

*UE 3-1 : Physique*

---

Chapitre 10 :

# Interactions Matière-Rayonnement

Professeur Eva PEBAY-PEYROULA

---

Année universitaire 2011/2012

Université Joseph Fourier de Grenoble - Tous droits réservés.

# X – Interactions

## Matière-Rayonnement

### Finalité du chapitre

•Après avoir vu les ondes (description, définition des paramètres caractéristiques et leurs propriétés), puis la description de la matière (de l'atome à l'échelle macroscopique), nous nous intéressons aux interactions entre les deux.

Comprendre les principes physiques des interactions, pour mieux cerner les interactions importantes.

Détection des rayonnements grâce à ces interactions,  
Lien entre la mise évidence des interactions et renseignements sur la composition et la structuration de la matière.

#### Plan

1. Les mécanismes physiques
2. Les détecteurs
3. Les spectres moléculaires
4. Quelques applications

# X – Interactions

## Matière-Rayonnement

### Exemples d'application

#### Imagerie

Toutes les imageries reposent sur une interaction entre matière et rayonnement

**Radiographie RX:** l'image sur le film met en évidence les os, zones pour lesquelles l'absorption des RX est forte.

**IRM:** imagerie basée sur le principe de résonance magnétique nucléaire, en présence d'un champ magnétique les noyaux absorbent de l'énergie venant d'une onde radiofréquence ce qui modifie leur aimantation  
Tous les noyaux ne réagissent pas de la même façon

**Scintigraphie:** émission de rayonnement gamma émis par un radiotracteur, le détecteur doit pouvoir détecter les photons  $\gamma$  de façon quantitative

# X – Interactions Matière-Rayonnement

- 1 Les mécanismes physiques
- 2 Les détecteurs
- 3 Les spectres moléculaires
- 4 Aperçu résumé des applications

Un rayonnement pénétrant dans la matière finit par être absorbé, énergie est transférée au milieu absorbant

Met en jeu les interactions entre rayonnement et matière

Va dépendre de la nature du rayonnement

## **2 aspects:**

global, interaction avec matière « dense »

moléculaire, réaction des molécules individuelles

# X – Interactions

## Matière-Rayonnement

### 1. Les mécanismes physiques

- Ralentissement des particules chargées

Cas des électrons (+ ou -, radioactivité  $\beta^+$  ou  $\beta^-$ ),  
des protons, particules alpha ou ions lourds

perte d'énergie due aux forces électriques avec électrons et noyaux constituant la matière

Distance trop grande pour les forces nucléaires

# X – Interactions

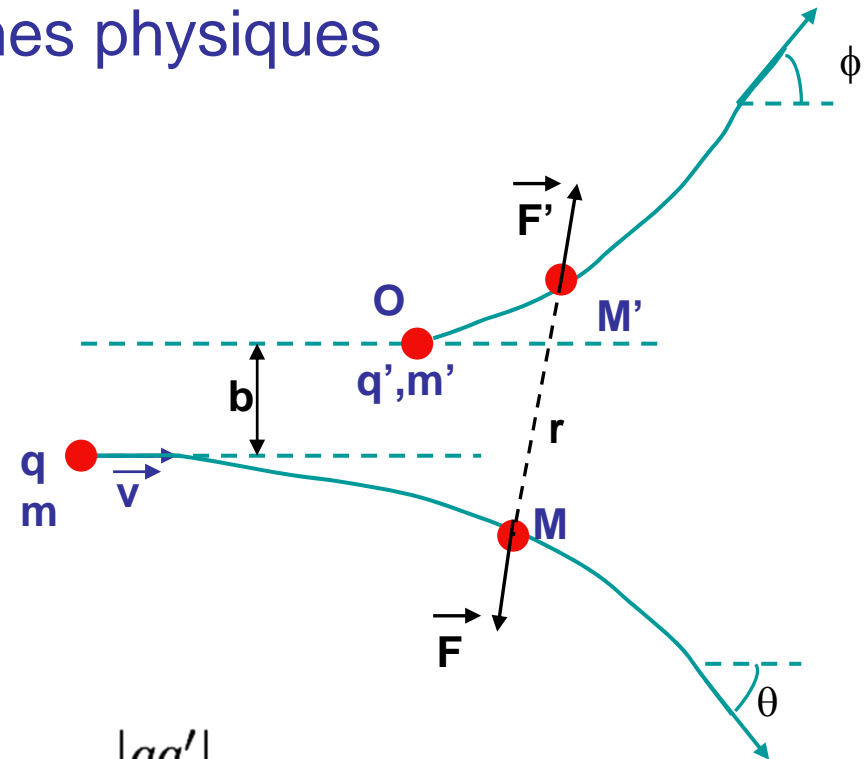
## Matière-Rayonnement

### 1. Les mécanismes physiques

#### Ralentissement des particules chargées

particule charge  $q$  et masse  $m$  animée d'une vitesse  $v$ , interagit avec particule  $q'$ ,  $m'$

Les 2 particules vont suivre une trajectoire qui dépend de leurs caractéristiques (charge, masse) et des paramètres de collision: paramètre d'impact  $b$



$$\text{À l'instant } t: M \text{ et } M', \quad \|\vec{F}\| = \|\vec{F}'\| = cte \frac{|qq'|}{r^2}$$

$F$  et  $F'$  sont les forces électrostatiques définies au chapitre 2

Particule  $q', m'$  immobile avant le choc acquiert une énergie cinétique  $\Delta E$  perdue par la particule  $q, m$

