

# Rayonnements ionisants

Bardia Farman

Physicien Médical  
Hôpital La Timone  
Marseille



# Plan

- Particules chargées et non chargées
- Intercations avec la matière
- Effets des rayonnements ionisants

# I - Rayonnements ionisants

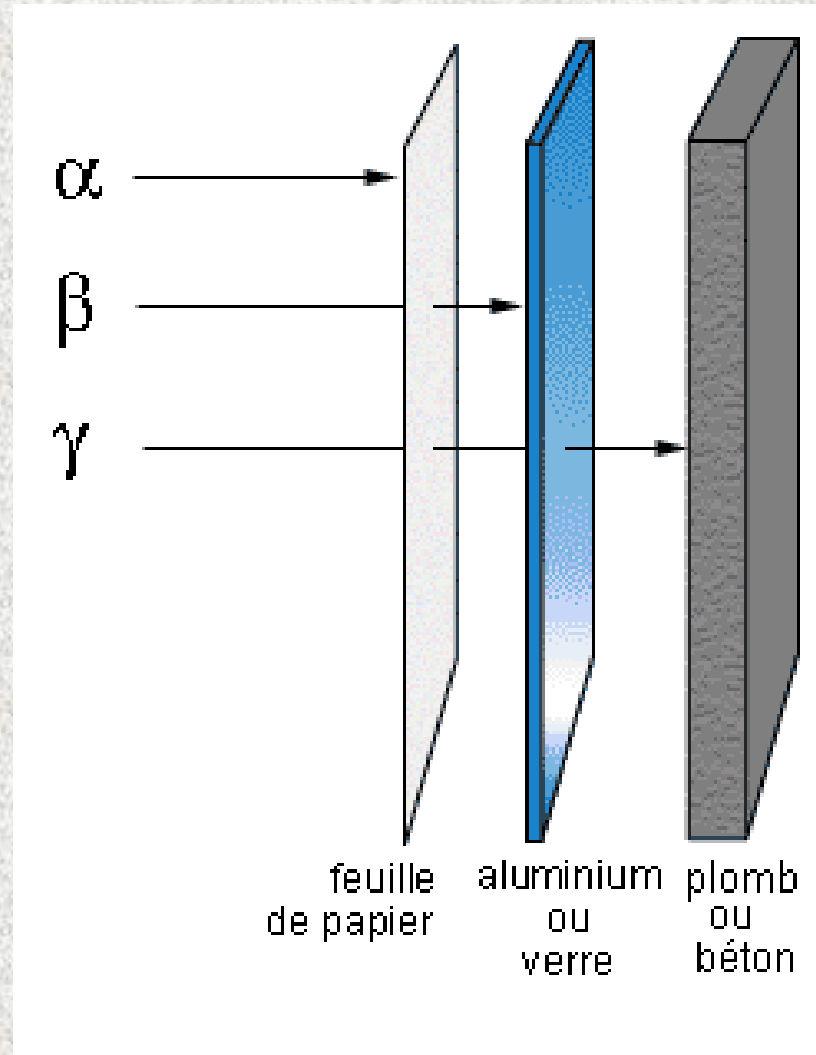
## Particules Chargées

- particules alpha
- particules bêta, électrons
- protons

## Particules non Chargées

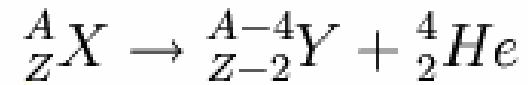
- photons : gammas et X
- neutrons

# Rayonnements ionisants

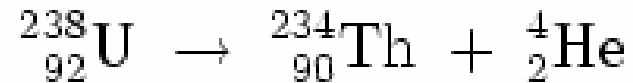


# Rayonnement $\alpha$

la particule alpha est un noyau d'Hélium



Exemple d'émission alpha :

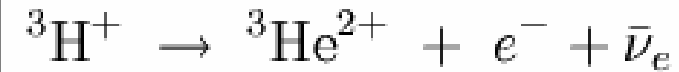


# Rayonnement $\beta^-$

Émission d'un électron

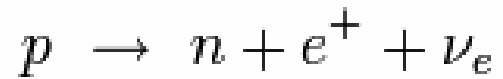


Exemple de désintégration  $\beta^-$  :

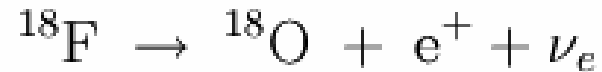


# Rayonnement $\beta^+$

Émission d'un positron

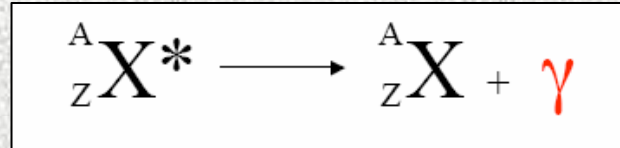


Exemple de désintégration  $\beta^+$  :

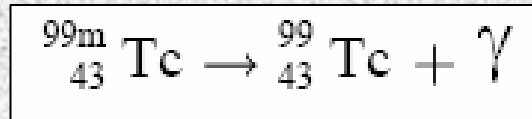


# Rayonnement $\gamma$

Le rayonnement gamma apparaît lors de la désexcitation d'un noyau instable



Exemple d'émission gamma :





# Interactions RI - Matière

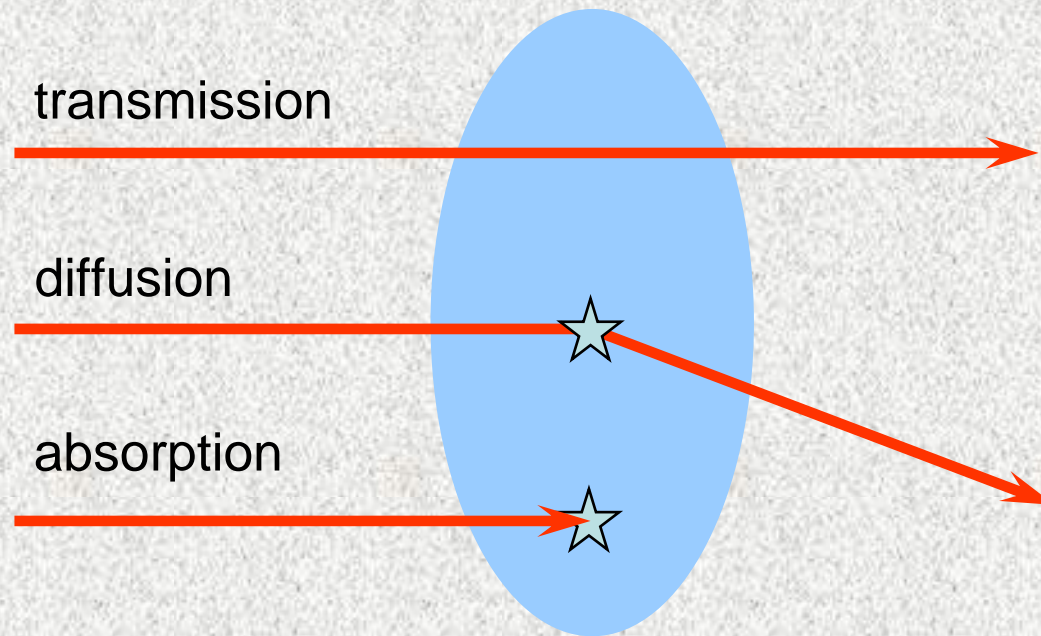
## Interaction Photon - Matière

(dépôt indirect d'énergie)

## Interaction Electron - Matière

(dépôt direct d'énergie)

