

Interaction des rayonnements ionisants avec la matière

Interactions des particules chargées lourdes

Interactions des particules chargées légères

Interactions des photons avec la matière

Les grandes catégories de rayonnements

Rayonnements chargés

- Particules chargées légères β^\pm ; μ^\pm
- P.C lourdes: protons; deutons : d^+ ; α^{++} ; π^\pm ..
- Fragments lourds de fissions – ions lourds

Rayonnements électromagnétiques (EM):

RX et R_γ

Rayonnements neutres :

- Neutrons : n ;
- Neutrinos : ν
- Pions : π^0

Intérêt de cette étude

- **Les RI ne peuvent être détectés et caractérisés que grâce à leurs interactions avec la matière**
- **Ils cèdent leur énergie en totalité ou en partie au milieu qu'ils traversent**
- **La matière traversée subit des modifications dues au passage des radiations**

Interaction des rayonnements ionisants avec la matière

- Les effets biologiques d'une irradiation dépendent des ***ionisations et excitations*** des atomes et molécules le long des trajectoires de particules ionisantes (phénomène initial)
- Un rayonnement particulaire ou électromagnétique ***est ionisant*** s'il est susceptible ***d'arracher*** des e^- à la matière

Conditions: - E_c (particules) }
 - $h\nu$ (photons) } **$> E_L$ des électrons**

- En général, cette énergie $\approx 10\text{eV}$

Interaction des rayonnements ionisants avec la matière

On distingue deux grandes catégories de radiations :

– **directement ionisantes :**

- Particules chargées: (e^-), (p^+), α , (e^+)...
- En Médecine: les α : (radiothérapie interne);
récent: ex: particules α (TEL $\uparrow\uparrow\uparrow$) en radio-immunothérapie pour le traitement des cancers

– **indirectement ionisantes :** particules non chargées

- Photons: X ; γ ; (UVC: $\lambda = 0,1\mu\text{m}$ avec $E = 12,4\text{eV}$)
- (UVA; UVB; visible; IR; Ondes Hertz: non ionisants)
- Particules neutres

Parcours des Rayonnements

- Ce parcours est directement lié au dépôt par le RI d'énergie par unité de longueur de matière (TLE voir +loin)

	Air	Eau, tissus	Degrés d'ionisations
Alpha	10 cm	Quelques μm	Fortement ionisante
Bêta	1m	1mm	Modérément ionisantes
X, gamma	> 10 ou 100 m	10^{aine} cm	Faiblement ionisants
Neutrons	> 10 ou 100 m	10^{aine} cm	Cas particuliers

L'interaction des particules chargées avec la matière

- **Transfert d'énergie du rayonnement incident au milieu traversé ;**
- **Il dépend de:**
 - **la nature de ce rayonnement**
 - **son énergie**
 - **la nature de la matière traversée**
- **Ces interactions dépendent de propriétés liées à :**
 - **la particule : charge Z , masse (m) et vitesse (v)**
 - **la matière: numéro atomique: Z (densité électronique)**
- **En biologie, les interactions avec l'eau +++**

I- Interactions des particules chargées avec la matière

Trois aspects:

- **l'interaction elle-même:**
 - nature : transfert d'énergie +++
 - mécanisme,
 - fréquence/probabilité
- **les conséquences sur la particule** qui se traduisent par:
 - son ralentissement
 - aboutissent à son arrêt
- **les conséquences sur le milieu** : l'énergie déposée par les particules aboutissant aux effets radiobiologiques

Ces 3 aspects  ***Notion : énergie transférée.***

Caractères généraux

- **Particules chargées lourdes:**
 - **Protons; deutons : α^{++} ; $\Pi \pm$. Fragments lourds de fissions – ions lourds**
 - **Emis par:**
 - **réactions nucléaires**
 - **désintégrations radioactives**
- **Particules chargées légères:**
 - **Émissions β^- , β^+ , $C\alpha$,**
 - **Mise en mouvement d'é directement ou secondairement par R_X et R_γ**
 - **Désexcitation par é Auger**

Caractères généraux (suite)

- Les interactions avec les particules chargées sont à caractère obligatoire avec:
- **les électrons +++ :**
 - Interaction coulombienne où la particule incidente cède une partie de son énergie cinétique aux é:
 - d'où ionisation ou excitation
- **les noyaux + :**
 - Phénomènes d'importance secondaire pour les PCL/é
 - Particule interagit avec le champ coulombien du noyau , d'où émission d'un rayonnement de freinage: RX

Interactions PCL - électrons

- ◆ ***Ionisation*** : e^- : arraché de sa couche: $E_{cé} = E_i - E_f$
- ◆ ***Excitation*** : e^- déplacé vers une couche périphérique
- ◆ ***Perte d'énergie:***
 - Masse des P.C lourdes $\gg m_{e^-}$, d'où
 - trajectoire peu modifiée des PCL \approx rectiligne :
 - nombreuses interactions à faible transfert d'énergie
 - perte d'énergie : **TLE; DLI; et courbe de Bragg**
 - en fin de parcours, $v \searrow \searrow$ d'où DLI des PCL $\nearrow \nearrow \nearrow$

Perte d'énergie des PCL

T.L.E. : Transfert linéique d'énergie (L_{∞}):

- **E transférée par la PCL au milieu / unité longueur**
- **Perte due aux ionisations et excitations**
- **TLE = dE/dx:**
 - KeV/ μ m : eau
 - MeV/cm : air
- **$L_{\infty} = K. (z^2 / v^2). n . Z$**
 - **z** : charge de la particule incidente
 - **Z** : numéro atomique du milieu
 - **n** : nombre d'atomes / unité volume
 - **v** : vitesse de la particule

Perte d'énergie des PCL

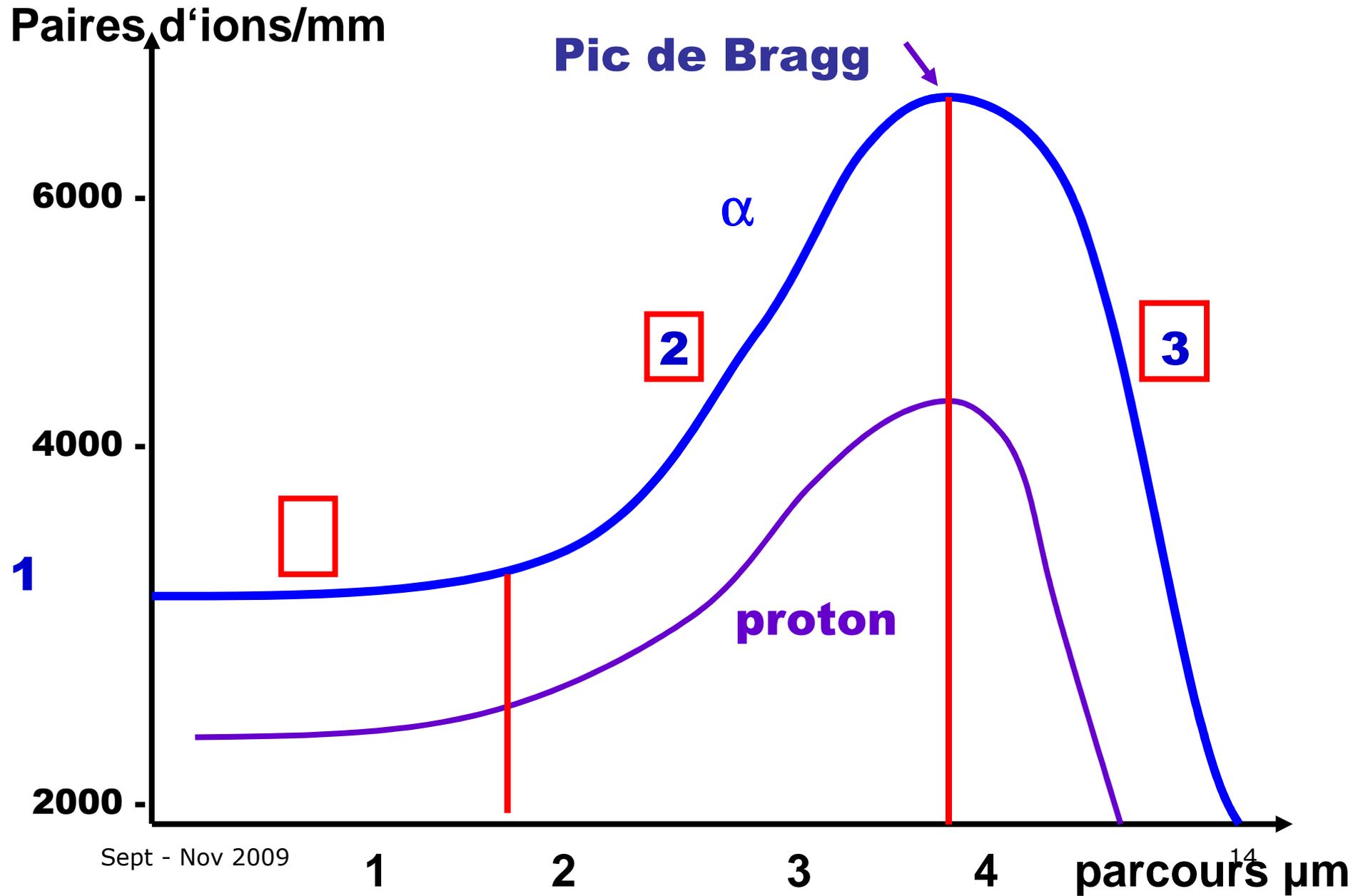
Densité linéique d'ionisation : D.L.I :

- nombre de paires d'ions créées / unité longueur :
- $L_{\infty} = W \cdot DLI$ et W : énergie nécessaire pour provoquer une ionisation (en biologie: $W = 33 \text{ eV}$)

La courbe de Bragg: variation de DLI le long de trajectoire

- La fin de parcours d'une PCL: marquée par une ↗↗↗ DLI due au ralentissement de la particule(2)
- Puis une diminution (3) lorsque, ayant capturé des é du milieu, elle s'arrête et cesse d'être ionisante