# X – Interactions

## Matière-Rayonnement

### 1. Les mécanismes physiques

#### Ralentissement des particules chargées

Si paramètre d'impact  $b$  très grand, angle  $\theta$  est très petit,  $\phi$  voisin de  $\pi/2$ , énergie échangée  $\Delta E$  très faible  
*La particule  $m$  passe loin de  $m'$  et n'est presque pas déviée, la vitesse acquise par  $m'$  est très faible*

Si paramètre d'impact  $b$  petit (voir nul, cas du choc frontal),  $\phi$  voisin de 0, énergie échangée  $\Delta E$  est maximale:

En particulier, si  $m=m'$  (cas si 2 électrons) dans un choc frontal l'électron incident est arrêté transférant toute son énergie cinétique à l'électron heurté

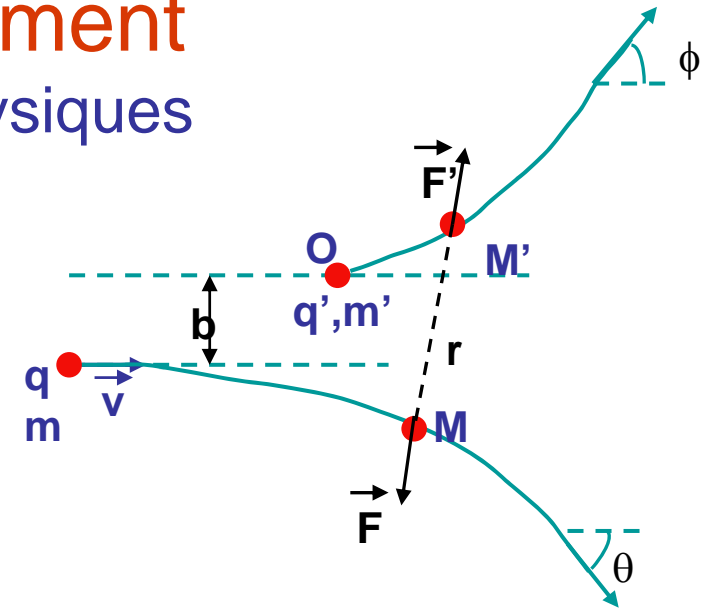
si  $m \ll m'$  (cas si 1 électron sur 1 noyau) l'électron rebondit sur le noyau, faible partie de l'énergie transférée:

Conservation de l'énergie cinétique et de la quantité de mouvement:

$$\Delta E/E = 4 m/m'$$

si  $m \gg m'$  (cas si 1 particule lourde proton ou alpha sur 1 électron) l'énergie de la particule est peu modifiée:

$$\Delta E/E = 4 m'/m \text{ si choc frontal}$$



# X – Interactions

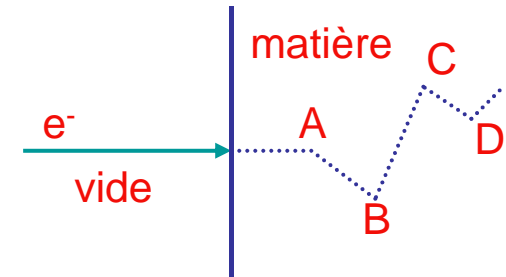
## Matière-Rayonnement

### 1. Les mécanismes physiques

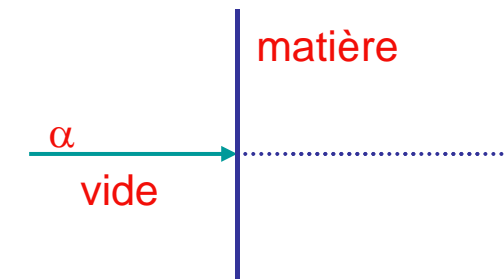
#### Ralentissement des particules chargées

Dans la matière grand nombre d'électrons par rapport aux noyaux:  
Perte d'énergie d'une particule chargée se fait surtout lorsqu'elle agit avec une particule de masse comparable ou inférieure à la sienne

Électron perdent leur énergie en interagissant avec d'autres électrons  
S'ils rencontrent des noyaux, trajectoire infléchie mais énergie peu modifiée  
Émission d'un rayonnement électromagnétique (Bremsstrahlung)



Les particules chargées lourdes ont une trajectoire dans la matière presque rectiligne et perdent leur énergie au cours des nombreuses interactions avec les électrons (plus rarement avec des noyaux)





# X – Interactions

## Matière-Rayonnement

### 1. Les mécanismes physiques

#### Énergie transférée au milieu

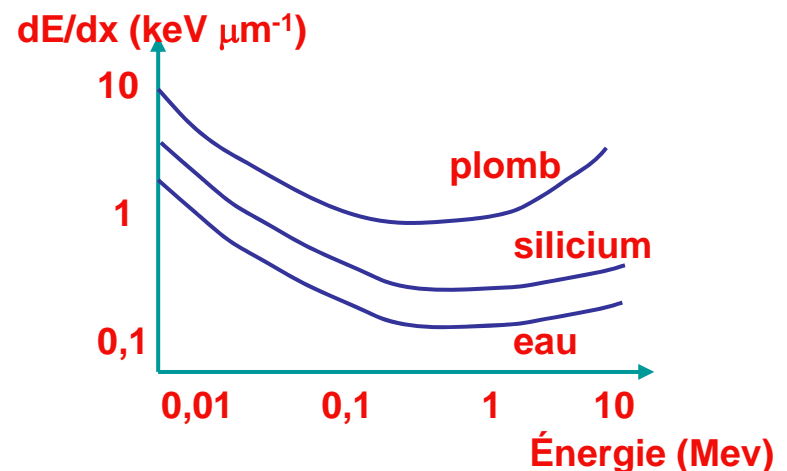
Particule chargée d'énergie  $E$  traversant une épaisseur  $dx$  va perdre de l'énergie  
-  $dE/dx > 0$  perte d'énergie spécifique

