

## Chapitre 7

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

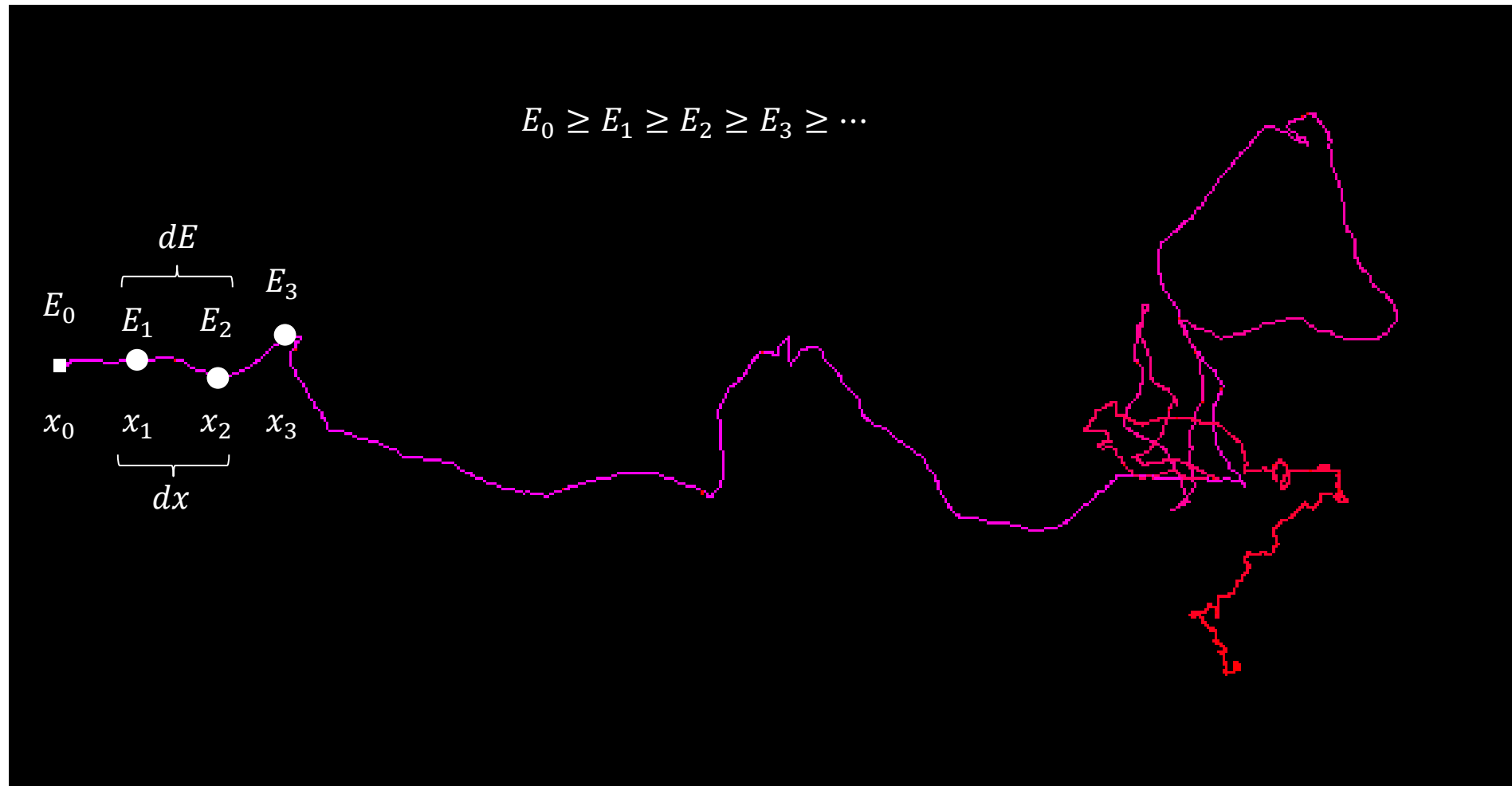
Dr. Jean-François ADAM

# Objectifs pédagogiques du cours

- Savoir définir le pouvoir de ralentissement des particules chargées
  - pouvoir de ralentissement et parcours
  - Courbe de Bragg pour les ions
- Appréhender les conséquences des interactions des particules chargées sur la matière
  - Agitation thermique / Excitation / Ionisation
  - Transfert d'énergie linéique / Densité linéique d'ionisation

# Conséquences sur la particule : ralentissement

## Pouvoir de ralentissement



# Conséquences sur la particule : ralentissement

## Pouvoir de ralentissement

- **Pouvoir de ralentissement  $S = dE/dx$  (en keV/ $\mu\text{m}$  ou en MeV/cm)**
- **$Q = K \cdot 1/h^2 \cdot z^2/v^2$   
donc  $dE$  et  $S$  sont proportionnels à  $z^2/v^2$**
- **À *vitesse égale*, toutes les particules portant une seule charge ont le même pouvoir de ralentissement**
- **$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$  s'appelle le **pouvoir de ralentissement massique**, en  $\text{MeV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ . On parle de aussi de pouvoir d'arrêt massique.**

# Conséquences sur la particule : ralentissement

## Pouvoir de ralentissement

- **Pouvoir de ralentissement  $S = dE/dx$  (en keV/ $\mu\text{m}$  ou en MeV/cm)**
- **$Q = K \cdot 1/h^2 \cdot z^2/v^2$   
donc  $dE$  et  $S$  sont proportionnels à  $z^2/v^2$**
- **À *vitesse égale*, toutes les particules portant une seule charge ont le même pouvoir de ralentissement**
- **$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$  s'appelle le **pouvoir de ralentissement massique**, en  $\text{MeV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ . On parle de aussi de pouvoir d'arrêt massique.**

# Conséquences sur la particule : ralentissement

## Pouvoir de ralentissement

- **Pouvoir de ralentissement  $S = dE/dx$  (en keV/ $\mu\text{m}$  ou en MeV/cm)**
- **$Q = K \cdot 1/h^2 \cdot z^2/v^2$   
donc  $dE$  et  $S$  sont proportionnels à  $z^2/v^2$**
- **À *vitesse égale*, toutes les particules portant une seule charge ont le même pouvoir de ralentissement**
- **$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$  s'appelle le **pouvoir de ralentissement massique**, en  $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ . On parle de aussi de pouvoir d'arrêt massique.**

# Pouvoir de ralentissement

- Masse du proton = 1830 x masse de l'électron
- Des protons de vitesse  $v$  (énergie  $E_p$ ) vont avoir le même pouvoir de ralentissement que des électrons qui, pour la même vitesse  $v$ , ont une énergie très inférieure  $E_e \sim E_p/1830$ .
- >> Des protons de 100 MeV ont le même pouvoir de ralentissement que des électrons de 45 keV.
- Effet de la charge : particule  $\alpha$  ( $z = 2$ ) : même vitesse  $v \Rightarrow$  le pouvoir de ralentissement est :  $2^2 = 4$  fois plus élevé

# Pouvoir de ralentissement

- Masse du proton = 1830 x masse de l'électron
- Des protons de vitesse  $v$  (énergie  $E_p$ ) vont avoir le même pouvoir de ralentissement que des électrons qui, pour la même vitesse  $v$ , ont une énergie très inférieure  $E_e \sim E_p/1830$ .
- >> Des protons de 100 MeV ont le même pouvoir de ralentissement que des électrons de 45 keV.
- Effet de la charge : particule  $\alpha$  ( $z = 2$ ) : même vitesse  $v \Rightarrow$  le pouvoir de ralentissement est :  $2^2 = 4$  fois plus élevé



# Pouvoir de ralentissement

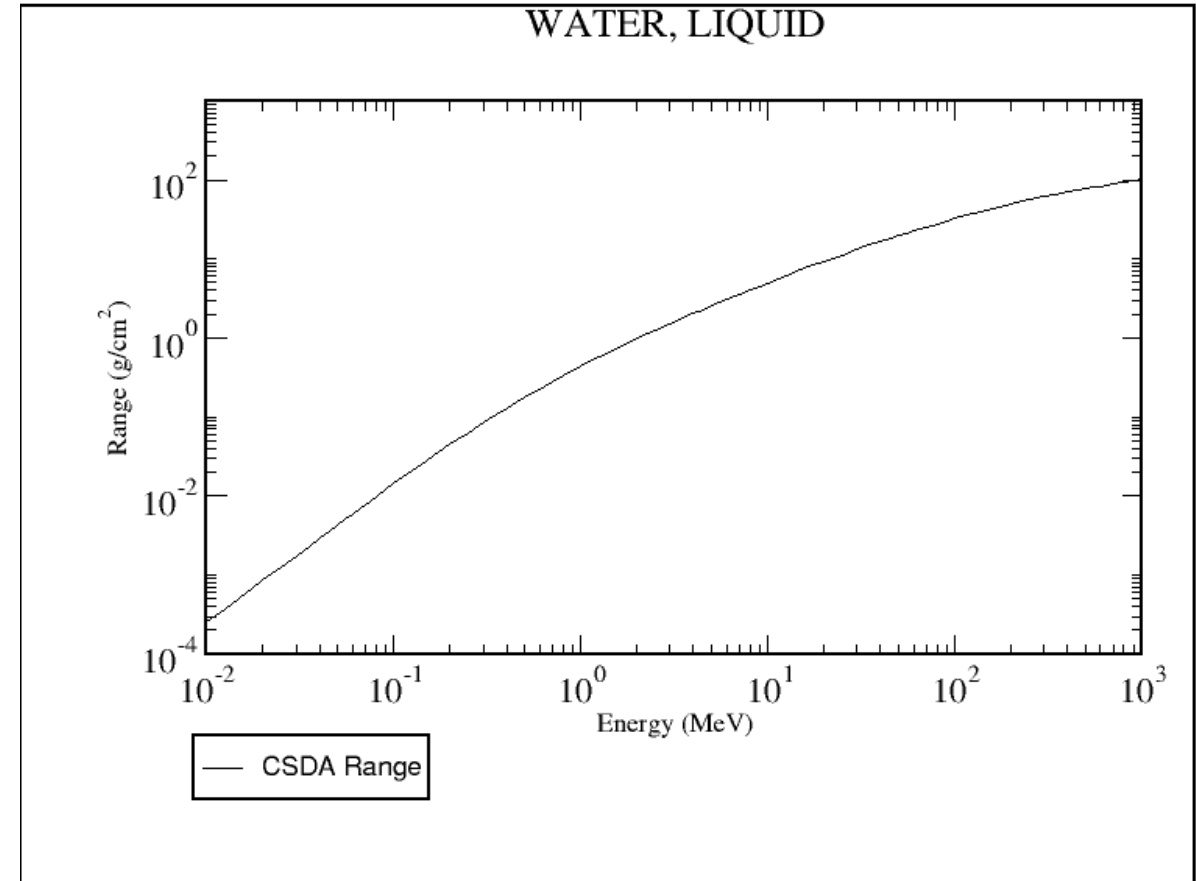
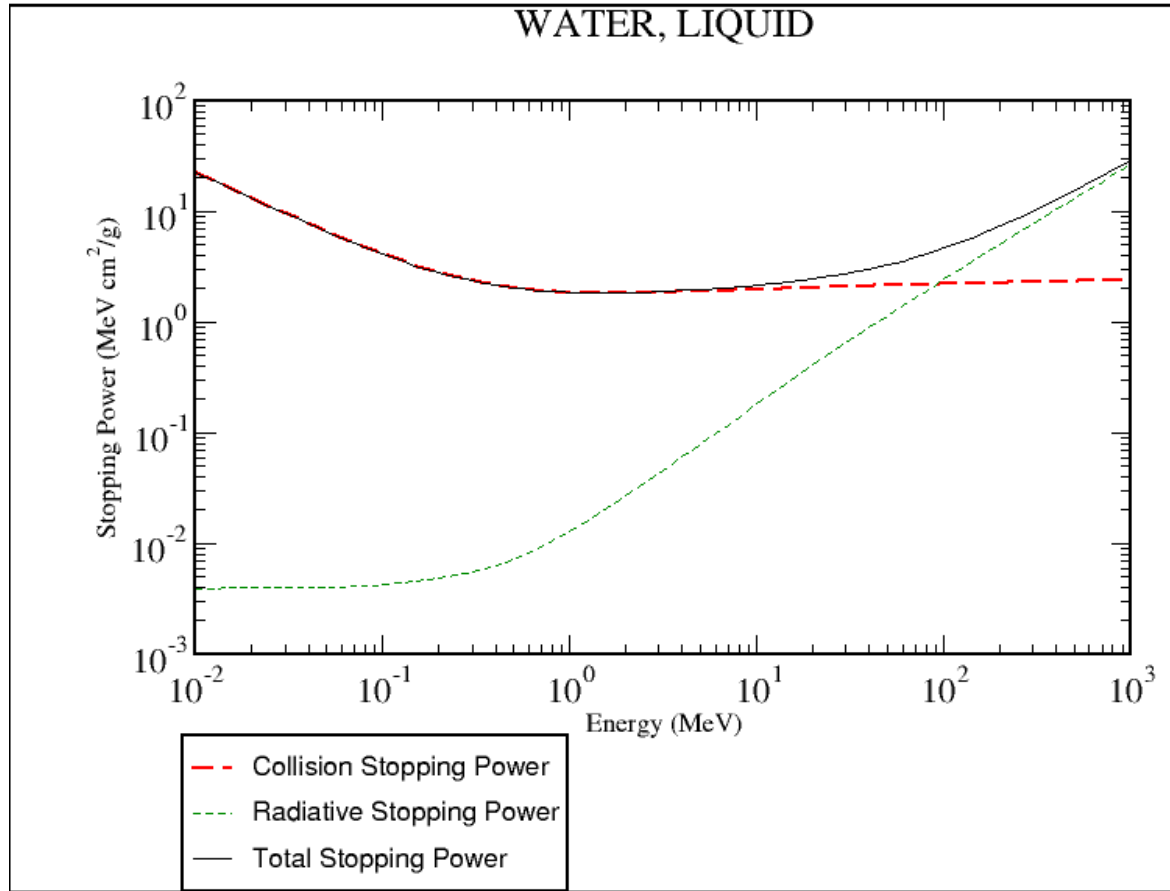
- **Conséquence importante :**  
deux particules de **même énergie** mais de **masses** donc de **vitesse différentes** ont des ***pouvoirs de ralentissement différents***
- Ceci a une importance considérable sur le plan radiobiologique ++++

