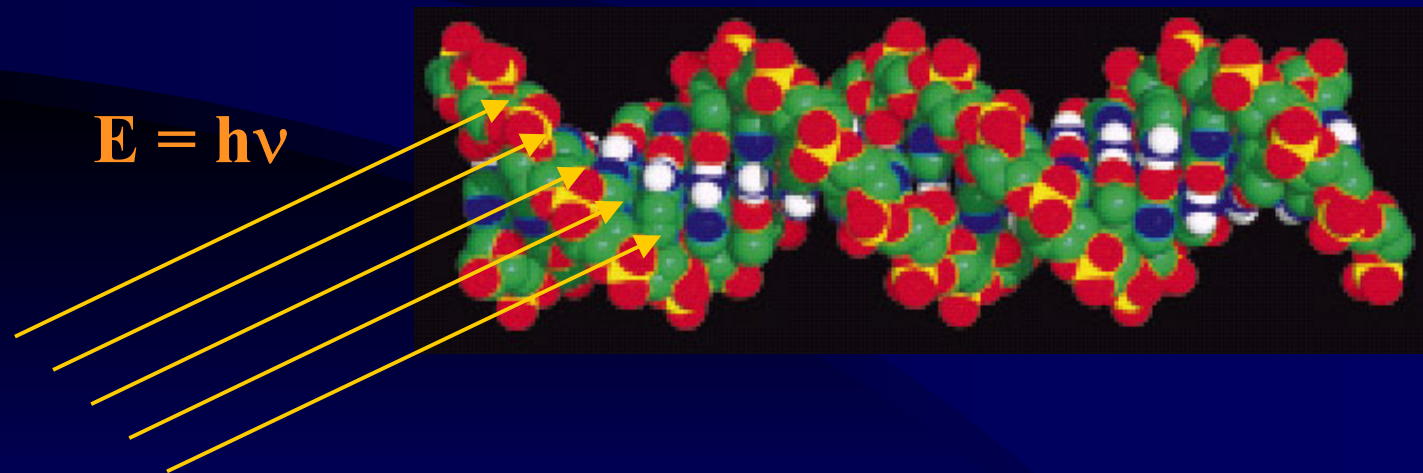


INTERACTION DES ONDES ET DES PARTICULES AVEC LA MATIÈRE VIVANTE

Christophe CHAMPION

Laboratoire de Physique Moléculaire et des Collisions
Université de Metz



Christophe CHAMPION, Institut de
Physique de Metz, LPMC - e2phy 2002
(Villeurbanne, 26-29 août 2002)

CLASSIFICATION DES RAYONNEMENTS

Rayonnements électromagnétiques/Rayonnements particulaires
Rayonnements ionisants/Rayonnements non-ionisants



Interaction avec la matière:

Cas des particules lourdes

Cas des électrons

Cas des neutrons

Cas des Rayons X



Interaction avec la matière:

Cas des UV

Cas du visible

Cas des IR

Cas des ultrasons

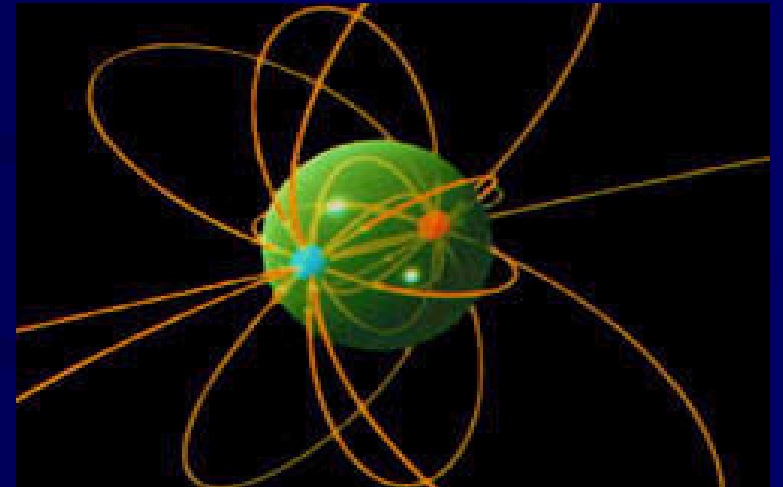


Effets biologiques

CLASSIFICATION DES RAYONNEMENTS

Selon la nature du rayonnement:

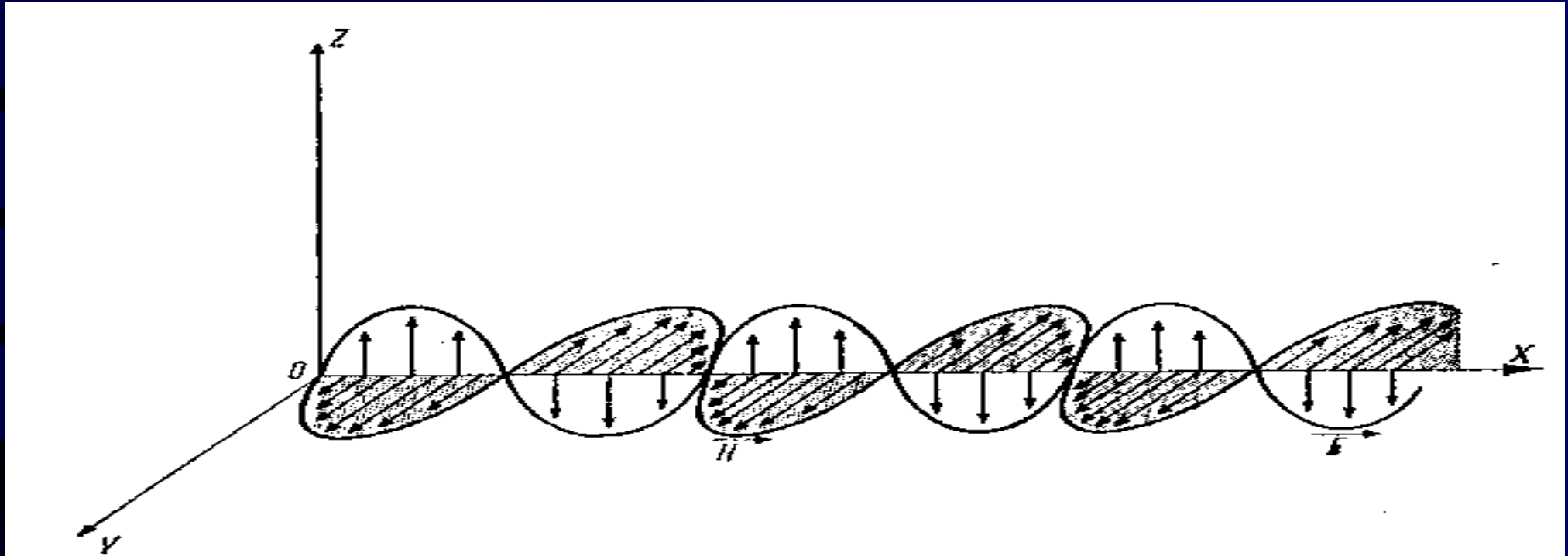
rayonnements électromagnétiques/rayonnements particulaires



Selon les effets du rayonnement sur la matière:
rayonnements ionisants/rayonnements non ionisants

RAYONNEMENTS ELECTROMAGNETIQUES

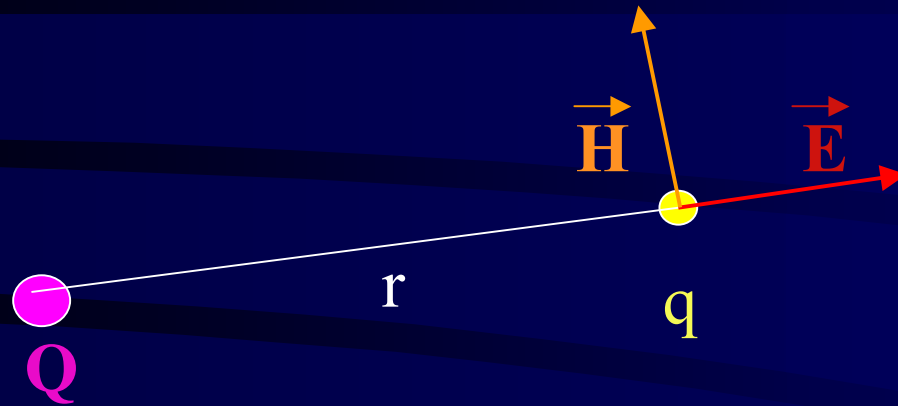
Les radiations électromagnétiques sont essentiellement émises par les vibrations des électrons atomiques



« radiations - rayonnement »:
rayon déterminant la direction de propagation

RAYONNEMENTS ELECTROMAGNETIQUES

Origine du rayonnement électromagnétique



$$\vec{F} = \frac{1}{k} \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2} \vec{u} = q \cdot \vec{E}$$
$$\vec{E} = \frac{Q}{kr^2} \vec{u}$$

Oscillation de la charge Q \Rightarrow Variation alternative de \vec{E}

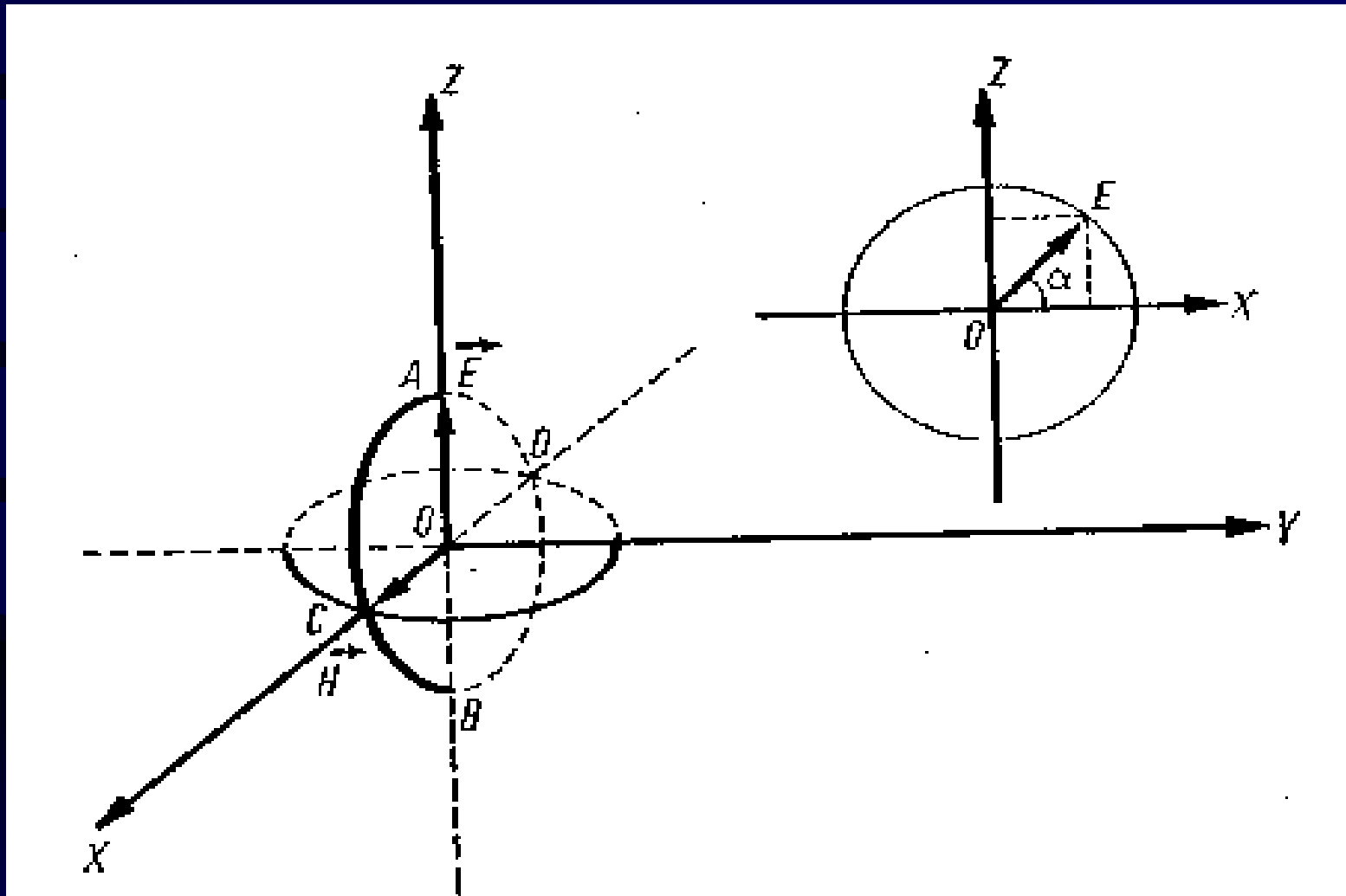
Déplacement de la charge Q \Rightarrow Production d'un courant I

Création d'un champ magnétique \vec{H} (Biot-Savart)

\vec{E} perpendiculaire à \vec{H}

RAYONNEMENTS ELECTROMAGNETIQUES

Origine du rayonnement électromagnétique



RAYONNEMENTS ELECTROMAGNETIQUES

Caractéristiques du rayonnement électromagnétique:

vitesse de propagation dans le vide constante:

$$c = 2.98 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

rayonnement monochromatique défini par:

- sa fréquence: $\nu = \text{T}^{-1}$
- longueur d'onde dans le vide: $\lambda = cT$
- nombre d'ondes par unité de longueur: $\sigma = \lambda^{-1}$
- sa pulsation: $\omega = 2\pi\text{T}^{-1}$

RAYONNEMENTS ELECTROMAGNETIQUES

Classification des rayonnements électromagnétiques

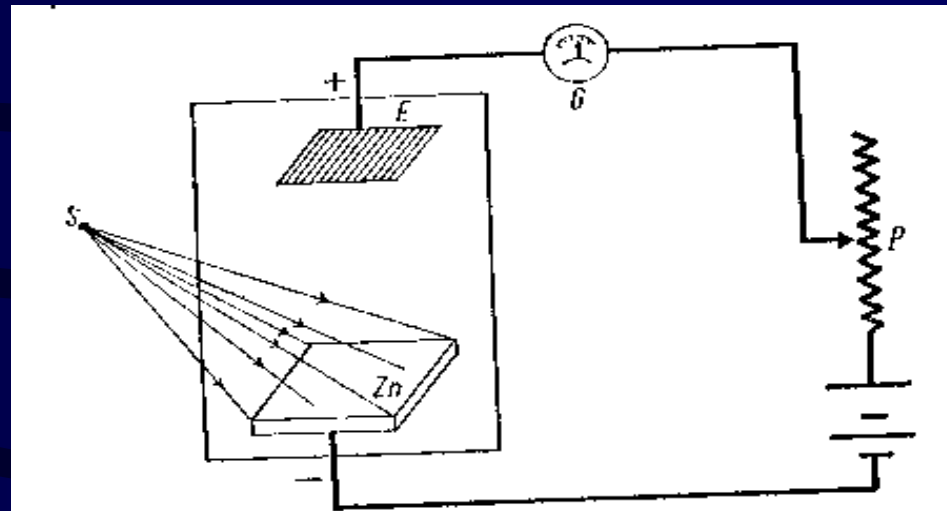
Nom	Intervalle de λ (en m)	Intervalle de fréquence ν (en Hertz)
Ondes de puissance	∞ à $3 \cdot 10^5$	0 à 10^3
Grandes Ondes	$3 \cdot 10^5$ à $3 \cdot 10^3$	10^3 à 10^5
Bande commune	$3 \cdot 10^3$ à 30	10^5 à 10^7
Ondes Courtes	30 à 0.3	10^7 à 10^9
Microondes	0.3 à $3 \cdot 10^{-3}$	10^9 à 10^{11}
Infrarouge (IR)	$3 \cdot 10^{-3}$ à $3 \cdot 10^{-6}$	10^{11} à 10^{14}
Visible	$7 \cdot 10^{-5}$ à $4 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{14}$ à $7 \cdot 10^{14}$
Ultraviolet (UV)	$3 \cdot 10^{-5}$ à $3 \cdot 10^{-7}$	10^{15} à 10^{17}
Rayons X et γ	$3 \cdot 10^{-7}$ à $3 \cdot 10^{-9}$ et moins	10^{17} à 10^{20} et plus