Dépend de la nature du matériau (hydrogène, aluminium, plomb,..), de son état physique (solide, liquide ou gaz), proportionnel à la masse volumique de la substance

Dépend de la nature de la particule considérée et de son énergie

- $dE/dx$  connu de façon expérimentale

*exemple: perte d'énergie d'électrons dans eau, silicium et plomb (échelle log en x et y)*



L'ordonnée du graphe représente la valeur absolue de  $dE/dx$

# X – Interactions

## Matière-Rayonnement

### 1. Les mécanismes physiques

#### Énergie transférée au milieu

*Perte d'énergie de diverses particules dans le silicium (très utilisé dans les détecteurs de particules):*

*Particules lourdes perdent beaucoup plus d'énergie que les protons (les électrons sont en dehors du diagramme)*

#### TLE Transfert linéique d'énergie: $-dE/dx$

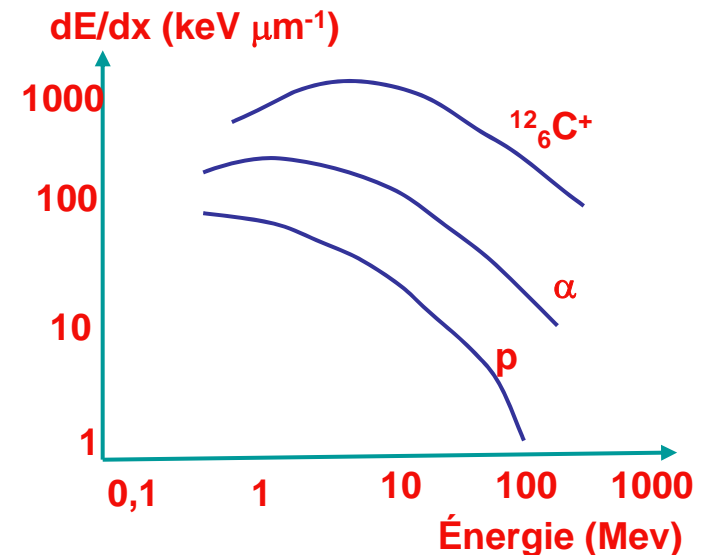
*Eau: TLE des électrons de 500 keV à 5 MeV est de  $0,20 \text{ keV } \mu\text{m}^{-1}$*

*TLE protons de 1 MeV est de  $20 \text{ keV } \mu\text{m}^{-1}$*

**Énergie transférée:** excitation et ionisation des milieux traversés, partage entre les 2 possibilités

**Densité linéique d'ionisation: DLI:** le nombre de paires d'ions créées par unité de longueur de trajectoire de la particule

$-dE/dx = W dn/dx$  avec W: énergie moyenne pour créer une paire d'ions



*L'ordonnée du graphe représente la valeur absolue de  $dE/dx$*

# X – Interactions

## Matière-Rayonnement

### 1. Les mécanismes physiques

#### Cas des neutrons

Neutrons: corpuscules neutres

Mécanisme de perte d'énergie lié à l'interaction nucléaire forte

Collision avec noyau: changement brusque de la trajectoire du neutron

Perte d'énergie maximale lorsque le noyau a une masse voisine, cas de l'hydrogène

Corps très hydrogéné est le mieux pour ralentir des neutrons (eau ou paraffine)

Neutron ralenti est ensuite absorbé lors d'une capture par un noyau, réaction nucléaire avec émission d'un photon

# X – Interactions

## Matière-Rayonnement

### 1. Les mécanismes physiques

#### Interactions des rayons X et $\gamma$ avec la matière

Photons ou ondes électromagnétiques, mouvement à la vitesse de la lumière, pas de ralentissement

Absorption

Transmission

Diffusion: émission d'un photon d'énergie inférieure (perte d'énergie)

**Effet photoélectrique** (voir cours sur les ondes)

Énergie du photon = énergie d'extraction de l'électron + énergie cinétique de l'électron

Existence d'un seuil  $W$  pour l'énergie du photon incident

# X – Interactions

## Matière-Rayonnement

### 1. Les mécanismes physiques

#### Interactions des rayons X et $\gamma$ avec la matière

##### Effet Compton

Électron libre ou lié à un atome

Énergie du photon incident partagée entre énergie cinétique acquise par l'électron et énergie du photon diffusé

Conservation énergie  $E = E' + \frac{1}{2}mv^2$

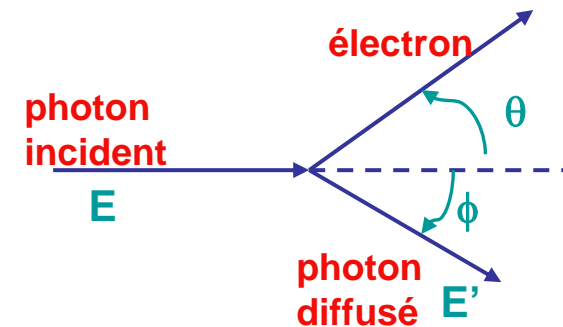
Conservation quantité de mouvement

$$\frac{E}{C} = \frac{E'}{C} \cos \Phi + mv \cos \theta$$
$$\frac{E'}{C} \sin \Phi = mv \sin \theta$$

3 équations pour 4 inconnues: 1 degré de liberté

Énergie du photon diffusé et de l'électron dépendent des angles

Électron mis en mouvement par effet Compton possède un spectre continue de 0 à un maximum lié à l'énergie du photon incident