# Interactions Photons - Matière



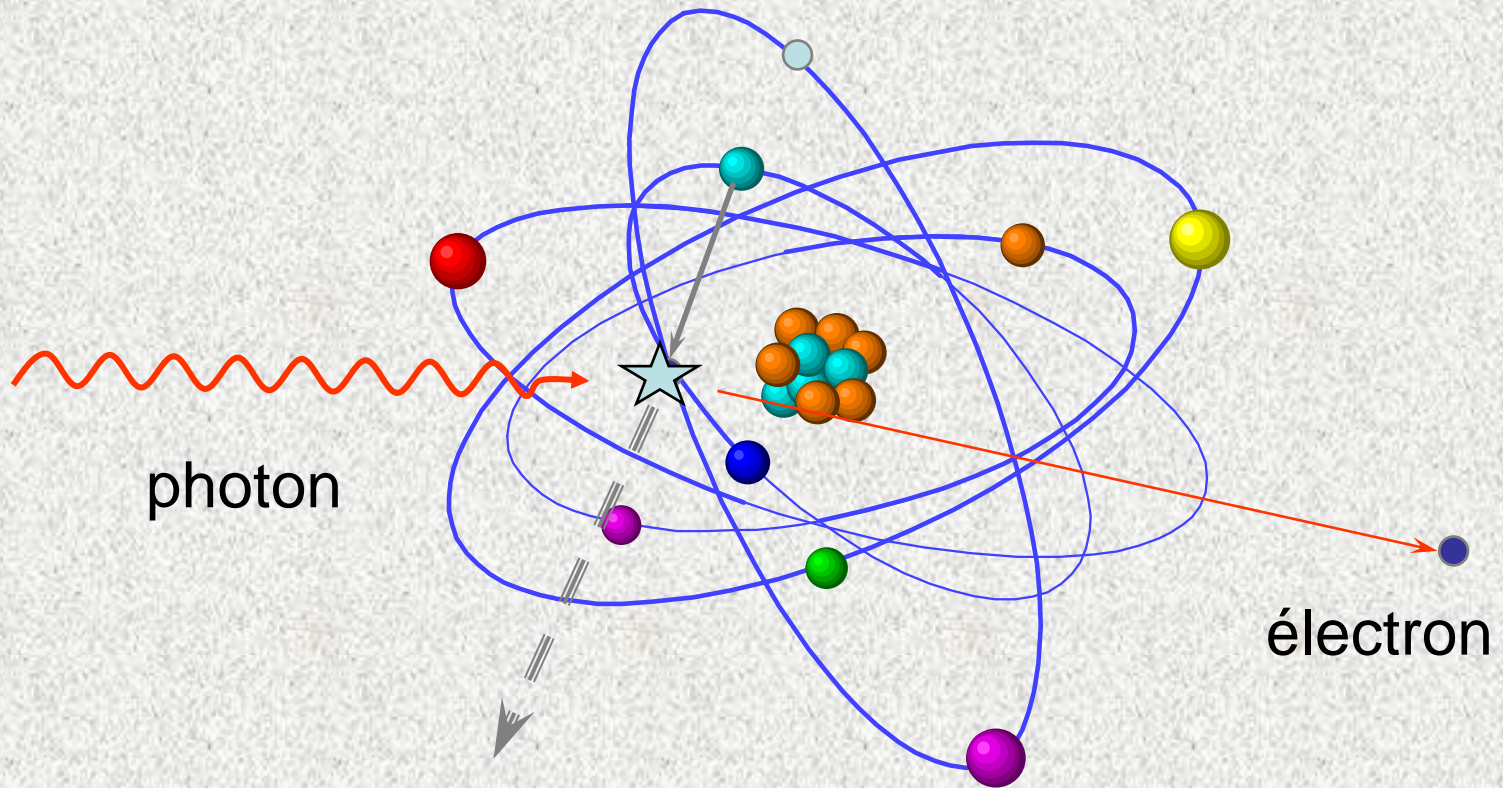
★ Dépot indirect d'énergie

# Formation d'image radiologique

- Transmission
- Diffusion
- Absorption



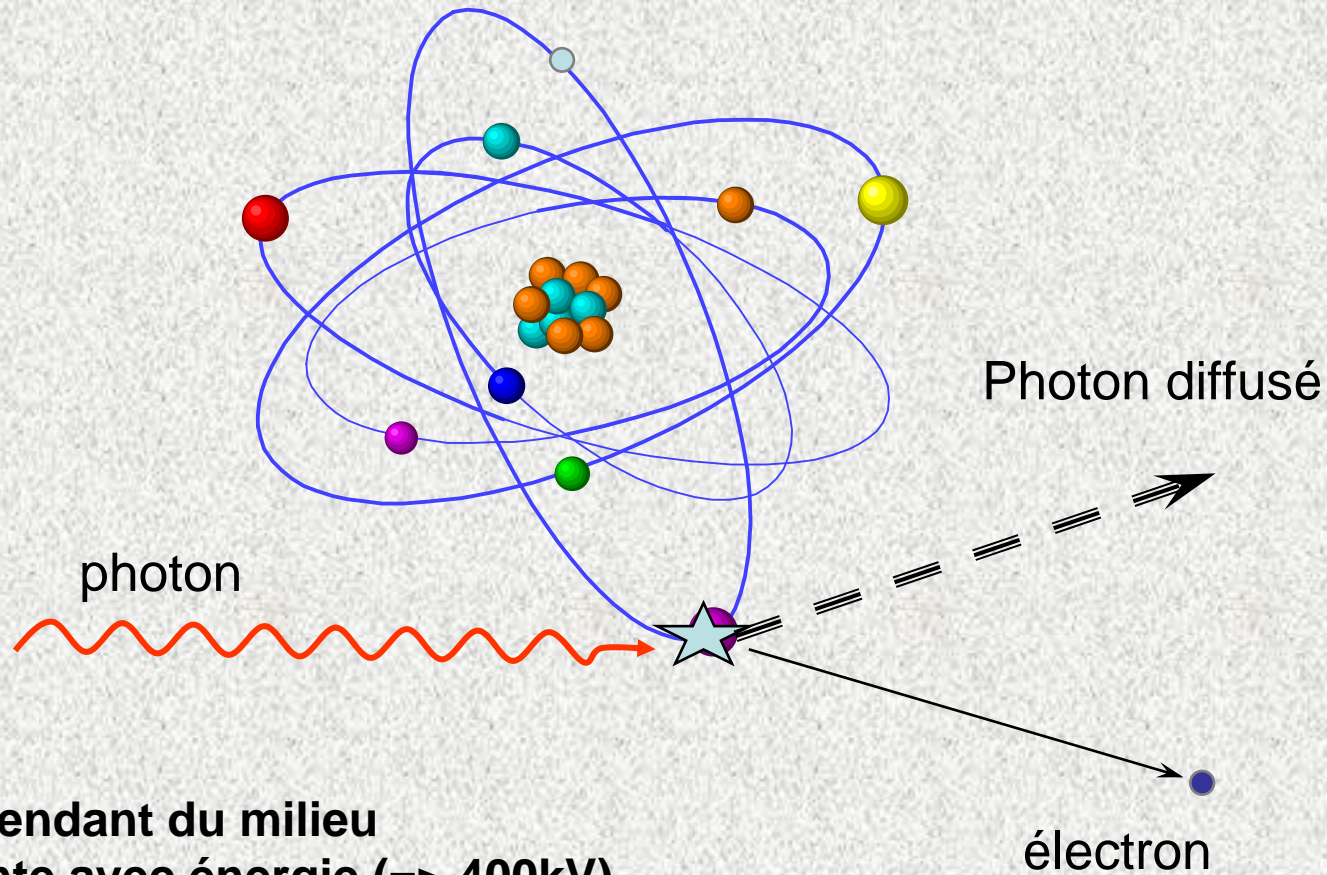
# EFFET PHOTOELECTRIQUE



Raie caractéristique

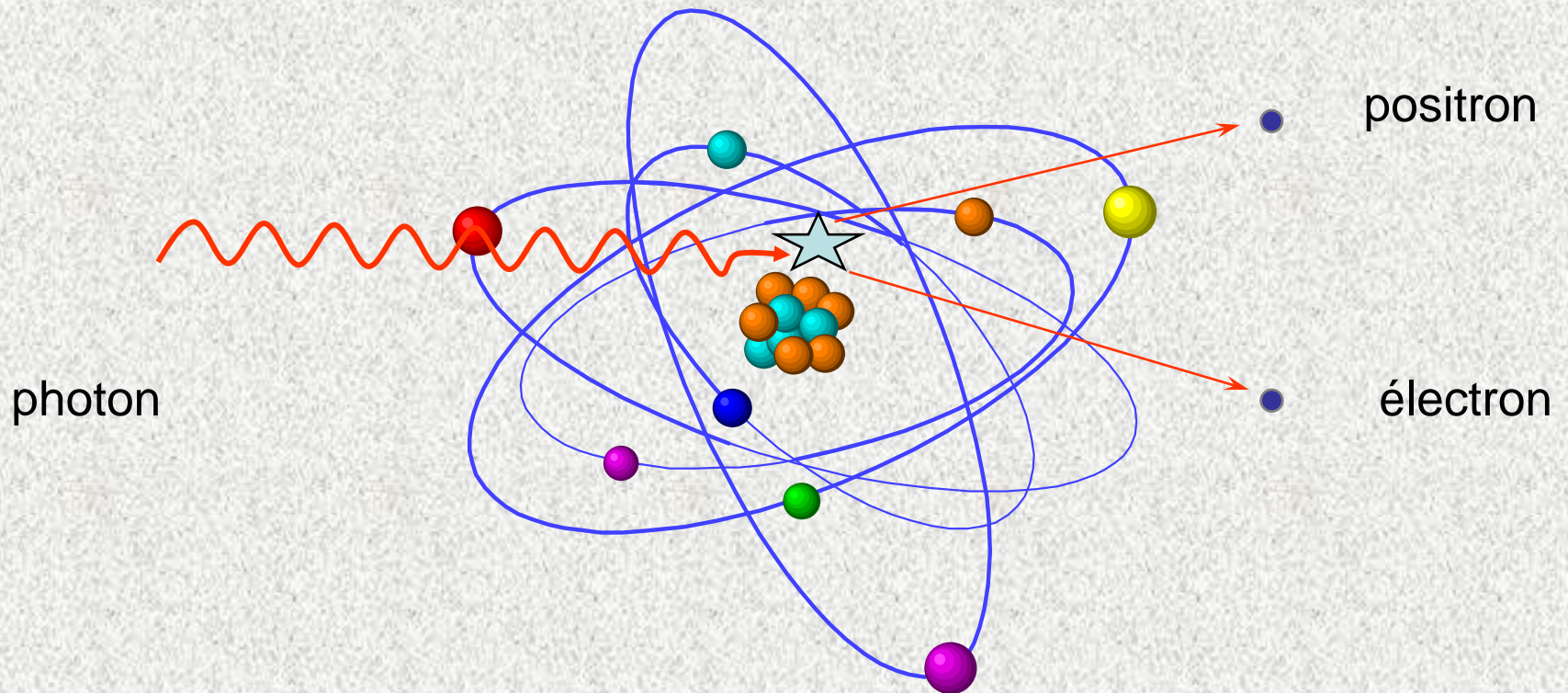
**surtout basse énergie  
pour noyaux "lourds" (Pb, W)  
essentiellement "absorption"**

