

# *Medical Physics Teaching Series*

## *Principes de base de la physique des radiations*

---

*PD Dr Habib Zaidi*

Département d'Imagerie & Sciences de l'Information Médicale

Division de Médecine Nucléaire

Hôpitaux Universitaires de Genève

Genève, Suisse

Email: [habib.zaidi@hcuge.ch](mailto:habib.zaidi@hcuge.ch)

Web: <http://pinlab.hcuge.ch/>

[http://pinlab.hcuge.ch/pdf/Bases\\_physiques.pdf](http://pinlab.hcuge.ch/pdf/Bases_physiques.pdf)

Bases physiques des radiations

# Plan

---

- ◆ Introduction à la physique médicale
- ◆ Radioactivité et décroissance
- ◆ Physique de l'interaction rayonnement matière
- ◆ Physique de la détection des rayonnements
- ◆ Principes de radioprotection opérationnelle
- ◆ Principes de dosimétrie interne

# Introduction à la physique médicale

---

- La physique médicale est une branche de la physique qui a pour objet les applications de la physique à la médecine, particulièrement au diagnostic et au traitement de la maladie humaine.
- Les principaux domaines d'intérêts:
  - traitement du cancer au moyen de rayonnements ionisants (radio-oncologie),
  - imagerie diagnostique au moyen des rayons X,
  - imagerie par ultrasons,
  - imagerie par résonance magnétique nucléaire,
  - imagerie diagnostique au moyen de radio-isotopes (médecine nucléaire),
  - étude des risques que présentent les rayonnements et les moyens de protection contre les rayonnements (radioprotection).

# Introduction à la physique médicale

---

- Autres applications:
  - étude bioélectrique du cerveau et du coeur (électroencéphalographie et électrocardiographie),
  - étude biomagnétique du cerveau (scintigraphie magnétique),
  - l'utilisation médicale de l'irradiation aux infrarouges (thermographie),
  - le traitement du cancer par la chaleur (hyperthermie),
  - utilisation de lasers à des fins chirurgicales (chirurgie au laser)

# Historique

---

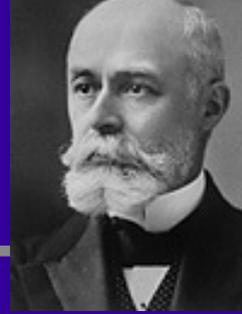
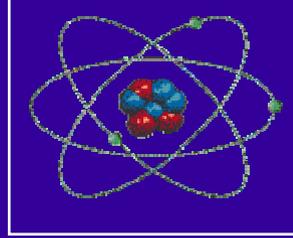


**1895: Découverte des rayons X par  
Prof. Wilhelm C. Roentgen**



**1901: Roentgen reçoit le Prix Nobel  
Pour la découverte des rayons X**

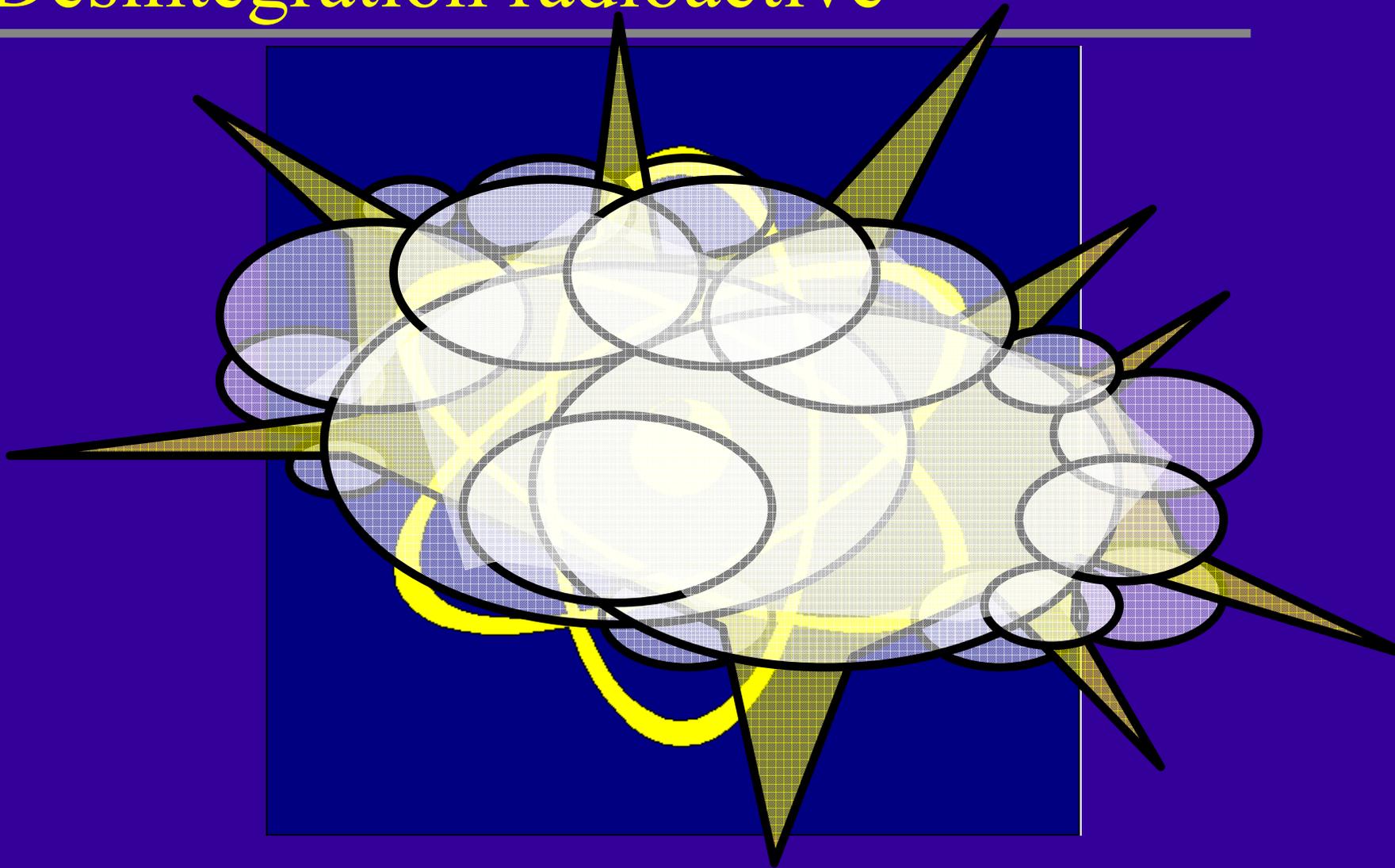
# Historique



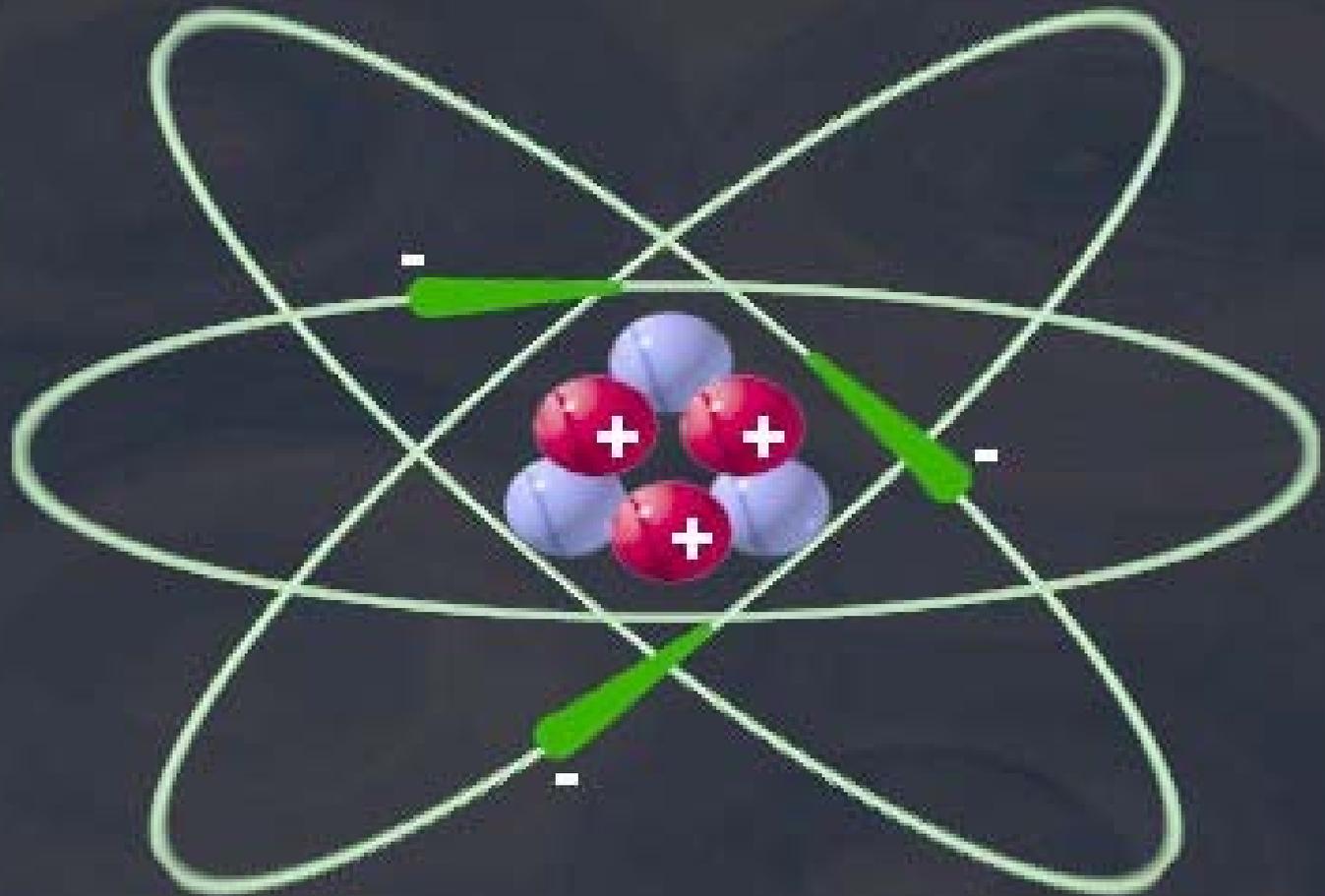
- La radioactivité n'a pas été inventée par l'homme. C'est un phénomène naturel qui existe depuis l'origine de l'Univers et qui imprègne notre environnement quotidien.
- En découvrant, il y a un siècle, ce phénomène jusque là insoupçonné, **Henri Becquerel**, puis **Pierre et Marie Curie** ont fait franchir à l'esprit humain une étape décisive pour la compréhension du monde et ont ouvert la voie à la science moderne.
- Henri Becquerel, au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, recherche si la fluorescence de certains corps est accompagnée par l'émission de rayons X. Il découvre ainsi, que le sulfate double d'uranyle et de potassium émet un rayonnement pénétrant capable de noircir une plaque photographique. Il établit que ce rayonnement est émis par l'élément **uranium**.
- 1903: Henri Becquerel ainsi que Pierre et Marie Curie reçoivent **le prix Nobel de physique** pour la découverte de la radioactivité.

# Désintégration radioactive

---



# L'atome neutre



**NEUTRAL ATOM**

# Représentation symbolique des isotopes

---



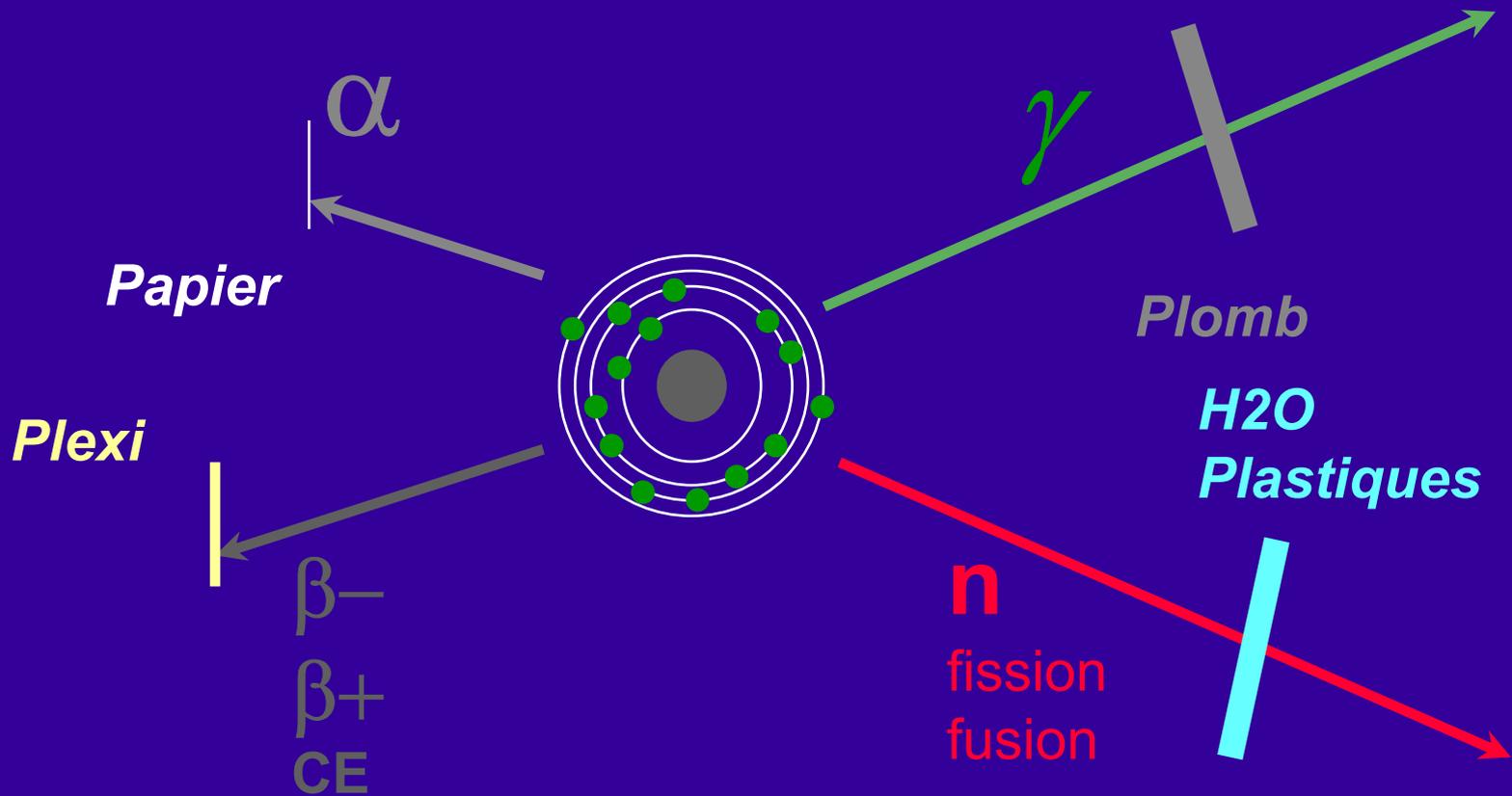
- ◆ A est le nombre de masse (nucléons) (protons + neutrons) dans l'isotope.
- ◆ Z est le numéro atomique (nombre de protons/électrons) dans l'isotope.
- ◆ X est le symbole atomique de l'isotope (déterminé par Z, donc Z est omis en général).