# X – Interactions

## Matière-Rayonnement

### 1. Les mécanismes physiques

#### Interactions des rayons X et $\gamma$ avec la matière

##### Création de paires

Énergie du photon incident supérieure à un certain seuil, effet de matérialisation: création d'une paire particule-antiparticule (couple électron-positon)

$$E_0 = 2 m_0 c^2 = 2 \times 511 \text{ keV}$$

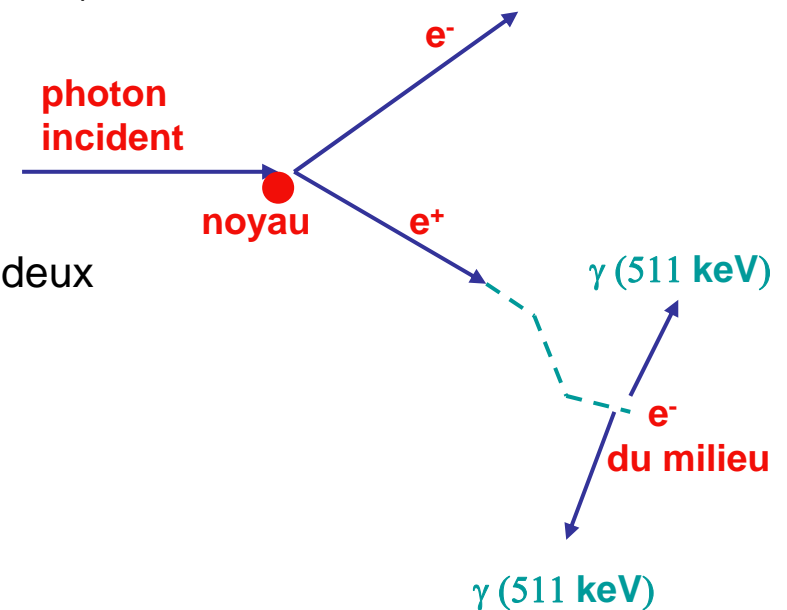
$$E_{\text{photon}} > E_0 = 1,02 \text{ MeV}$$

Excédent d'énergie du photon est communiqué aux deux particules créés sous forme d'énergie cinétique

$$E = E_0 + E_{e^-} + E_{e^+}$$

= énergie de masse + énergies cinétiques

*Cet effet se produit au voisinage d'un noyau*  
*Finalemnt positon s'annihile avec un électron du milieu*  
*avec émission de photons  $\gamma$*



# X – Interactions

## Matière-Rayonnement

### 1. Les mécanismes physiques

#### Interactions des rayons X et $\gamma$ avec la matière

##### Atténuation d'un faisceau de photons X ou $\gamma$

Chacun des 3 effets se réalise avec une certaine probabilité, de façon indépendante.

Pour chaque effet on considère intensité du faisceau fonction de la quantité de matière traversée,  $I(x)$

Proportionnelle au nombre de photons dans le faisceau

Suivant tranche  $dx$ :

$dI = -\mu I dx$ ,  $\mu$  coefficient dépend de la substance et de l'énergie du rayonnement

$$I = I_0 \exp -\mu x \quad I_0 \text{ intensité du faisceau à } x=0$$

Les 3 effets peuvent avoir lieu:  $dI = -(\mu_{ph} + \mu_c + \mu_p) I dx$

$I = I_0 \exp -(\mu_{ph} + \mu_c + \mu_p)x$  d'où  $I = I_0 \exp -\mu x$   $\mu$  coefficient linéique d'absorption

On peut définir aussi coefficient massique d'atténuation:  $\mu/\rho$

# X – Interactions

## Matière-Rayonnement

### 2. Les détecteurs

Toutes les interactions décrites dans les paragraphes précédents entre particules (ou le rayonnement) et la matière sont exploitées dans les détecteurs pour permettre de détecter des particules (identification de leur nature, quantification, visualisation de la trajectoire)

#### Détecteur utilisant l'ionisation du milieu

##### Principe général

Ionisation de la matière au passage de la particule: formation de charge + (ions) et - (électrons)

Déplacement des charges par un champ électrique pour les recueillir séparément: impulsion électrique qui dépend de l'énergie laissée dans le détecteur (*voir chapitre 2 et 3*)

#### Détecteur utilisant l'excitation des atomes du milieu

##### Principe général

Atome excité par le passage d'un rayonnement passe dans un état d'énergie supérieur et revient au niveau fondamentale par émission d'un photon (*voir chapitre 8*)

Détection des photons: mesure de l'énergie perdue par excitation du milieu par la particule

Les détecteurs seront détaillés dans le cours de M. Vuillez



# X – Interactions

## Matière-Rayonnement

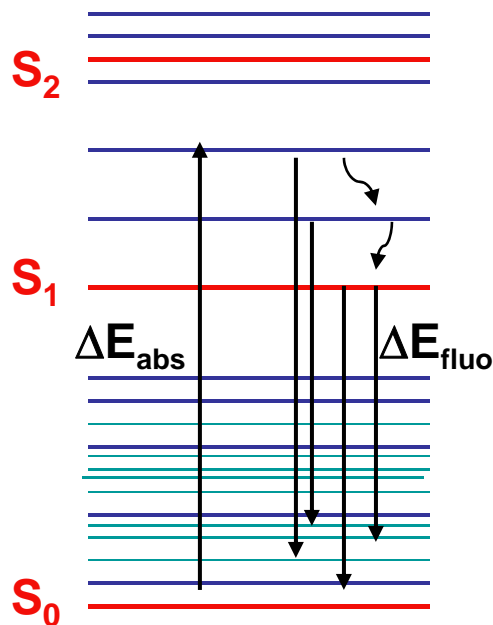
### 3. Spectres moléculaires

- Niveaux d'énergie des molécules

énergie d'une molécule: énergie électronique + énergie des noyaux

$E_{\text{électronique}} > E_{\text{noyaux}}$

$E_{\text{noyaux}} = E_{\text{vibration}} + E_{\text{rotation}}$  avec  $E_{\text{vibration}} > E_{\text{rotation}}$



