

## Chapitre 6

# Interactions des rayonnements ionisants avec la matière: particules chargées (1/2).

Dr. Jean-François ADAM

# Objectifs pédagogiques du cours

- Connaître les notions de rayonnements directement et indirectement ionisants
- Connaître les différents types d'interactions des particules chargées
  - Collisions élastiques
  - Collisions inélastiques
  - Rayonnement de freinage
  - Collisions nucléaires
- Connaître les définitions de trajectoire et de parcours

# Interactions des rayonnements ionisants avec la matière

## Il faut distinguer

- **les particules électriquement chargées = rayonnements directement ionisants** : Energie cinétique suffisante pour ioniser la matière par leurs interactions (produire des ions = atomes porteurs de charges électriques).

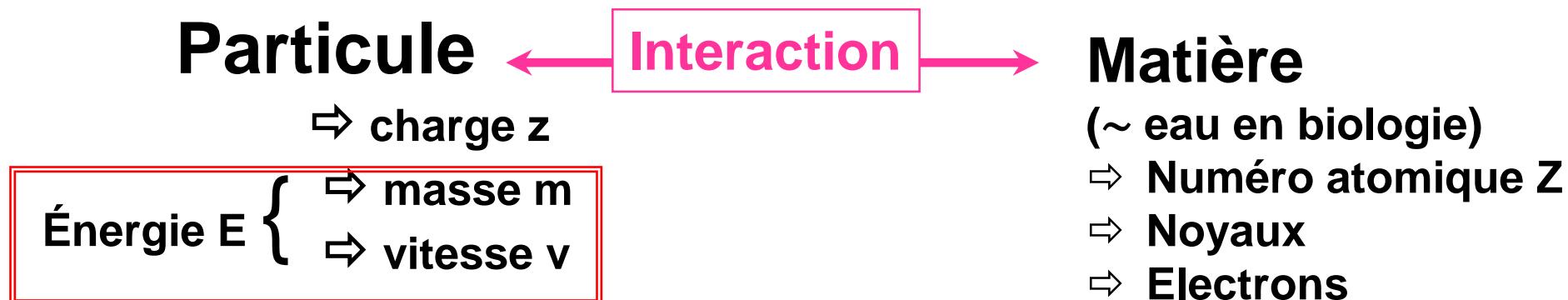
- **les particules neutres (non chargées électriquement, principalement les neutrons et les photons) = rayonnements indirectement ionisants.**

Energie est suffisante ( $>13,6\text{ eV}$ ) pour produire, selon plusieurs types d'interactions, une ionisation de la matière.

[L'énergie de liaison de l'électron le plus périphérique (« premier potentiel d'ionisation ») est de l'ordre de dix à quelques dizaines d'eV, et vaut 13,6 eV pour l'atome H]

# Interactions des particules chargées avec la matière

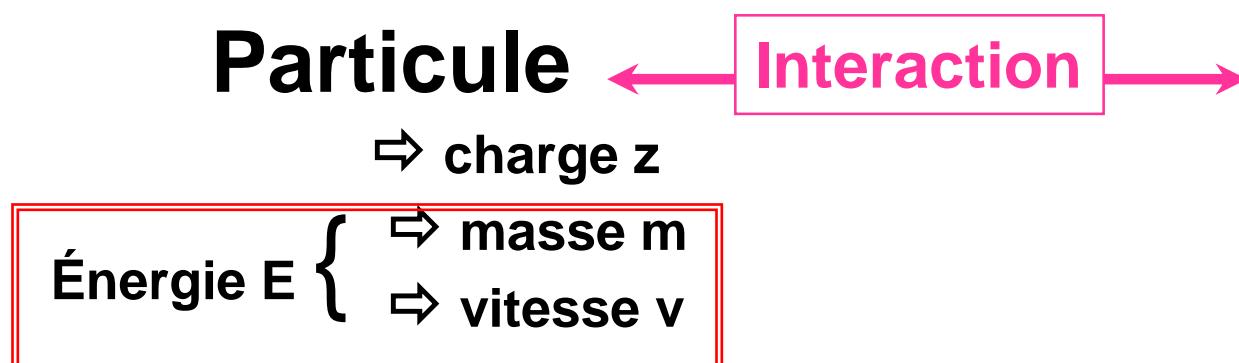
- **Particules chargées**
  - électrons ( $e^-$ )
  - positons ( $e^+$ )
  - protons ( $p^+$ )
  - particules  $\alpha$  ( ${}^4_2He^{2+}$ ) / ions lourds



# Interactions des particules chargées avec la matière

- **Particules chargées**

- électrons ( $e^-$ )
- positons ( $e^+$ )
- protons ( $p^+$ )
- particules  $\alpha$  ( ${}_2^4He^{2+}$ ) / ions lourds



## Matière

- (~ eau en biologie)
- ⇒ Numéro atomique Z
- ⇒ Densité de cibles
- ⇒ Electrons (densité électronique)
- ⇒ Noyaux (+ électrons = densité atomique)
- ⇒ Masse volumique (densité massique)

# Les trois aspects des interactions des particules chargées avec la matière

- L'interaction elle-même = *transfert d'énergie*
  - nature
  - mécanisme
  - fréquence/probabilité
- Conséquences sur la particule = *ralentissement*
- Conséquences sur le milieu = *effets physiques et radiobiologiques (+++)*

