

## Chapitre 8

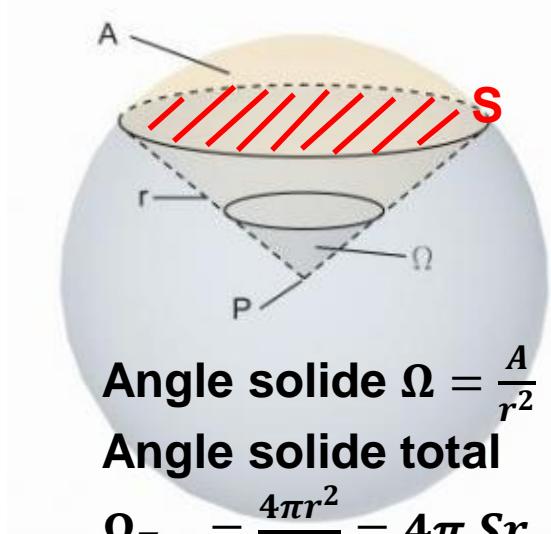
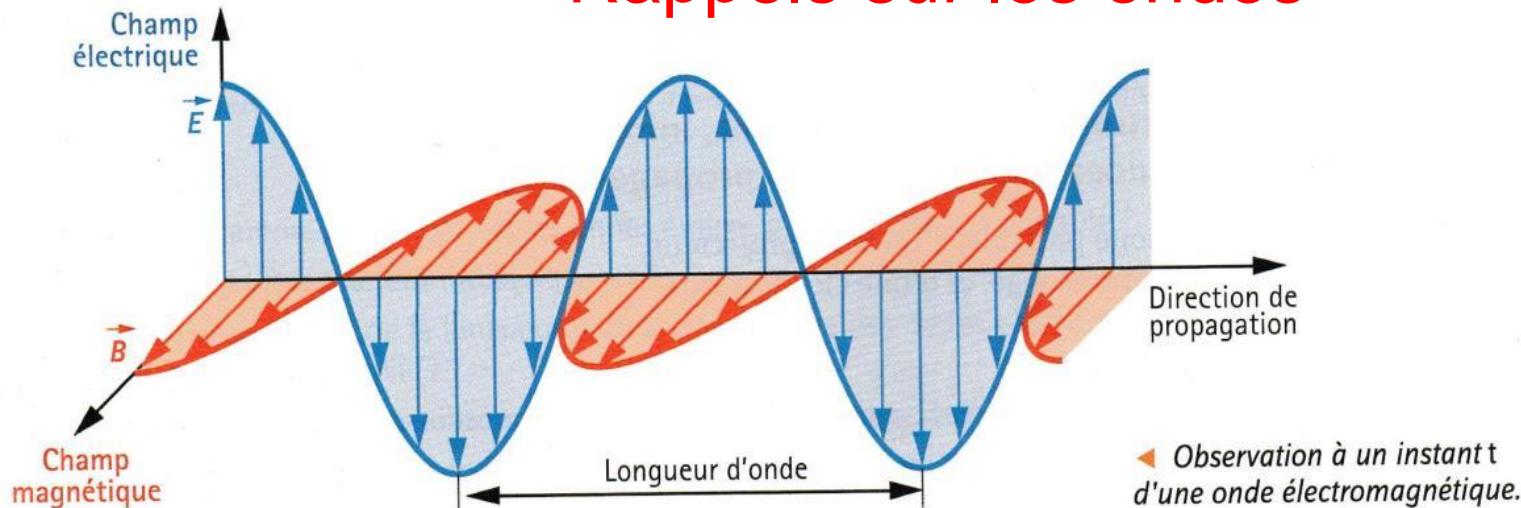
# Interactions des rayonnements avec la matière: photons (1/2).

Dr. Jean-François ADAM

# Objectifs pédagogiques du cours

- Les photons en tant que rayonnement ionisants
  - Origine
  - Ondes/particules
  - Rayonnements indirectement ionisants
- Connaître les principaux modes d'interactions des photons avec la matière
  - Effet photoélectrique, diffusion Rayleigh, diffusion Compton, création de paires
  - Transfert d'énergie: mise en mouvement de particules chargées

# Rappels sur les ondes



## Paramètres principaux

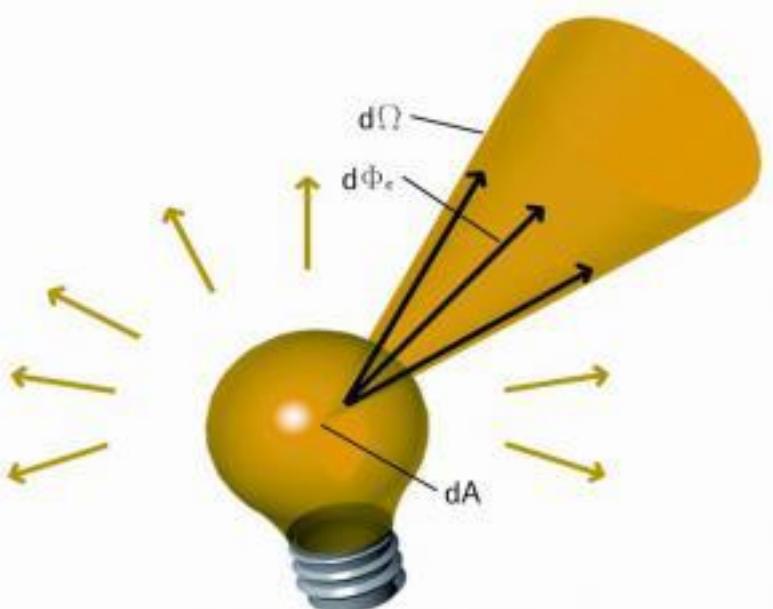
Période  $T = 1/\nu$  exprimée en s

Longueur d'onde dans le vide  $\lambda = cT = c/\nu$  exprimée en m

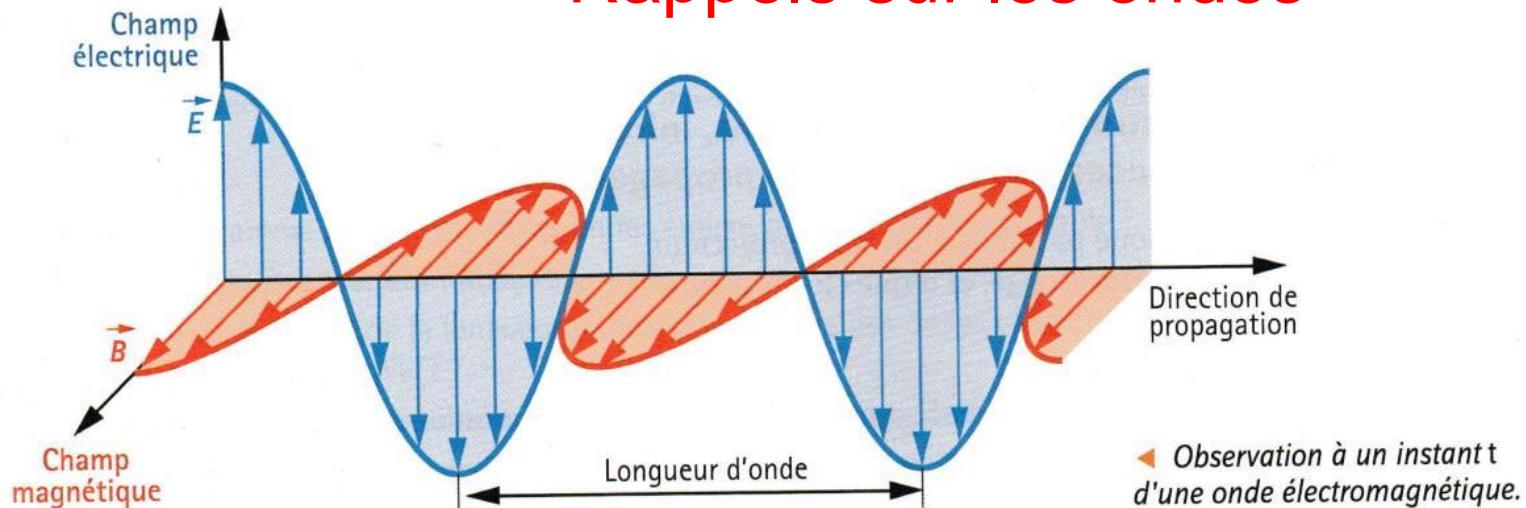
Puissance radiante:  $\Phi$  Energie totale transportée par unité de temps (W)