# EFFET COMPTON



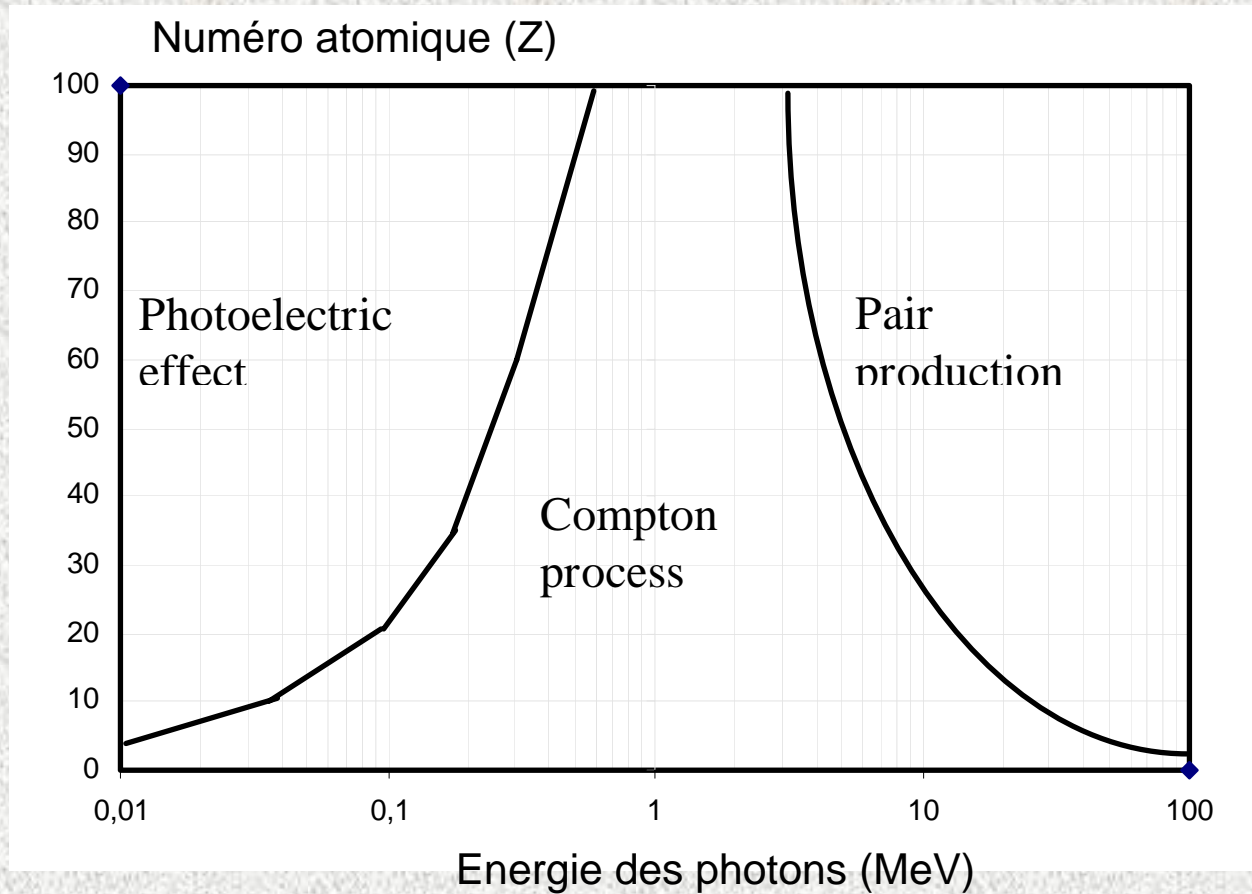
**± indépendant du milieu**  
**augmente avec énergie (=> 400kV)**  
**absorption + diffusion**  
**diffusé peu directionnel**

# PRODUCTION DE PAIRE



Énergie minimale du photon incident : 1,022 MeV,  
(la masse au repos des 2 particules)

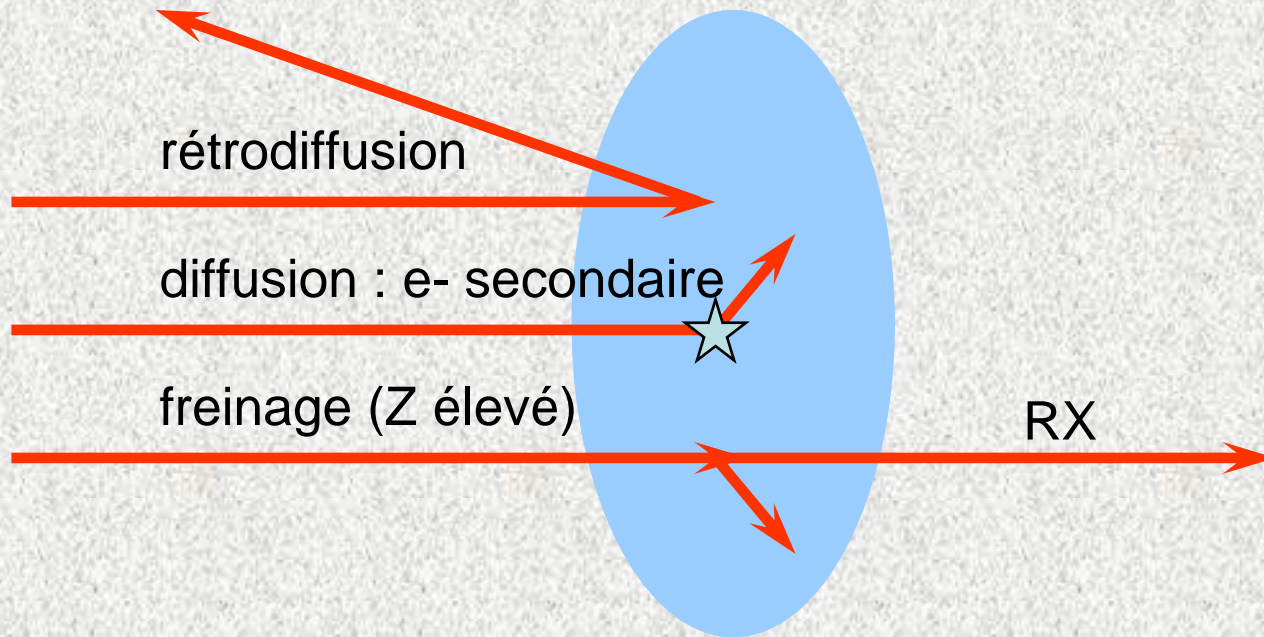
# INTERACTIONS PHOTON



Photon energy (MeV)

The dominating photon absorption process in different materials of different atomic numbers