Notion centrale : *énergie transférée*

- effet thermique
- excitations
- Ionisations
- Rayonnement

# Interactions des particules chargées avec la matière

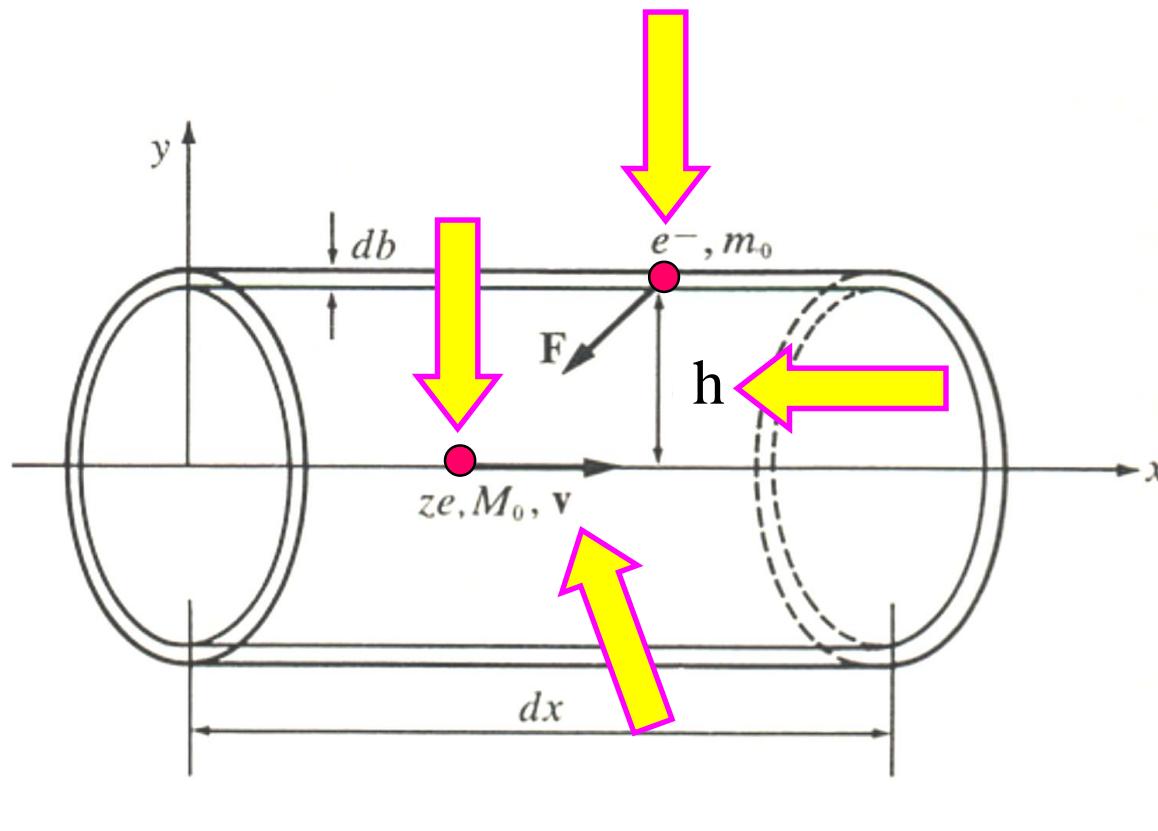
- **Elles vont se faire :**
  - Surtout avec les électrons du cortège électronique du milieu (++++) : interactions coulombiennes. On appelle ces interactions des « **collisions** ».
    - Tous les intermédiaires entre la collision « frontale » (rare) et la collision « à grande distance » (la plus fréquente)
    - Cas particulier du positon (annihilation)
  - Avec les noyaux
    - Interaction à distance : **rayonnement de freinage** (X)
    - Collisions nucléaires (uniquement pour les protons et les ions)

# Interaction des particules chargées avec les électrons

# Interactions des particules chargées avec les électrons du milieu

- Mécanisme commun à toutes les particules chargées :  
= Interaction coulombienne
- La force coulombienne (positive ou négative) qui, pendant le bref passage de la particule au voisinage de l'électron, s'exerce entre les deux charges électriques, communique une **impulsion** à l'électron
- Il y a TRANSFERT à l'électron cible d'une **énergie Q** prélevée sur l'énergie E de la particule incidente

# Transfert d'énergie de la particule incidente à un électron



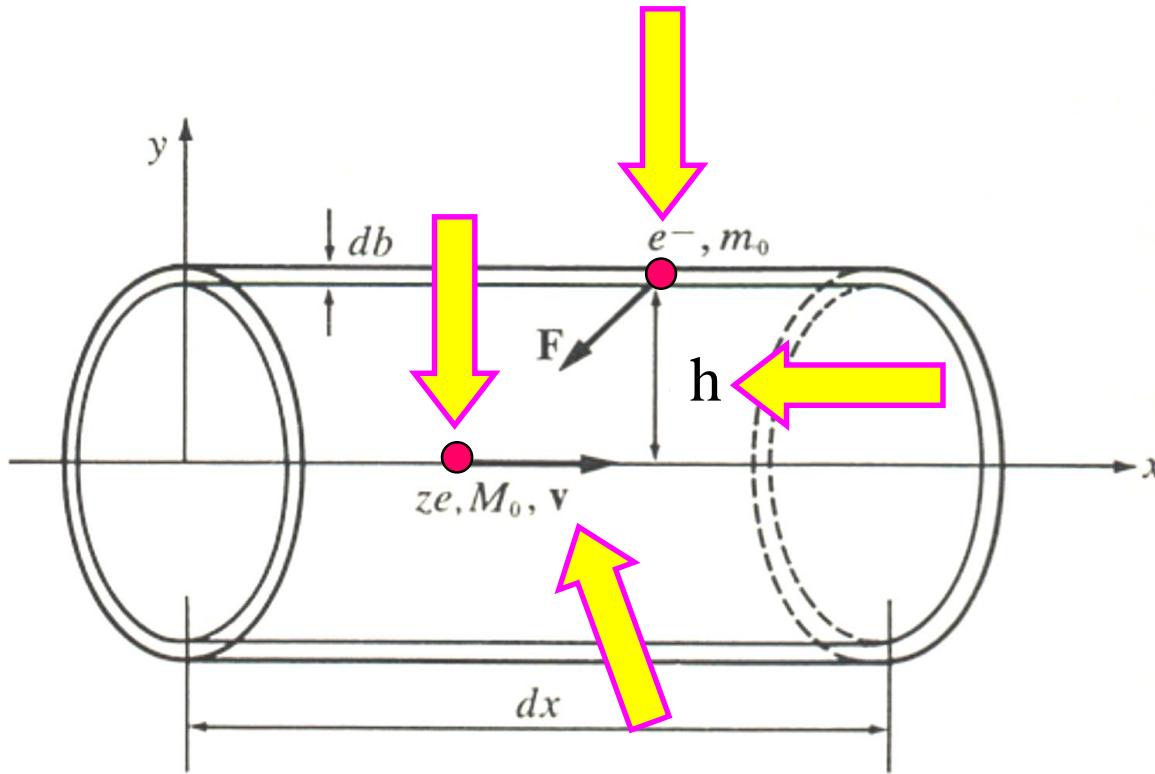
$$Q \simeq K \frac{1}{h^2} \frac{z^2}{v^2}$$

→ F donc Q diminue rapidement lorsque h augmente

$$\Delta t \simeq \frac{h}{v}$$

→ Pour une distance  $h$  donnée,  $Q$  est d'autant plus grande que la vitesse de la particule est faible