DUALITE ONDE-CORPUSCULE

Aspect corpusculaire du rayonnement électromagnétique

- Effet photoélectrique -

Insuffisance de la théorie électromagnétique

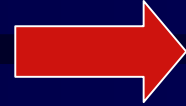


Lois expérimentales de l'effet photoélectrique:

- arrachement des électrons du métal ssi: $\nu > \nu_{\text{seuil}}$
- $E_c \text{ max} \sim \lambda^{-1}$
- courant photoélectrique est quasi-instantané
- $E_c \text{ max}$ indépendante de l'intensité du rayonnement

DUALITE ONDE-CORPUSCULE

Théorie
ondulatoire



- phénomène se produit $\forall \lambda$
- retard à l'allumage
- pas de E_c max car E_c \nearrow avec l'intensité



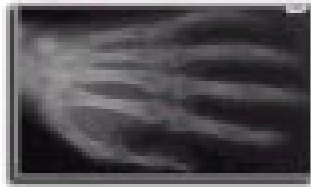
quanta d'Einstein (1905) d'énergie $E = h\nu$

- existence d'une barrière d'énergie W
à franchir lors de la collision photon-électron
- $E_c \text{ max} \sim \lambda^{-1}$ car $W + E_c = h\nu$
- interaction photon-électron est quasi-instantanée
- $E_c \text{ max}$ indépendante de l'intensité du rayonnement

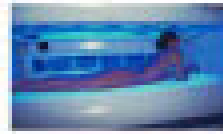
DUALITE ONDE-CORPUSCULE



γ

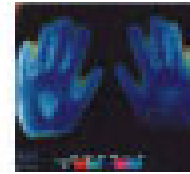


X



UV

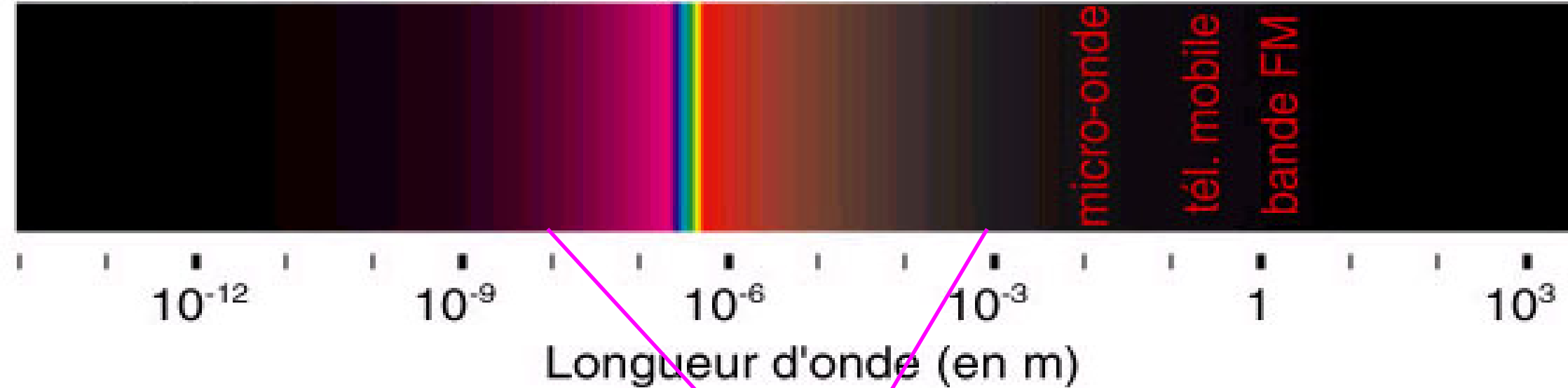
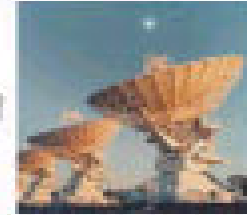
visible



IR



radio



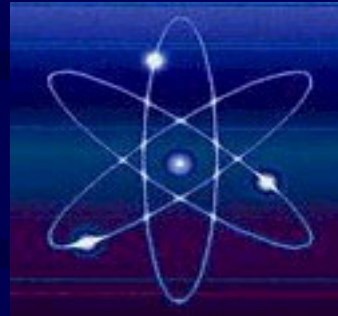
théorie corpusculaire

théorie ondulatoire

Les deux théories envisagées

RAYONNEMENTS PARTICULAIRES

Rayonnements formés de particules dotées d'une masse au repos non nulle



Animées d'une énergie cinétique, ces particules forment un faisceau de particules caractérisées par:

- une charge
- une masse au repos m_0
- une vitesse v
- une masse cinétique:
- une impulsion (ou quantité de mouvement):
- une énergie totale:

$$m = m_0 / \sqrt{1 - (v^2 / c^2)}$$

$$\vec{p} = m \vec{v}$$

$$E = mc^2$$

RAYONNEMENTS PARTICULAIRES

Les 4 grands types de forces ou d'interactions

- forces de gravitation:

d'intensité faible, longue portée (en $1/r^2$), négligeable à l'échelle atomique

- interactions faibles:

forces 10^{25} fois plus intenses que les forces de gravitation, de courte portée:
concernent essentiellement les particules légères (électron, méson, ...)

- interactions électromagnétiques:

forces 10^{37} fois plus intenses que les forces de gravitation,
longue portée (en $1/r^2$)
elles entrent en jeu dans les réactions chimiques

- les interactions fortes:

forces 10^{39} fois plus intenses que les forces de gravitation,
à courte portée, de l'ordre des dimensions nucléaires

RAYONNEMENTS PARTICULAIRES

Les particules élémentaires

PARTICULE	SYMBOLE	MASSE AU REPOS	CHARGE (e)	SPIN	NOMBRE QUANTIQUE			VIE (seconde)		
					Lepton	Baryon	Étrangeté			
Baryons	Hypérons	Ksi chargé	Ξ^-	1.41 u	- 1	$\frac{1}{2}$	0	+ 1	- 2	$1,9 \times 10^{-10}$
		Ksi neutre	Ξ^0	1.41 u	0	«	0	+ 1	- 2	2×10^{-10}
		Sigma négatif	Σ^-	1.27 u	- 1	«	0	+ 1	- 1	$1,6 \times 10^{-10}$
		Sigma neutre	Σ^0	1.27 u	0	«	0	+ 1	- 1	1×10^{-11}
		Sigma positif	Σ^+	1.27 u	+ 1	«	0	+ 1	- 1	$0,8 \times 10^{-10}$
		Lambda	Λ	1.19 u	0	«	0	+ 1	- 1	$2,5 \times 10^{-10}$
	Nucléons	Neutron	n	1.008 u	0	«	0	+ 1	0	780
Proton	p	1.007 u	+ 1	«	0	+ 1	0	0	stable	
Mésons	Kaon neutre	K^0	967 m_e	0	0	0	0	+ 1	10^{-9}	
	Kaon chargé	K^+	966 m_e	+ 1	0	0	0	+ 1	$1,2 \times 10^{-8}$	
	Pion neutre	π^0	264 m_e	0	0	0	0	0	10^{-16}	
	Pion chargé	π^+	273 m_e	+ 1	0	0	0	0	$2,5 \times 10^{-8}$	
Leptons	Muon	μ^-	207 m_e	- 1	$\frac{1}{2}$	+ 1	0	- 1	$2,2 \times 10^{-6}$	
	Electron	e^-	1 m_e	- 1	«	+ 1	0	0	stable	
	Neutrino	ν	0	0	«	+ 1	0	0	stable	
	Photon	γ	0	0	1	0	0	0	stable	

RAYONNEMENTS IONISANTS / NON IONISANTS

rayonnement ionisant:

rayonnement dont l'énergie est suffisante pour ioniser un atome

l'énergie d'ionisation des principaux atomes d'intérêt biologique:

H: 13.54 eV

N: 14.24 eV

C: 11.24 eV

O: 13.57 eV

rayonnements non-ionisants = rayonnements dont l'énergie < 13.6 eV

ondes radioélectriques, UV, visible, IR

rayonnements ionisants

RX, rayonnements particulaires: $\lambda \leq 150$ nm

RAYONNEMENTS IONISANTS

Rayonnements particuliers

Interaction des particules chargées lourdes (protons, particules α , ions lourds)

Nature de l'interaction:

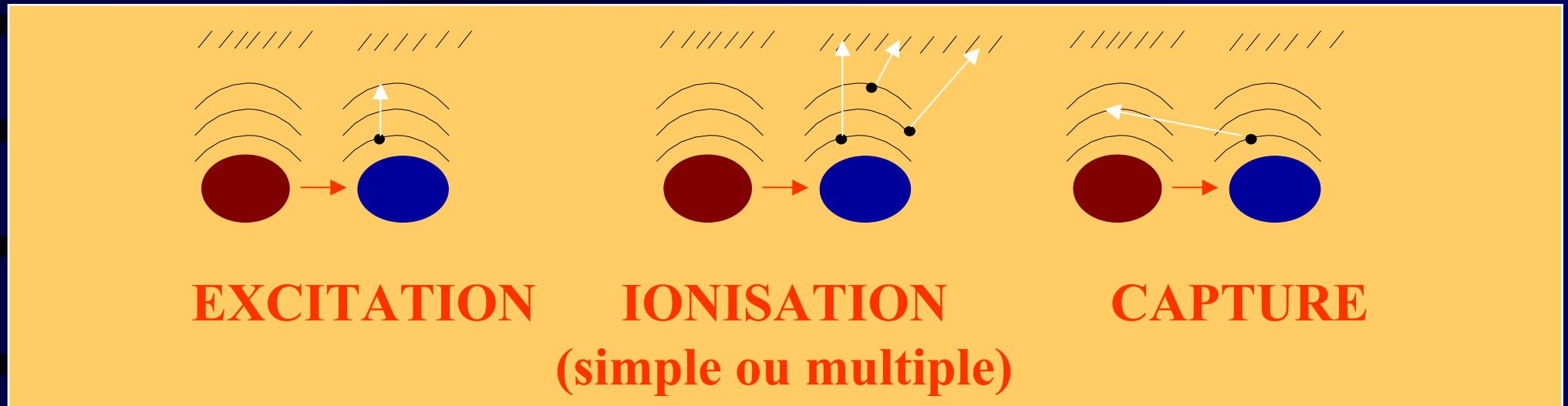
L'interaction dominante est la **force coulombienne** entre la particule incidente chargée positivement et les électrons atomiques chargés négativement.

Interactions avec les noyaux
(**forces coulombiennes** ou les **forces nucléaires**)
sont environ 10^8 fois moins fréquentes.
négligées dans le processus de ralentissement.



RAYONNEMENTS IONISANTS

Rayonnements particulaires



$$\Delta E_{\max} = \frac{4 \cdot m \cdot M}{(m + M)^2} E_{\text{inc}}$$

Force d'interaction coulombienne = force à longue portée ($1/r^2$)

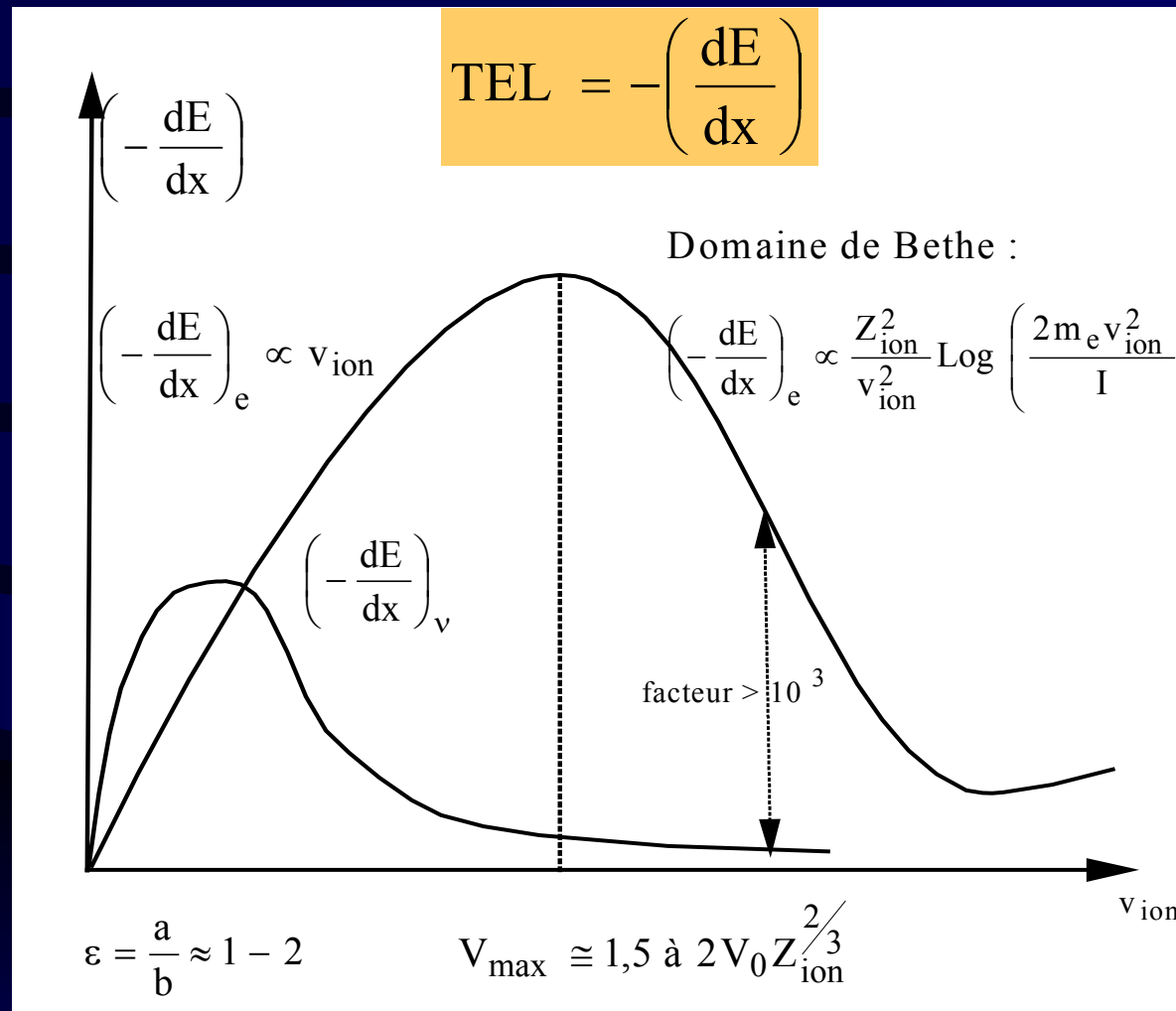


interaction avec un grand nombre d'électrons
ralentissement = phénomène continu et de nature statistique

RAYONNEMENTS IONISANTS

Rayonnements particulaires

Pouvoir d'arrêt ou TEL (Transfert d'Énergie Linéique)