Courbe de Bragg pour $\alpha = 5,3$ MeV (air) et pour p



Applications

Applications en radiothérapie:

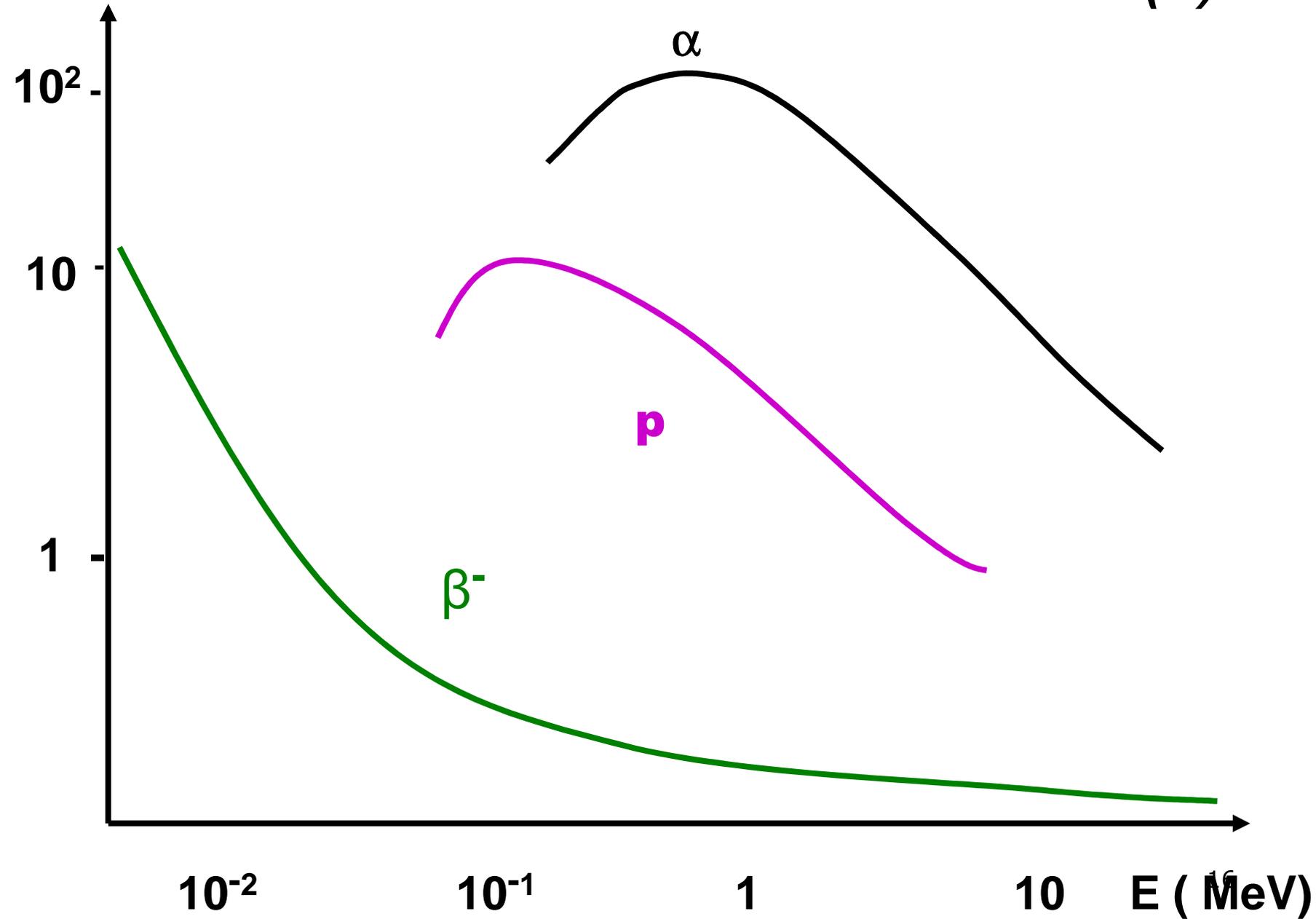
- En sélectionnant l'énergie cinétique des particules, on peut *ajuster la profondeur du pic de Bragg* à celle *d'une tumeur*
- On peut ainsi mieux protéger les tissus sains environnants

Applications en radioprotection: Parcours des PCL: *limité et court* dans la matière : Ex: $\alpha = 5,3 \text{ MeV}$ de TLE: $130 \text{ KeV}/\mu\text{m}$ (élevé)

- ❖ α : *arrêtées* par : quelques cm d'air, feuille papier, couche cornée de la peau; donc α : pas de risque en exposition externe
- ❖ mais en exposition interne: α : danger d'irradiation localisée par pénétration dans l'organisme

TEL KeV/ μm

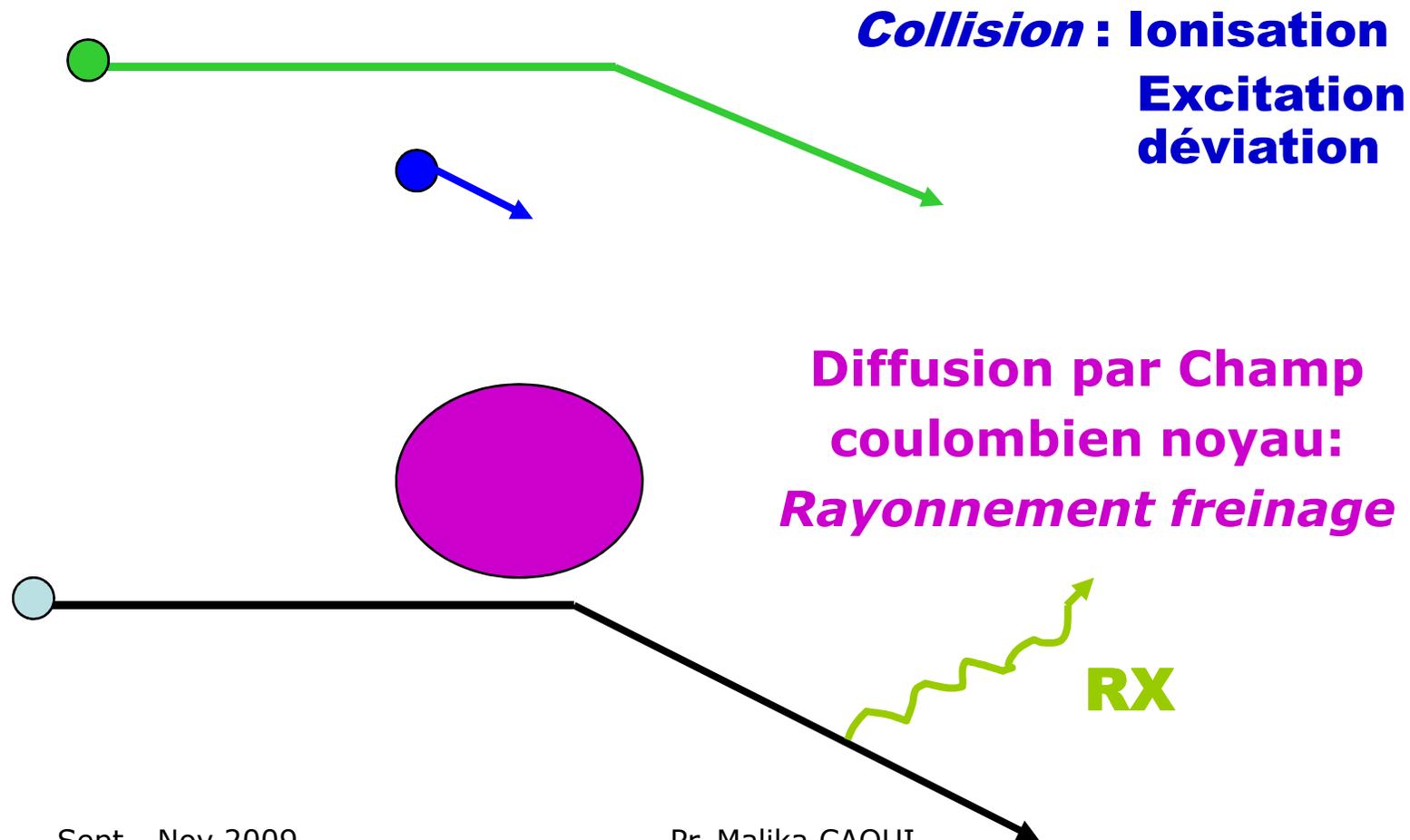
Variation du TEL dans l'eau : $f(E)$



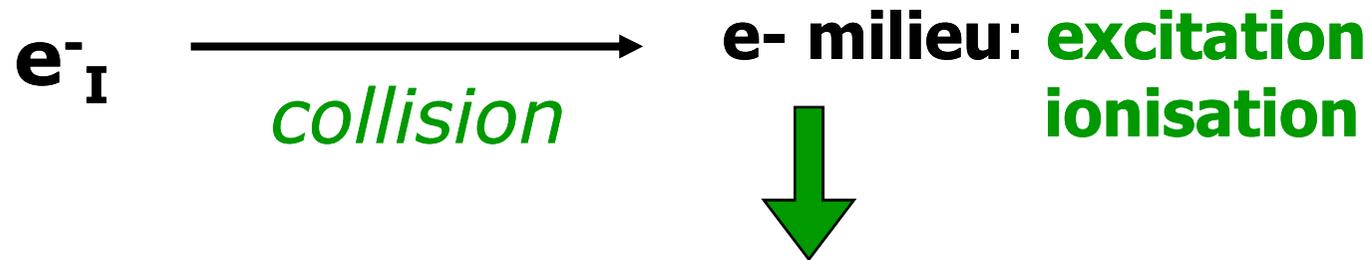
Modes d'interaction des PC légères avec la matière

- **Le processus d'interactions des PC légères avec les électrons est dominant /celui noyaux jusqu'à des énergies :**
 - **$E \approx 100$ MeV dans l'eau,**
 - **$E \approx 10$ MeV dans le plomb**
- **Dans l'eau pour des ϵ de 500 KeV à 5 MeV :**
- **$TLE \approx 0,25$ KeV / μm , valeur plus faible / PCL**