Le parcours R et le pouvoir de ralentissement S des électrons dans l'eau en fonction de leur énergie cinétique initiale E est donnée dans le tableau suivant :

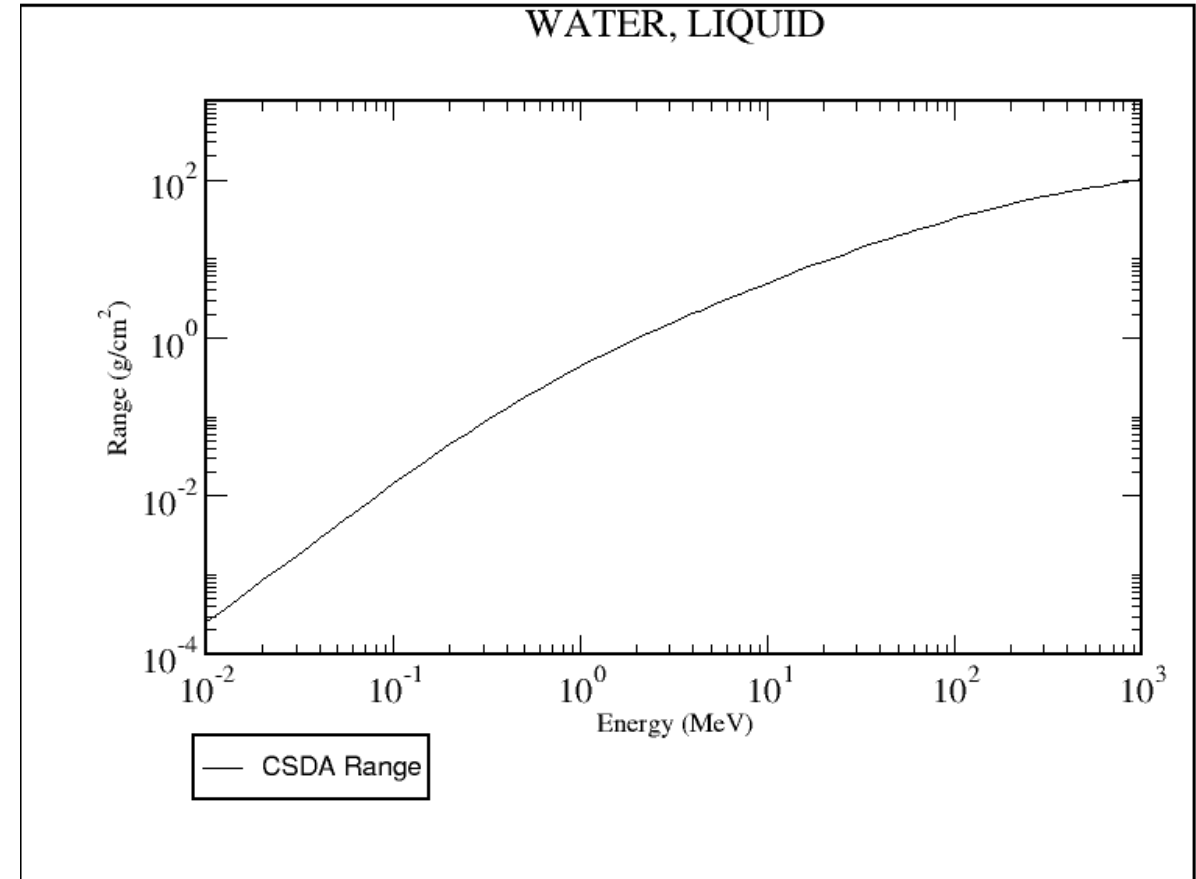
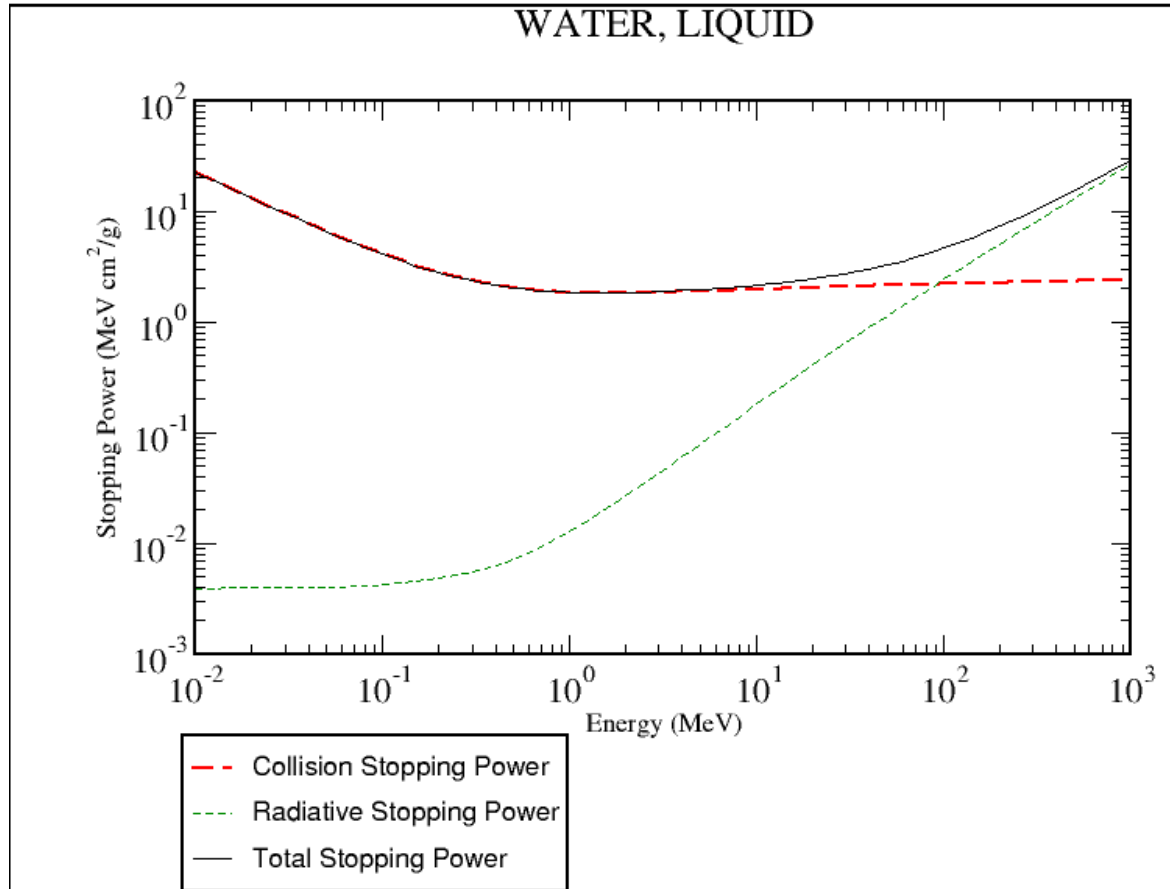
E	keV				MeV			
	10	30	50	100	0,5	1	5	10
S(keV/ $\mu$ m)	2,3	0,99	0,67	0,42	0,20	0,19	0,19	0,19
R	$\mu$ m				cm			
	5	20	50	150	0,2	0,5	2,5	5

(d'après Tubiana M., Dutreix J., Wambersie A. Radiobiologie -Hermann 1986).