# Propriétés fondamentales des particules

---

<b>Particule</b>	<b>Symbole</b>	<b>Charge Relative</b>	<b>Approx. <math>E</math> (MeV)</b>
Proton	p	+1	938
Electron	$e^-$	-1	0.511
Positron	$e^+$	+1	0.511
Neutron	n	0	940

# Radioactivité



# Mécanismes de désintégration

---

## ◆ Transition atomique

- émission de photons; rayons X résultant du changement de niveau énergétique des électrons orbitaux.

## ◆ Transition nucléaire

- émission de photons: émission  $\gamma$  résultant du changement des niveaux d'énergie nucléaires.
- émission de particules ( $\beta$ , p, n,  $\alpha$ ,  $\nu$ , etc.)

## ◆ Capture électronique (CE)

- Le noyau capture un électron orbital interne (e.g., couche K ou L) et l'effet net est que le proton devient un neutron.

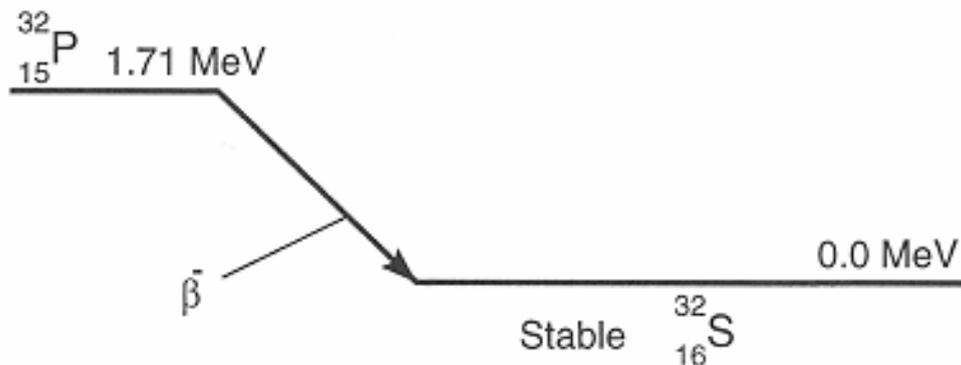
# Schémas de désintégration

---

- ◆ Chaque radioélément possède son propre schéma de désintégration
- ◆ Les schémas de désintégration contiennent toutes les informations concernant les modes de désintégration, la demi-vie, et les sous-produits des désintégrations.
- ◆  $\beta^+$  Branching ratio
  - nombre représentant la fraction moyenne de  $\beta^+$  produits par désintégration.
  - L'activité source (désintégrations/sec) multiplié par le  $\beta^+$  branching ratio donne l'activité (positrons produits/sec).

# Schémas de désintégration

PHOSPHORUS-32  
Beta-Minus Decay  
 $T_{1/2} = 14.3$  days



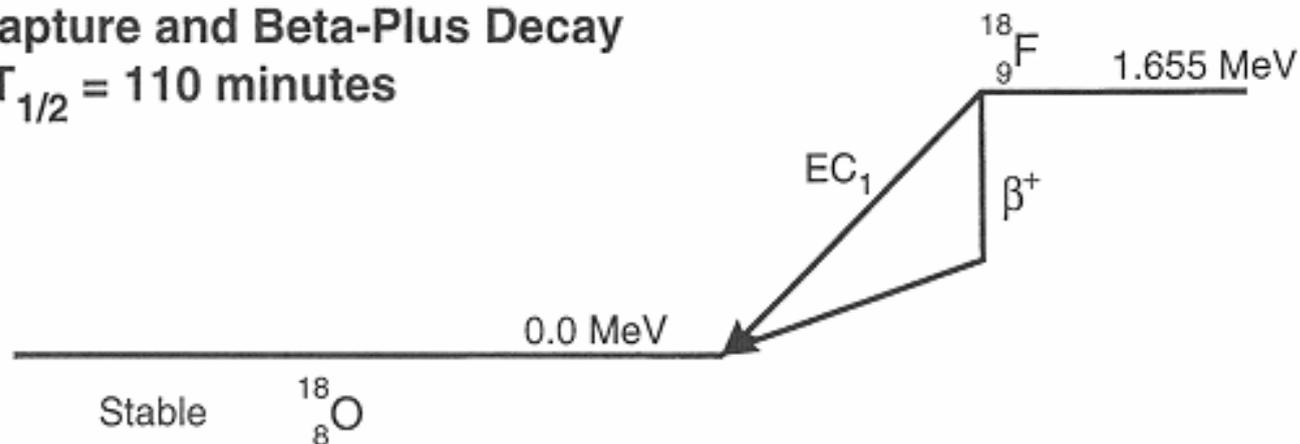
**Decay Data Table**

Radiation	Mean Number per Disintegration	Mean Energy per Particle (MeV)
Beta Minus	1.000	0.6948

# Schémas de désintégration

## FLUORINE-18 Electron Capture and Beta-Plus Decay

$T_{1/2} = 110$  minutes



**Decay Data Table**

Radiation	Mean Number per Disintegration	Mean Energy Particle (MeV)
Beta Plus	0.9700	0.2496
Annih. Radiation	1.9400	0.5110

# Radioactivité et décroissance

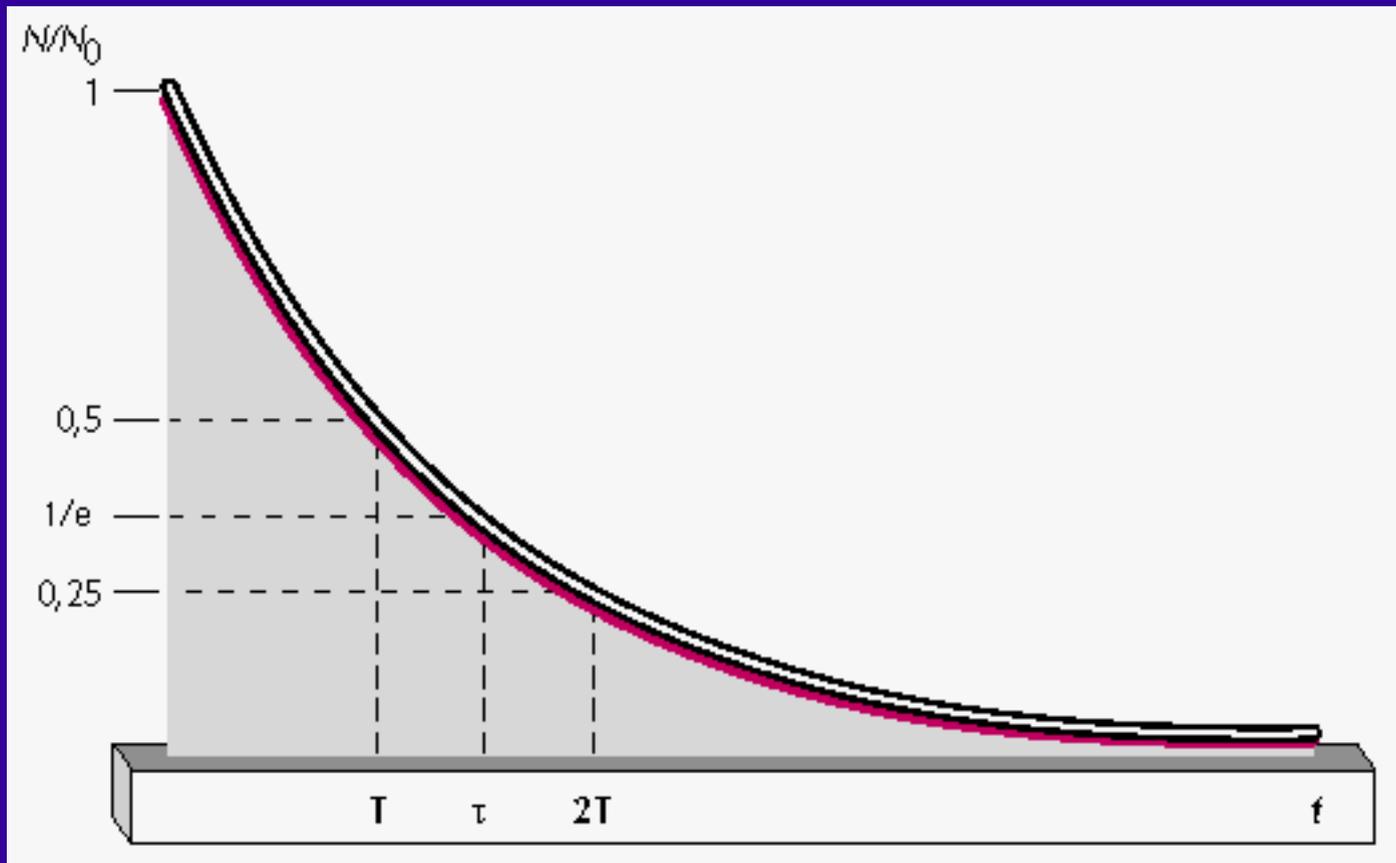
---

Forme différentielle:  $\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) \quad [\lambda \geq 0]$

Forme fonctionnelle:  $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$

Le nombre de noyaux pour un isotope radioactif qui se désintègre dans un intervalle de temps donné ( $t$ ) est proportionnel ( $\lambda$  étant la constante de proportionnalité) au nombre de noyaux radioactifs présents à  $t$ .

# Loi de désintégration radioactive



# La demi-vie radioactive

---

La demi-vie ( $\tau$ ) d'un isotope est définie par l'intervalle de temps requis pour que le nombre de noyaux radioactifs présent se réduit de moitié à cause de la décroissance radioactive

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \longrightarrow 0.5 N_0 \equiv N_0 e^{-\lambda \tau}$$

$$\tau \equiv \frac{-\ln(0.5)}{\lambda}, \text{ or } \lambda \equiv \frac{-\ln(0.5)}{\tau}$$

( $\lambda$  et  $\tau$  sont des constantes pour un isotope radioactif donné)

# Mesure de la radioactivité - unités

---

- ◆ Activité

- désintégrations par seconde

- ◆ Exposition

- ionisations produites dans l'air par les photons

- ◆ Dose absorbée

- déposition d'énergie dans la matière

- ◆ Equivalent de dose

- mesure des dommages biologiques

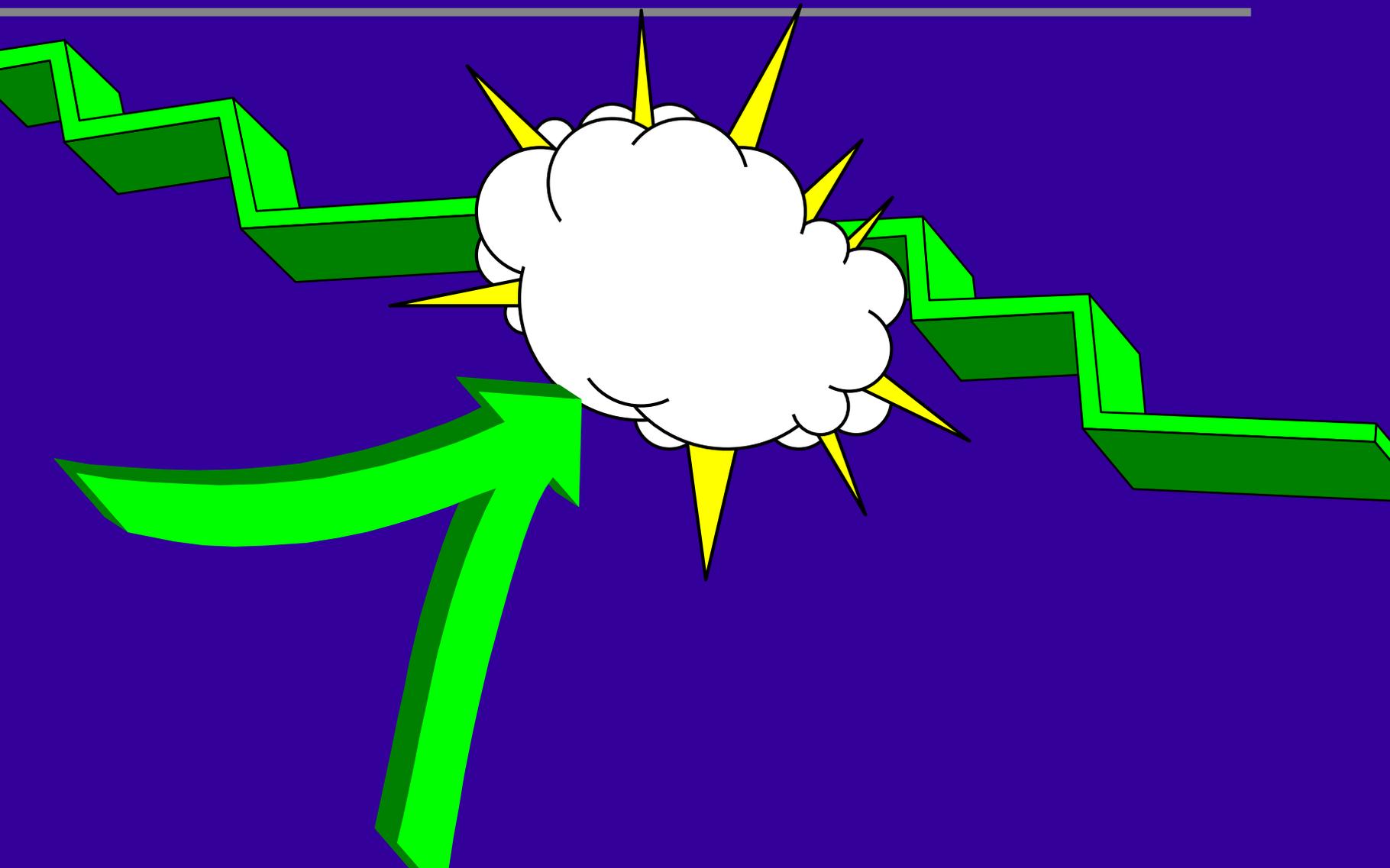
# Mesure de la radioactivité - unités

---

- ◆ **Activité (désintégrations par seconde)**
- ◆ [Bq] Becquerel
  - unité SI de l'activité correspondant à une désintégration par seconde.
- ◆ [Ci] Curie
  - unité historique de l'activité, correspondant à l'activité d'1 gramme de  $^{226}\text{Ra}$  pure. Ceci est équivalent à  $3.7 \times 10^{10}$  Bq.