## Collisions avec un électron du milieu



$$Q \cong K \frac{1}{h^2} - \frac{z^2}{v^2}$$

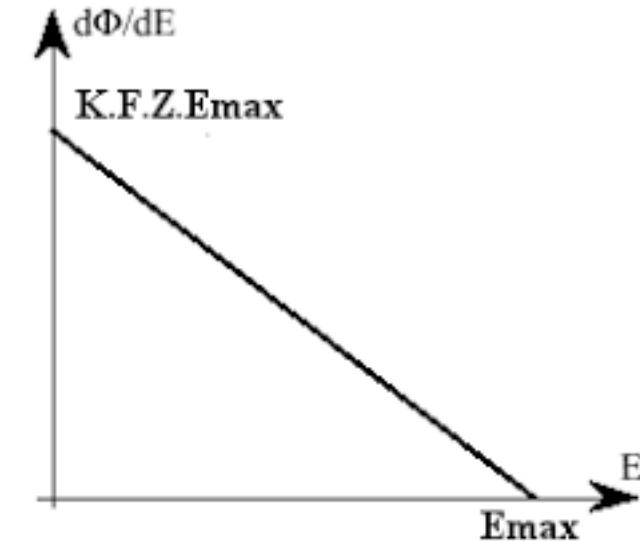
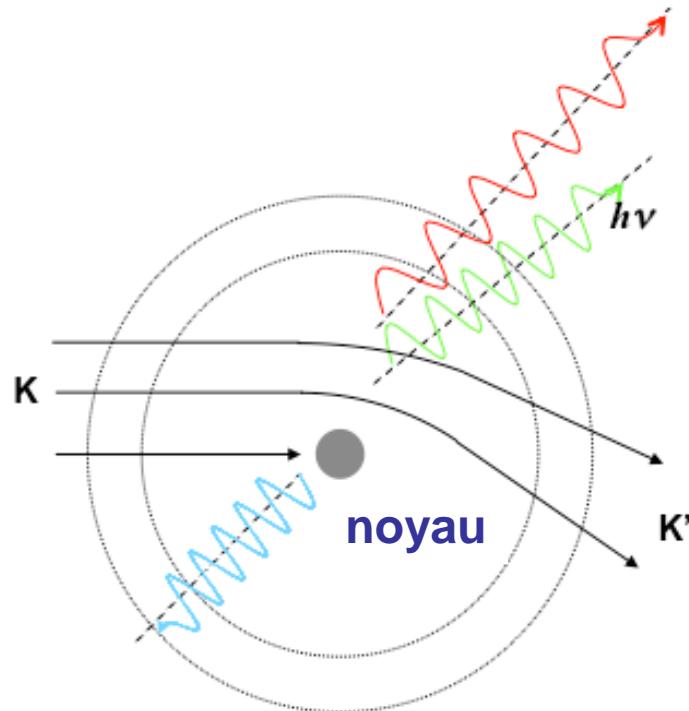
→ F donc Q diminue rapidement lorsque h augmente

$$\Delta t \cong \frac{h}{v}$$

→ Pour une distance h donnée, Q est d'autant plus grande que la vitesse de la particule est faible

Interactions les plus fréquentes dans les milieux biologiques

# Interaction des particules chargées avec les noyaux du milieu: rayonnement de freinage



La particule incidente est déviée de sa trajectoire par la force Coulombienne exercée par le noyau sur la particule incidente. L'énergie perdue à cause de cette force centrifuge va être émise sous la forme d'un photon de freinage: photon X

# Les trois principaux types d'interactions des particules chargées avec la matière

- **Les collisions élastiques (avec les électrons)**
  - Perte d'énergie négligeable (thermique/excitations)
  - forte occurrence pour électrons/positons
  - occurrence augmente à faible énergie et pour les matériaux légers
- **Les collisions inélastiques (avec les électrons)**
  - Perte d'énergie significative (excitations des couches profondes)  
**ionisation**
  - Dominant à faible énergie et pour les matériaux légers (eau)
- **Le rayonnement de freinage (avec les noyaux)**
  - Perte d'énergie significative : émission de photons (RX de freinage)
  - Occurrence augmente avec l'énergie et pour les matériaux lourds (W,Pb)
- **Les collisions nucléaires: pour les ions à très faible énergie**