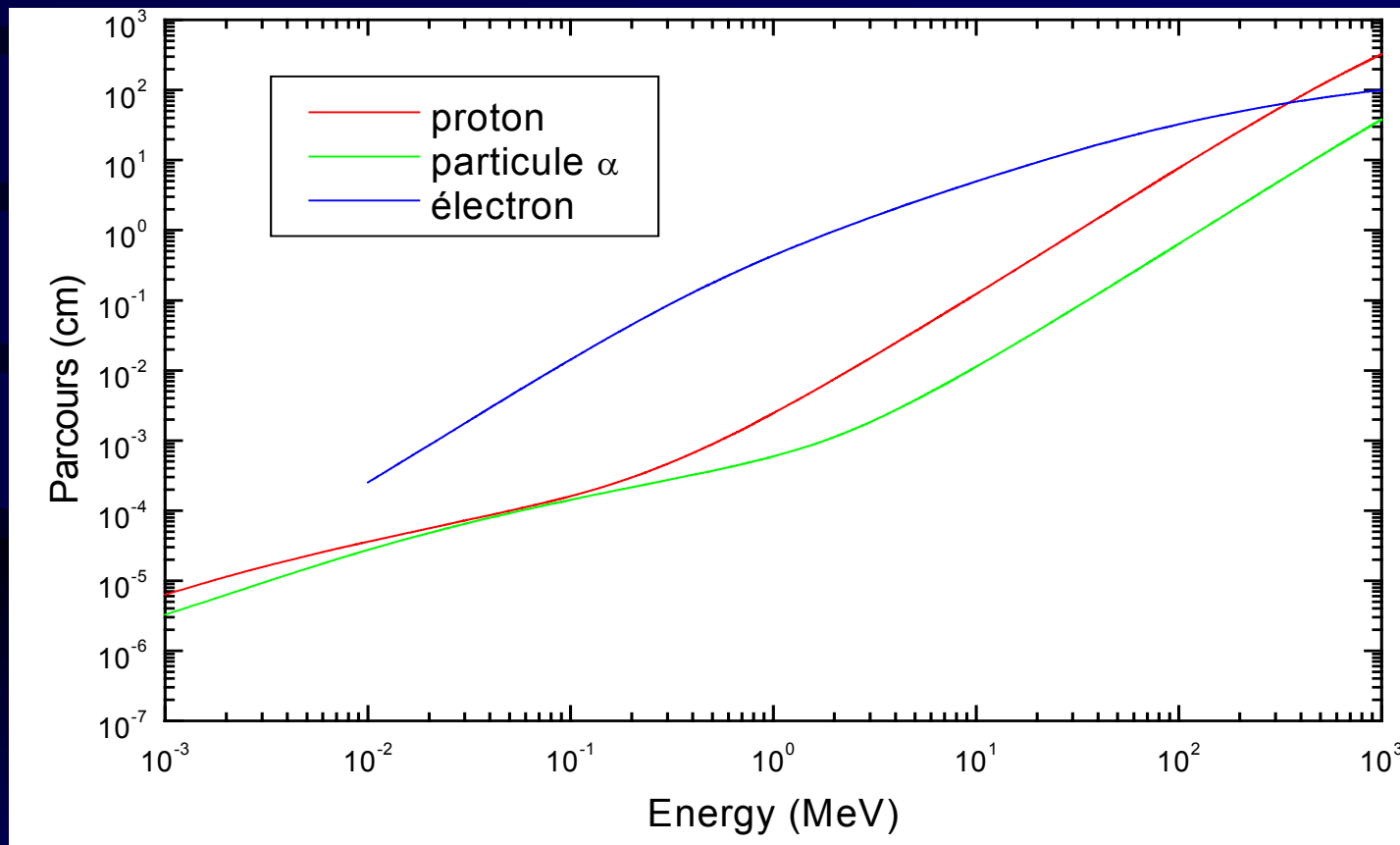


RAYONNEMENTS IONISANTS

Rayonnements particuliers

Parcours

$$R = \int_{E_0}^0 dx = \int_0^{E_0} \frac{dE}{\text{TEL}}$$

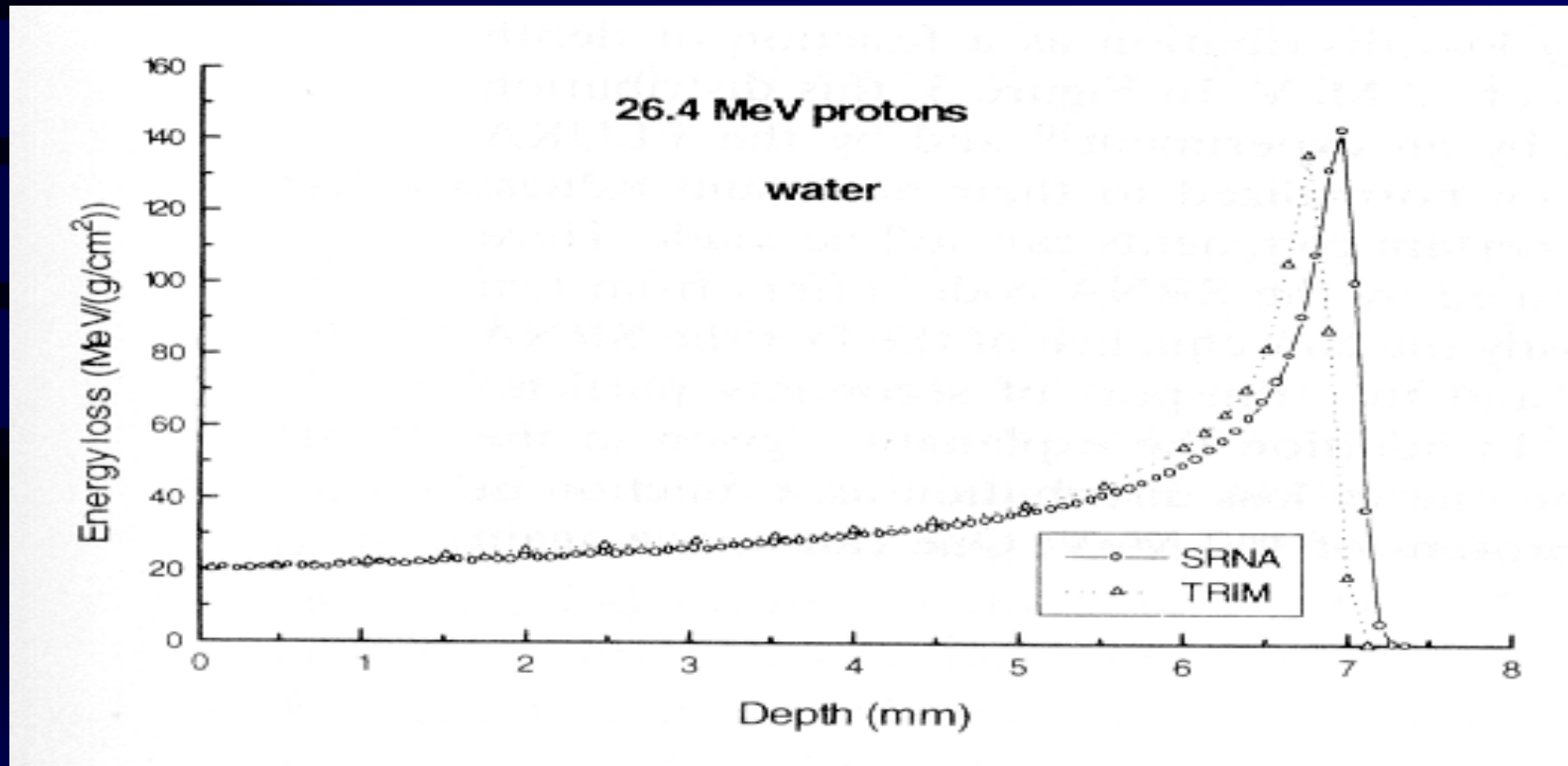


RAYONNEMENTS IONISANTS

Rayonnements particuliers

Ionisation spécifique - courbe de Bragg

$$I_s = \frac{\Delta I}{\Delta x} = \frac{\text{nombre de paires d'ions crées le long de } \Delta x}{\Delta x}$$



RAYONNEMENTS IONISANTS

Rayonnements particuliers

Interaction des particules chargées légères: électrons

Interactions avec les noyaux

$$\gamma = \frac{z \cdot Z \cdot e^2}{mr^2}$$

Diffusion élastique

dans le champ coulombien du noyau

ΔE négligeable

Prob $\sim Z^2$

Diffusion inélastique

Bremsstrahlung

$E_{\text{ray}} \sim \gamma^2 \implies$ non négligeable

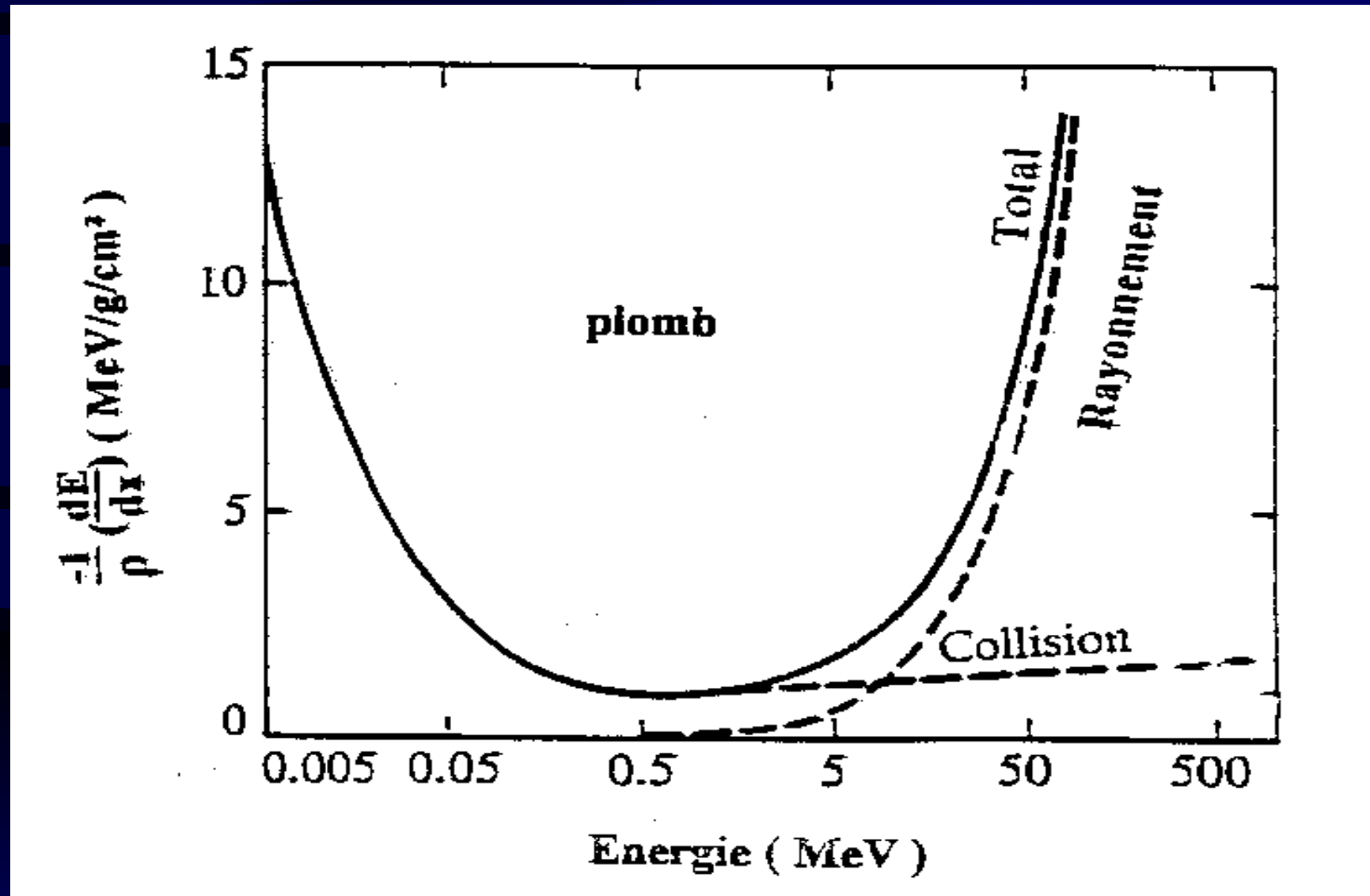
E_{ray} avec E_{elec}

Prob $\sim Z^2$ (0.3% à 1MeV)