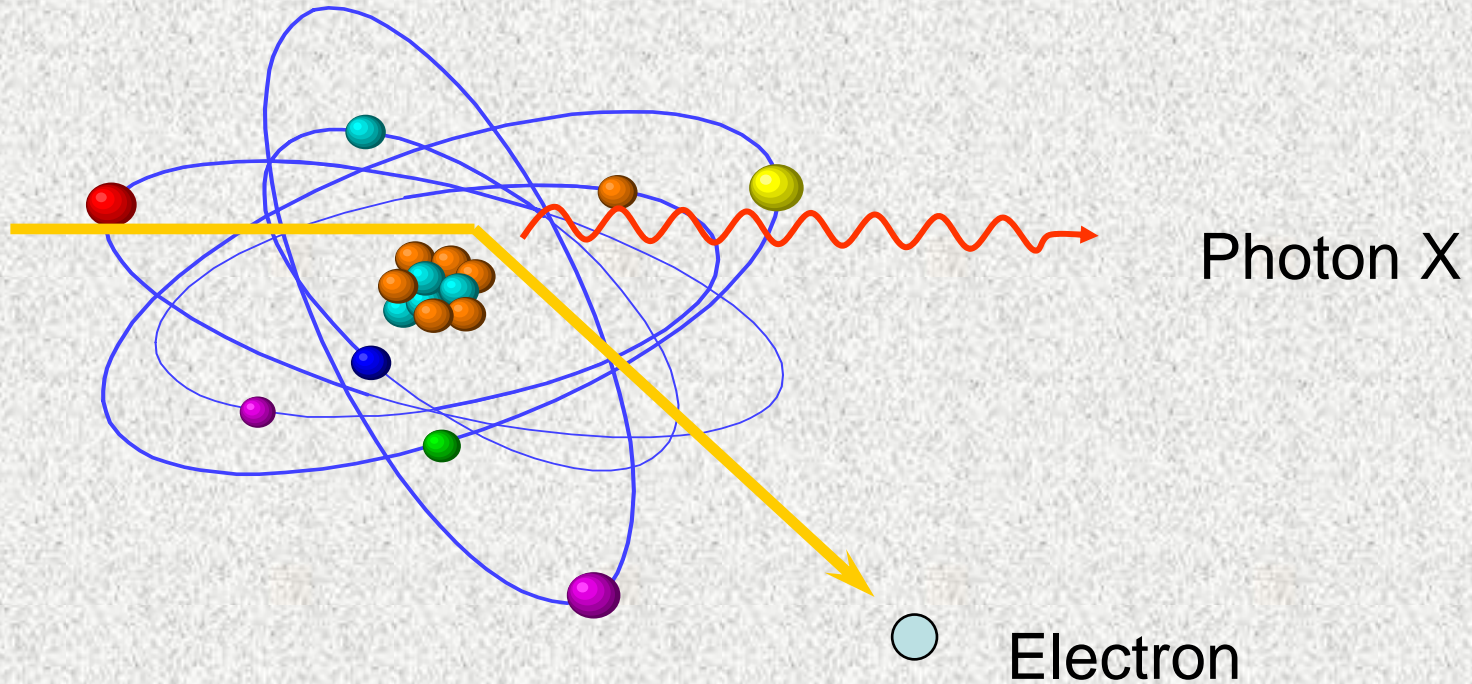
# Interactions Électron - Matière



★ Dépot direct d'énergie



# Rayonnement de Freinage (Bremsstrahlung)

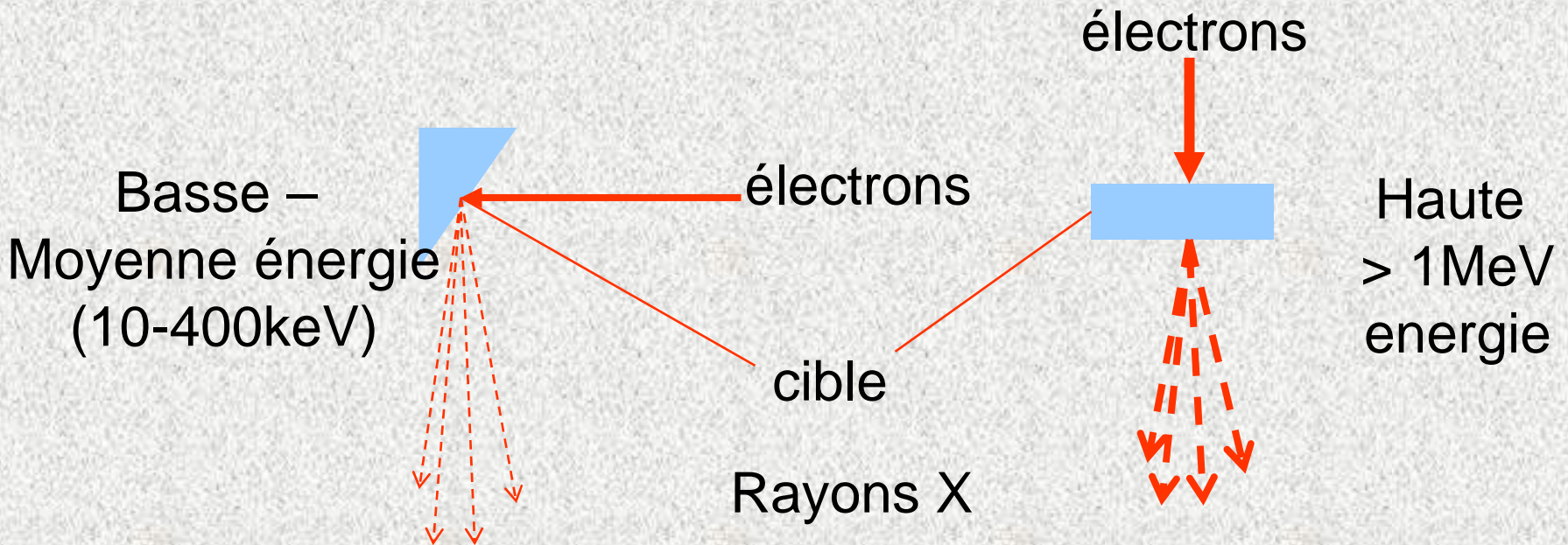


# Rayonnement de Freinage (Bremsstrahlung)

- Nombre atomique élevé de la cible (anode) : champ électromagnétique créé par le noyau élevé
- Électrons ayant une énergie élevée
- Augmentation de l'énergie augmente la probabilité de production de rayonnement de freinage et donc la production de RX

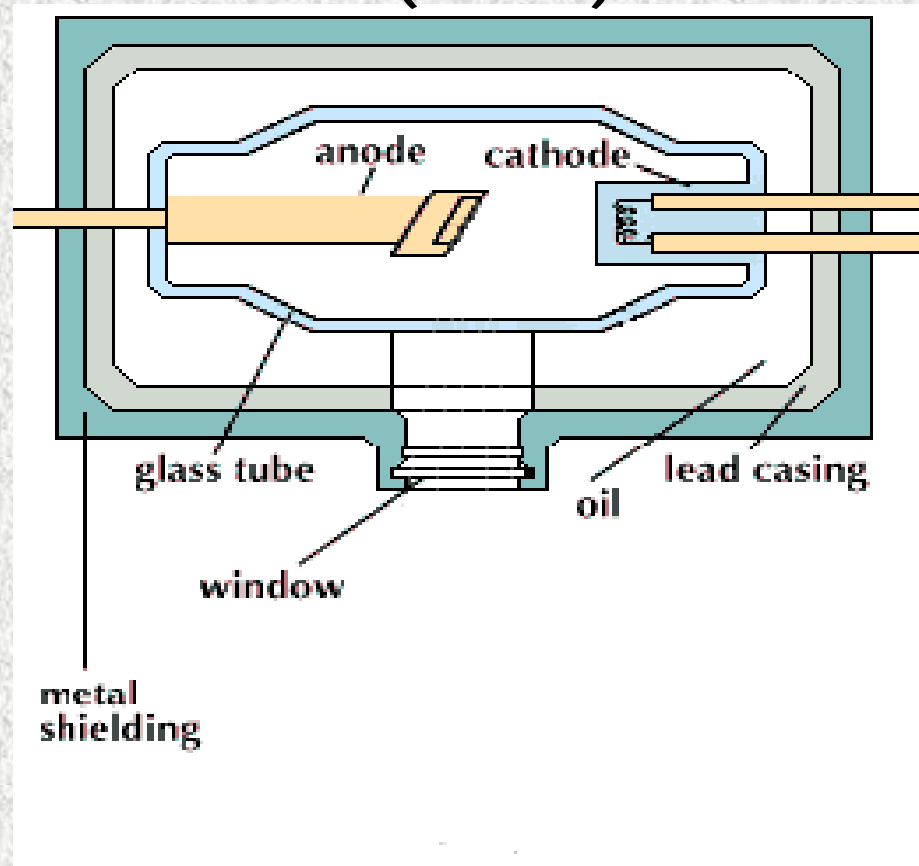
# Production de RX

- Interaction entre des électrons de haute énergie avec une cible métallique, une partie de leur énergie est convertie en RX



# Principe du tube radiogène

1. Production d'électrons (cathode), Filament chauffé, mA
2. Accélération des électrons, DDP entre l'anode et la cathode, kV
3. Freinage des électrons (anode)



# La production des RX est conditionnée par :

## 1. Qualité des électrons fournis par la cathode

Énergie à fournir:

1. des milliampères (mA)
2. des kilovolts (kV)

## 2. Nature de la cible

- anode dense (z élevé) tungstène, rhodium, ...