Niveaux d'énergie quantifiés

Situation stable: molécules dans l'état fondamental

Excitation par une onde: absorption possible:

$$\Delta E_{\text{abs}} = h\nu_{\text{abs}} = h c / \lambda_{\text{abs}}$$

Retour vers l'équilibre:

Perte d'énergie par collisions entre molécules

Émission de fluorescence

$$\Delta E_{\text{fluo}} = h\nu_{\text{fluo}} = h c / \lambda_{\text{fluo}}$$

$$\Delta E_{\text{abs}} > \Delta E_{\text{fluo}} \text{ donc } \lambda_{\text{abs}} < \lambda_{\text{fluo}}$$

# X – Interactions

## Matière-Rayonnement

### 3. Spectres moléculaires

- Transitions entre niveaux d'énergie

Différentes transitions entre niveaux d'énergie

Transition radiative:

-**Absorption**: apport d'énergie par une onde électromagnétique

-**Émission spontanée**: retour vers le niveau d'énergie le plus stable

$N(t) = N_0 \exp -t/\tau$  où  $\tau$  est la durée de vie du niveau d'énergie excité

-**Émission stimulée**: on force toutes les molécules à émettre en même temps, donne une intensité très forte, principe du laser.

Transition non radiative:

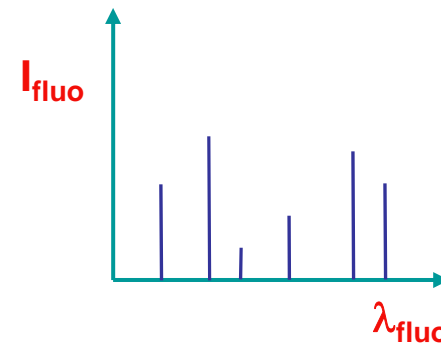
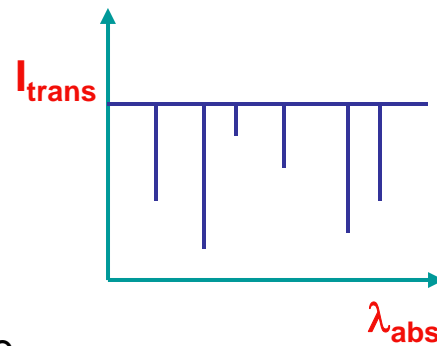
-Perte d'énergie par collisions, en compétition avec les transitions radiatives

# X – Interactions

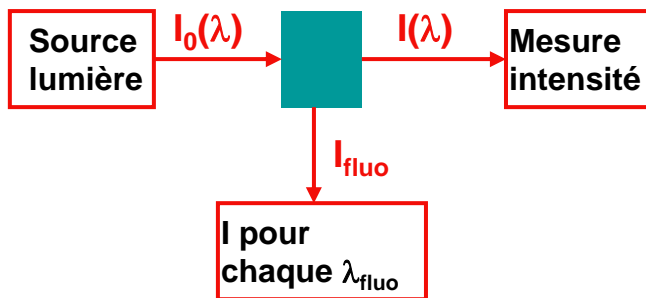
## Matière-Rayonnement

### 3. Spectres moléculaires

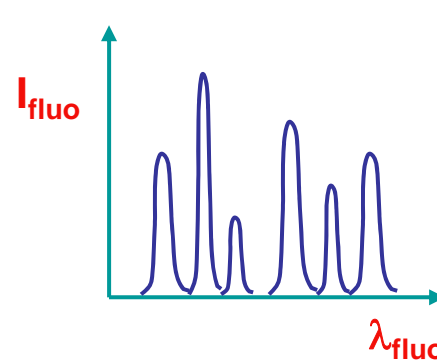
Spectres théoriques



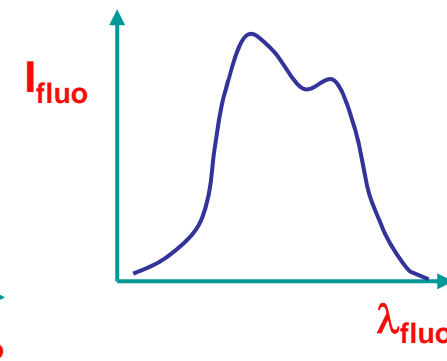
Principe de mesure



Spectres réels



*Molécules dans un gaz*



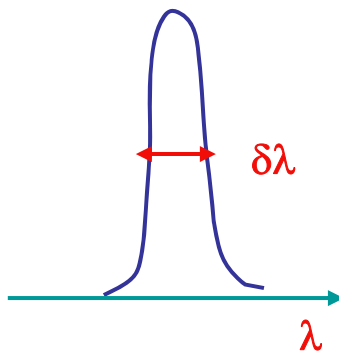
*Molécules en solution*

# X – Interactions

## Matière-Rayonnement

### 3. Spectres moléculaires

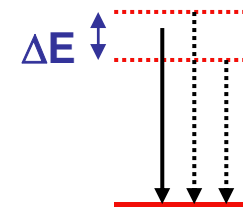
#### Largeurs de raies



Les raies d'absorption ou d'émission ont une certaine largeur

**Largeur naturelle** liée à la durée de vie des niveaux d'énergie  
durée de vie  $\tau$ :  $\Delta E \text{ prop. } 1/\tau$

