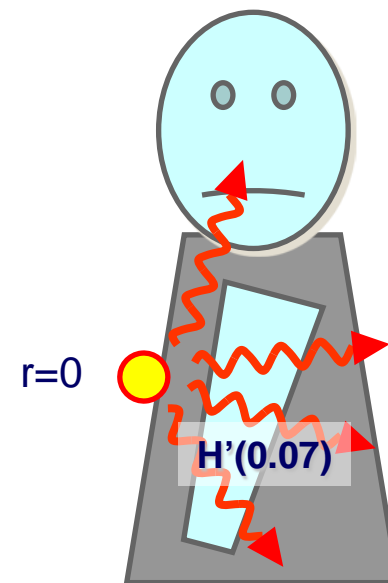
- Au contact :

$$\dot{H}'(0.07) = A_S \cdot h_{c0.07}$$

\dot{H} [mSv/h]

A_S [kBq/cm²]

h : index de dose



Index de dose de l'ORaP

Radioprotection - O

Nucléide	Période	Type de désintégration/ de rayonnement	e_{inh} Sv/Bq	e_{ing} Sv/Bq	Grandeurs d'appréciation			Limite d'exemption LE Bq/kg ou LE_{abs} Bq
					h_{10} (mSv/h)/GBq à 1 m de distance	$h_{0,07}$ (mSv/h)/GBq à 10 cm de distance	$h_{c0,07}$ (mSv/h)/ (kBq/cm ²)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Co-57	270.9 d	ϵ, γ	6.0 E-10	2.1 E-10	0.021	100	0.1	5 E+04
Co-58	70.80 d	$\epsilon, \beta^+, \gamma$	1.7 E-09	7.4 E-10	0.147	300	0.3	1 E+04
Co-58m	9.15 h	γ	1.7 E-11	2.4 E-11	<0.001	10	<0.1	4 E+05
Co-60	5.271 a	β^-, γ	1.7 E-08	3.4 E-09	0.366	1000	1.1	1 E+03 ⁶⁶
Co-60m	10.47 m	β^-, γ	1.2 E-12	1.7 E-12	0.001	20	<0.1	6 E+06
Co-61	1.65 h	β^-, γ	7.5 E-11	7.4 E-11	0.017	1000	1.6	1 E+05
Co-62m	13.91 m	β^-, γ	3.7 E-11	4.7 E-11	0.436	1000	1.8	2 E+05
Ni-56	6.10 d	ϵ, γ	9.6 E-10	8.6 E-10	0.260	60	0.1	1 E+04
Ni-57	36.08 h	$\epsilon, \beta^+, \gamma$	7.6 E-10	8.7 E-10	0.278	700	0.8	1 E+04

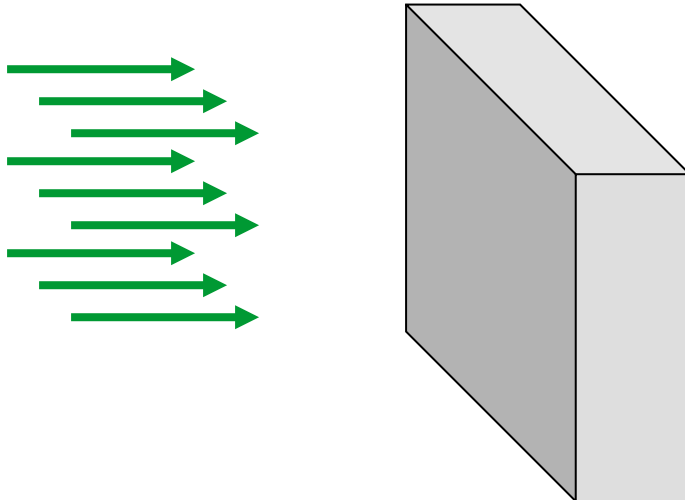
$$H^*(10) = \dot{h}(10) \frac{A \cdot t}{r^2}$$