# Interaction des photons avec la matière

---



# Modes d'interaction photons-matière

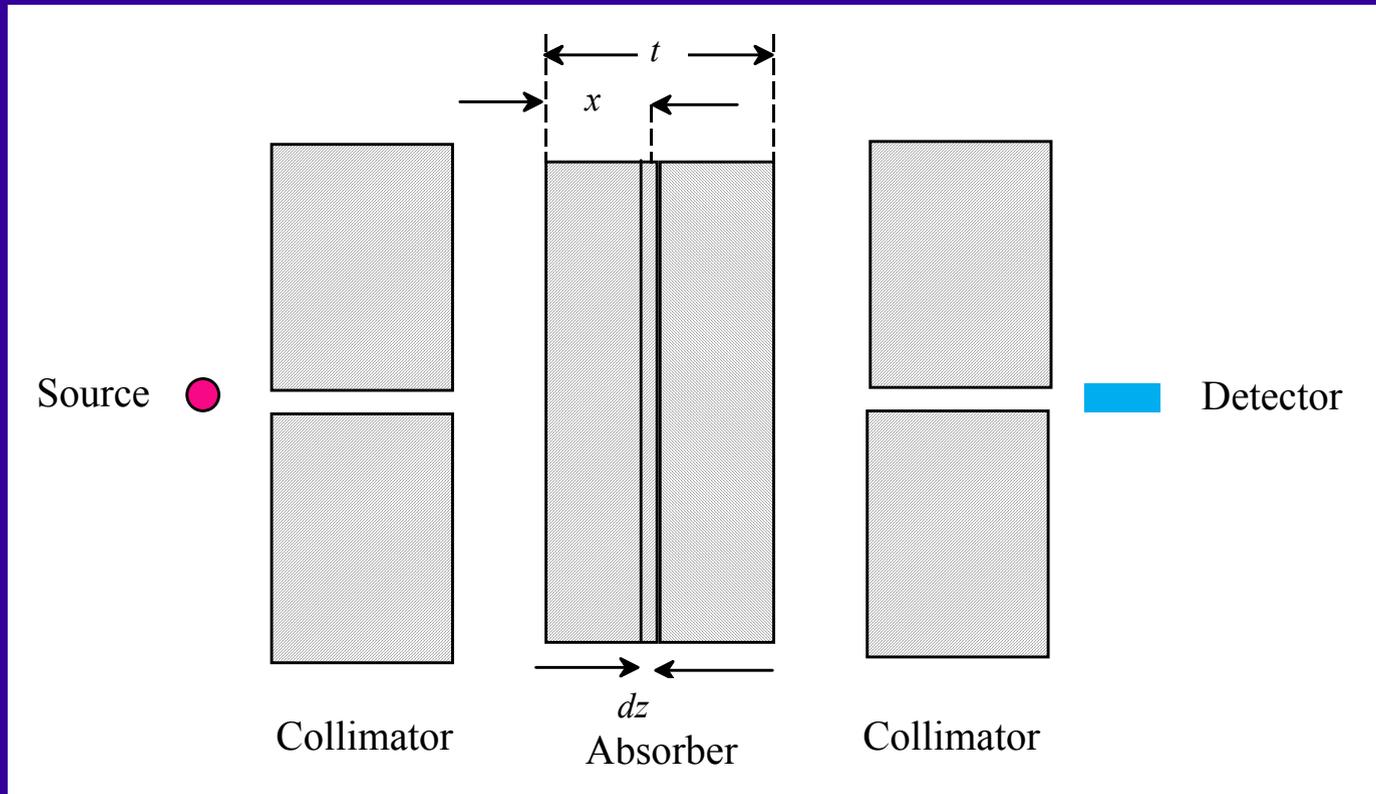
---

- Pour les énergies qui présentent un intérêt en physique médicale (moins de 10 MeV), lorsqu'un photon traverse la matière, 4 modes d'interactions sont possibles (effet photoélectrique, diffusion incohérente (Compton), diffusion cohérente (Rayleigh), ou la production de paires).
- La probabilité qu'un photon ayant une énergie donnée  $E$  subisse une absorption ou une diffusion lorsqu'il traverse une couche de matériau  $Z$  peut s'exprimer quantitativement en terme du coefficient linéaire d'atténuation  $\mu$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) qui dépend de la densité du matériau,  $\rho$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ):

$$\frac{\rho}{\mu} = t^{-1} \ln\left(\frac{I_0}{I(t)}\right)$$

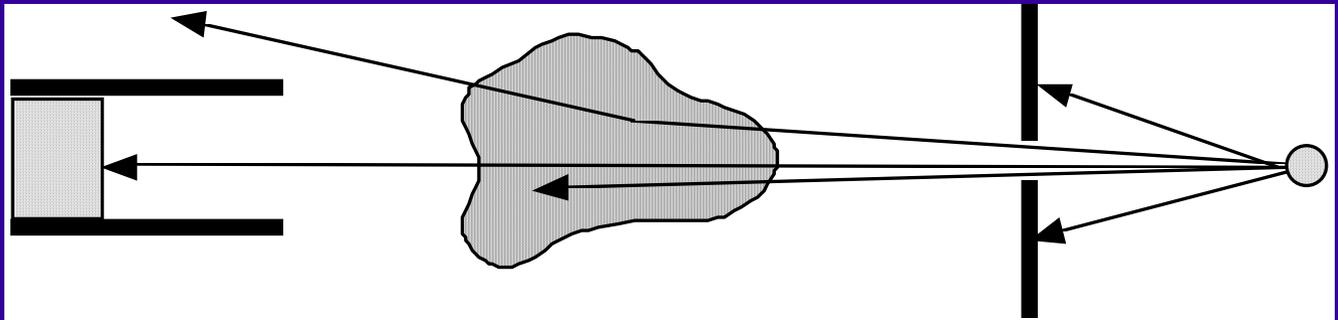
# Attenuation des photons

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\int_0^t \left(\frac{\mu}{\rho}\right)(x) dx\right)$$

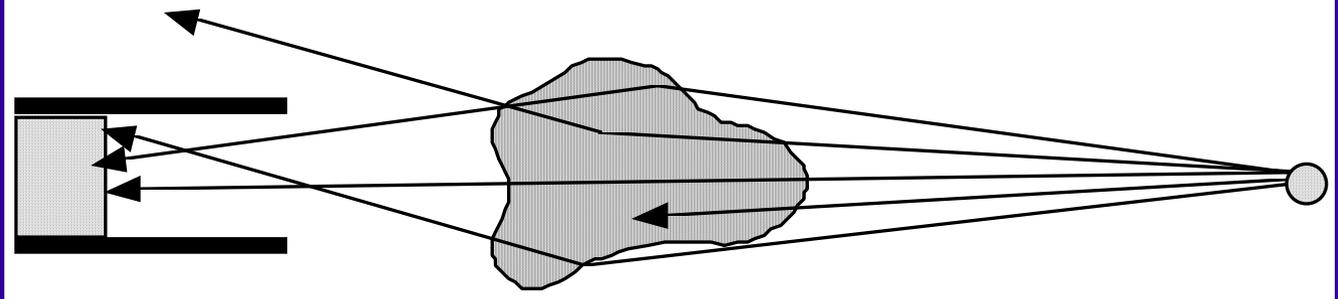


# Transmission narrow/broad beam

Broad-beam

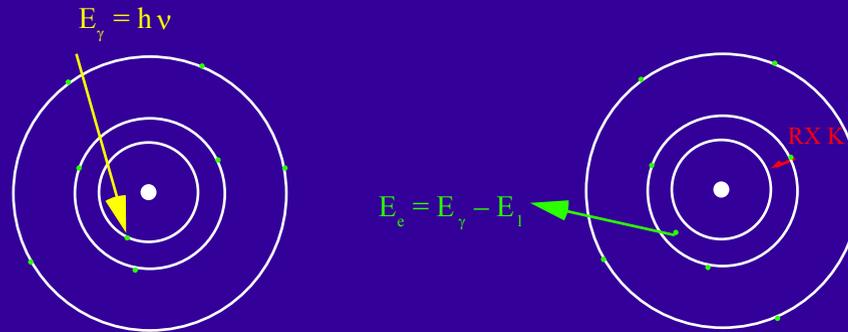


Narrow-beam



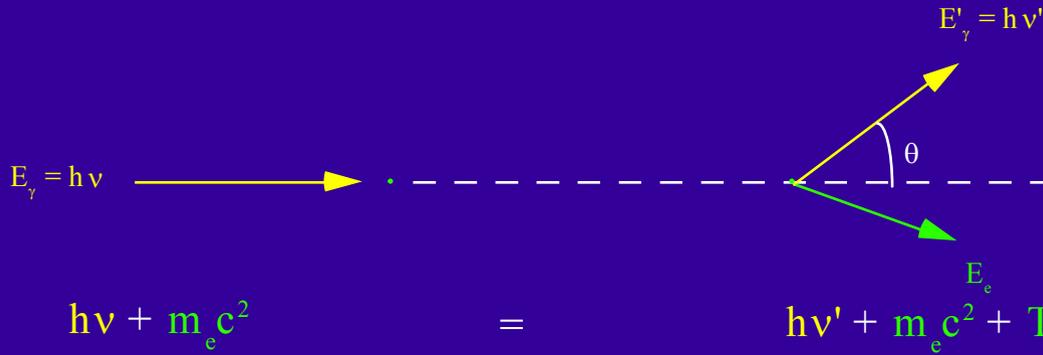
# Absorption photoélectrique

$$\sigma_{photo} \sim \frac{Z^5}{E^{3.5}}$$



$$\Phi = 4 \alpha^4 |2 Z^5 (8 \pi r_e^2 / 3) (m_e c^2 / h\nu)^{7/2}$$

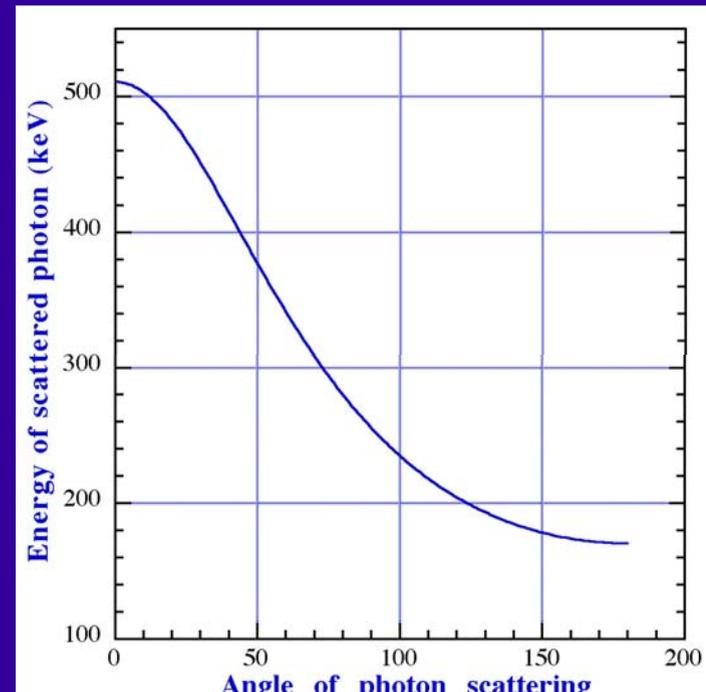
# Diffusion incohérente (Compton)



$$h\nu + m_e c^2 = h\nu' + m_e c^2 + T_e$$

$$\mathbf{P}_{h\nu} = \mathbf{P}_{h\nu'} + \mathbf{P}_e$$

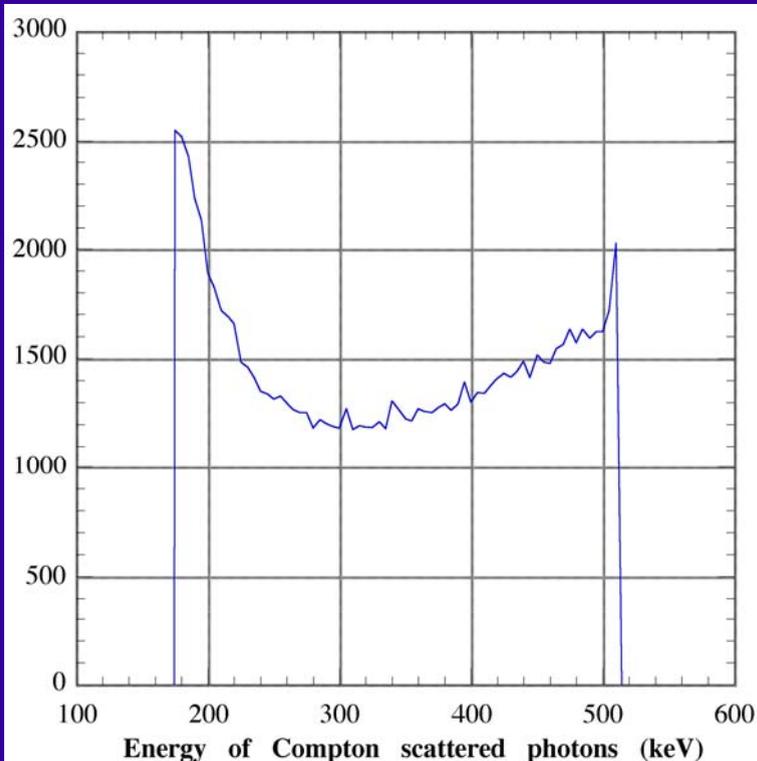
$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + (1 - \cos \theta) \frac{h\nu}{m_e c^2}}$$



