

## RAYONNEMENTS

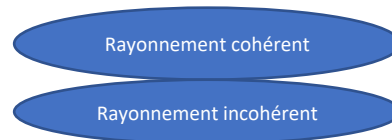
### I. INTRODUCTION

- Les rayonnements électromagnétiques englobent un ensemble de rayonnements de nature physique identique, mais très hétérogènes par l'énergie qu'ils transportent et par leurs possibilités d'interaction avec un milieu matériel.
- L'étude des rayonnements électromagnétiques utilise deux modèles complémentaires qui permettent de décrire comme un phénomène ondulatoire (onde électromagnétique) ou corpusculaire (flux de photons).

### II. CLASSIFICATION DES RAYONNEMENTS

#### ☐ Selon la nature du rayonnement:

- Rayonnement électromagnétique ( $X, \gamma$ )
- Rayonnement particulaire



#### ☐ Selon ses effets sur la matière:

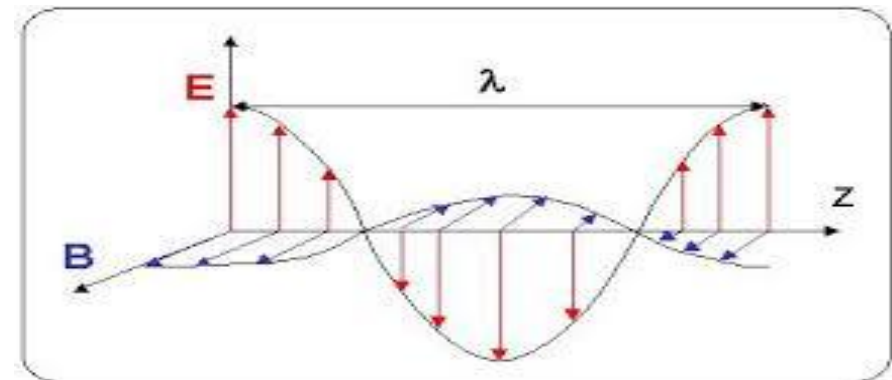
- Rayonnement ionisant
- Rayonnement non ionisant

## III. RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE

### 1) Aspect ondulatoire:

- **Le rayonnement électromagnétique est émis** par les vibrations des électrons atomiques qui composent la matière.
- **Célérité (vitesse de propagation dans le vide):** Constante, égale à  $3 \cdot 10^8$  m/sec.
- **Peut être:**
  - ✓ **monochromatique:** formé d'ondes de même période, même fréquence.
  - ✓ **polychromatique:** formé d'ondes de fréquences différentes, de longueur d'ondes différentes.

La plupart du temps le rayonnement électromagnétique est polychromatique.



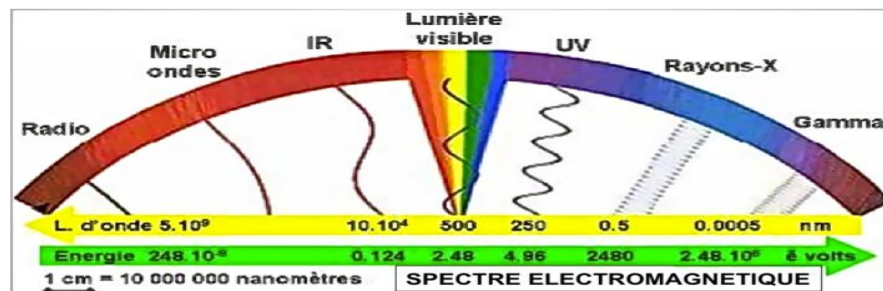
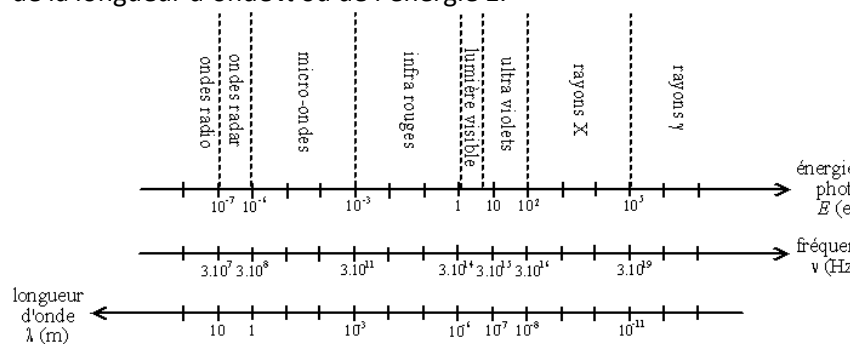
**L'onde électromagnétique:** c'est l'association d'un champ électrique sinusoïdal  $\vec{E}$  et d'un champ magnétique  $\vec{B}$  de même période qui lui est en tout point perpendiculaire.