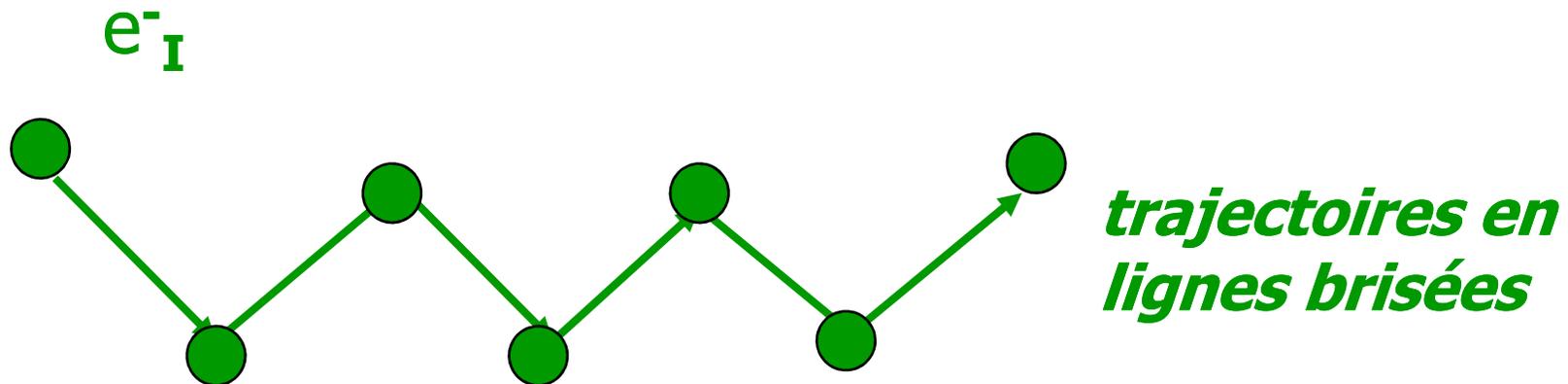
Modes d'interaction des PC légères avec la matière



PC légères- électrons



Déviations par répulsion coulombienne :
diffusion avec perte d'énergie importante e^-_I



PC légères – noyaux +++

- e^-_i pénètre dans le champ coulombien noyau
- Accélération +++ de e^-_i avec déviation et perte $E_{ce^-_i}$
- e^-_i rayonne de l'énergie sous forme : RX de freinage
- Ce phénomène: à l'origine de production des RX dans :
 - les tubes de Coolidge
 - les accélérateurs de particules

Le pouvoir de ralentissement linéique avec:

- les électrons, est : S_{coll}
 - les noyaux, est S_{rad}
- } ***Il varie selon E_c des électrons incidents:***

Perte d'énergie des PC légères

- $S_{\text{rad}} / S_{\text{coll}} = Z \cdot T / 800$; T: E.cinétique des é
- Rôle capital dans la production des RX
- *Ceci explique l'intérêt:*
 - des accélérateurs linéaires dans leur production : car T élevée favorise ce processus / celui conduisant à des ionisations excitations des atomes de la cible
 - *L'utilisation de matériau de Z élevé pour la réalisation des anodes des tubes à RX*

Rayonnements électromagnétiques

- **Photons X: *origine électronique* émis par:**
 - freinage d'un faisceau d'électrons
 - lors du retour à l'état fondamental d'un atome*
- **Photons γ : émis par *le noyau* au cours de processus**
 - de transition nucléaire
 - ou d'annihilation de particules
- **Domaine énergétique des photons:**
 - γ quelques dizaines de : KeV et MeV
 - X “ ” eV et GeV:(Rayt de freinage)

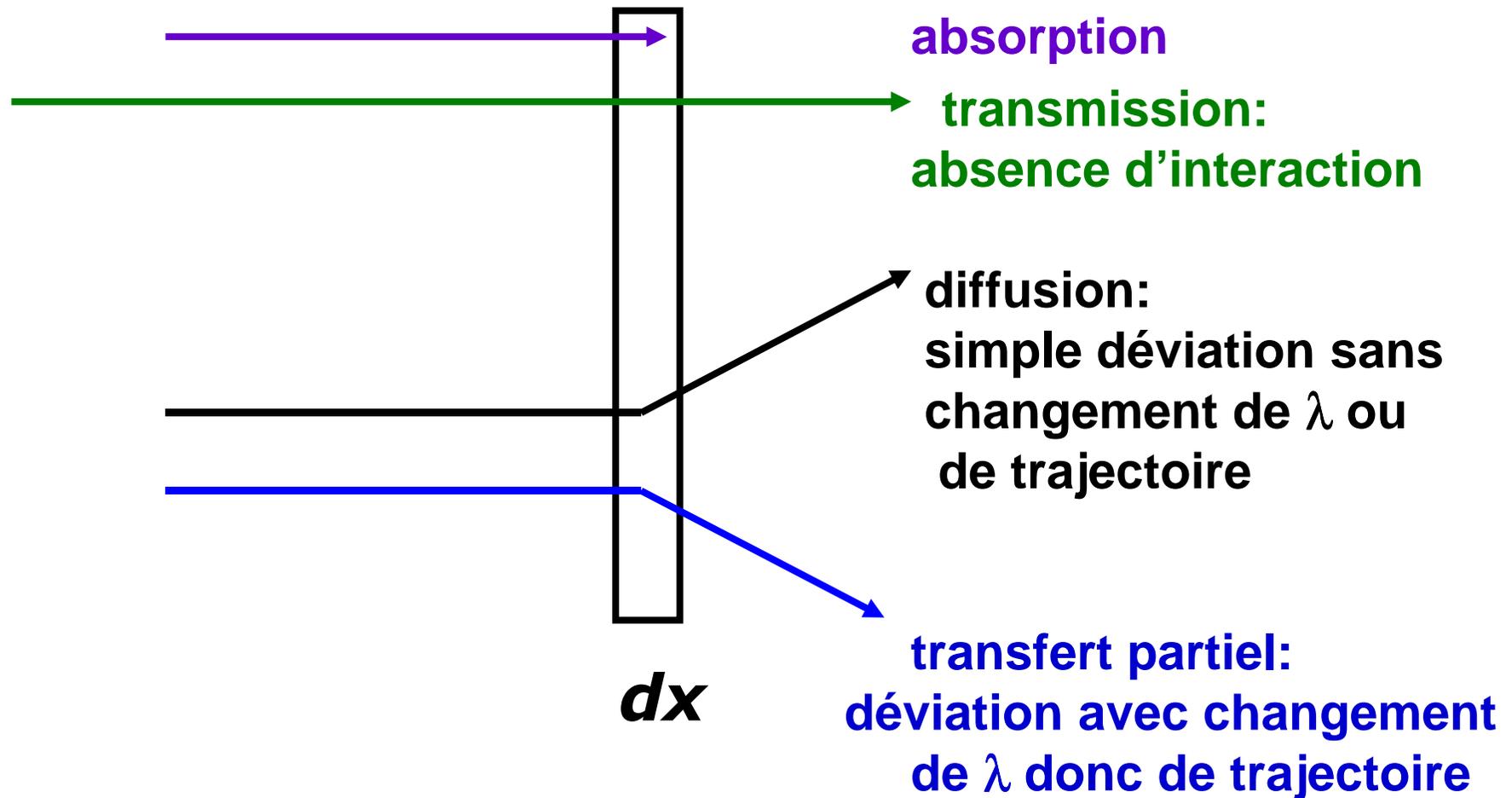
Rayonnements indirectement ionisants

- RX et Ry ont même comportement vis-à-vis de la matière
- Ces photons diffèrent des PC :
 - $m \approx 0$
 - Charge ≈ 0 } donc leur comportement vis-à-vis de la matière \neq / PC



Cette interaction est de type aléatoire (non obligatoire)

Devenir possible d'un photon X ou γ après traversée d'une épaisseur dx d'un matériau



Les lois d'atténuation d'un faisceau de Photons X ou γ

- Ainsi, en moyenne, l'énergie incidente E_i d'un photon, après traversée d'une épaisseur dx de matériau, se répartit entre:
 - une énergie transmise,
 - “ ” diffusée
 - “ ” transférée

} dont la $\Sigma = E_i$
- L'étude de probabilités d'interaction des photons avec la matière conduit à la définition des lois d'atténuation d'un faisceau de photons

Expression exponentielle de la loi d'atténuation

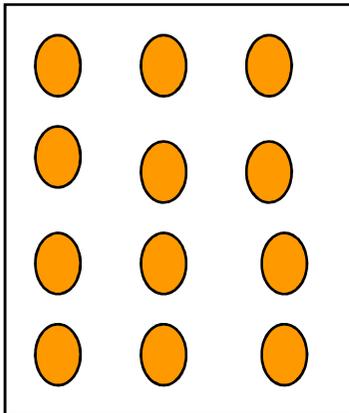
- Les photons X ou γ sont enlevés du faisceau incident par une seule interaction : ***absorption ou diffusion***:

$$\varphi(x) = \varphi_0 e^{-\mu x}$$

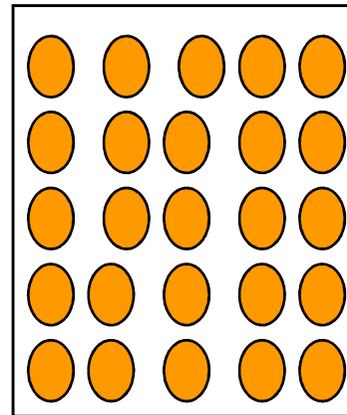
- La probabilité d'interaction/unité de longueur d'un photon avec la matière est : μ
- μ : coefficient d'atténuation linéaire total: cm^{-1} ; dépend de:
 - o la nature du matériau
 - o l'énergie du photon incident