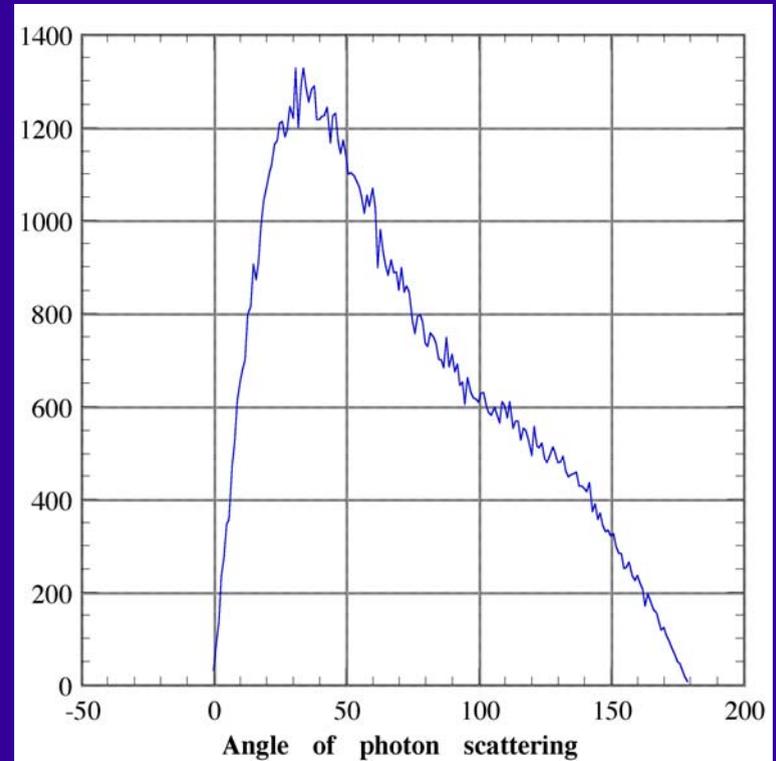
# Distribution énergétique et angulaire

La probabilité de diffusion est donnée par l'équation de Klein Nishina

$$\frac{d\sigma}{d\theta} = \frac{r_0^2}{2} (1 + \cos^2 \theta) \left[ \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \right]^2 \cdot \left[ 1 + \frac{\alpha^2 (1 - \cos \theta)^2}{[1 + \alpha(1 - \cos \theta)(1 + \cos^2 \theta)]} \right]$$



**E=511 keV**



# Diffusion cohérente (Rayleigh)



$\theta$  est l'angle polaire de diffusion

$$\frac{d\sigma_{coh}}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} (1 + \cos^2 \theta) F^2(x, Z)$$

$$F(x, Z) = 4\pi \int_0^\infty \frac{\rho(r) \sin(xr) r^2 dr}{xr}$$

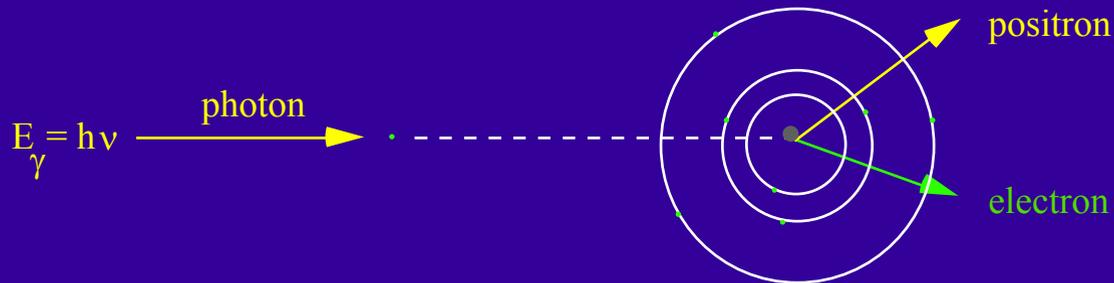
$$r_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_0 c^2}$$

$$x = \frac{E}{hc} \text{sinc}\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

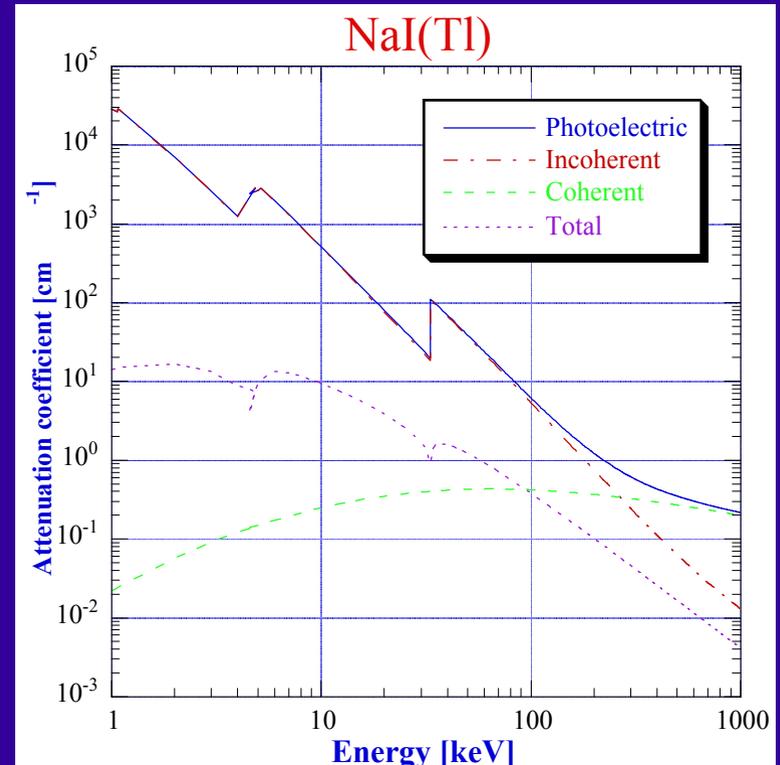
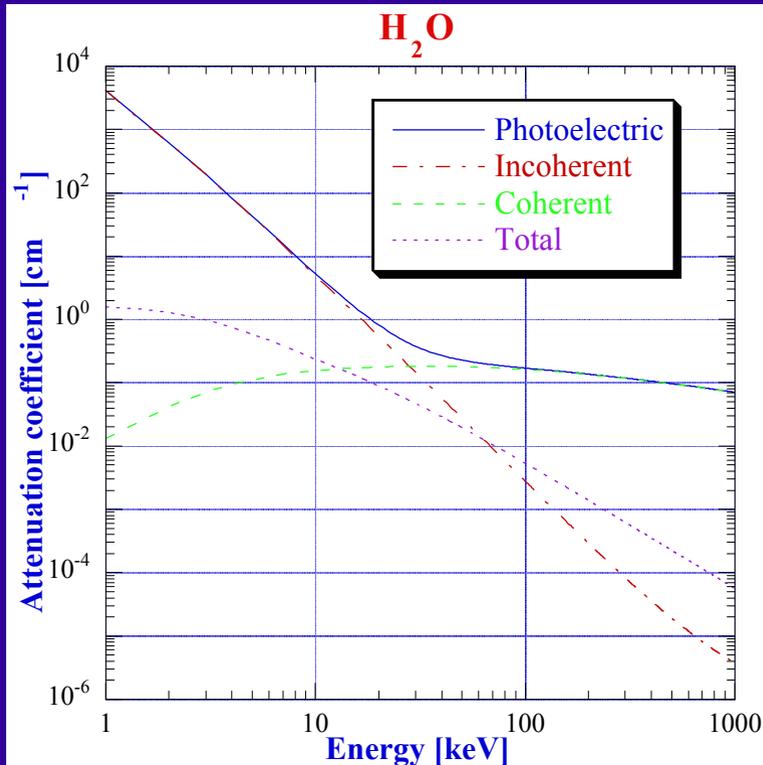
# Production de paire

---

$$\sigma_{pair} \sim Z^2$$

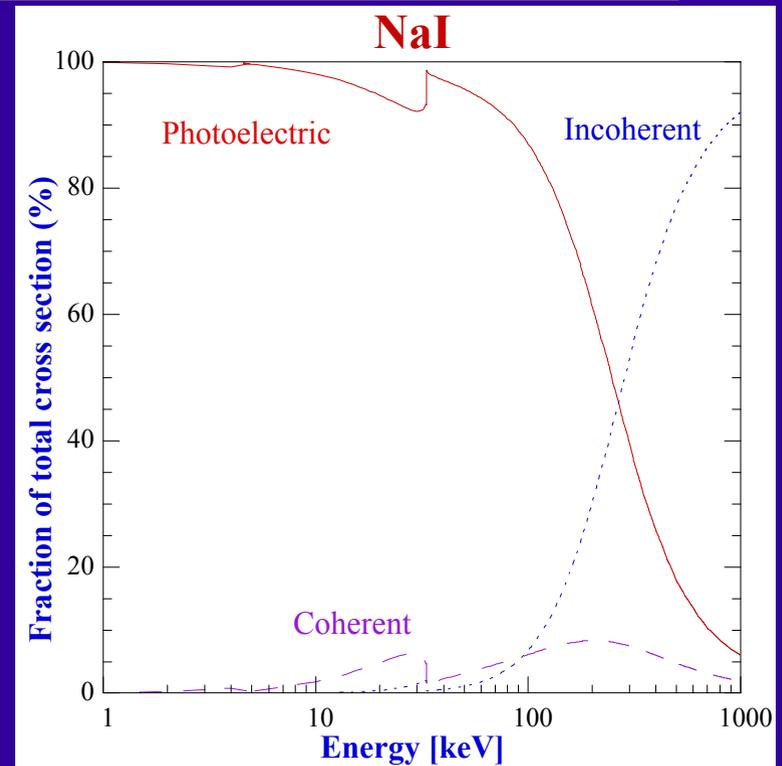
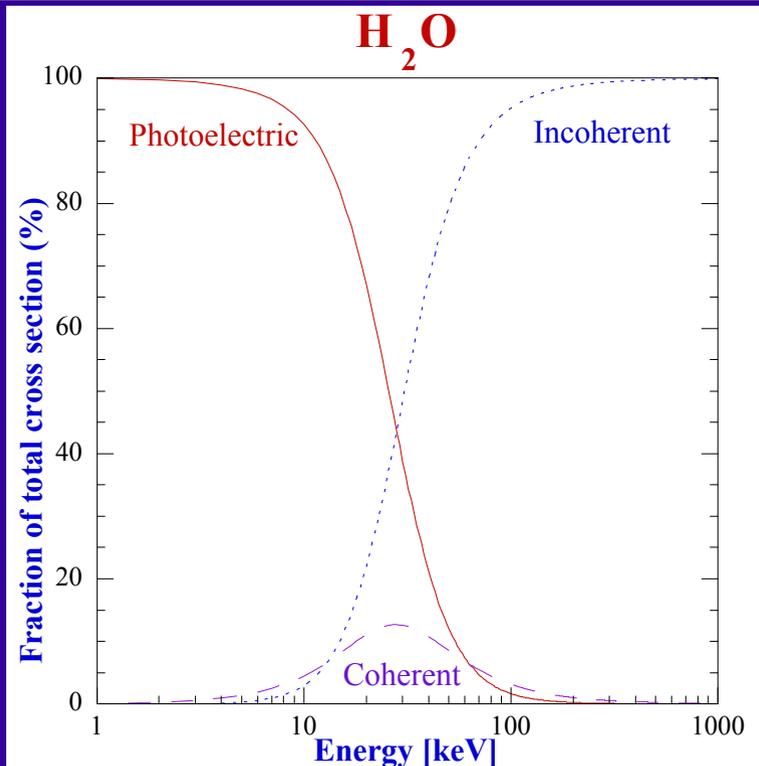


# Sections efficaces d'interaction



La section efficace d'interaction est proportionnelle à la probabilité d'occurrence d'un processus particulier.