Champ électrique attractif dû aux protons élevés

- production d'un rayonnement de freinage

Perte importante sous forme de chaleur

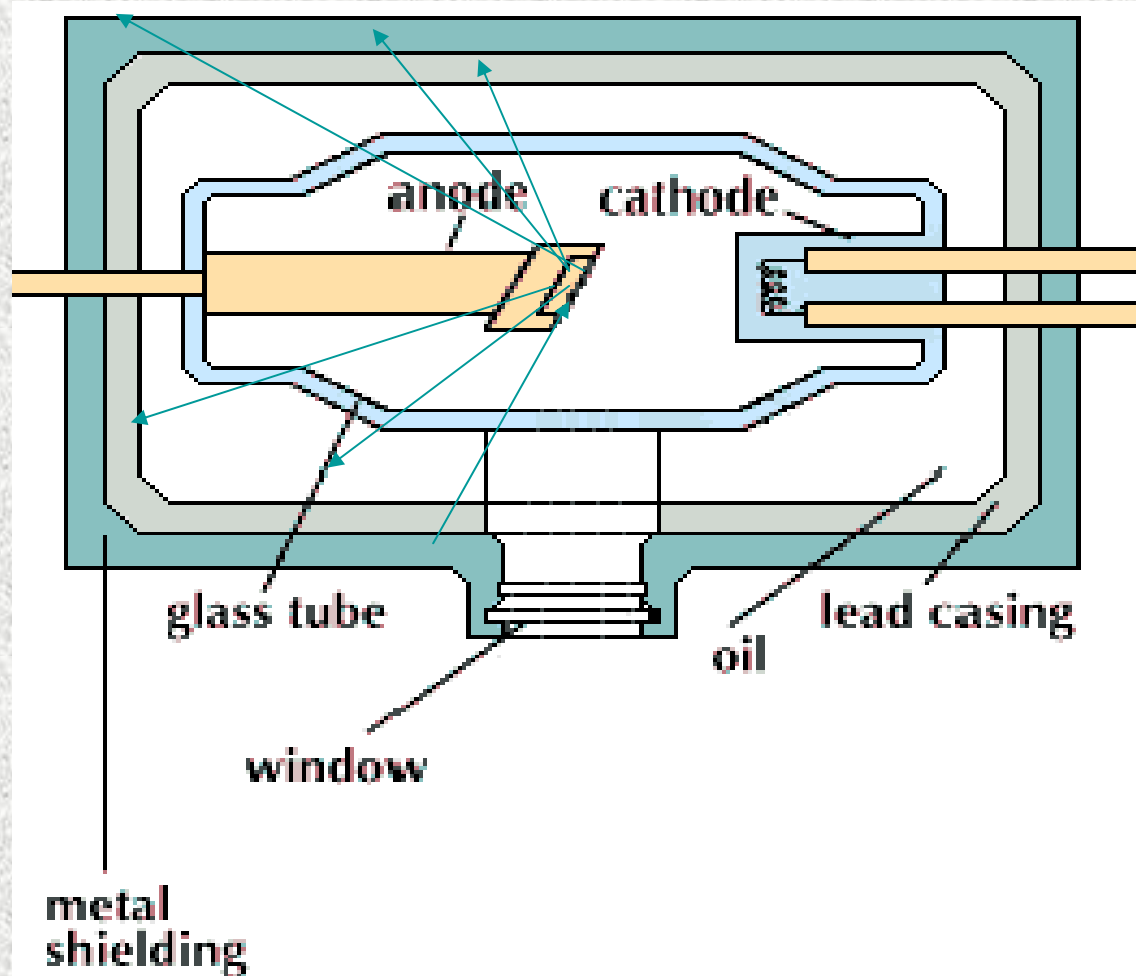
# Émission et nature des RX

- a. Direction d'émission du Rayonnement de freinage
- b. Spectre des RX

# Direction d'émission

du Rayonnement de freinage

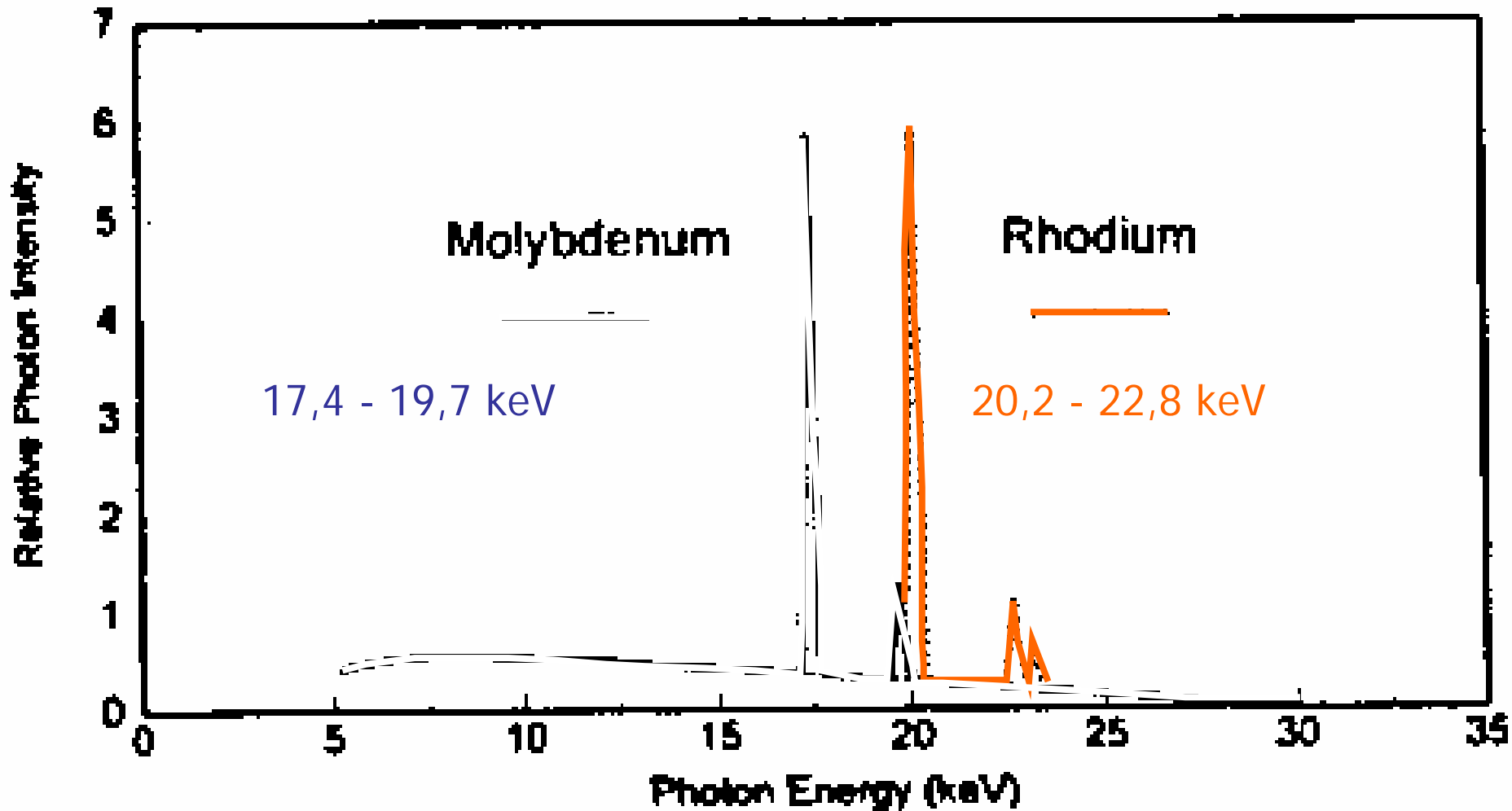
Seule une partie est utilisée, au regard de la fenêtre