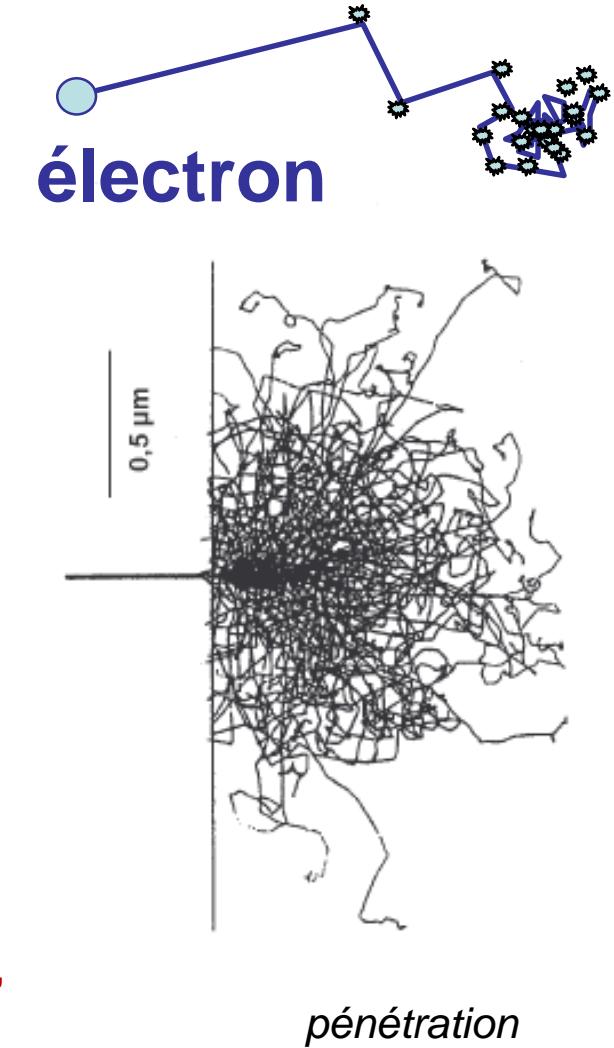
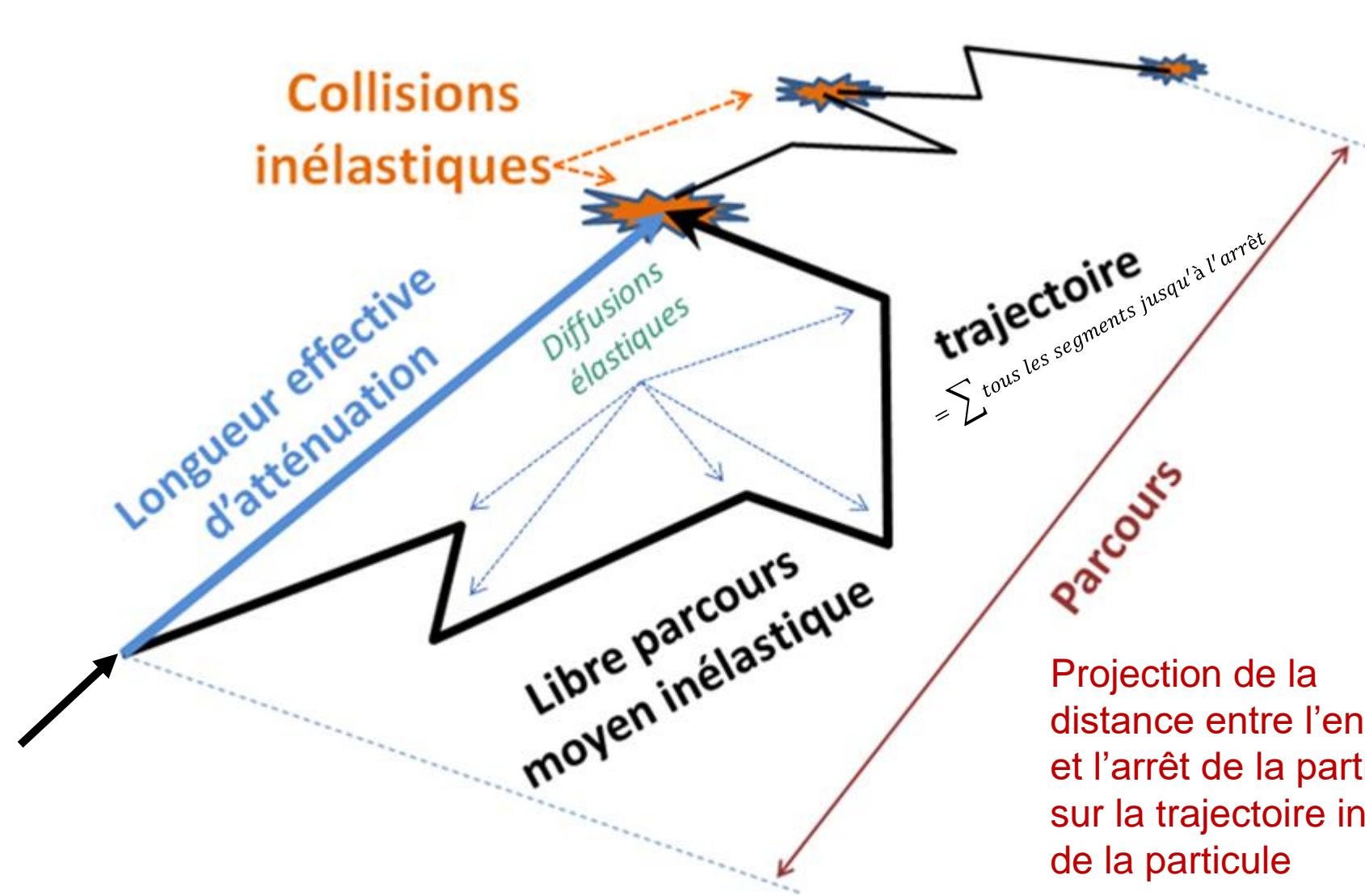
# Les trois principaux types d'interactions des particules chargées avec la matière

- **Les collisions élastiques (avec les électrons)**
  - Perte d'énergie négligeable (thermique/excitations)
  - forte occurrence pour électrons/positons
  - occurrence augmente à faible énergie et pour les matériaux légers
- **Les collisions inélastiques (avec les électrons)**
  - Perte d'énergie significative: **ionisation**
  - Dominant à faible énergie et pour les matériaux légers (eau)
- **Le rayonnement de freinage (avec les noyaux)**
  - Perte d'énergie significative : émission de photons (RX de freinage)
  - Occurrence augmente avec l'énergie et pour les matériaux lourds (W,Pb)
- **Les collisions nucléaires: pour les ions à très faible énergie**