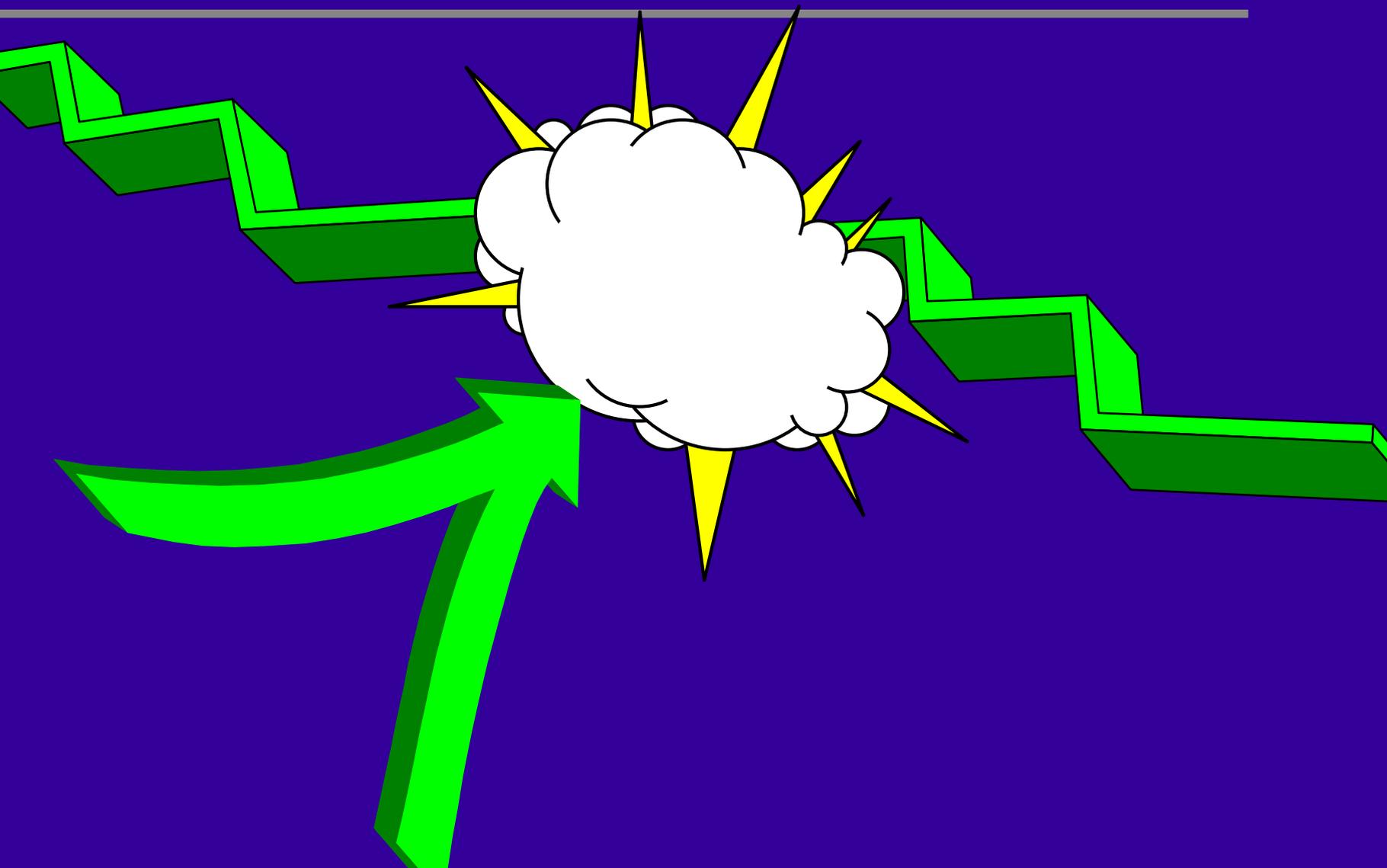
# Importance des modes d'interaction



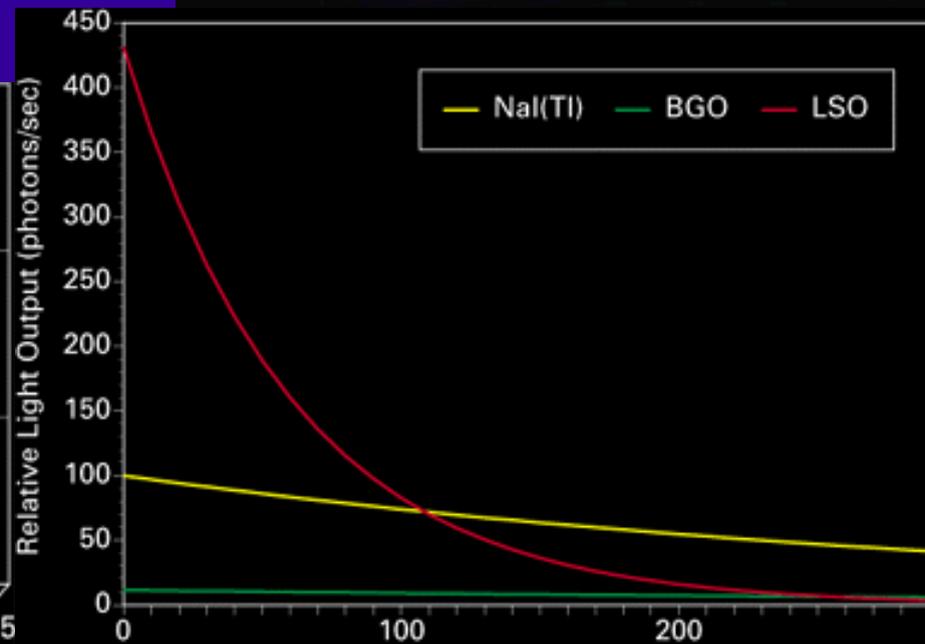
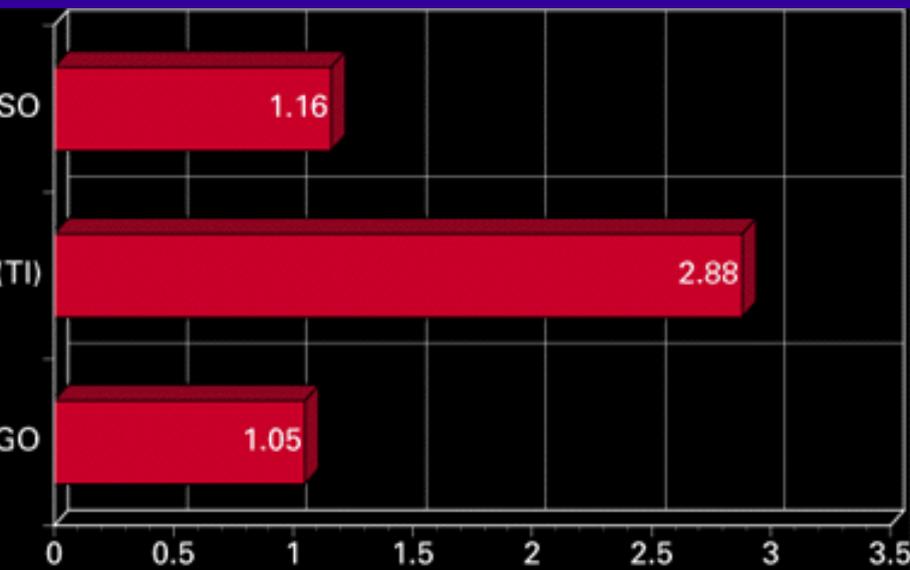
Composantes des sections efficaces d'interaction des photons pour l'eau (H<sub>2</sub>O) et l'iodure de sodium (NaI) montrant les contributions relatives et régions de dominance de chaque processus d'interaction (photoélectrique, diffusion incohérente, diffusion cohérente) pour  $E < 1$  MeV.

# Détection des photons

---



# Cristaux de détection



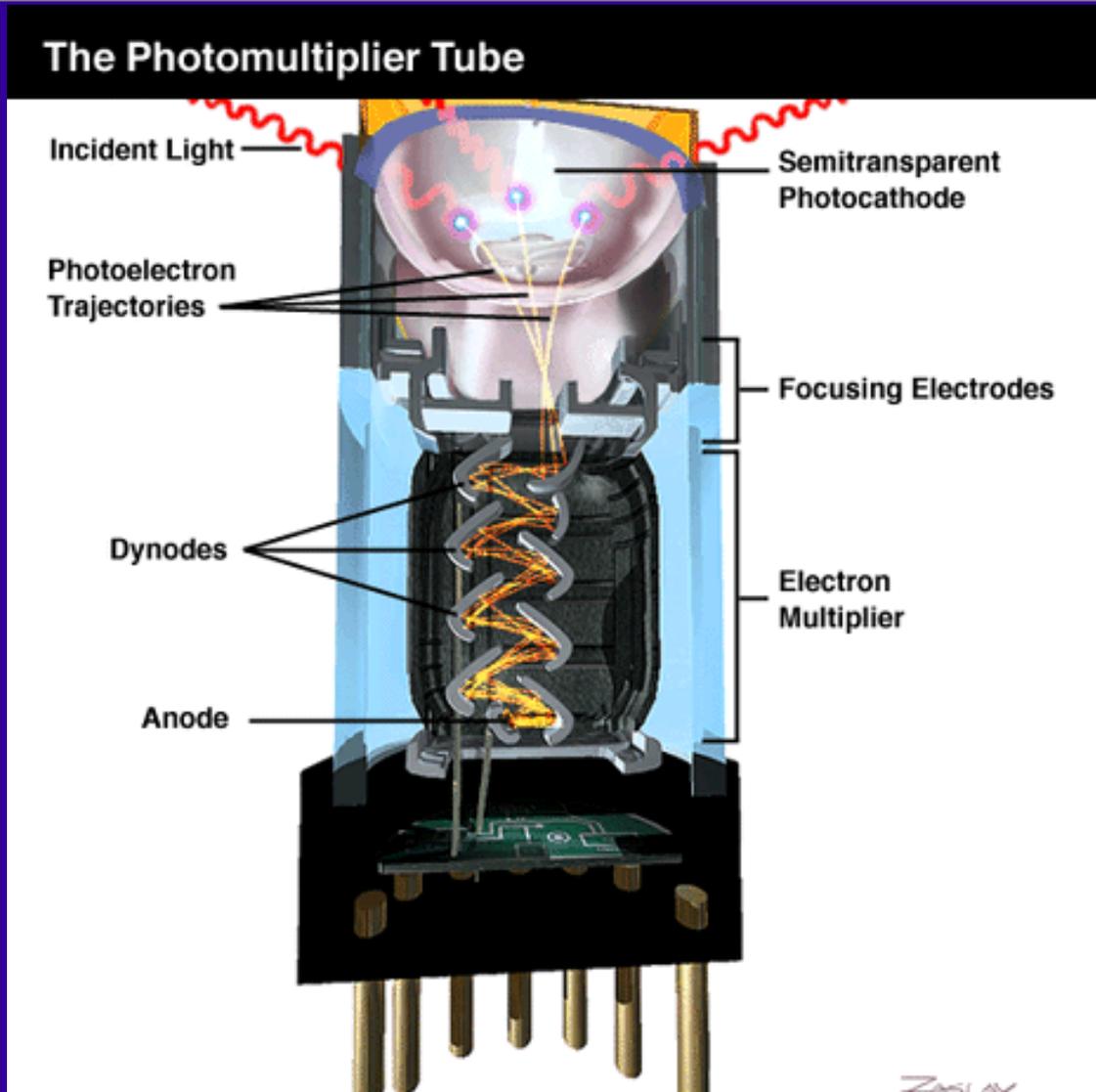
# Cristaux de détection

Scintillator	NaI(Tl)	BGO	BaF2	LSO	GSO	LuAP	YAP
Formula	NaI(Tl)	Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	BaF <sub>2</sub>	Lu <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> :Ce	Gd <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> :Ce	LuAlO <sub>3</sub> :Ce	YAlO <sub>3</sub> :Ce
Density (g/cc)	3.67	7.13	4.89	7.4	6.71	8.34	5.37
Light yield (%)	100	15-20	3-20	75	20-25	25-50	40
Effective Z	51	75	53	66	60	65	34
Decay constant (ns)	230	300	1/700	42	30-60	18	25
Peak wavelength (nm)	410	480	195-220	420	440	370	370
index of refraction	1.85	2.15	1.56	1.82	1.95	1.95	1.56
Photofraction (%) <sup>*/+</sup>	17.3/7.7	41.5/88	18.7/78.6	32.5/85.9	25/82.3	30.6/85.1	4.5/48.3
Mean free path (cm) <sup>*/+</sup>	2.93/0.4	1.04/0.08	2.19/0.27	1.15/0.1	1.4/0.16	1.05/0.1	2.17/0.7
Hygroscopic	yes	no	no	no	no	no	no