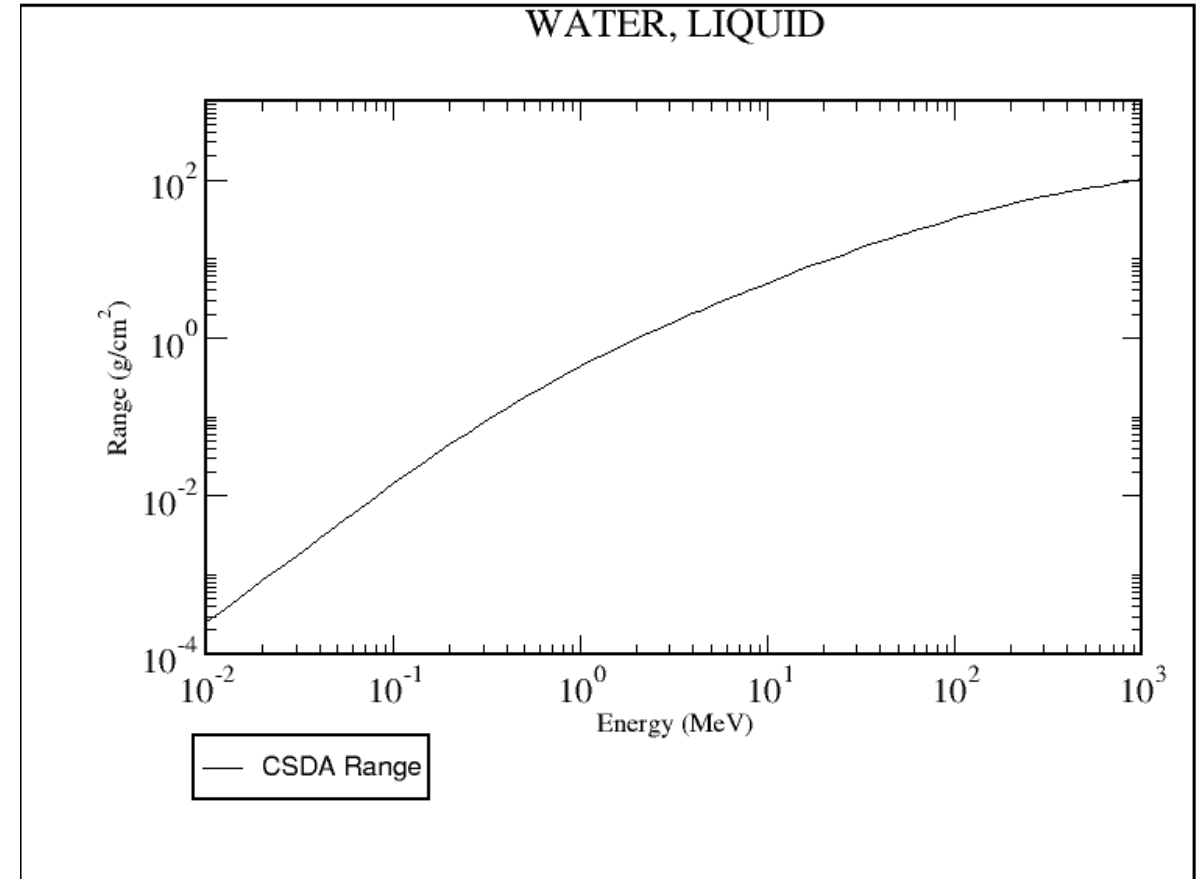
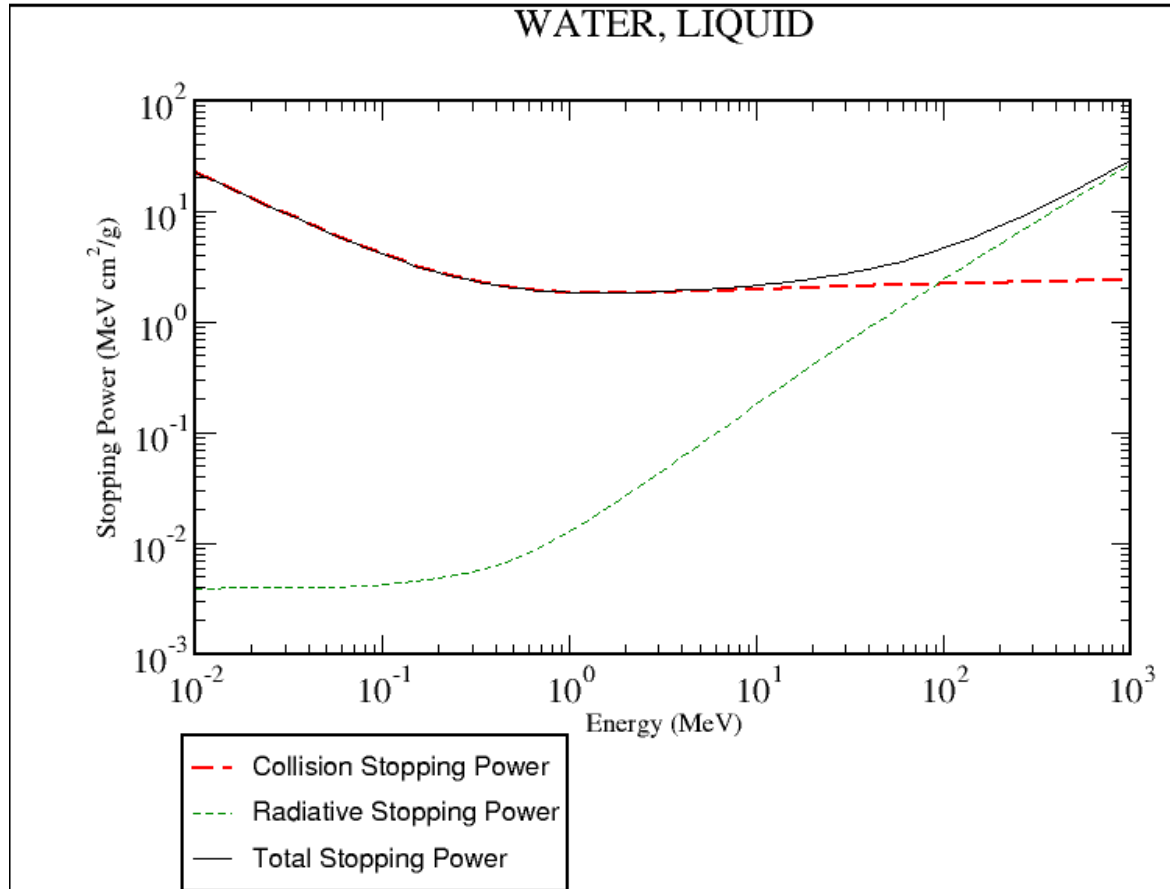
# Pouvoir de ralentissement / Parcours – électrons/ positons



# Pouvoir de ralentissement / Parcours – électrons/ positons

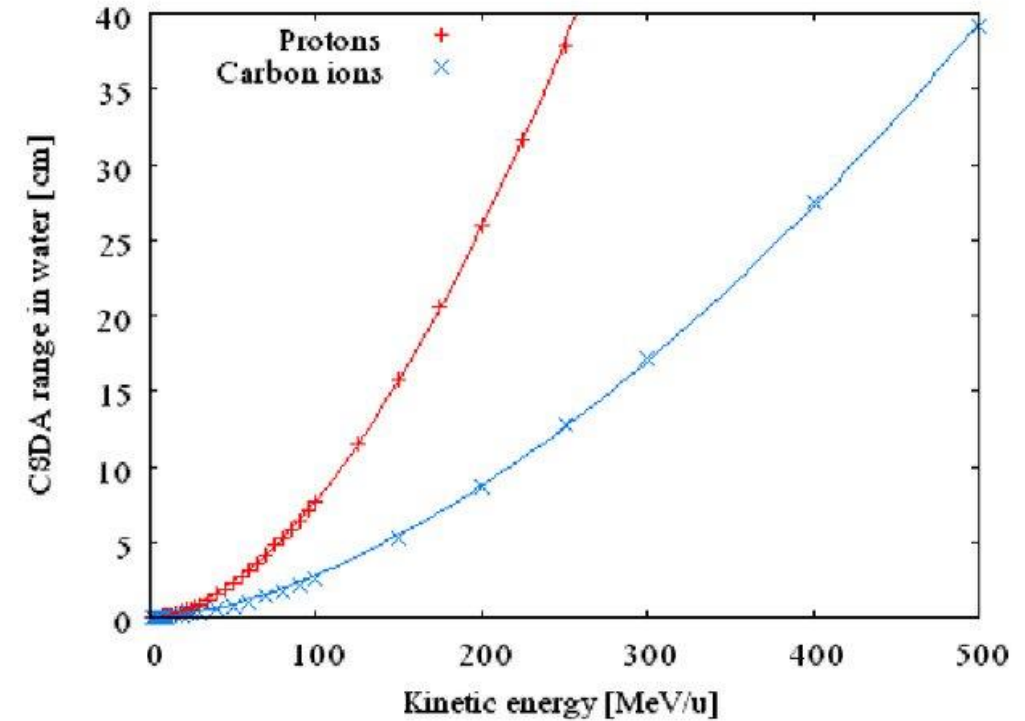
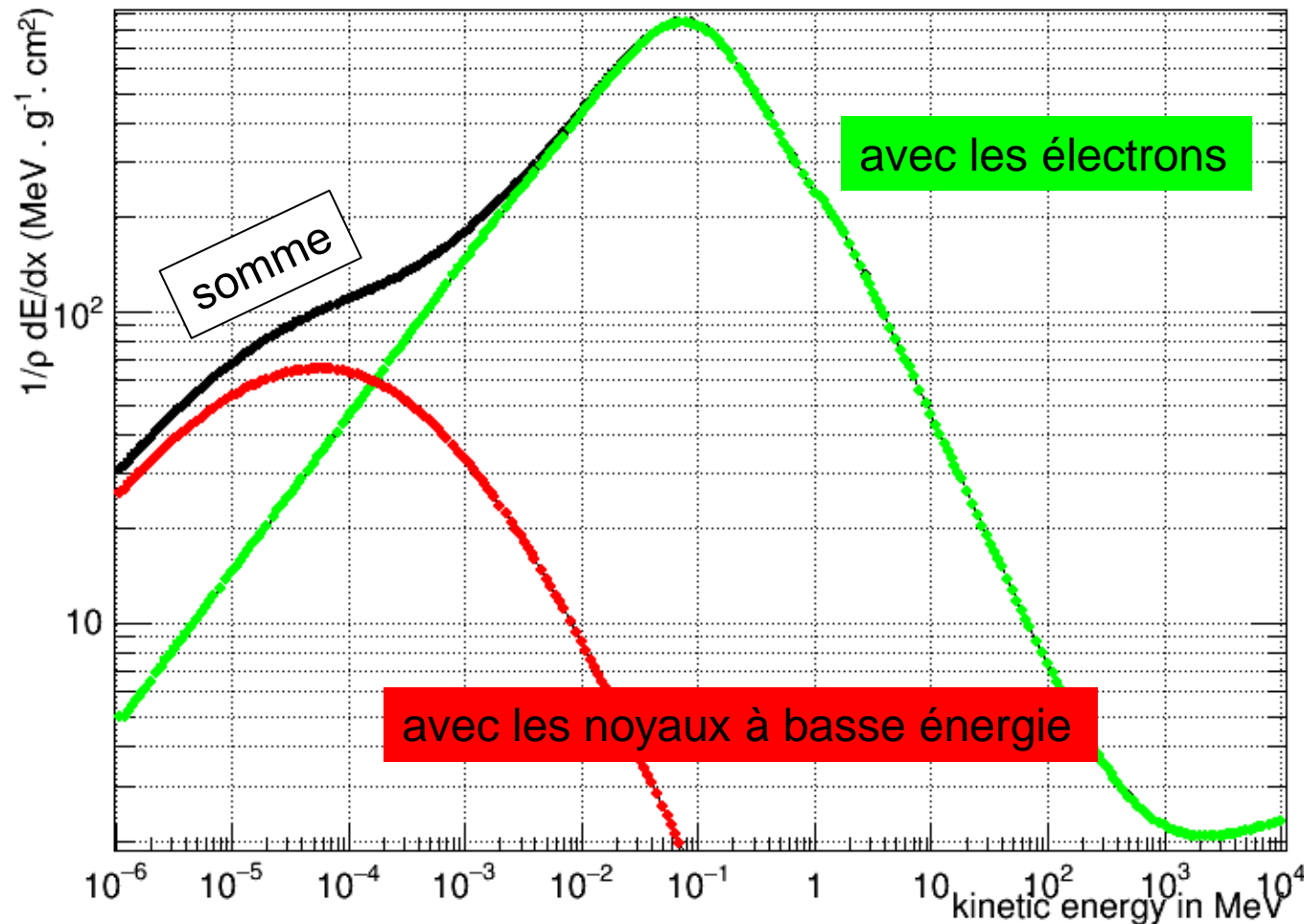