Intensité radiante : puissance radiante transportée dans une direction donnée  $I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$  (W/Sr)

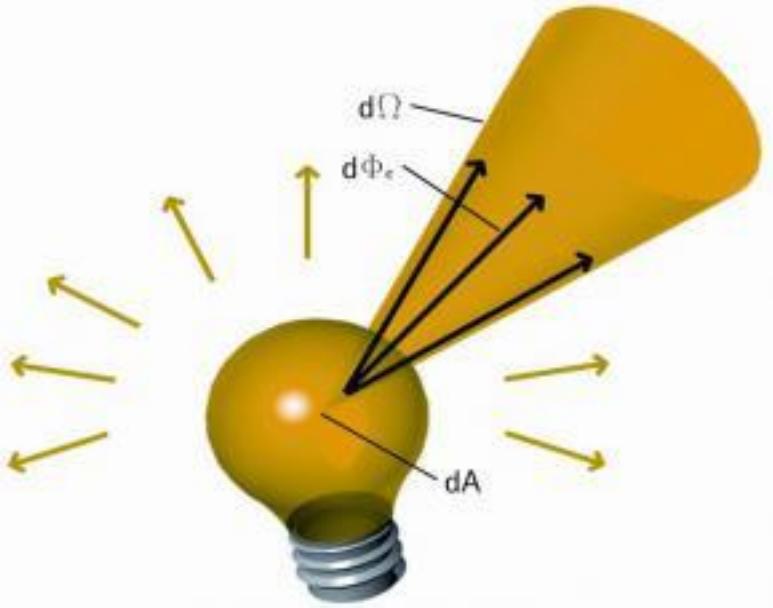
Luminance énergétique  $L=I/S$  (W/m<sup>2</sup>/Sr)



# Rappels sur les ondes

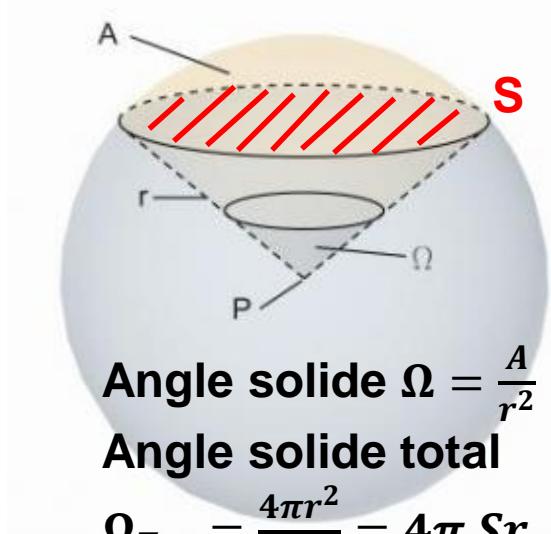


$\nu$  est la fréquence de l'onde (Hz)



## Paramètres principaux

- Période  $T = 1/\nu$  exprimée en s
- Longueur d'onde dans le vide  $\lambda = cT = c/\nu$  exprimée en m
- Puissance radiante:  $\Phi$  Energie totale transportée par unité de temps (W)
- Intensité radiante : puissance radiante transportée dans une direction donnée  $I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$  (W/Sr)
- Luminance énergétique  $L=I/S$  (W/m<sup>2</sup>/Sr)

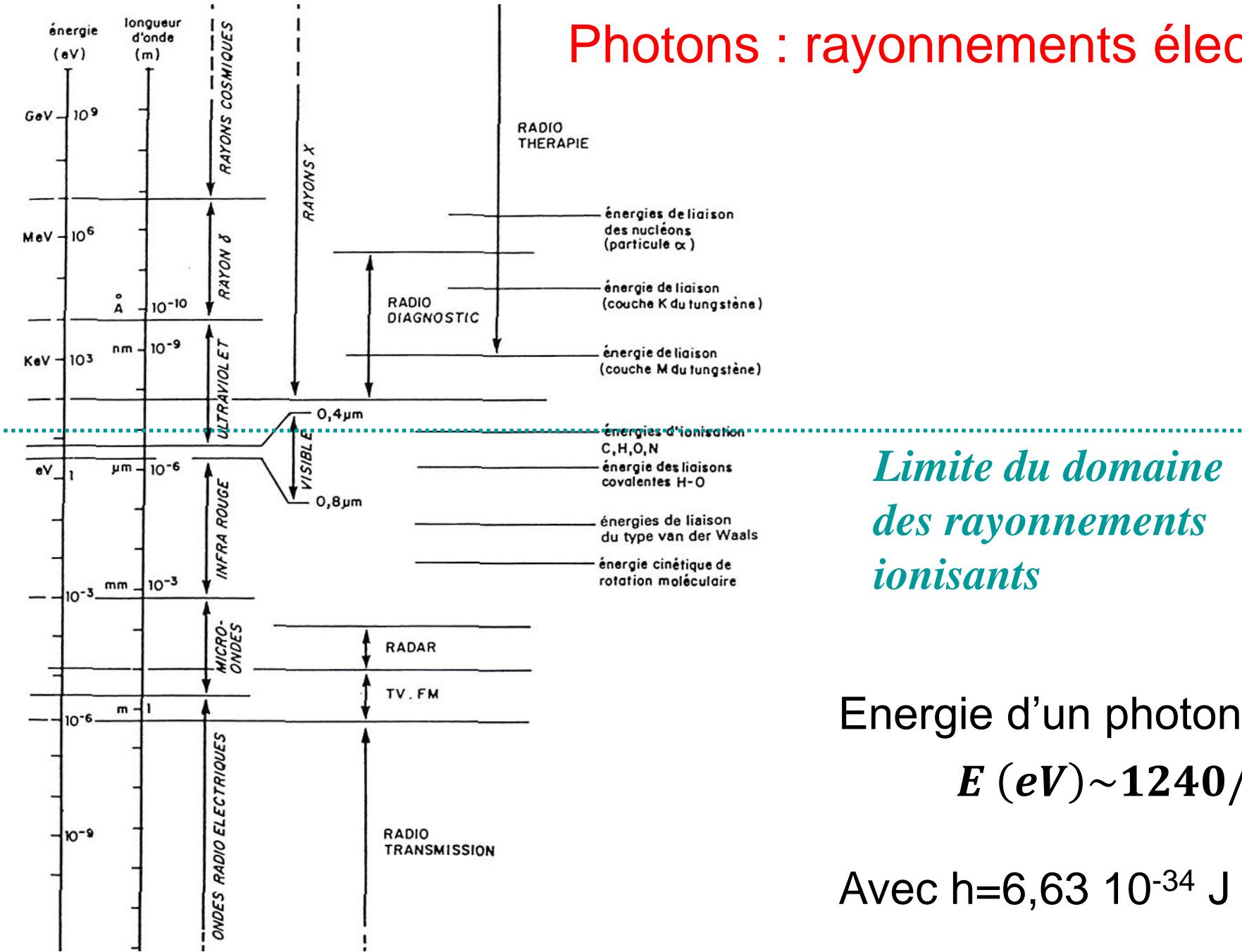


$$\text{Angle solide } \Omega = \frac{A}{r^2}$$

Angle solide total

$$\Omega_{Tot} = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi \text{ Sr}$$