\* At 511 keV

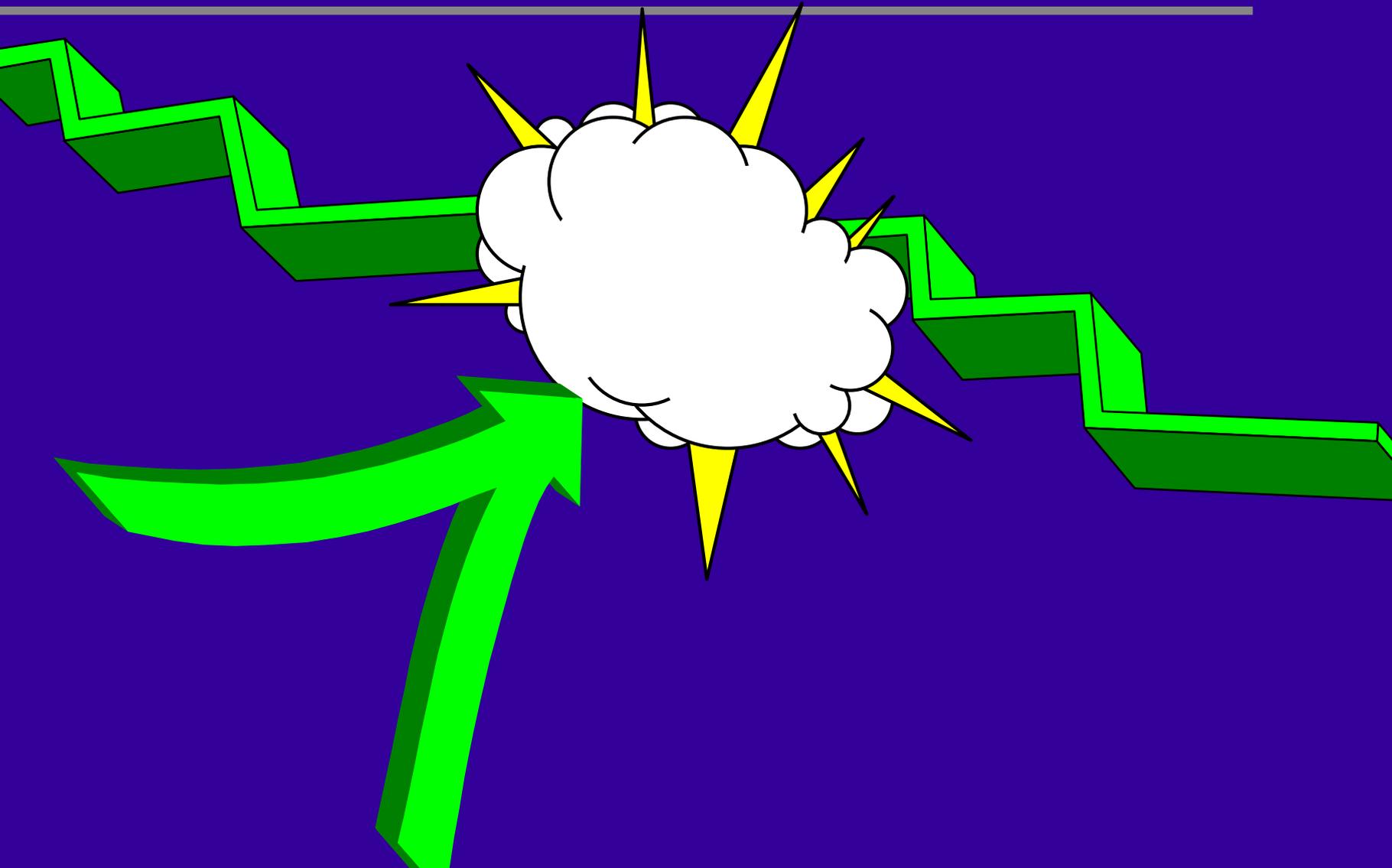
+ At 140 keV

# Tube photomultiplicateur (PMT)



# Principes de radioprotection

---



# Origine des recommandations

---

- ◆ Découverte des rayons X par Röntgen en 1895
- ◆ Découverte de la radioactivité par Becquerel en 1896
- ◆ Les premières radiographies et tentatives de radiothérapie étaient réalisées dès 1896
- ◆ Plusieurs accidents cutanés étaient signalés et le premier cas de cancer cutané radioinduit était rapporté en 1902
- ◆ 1921, des radiologues anglais créent un "Comité pour la protection contre les rayons X et le radium".
- ◆ 1928, les participants au deuxième Congrès International de Radiologie, tenu à Stockholm, mettent en place une "Commission Internationale de Protection contre les Rayons X et le Radium"

# Origine des recommandations

---

- ▶ 1950, la "Commission Internationale de Protection Radiologique", organisation non gouvernementale (reconnue par les Nations Unies).
- ▶ Les recommandations de la CIPR, n'ont aucun caractère obligatoire mais font référence sur le plan international, en raison de leur valeur scientifique et de leur approche prudente et réaliste des problèmes de radioprotection.
- ▶ Les recommandations de la CIPR ont servi de guide pour l'établissement des réglementations adoptées par de grands organismes internationaux, tels que l'ONU, l'OMS, l'AIEA, ainsi que par la CEE et par de nombreux pays.
- ▶ **Suisse:** Ordonnance fédérale sur la radioprotection (22 juin 1994).
- ▶ Recommandations de la Publication 60 de la CIPR.

# Grandeurs et unités dosimétriques

---

- ◆ La grandeur dosimétrique fondamentale en radioprotection, qui quantifie l'interaction d'un rayonnement avec la matière, est la dose absorbée.

$$D = \frac{dE_a}{dm}$$

- ◆ L'unité de dose absorbée est le gray (Gy), dose absorbée dans une masse de matière d'un kilogramme à laquelle les rayonnements ionisants communiquent en moyenne de façon uniforme une énergie de un joule:
  - ◆ 1 Gy = 1 J/kg
- ◆ La dose absorbée par unité de temps est le débit de dose absorbée, (Gy/s ou J/kg.s).

# La dose équivalente (equivalent de dose)

---

- ◆ A dose absorbée égale, les effets biologiques varient selon la nature des rayonnements.
- ◆ Facteur de pondération de rayonnement,  $W_R$ , par la CIPR en 1990, traduit l'action moyenne du rayonnement considéré sur un tissu ou un organe donné.

$$H_{T,R} = W_R \cdot D_{T,R}$$

- ◆ Dans le cas où le radionucléide considéré émet plusieurs rayonnements:

$$H_T = \sum_R W_R \cdot D_{T,R}$$

- ◆ L'unité de dose équivalente est le sievert (Sv = 1J/Kg)
- ◆ La dose équivalente permet de comparer les doses délivrées par des rayonnements différents.

# La dose équivalente (equivalent de dose)

## FACTEURS DE PONDERATION LIES A LA NATURE DU RAYONNEMENT

Nature	Energie	$W_R$
Photons	Toutes les énergies	1
Electrons, muons	Toutes les énergies	1
Neutrons	<10 keV	5
	10 keV - 100 keV	10
	100 keV - 2 MeV	20
	2 MeV - 20 MeV	10
	>20 MeV	5
Protons	>2 MeV	5
Particules alpha, fragments de fission, noyaux lourds		20

# La dose efficace (Equivalent de dose efficace)

---

- ◆ La dose efficace,  $E$ , est la somme des doses équivalentes reçues au niveau de tous les organes ou tissus exposés, chacune de ces doses étant pondérée par un facteur,  $W_T$ , lié à la radiosensibilité propre du tissu ou de l'organe considéré:

$$E = \sum_T W_T H_T$$

# La dose efficace (Equivalent de dose efficace)

## FACTEURS DE PONDERATION LIE A LA RADIOSENSIBILITE DES TISSUS

Organe	$W_T$ (CIPR 60)
Gonades	0.20
Seins	0.05
Moelle osseuse rouge	0.12
Côlon	0.12
Poumons	0.12
Estomac	0.12
Vessie	0.05
Foie	0.05
Oesophage	0.05
Thyroïde	0.05
Os (surface osseuse)	0.01
Peau	0.01
Reste de l'organisme	0.05

# La dose équivalente engagée

- ◆ La dose équivalente engagée pendant un temps,  $\tau$ , au niveau d'un tissu ou d'un organe,  $T$ , par suite d'une incorporation unique de radioactivité au temps  $t_0$ , est la dose équivalente au niveau de l'organe ou tissu résultant de l'incorporation considérée, intégrée sur le temps  $\tau$ .

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} H_T(t) dt$$

- ◆  $H_T(t)$  est le débit de dose délivrée à l'organe ou au tissu  $T$  au temps  $t$ .
- ◆ La CIPR a choisi d'évaluer les doses engagées sur une période de 50 ans pour les travailleurs et de 70 ans pour les individus du public.

# La dose efficace engagée

---

- ◆ La dose efficace engagée sur le temps  $\tau$ .

$$E(\tau) = \sum_T W_T H_T(\tau)$$

## Le concept de dose collective

- ◆ Pour avoir une estimation globale du risque stochastique encouru par une population (groupe de travailleurs ou de personnes du public).

# Principes fondamentaux de la radioprotection

---

## 1. La justification des pratiques

- ◆ Toute activité humaine susceptible d'entraîner une exposition de l'homme aux rayonnements ionisants doit être justifiée par les avantages qu'elle procure:
- ◆ ses bénéfices doivent être supérieurs à ses inconvénients

## 2. L'optimisation de la protection

- ◆ Le second principe implique que l'exposition des individus et des populations soit maintenue au niveau le plus bas que l'on puisse raisonnablement atteindre, compte tenu des facteurs économiques et sociaux
- ◆ ALARA (As Low As Reasonably Achievable): l'expression d'optimisation de la radioprotection adoptée par la CIPR.

# Principes fondamentaux de la radioprotection

---

## 3. La limitation des doses individuelles

- ◆ La limitation des doses individuelles proposée par la CIPR dans sa publication 60 procède d'une approche fondée sur l'appréciation du degré de tolérance d'une exposition. Une exposition peut être: inacceptable, tolérable, acceptable.
- ◆ Pour définir les niveaux de dose correspondant à ces trois degrés d'exposition, la CIPR a calculé la probabilité de mort résultant d'une exposition à des doses efficaces annuelles de, 10, 20, 30 et 50 mSv, correspondant à des doses cumulées au cours d'une vie professionnelle de 50 ans, respectivement de, 0.5, 1.0, 1.5 et 2.5 Sv.
- ◆ Pour les travailleurs, la CIPR a donc proposé d'ajouter à l'ancienne limite, toujours valable, de 50 mSv par an, une nouvelle limite de 100 mSv pour 5 ans, soit, 20 mSv par an. Cette limite correspond à un objectif de dose pour la vie de 1 Sv pour une durée de vie professionnelle de 50 ans.