▪ Les principales caractéristiques d'une onde électromagnétique:

- ✓ Sa fréquence:  $\nu = \frac{1}{T}$  ( Hz ou  $s^{-1}$  ).
- ✓ Sa période:  $T = \frac{1}{\nu}$  (s).
- ✓ Sa longueur d'onde dans le vide:  $\lambda = CT = \frac{c}{\nu}$ , distance de propagation durant une période.
- ✓ Son nombre d'ondes:  $\sigma = \frac{1}{\lambda}$  par unité de longueur.
- ✓ Sa pulsation:  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ , c'est la vitesse angulaire de rotation du vecteur champ électrique dans un plan perpendiculaire au rayonnement tout au long de la propagation.
- ✓ Son intensité énergétique:  $I(\vec{U}) = \frac{d\Phi}{d\Omega}$ , c'est le flux énergétique  $d\Phi$  émis dans un angle solide  $d\Omega$  dans une direction déterminée  $\vec{U}$ .

▪ Spectre du rayonnement:

C'est la distribution de l'intensité du rayonnement  $I$  en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  ou de l'énergie  $E$ .

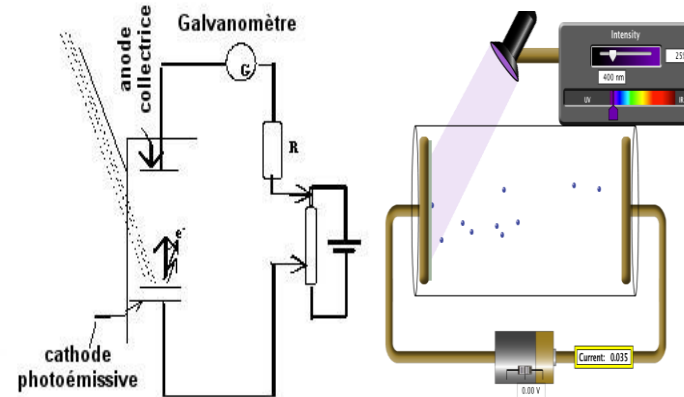


2) Aspect corpusculaire:

**EFFET PHOTOELECTRIQUE:**

Définition:

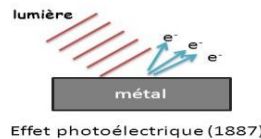
C'est l'émission d'électrons par un matériau, généralement métallique lorsque celui-ci est exposé à la lumière ou à un rayonnement électromagnétique de fréquence suffisamment élevée.



Constatations expérimentales:

1. Les électrons ne sont émis que si la fréquence de la lumière est suffisamment élevée et dépasse une fréquence limite appelée **fréquence seuil** ( $h\nu \geq h\nu_0$  fréquence seuil).
2. La fréquence seuil dépend du matériau, elle est liée à l'énergie de liaison des électrons.
3. L'**énergie cinétique** des électrons émis dépend de **la fréquence** de la lumière incidente.
4. La vitesse des électrons émis ne dépend pas de l'intensité de la source lumineuse.
5. Le **nombre d'électrons** émis lors de l'exposition à la lumière, qui détermine l'intensité du courant électrique, est proportionnel à l'**intensité** de la source lumineuse.
6. Le phénomène d'émission photoélectrique se produit dans un délai très petit  $<10^{-9}$  sec.