# Pouvoir de ralentissement / Parcours – électrons/ positons



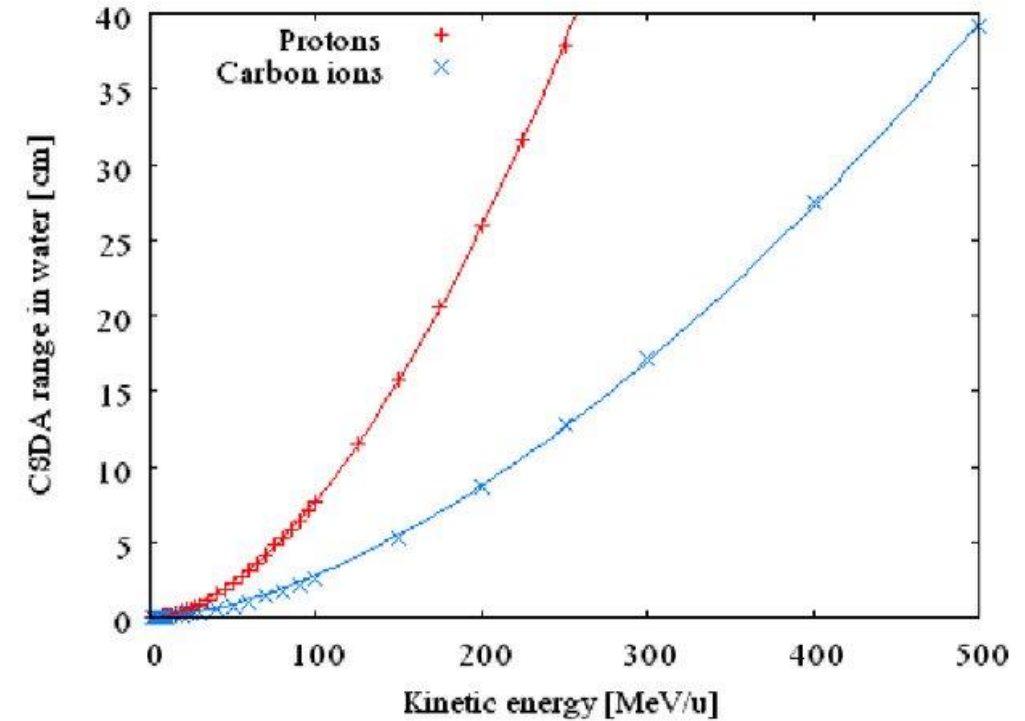
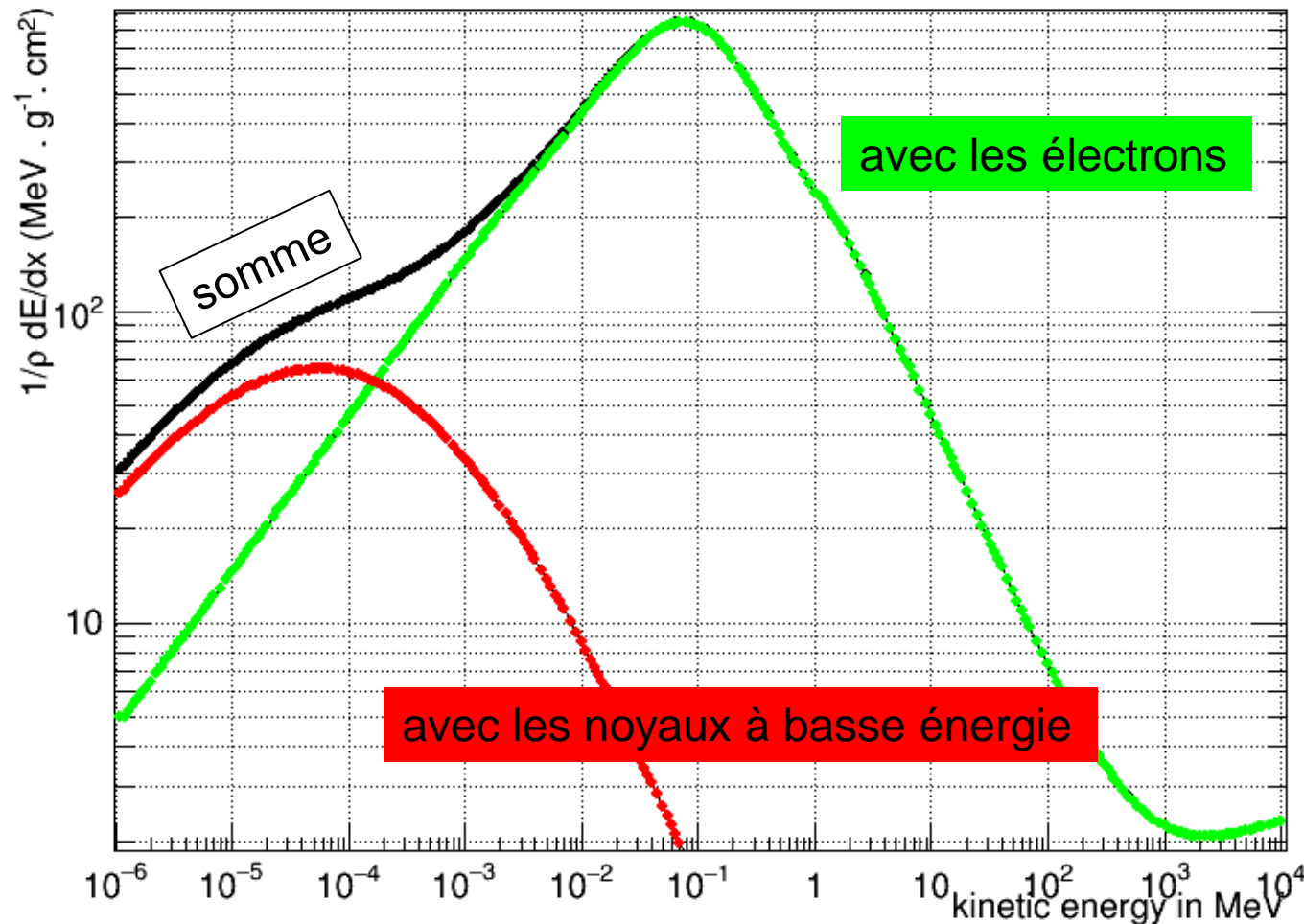
# Pouvoir de ralentissement / Parcours – ions

proton in water, adapted from SRIM 2013



# Pouvoir de ralentissement / Parcours – ions

proton in water, adapted from SRIM 2013



# Le pouvoir de ralentissement dépend de la vitesse

- ... Dans la zone où les interactions par collision dominent, il augmente quand la vitesse diminue (proportionnel à  $z^2/v^2$  )
- **Donc plus la particule ralentit, plus le pouvoir de ralentissement augmente : les interactions sont beaucoup plus nombreuses en fin de trajectoire...**
- **Electrons**
  - 1 MeV – Pouvoir d'arrêt dans l'eau de 1,85 MeV/cm
  - 350 keV – Pouvoir d'arrêt dans l'eau 2,25 MeV/cm .
  - 90 keV – Pouvoir d'arrêt dans l'eau de 4,4 MeV/cm.



# Avec les particules lourdes (protons, particules $\alpha$ ), les ionisations sont plus nombreuses et plus resserrées en fin de parcours : courbe de Bragg

## Electrons

1 MeV – Parcours de 4 mm dans l'eau. Pouvoir d'arrêt de 1.85 MeV/cm

350 keV – Parcours de 1 mm dans l'eau. pouvoir d'arrêt dans l'eau 2.25 MeV/cm .

90 keV ; parcours de 0.1 mm dans l'eau. Pouvoir d'arrêt de 4.4 MeV/cm.

## Protons

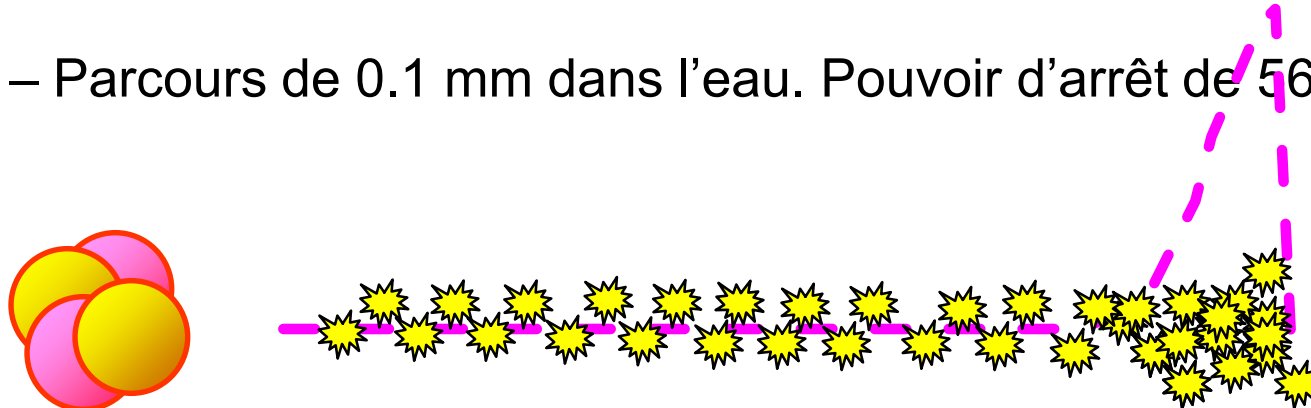
20 MeV – Parcours de 4 mm dans l'eau. Pouvoir d'arrêt de 26,5 MeV/cm

10 MeV – Parcours de 1mm dans l'eau. Pouvoir d'arrêt de 47 MeV/ cm.

2,5 MeV – Parcours de 0.1 mm dans l'eau. Pouvoir d'arrêt de 140 MeV/cm.

## Alpha

10 MeV – Parcours de 0.1 mm dans l'eau. Pouvoir d'arrêt de 565 MeV/cm



# Avec les particules lourdes (protons, particules $\alpha$ ), les ionisations sont plus nombreuses et plus resserrées en fin de parcours : courbe de Bragg

## Electrons

1 MeV – Parcours de 4 mm dans l'eau. Pouvoir d'arrêt de 1.85 MeV/cm

350 keV – Parcours de 1 mm dans l'eau. pouvoir d'arrêt dans l'eau 2.25 MeV/cm .

90 keV ; parcours de 0.1 mm dans l'eau. Pouvoir d'arrêt de 4.4 MeV/cm.