# Formes d'exposition

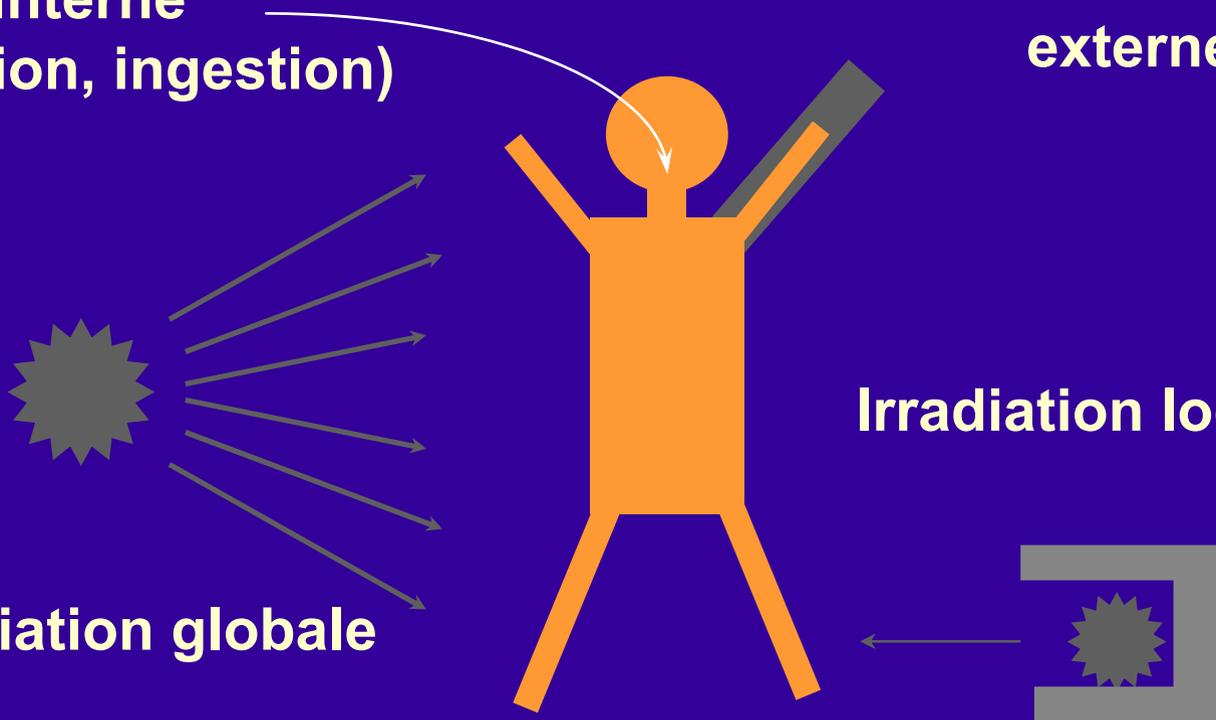
---

**Contamination  
interne  
(inhalation, ingestion)**

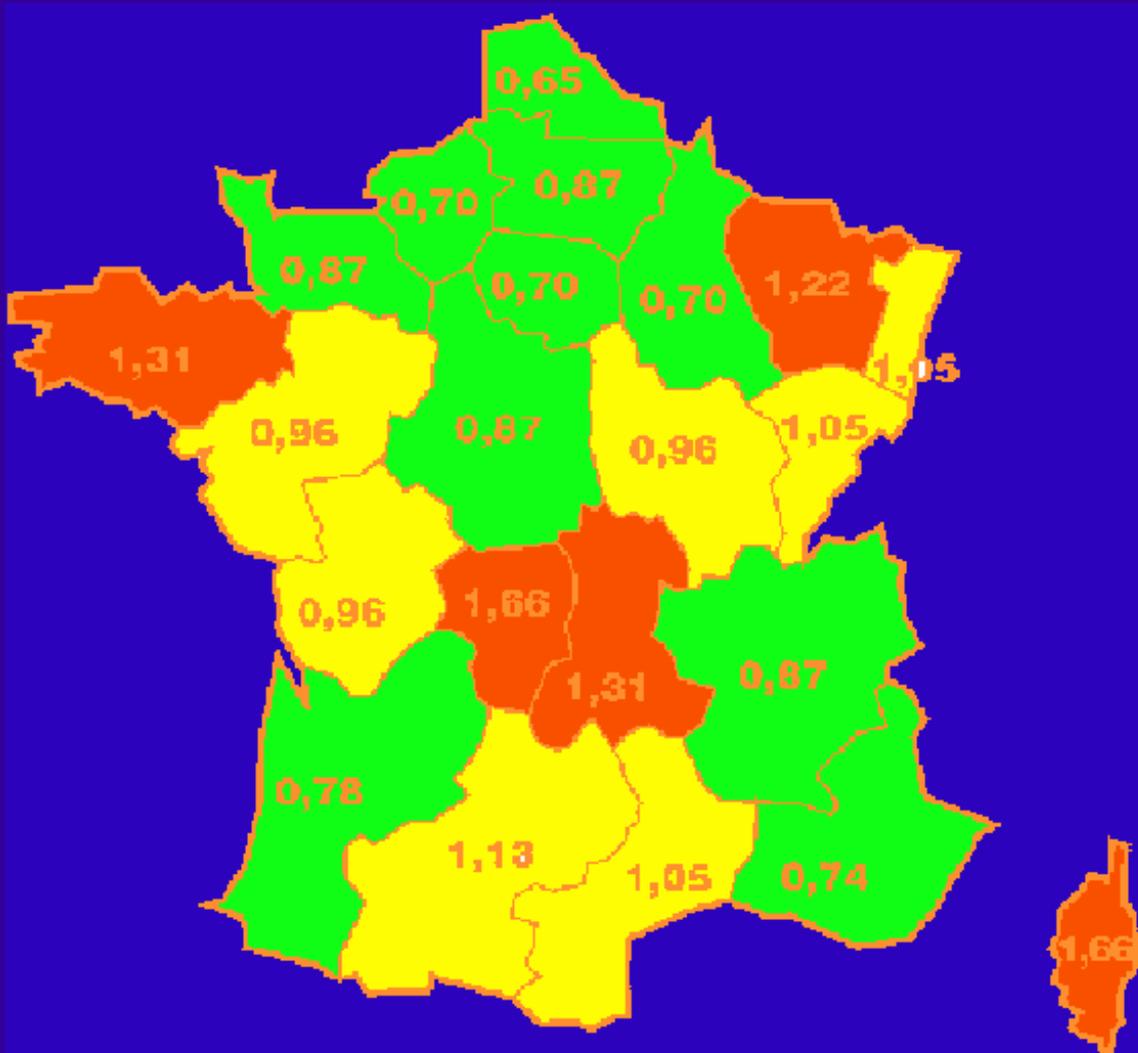
**Contamination  
externe**

**Irradiation globale**

**Irradiation localisée**



# Irradiation externe annuelle



*en mSv / an*

*Province du Kerala  
(Decan, Inde)  
8 mSv / an*

*Brésil  
12 à 130 mSv / an*

*Rhone:  
100 tonnes d'U /an  
100 milliards de Bq / an*

# Dose efficace en médecine nucléaire

Les valeurs habituellement retenues pour les examens courants, calculées à partir des doses efficaces par unité d'activité administrée sont données:

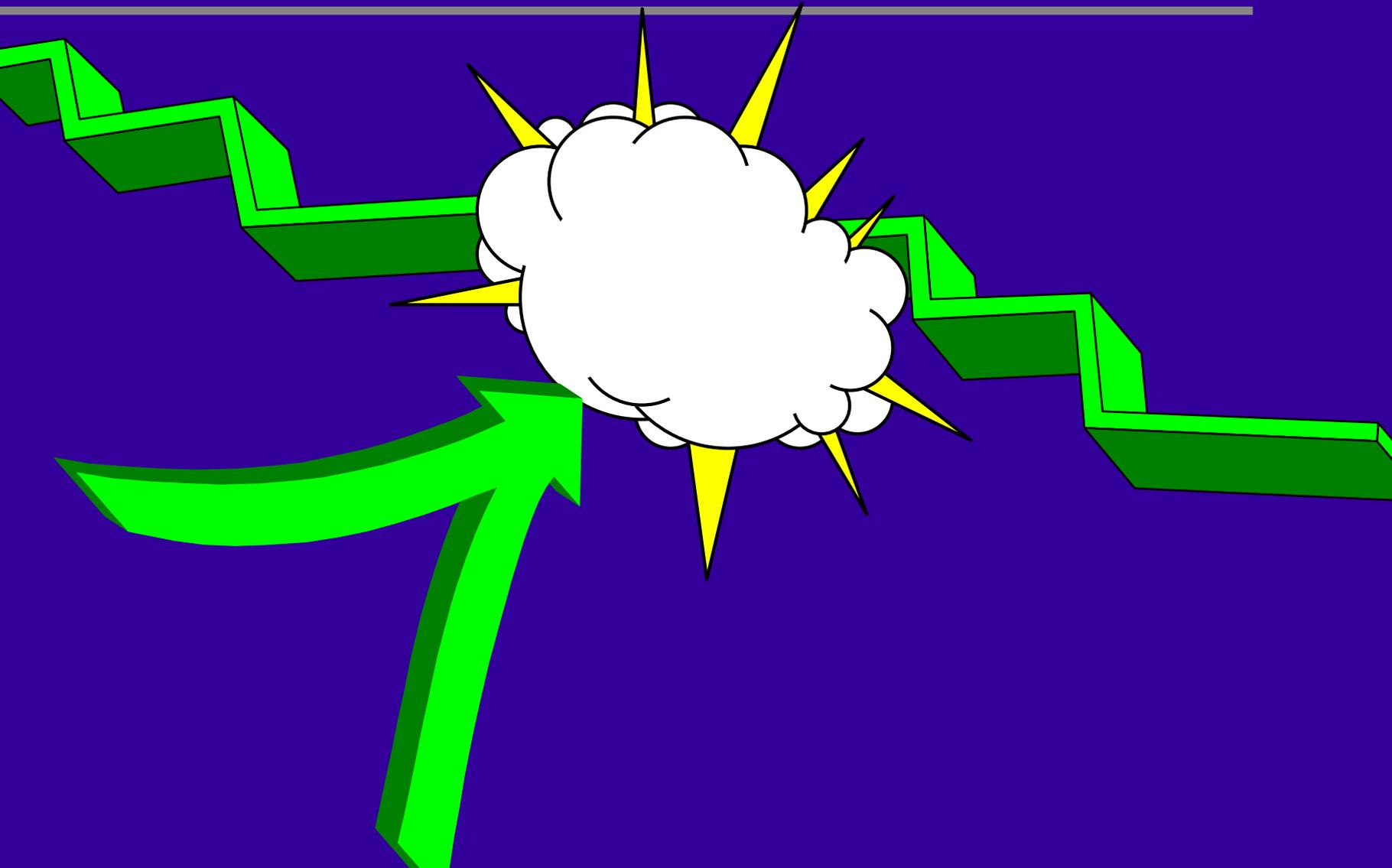
<b>Radiopharmaceutique</b>	<b>Activité (MBq)</b>	<b>Dose efficace (mSv)</b>
Thyroïdienne $^{99m}\text{Tc}$	20	0.24
Thyroïdienne $^{123}\text{I}$	4	0.9
Thyroïdienne $^{131}\text{I}$	2	2.2
Osseuse MDP- $^{99m}\text{Tc}$	700	4
Pulmonaire MAA- $^{99m}\text{Tc}$	100	1.1
Pulmonaire Aérosol- $^{99m}\text{Tc}$	40	0.6
Pulmonaire $^{133}\text{Xe}$	200	0.15
Myocardique MIBI- $^{99m}\text{Tc}$	1000	8
Cavités cardiaques Hématies- $^{99m}\text{Tc}$	700	7
Cérébrale HMPAO- $^{99m}\text{Tc}$	400	3.6
Rénale DTPA- $^{99m}\text{Tc}$	500	2.6
Rénale MAG 3- $^{99m}\text{Tc}$	200	1.5
Rénale DMSA- $^{99m}\text{Tc}$	100	0.9
Surrénalienne MIBG- $^{131}\text{I}$	40	0.6
Myocardique $^{201}\text{Tl}$	100	23

# Dose efficace par examen de radiodiagnostic

Type d'examen	Dose efficace (mSv)
Rachis cervical	0.85
Rachis dorsal	2.48
Rachis dorso-lombaire	4.75
Rachis lombo-sacré	4.73
Bassin, hanche	1.15
Abdomen sans préparation	1.71
Urographie intraveineuse	10.92
Hystéroggraphie	3.58
Cholécystographie	8.52
Crâne	0.61
Lavement baryté	10.96
Transit gastro-duodéal	7.18
Thorax	0.18
Artériographie cérébrale	1.96
Artériographie thoracique	1.69
Artériographie abdominale	5.49
Artériographie des membres inférieur	3.19
Phlébographie	12.59
Contenu utérin	2.81
Hystéro-salpingo-graphie (HSG)	4.58

# Principes de dosimétrie interne

---



# Calcul de la dose absorbée au tissu

<i>Parametres Biologiques</i>	<i>Paramètres Physiques</i>
1. Combien d'activité dans l'organe en question?	1. Quelle est l'énergie émise par cette activité?
2. Combien l'activité reste t-elle dans l'organe ou tissu?	2. Quelle est la fraction de l'énergie émise qui sera déposée dans le tissu?

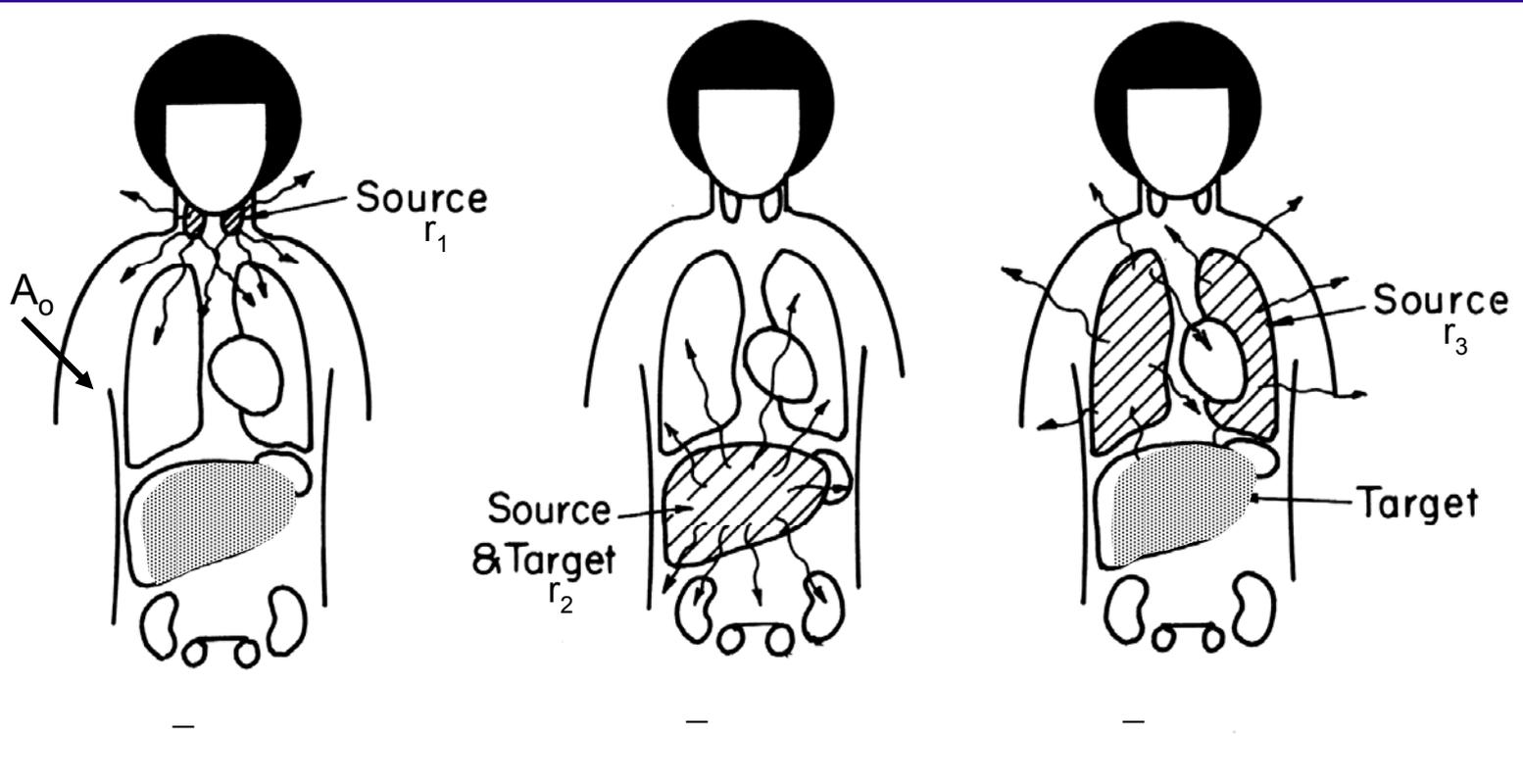
*Schéma pour calculer la dose absorbée*

**Medical Internal Radiation Dose (MIRD)**

Committee of the Society of Nuclear Medicine

# Modèle de calcul

Administered  
Activity



# Le formalisme du MIRD

"la dose moyenne absorbée (mGy) par unité d'activité administrée (MBq)"

$$\frac{\bar{D}}{A_0} = \tau S$$

L'équation de la dose est divisée en 2 paramètres:

## 1. Paramètres biologiques ( $\tau$ )

- Le temps moyen que l'activité reste dans l'organe source
- Dépend du comportement physiologique du radiopharmaceutique
- Dépend de la décroissance radioactive

## 2. Paramètres physiques (S-value)

- Dépend de la nature des radiations
- Dépend des caractéristiques d'absorption
- Dépend du modèle anatomique

# Dose moyenne absorbée

---

- Il convient de tabuler le produit de  $\Delta$  et  $\Phi$ , représenté par  $S$ , *i.e.* dose moyenne absorbée par unité d'activité cumulée.
- Il est utile d'exprimer la dose absorbée à l'organe cible en terme de dose par unité d'activité administrée,  $A_0$ :
- Le temps de residence dans l'organe source =

$$\tau = \frac{\tilde{A}}{A_0}$$

- La dose moyenne à l'organe cible par unité d'activité administrée:

$$\frac{\bar{D}}{A_0} = \tau \cdot S$$

# Schéma du MIRD

---

1. Les radiopharmaceutiques émettent plusieurs types de radiations
  2. Les radiopharmaceutiques se localisent dans plusieurs organes source
- Pour estimer la dose que reçoit l'**organe cible** il est nécessaire de sommer tous les produits des  $\tau$  pour les **organes sources** et les valeurs  $S$  associant à chaque **organe source** un **organe cible** :

$$\frac{\bar{D}}{A_0} = \sum \tau \cdot S$$

# Schéma du MIRD

$$\frac{\bar{D}(r_k \leftarrow r_h)}{A_0} = \frac{\tau_h \sum_i \Delta_i \phi_i(r_k \leftarrow r_h)}{m_k}$$
$$= \tau_h \sum_i \Delta_i \Phi_i(r_k \leftarrow r_h)$$
$$= \tau_h S(r_k \leftarrow r_h)$$

*i* désigne un **type de radiation** émise,  
*h* désigne **source** et  
*k* désigne **cible**

Plusieurs organes source  $r_h$  contribuent à la dose absorbée par un organe cible  $r_k$ .