Deux expériences troublantes



quantum d'énergie  
 $h\nu$

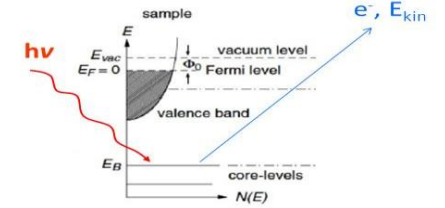
L'effct photoélectrique

Expérience ultérieures (notamment Von Lenard)

- L'énergie maximum des électrons émis est proportionnelle à la fréquence de la lumière, pas à son intensité.
- Il y a une énergie minimum à fournir (le travail de sortie, qq eV) pour arracher des électrons à un métal, elle est différente pour chaque matériau.

Expliqué par Einstein en 1905...  
⇒ Il existe des photons d'énergie  $h\nu$

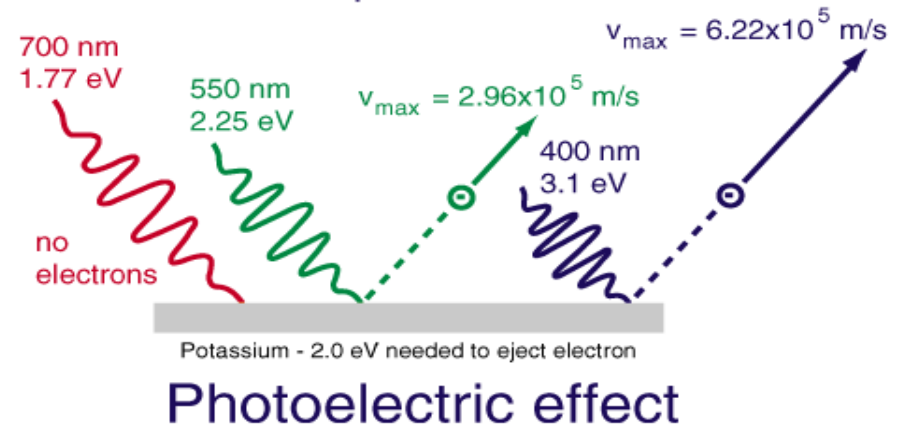
Description moderne



Niveaux d'énergie dans un solide

$$E_{kin} = h\nu - W - |E_B|$$

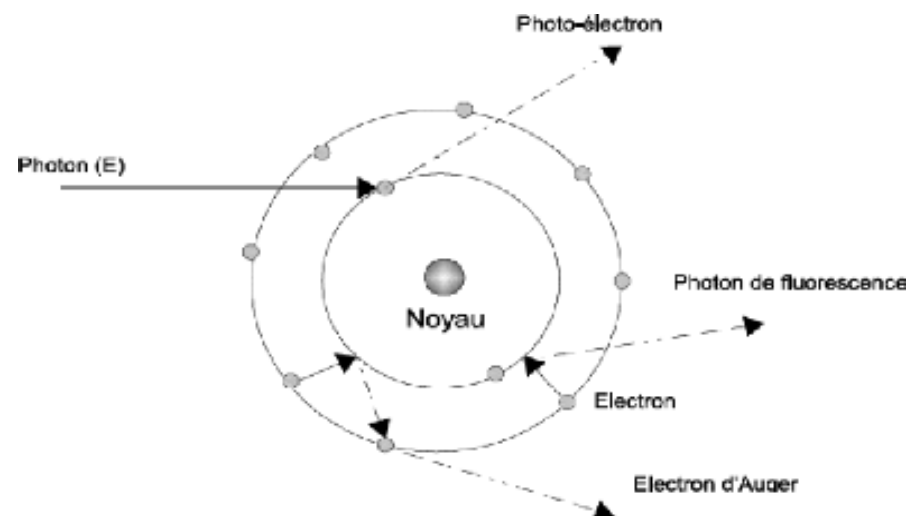
$$E_{\text{photon}} = h\nu$$



### Explication:

- L'effet photoélectrique ne peut pas être expliqué de manière satisfaisante si l'on considère que la lumière est une onde.
- Si on considère la lumière comme une onde, en augmentant son **intensité** on devrait pouvoir fournir **suffisamment d'énergie** au matériau pour libérer les électrons
- L'expérience montre que l'intensité lumineuse **n'est pas le seul paramètre**.
- La lumière est constituée de **particules virtuelles** appelées **photons**, accumulées en paquets appelés **quanta**, chaque quantum contient une quantité d'énergie  **$E = h\nu$**
- Quand un photon tombe sur la plaque de zinc il y'a une collision de type mécanique classique (l'énergie et la quantité de mouvements sont conservés)
- Si le photon apporte à l'électron une **énergie suffisante  $h\nu$**  pour vaincre la barrière d'énergie, l'électron s'échappe du métal et forme le photoélectron sinon pas d'effet photoélectrique.
- Résulte du transfert de toute l'énergie du photon incident sur un électron d'un des atomes de la cible.
- Ne se produit que si l'énergie du photon est  $>$  l'énergie de liaison de l'électron  **$E > W_L$**
- L'électron est éjecté de son orbite avec une énergie cinétique  **$W_C = E - W_L$** , il est appelé **photoélectron** et épuise son énergie cinétique en ionisations et en excitations.
- L'électron éjecté laisse une place vacante qui va être comblée par les électrons des couches externes.
- Ce remplacement s'accompagne d'une libération d'énergie  $W_R$  qui peut être:
  - ✓ Soit **diffusée** sous forme d'un photon = **photon de fluorescence**.