# Spectre de RX

Raie caractéristique de l'anode

## Molybdenum and Rhodium unfiltered spectra





# II - Dosimétrie

**D = La Dose absorbée :**

Energie absorbée par unité de masse

$$1 \text{ Gy (gray)} = 1 \text{ J/kg}$$

## H = La Dose Equivalente :

L' équivalent biologique de la dose absorbée pour l'homme reflète l'impact sur les tissus biologiques d'une exposition aux rayonnements ionisants, en tenant compte de la nature des rayonnements

$$H = \sum_R w_R \cdot D$$

D: dose absorbée (Gy),

$w_R$  : facteur de pondération radiologique (1-20)

H s'exprime en Sv (Sievert)

## $W_R$ : Facteur de pondération radiologique

- |                       |    |
|-----------------------|----|
| • Photons :           | 1  |
| • Electrons :         | 1  |
| • Neutrons :          |    |
| – Inf. à 10 keV       | 5  |
| – de 10 keV à 100 keV | 10 |
| – de 100 keV à 2 MeV  | 20 |
| – de 2 MeV à 20 MeV   | 10 |
| – Sup. à 20 MeV       | 5  |
| • Protons             |    |
| – sup. à 2 MeV        | 5  |
| • Particules alpha :  | 20 |

## $H_T$ = La Dose Equivalente Tissulaire :

L' équivalent biologique de la dose absorbée au niveau d'un organe ou tissu donné, en tenant compte de sa radiosensibilité

$$H_T = w_T \cdot H$$

$w_T$  : facteur de pondération tissulaire (0,01 à 0,20)

(Remarque : la somme des  $w_T$  est égale à 1)

$H_T$  s'exprime en Sv (Sievert)

## $W_T$ : Facteur de pondération tissulaire

- Gonades : 0,20
- Moelle osseuse : 0,12
- Colon : 0,12
- Poumons : 0,12
- Estomac : 0,12
- Vessie : 0,05
- Seins : 0,05
- Foie : 0,05
- Œsophage : 0,05
- Thyroïde : 0,05
- Peau : 0,01
- Surface des os : 0,01
- Autres : 0,05

## E = La Dose Efficace :

grandeur physique mesurant l'impact sur le corps entier d'une exposition aux rayonnements ionisants, lors des expositions externe et interne, en tenant compte de la radiosensibilité des tissus

$$E = \sum_T H_T = \sum_T w_T \cdot H$$

$$E = \sum_T \sum_R w_T \cdot w_R \cdot D$$

E s'exprime en Sv (Sievert)

**$H_T(\tau)$  = La Dose Equivalente Engagée**

est la dose équivalente reçue par un organe ou tissus pendant le temps ( $\tau$ )

**$E(\tau)$  = La Dose Efficace Engagée**

est la dose efficace reçue par le corps entier pendant le temps ( $\tau$ )

# III - Radiobiologie

## Lésions dues aux RI

- Les effets biologiques des RI se manifestent à différents niveaux :
  - réactions physico-chimiques
  - moléculaires
  - cellulaires
  - tissulaires
  - organisme entier

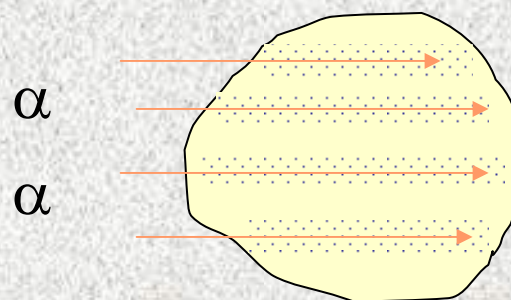
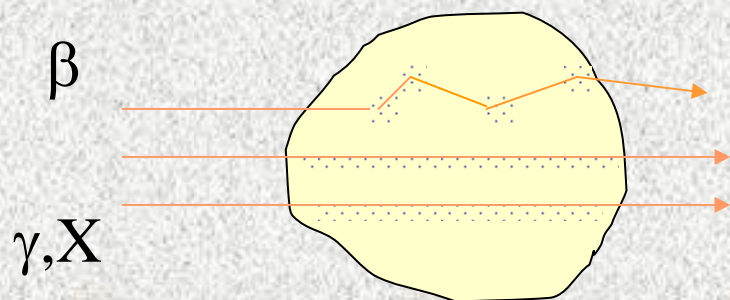


# Absorption de l'énergie par le milieu

- Interaction rapide ( $10^{-12}$  s) avec  $e^-$  et noyaux
  - excitations :  $e^-$  projeté sur couche plus externe
  - ionisations :  $e^-$  éjecté
- TLE (transfert linéique d'énergie)
  - X , gamma et bêta : TLE faible
  - alpha, protons : TLE élevée

# Absorption de l'énergie par le milieu

Comparaison entre  $\alpha$ ,  $\beta$ , X et  $\gamma$   
pour une dose de 1 Gy au noyau



**1000 particules de TLE faible  
(20 000 ionisations)**

**VS**

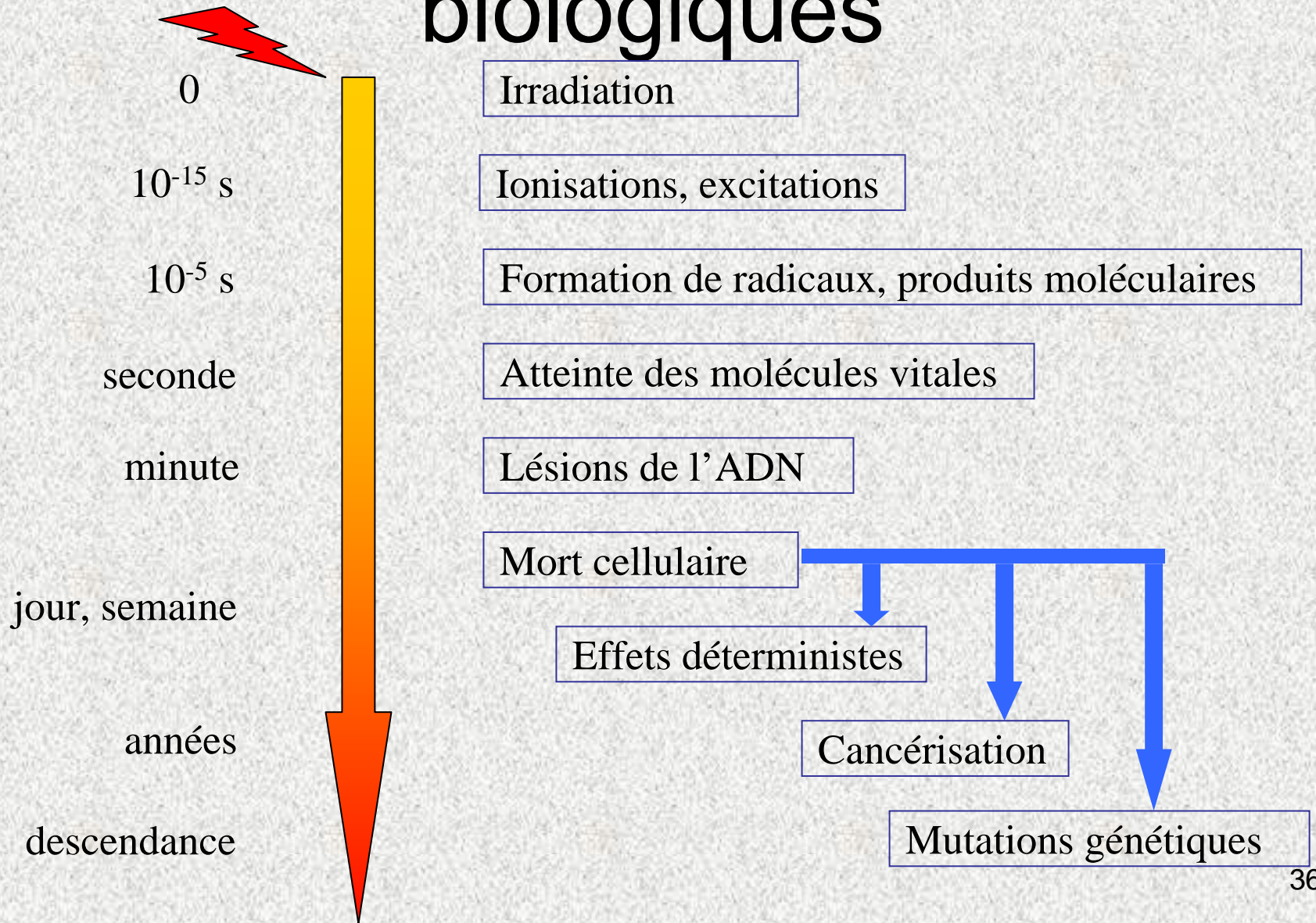
**4 particules  $\alpha$  de TEL élevé  
(20 000 ionisations)**