## Protons

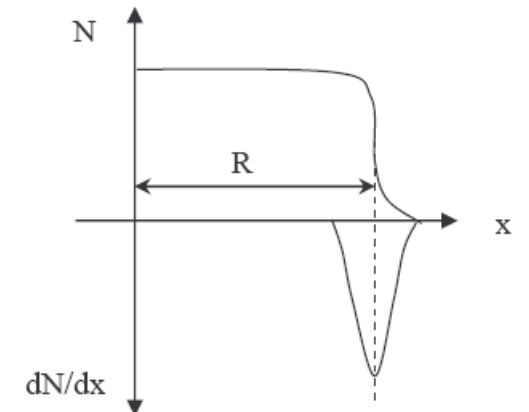
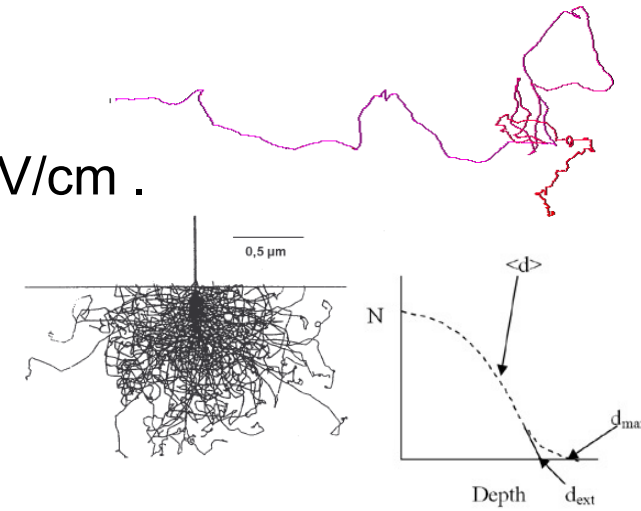
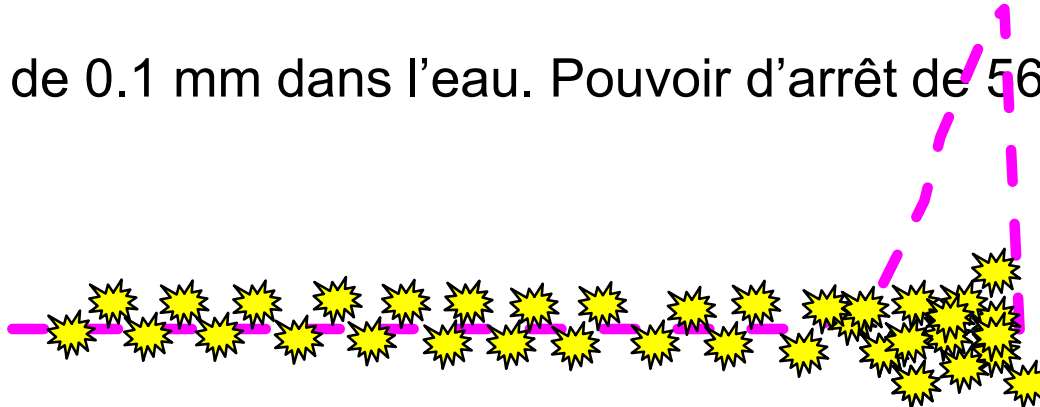
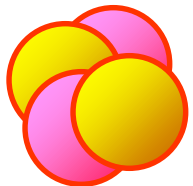
20 MeV – Parcours de 4 mm dans l'eau. Pouvoir d'arrêt de 26,5 MeV/cm

10 MeV – Parcours de 1mm dans l'eau. Pouvoir d'arrêt de 47 MeV/ cm.

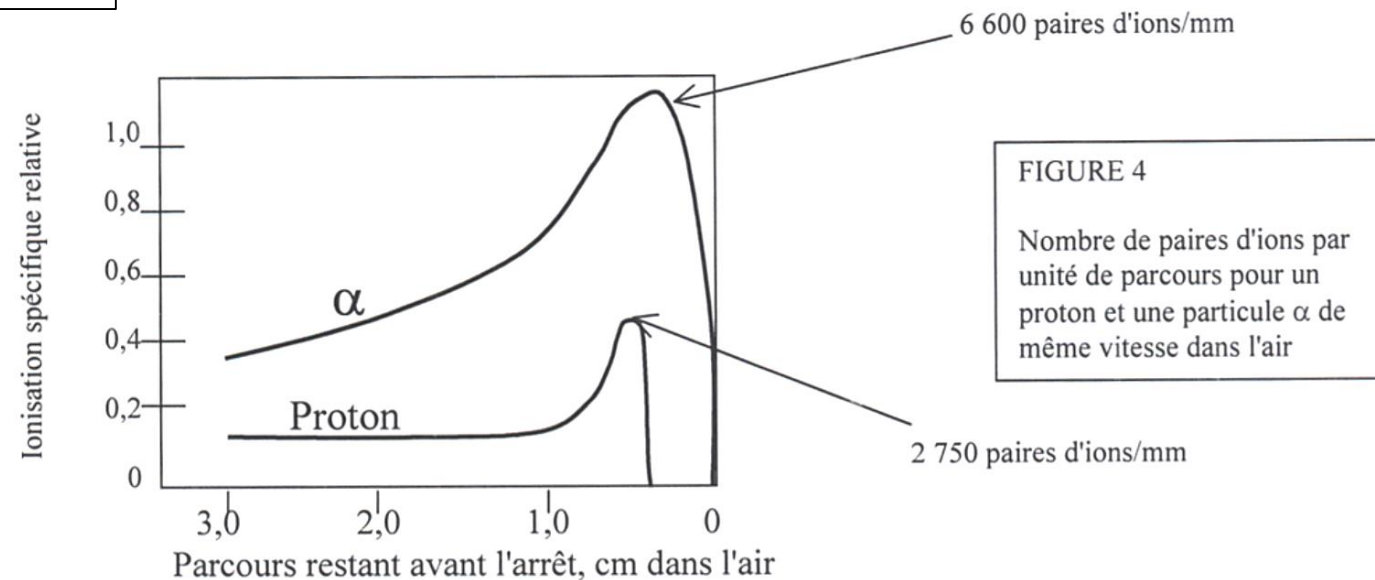
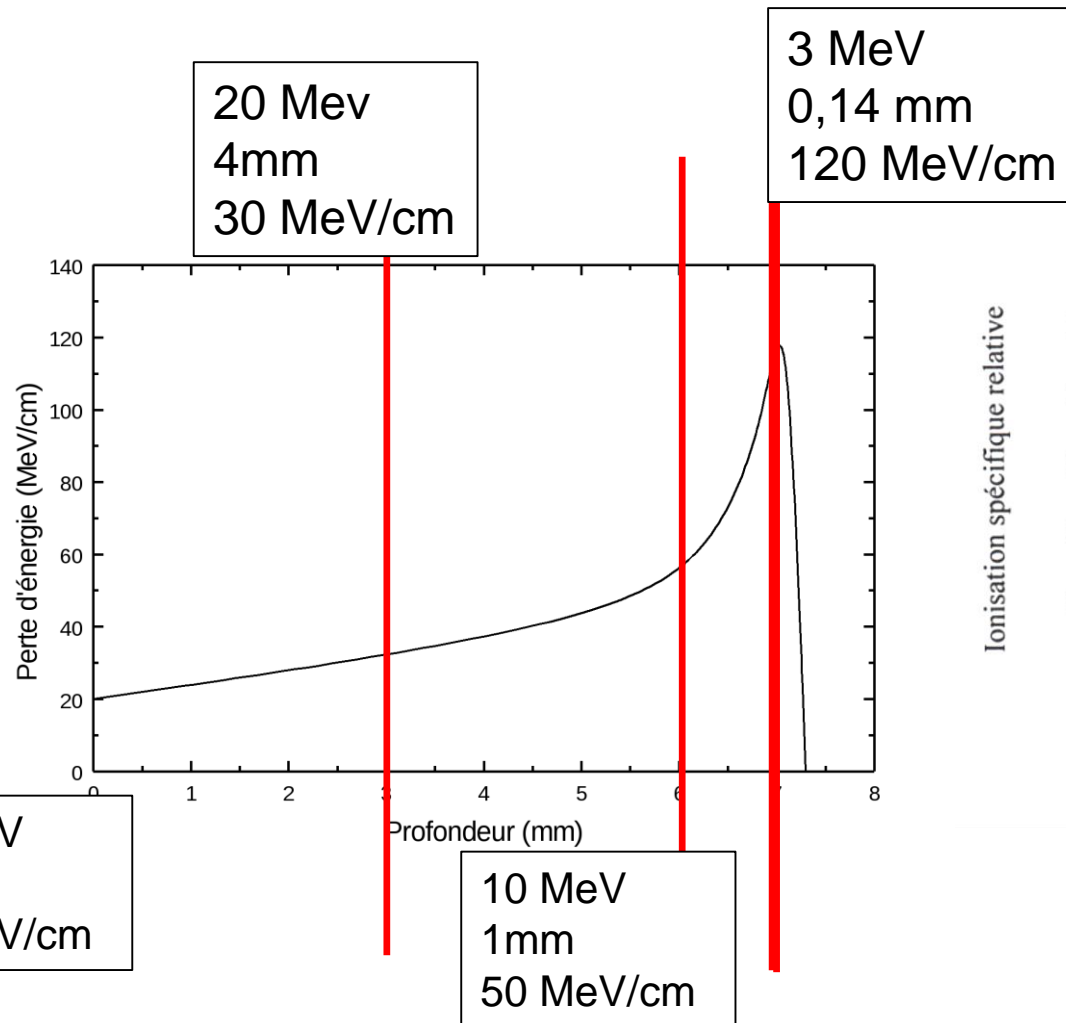
2,5 MeV – Parcours de 0.1 mm dans l'eau. Pouvoir d'arrêt de 140 MeV/cm.

## Alpha

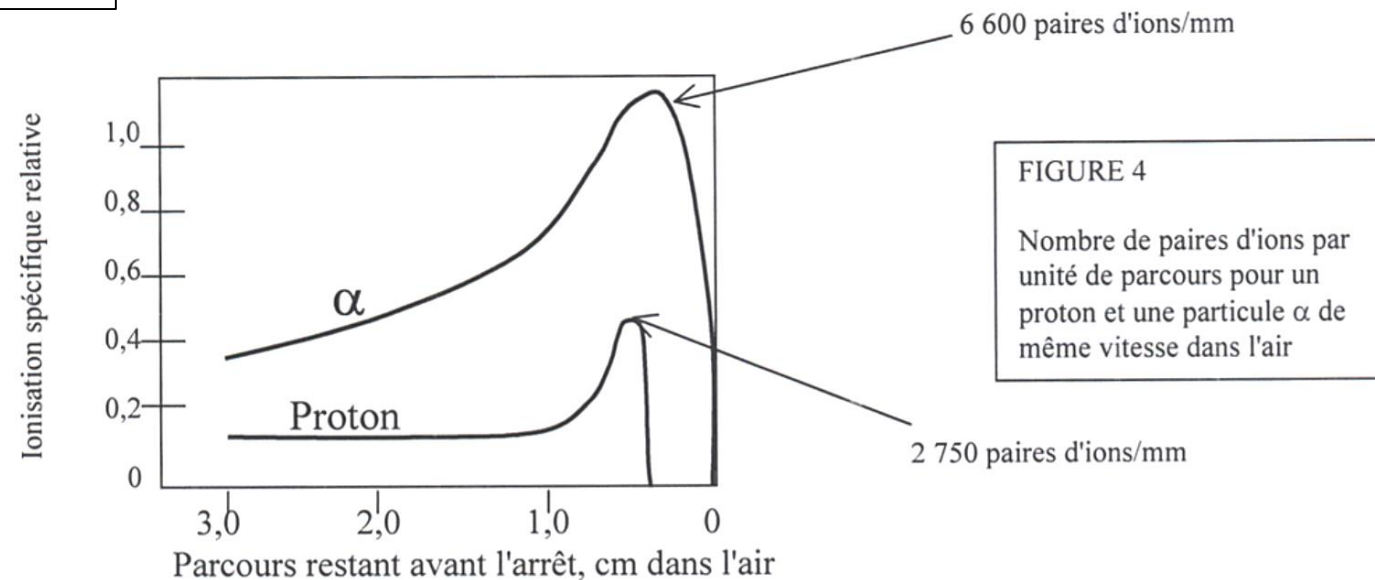
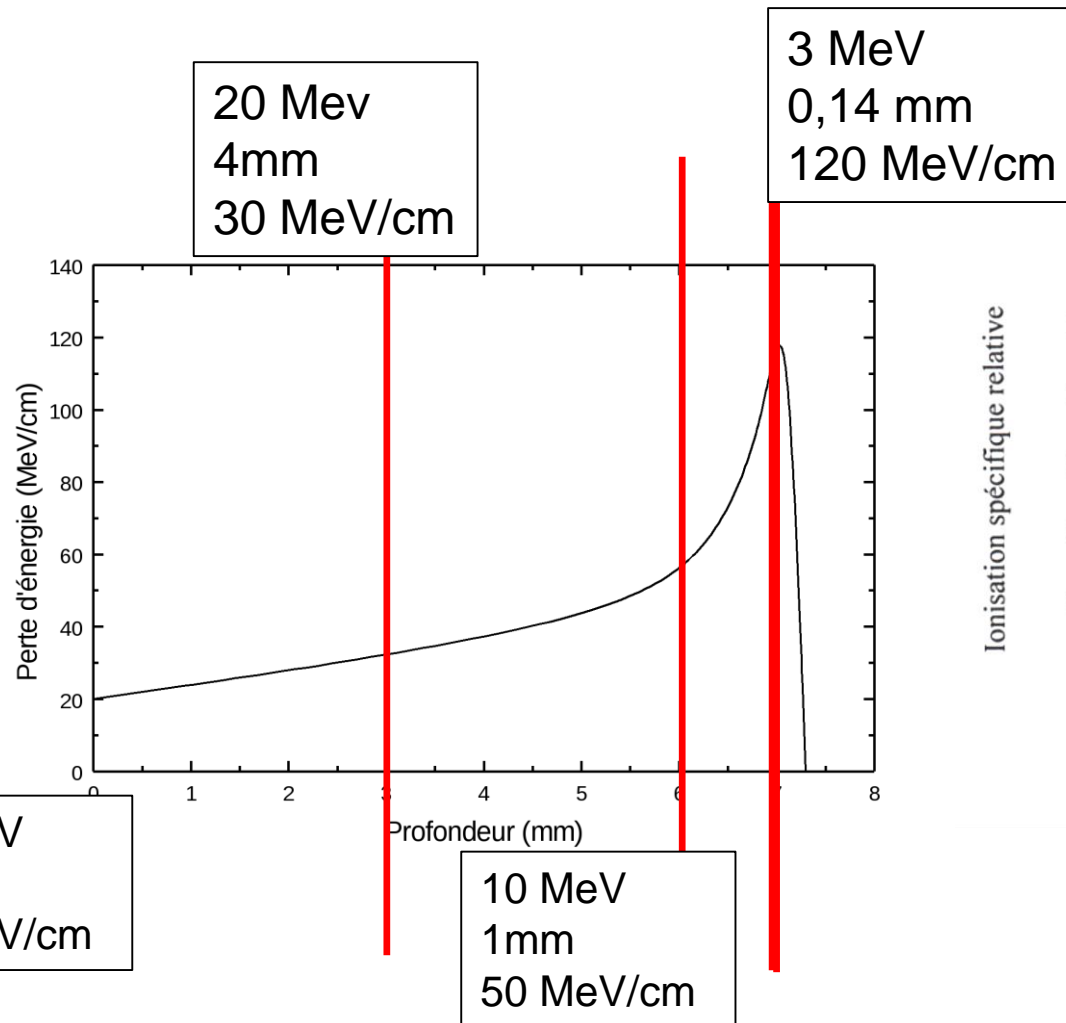
10 MeV – Parcours de 0.1 mm dans l'eau. Pouvoir d'arrêt de 565 MeV/cm