$$H'(0.07) = \dot{h}'(0.07) \frac{A \cdot t}{(10 \times r)^2}$$

$$\dot{H}'(0.07) = \dot{h}_c(0.07) A_s$$

Dosimétrie individuelle

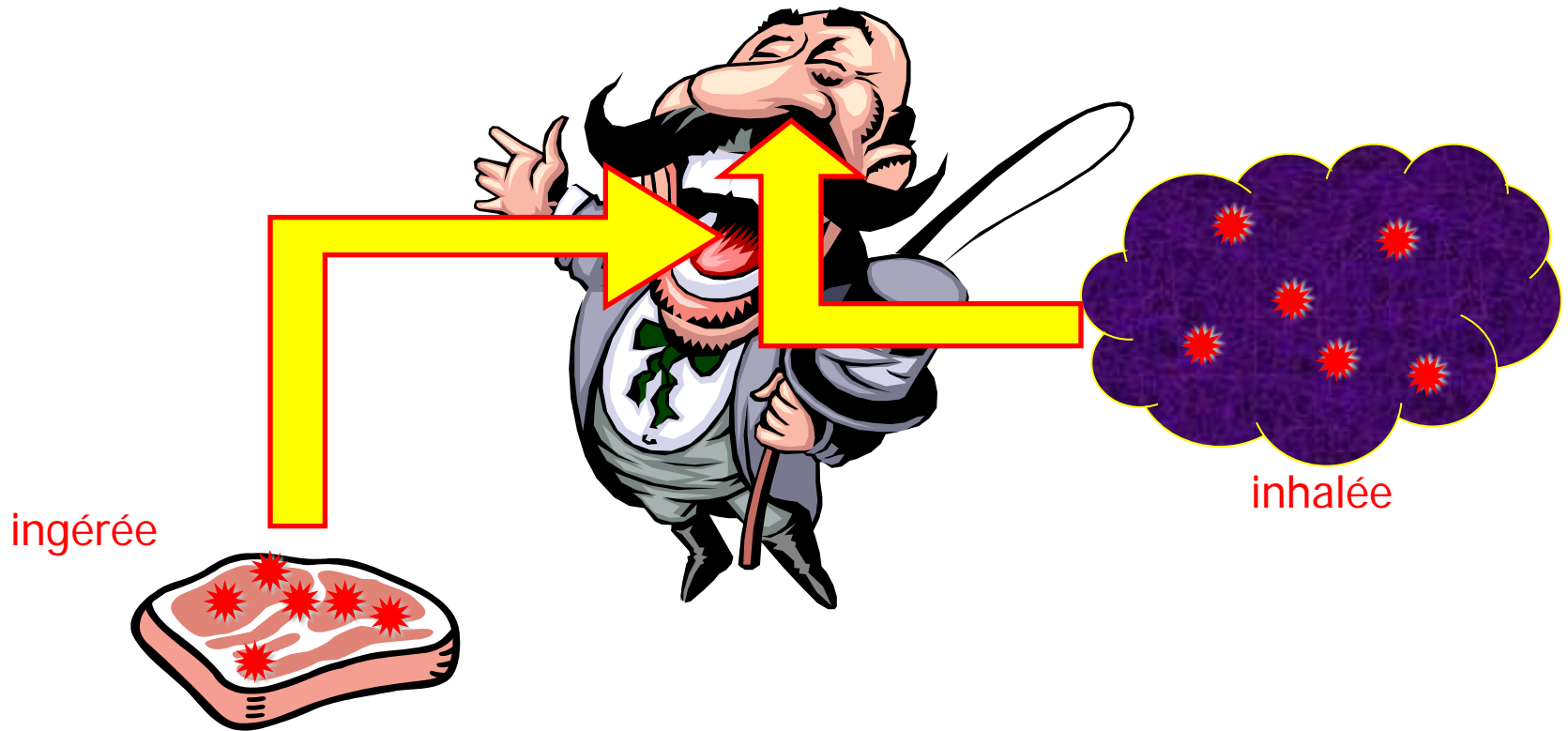
- $H_p(10)$
 - 10 mm de profondeur
 - Représentatif de la dose délivrée à un organe en profondeur
- $H_p(0.07)$
 - 0.07 mm de profondeur
 - Représentatif de la dose délivrée à la peau



51

Incorporation

- Activité inhalée / ingérée :
 - Poudres et liquides de radiochimie, sources scellées endommagées, transport.