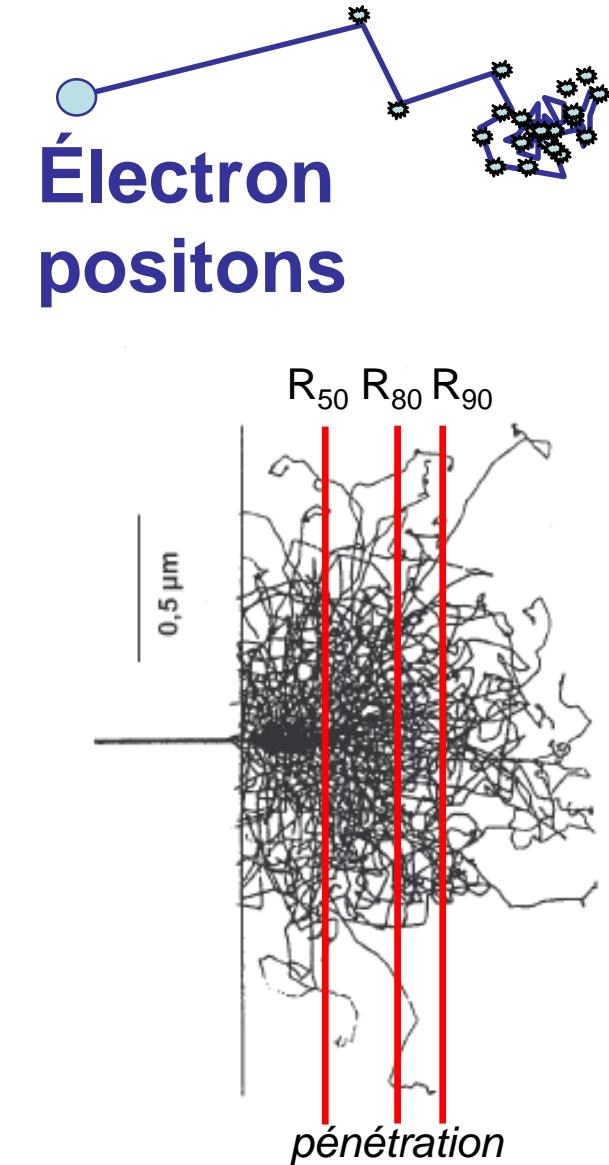
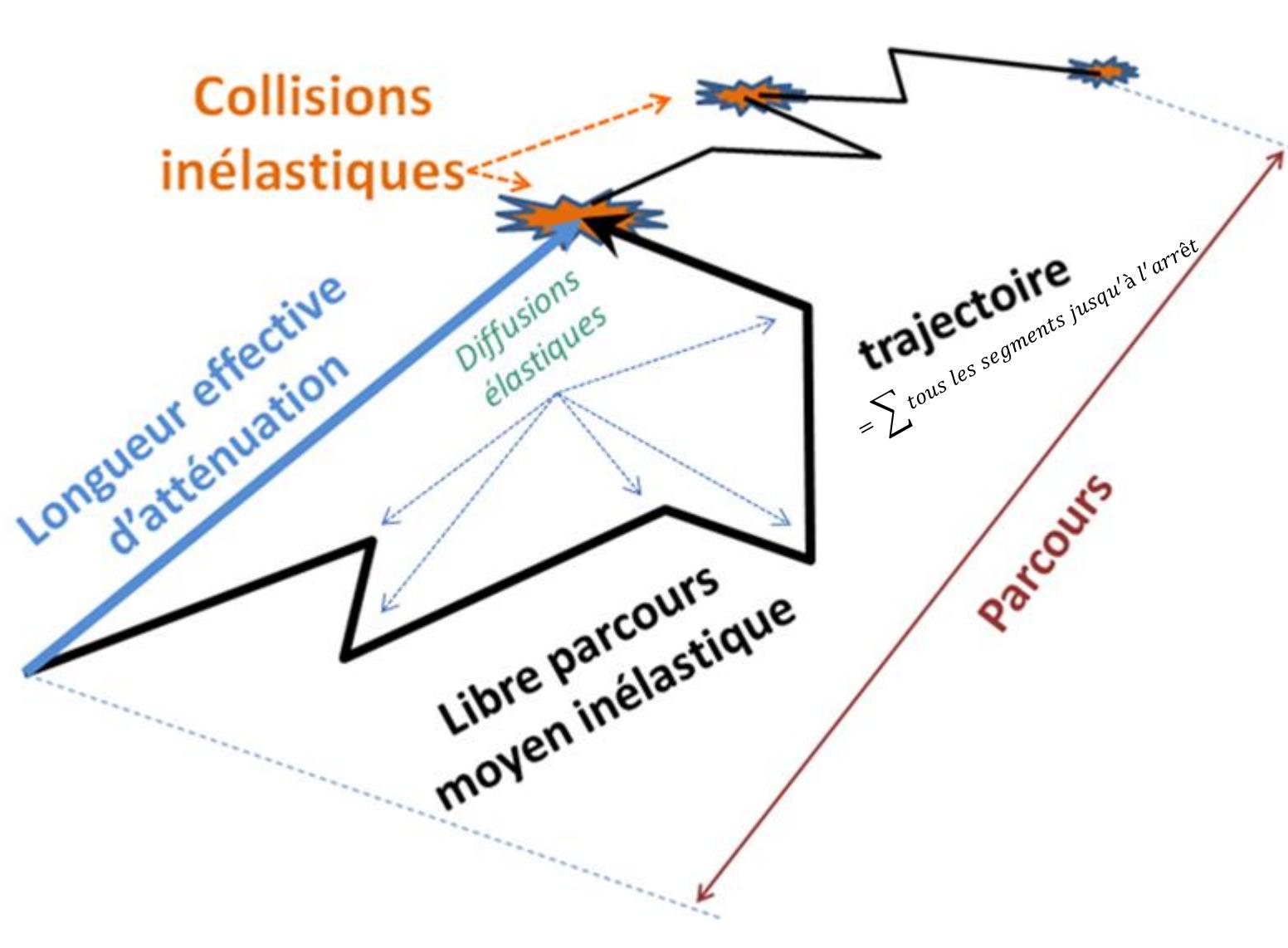
# Les trois principaux types d'interactions des particules chargées avec la matière

- **Les collisions élastiques (avec les électrons)**
  - Perte d'énergie négligeable (thermique/excitations)
  - forte occurrence pour électrons/positons
  - occurrence augmente à faible énergie et pour les matériaux légers
- **Les collisions inélastiques (avec les électrons)**
  - Perte d'énergie significative: **ionisation**
  - Dominant à faible énergie et pour les matériaux légers (eau)
- **Le rayonnement de freinage (avec les noyaux)**
  - Perte d'énergie significative : émission de photons (RX de freinage)
  - Occurrence augmente avec l'énergie et pour les matériaux lourds (W,Pb)
- **Les collisions nucléaires: pour les ions à très faible énergie**