# Photons : rayonnements électromagnétiques



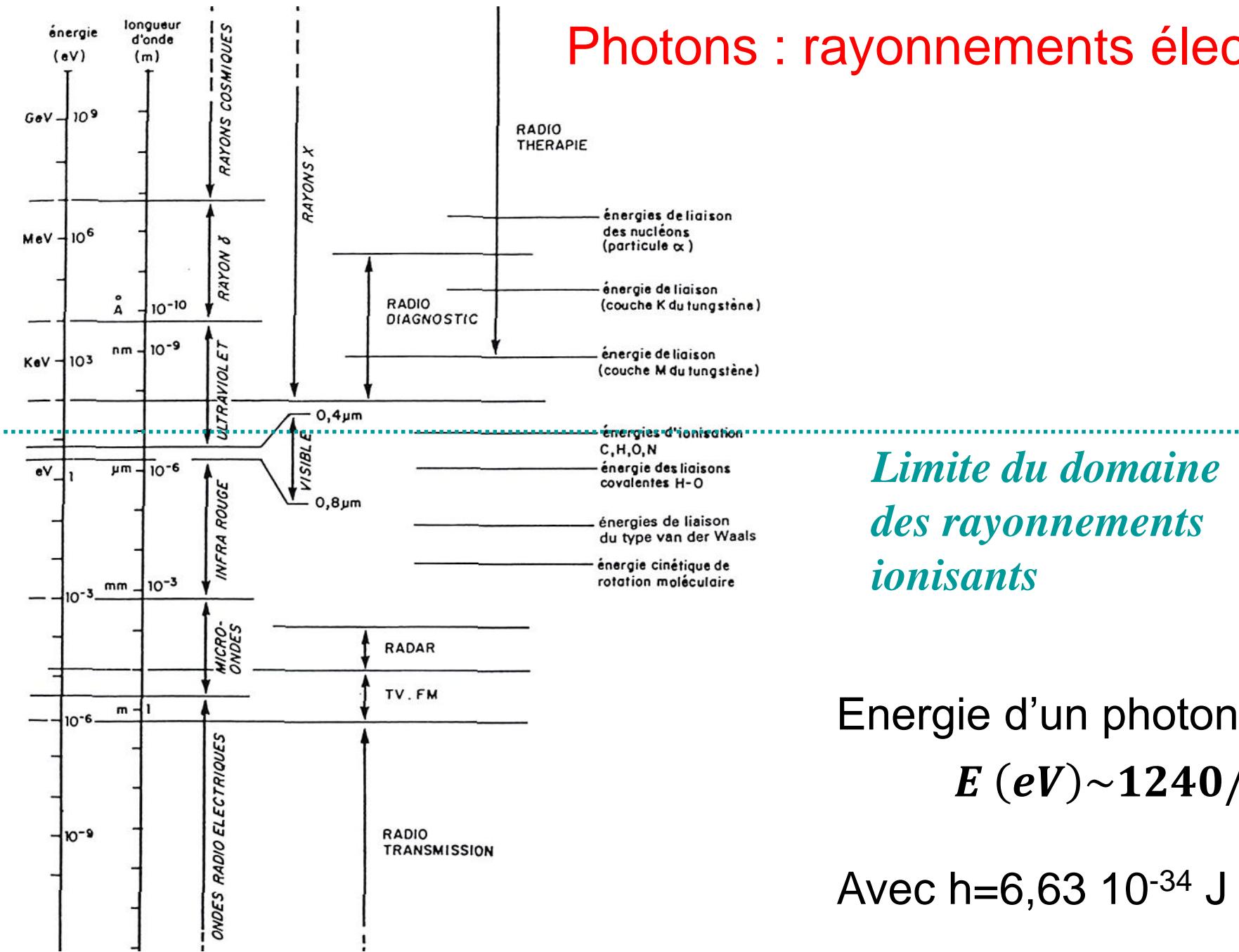
*Limite du domaine des rayonnements ionisants*

$$\text{Energie d'un photon } E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$E \text{ (eV)} \sim 1240/\lambda \text{ (nm)}$$

Avec  $h=6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$

# Photons : rayonnements électromagnétiques



*Limite du domaine des rayonnements ionisants*

$$\text{Energie d'un photon } E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$E \text{ (eV)} \sim 1240/\lambda \text{ (nm)}$$

Avec  $h=6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$

# Photons : rayonnements électromagnétiques / Particules neutres de masse nulle

- Rayons  $\gamma$  :
  - Gammas de désexcitation suite à désintégration radioactive,
  - gammas d'annihilation
- Rayons X
  - X de freinage (spectre continu)
  - X de réarrangement (fluorescence, spectre de raies)

# Interactions des photons avec la matière

- **Dans un premier temps : interaction du photon avec un atome, un électron ou un noyau de la cible**
  - Non obligatoire et déjà rare aux énergies utilisées en santé : probabilité = section efficace, coefficient d'atténuation
  - Loi d'atténuation (proportion de photons ayant interagi)
- **Les particules chargées éventuellement mises en mouvement se comportent alors comme vu au ch 6-7 (excitations, ionisations)**

**>> rayonnements **indirectement ionisants****

# Interactions des photons avec la matière

- **Dans un premier temps : interaction du photon avec un atome, un électron ou un noyau de la cible**
  - Non obligatoire et déjà rare aux énergies utilisées en santé : probabilité = section efficace, coefficient d'atténuation
  - Loi d'atténuation (proportion de photons ayant interagi)
- **Les particules chargées éventuellement mises en mouvement se comportent alors comme vu au ch 6-7 (excitations, ionisations)**

**>> rayonnements **indirectement ionisants****

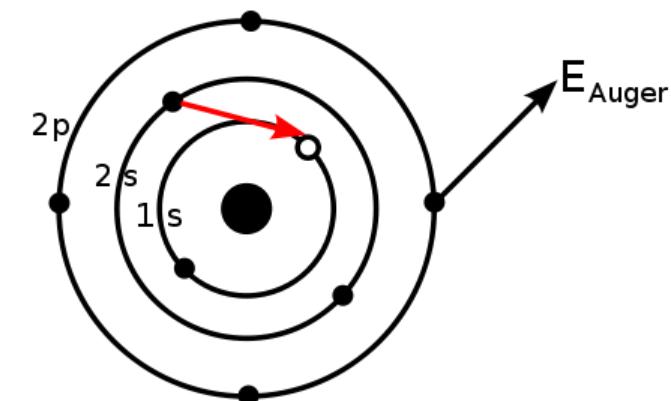
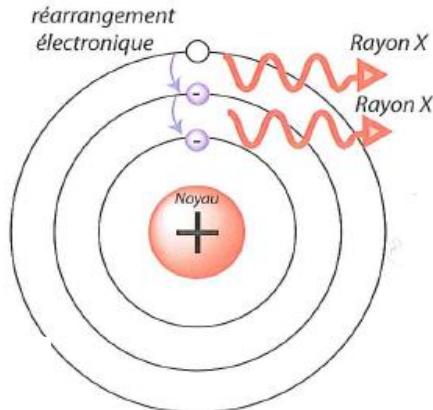
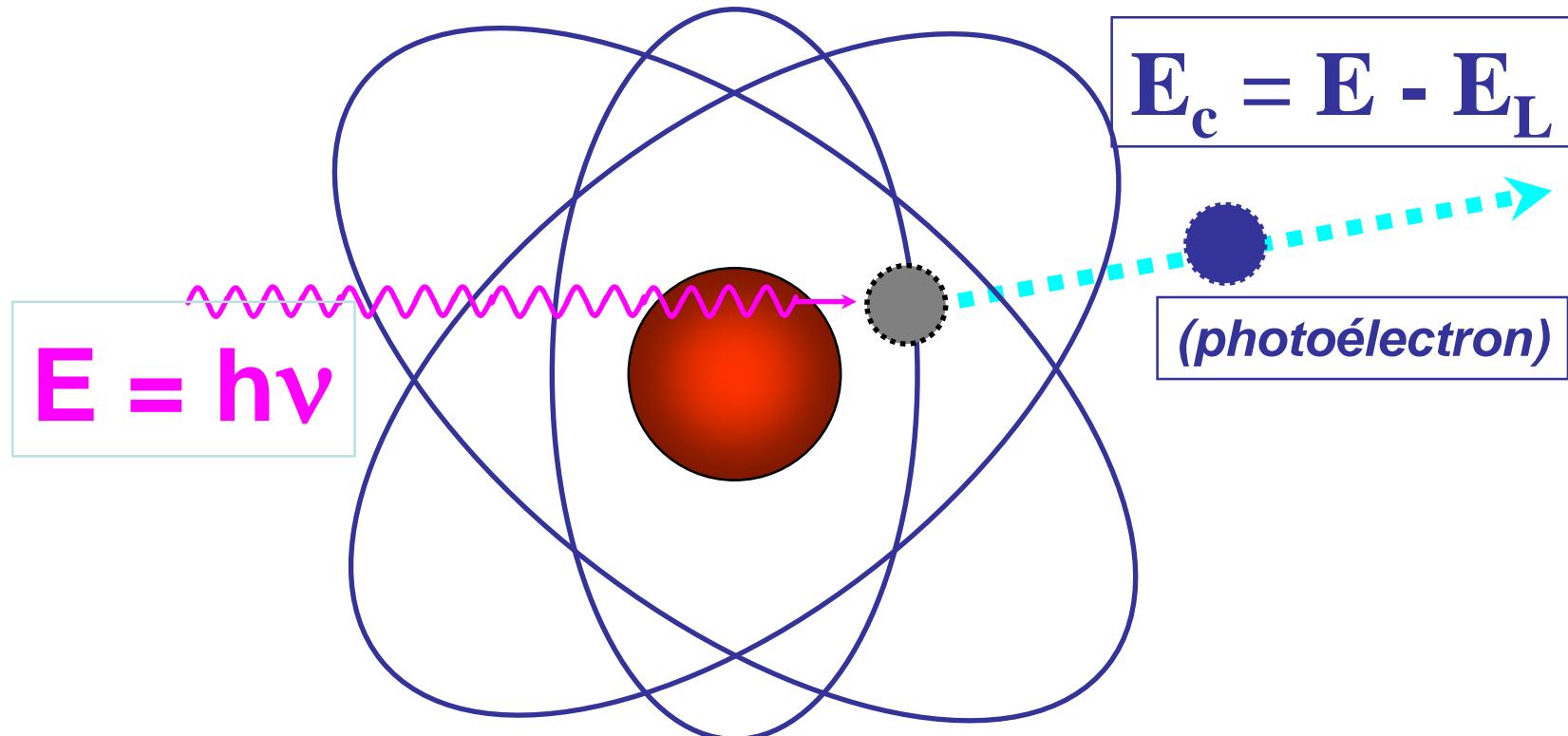
# Photons : rayonnements indirectement ionisants