Incorporation

- Dose efficace engagée :

$$E_{50} = \int_{t_0}^{t_0 + 50 \text{ ans}} E(t) dt$$

- Somme des doses efficaces par unité de temps $E(t)$ reçues sur les 50 ans qui suivent l'incorporation

Incorporation

- Modélisation selon l'ORap

$$E_{50} = A_{inh} \cdot e_{inh}$$

Activité inhalée

Coefficient de dose

$$E_{50} = A_{ing} \cdot e_{ing}$$

Activité ingérée

The diagram illustrates the relationship between the 50th percentile of the oral reference dose (E₅₀) and the activity of the substance. It shows two equations: E₅₀ = A_{inh} · e_{inh} and E₅₀ = A_{ing} · e_{ing}. The first equation is associated with 'Activité inhalée' (inhalation activity) and the second with 'Activité ingérée' (ingestion activity). A 'Coefficient de dose' (dose coefficient) is indicated between the two equations, suggesting a conversion factor between the two pathways.

Coeff de dose dans l'ORaP

Radioprotection - O

Nucléide	Période	Type de désintégration/ de rayonnement	e_{inh} Sv/Bq	e_{ing} Sv/Bq	Grandeurs d'appréciation			Limite d'exemption
					h_{10} (mSv/h)/GBq à 1 m de distance	$h_{0,07}$ (mSv/h)/GBq à 10 cm de distance	$h_{e0,07}$ (mSv/h)/(kBq/cm ²)	LE Bq/kg ou LE _{abs} Bq
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Co-57	270.9 d	ϵ, γ	6.0 E-10	2.1 E-10	0.021	100	0.1	5 E+04
Co-58	70.80 d	$\epsilon, \beta^+, \gamma$	1.7 E-09	7.4 E-10	0.147	300	0.3	1 E+04
Co-58m	9.15 h	γ	1.7 E-11	2.4 E-11	<0.001	10	<0.1	4 E+05
Co-60	5.271 a	β^-, γ	1.7 E-08	3.4 E-09	0.366	1000	1.1	1 E+03 ⁶⁶
Co-60m	10.47 m	β^-, γ	1.2 E-12	1.7 E-12	0.001	20	<0.1	6 E+06
Co-61	1.65 h	β^-, γ	7.5 E-11	7.4 E-11	0.017	1000	1.6	1 E+05
Co-62m	13.91 m	β^-, γ	3.7 E-11	4.7 E-11	0.436	1000	1.8	2 E+05
Ni-56	6.10 d	ϵ, γ	9.6 E-10	8.6 E-10	0.260	60	0.1	1 E+04
Ni-57	36.08 h	$\epsilon, \beta^+, \gamma$	7.6 E-10	8.7 E-10	0.278	700	0.8	1 E+04

$$E_{50} = A_{inh} \cdot e_{inh}$$

$$E_{50} = A_{ing} \cdot e_{ing}$$

Lien entre les doses en pratique

- Dose efficace externe

$$E_{\text{externe}} = H_p (10)$$

ou $H^* (10)$

- Dose à la peau

$$H_{\text{peau}} = H_p (0.07)$$

ou $H' (0.07)$

- Dose efficace par incorporation

$$E_{\text{inc}} = E_{50}$$

Dose efficace totale

$$E = E_{\text{ext}} + E_{\text{inc}}$$

Résumé

- La dose absorbée (D) est l'énergie déposée par unité de masse. Son unité est le Gy.
- L'effet biologique dépend de la distribution à l'échelle microscopique c'est-à-dire du TEL donc de la nature et de l'énergie du rayonnement.
- L'efficacité biologique relative (EBR) d'une radiation donnée est le rapport, pour un effet biologique donné, de la dose absorbée délivrée par une radiation de référence à la dose absorbée délivrée par la radiation donnée, nécessaires pour obtenir le même niveau d'effet.
- L'équivalent de dose (H) est une manière simplifiée de prendre en compte les effets de la radiation sur le tissu biologique. Elle est définie comme $H = w_R \cdot D$. L'unité de l'équivalent de dose est le sievert (Sv).
- Le facteur de pondération (w_R) d'une radiation est une approximation de l'EBR utilisée en radioprotection
- Grandeurs opérationnelles
 - Pour la dosimétrie individuelle en cas d'irradiation externe, les grandeurs opérationnelles sont:
 - l'équivalent de dose individuel en profondeur $H_p(10)$;
 - l'équivalent de dose individuel en surface $H_p(0,07)$;
 - l'équivalent de dose individuel au cristallin $H_p(3)$.
 - Pour la dosimétrie d'ambiance, les grandeurs opérationnelles sont:
 - l'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$;
 - l'équivalent de dose directionnel $H'(0,07)$;
 - l'équivalent de dose directionnel $H'(3)$.
- Pour l'irradiation interne, la grandeur opérationnelle est la dose efficace engagée E50.
- La dose efficace est destinée à être utilisée en tant que grandeur de protection.
- La dose efficace est une grandeur utilisée en radioprotection pour prédire les risques stochastiques liés à une faible irradiation ou à une irradiation chronique
- La notion de dose efficace n'est pas appropriée et ne doit surtout pas être utilisée pour quantifier les effets déterministes dans le cas d'une irradiation aiguë.