# Schéma du MIRD

Ces contributions doivent être sommées:

$$\frac{\bar{D}(r_k)}{A_0} = \sum_h \bar{D}(r_k \leftarrow r_h) = \sum_h \tau_h S(r_k \leftarrow r_h)$$

Exemple:

- Organes sources sont le foi (liver), spleen (rate) et les reins (kidneys)
- Organe cible est le foi (liver)

$$\begin{aligned} \frac{\bar{D}(\text{liver})}{A_0} &= \tau_{\text{liver}} \cdot S(\text{liver} \leftarrow \text{liver}) \\ &+ \tau_{\text{spleen}} \cdot S(\text{liver} \leftarrow \text{spleen}) \\ &+ \tau_{\text{kidneys}} \cdot S(\text{liver} \leftarrow \text{kidneys}) \end{aligned}$$

NB: Chaque organe source est aussi un organe cible (self dose, k=h)

# Energie moyenne émise par transition nucléaire, $\Delta_i$

---

L'énergie moyenne d'un rayonnement de type  $i$  émis par transition nucléaire,  $\Delta_i$ , est donnée par:

$$\Delta_i = K n_i E_i$$

- $K$  est une constante dépendant des unités choisies pour  $\Delta$  et  $E$ ,
- $n_i$  est le nombre de particules du rayonnement de type- $i$  émis par transition nucléaire
- $E_i$  est l'énergie moyenne par particule du rayonnement de type- $i$ .

L'énergie totale émise par transition est:

$$\Delta = \sum_i \Delta_i = K \sum_i n_i E_i$$

# La fraction absorbée: $\phi_i$

---

La fraction absorbée,  $\phi$ , est la fraction de l'énergie émise par l'organe source  $r_h$  qui est absorbée dans l'organe cible  $r_k$

$$\phi_i(r_k \leftarrow r_h) = \frac{i\text{-type energy in source } r_h \text{ and absorbed in target } r_k}{i\text{-type energy in source } r_h}$$

Dépend de:

1. Type et énergie du rayonnement
2. Dimension, forme et composition de la source et la cible
3. Composition du tissu traversé

$$0 \leq \phi_i(r_k \leftarrow r_h) \leq 1$$

# Rayonnements non-pénétrant

---

Les rayonnements émis dans l'organe source contribuent de façon insignifiante à la dose absorbée dans les organes cibles autre que l'organe source lui même.

$$\phi_{np}(r_h \leftarrow r_h) = 1$$

$$\phi_{np}(r_k \leftarrow r_h) = 0 \quad (k \neq h)$$

Les photons ayant une énergie  $< 20$  keV, particules  $\beta$ , électrons sont considérés non-pénétrants pour la plupart des organes/tissus humains considérés comme organe source.

# Rayonnements pénétrants

---

Les rayonnements émis dans l'organe source contribuent de façon significative à la dose absorbée dans les autres organes cibles.

$$0 \leq \phi_p(r_k \leftarrow r_h) < 1$$

$$0 \leq \phi_p(r_k \leftarrow r_h) < 1 \quad (k \neq h)$$

Les photons ayant une énergie  $> 20$  keV sont considérés pénétrants.

Photon absorbed fractions are tabulated for a variety of source shapes (spheres, cylinders, ellipsoids) and sizes (MIRD Pamphlets No. 3, 1968 and No. 8, 1971).

Photon absorbed fractions for many pairs of organs in an anthropomorphic mathematical model have also been tabulated (MIRD Pamphlet No. 5, 1969).

# La fraction absorbée spécifique : $\Phi_i$

---

La fraction spécifique absorbée est la fraction d'énergie absorbée dans la cible par unité de masse de l'organe cible.

$$\Phi_i(r_k \leftarrow r_h) = \frac{\phi_i(r_k \leftarrow r_h)}{m_k}$$

1. Specific absorbed fractions at points in water as a function of distance from point sources of photons and b-particles have been tabulated (MIRD Pamphlets No. 2, 1968 and No. 7, 1971).
2. Photon specific absorbed fractions for many pairs of organs in an anthropomorphic mathematical phantom have been tabulated (MIRD Pamphlet No. 5, 1978).

# La dose absorbée moyenne par unité d'activité cumulée, $S$

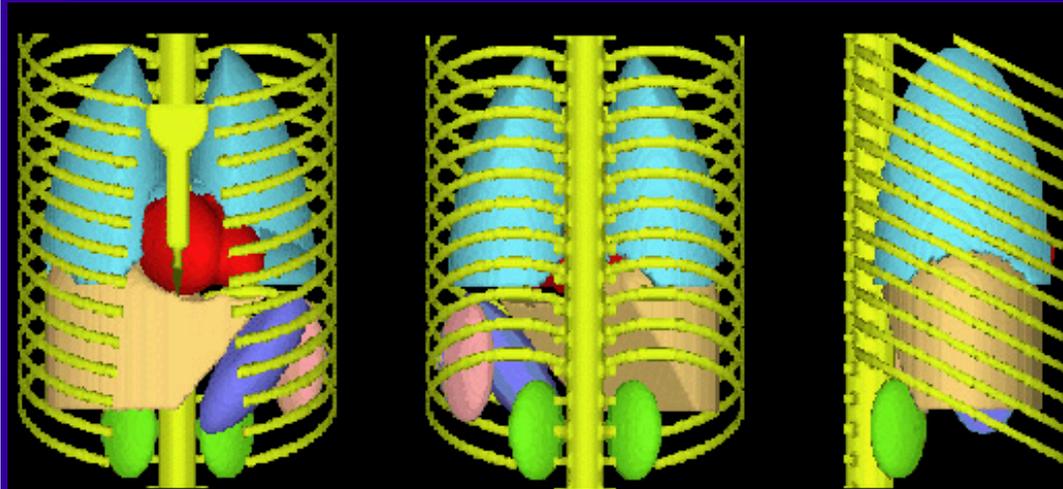
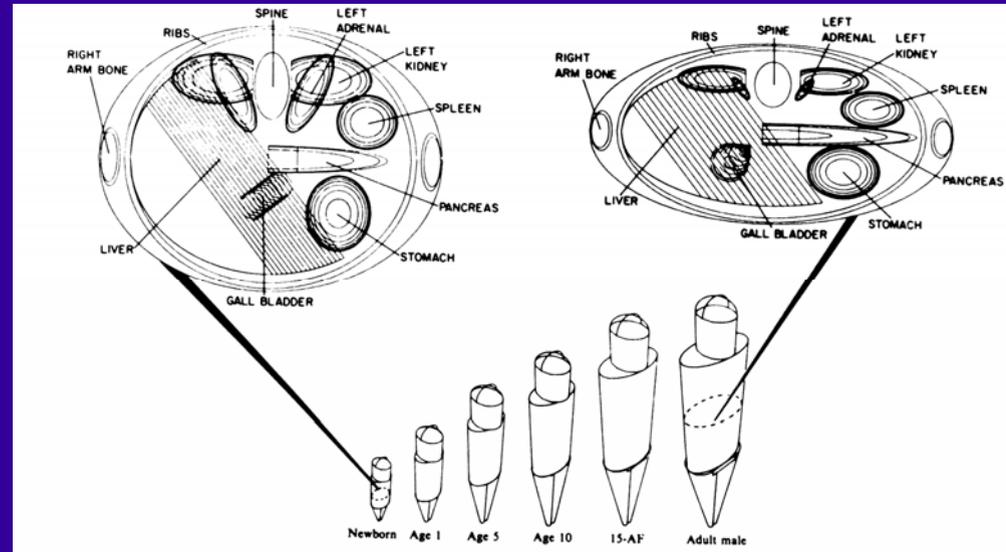
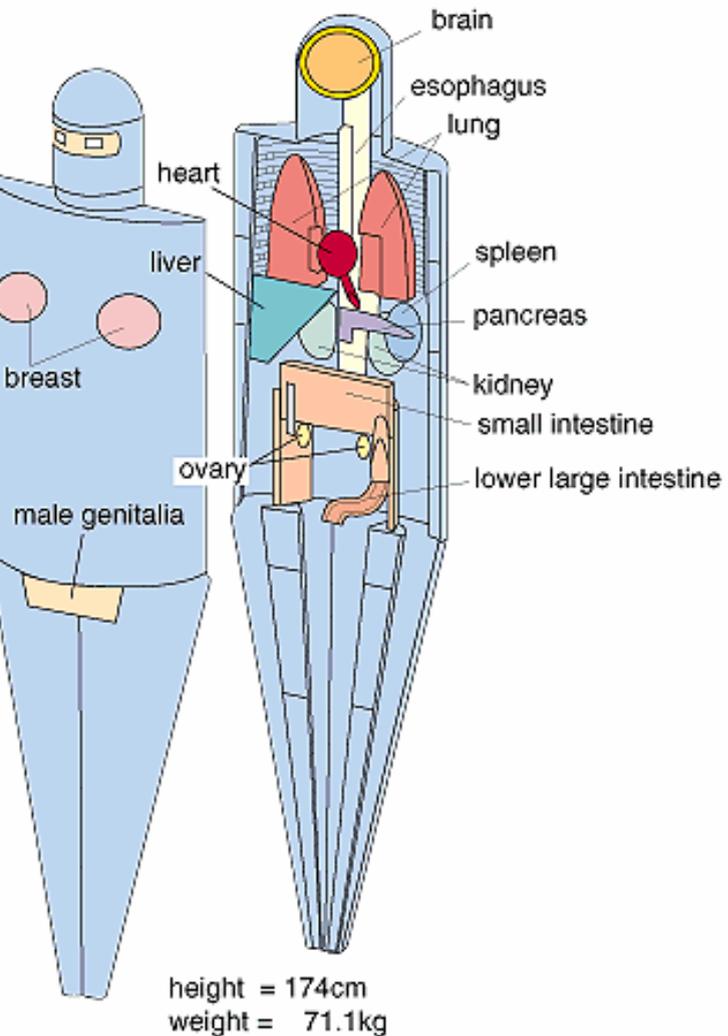
---

Les valeurs de  $\Delta_i$  et  $\Phi_i$  peuvent être combinés en un seul paramètre  $S$  pour tous les types de rayonnements et pour toutes les paires individuelles d'organes source et cible:

$$S(r_k \leftarrow r_h) = \sum_i \Delta_i \Phi_i(r_k \leftarrow r_h)$$

Les valeurs  $S$  sont tabulées pour plusieurs paires d'organes, pour 117 radioéléments, en utilisant le modèle anthropomorphique du MIRD (MIRD Pamphlet No. 11, 1975).

# Fantômes mathématiques/numériques



# L'activité cumulée, $\tilde{A}$

---

L'activité cumulée est la somme de toutes les transitions nucléaires dans l'organe source  $h$  pendant un intervalle de temps donné.

La somme est équivalente à l'intégration pendant cet intervalle de temps:

$$\tilde{A}_h = \int_0^{\infty} A_h(t) dt$$

$A(t)$  est l'activité dans l'organe source  $h$  en fonction du temps.

# Demi-vie effective: $T_{\text{eff}}$

Dans le cas d'une incorporation instantanée avec une clearance par décroissance physique et excrétion biologique, l'activité est donnée par:

$$A_h(t) = A_h e^{-(\lambda + \lambda_j)t}$$

$A_h$  est l'activité maximum dans l'organe source  $h$

$\lambda$  est la constante de désintégration physique ( $\ln 2 / T$ )

$\lambda_j$  est la constante de clearance biologique ( $\ln 2 / T_j$ )

La constante d'élimination effective (demi-vie effective) est définie comme suit:

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{biol}} + \lambda_{\text{phys}}$$

$$\frac{1}{T_{\text{eff}}} = \frac{1}{T_{\text{biol}}} + \frac{1}{T_{\text{phys}}}$$

# Activité cumulée:

$$\tilde{A}$$

$$\begin{aligned}\tilde{A}_h &= \int_0^{\infty} A_h(t) dt = \int_0^{\infty} A_h \exp\left(-\frac{\ln(2)}{T_{eff}} t\right) dt \\ &= \frac{1}{\ln 2} A_h T_{eff} \\ &= \frac{A_h}{\lambda_{eff}}\end{aligned}$$

Dans la plupart des situations, l'activité dans l'organe ne peut pas être représentée par une seule exponentielle:

$$A_h(t) = A_0 \sum_j \alpha_{hj} \exp-(\lambda + \lambda_j)t$$

$$\tilde{A}_h(0, \infty) = A_0 \sum_j \frac{\alpha_{hj}}{(\lambda + \lambda_j)}$$

# Résumé (dosimétrie interne)

---

## I. Données de distribution biologiques

Connaissance de la distribution d'activité dans le corps et l'activité déposée dans l'organe cible.

## II. Paramètres physiques

Paramètres nucléaires pour un radioélément particulier: type de particule et énergie des particules par transition et énergie émise par transition (MIRD; Radionuclide Data and Decay Schemes, The Society of Nuclear Medicine, 1989).

## III. Schema pour calculer la dose absorbée

1. Medical Internal Radiation Dose (MIRD) Committee of the Society of Nuclear Medicine (MIRD Pamphlet No. 1, Revised, 1976)
2. MIRD Primer for absorbed dose calculations (SNM) 1991