spectre continu avec $E_{\text{max}} = E_{\text{elec}}$

RAYONNEMENTS IONISANTS

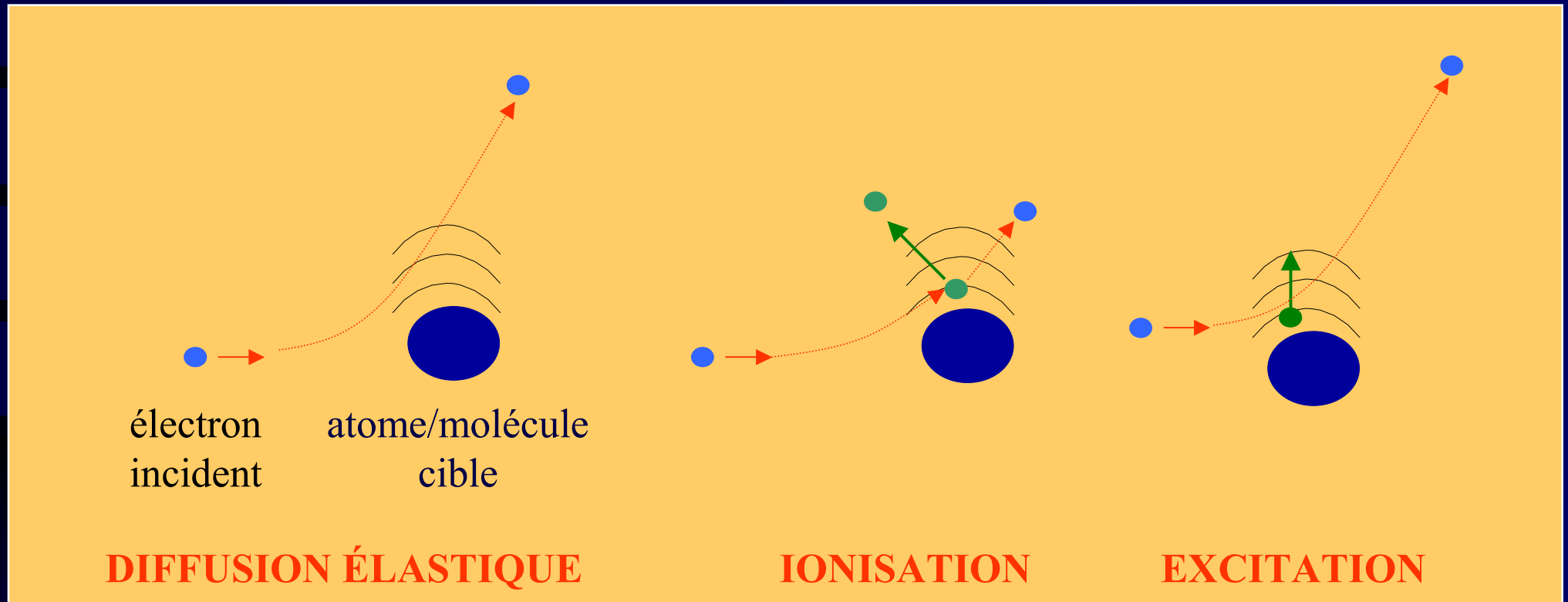
Rayonnements particuliers



RAYONNEMENTS IONISANTS

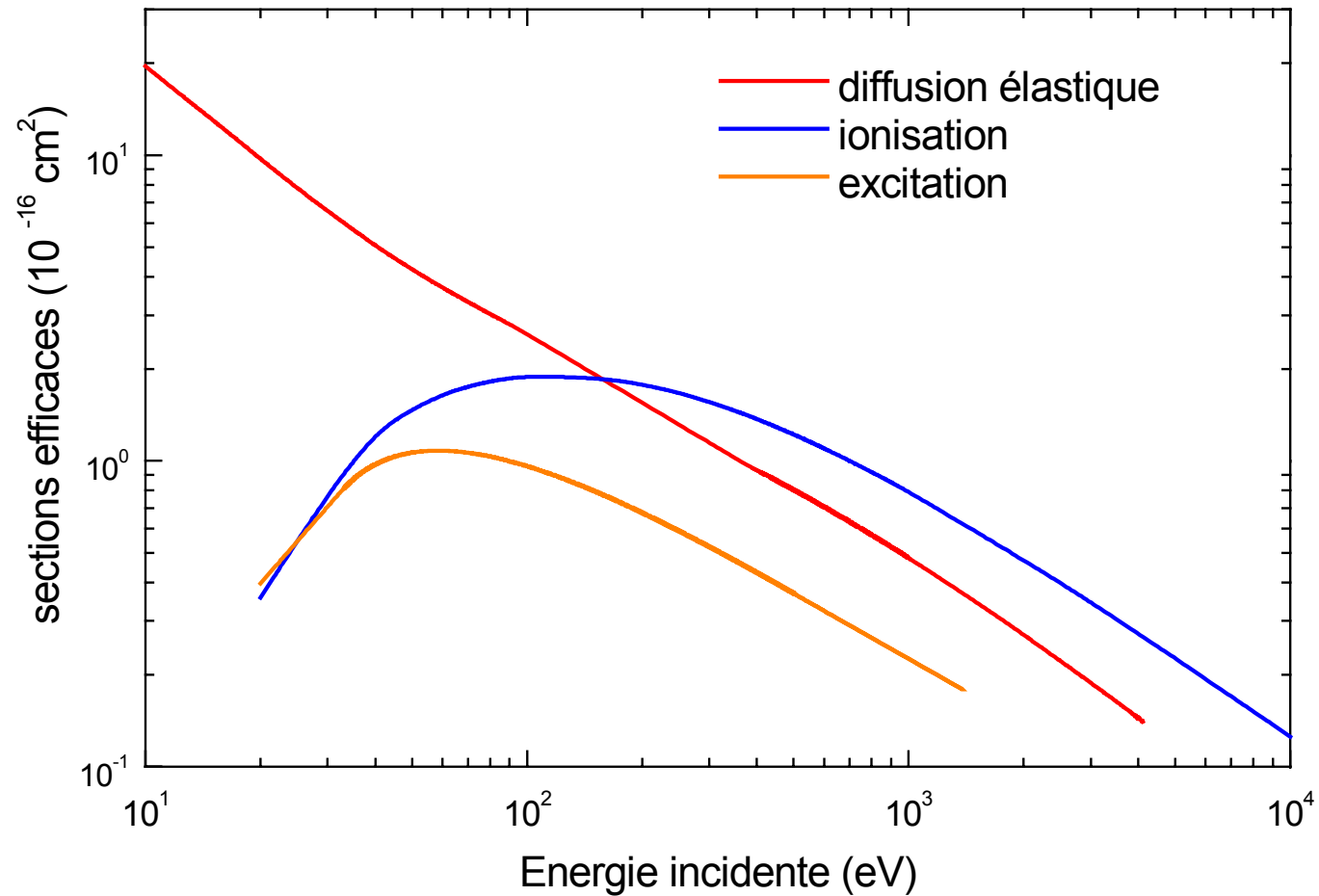
Rayonnements particulaires

Interactions avec les électrons cibles



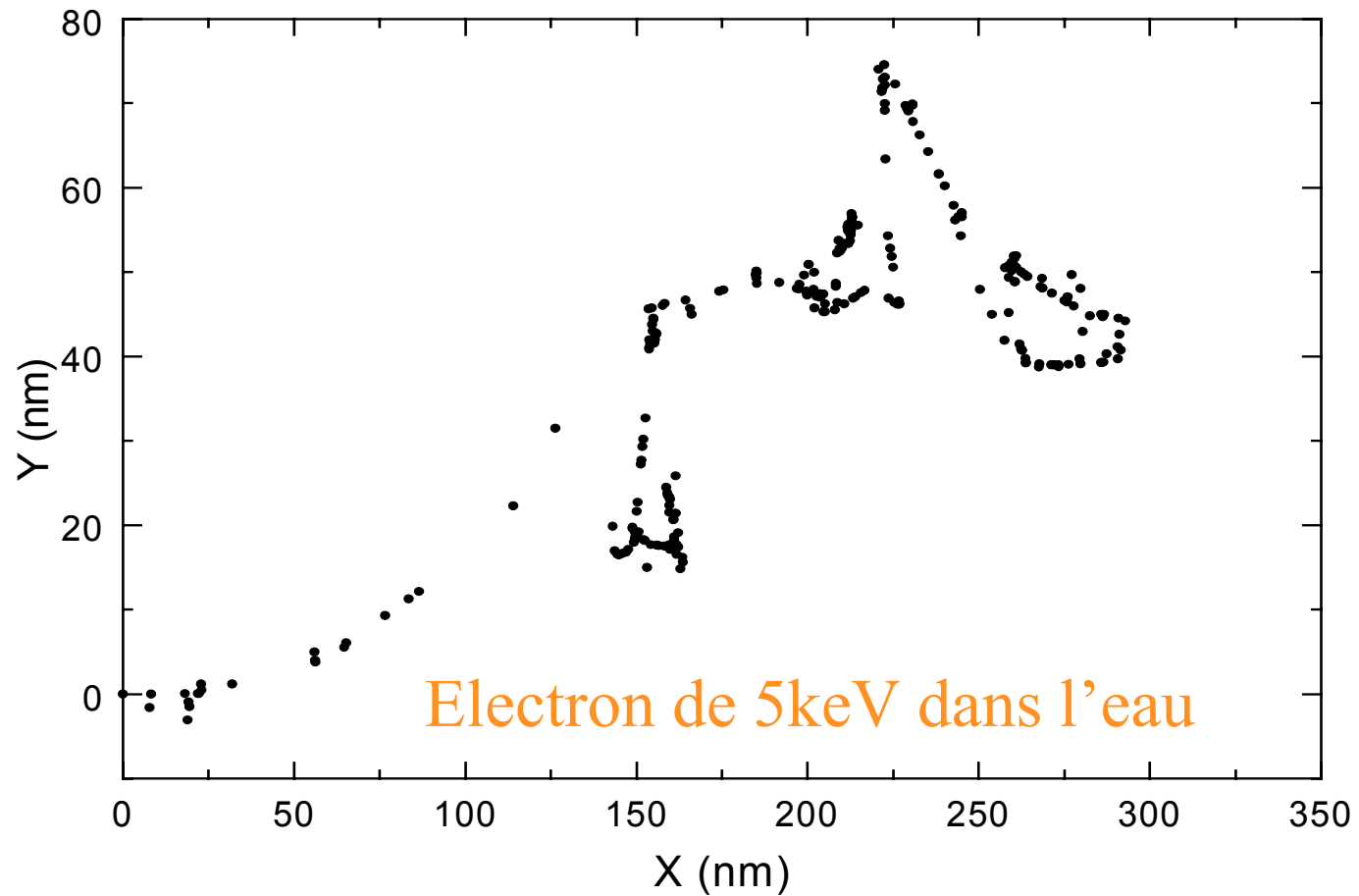
RAYONNEMENTS IONISANTS

Rayonnements particulaires



RAYONNEMENTS IONISANTS

Rayonnements particuliers



RAYONNEMENTS IONISANTS

Rayonnements particuliers

Interaction des particules: neutrons

Particule électriquement neutre

→ pas d'interaction coulombienne avec les électrons atomiques

→ réactions nucléaires

particules très pénétrantes et ΔE est très faible

Classification des neutrons:

les neutrons rapides: $E_{\text{cin}} > 0.8 \text{ MeV}$

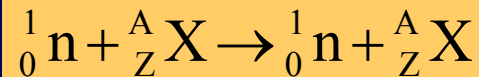
les neutrons épithermiques: $1 \text{ eV} < E_{\text{cin}} < 0.8 \text{ MeV}$

les neutrons thermiques: $E_{\text{cin}} < 1 \text{ eV}$

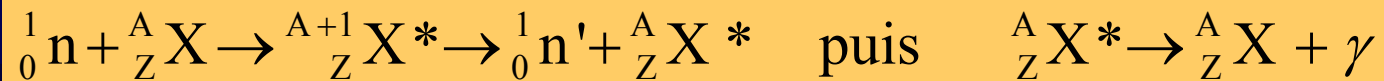
RAYONNEMENTS IONISANTS

Rayonnements particuliers

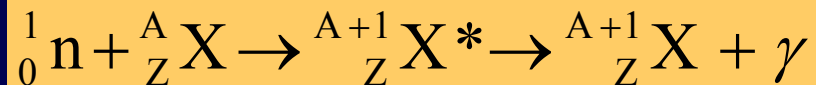
la diffusion élastique



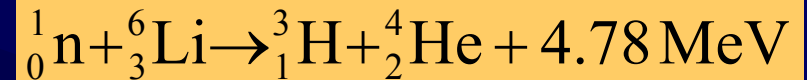
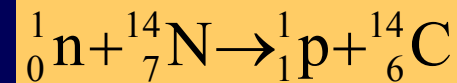
la diffusion inélastique



la capture radiative



les réactions de capture



les réactions de capture de type (n,2n)

les réactions de fission



RAYONNEMENTS IONISANTS

Rayonnements électromagnétiques

4 catégories de rayonnements électromagnétiques:

- rayonnements X

émis lors de la désexcitation d'un atome

- rayonnements γ

qui accompagnent la désexcitation d'un noyau

- photons d'annihilation

résultant de l'annihilation d'un positron avec un électron

- photons de freinage

émis lors du ralentissement des électrons dans la matière

RAYONNEMENTS IONISANTS

Rayonnements électromagnétiques

3 principaux types d'interaction

- l'effet photoélectrique

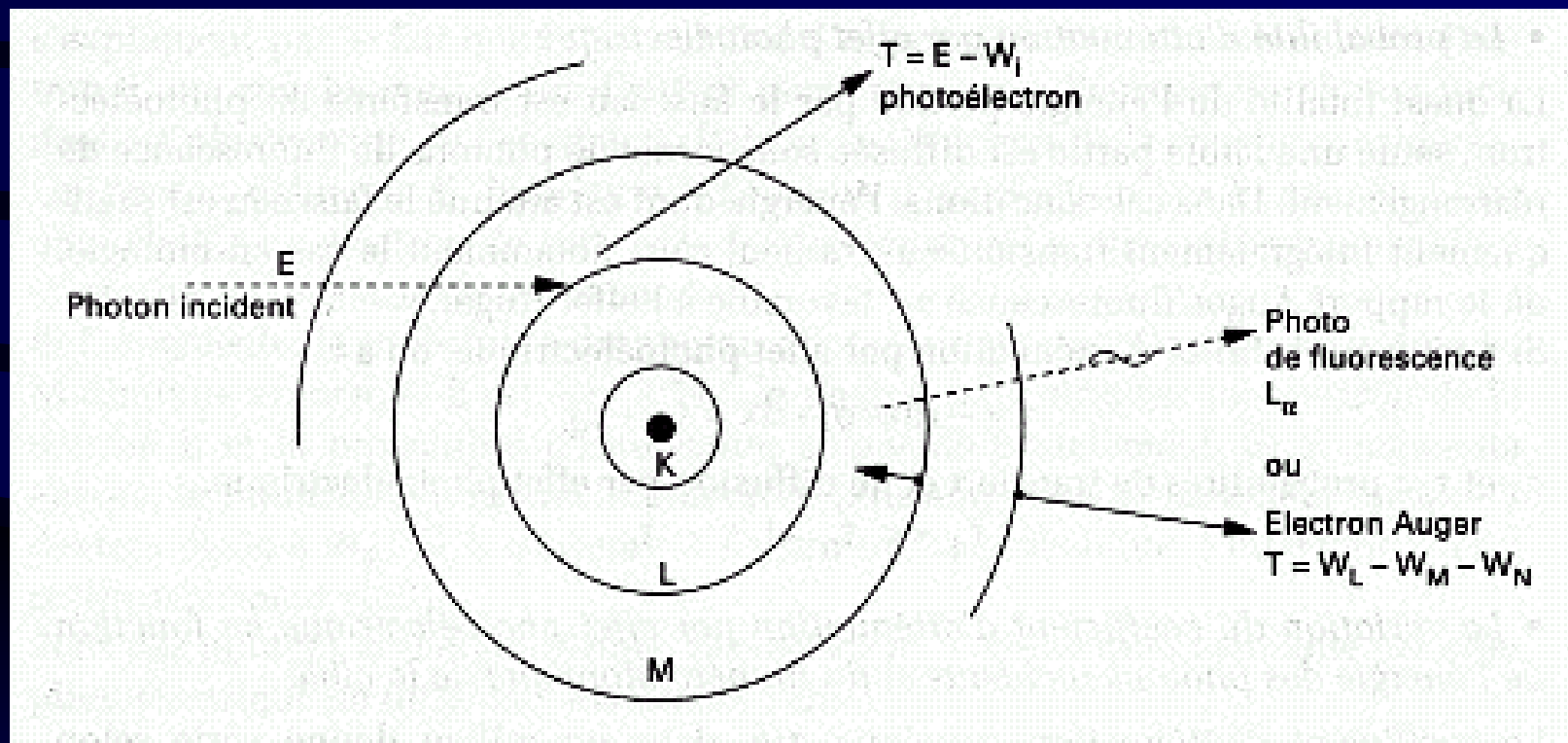
- l'effet Compton

- l'effet de matérialisation (création de paires)