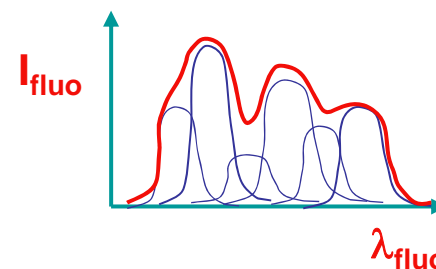
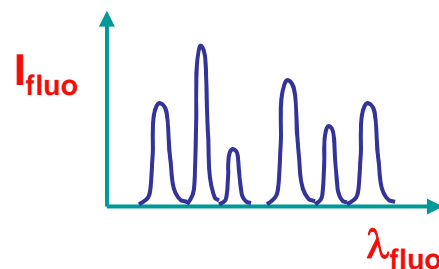
*Molécule isolée sans interaction avec d'autres,  $\tau \sim 10^{-9}$  s,  $\Delta\nu \sim 1$  GHz*



**Largeur due aux collisions:** gaz dilué peu de collisions, raies fines, gaz dense ou molécules en solution plus de collisions, raies plus larges

Collisions: durée de vie de l'état excité raccourci

**Effet Doppler** mouvement des molécules, variation de la fréquence perçue



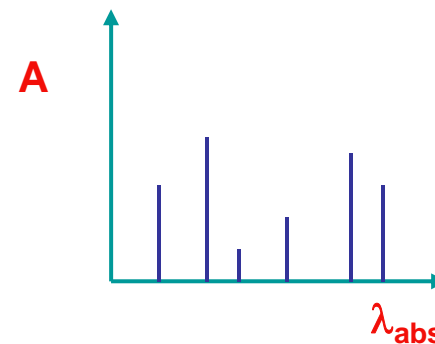
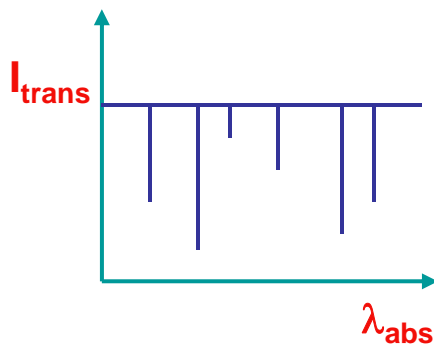
# X – Interactions

## Matière-Rayonnement

### 3. Spectres moléculaires

#### Absorption

- Absorbance (ou densité optique)  $A = -\log I/I_0$
- Dépend de la longueur d'onde
- Loi de Beer-Lambert  $A(\lambda) = \varepsilon(\lambda) c l$
- pour  $c$  faible
- $\varepsilon$  coefficient d'extinction molaire  $M^{-1} cm^{-1}$  (ou  $(mg/mL)^{-1} cm^{-1}$ ) dépend des molécules en solution, peut être calibré
- $c$  concentration molaire,  $l$  épaisseur traversée



# X – Interactions

## Matière-Rayonnement

### 3. Spectres moléculaires

#### Caractérisation des molécules par spectre d'absorption

- Différents domaines d'énergie (ou longueurs d'onde)
- Atomes ou molécules
- UV (10-200nm) -proche UV (200-400nm)-visible (400-800nm)  
transitions électroniques
- IR (0,8 - 1000  $\mu\text{m}$ )      transitions entre niveaux d'énergie vibrationnelle

#### Informations

**Forme du spectre:** nature des molécules

Spectre de raies fines (gaz d'atomes ou de molécules): identification simple, possibilité d'identifier plusieurs constituants dans un mélange

Spectres de raies larges (molécules en solution): identification plus difficile, moins sélective

**Intensité des raies:** quantité de molécules absorbantes présentes

# X – Interactions

## Matière-Rayonnement

### 3. Spectres moléculaires

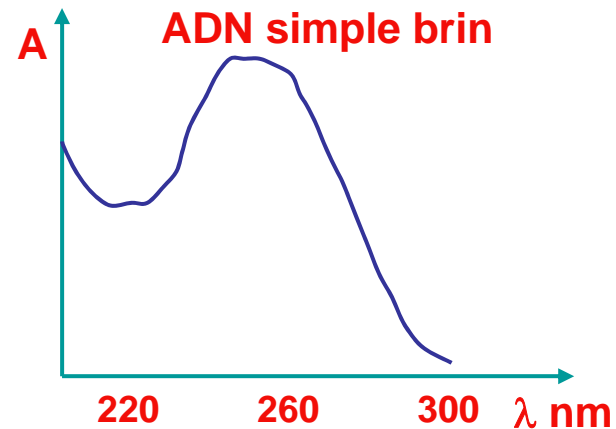
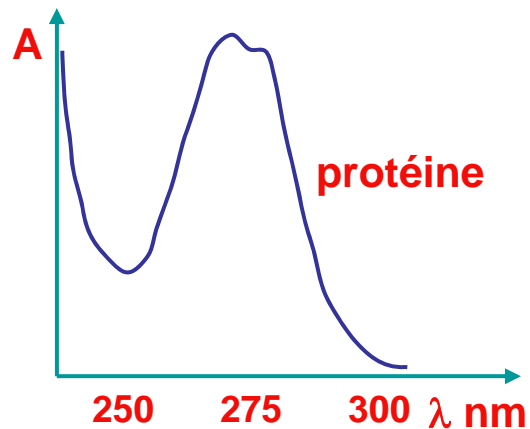
- Caractérisation des molécules par spectre d'absorption