Coefficient d'atténuation

Cuivre



Cuivre compact



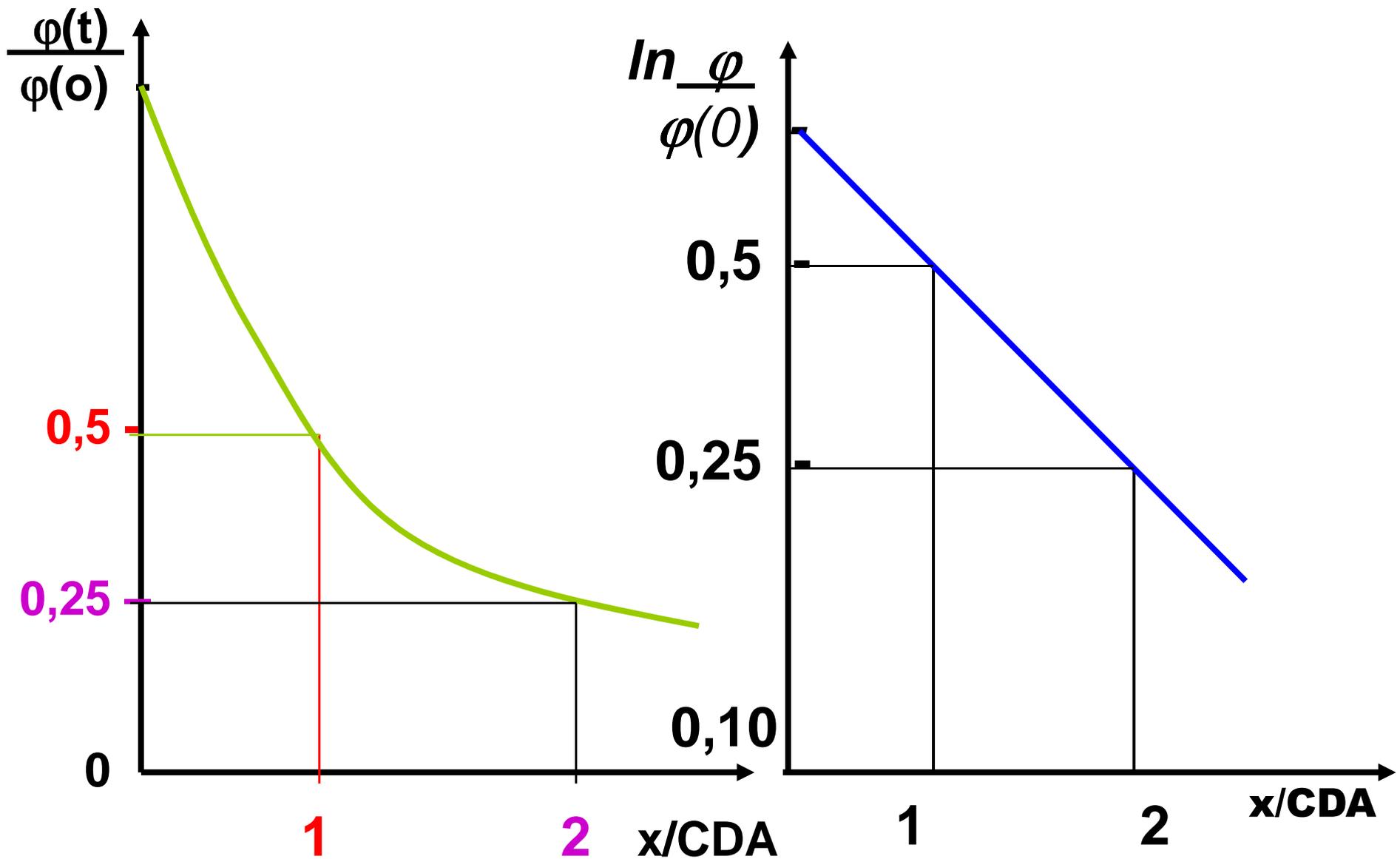
μ élevé

- Importance de ρ : $\varphi(x) = \varphi_0 e^{- (\mu/\rho).x}$
- μ/ρ : coefficient d'atténuation massique total
- $\mu / \rho = \text{cm}^{-1} / \text{g.cm}^{-3} \longrightarrow \mu/\rho = \text{cm}^2 . \text{g}^{-1}$

Couche de demi-atténuation: CDA

- ***La CDA : épaisseur de matériau nécessaire pour atténuer d'un facteur 2 l'énergie transportée par le faisceau : $\varphi(0)$***
- **$\varphi(0) = \varphi(0)/2 = \varphi(0) e^{-\mu \text{CDA}}$**
- **$\text{Ln}2 = \mu (\text{CDA})$ d'où:**

$$\text{CDA} = \text{Ln}2/\mu$$



Atténuation d'un faisceau de photons X et γ pour la matière

Différents modes d'interaction des photons X et γ avec la matière

Un faisceau de photons, peut interagir avec la matière par:

- ***Effet Photoélectrique***
- ***Effet Compton***
- ***Production de paire: E élevée $> 1,022$ MeV: les noyaux***
- ***L'énergie incidente se répartit en une énergie***
 - ***transmise,***
 - ***transférée***
 - ***diffusée***