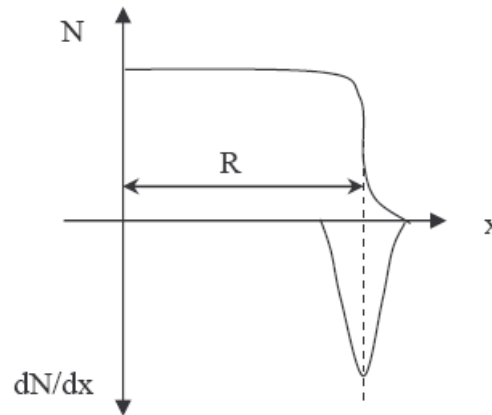
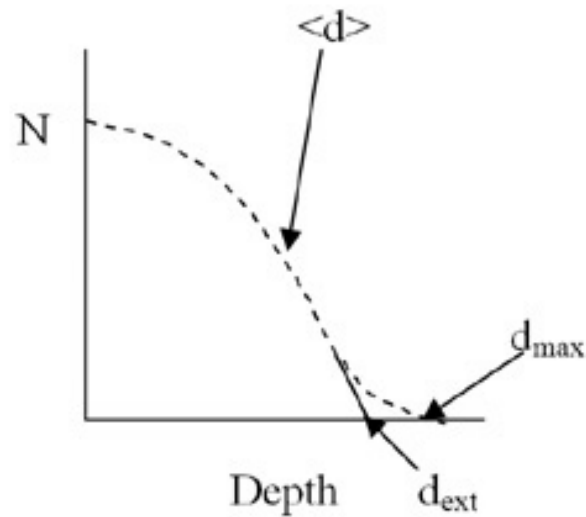
# Particules lourdes (protons, particules $\alpha$ ): courbe de Bragg



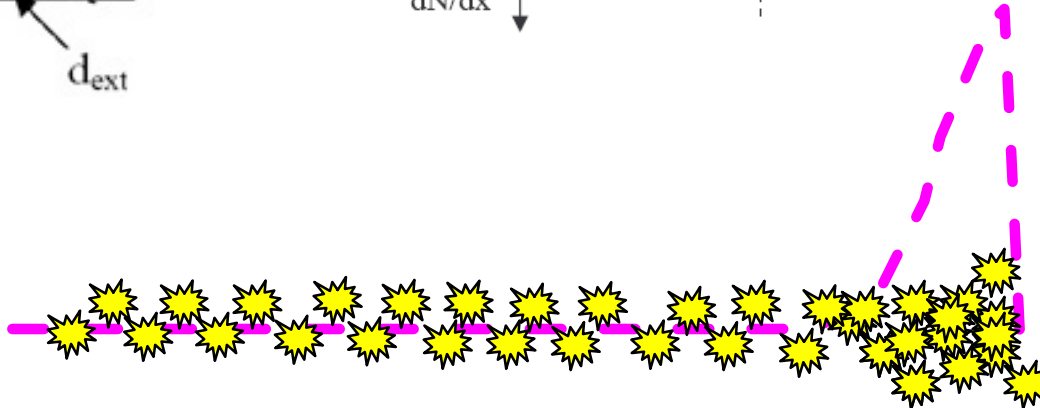
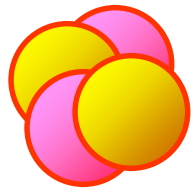
# Particules lourdes (protons, particules $\alpha$ ): courbe de Bragg



Avec les particules lourdes (protons, particules  $\alpha$ ),  
les ionisations sont plus nombreuses et plus  
resserrées en fin de parcours : courbe de Bragg

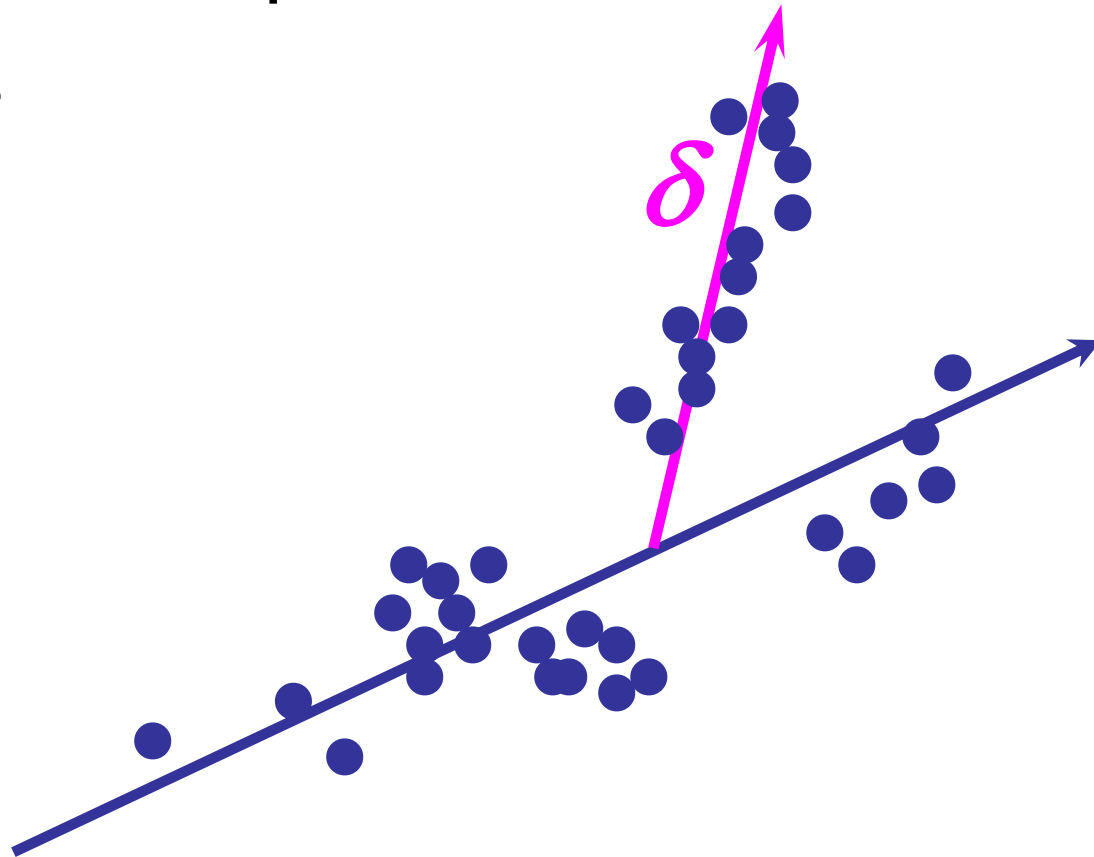


Le pic de Bragg n'est pas observé pour les électrons à cause de la forte variabilité dans leurs parcours (trajectoire en ligne brisée). De plus leur nombre diminue fortement avec la profondeur dans la matière



# Conséquences de l'interaction des particules chargées sur le milieu

- Transferts thermiques
- Excitations
- Ionisations

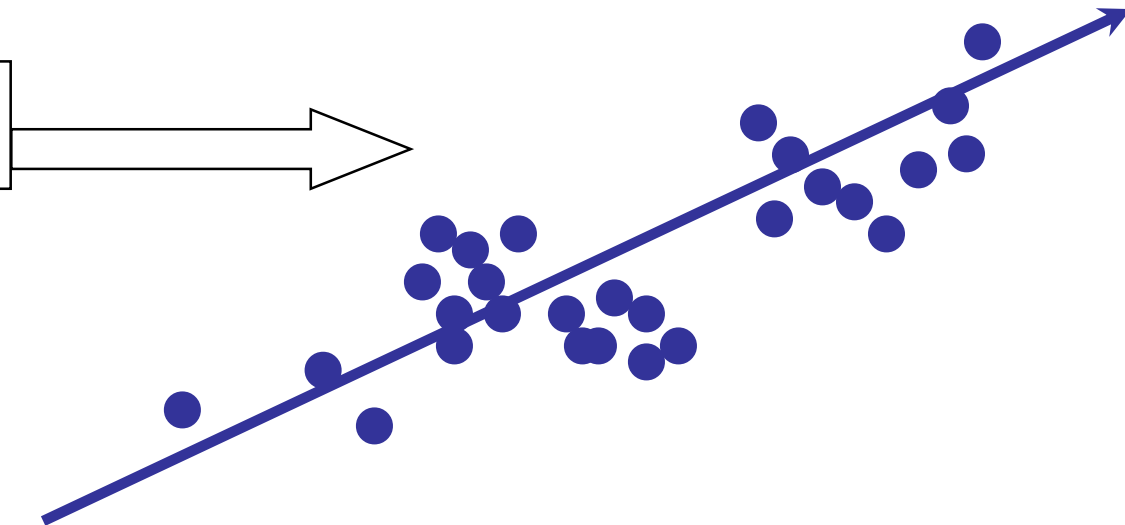


Chaque interaction entraîne dans le milieu un effet qui dépend de la valeur  $Q$  de l'énergie transférée par la particule :