Proche UV:

Protéines:

Tyr, Phe, Trp de 180 à 300 nm avec max vers 280, liaisons peptidiques 200 nm

ADN max vers 260 nm



*Applications:*

*Contrôle de la non-contamination d'une solution de protéine par des acides nucléiques*

*Mesure de la concentration en mesurant le spectre à 280nm*

# X – Interactions

## Matière-Rayonnement

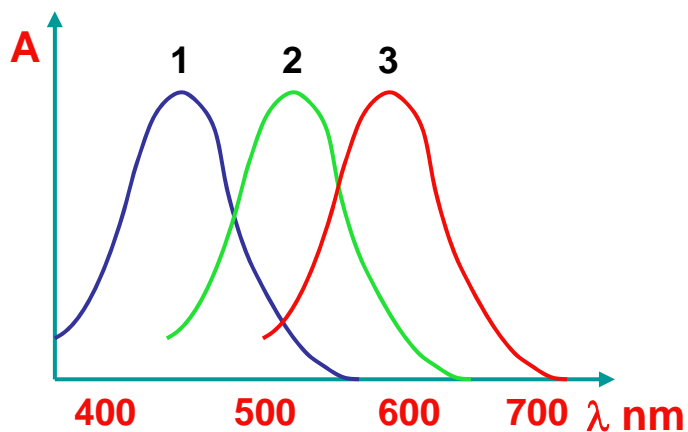
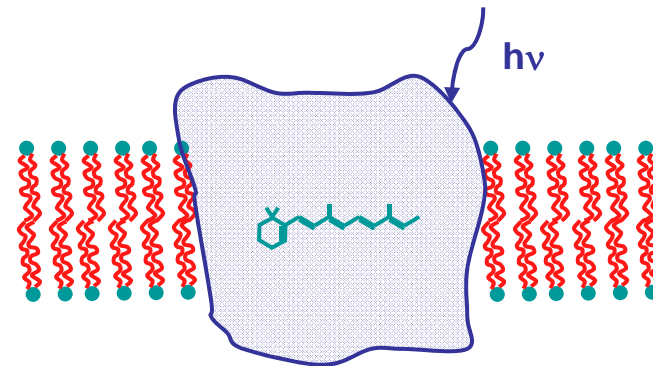
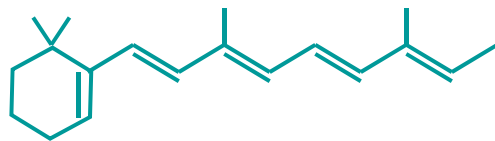
### 3. Spectres moléculaires

- Caractérisation des molécules par spectre d'absorption

Visible

Petite molécule liée à protéine: spectre dépend de l'environnement

*Exemple:* rétinal lié à la rhodopsine (protéine membranaire) à l'origine de la vision



Courbes 1, 2 et 3:

3 rhodopsines différentes responsables de la vision dans le bleu, le vert et le rouge, respectivement (RVB)

Même rétinal, environnement légèrement différent



# X – Interactions

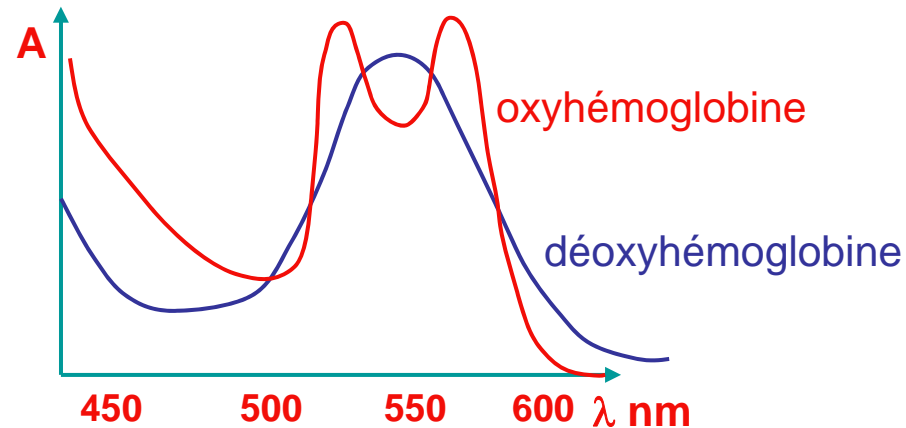
## Matière-Rayonnement

### 3. Spectres moléculaires

- Caractérisation des molécules par spectre d'absorption

Visible

effet de l'environnement : hème de l'hémoglobine en présence et en absence d'oxygène



IR

Spectres caractéristiques de certaines molécules (lipides): caractérisation et quantification

Caractéristiques de la géométrie locale des liaisons: caractérisation de l'organisation locale des protéines

# X – Interactions

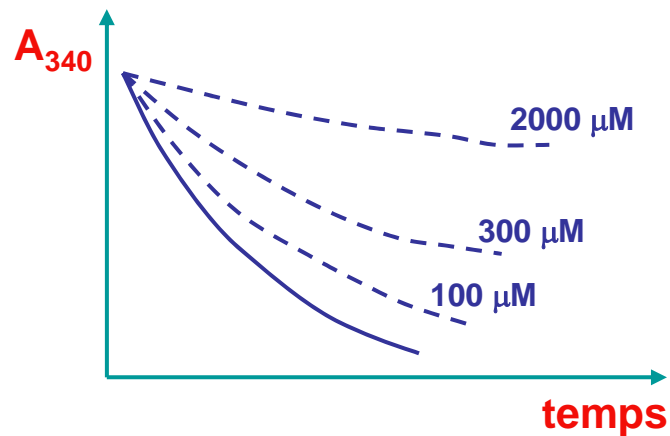
## Matière-Rayonnement

### 3. Spectres moléculaires

- Suivi d'une réaction par spectre d'absorption

#### Visible

Suivi d'une réaction en fonction du temps: réaction de réduction catalysée par une enzyme et nécessitant une molécule de NADPH (transformée en NADP<sup>+</sup>)