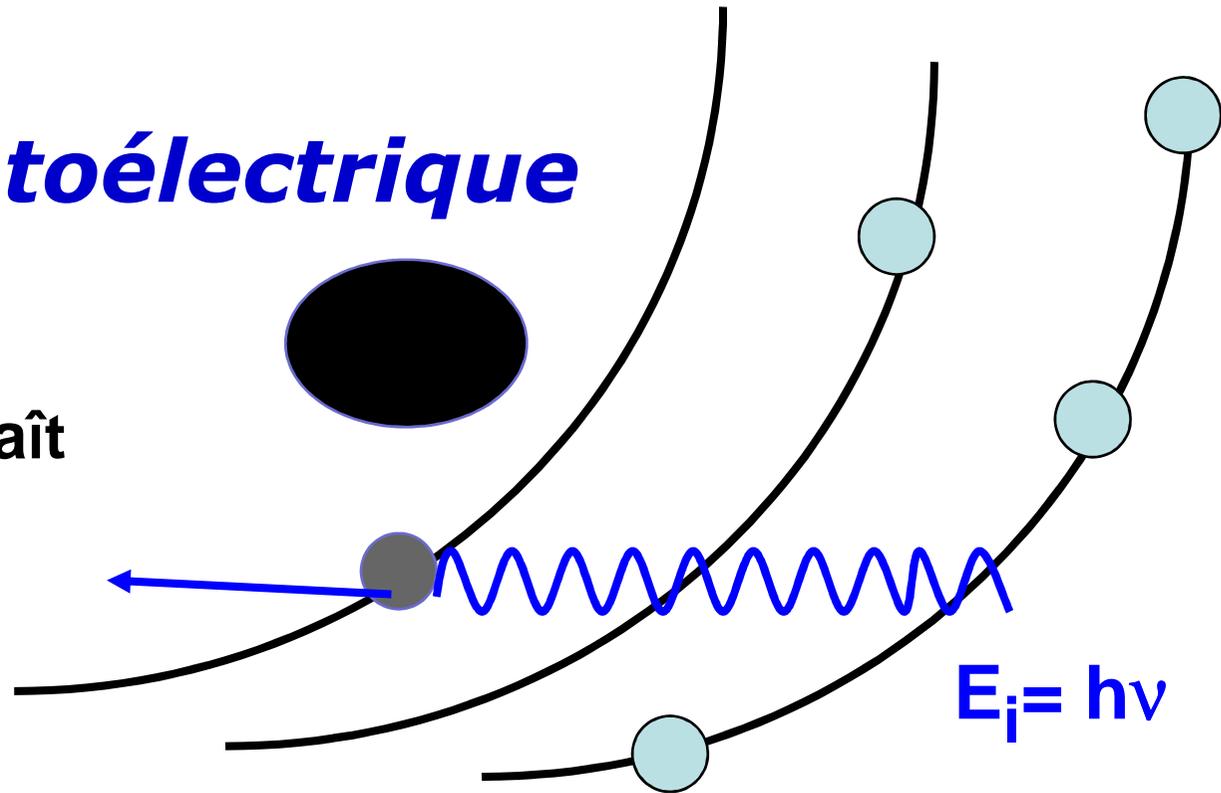
Les électrons

Effet photoélectrique

- é lié
- photon disparaît

photoélectron

$$E_c = E_i - E_l$$



E_i sert à : - extraire de sa couche l'é d' E_l
- communiquer à cet é une E_c

Conditions: - $E_i > E_l$
- Ce phénomène a lieu sur é lié K+++; L+++; M+

Effet photoélectrique

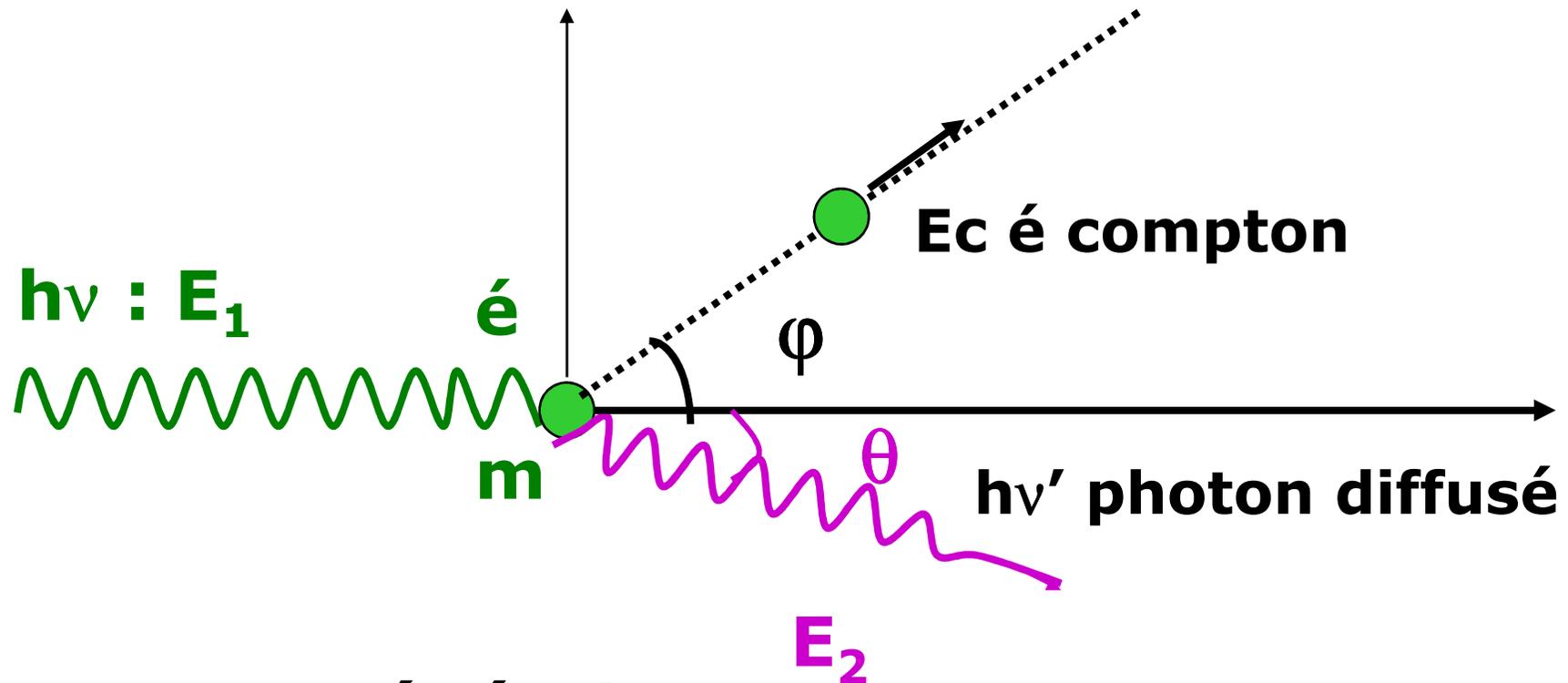
Phénomènes secondaires:

- Réorganisation cortège électronique avec émission de :
 - RX de fluorescence
 - Electron Auger
- Ionisations et excitations des atomes du milieu

Probabilité μ_ϕ d'interaction par effet photoélectrique:

- μ_ϕ dépend de E et de Z cible: $\mu_\phi \nearrow \nearrow$ avec Z et $\mu_\phi \searrow \searrow$ avec E
- Effet photoélectrique est prédominant jusqu'à E = 0,5 MeV avec Z $\nearrow \nearrow \nearrow$ (noyaux lourds)

Effet Compton



Cas général

Effet Compton

Effet Compton: interaction: **photon - é libre ou peu lié**

➤ *Projection de l'é selon :*

- angle φ : $0 < \varphi < 90^\circ$
- L'é avec une E_c : Excitation + Ionisation

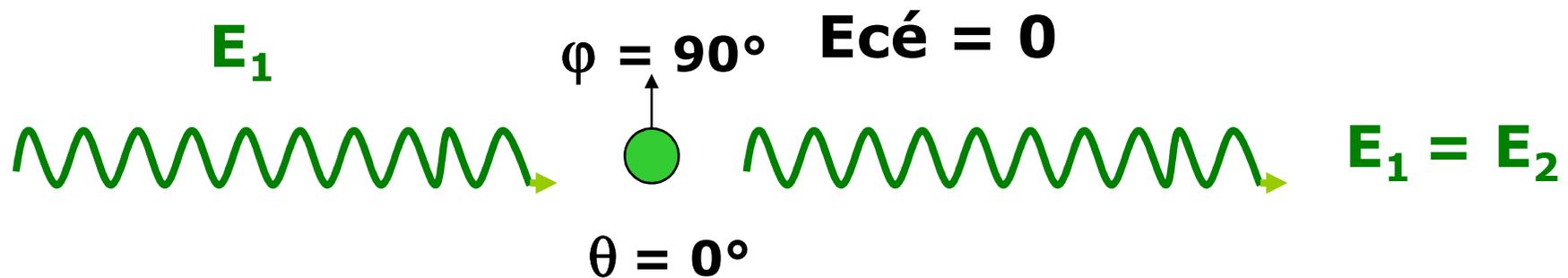
➤ *Diffusion du photon Incident selon :*

- une direction d'Â : θ $0 < \theta < 180^\circ$
- $E_2 = h\nu'$ du photon diffusé

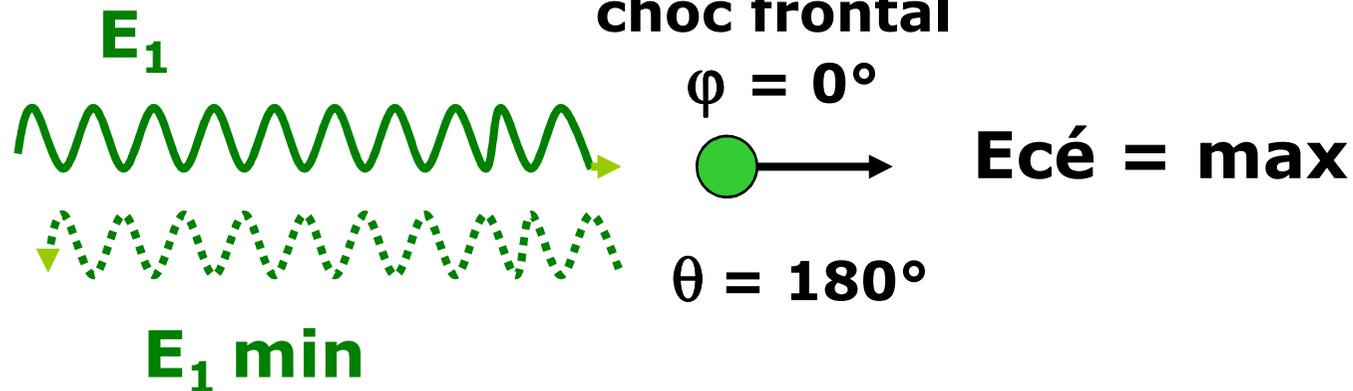
➤ μ_c : *Probabilité* d'atténuation par effet Compton a lieu pour $E > 0,5 \text{ MeV}$ et sur des noyaux légers

Effet Compton: Cas extrêmes

choc tangentiel



choc frontal



Production de paire

- Mécanisme possible si:

$$h\nu > 1,022 \text{ MeV}$$



avec disparition du photon

$$h\nu - 1,022 = E_{ce-} + E_{ce+}$$

Conséquences:

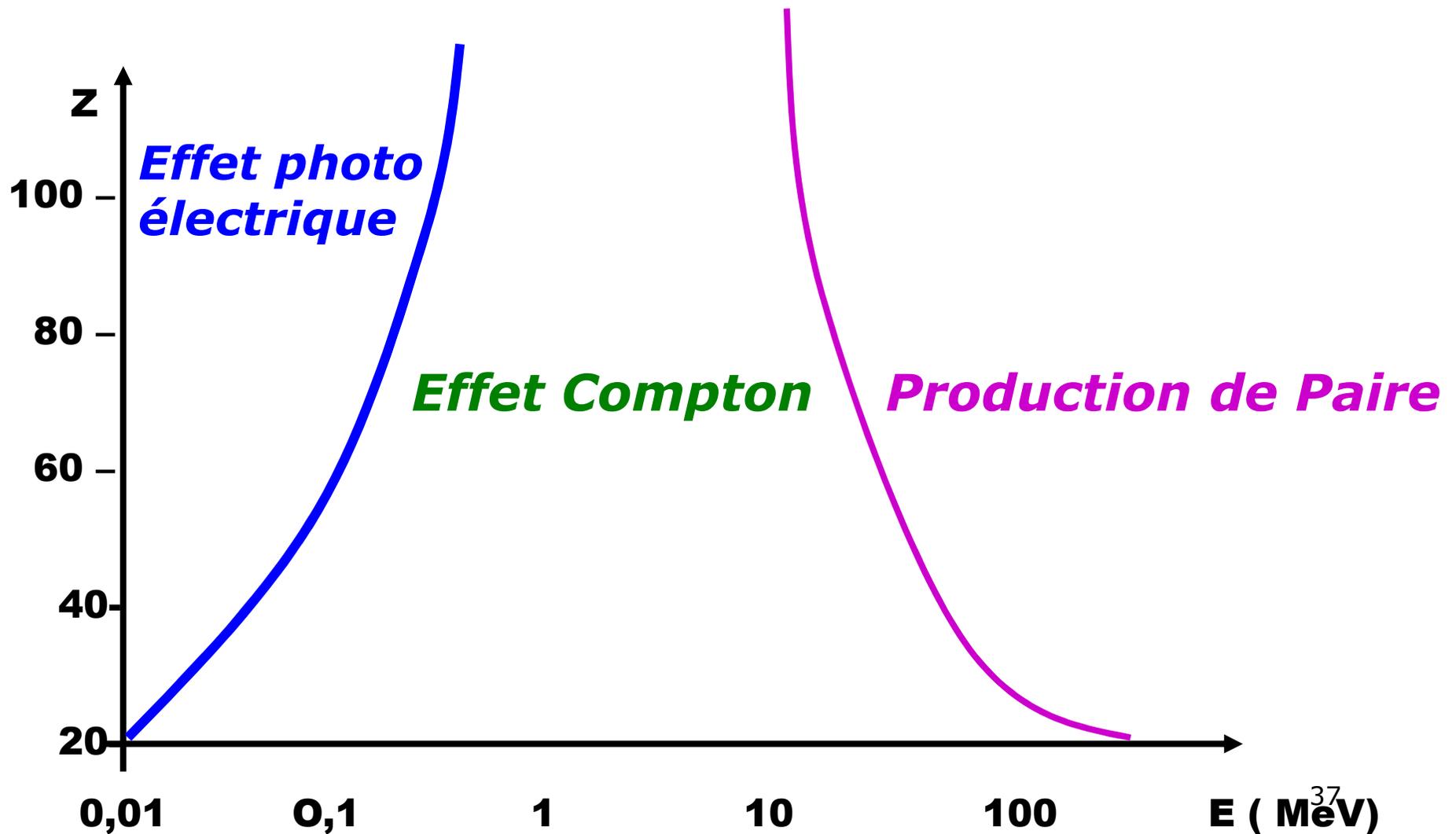
- e^- perd son E_c par excitation et ionisation
- e^+ : s'annihile avec e^- libre et émission de 2 γ de 0,511 MeV