- **4 principaux types d'interactions :**
  - Effet photoélectrique (électron des couches profondes)
  - Diffusion Rayleigh (Atome)
  - Diffusion Compton (électron des couches périphériques)
  - Création de paire  $e^-/e^+$  (Noyau)
- **Conséquences possibles:**
  - transmission
  - absorption/diffusion
  - Mise en mouvement de particules chargées

# Photons : rayonnements indirectement ionisants

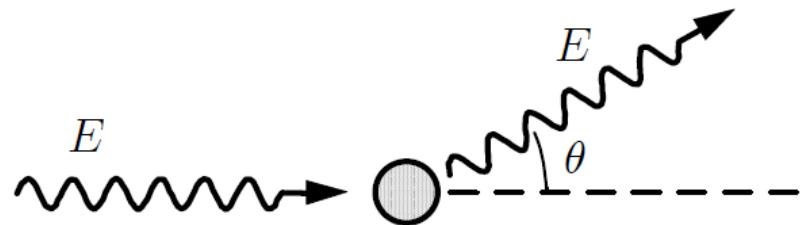
- **4 principaux types d'interactions :**
  - Effet photoélectrique (électron des couches profondes)
  - Diffusion Rayleigh (Atome)
  - Diffusion Compton (électron des couches périphériques)
  - Création de paire  $e^-/e^+$  (Noyau)
- **Conséquences possibles:**
  - transmission
  - absorption/diffusion
  - Mise en mouvement de particules chargées

# Effet photoélectrique ou absorption photoélectrique



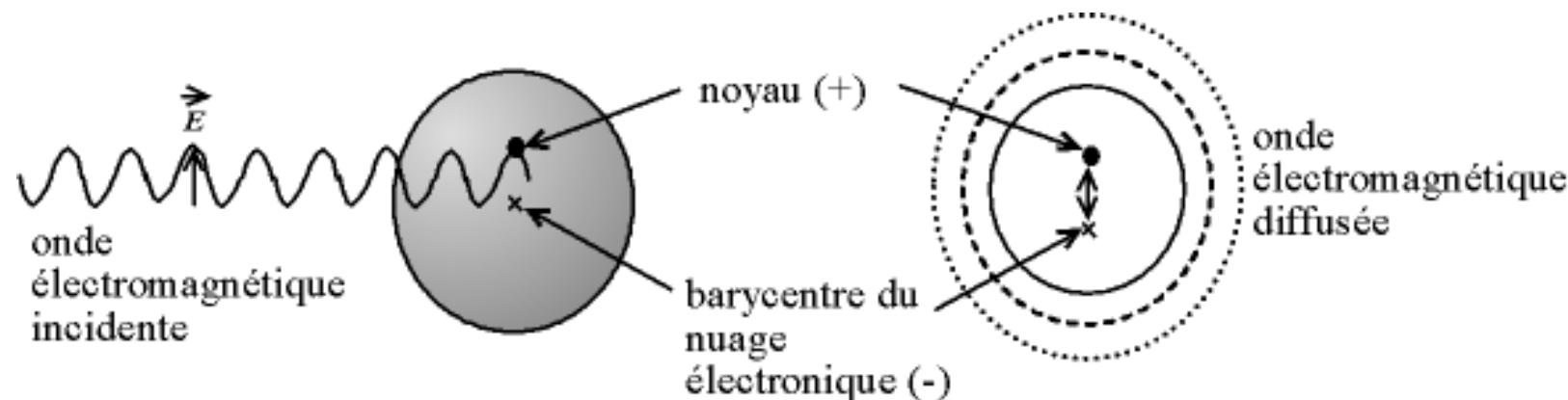
+ phénomènes de relaxation : fluorescence / émission Auger

# Diffusion Rayleigh ou diffusion cohérente



Rayleigh scattering

Equivalent à un « choc élastique »  
Pas de perte d'énergie, pas de particules chargées (pas d'ionisation), Angles faibles  
En compétition, mais 100 à 10000 x moins probable que l'effet photoélectrique



# Effet Compton / Diffusion Compton

« diffusion incohérente » équivalente à « choc inélastique »

*Photon incident*

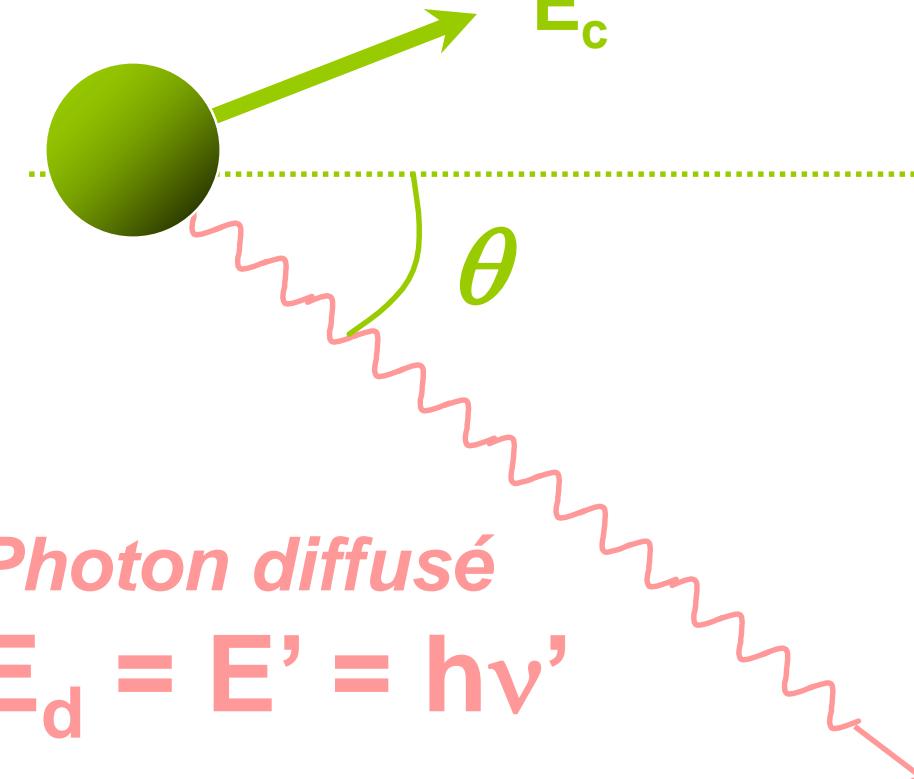
$$E = h\nu$$



$$E = E_c + E_d + (E_L)$$

*Energie de liaison négligée  
Car électrons périphériques*

*Énergie cinétique*  
 $E_c$



*Photon diffusé*

$$E_d = E' = h\nu'$$

# Effet Compton / Diffusion Compton

« diffusion incohérente » équivalente à « choc inélastique »