NADPH absorbe à 340 nm,  
NADP<sup>+</sup> n'absorbe pas à 340 nm  
Suivi de la réaction:  $A_{340}$  décroît

Effet d'un inhibiteur

# X – Interactions

## Matière-Rayonnement

### 3. Spectres moléculaires

- Fluorescence

Après excitation par absorption d'un rayonnement, le retour vers l'état fondamental peut se faire par fluorescence (transition radiative)

**Spectre de fluorescence:** caractéristique de l'élément qui fluoresce et dépend beaucoup de son environnement: intéressant pour sonder l'environnement

*Informations:*

*Forme du spectre, intensité de chaque raie, intensité globale en fonction du temps*

**Utilisation de marqueurs:**

Possibilité de marquer les lipides, les protéines, l'ADN,...par des petites molécules fluorescentes qui se lient aux molécules d'intérêt.

# X – Interactions

## Matière-Rayonnement

### 4. Résumé des applications

Détection et Identification d'un élément chimique

Élément: noyau, atome, molécule

Informations sur la structuration de la matière

Suivi enzymatique ou métabolisme (suivi d'un produit de réaction)

*Différentes échelles: tissulaires (humains entiers), cellulaires ou moléculaires*

**Plusieurs niveaux :**

Localisation d'un traceur (x,y,z), imagerie

Suivi d'un traceur en fonction du temps

Suivi d'un traceur avec variation des propriétés spectrales en fonction de l'environnement: sonde de pH, d'ions,...et/ou du temps (réactions chimiques)

- Interaction pour voir la structure de la matière

# X – Interactions

## Matière-Rayonnement

### Résumé des notions importantes

- Description Impact entre 2 particules chargées : savoir poser le problème
- Ralentissement des électrons et des particules  $\alpha$  dans la matière : comportement
- Notion de perte d'énergie spécifique et des paramètres dont dépend cette perte d'énergie
- Interactions des neutrons avec la matière : origine physique et conséquence (forte interaction avec H)
- Interactions des RX ou gamma : effet photoélectrique (vu cours ondes), effet Compton (savoir poser les équations de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement), création de paires (décrire le phénomène, comprendre notion d'énergie seuil)
- Loi d'atténuation d'un faisceau de photons
- Principe des détecteurs : différents types de détecteurs, origine physique du principe de détection
- Spectres moléculaires : description, transitions d'énergie possibles, largeur de raies
- Utilisation d'un spectre moléculaire : applications dans différents domaines d'énergie

# Exercices

## •Exercice 1

- Écrire les équations permettant de déterminer l'énergie des photons dans le cadre de l'effet Compton dans le cas où le mouvement de l'électron est parallèle à la trajectoire du photon incident. Quelle est la direction du photon diffusé? Quelle est son énergie par rapport à l'énergie du photon incident?
- Dans le cas où le photon est diffusé perpendiculairement au photon incident, exprimer l'angle de diffusion de l'électron en fonction de son énergie cinétique et de l'énergie du photon incident (on exprimera la tangente de cet angle).

## •Exercice 2

- Le coefficient d'absorption linéique du Plomb est de  $0,79 \text{ cm}^{-1}$  pour des photons de 1 MeV. On définit la couche de demi-atténuation comme étant l'épaisseur de matière qui réduit de moitié l'intensité du faisceau de rayonnement.
  - - *Quelle est la longueur des photons de 1 MeV? De quel type de photons s'agit-il?*
  - - *Calculer la couche de demi-atténuation du plomb pour ces photons.*
  - - *Quelle est l'épaisseur nécessaire pour atténuer le faisceau d'un facteur 1000?*
  - - *Est-il possible d'arrêter totalement le faisceau incident?*

## •Exercice 3

- Lors de l'absorption d'une onde par une molécule suivie d'une émission de fluorescence, comment se comparent les longueurs d'onde d'absorption et de fluorescence? Pourquoi?

## •Exercice 4

- On veut mesurer la concentration d'une solution de protéine en utilisant la loi de Beer-Lambert.
- La solution de protéine doit-elle être pure?
- Quelle sera en général la longueur d'onde utilisée: 280, 380 ou 480 nm?
- Si le coefficient d'extinction molaire d'une protéine à une longueur d'onde  $\lambda$  est de l'ordre de  $1 \text{ (mg/mL)}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ , quel est ce même coefficient en  $\text{M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ , sachant que la masse molaire de la protéine est 125 000 g/mol?

# Mentions légales

L'ensemble de cette œuvre relève des législations française et internationale sur le droit d'auteur et la propriété intellectuelle, littéraire et artistique ou toute autre loi applicable.

Tous les droits de reproduction, adaptation, transformation, transcription ou traduction de tout ou partie sont réservés pour les textes ainsi que pour l'ensemble des documents iconographiques, photographiques, vidéos et sonores.

Cette œuvre est interdite 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 Joseph Fourier (UJF) Grenoble 1 et ses affiliés.

L'utilisation de ce document est strictement réservée à l'usage privé des étudiants inscrits à l'Université Joseph Fourier (UJF) Grenoble 1, et non destinée à une utilisation collective, gratuite ou payante.