RAYONNEMENTS IONISANTS

Rayonnements électromagnétiques

- l'effet photoélectrique

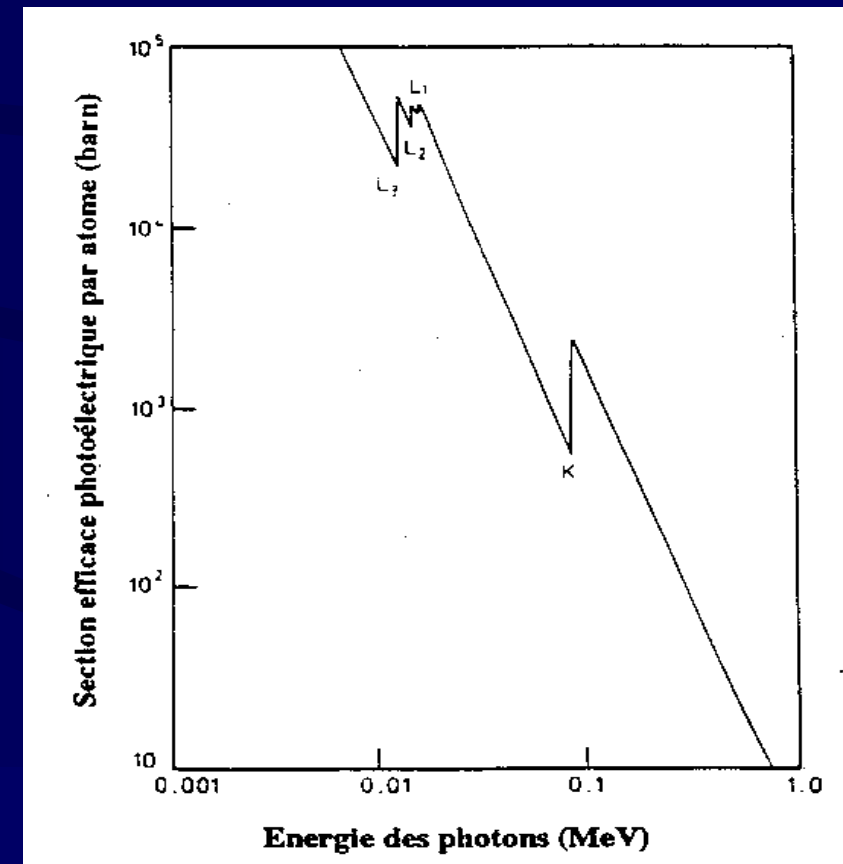
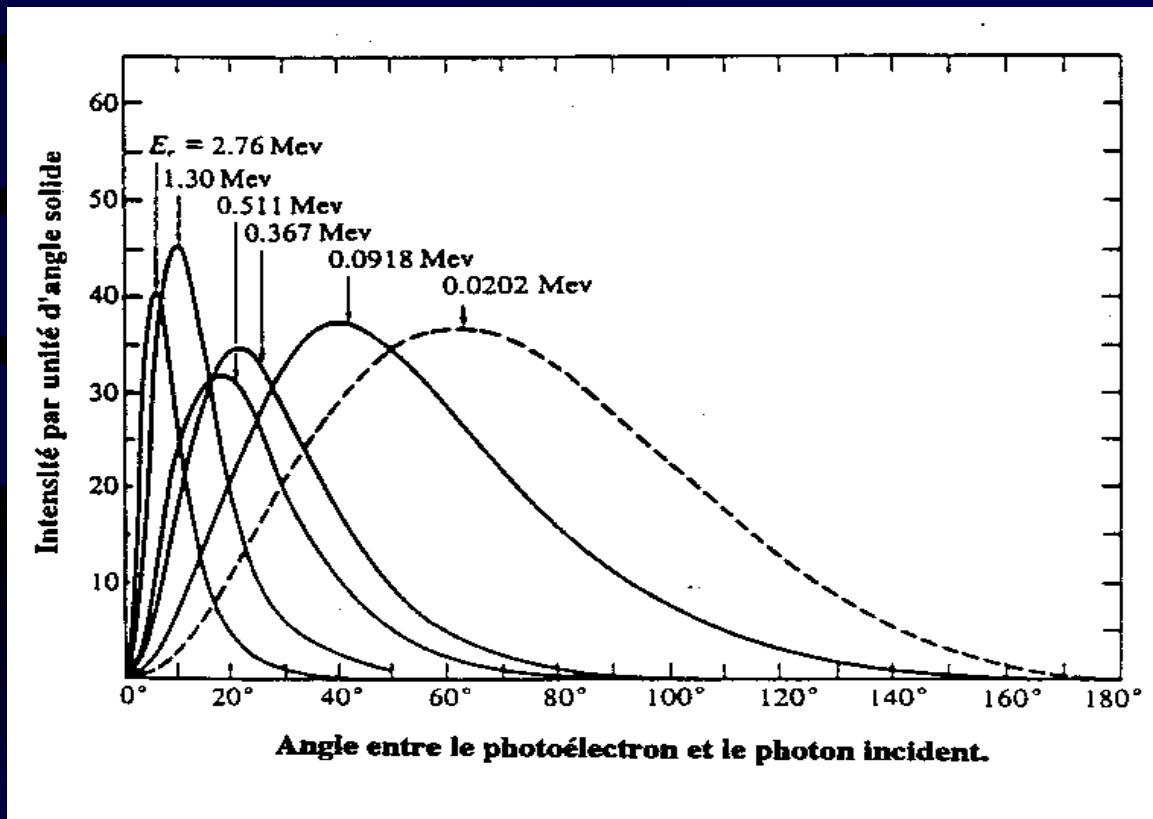


RAYONNEMENTS IONISANTS

Rayonnements électromagnétiques

- l'effet photoélectrique

Distribution angulaire et section efficace

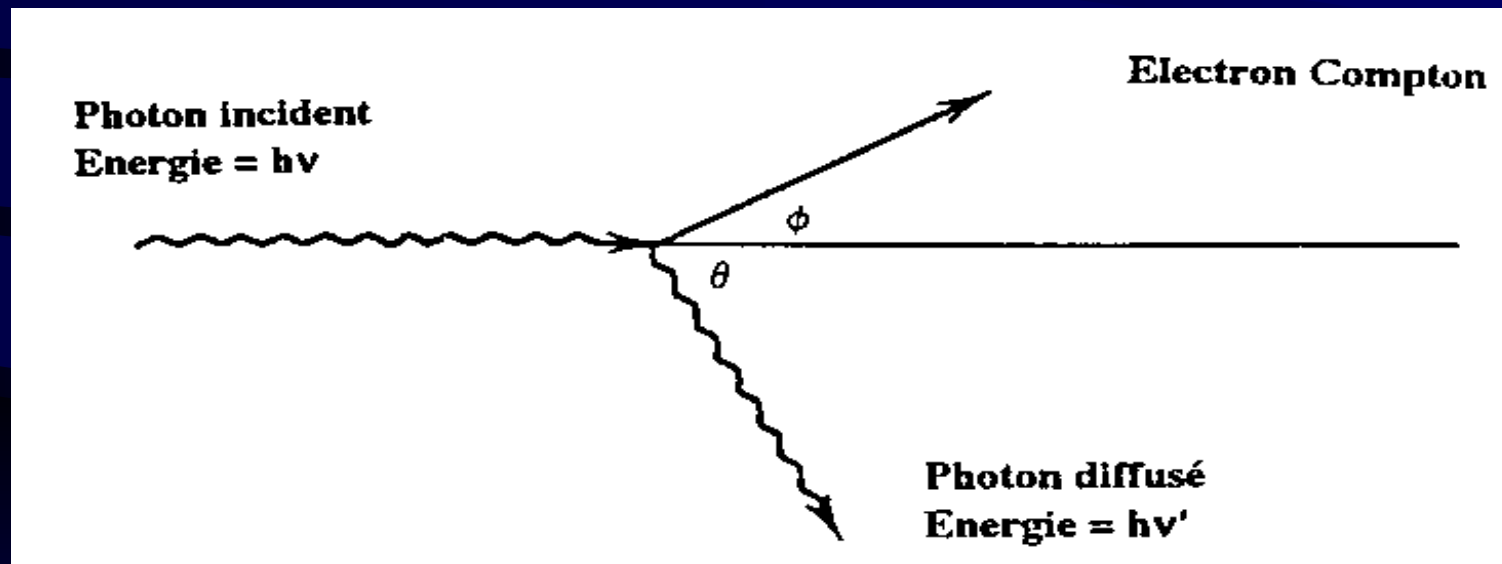


RAYONNEMENTS IONISANTS

Rayonnements électromagnétiques

- l'effet Compton

Interaction avec un électron peu lié du milieu absorbeur



RAYONNEMENTS IONISANTS

Rayonnements électromagnétiques

- l'effet Compton

Caractéristiques énergétiques:

Électron faiblement lié

→ $h\nu \gg W_i$

→ électron \sim au repos

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{h\nu(\text{MeV})}{0.511}$$

$$E_e = \frac{h\nu\alpha(1 - \cos\theta)}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}$$

RAYONNEMENTS IONISANTS

Rayonnements électromagnétiques

- l'effet de matérialisation (création de paires)

Création d'une paire **électron-positron** lorsque le photon pénètre dans le champ coulombien du noyau

$$h \nu = 2m_0 c^2 + E_{e^-} + E_{e^+}$$

Réaction possible ssi:

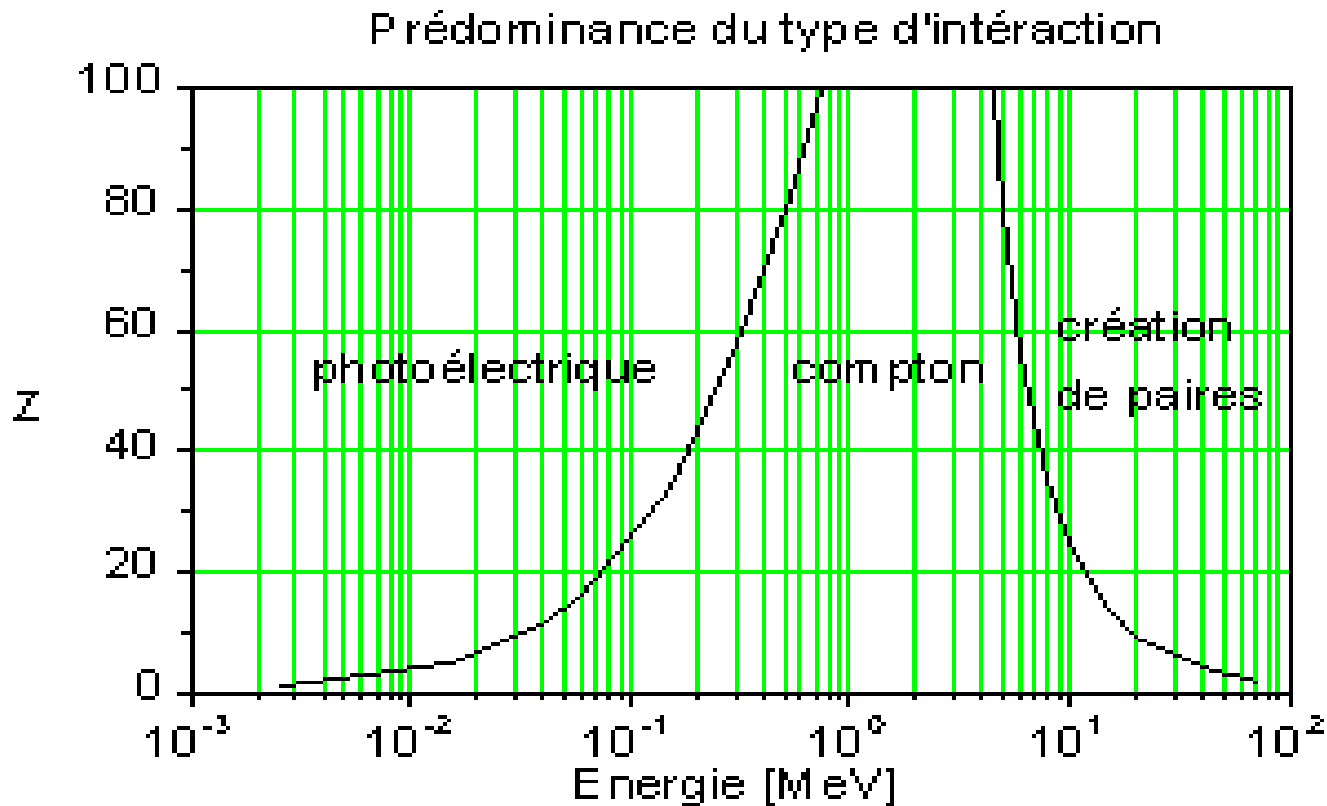
$$h \nu > 2m_0 c^2 = 2 \cdot 0.511 \text{ MeV} = 1.022 \text{ MeV}$$

Puis annihilation du positron avec un électron au repos et formation de 2 photons d'énergie 511keV

RAYONNEMENTS IONISANTS

Rayonnements électromagnétiques

Prédominance du type d'interaction



RAYONNEMENTS IONISANTS

Rayonnements électromagnétiques

$$N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu x} = N_0 \cdot e^{-\tau x} \cdot e^{-\sigma x} \cdot e^{-\pi x}$$

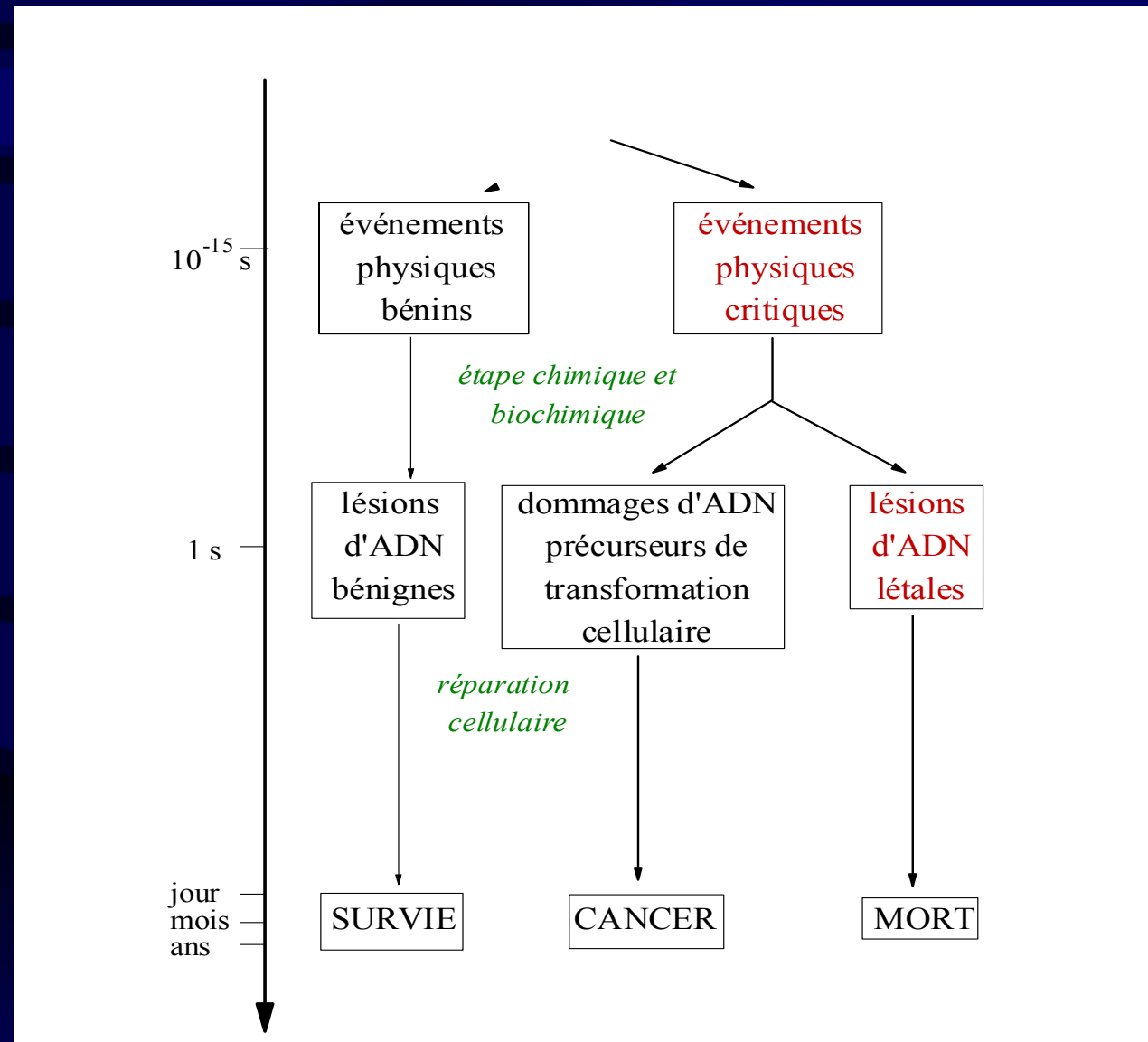
donc $\mu = \tau + \sigma + \pi$ et $\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho} + \frac{\pi}{\rho}$

Dans l'eau:

Energie incidente E	Effet prédominant
$E < 50 keV$	Photoélectrique
$50 keV < E < 20 MeV$	Compton
$E > 20 MeV$	Création de paires

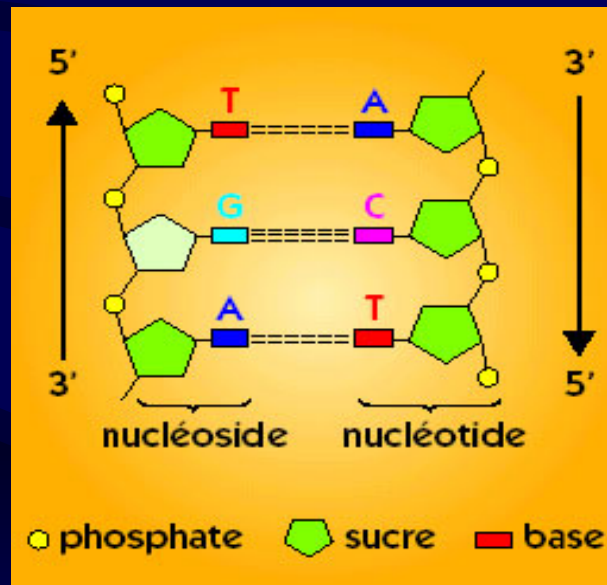
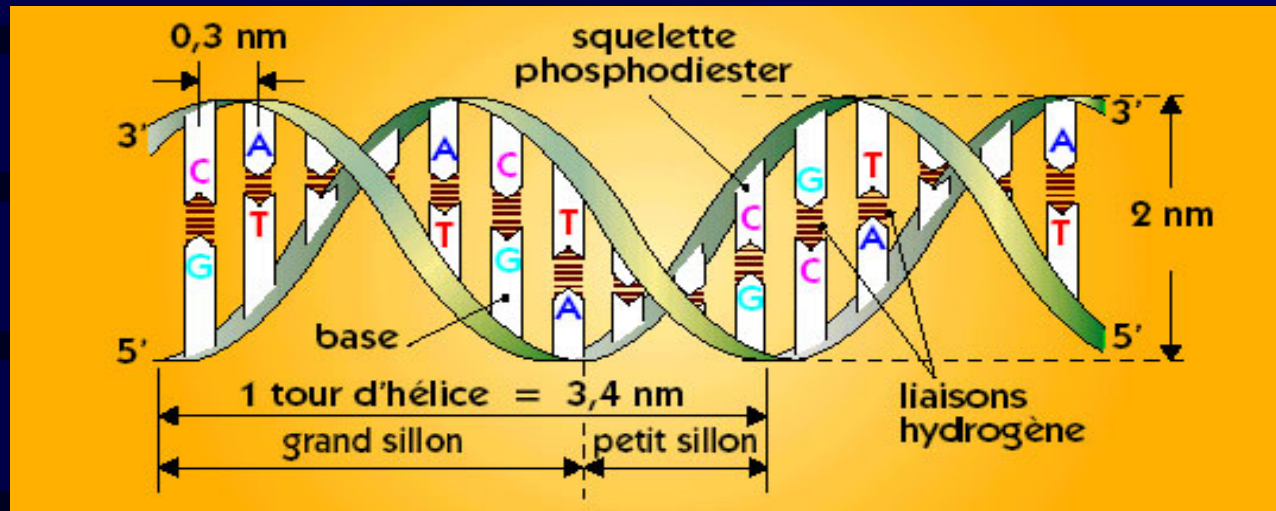
BIOLOGIE DES RADIATIONS IONISANTES