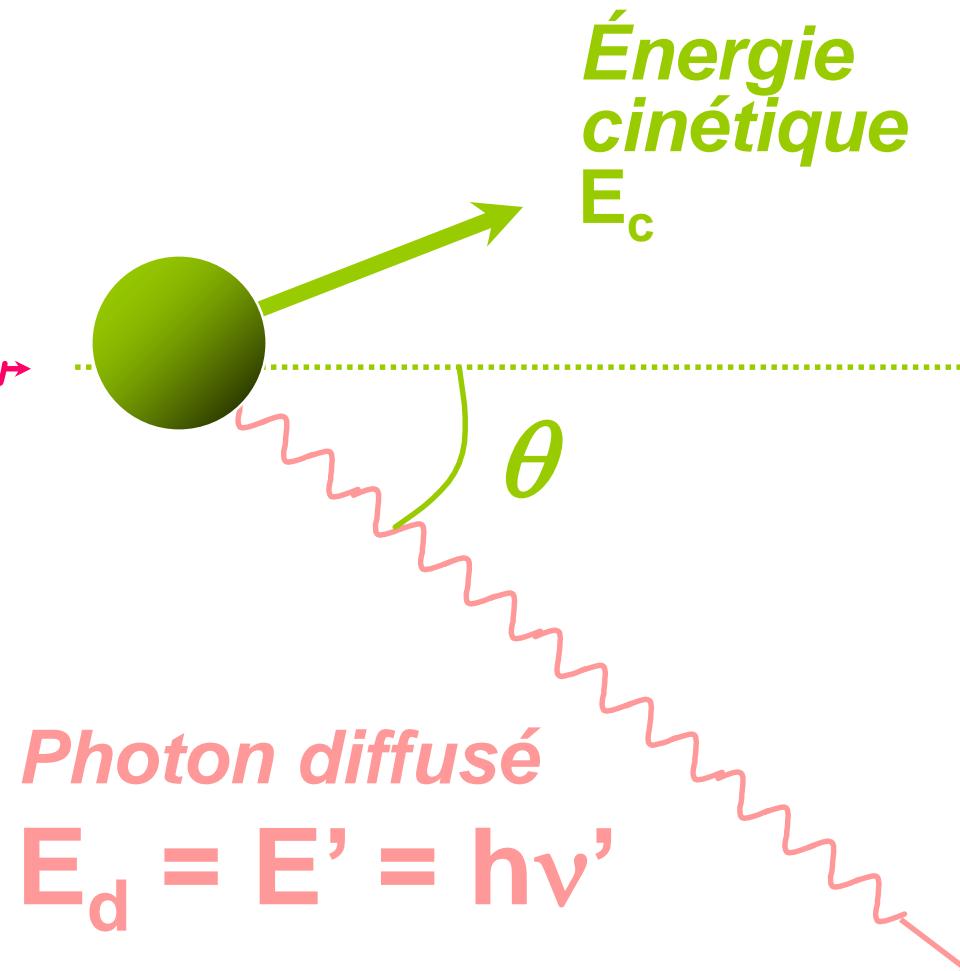
**Photon incident**

$$E = h\nu$$



$$E = E_c + E_d + (E_L)$$

*Energie de liaison négligée  
Car électrons périphériques*



# Effet Compton / Diffusion Compton

## « diffusion incohérente » équivalente à « choc inélastique »

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + (1 - \cos \theta)h\nu/m_e c^2}, \text{ avec } m_e c^2 = 511 \text{ keV}$$

Avec  $\alpha = \frac{E}{m_e c^2} = \frac{h\nu}{m_e c^2}$ , l'énergie relative on a  $h\nu' = h\nu \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos(\theta))}$   
et  $E_c = h\nu(1 - \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos(\theta))})$  donc  $E_c = h\nu \frac{\alpha(1 - \cos(\theta))}{1 + \alpha(1 - \cos(\theta))}$

### Valeurs caractéristiques

Choc « tangentiel » :  $\theta = 0^\circ$   $h\nu' = h\nu$  et  $E_c = 0$

Choc « latéral »  $\theta = 90^\circ$   $h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha}$  et  $E_c = h\nu \frac{\alpha}{1 + \alpha}$

Choc « Frontal »  $\theta = 180^\circ$   $h\nu' = \frac{h\nu}{1 + 2\alpha}$  et  $E_c = h\nu \frac{2\alpha}{1 + 2\alpha}$

# Effet Compton / Diffusion Compton

## « diffusion incohérente » équivalente à « choc inélastique »

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + (1 - \cos \theta)h\nu/m_e c^2}, \text{ avec } m_e c^2 = 511 \text{ keV}$$

Avec  $\alpha = \frac{E}{m_e c^2} = \frac{h\nu}{m_e c^2}$ , l'énergie relative on a  $h\nu' = h\nu \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos(\theta))}$   
et  $E_c = h\nu(1 - \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos(\theta))})$  donc  $E_c = h\nu \frac{\alpha(1 - \cos(\theta))}{1 + \alpha(1 - \cos(\theta))}$

### Valeurs caractéristiques

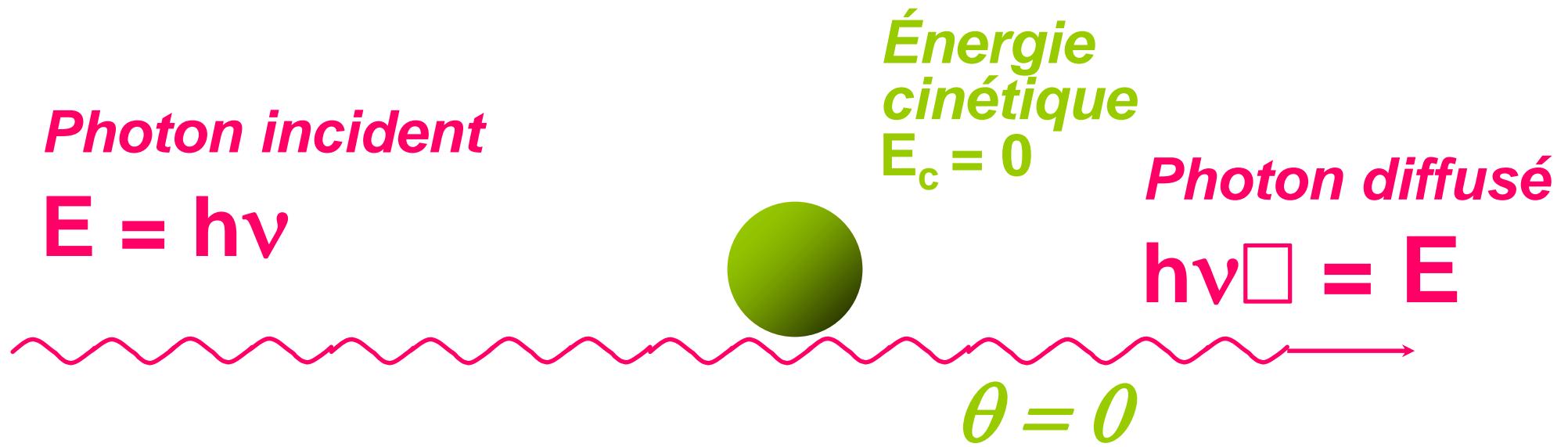
Choc « tangentiel » :  $\theta = 0^\circ$   $h\nu' = h\nu$  et  $E_c = 0$

Choc « latéral »  $\theta = 90^\circ$   $h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha}$  et  $E_c = h\nu \frac{\alpha}{1 + \alpha}$

Choc « Frontal »  $\theta = 180^\circ$   $h\nu' = \frac{h\nu}{1 + 2\alpha}$  et  $E_c = h\nu \frac{2\alpha}{1 + 2\alpha}$

# Effet Compton / Diffusion Compton

« diffusion incohérente » équivalente à « choc inélastique »