Exercice

- Calculer l'augmentation de la température de l'eau après une irradiation donnant lieu à une dose absorbée de 2 Gy

Exercice

- Calculer l'augmentation de la température de l'eau après une irradiation donnant lieu à une dose absorbée de 2 Gy
 - Une dose absorbée de 2 Gy correspond à une énergie E égale à 2 J pour une masse m de 1 kg.
 - Si toute l'énergie est convertie en chaleur, alors la relation liant E à l'élévation de température ΔT est : $E = m c \Delta T$
où c est la chaleur massique de l'eau (4180 J/kg/K).
 - L'élévation de température vaut donc $2 / (1 \times 4180) = 0.48 \cdot 10^{-3}$ K.

Exercice

- Soit une irradiation au P-32 donnant lieu à une dose absorbée de 2 Gy
Quelle est l'équivalent de dose ?

Exercice

- Soit une irradiation au P-32 donnant lieu à une dose absorbée de 2 Gy
Quelle est l'équivalent de dose ?
 - Le P-32 est un émetteur bêta. Le facteur de pondération vaut donc 1 et l'équivalent de dose est numériquement égal à la dose absorbée; i.e. **2 Sv**.

Exercice

- Calculer l'équivalent de dose produit par une irradiation simultanée avec des rayonnements alpha et bêta aux doses absorbées suivantes

$$D_{\alpha}=1.4 \text{ mGy et } D_{\beta}=10.1 \text{ mGy}$$

Exercice

- Calculer l'équivalent de dose produit par une irradiation simultanée avec des rayonnements alpha et bêta aux doses absorbées suivantes :

$$D_{\alpha}=1.4 \text{ mGy et } D_{\beta}=10.1 \text{ mGy}$$

- Le facteur de pondération du rayonnement bêta est égal à 1. Celui du rayonnement alpha est égal à 20.
- L'équivalent de dose est donc égale à :
 $20 \times 1.4 + 1 \times 10.1 = 38.1 \text{ mSv}$.
- On constate qu'une faible dose absorbée de rayonnement alpha correspond à un grand équivalent de dose.

Exercice

- Calculer le débit d'équivalent de dose ambiant et le débit d'équivalent de dose directionnel à 7 m d'une source de Co-60 de 500 MBq

Exercice

- Calculer le débit d'équivalent de dose ambiant et le débit d'équivalent de dose directionnel à 7 m d'une source de Co-60 de 500 MBq

– Pour le débit d'équivalent de dose ambiant, l'indice vaut 0.366 mSv m²/h/GBq.

– Cela fait donc : $\dot{H}^*(10) = \frac{0.5 \times 0.366}{7^2} = 0.0037 \text{ mSv/h} = 3.7 \mu\text{Sv/h}$

– Pour le débit de d'équivalent de dose directionnel, l'indice vaut 1000 mSv m²/h/GBq.

– Cela fait donc : $\dot{H}^*(0.07) = \frac{0.5 \times 1000}{(7 \times 10)^2} = 0.102 \text{ mSv/h} = 102 \mu\text{Sv/h}$

$$0.5 \times 1000 / (7 \times 10)^2 = 0.102 \text{ mSv/h} = 102 \mu\text{Sv/h.}$$

Exercice

- Calculer la dose à la peau reçue sur la main d'une personne s'appuyant sur une source de P-32 d'activité surfacique de 1 MBq/cm^2 pendant une minute

Exercice

- Calculer la dose à la peau reçue sur la main d'une personne s'appuyant sur une source de P-32 d'activité surfacique de 1 MBq/cm² pendant une minute
 - Pour le débit d'équivalent de dose directionnel en contact, l'indice vaut :

- Cela fait donc : $\dot{h}_c(0.07) = 1.6 \frac{\text{mSv} \cdot \text{kBq}}{\text{h} \cdot \text{cm}^2}$.

$$H'(0.07) = \dot{h}_c(0.07) A_s t = 1.6 \times 1'000 \times \frac{1}{60} = 27 \text{ mSv}$$