Chronologie



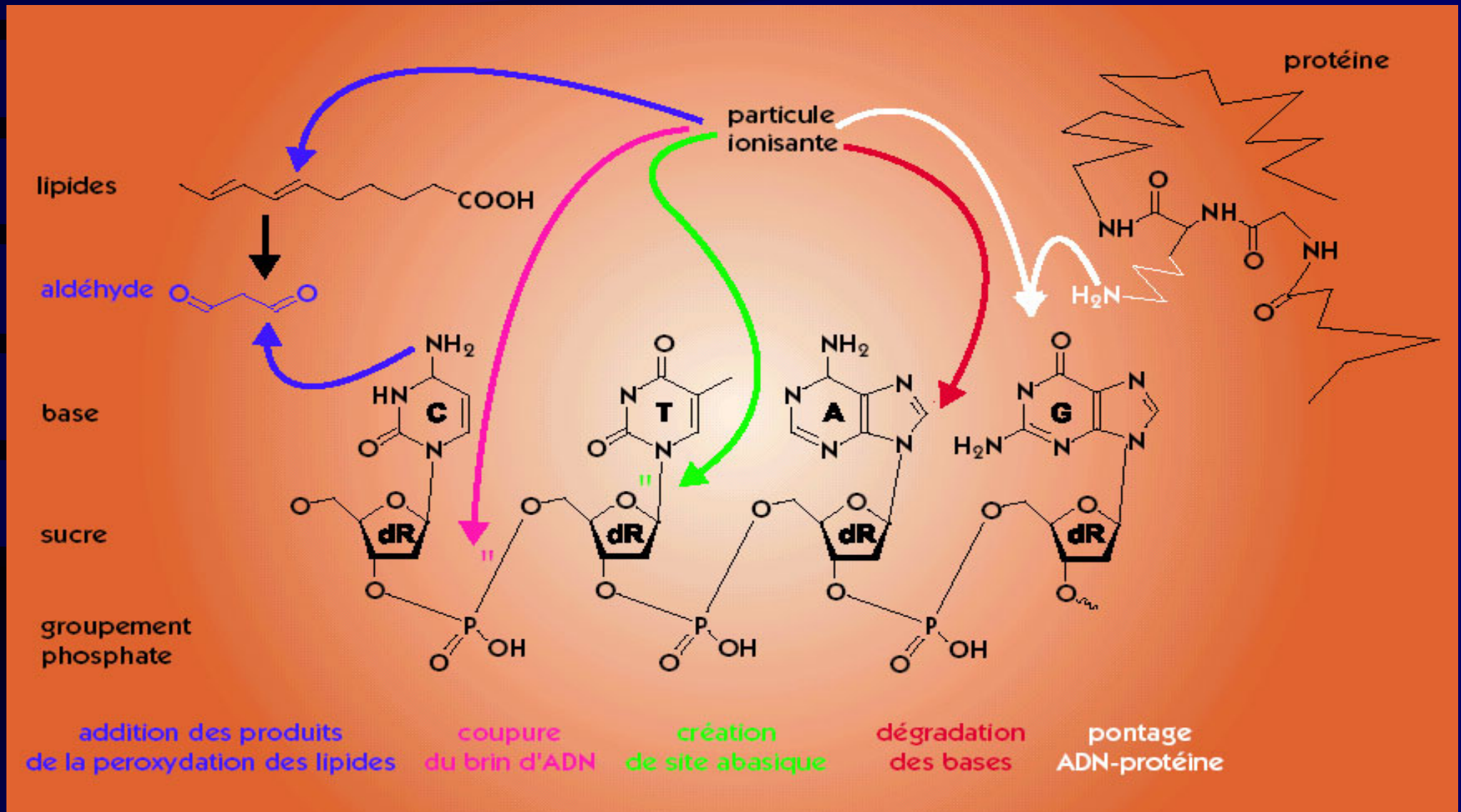
BIOLOGIE DES RADIATIONS IONISANTES

Structure de l'ADN



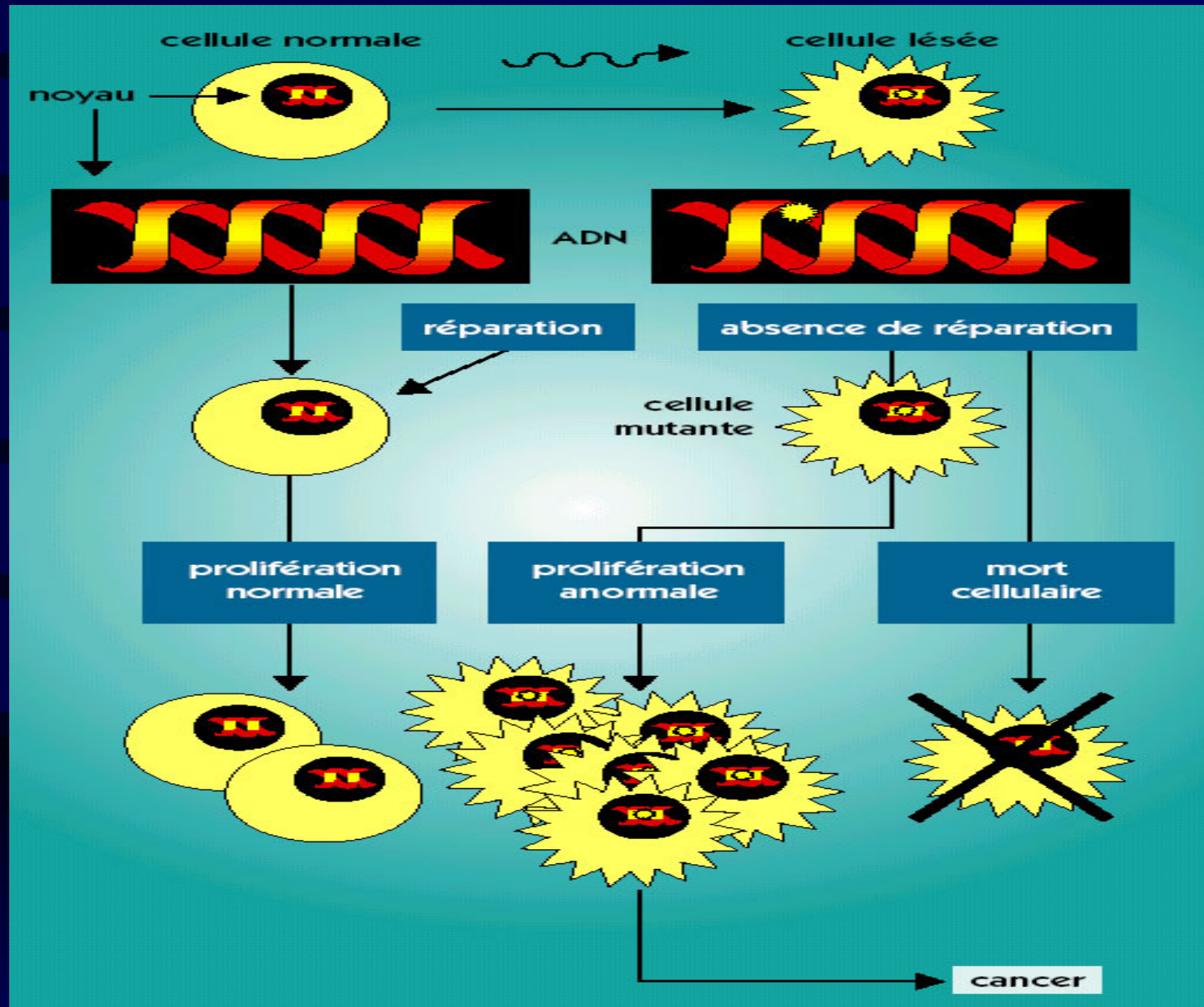
BIOLOGIE DES RADIATIONS IONISANTES

Dommmages radio-induits



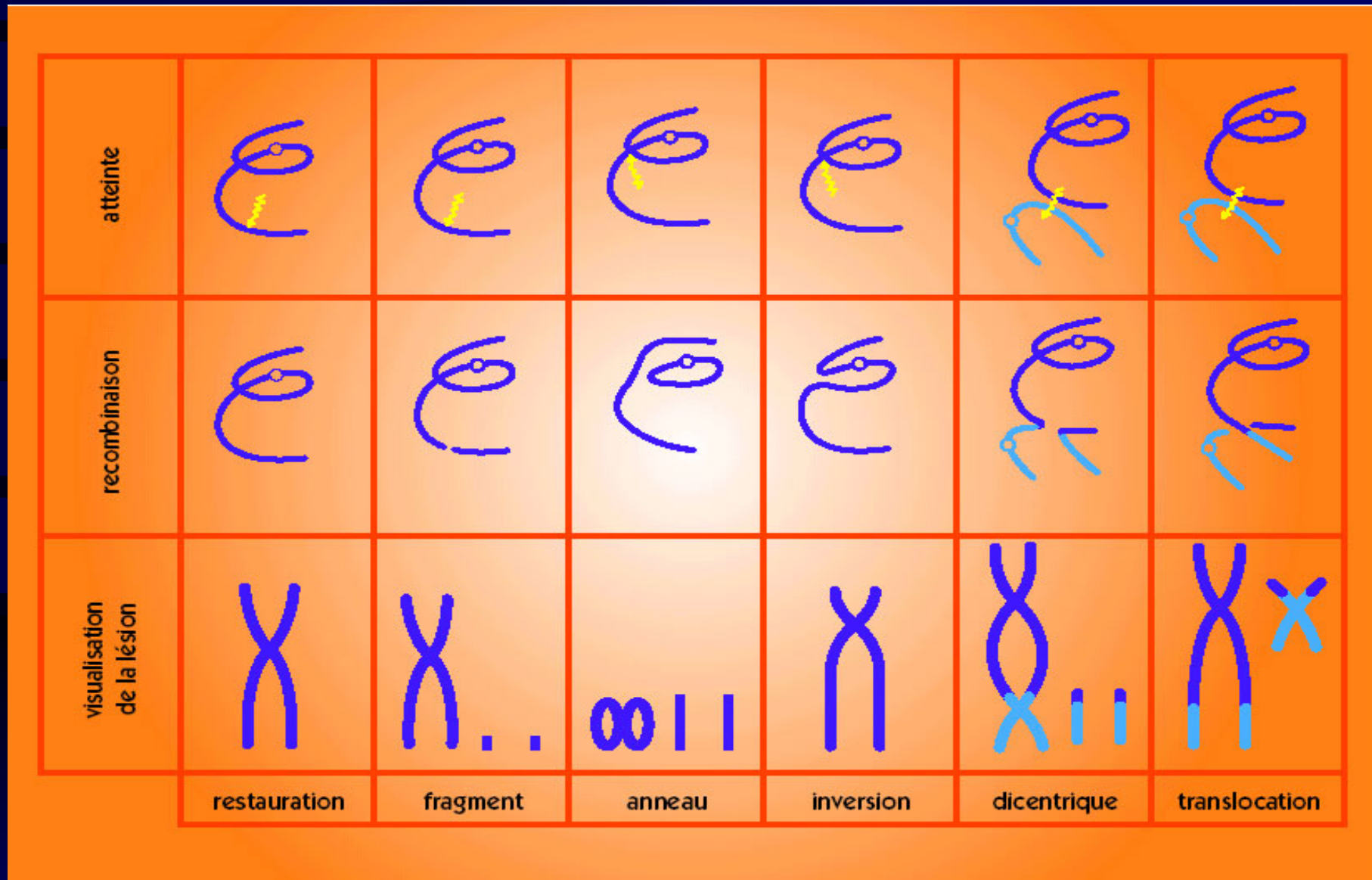
BIOLOGIE DES RADIATIONS IONISANTES

Dommmages radio-induits



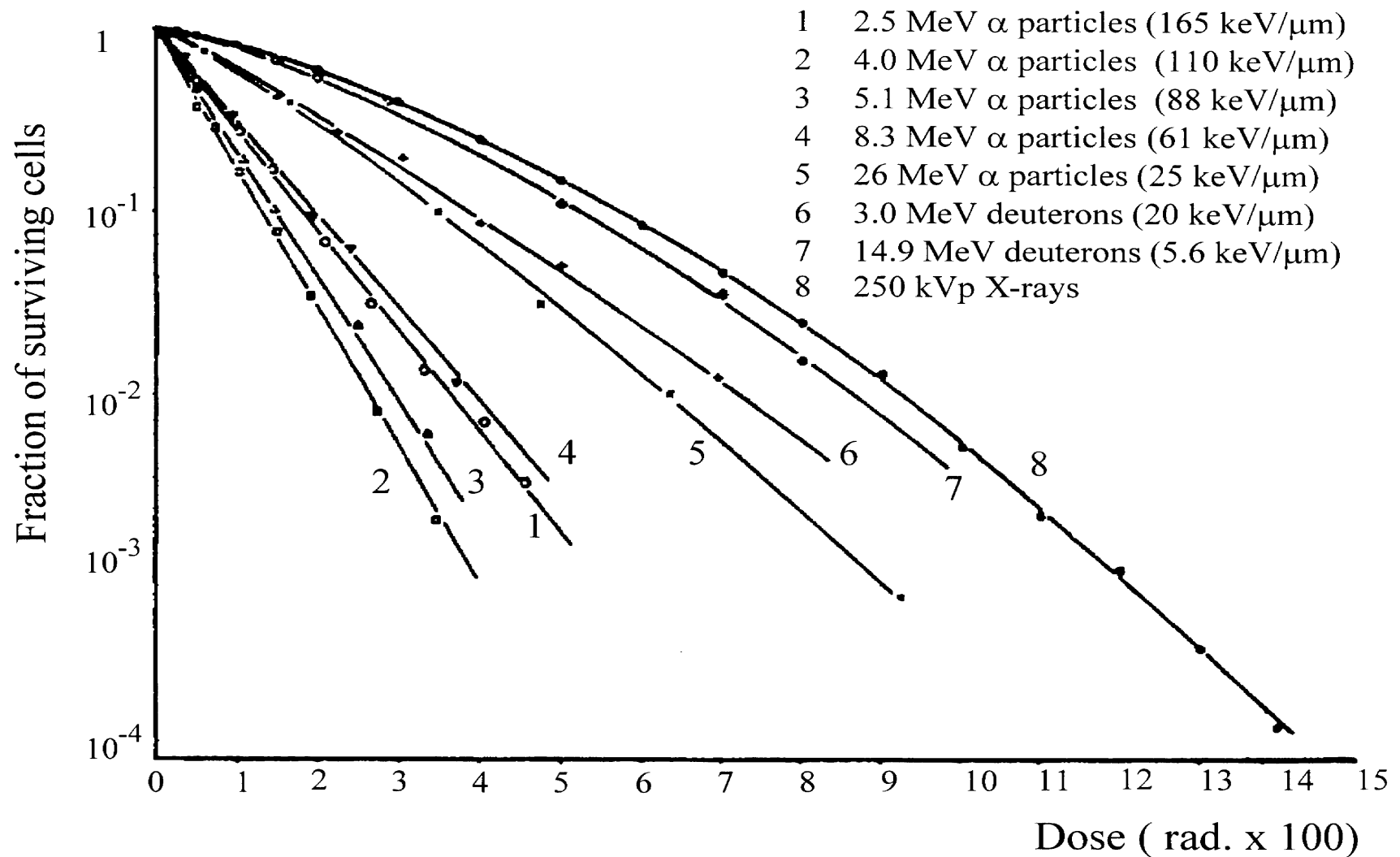
BIOLOGIE DES RADIATIONS IONISANTES

Dommmages radio-induits



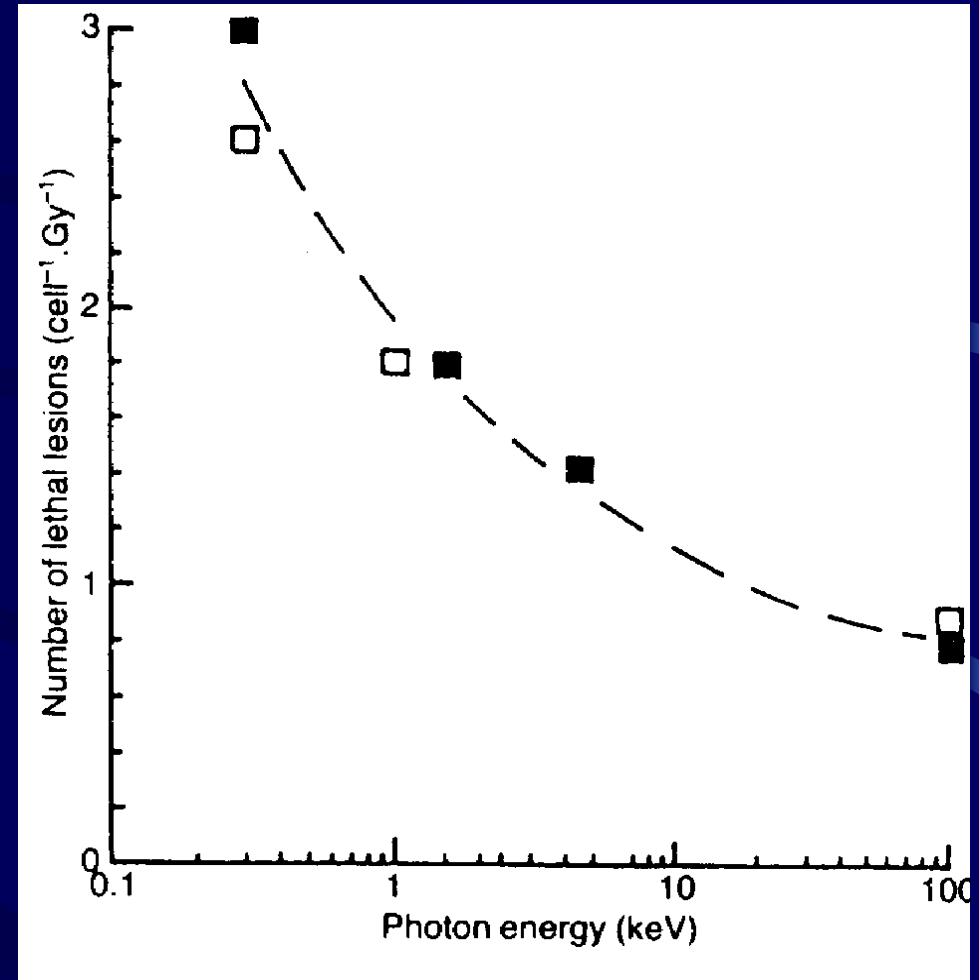
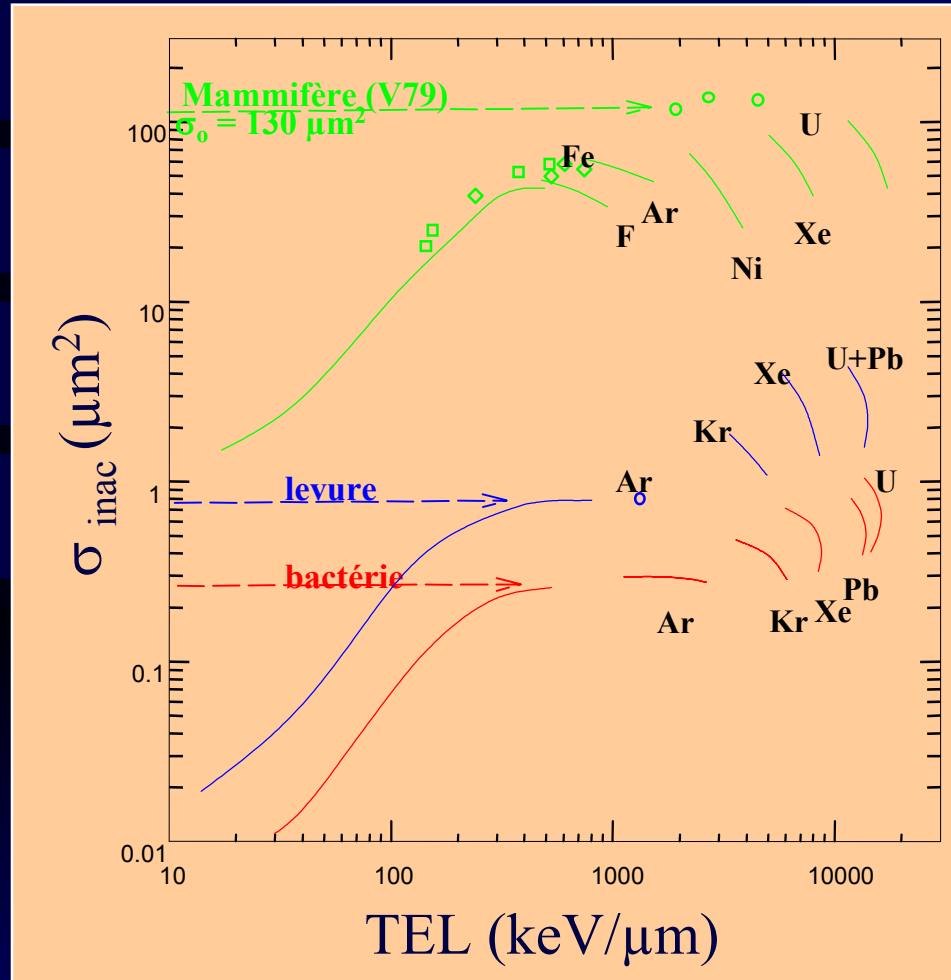
BIOLOGIE DES RADIATIONS IONISANTES

Quantifier l'inactivation cellulaire



BIOLOGIE DES RADIATIONS IONISANTES

Quantifier l'inactivation cellulaire



RAYONNEMENTS NON IONISANTS

Radiations non ionisantes = radiations électromagnétiques avec $h\nu < 10\text{eV}$



$\lambda > 100\text{nm}$

elles comprennent:

- **les radiations UV:** $100\text{nm} < \lambda < 400\text{nm}$ et $3.1\text{eV} < E < 12.4\text{ eV}$
UV extrême - UV proche
- **les radiations visibles:** $400\text{nm} < \lambda < 750\text{nm}$ et $1.65\text{eV} < E < 3.1\text{ eV}$
- **les radiations IR:** $750\text{nm} < \lambda < 1\text{mm}$ et $1.2\text{ meV} < E < 1.65\text{ eV}$
IR proche - IR lointain
- **les ondes hertziennes:** $\lambda > 1\text{mm}$ et $E < 1.2\text{ meV}$

RAYONNEMENTS NON IONISANTS

Radiations incapables d'ioniser



elles n'agissent sur la matière
que dans la mesure où elles sont **absorbées**



leur action dépend de la façon
dont finalement cette **énergie absorbée** va être utilisée



Comment varie l'énergie d'un atome ou d'une molécule?

RAYONNEMENTS NON IONISANTS

Quantification des niveaux électroniques



spectre d'absorption présente des raies

cas d'un atome isolé:

cas simple ne comprenant que des états électroniques excités

cas d'une molécule isolée:

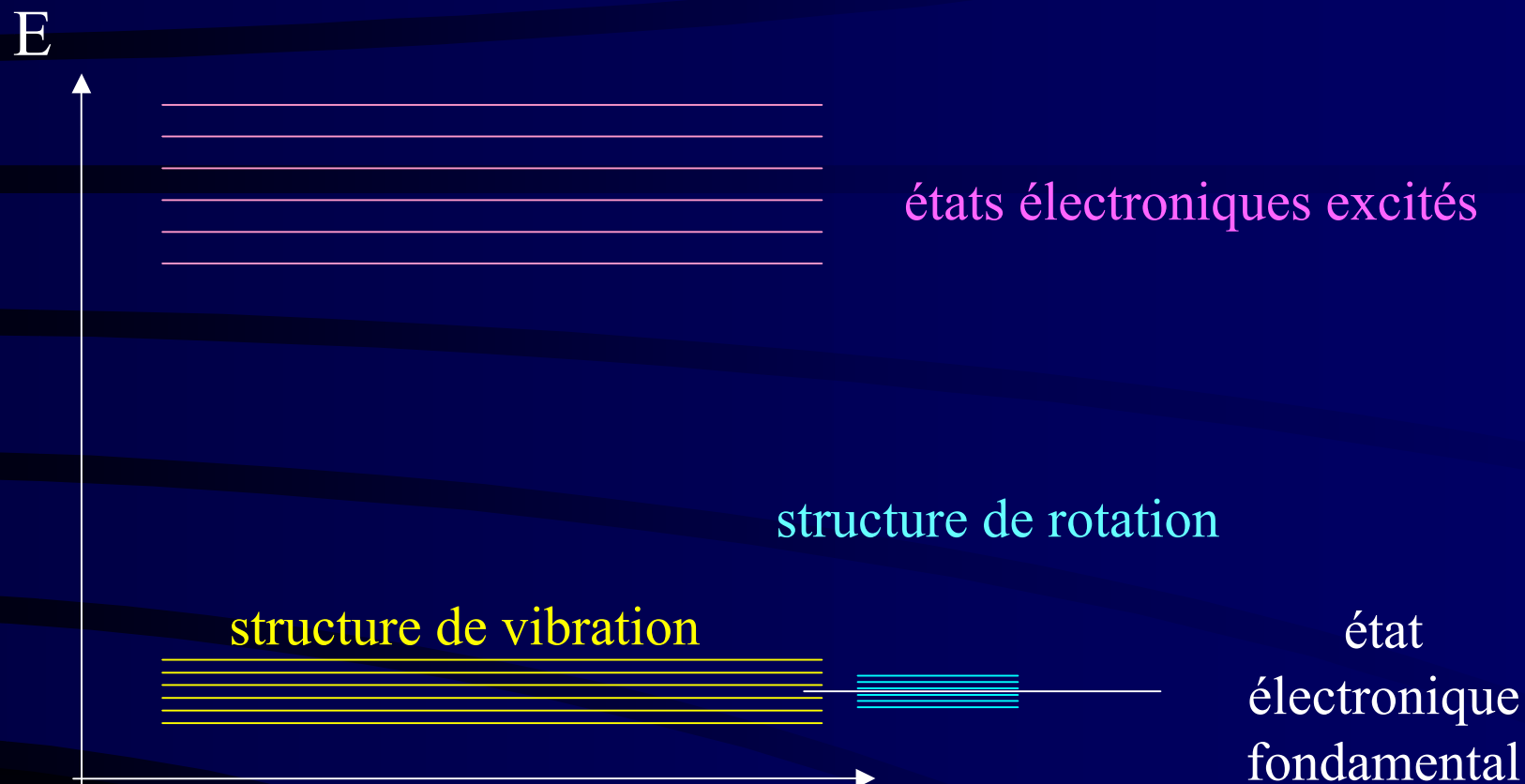
cas plus complexe comprenant:

une énergie électronique

une énergie de vibration

une énergie de rotation

RAYONNEMENTS NON IONISANTS

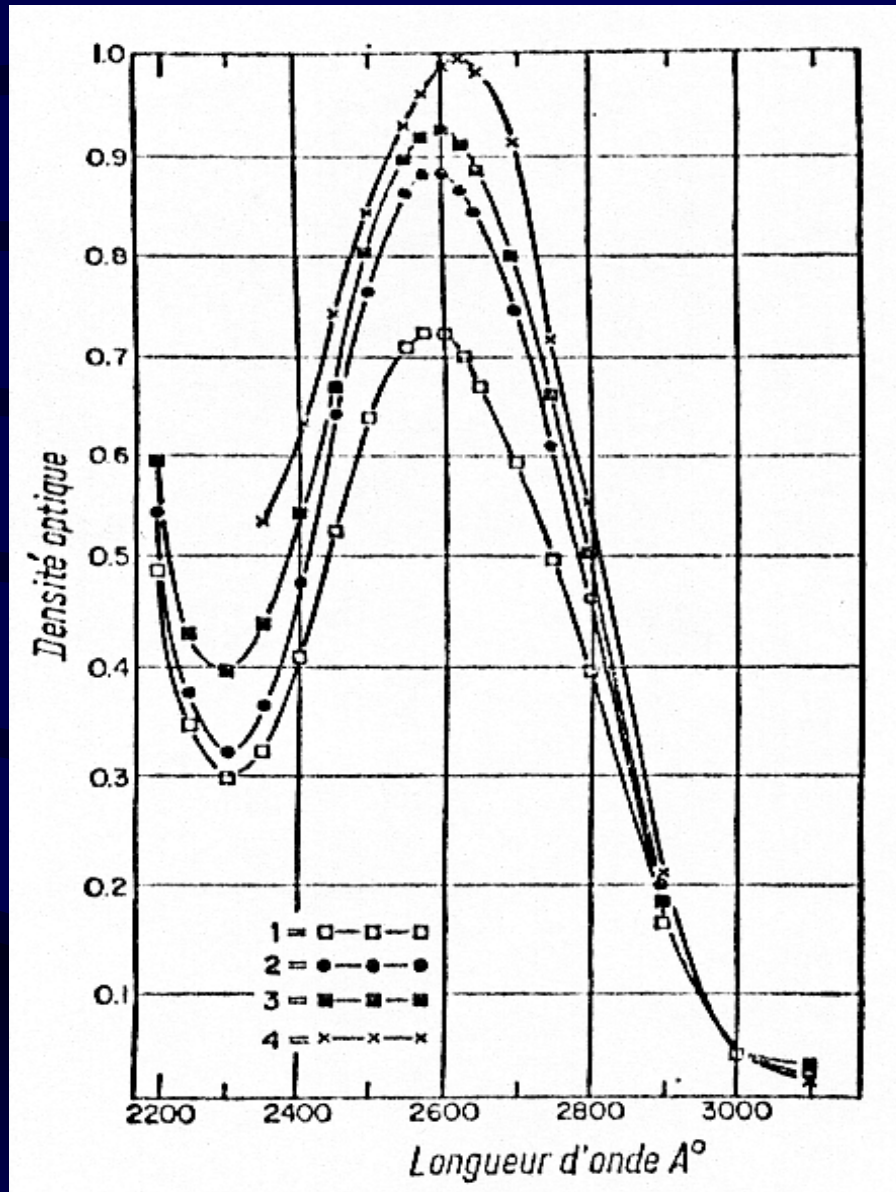


une énergie électronique $\Delta E_e \sim$ qqes eV

une énergie de vibration $\Delta E_v \sim$ qqes $1/10^{\text{ème}}$ eV

une énergie de rotation $\Delta E_r \sim$ qqes $1/100^{\text{ème}}$ eV

RAYONNEMENTS NON IONISANTS



Christophe CHAMPION, Institut de
Physique de Metz, LPMC - e2phy 2002
(Villeurbanne, 26-29 août 2002)

RAYONNEMENTS NON IONISANTS

Devenir de l'énergie absorbée

Energie absorbée = initiatrice de réactions photochimiques

- les radiations visibles et UV: $\Delta E_r + \Delta E_v + \Delta E_e$
- les radiations IR proche: $\Delta E_r + \Delta E_v$
- les radiations IR lointain et hertziennes: ΔE_r

ΔE_r négligeable → ne modifie pas la structure de la molécule



IR lointain et ondes hertziennes: pas d'action chimique

ΔE_v ↗



l'amplitude des oscillations ↗



la molécule est plus fragile



plus apte à réagir

mais action négligeable à température ordinaire



IR proche: pas d'action chimique

RAYONNEMENTS NON IONISANTS

Devenir de l'énergie absorbée

Energie absorbée = initiatrice de réactions photochimiques

Seules les transitions électroniques
(UV et visible)
ont un intérêt photochimique



avec $h\nu$ de l'ordre de l'énergie de liaison chimique
→ réactivité augmentée.

Excitation accompagnée d'une dissociation par rupture de la liaison



deux radicaux libres très réactifs

RAYONNEMENTS NON IONISANTS

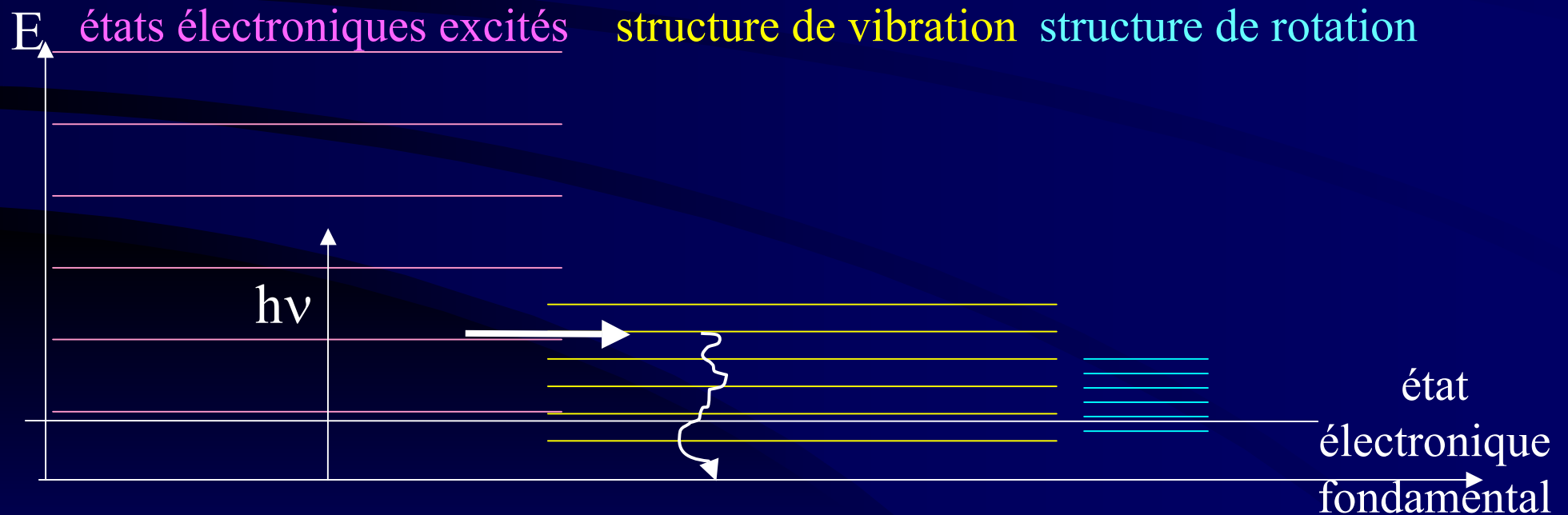
Devenir de l'énergie absorbée

Deux autres processus possibles:

Processus de fluorescence:

L'énergie est dissipée sous forme de chaleur ou réémise sous forme de photon

Processus de conversion interne:



BIOLOGIE DES RAYONNEMENTS NON IONISANTS

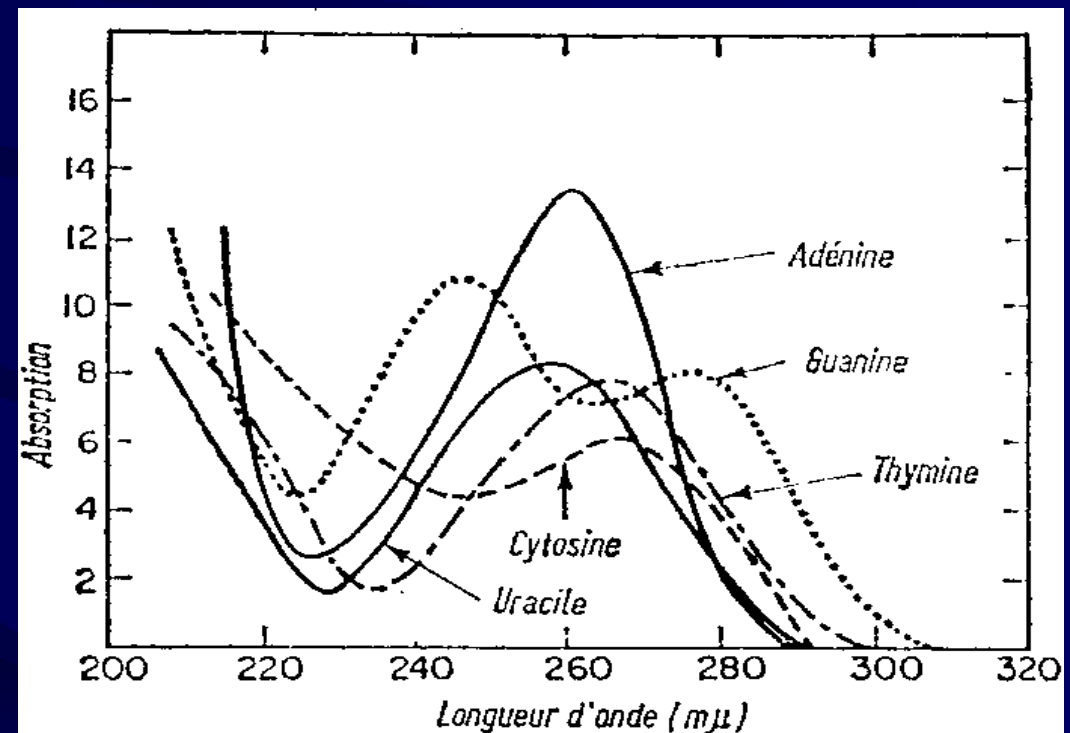
Seuls les composés organiques qui absorbent sélectivement
sont concernés par ce type de radiations
(= composés chromophores)

(les autres ayant une absorption négligeable pour $\lambda > 220\text{nm}$)

absorption de l'ADN
due aux bases

$200\text{ nm} < \lambda < 300\text{ nm}$

avec un pic à $\lambda \approx 260\text{ nm}$



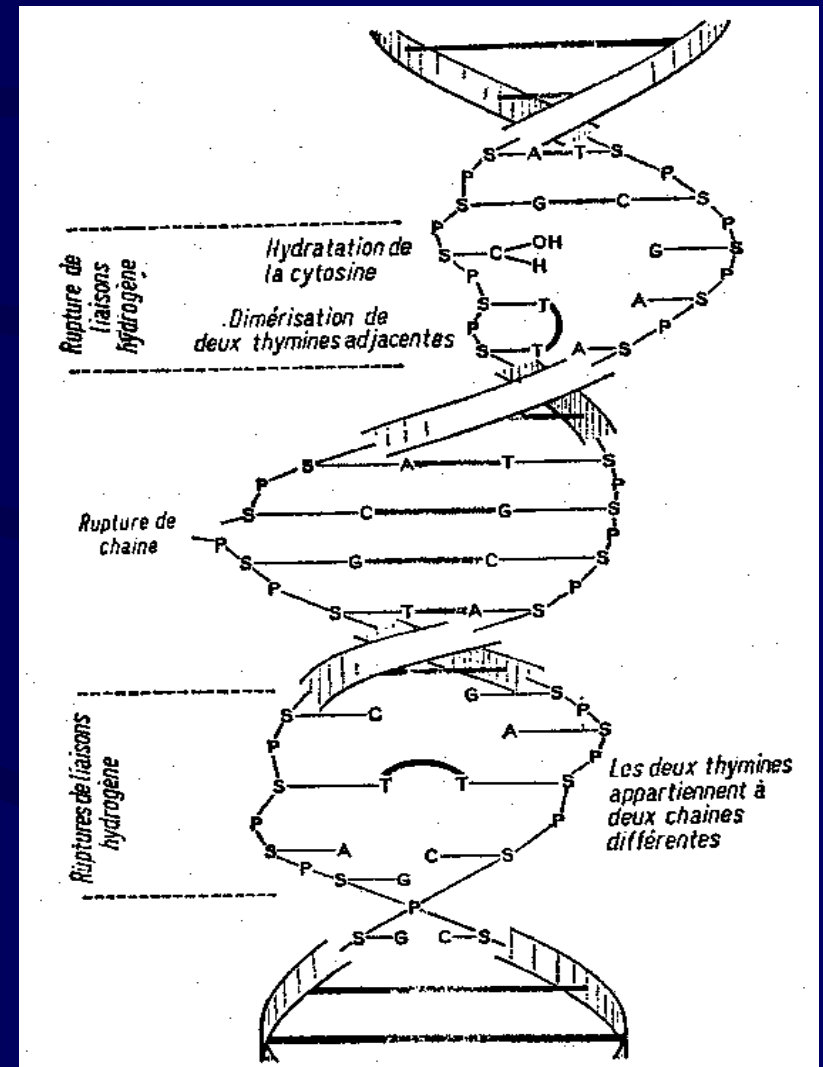
BIOLOGIE DES RAYONNEMENTS NON IONISANTS

Pas d'effet indirect car l'eau n'absorbe pas pour $\lambda > 250$ nm

Au niveau moléculaire

Action
sur les protéines

Action
sur les acides
nucléiques



BIOLOGIE DES RAYONNEMENTS NON IONISANTS

Au niveau cellulaire

les rayons lumineux et UV n'ont qu'une pénétration très faible



effets sur:

les tissus superficiels

effets cutanés

(erythème, pigmentation, cancérisation)

effets oculaires

(« coup de lumière »)

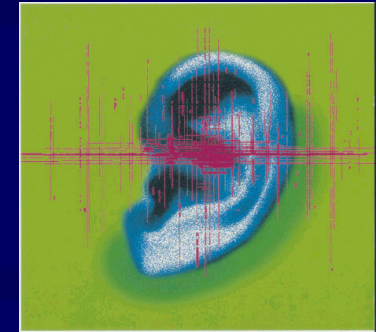
les micro-organismes (virus, bactéries, ...)

courbes effet-dose monochromatiques

sélectivité
spectre d'action

RAYONNEMENTS NON IONISANTS

Le son



Le son est produit par les vibrations mécaniques d'un milieu élastique (gaz, liquide ou solide).

Aucun son ne peut se propager en l'absence de matière (vide).

La vitesse de son dans l'air est environ 340 m/s.

RAYONNEMENTS NON IONISANTS

Les ultrasons

Principaux effets biologiques

Effet mécanique

Les vibrations provoquent
des compressions,
des expansions

micro massages entraînant
à une dilacération
des fibres du tissu

effet fibrolytique
mis à profit dans
le traitement des cicatrices

Effet thermique

augmentation de la température

augmentation du calibre
des vaisseaux sanguins
vasodilatation

modification
de la perméabilité
des membranes

aux sites de réflexion
(cartilages, tendons)

RAYONNEMENTS NON IONISANTS

Les ultrasons

Principales applications médicales

Usage thérapeutique

thermothérapie \neq celle des IR
car profondeur d'action
plus grande

action fibrolytique
micromassage

Au niveau des interfaces
réflexion des ultrasons
accumulation d'énergie
réchauffement aux interfaces
(peau/muscle et muscle/os)

Diagnostic médical

La pénétration dans les tissus
dépend de :

- la fréquence des ultrasons
- la perméabilité acoustique
des tissus



CONCLUSION

Qu'il soit ionisant ou non ionisant,
le rayonnement peut modifier la cartographie génique de notre ADN

Que ce soit par le biais de:

- collisions moléculaires
- réactions photochimiques
- réchauffements cellulaires localisés

Et bien que l'étape physique ne dure que quelques femto-secondes, elle n'en constitue pas moins le **chaînon initiateur** d'une longue séquence d'événements chimiques puis biologiques qui peuvent entraîner modification du patrimoine génétique (**aberrations chromosomiques**) ou encore **la mort de la cellule**