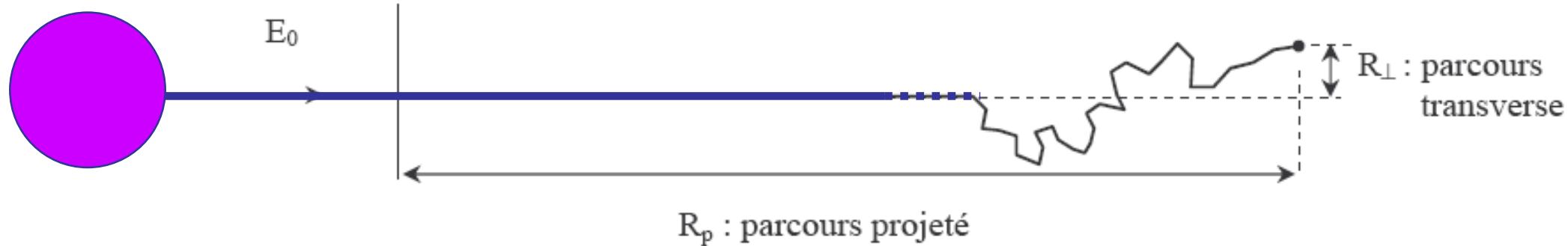
# Trajectoire et parcours



# Trajectoire et parcours

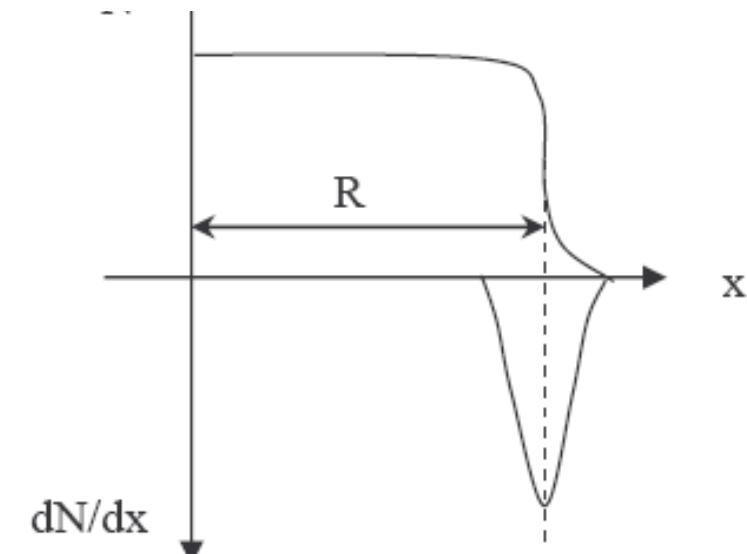
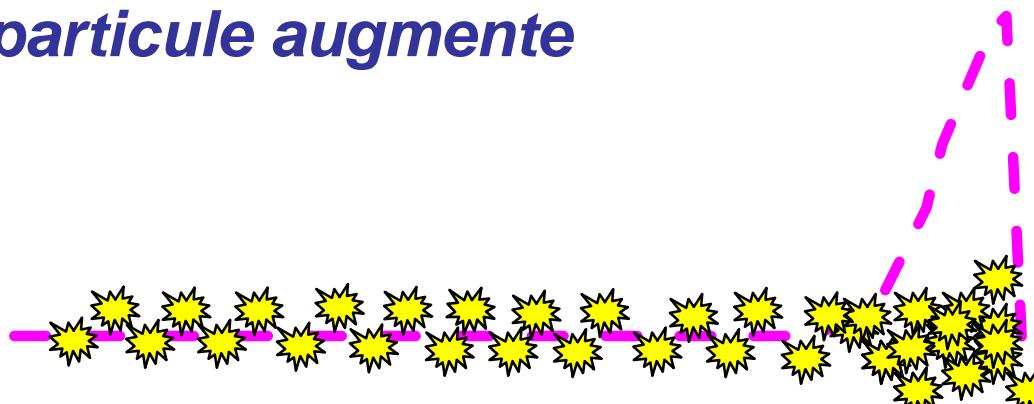
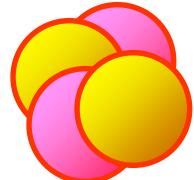


# Trajectoire et parcours particules lourdes



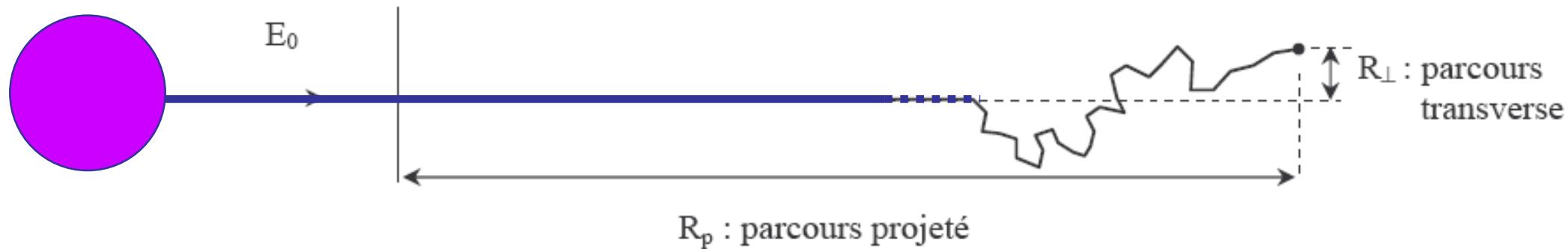
Parcours ~ trajectoire

Parcours transverse diminue quand la taille de la particule augmente



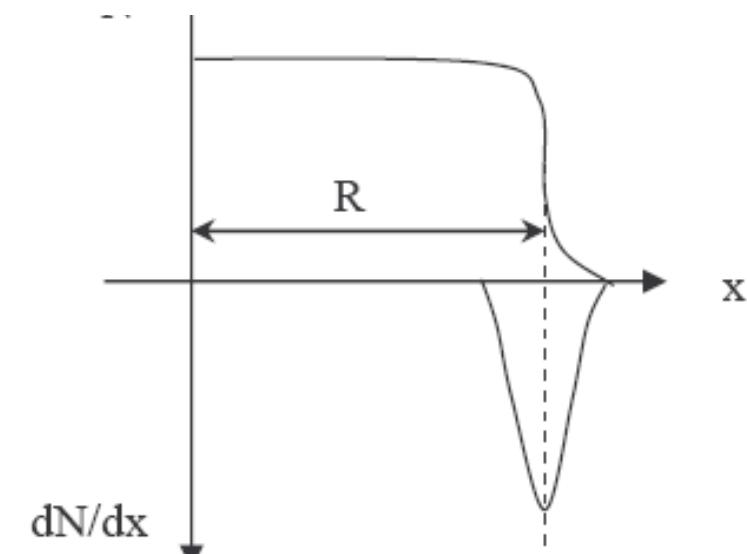
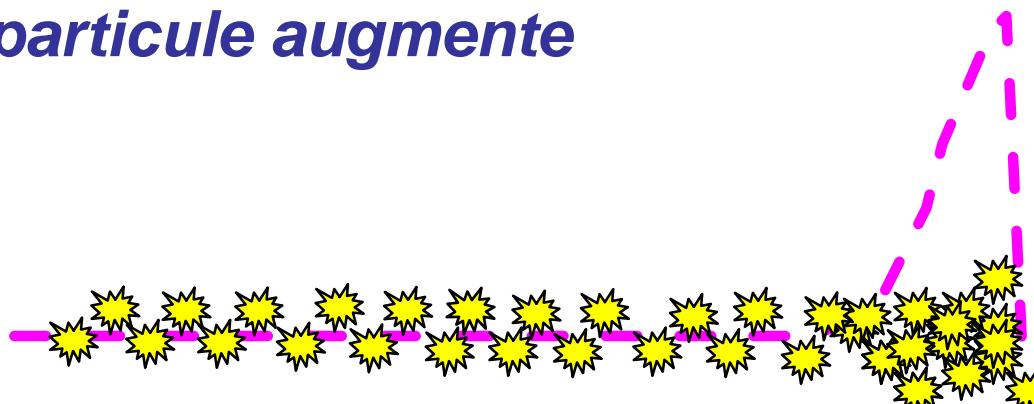
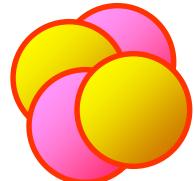
Nombres de particules primaires en fonction de la distance dans la matière