Exemple : le radon ( $^{222}\text{Rn}$ ),  $E : 5,5 \text{ MeV}$ ,  $T : 3,8 \text{ j}$ , parcourt un trajet en ligne droite d'environ  $40 \mu\text{m}$  dans l'eau

# Parcours moyens des différents rayonnements dans les tissus

Alpha	qq $\mu\text{m}$
Bêta	1 à qq mm
Gamma et X	10 cm
Neutrons	10 cm

# Chronologie des effets biologiques

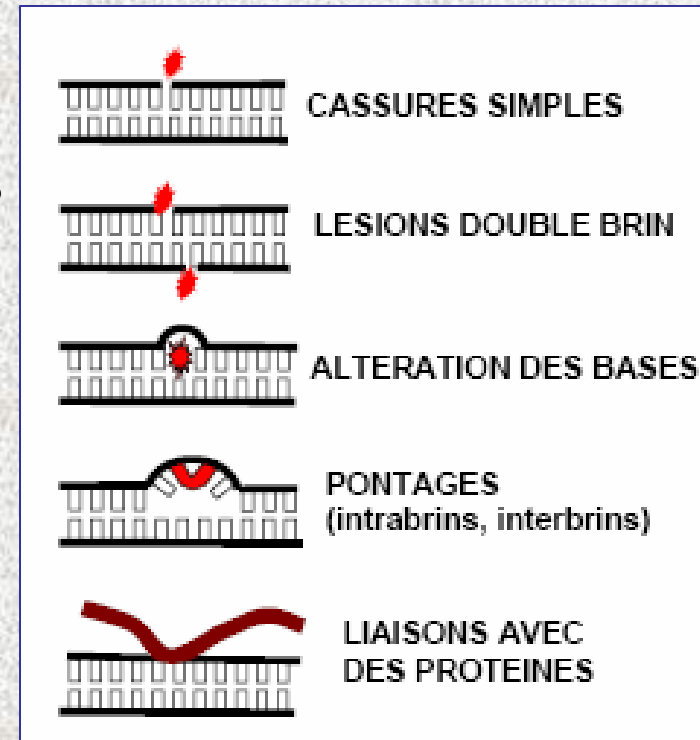


# Les réactions physico-chimiques

- Les RI cèdent de l'énergie à la matière traversée
  - effet direct = énergie directement cédée à la molécule d'intérêt biologique
  - effet indirect = le plus souvent H<sub>2</sub>O ionisée, formation de radicaux libres : c'est le phénomène de radiolyse

# Lésions moléculaires 1

- acides gras membranaires → perméabilité
- enzymes → inactivation → blocage métabolique
- ADN : cible la plus sensible
  - modifications structurales
  - altération des bases ou des sucres
  - cassures simple ou double brin



# Processus de réparation de l'ADN

- excision d'une base et resynthèse
- excision d'un nucléotide et resynthèse
  - rupture simple brin → réparation fidèle
- recombinaison homologue
  - rupture double brin → souvent fautive

# Les effets cellulaires

Augmentés lors de la division, seront fonction :

- du type de rayonnement (TLE)
- de la dose et de son fractionnement
- du débit de dose
- de la nature du tissu auquel appartient la cellule
- l'environnement cellulaire



# Les effets tissulaires 1

Chaque tissu a une radiosensibilité propre qui dépend :

- radiosensibilité des cellules
- durée de vie des cellules

L'irradiation perturbe l'équilibre cellulaire :

- distribution des cellules  $\neq$  stades du cycle
- réparation des lésions

# Les effets tissulaires 2

## **Classement par radiosensibilité décroissante**

- tissus embryonnaires
- organes hématopoïétiques
- gonades
- épiderme
- muqueuse intestinale
- tissu conjonctif
- tissu musculaire
- tissu nerveux

# Effets déterministes

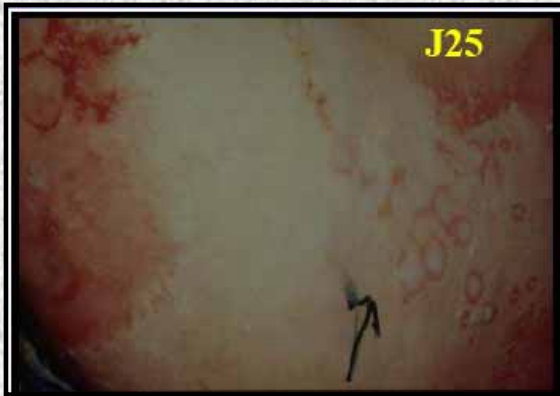
- Existence d'un seuil (effet obligatoire chez tous les sujets)
- seuil  $\neq$  pour chaque individu mais faible écart
- la gravité augmente avec la dose
- effets très précoces sauf pour cataracte
- effets réversibles si lésions peu sévères

# Irradiation localisée à la peau

Nature des lésions	Dose (Gy)	Délai d'apparition (semaines)
Erythème	3 – 5	3
Plyctènes	20	4
Nécrose	50	3

# Irradiation localisée à la peau

Irradiation aiguë par un  
faisceau d'électrons accélérés  
(accélérateur linéaire)



Source : J-B Fleutot SPRA

# Irradiation aiguë accidentelle



Appareil de  
Gammagraphie  
- Source  $^{192}\text{Ir}$   
- 1370 GBq (40 Ci)  
contact 6 heures  
20 février 1999

## Doses calculées (Gy) :

peau (1cm) :	10 000
tissus mous (2 cm) :	2 500
tissus mous (5 cm) :	400
fémur et artère fémorale (7 cm) :	140
gonades (18 cm) :	23
rectum (20 cm) :	18



Source : J-B Fleutot SPRA

# Cas de l'embryon (1)

## Irradiation après fécondation

- Effets non spécifiques aux RI (méthylmercure, thalidomide, dioxine...)
- Avant nidation 9 jours, blastomères : effet de type tout ou rien
- Embryogenèse 10<sup>ème</sup> J / fin 2<sup>ème</sup> mois
  - anomalies, malformations : période tératogène
- Différence avec SNC où la sensibilité maximale se situe entre la 8<sup>ème</sup> et la 16<sup>ème</sup> semaine : période de multiplication exponentielle des cellules qui vont donner le cerveau
  - microcéphalies, retards mentaux (- 30 points QI pour 1 Gy)
- Normalement, 2 à 3 % des bébés naissent avec une anomalie (au sens large du terme, de la cardiopathie à la tache cutanée de plus de 5 cm de large)