Probabilité d'atténuation PP μ_p : croit lentement avec $h\nu$

et \nearrow avec Z ($\mu_p \sim Z^2$)

Coefficient linéaire total: $\mu \text{ cm}^{-1} = \mu_{\phi} + \mu_c + \mu_p$

Coefficient massique total: $\mu/\rho = \mu_{\phi}/\rho + \mu_c/\rho + \mu_p/\rho$



Valeurs des CDA du Pb et de l'eau

CDA (cm)	100KeV	1MeV
Plomb	0,01	0,9
Eau	4,2	10,0

Détection des RI

Généralités

- **Aucun de nos sens n'est sensible aux RI émis par les substances radioactives**
- **Mais on peut déceler la radioactivité en exploitant le résultat de certaines interactions entre les rayonnements et la matière.**
- **Effet : produit par perte de E**
- **L'apparition et l'observation de cet effet : principe de la détection**
- **On exploite 2 types d'interactions avec le détecteur:**
 - **Ionisation → Ions formés → modifications chimiques**
 - **Excitation → Conséquences immédiates ou différées**

Détecteurs

Il y a une distinction entre:

1/ Détecter la présence de radiations:

- Simple
- Possibilités offertes sont nombreuses

2/ Effectuer la mesure d'une grandeur de ces radiations

- Dénombrement
 - Energie
 - Dose absorbée
- } Délicat

Détecteurs : convertit E "invisible" de RI en signal mesurable

Principe de la détection

- ❖ Détecteur = capteur de RI où a lieu ***les interactions*** avec les RI : signal d'information renseignant sur :
 - ❖ l'énergie, la date, la durée,
 - ❖ la position ou l'intensité de l'interaction
 - ❖ nature ou la vitesse de la particule
- ❖ RI: Interagit et cède une partie ou toute l'énergie: E
- ❖ Détecteur : ***création d'évènements*** \longrightarrow ***signal électrique:***
 - ❖ mesure de E
 - ❖ dénombrement des RI

Constitution d'un détecteur

- **Capteur : lieu d'interaction RI - matière**
- **Systeme d'amplification du signal**
- **Traitement signal: discriminateur d'amplitude**
- **Systeme d'affichage: fournit donnée mesure**
 - **flux de particules : compteur**
 - **Énergie particules: spectromètre**
 - **Dose absorbée dans milieu: dosimètre ou débitmètre**

Caractéristiques générales des détecteurs

Différents paramètres:

- Efficacité de détection***
- Temps mort***
- Mouvement propre***
- Résolution en énergie***
- Caractéristiques géométriques***

Classification des détecteurs

- **D. mettant en jeu l'ionisation des gaz**
- **D. à scintillations**
- **D. utilisant le noircissement des films photographiques**
- **D. à semi- conducteurs**
- **D. thermoluminescents**
- **Les autres:**
 - **Dosimètres par résonance paramagnétique électronique**
 - **Dosimètres chimiques**
 - **Appareils mettant en jeu les méthodes calorimétriques...**

Caractéristiques générales des détecteurs

Efficacité de détection: E.D: dépend de la nature et de l'énergie du RI

$$E.D = \frac{\text{Nombre particules détectées}}{\text{Nombre particules reçus par détecteur}}$$

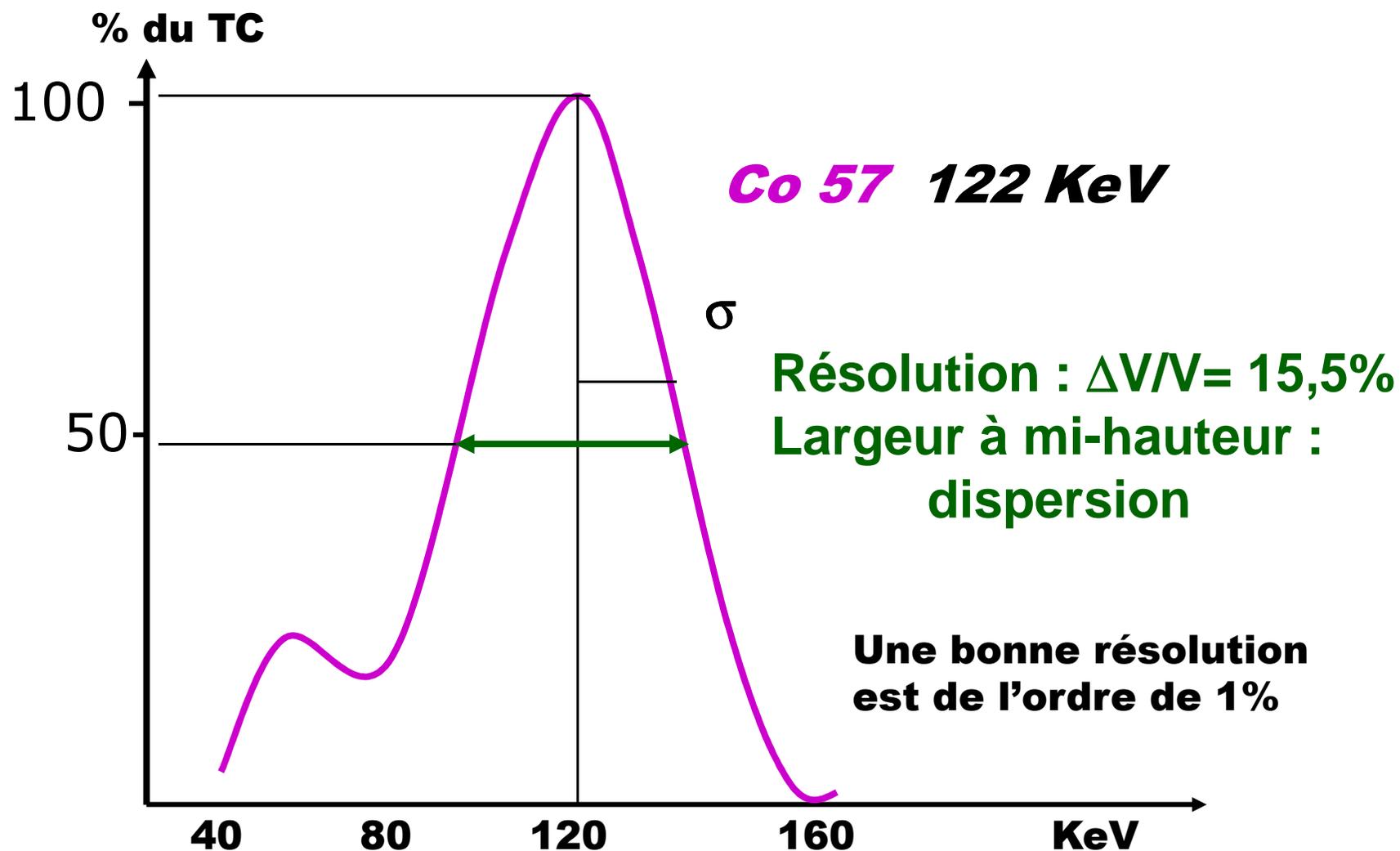
Résolution en énergie :

Caractérise la qualité du détecteur à séparer 2 énergies proches.

Le temps mort : τ

- Plus petit intervalle de temps qui doit séparer deux informations pour être prises en compte individuellement par le système.
- Dépend des caractéristiques du détecteur
- Si τ court \longrightarrow taux de comptage (TC) $\nearrow \nearrow$