# Trajectoire et parcours particules lourdes



Parcours ~ trajectoire

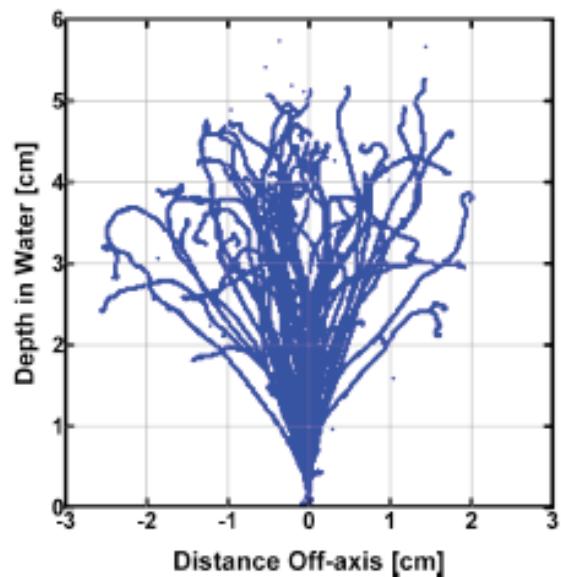
Parcours transverse diminue quand la taille de la particule augmente



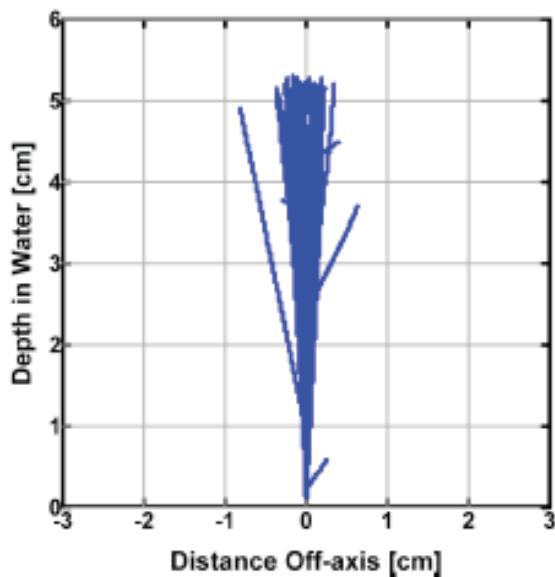
Nombres de particules primaires en fonction de la distance dans la matière