Choc tangentiel

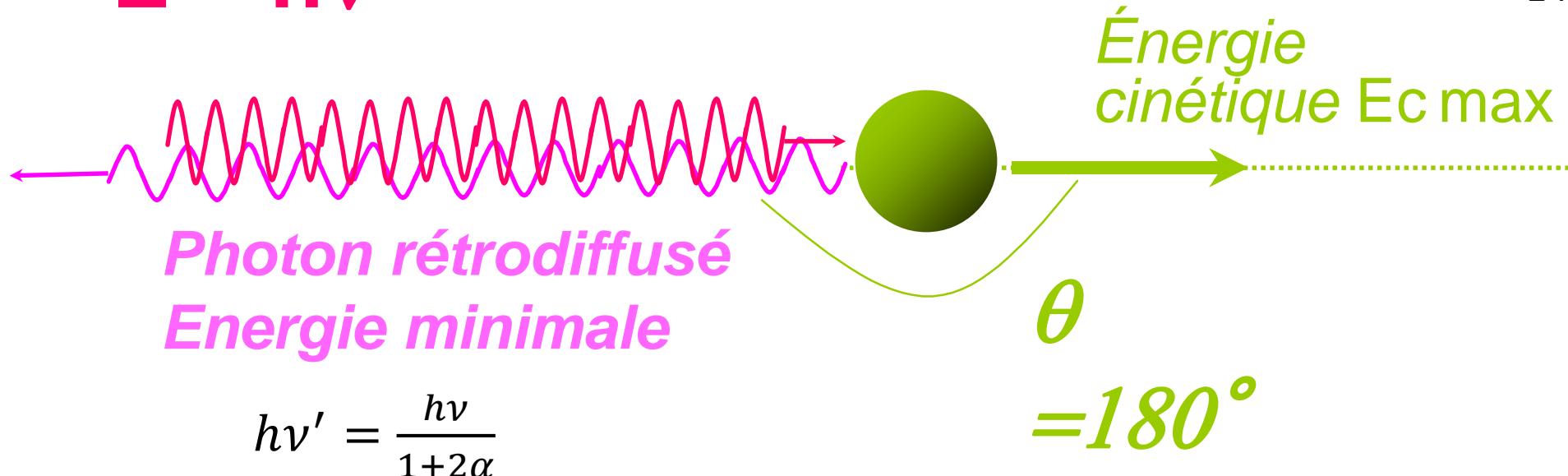
# Effet Compton

## « collision » ou « choc élastique »

***Photon incident***

$$E = h\nu$$

$$E_c = h\nu \frac{2\alpha}{1+2\alpha}$$



**Choc frontal**

## Effet Compton: énergie transférée

$$\frac{E_c}{E_d} = \frac{E_c}{h\nu'} = \alpha(1 - \cos(\theta)) = \frac{E(1 - \cos(\theta))}{m_e c^2}$$

*proportionnel à  $E$*

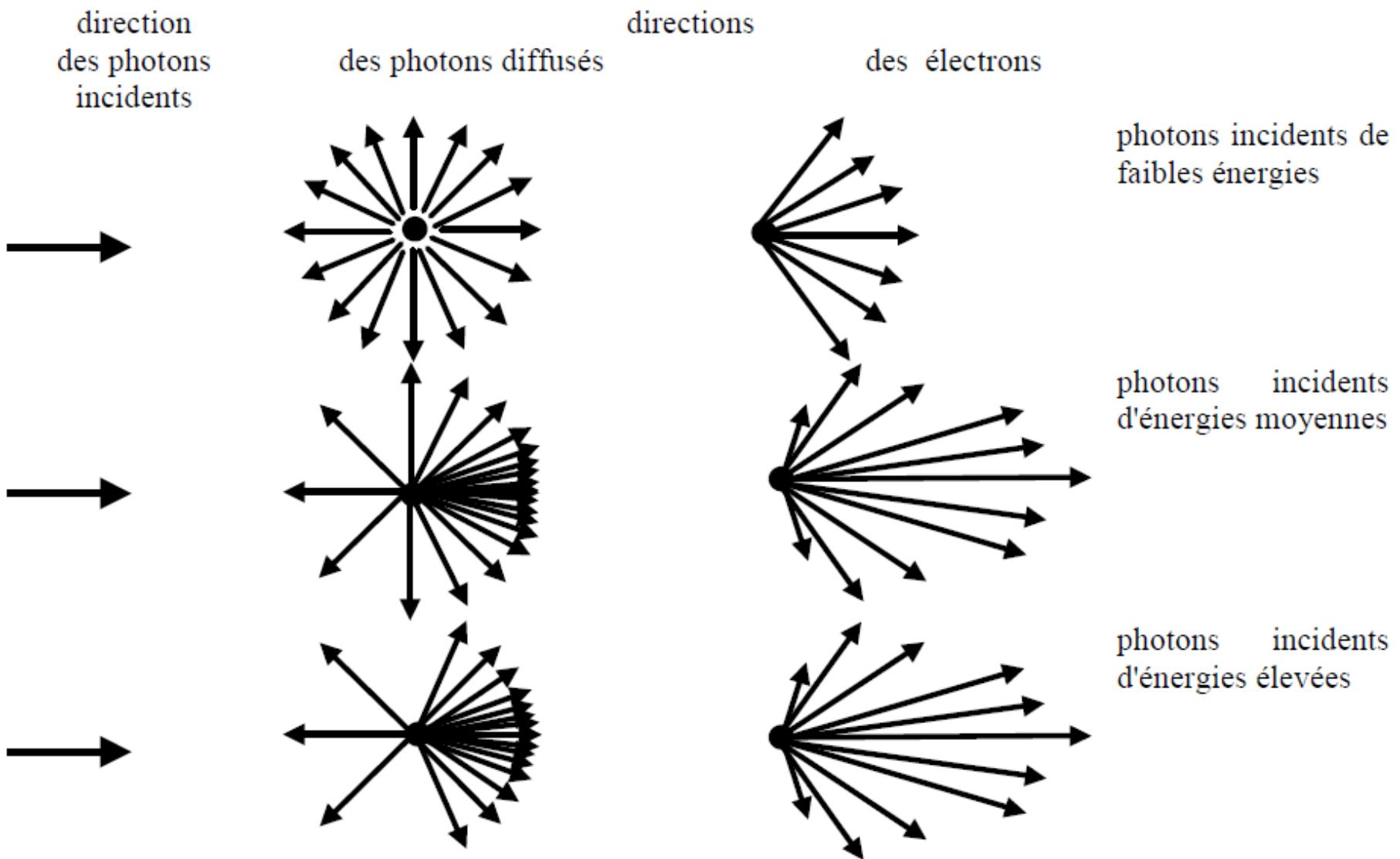
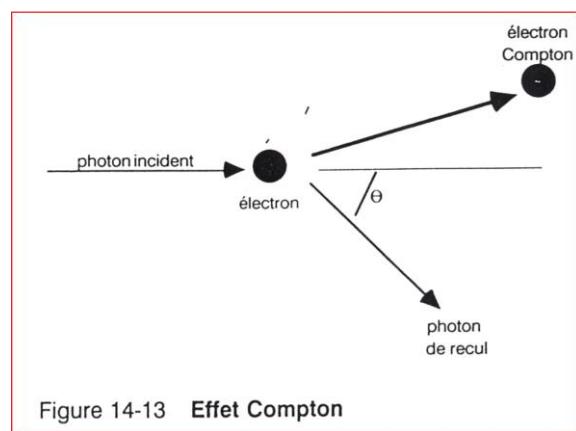
Ce qui compte pour les effets radiobiologiques, c'est l'énergie communiquée à l'électron, c'est-à-dire l'énergie transférée, et qui varie donc

$$\text{entre } 0 \text{ et } E_{c,max} = h\nu \frac{2\alpha}{1+2\alpha} = E \frac{2E}{m_e c^2 + 2E}$$