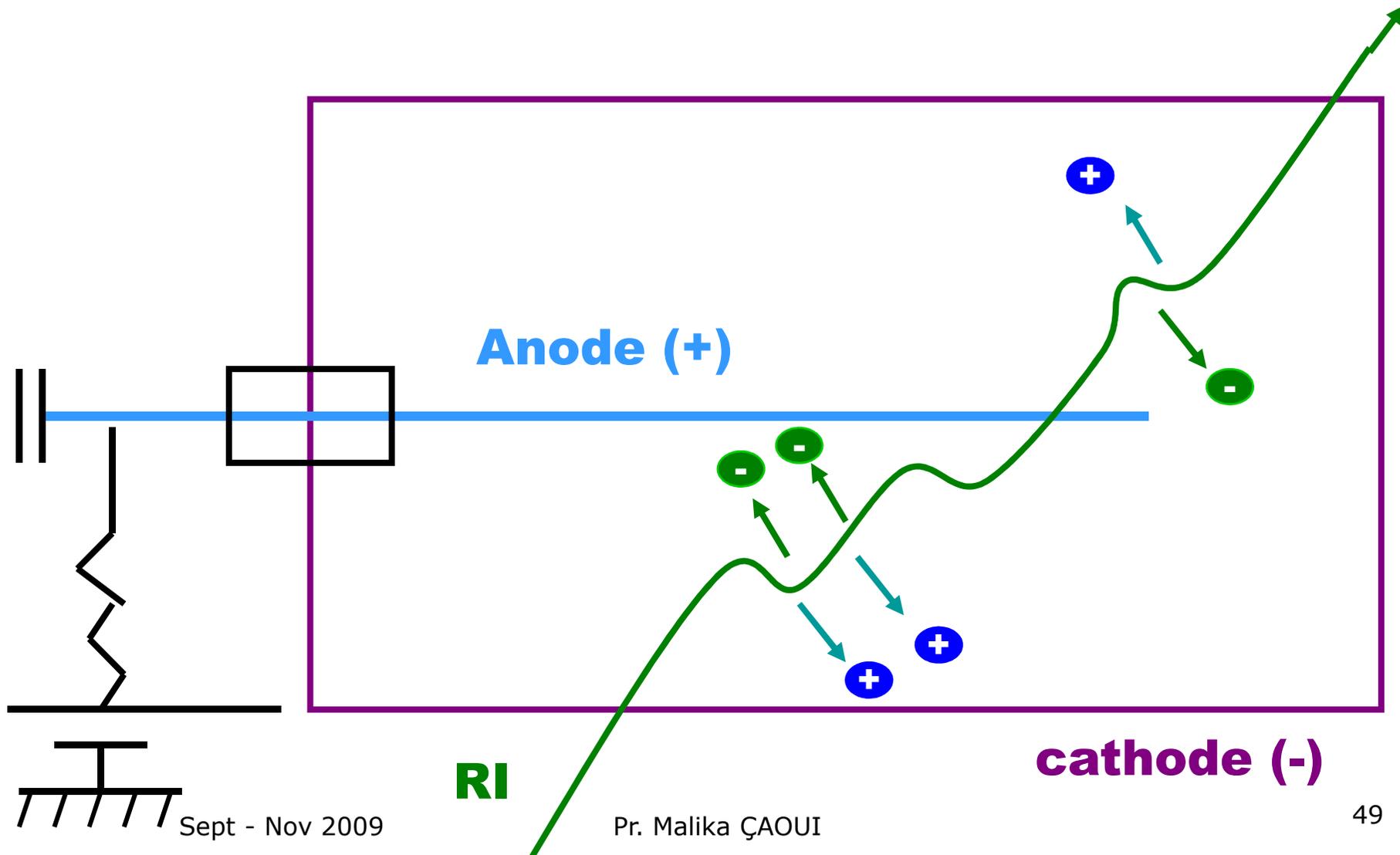
Résolution d'un détecteur



Le mouvement propre

- ❖ **Il correspond au T.C enregistré en *l'absence* de toute source*:**
- ❖ ***Origine du M.P :***
 - **Le Bruit de Fond (BF) naturel:**
 - radioactivité ambiante
 - rayonnements cosmiques
 - **La radioactivité propre des matériaux du détecteur**
 - **Le bruit de l'électronique associée**

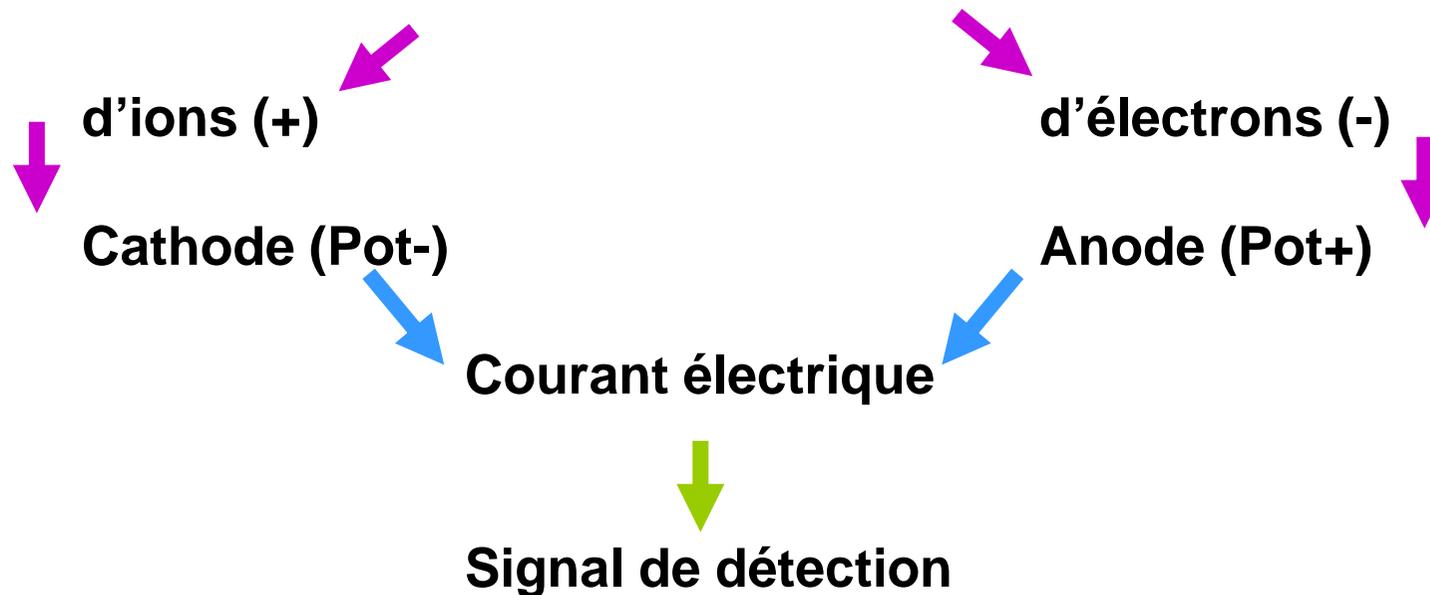
Détecteurs mettant en jeu l'ionisation des gaz



Détecteurs mettant en jeu l'ionisation des gaz (suite)

- ❖ Normalement , en l'absence de tout RI , \forall la différence de potentiel (ddp) appliquée, aucun courant ne traverse la chambre
- ❖ Mais si une particule ionisante pénètre dans l'enceinte :

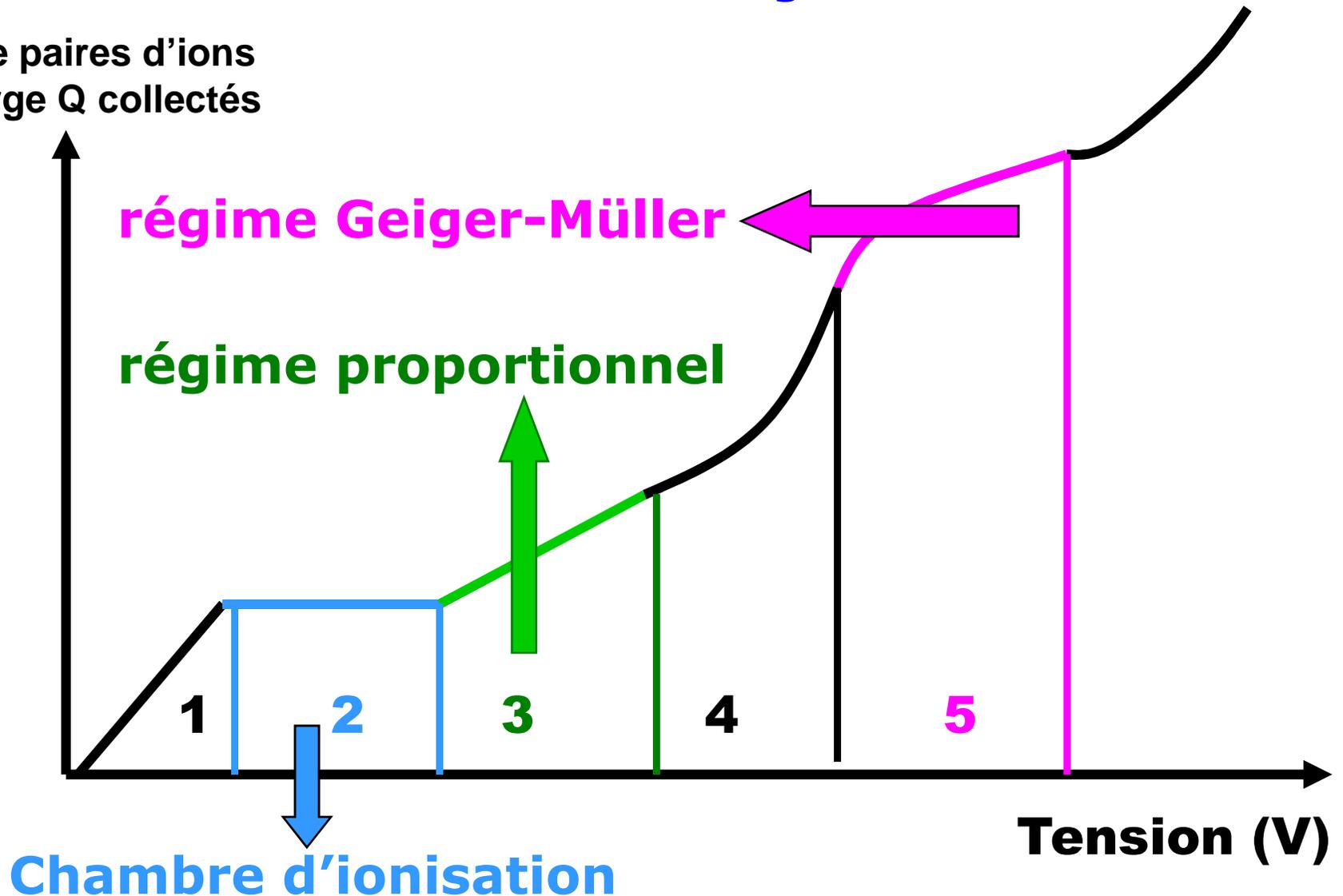
Production d'un grand nombre



L'étude de l'impulsion en fonction de la tension permet

d'individualiser 5 régions:

Nombre paires d'ions
ou charge Q collectés



Les 5 régions des détecteurs à gaz

1/ Régime de recombinaison :

- **V petite ddp < 100V, champ électrique faible:**
- **e- et ions se recombinent tous avant d'atteindre les électrodes**

2/ Régime d'ionisation primaire :

- **ddp \geq 100-200V: recombinaison ions nulle car ils tous collectés,**
- **l'amplitude de l'impulsion dépend E particule**
- **Les appareils fonctionnant dans cette région: chambres d'ionisation type «Babyline»; rôle: - dénombrent les particules
- mesurent leur énergie.**