# Straggling from Multiple Particle Paths

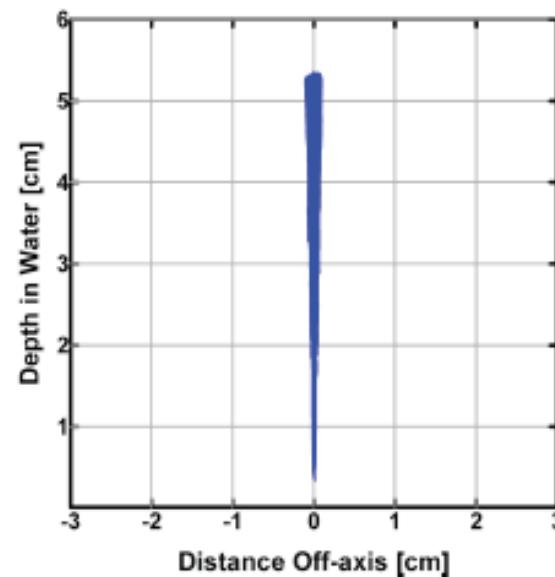
10 MeV electrons  
50 histories



80 MeV protons  
50 histories



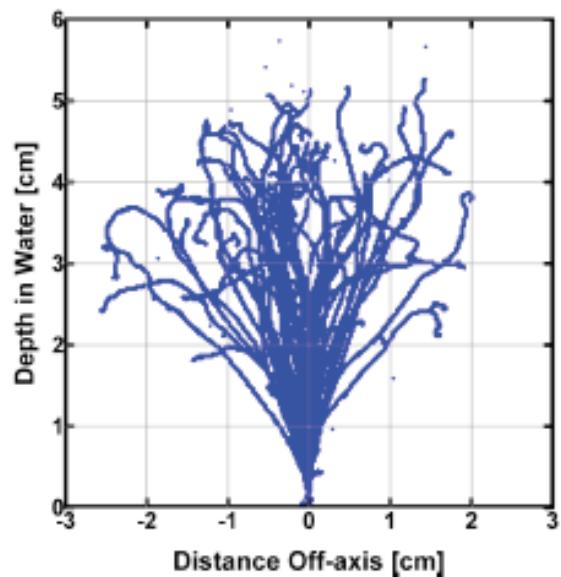
150 MeV/n carbon ions  
500 histories



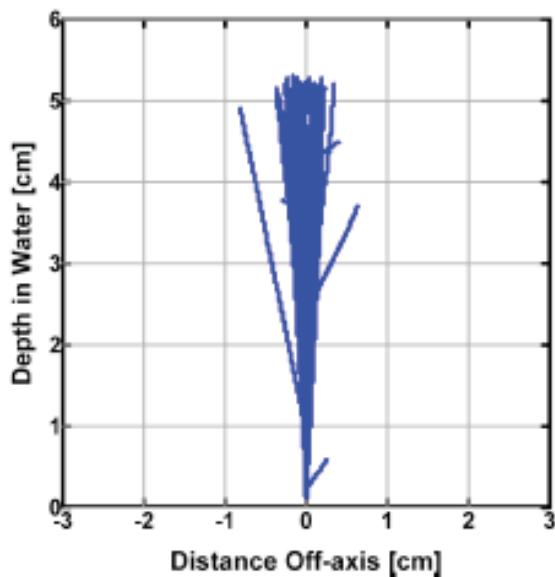
MCNPX simulations

# Straggling from Multiple Particle Paths

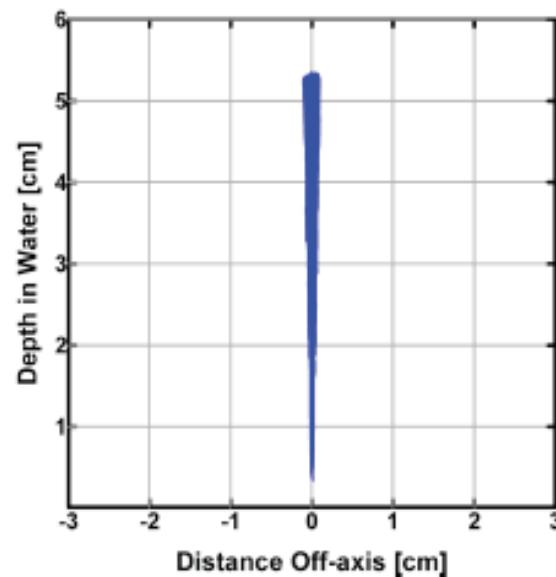
10 MeV electrons  
50 histories



80 MeV protons  
50 histories

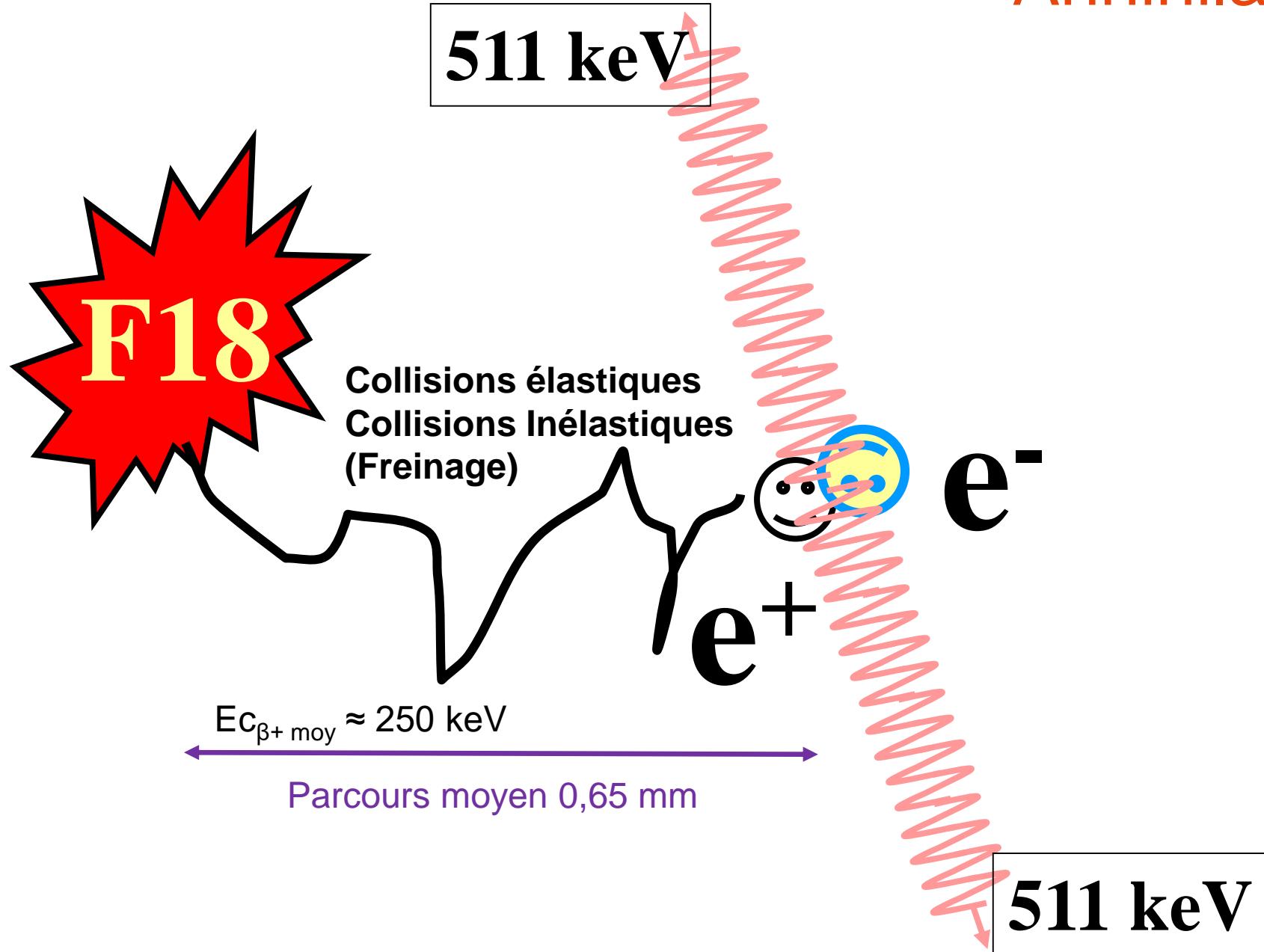


150 MeV/n carbon ions  
500 histories



MCNPX simulations

# Annihilation



# Messages essentiels du cours

- Les particules chargées sont des rayonnements directement ionisants car ils interagissent beaucoup avec la matière et ce sur des distances courtes
- Les interactions dans les tissus vont beaucoup se faire avec les électrons et plus rarement avec les noyaux. Les interactions vont consister en des mécanismes collisionnels avec les électrons (thermique, excitation, ionisation) et avec les noyaux (pour les ions uniquement) et des mécanismes radiatifs (freinage, annihilation pour les positons )
- Le type et la probabilité d'interaction dépend de la charge de la particule incidente; de l'énergie et du numéro atomique de la cible.
- La trajectoire est la distance totale parcourue par la particule. Le parcours est la projection de la trajectoire selon la direction initiale de la particule

## Et au prochain cours ...

- Conséquences sur la particule
  - Ralentissement / Pouvoir de ralentissement
  - Variation du pouvoir de ralentissement avec l'énergie et la charge de la particule et le Z de la cible
- Conséquences sur la matière
  - Ionisations
  - Pic de Bragg
  - Transfert d'énergie linéique / Densité linéique d'ionisation

# 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.