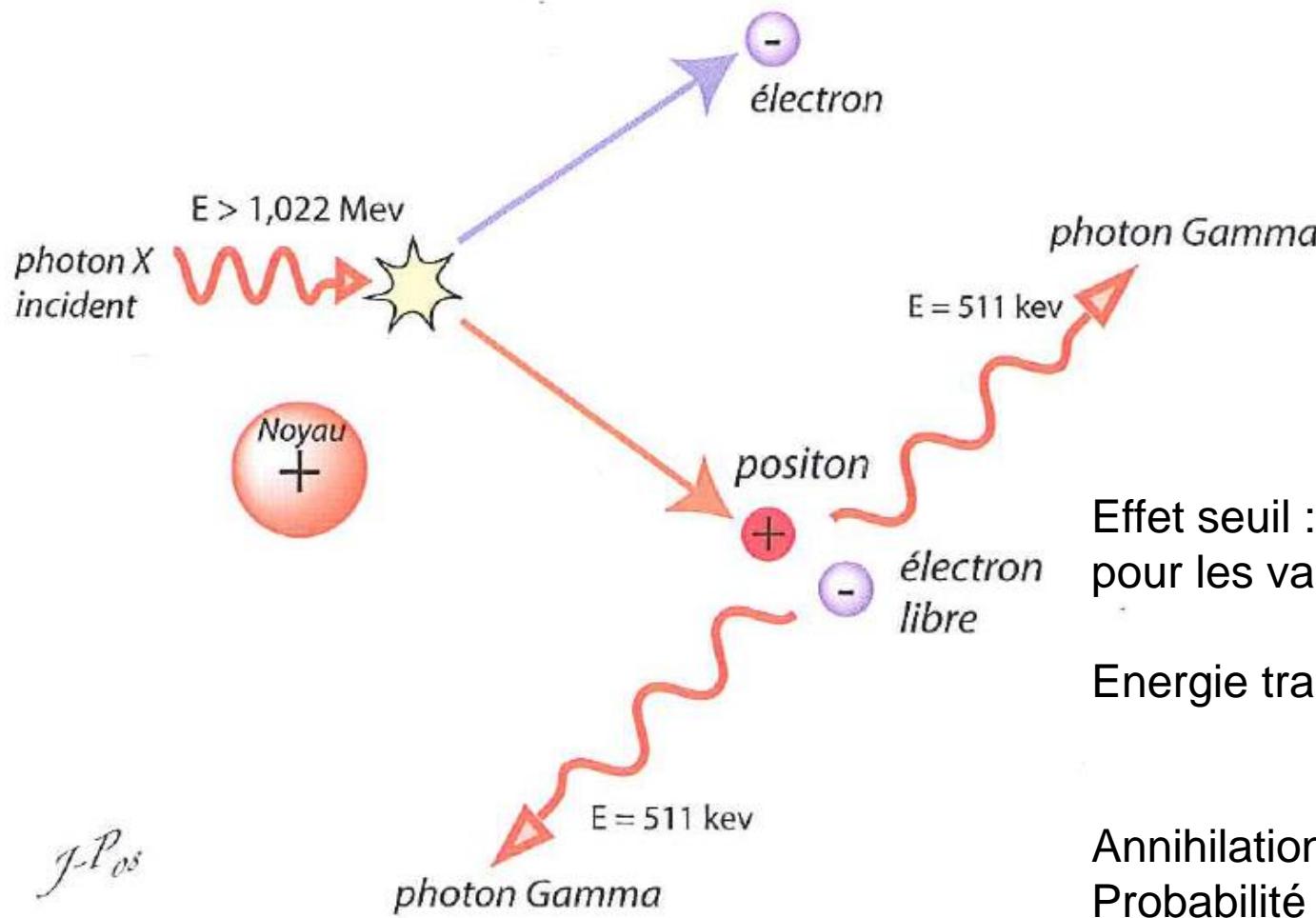
## Effet Compton: énergie transférée

Plus l'énergie du photon incident est grande, plus la fraction moyenne d'énergie transférée à l'électron est grande.

**A Aurengo et T Peticlerc**  
**Biophysique PCEM**  
**Médecine Science**  
**Flammarion**



# Effet de création de paire (si $h\nu > 1,022 \text{ MeV}$ ): interaction avec les noyaux



$\mathcal{P}_{os}$

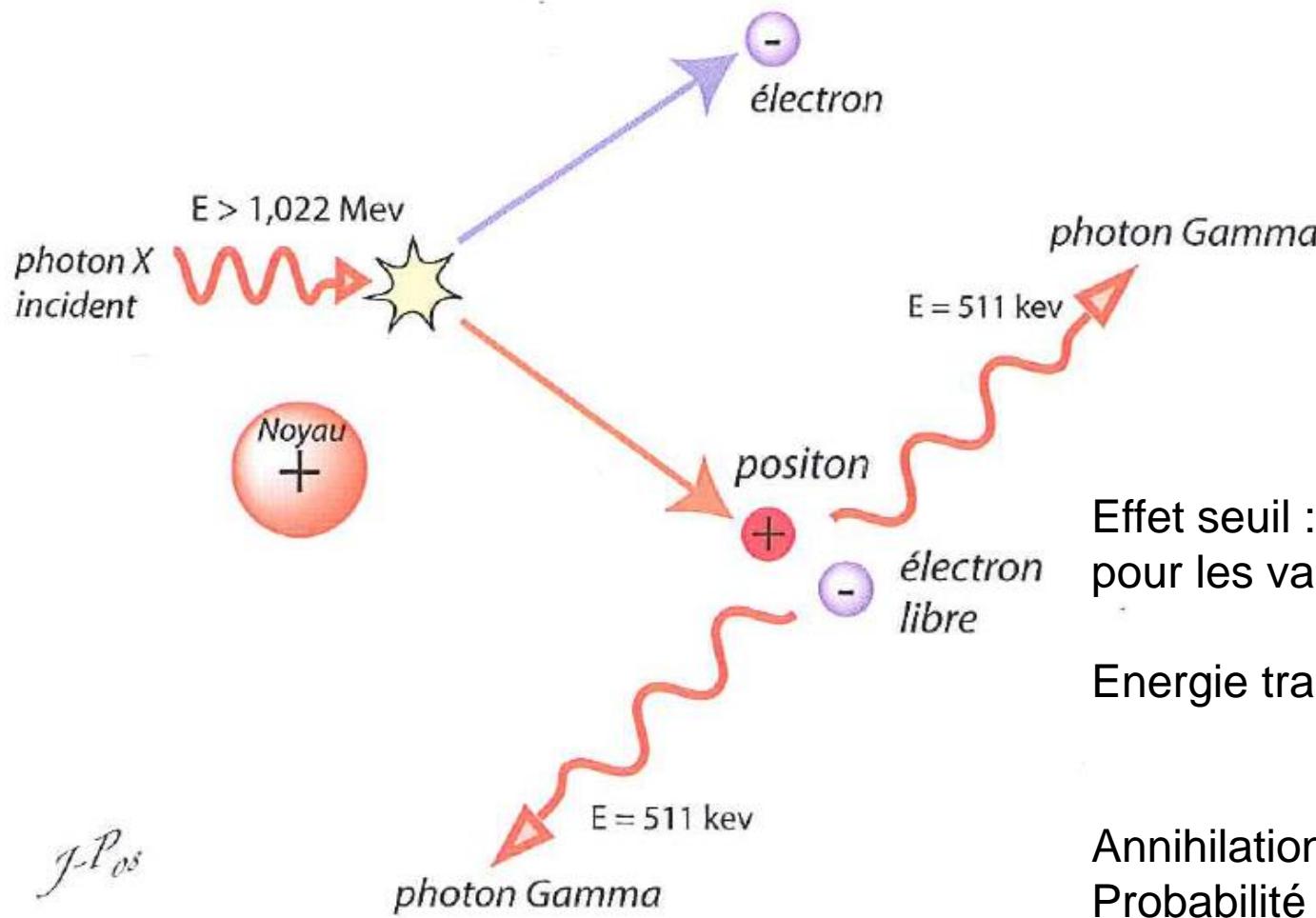
Effet seuil : la probabilité de cette interaction est nulle pour les valeurs de  $E$  inférieures à  $2m_e c^2 = 1,022 \text{ MeV}$

Energie transférée aux particules chargées

$$E_{c,e^-} \sim E_{c,e^+} = \frac{h\nu - 2m_e c^2}{2}$$

Annihilation du positon en fin de parcours  
Probabilité faible dans les tissus biologiques pour les photons utilisés en santé