# Cas de l'embryon (2)

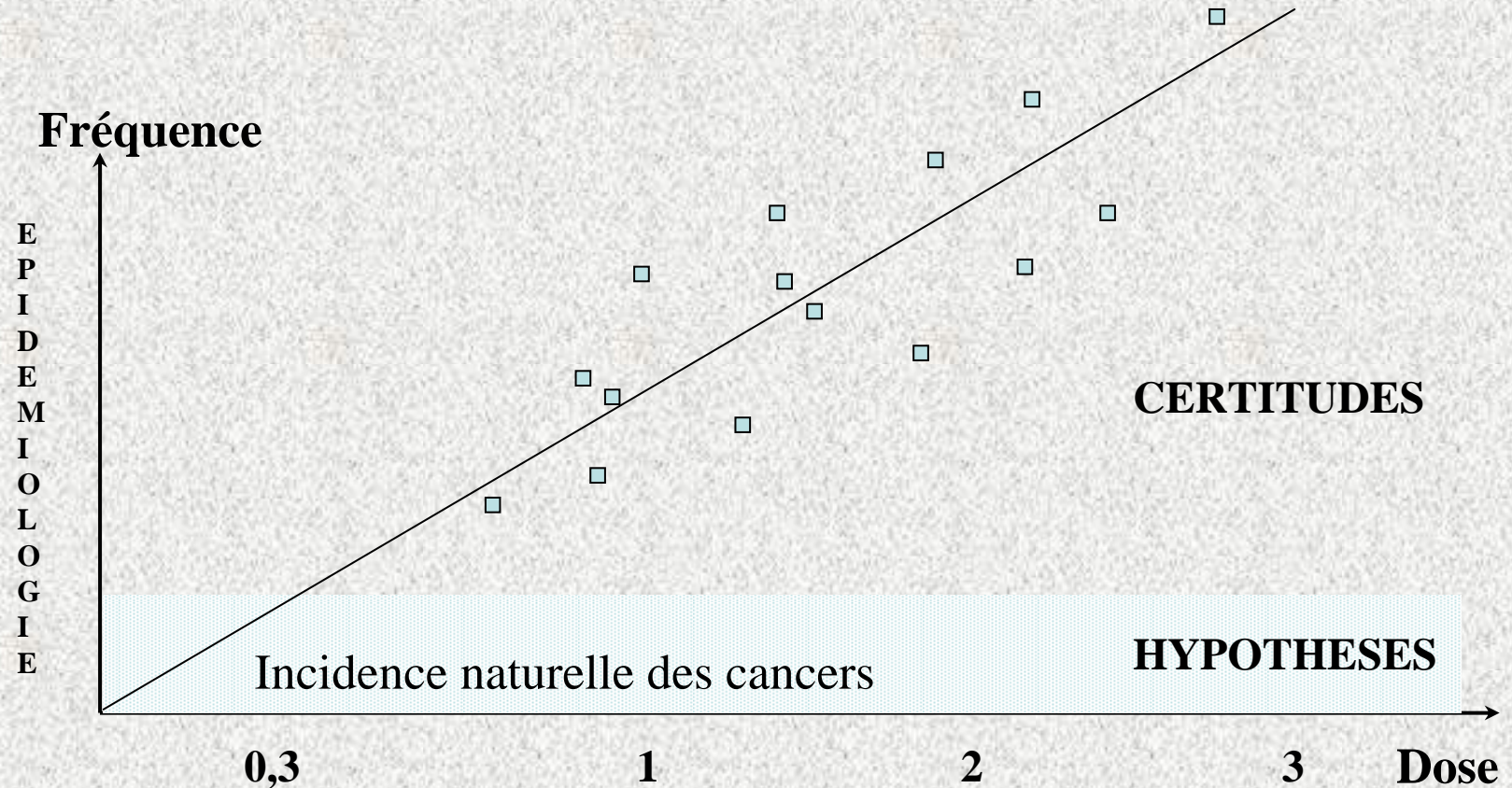
- Avant 9<sup>ème</sup> J : tout ou rien
- 9<sup>ème</sup> au 60<sup>ème</sup> J : radiosensibilité maximale
  - dose < 0.1 Sv → risque négligeable
  - 0,1 < dose < 0,2 Sv → à discuter cas par cas
  - dose > 0,2 Sv → IVG possible
- Aucune anomalie notée pour dose < 0,5 Sv



# Les effets stochastiques

- Risque cancérogène  
Hiroshima Nagasaki
  - excès de leucémies et cancers chez population irradiée à plus de 0,5 Gy
  - non significatif au-dessous de 0,2 Gy
- risque génétique
  - importantes variations de l'incidence naturelle
  - difficile à estimer

# Relation dose effet



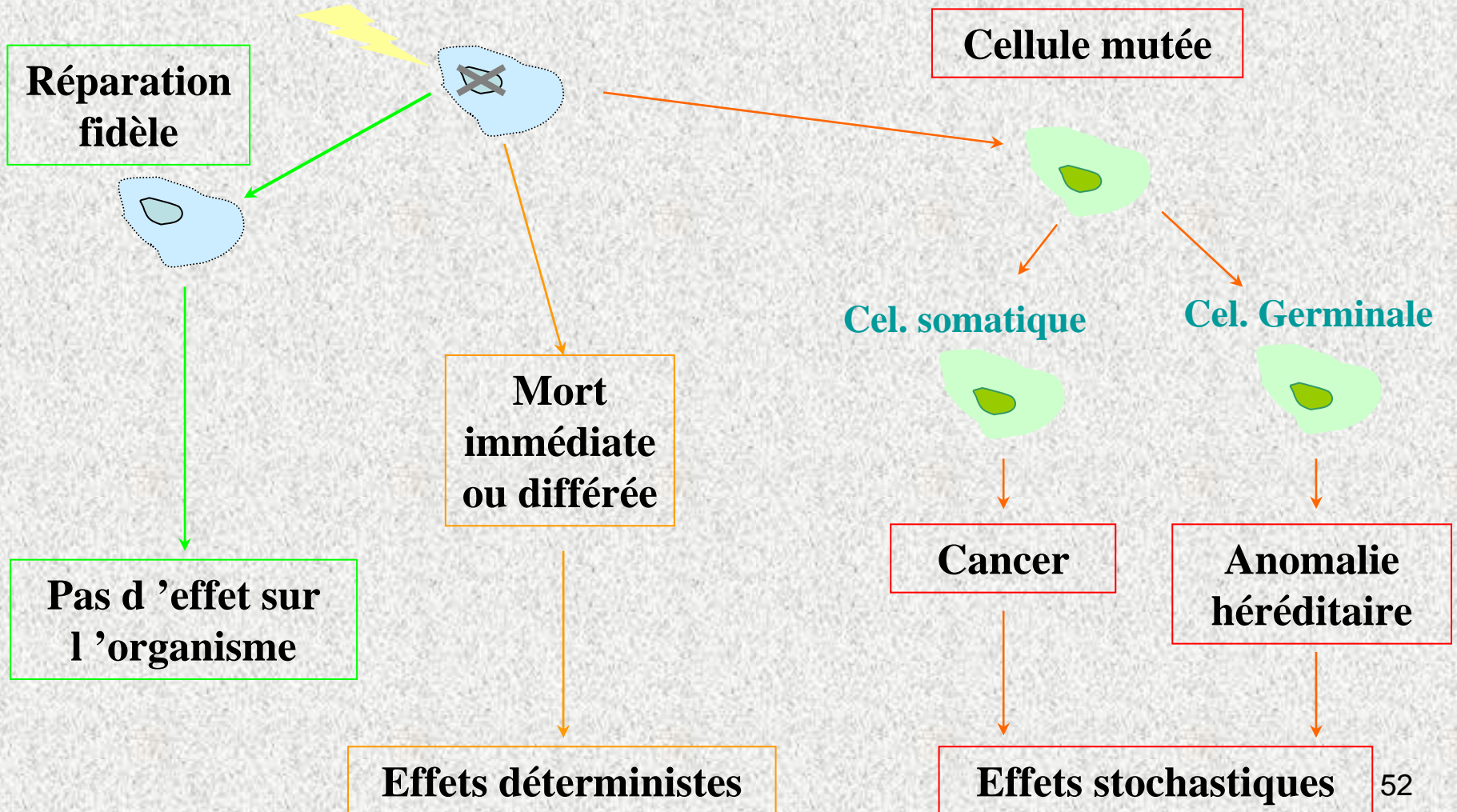
→ Relation linéaire sans seuil

→ A toute dose correspond un risque

# Les effets stochastiques 2

- aléatoires
- probabilité d'apparition avec la dose
- sans seuil (toute dose comporte un risque)
- gravité indépendante de la dose
- non spécifiques
- effet tardif

# Les effets biologiques



# Exemples

## Irradiation externe : Hiroshima /Nagasaki

Pour 40 000 personnes	Cas attendus 1950-1987	Cas observés (témoins)	Excès
Leucémies	156	231	75
Cancers solides	8100	8600	500
			575

## Contamination interne : Tchernobyl (thyroïde)

**1800 CANCERS DE LA THYROÏDE (cumulés)**

- **INCIDENCE NATURELLE : 0,04/100 000**
- **INCIDENCE OBSERVEE : BELARUS : 3,4 / 100 000**  
**GOMEL : 9,5 / 100 000**

# Quantification du risque stochastique

- Facteurs de risque CIPR 60

Population exposée	Détriment (probabilité max) ( $10^{-2} Sv^{-1}$ )			
	Cancers mortels	Cancers non mortels	Effets héréditaires graves	Total
Travailleurs adultes	4,0	0,8	0,8	5,6
Population entière	5,0	1,0	1,3	7,3

# Limites annuelles

- **Travailleur**
  - dose efficace **20 mSv/12 mois**
  - dose équivalente
    - cristallin **150 mSv/12 mois**
    - peau, mains, pieds **500 mSv/12 mois**
- **Public**
  - dose efficace **1 mSv/12 mois**
  - dose équivalente
    - cristallin **15 mSv/12 mois**
    - peau, mains, pieds **50 mSv/12 mois**

# Valeurs annuelles d'exposition aux Rayonnements Ionisants

## *Naturelle*

Ingestion :	0,34
Radon :	1,26
Cosmique :	0,36
Interne :	<u>0,41</u>
Total	2,37

## *Activité Humaine*

Médical :	0,8
Non nucléaire :	0,08
Essais militaires :	0,04
Energie nucléaire :	0,02
Accident Tchernobyl :	<u>0,01</u>
Total	0,95

**Soit : 3,32 mSv/an**



Valeurs annuelles d'exposition aux RI