Les 5 régions des détecteurs à gaz

5/ Régime Geiger-Müller: GM

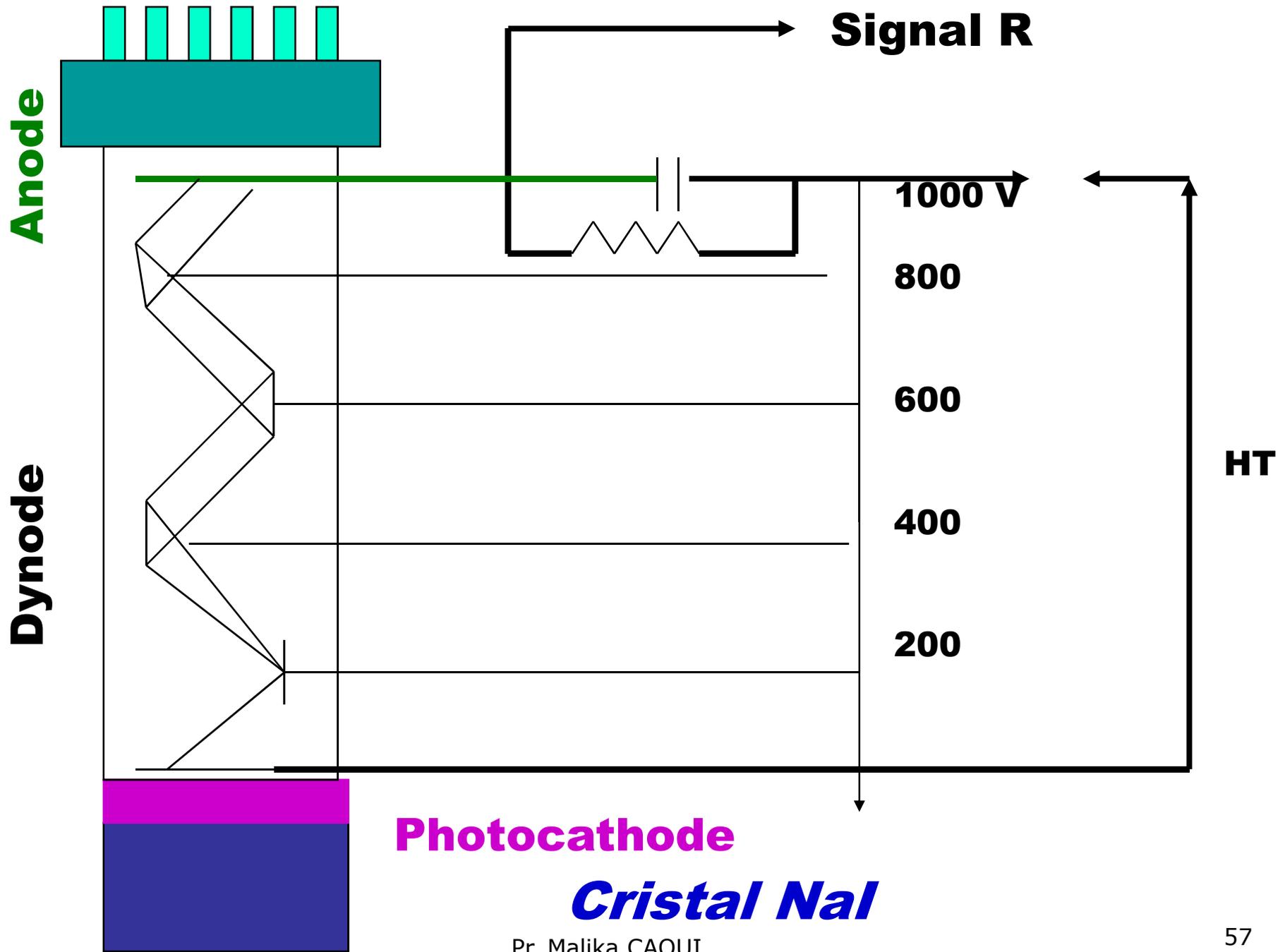
- $P_1 \longrightarrow$ ions I \longrightarrow ions II \longrightarrow ions III
- Avalanche d'ions multipliés en chaîne ,
- Charge Q: indépendante l'ionisation primaire
- Le compteur GM:
 - ne peut *discriminer* es particules selon leur énergie,
 - il ne permet que leur dénombrement
- Le temps de collection des charges: élevé
- Le temps mort également

Principales caractéristiques des détecteurs à ionisation

Détecteurs	Particules détectées	t.m : μs	t.c : i/s
Chambre d'ionisation	$\alpha - \beta - X - \gamma$	1-10	$10^4 - 10^5$
Compteur proportionnel	$\alpha - \beta - X -$	1-10	$10^4 - 10^5$
Compteur GM	$\beta - X - \gamma$	100	10^3

Compteurs à scintillations

- **Utilisent les propriétés de certaines substances d'émettre de la lumière visible sous l'action des R.I**
- **Cette émission correspond à *la désexcitation* des molécules du scintillateur consécutives aux ionisations et excitations provoquées par le passage d'un rayonnement ionisant**
- **Détecteur à scintillation composé:**
 - **Scintillateur**
 - **Photomultiplicateur couplé au scintillateur**
 - **Électronique associée**



Le détecteur à scintillation

Le Scintillateur : Cristal NaI+++ Détection gamma: Gamma caméra
Convertit le rayonnement incident en photons lumineux.

Le photomultiplicateur : PM

❖ **Convertit signal lumineux en signal électrique; le PM comprend :**

- Photocathode : transforme les photons lumineux en électrons.
- multiplicateur d'électrons: dynodes.
- anode: recueille les é issus et les transforme en impulsions.

❖ ***L'électronique associée:***

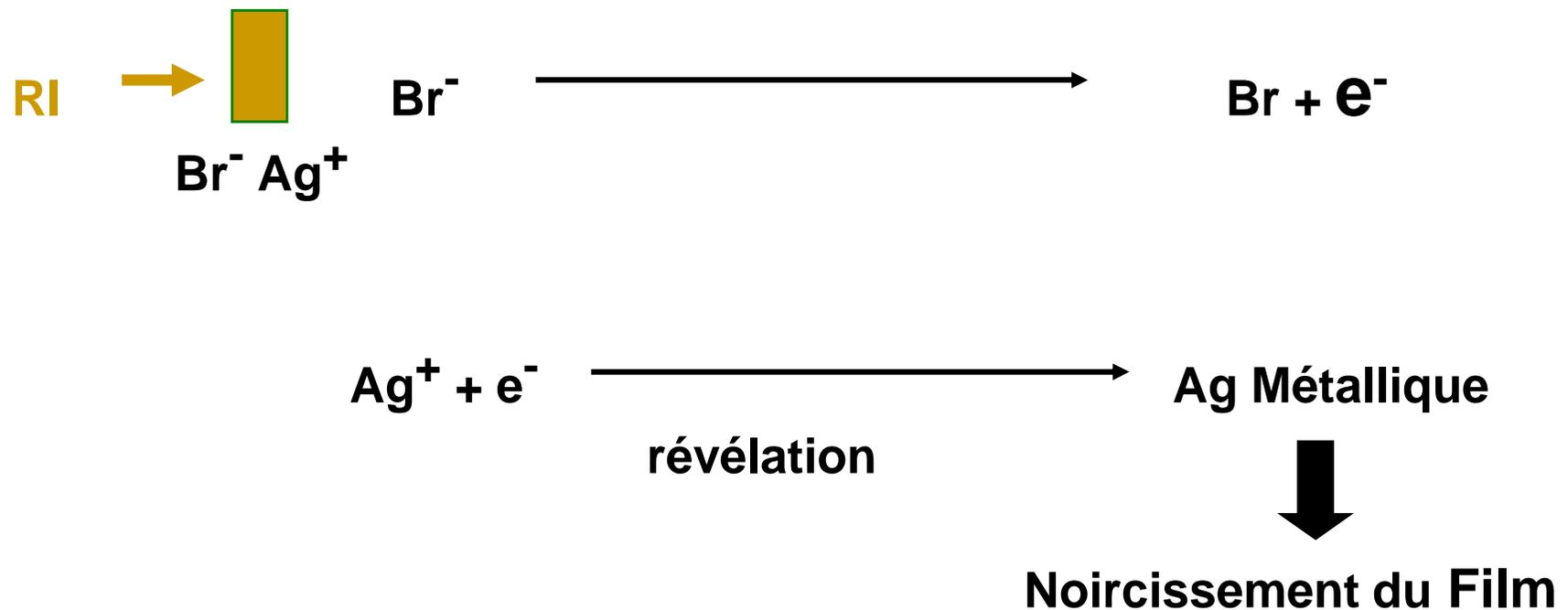
- alimentation H.T
- préamplificateur,
- amplificateur d'amplitude monocanal;
- analyseur multicanaux
- dispositif de comptage.

Principaux types de compteurs à scintillations

- **Compteur corps entier**
- **Scintigraphe à balayage**
- **Gamma-caméra**
- **Tomo-Gamma-Caméra**
- **Tomo-Gamma-Caméra à positons : 2 têtes détectrices, émetteurs à positons**

Les émulsions photographiques

- C'est le plus simple et le plus ancien détecteur;
- formé de cristaux de $\text{Br}^- \text{Ag}^+$



Les détecteurs

- ❑ **Les détecteurs: à gaz, à scintillations et semi- conducteurs peuvent:**
 - **Dénombrer les rayonnements Incidents**
 - **Mesurer un débit de dose absorbée**
 - **Pour certains: effectuer une spectrométrie (= classer les impulsions recueillies selon leur tension et en tracer le spectre)**
- ❑ **Alors que les autres détecteurs ne mesurent qu'une dose absorbée**
- ❑ **L'information mémorisée n'est exploitée qu'à la fin de l'exposition à l'aide d'appareils de lecture adaptée.**
- ❑ **Ces dosimètres sont dits « à effet latent » ou « à lecture différée »**

Quelques références bibliographiques

- D.J. GAMBINI / R. GRANIER, décembre 2000. Manuel pratique de radioprotection. Editions Médicales Internationales.
- Rapport sur les travaux de la 54^{ème} session de l'UNSCEAR, 2006, supplément N°46.
- Site du CNEBMN: Collège National des Enseignants de Biophysique et de Médecine Nucléaire