- $Q$  très faible : transfert thermique
- $Q$  plus élevé mais  $< 13$  eV :  
excitations

- $Q$  élevé :

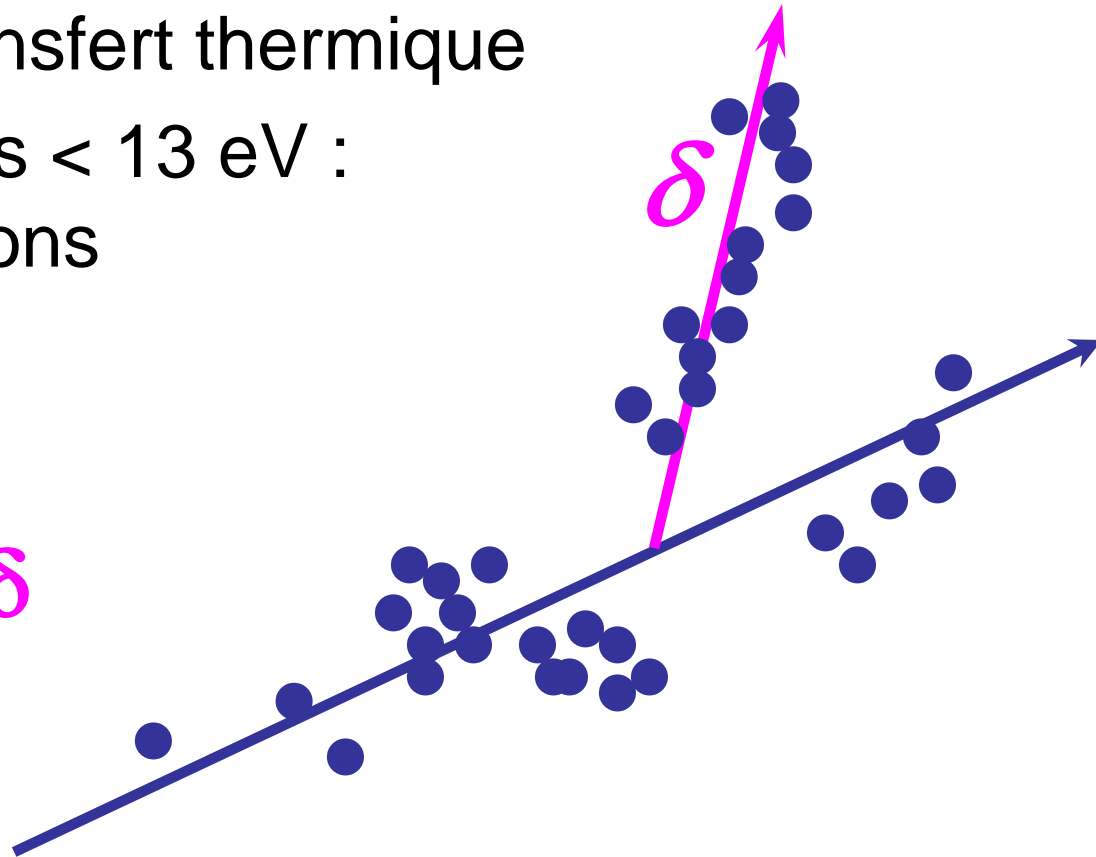
– Ionisations  
– Électrons  $\delta$



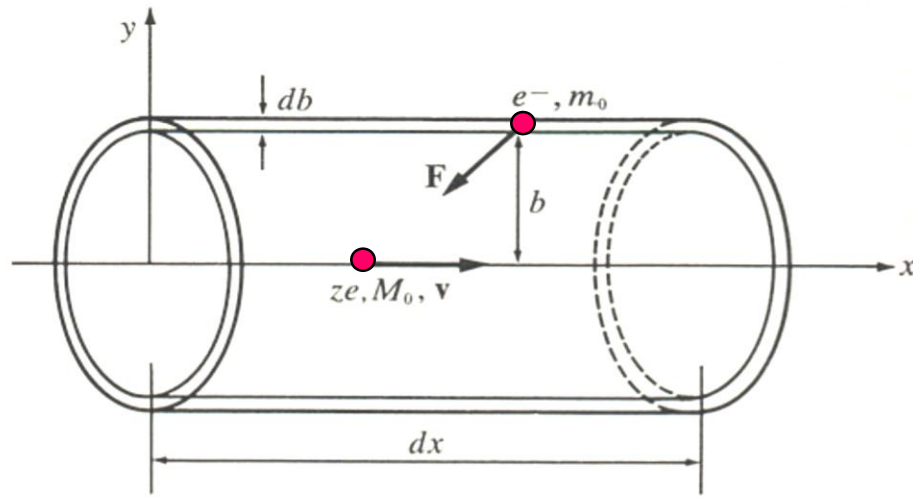
Chaque interaction entraîne dans le milieu un effet qui dépend de la valeur  $Q$  de l'énergie transférée par la particule :

- $Q$  très faible : transfert thermique
- $Q$  plus élevé mais  $< 13$  eV :  
excitations
- $Q$  élevé :

– Ionisations  
– **Électrons  $\delta$**

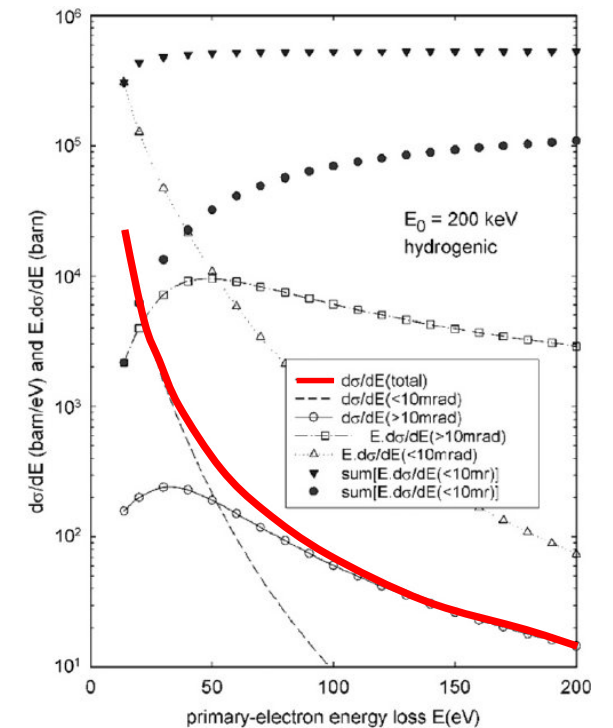






$$Q \approx K \frac{1}{h^2} \cdot \frac{z^2}{v^2}$$

La probabilité d'une interaction au cours de laquelle est transférée l'énergie  $Q$  est *proportionnelle à  $1/Q^2$*



La probabilité d'une interaction au cours de laquelle est transférée l'énergie  $Q$  est *proportionnelle à  $1/Q^2$*

- Les chocs à faible transfert (= à distance élevée) sont plus nombreux (probabilité plus élevée)
- Il en résulte que l'énergie  $\Delta E$  perdue par la particule le long d'un segment  $\Delta x$  de sa trajectoire se répartit schématiquement en :
  - 40 % sous forme de transferts  $Q > 100$  eV (électrons  $\Delta$ )
  - 30 % sous forme de transferts  $10 < Q < 100$  eV (ionisations)
  - 30 % sous forme de transferts  $Q < 10$  eV (excitations et transferts thermiques)

La probabilité d'une interaction au cours de laquelle est transférée l'énergie  $Q$  est *proportionnelle à  $1/Q^2$*

- **Energie  $\Delta E$  perdue par la particule le long d'un segment  $\Delta x$  de sa trajectoire :**
  - 40 % sous forme de transferts  $Q > 100$  eV (électrons  $\delta$ )
  - 30 % sous forme de transferts  $10 < Q < 100$  eV (ionisations simples)
  - 30 % sous forme de transferts  $Q < 10$  eV (excitations et transferts thermiques)
- **Cette répartition :**
  - dépend peu de la vitesse et de la charge de la particule, donc de son pouvoir de ralentissement
  - est constante tout au long de la trajectoire de la particule
  - est la même pour les électrons  $\delta$
- **De sorte qu'après épuisement des électrons secondaires, environ 50 % de l'énergie d'un électron incident a été déposée par ionisations**

## TEL (transfert d'énergie linéique)

= quantité d'énergie transférée au milieu  
par la particule incidente par **unité de**  
**longueur de trajectoire** (en keV.μm<sup>-1</sup>)

Pour des particules de vitesse faible par  
rapport à celle de la lumière :

$$\text{TEL} \approx K \frac{Z^2}{v^2} n Z$$

*charge* →  $Z^2$

*Nombre d'atomes par unité de volume de la cible* →  $n$

*Numéro atomique* →  $Z$

*Vitesse* →  $v^2$

**DLI = densité linéique d'ionisation**

- **Le TEL est un paramètre clé de la radiobiologie**
- **Il est lié au nombre de paires d'ions créés par la particule incidente par unité de longueur de trajectoire: la densité linéique d'ionisation (DLI)**
  - **Le TEL conditionne les effets biologiques**
- **Si  $\omega_i$  est l'énergie moyenne transférée pour chaque ionisation :**

$$\text{TEL} = \text{DLI} \cdot \omega_i$$

# Énergie moyenne par ionisation

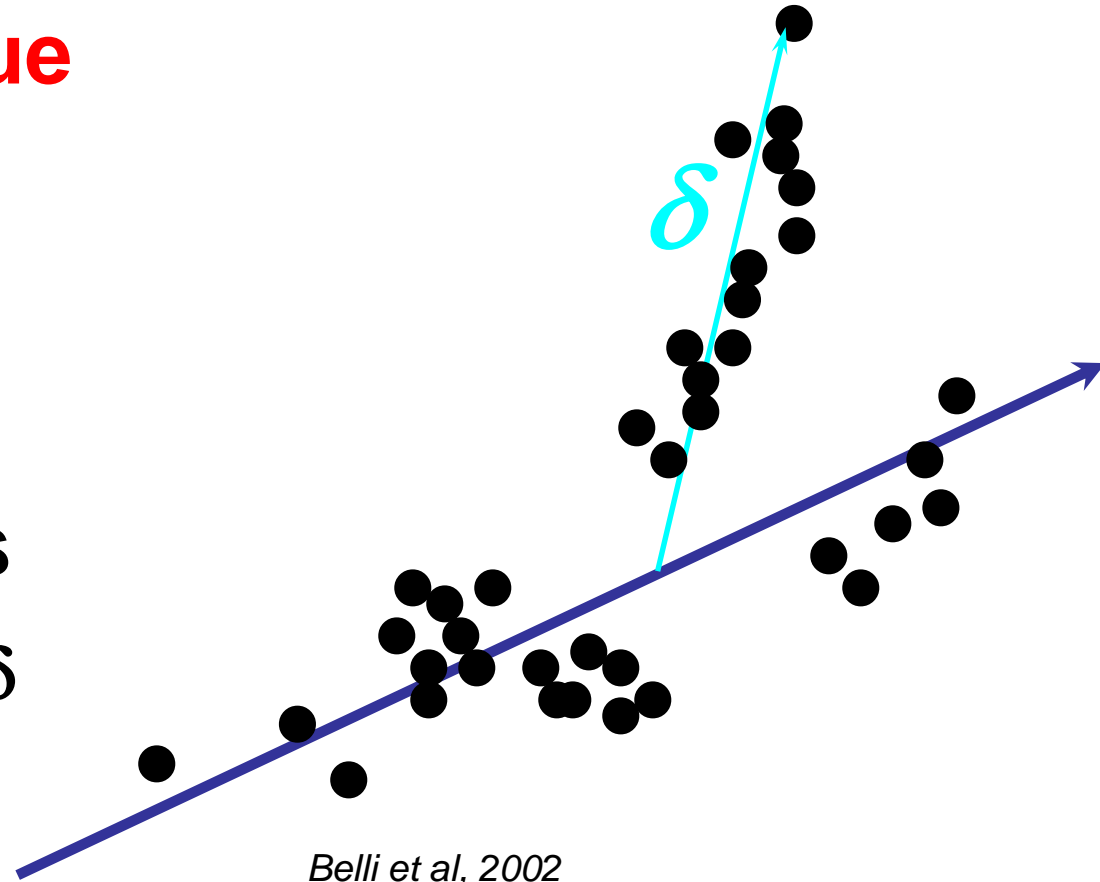
- La répartition des conséquences physiques des interactions (électrons delta, ionisations, excitations) est constante tout au long de la trajectoire de la particule. On retrouve la même répartition pour les interactions des électrons delta. Ainsi, au terme de la dégradation des électrons  $\delta$ , l'énergie déposée dans le milieu est partagée à peu près également entre ionisations d'une part (50% d'énergie perdue par collisions inélastiques), excitations et transferts thermiques d'autre part (50% d'énergie perdue par collisions élastiques).
- L'énergie absorbée en moyenne pour chaque ionisation, appelée **énergie moyenne par ionisation** ( $\omega_i$ ) est donc le double de l'énergie nécessaire à cette ionisation. Cette **énergie nécessaire pour créer une paire électron-ion** dépend peu de la vitesse et de la charge des particules ; elle dépend essentiellement du milieu traversé (Z et masse volumique).
- Dans l'eau, où une ionisation demande environ 16 eV, on a  $\omega_i = 32$  eV (et environ 64 eV dans l'air).