# Effet de création de paire (si $h\nu > 1,022 \text{ MeV}$ ): interaction avec les noyaux



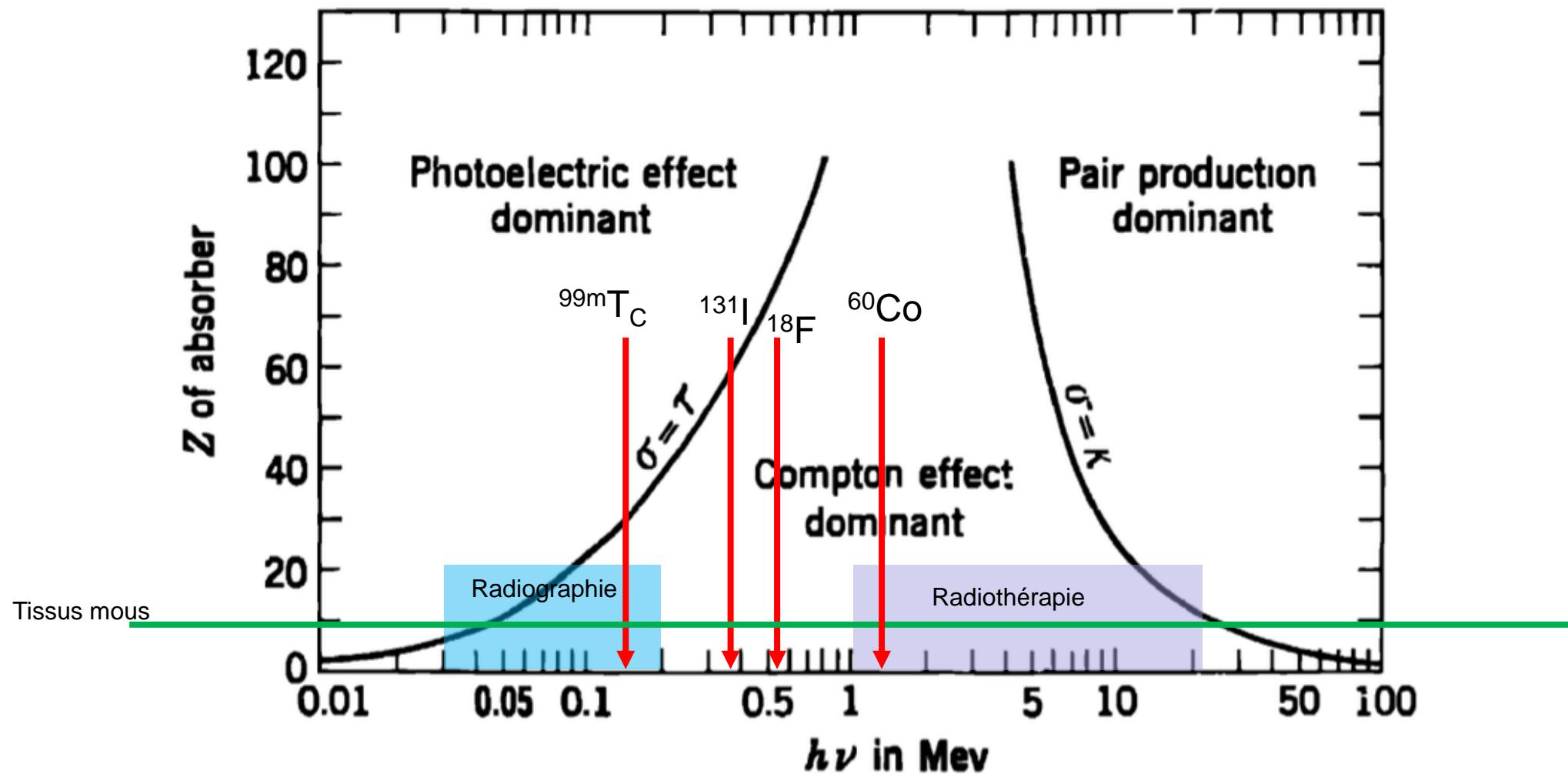
Effet seuil : la probabilité de cette interaction est nulle pour les valeurs de  $E$  inférieures à  $2m_e c^2 = 1,022 \text{ MeV}$

Energie transférée aux particules chargées

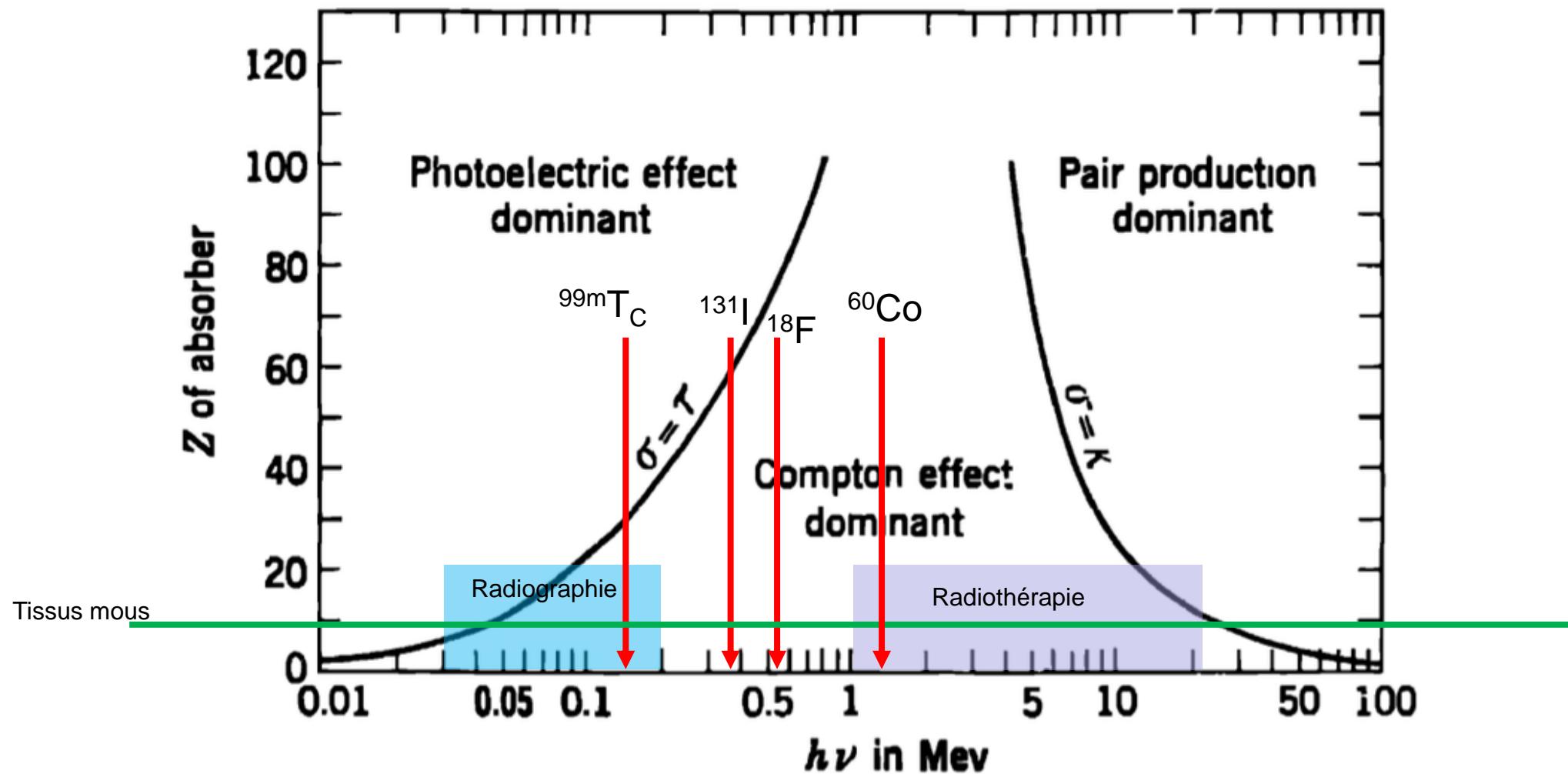
$$E_{c,e^-} \sim E_{c,e^+} = \frac{h\nu - 2m_e c^2}{2}$$

Annihilation du positon en fin de parcours  
Probabilité faible dans les tissus biologiques pour les photons utilisés en santé

Important pour la dosimétrie et la radiobiologie:  
transfert d'énergie aux particules chargées



Important pour la dosimétrie et la radiobiologie:  
transfert d'énergie aux particules chargées



# Messages essentiels du cours

- Les photons sont des particules indirectement ionisantes : la probabilité d'interagir des photons utilisés en santé est très faible. Lorsque les photons interagissent, ils peuvent transférer presque tout ou une partie seulement de leur énergie à la matière irradiée et mettre en mouvement des particules chargées (électron surtout, positons rarement) qui à leur tour interagir et ioniser la matière
- Les photons peuvent interagir par effet photoélectrique, diffusion Rayleigh, diffusion Compton ou création de paires
- Le photon incident peut soit disparaître (effet photoélectrique, création de paire), soit être dévié de sa trajectoire en perdant (Diffusion Compton) ou non (Diffusion Rayleigh) une partie de son énergie

## Et au prochain cours ...

- La loi d'atténuation des photons
  - Notion de section efficace et de probabilité d'interaction
  - Loi d'atténuation
  - Variation de l'atténuation avec l'énergie des photons
- Interactions neutrons matière.

# Mentions légales

---

L'ensemble de ce document relève des législations française et internationale sur le droit d'auteur et la propriété intellectuelle. Tous les droits de reproduction de tout ou partie sont réservés pour les textes ainsi que pour l'ensemble des documents iconographiques, photographiques, vidéos et sonores.

Ce document est interdit à la vente ou à la location. Sa diffusion, duplication, mise à disposition du public (sous quelque forme ou support que ce soit), mise en réseau, partielles ou totales, sont strictement réservées à l'Université Grenoble Alpes (UGA).

L'utilisation de ce document est strictement réservée à l'usage privé des étudiants inscrits à l'Université Grenoble Alpes (UGA), et non destinée à une utilisation collective, gratuite ou payante.