# Énergie moyenne par ionisation

- La répartition des conséquences physiques des interactions (électrons delta, ionisations, excitations) est constante tout au long de la trajectoire de la particule. On retrouve la même répartition pour les interactions des électrons delta. Ainsi, au terme de la dégradation des électrons  $\delta$ , l'énergie déposée dans le milieu est partagée à peu près également entre ionisations d'une part (50% d'énergie perdue par collisions inélastiques), excitations et transferts thermiques d'autre part (50% d'énergie perdue par collisions élastiques).
- L'énergie absorbée en moyenne pour chaque ionisation, appelée **énergie moyenne par ionisation** ( $\omega_i$ ) est donc le double de l'énergie nécessaire à cette ionisation. Cette **énergie nécessaire pour créer une paire électron-ion** dépend peu de la vitesse et de la charge des particules ; elle dépend essentiellement du milieu traversé (Z et masse volumique).
- Dans l'eau, où une ionisation demande environ 16 eV, on a  $\omega_i = 32$  eV (et environ 64 eV dans l'air).

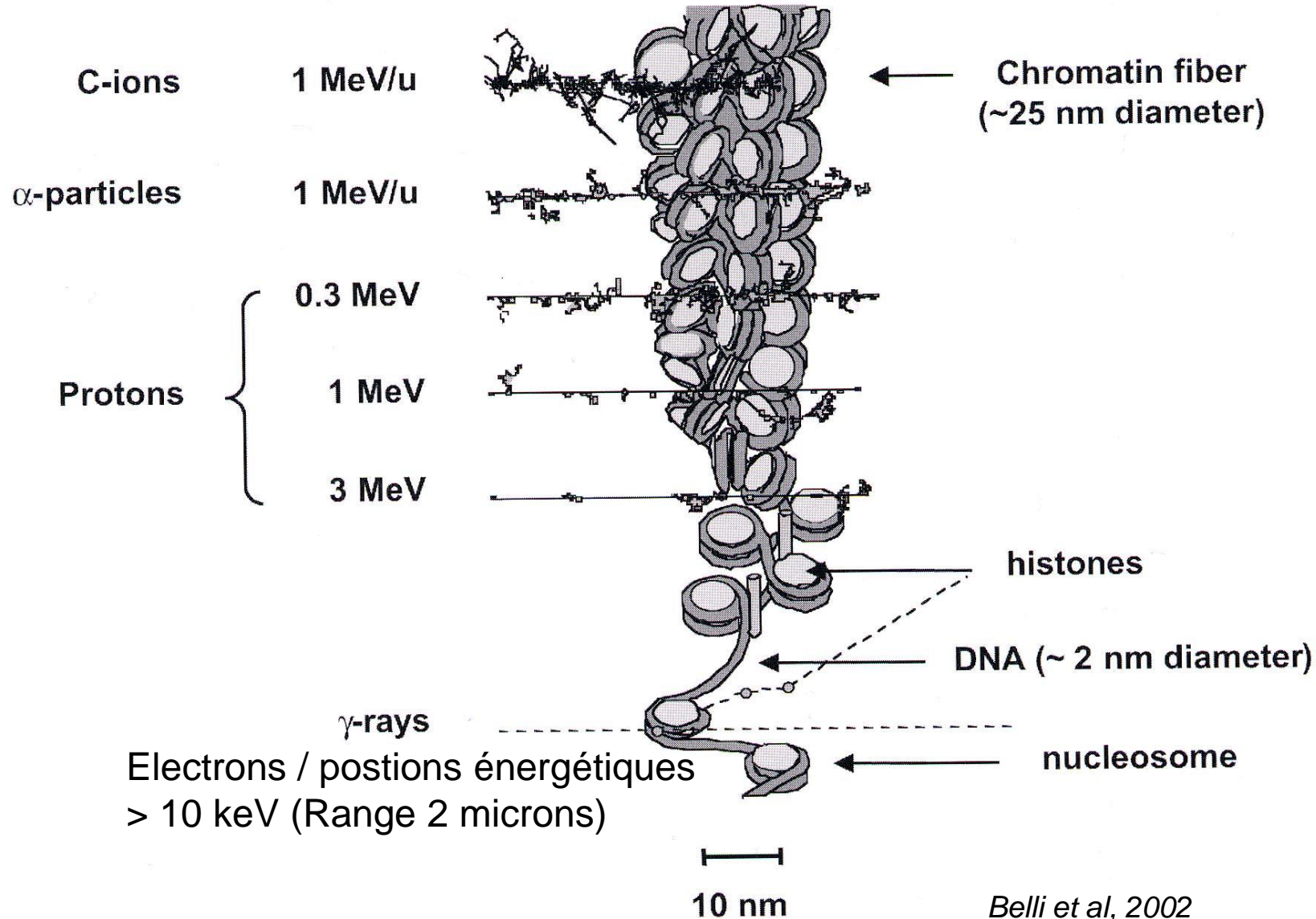
# Notion centrale : énergie transférée

- effet thermique
- excitations
- ionisations
  - simples
  - en grappes
  - électrons  $\delta$



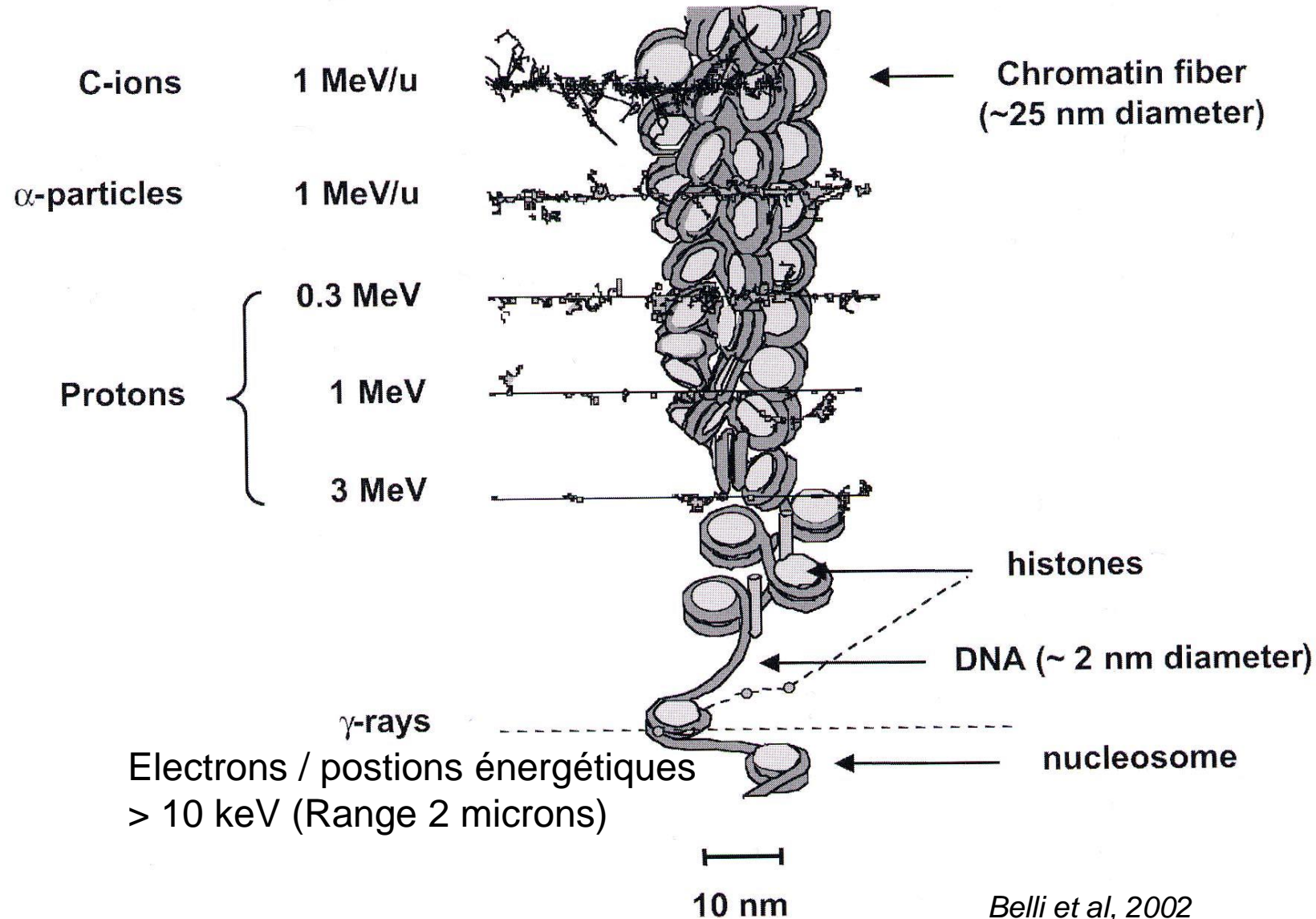


# Conséquences radiobiologiques



*Belli et al, 2002*

# Conséquences radiobiologiques



*Belli et al, 2002*

# Messages essentiels du cours

- Le pouvoir de ralentissement représente la perte d'énergie des particules chargées par unité de longueur.
- Pour les particules chargées dont la vitesse est inférieure à la vitesse de la lumière, le pouvoir de ralentissement augmente quand l'énergie diminue.
- Les particules lourdes ont un pouvoir de ralentissement très supérieur à celui des électrons/positons à énergie égale. Les particules lourdes engendrent des ionisations très nombreuses et resserrées en fin de parcours: c'est le pic de Bragg.
- Le transfert d'énergie linéique qui représente l'énergie moyenne transférée par unité de longueur est un paramètre clé de la radiobiologie

## Et au prochain cours ...

- Les photons du domaine des rayonnements ionisants
  - Spectre électromagnétique
  - Origine des photons
  - Relation énergie / Longueur d'onde
- Principales interactions des photons avec la 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.