- ✓ Soit **communiquée** à un électron périphérique d'énergie de liaison  **$W_P < W_R$** , qui sera expulsé avec une énergie cinétique  **$W_R - W_P$** : c'est **l'effet Auger** et l'électron est appelé **électron Auger**.



- Dans les deux cas l'électron de remplacement laisse à son tour une place vacante qui va être comblée avec émission d'un photon de fluorescence ou d'un électron Auger et ainsi de suite.
- Si aucun électron ne vient combler la place vacante, l'atome cible est dans un **état ionisé**.
- **Bilan énergétique:**
  - Photon incident** → **énergie diffusée:** sous forme d'un ou de plusieurs photons de fluorescence.
  - **énergie absorbée:** effet Auger  $E - W_D$ .

### 3) Dualité onde corpuscule de la nature des rayonnements électromagnétiques:

- Les rayonnements électromagnétiques ont deux aspects complémentaires:
- ✓ **Aspect ondulatoire:** onde (longueur d'onde  $\lambda$ , fréquence  $\nu$ )
- ✓ **Aspect corpusculaire:** photons (énergie  $h\nu$ )
- Ces deux aspects n'ont pas toujours le même intérêt pratique:
- ✓ **Les rayonnements  $\lambda \nearrow$ , fréquence  $\nu \searrow$ , énergie faible:** seul l'**aspect ondulatoire** est pris en considération.
- ✓ **Les rayonnements  $\lambda \searrow$ , fréquence  $\nu \nearrow$ , énergie trop élevée:** seul l'**aspect corpusculaire** (photonique) est pris en considération.
- ✓ **Dans le domaine intermédiaire** (IR, visible, UV) les deux aspects sont pris en considération:
- **L'aspect ondulatoire explique:** la réflexion, la diffraction (lois de l'optique géométrique).
- **L'aspect corpusculaire explique:** l'excitation, l'ionisation d'atomes ou de molécules.

### IV. RAYONNEMENT PARTICULAIRE:

**1) Définition:** constitué de **particules matérielles** douées de masse au repos.

#### 2) Paramètres physiques d'une particule matérielle en mouvement:

- **La charge:** multiple entier de la charge élémentaire
- **La masse au repos  $m_0$**
- **La vitesse  $v$**
- **La masse en mouvement  $m$  (masse cinétique):**  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

( $v$ : vitesse de la particule;  $c$ : célérité de la lumière).

### 3) Aspect ondulatoire des rayonnements corpusculaires:

Les particules matérielles douées de masse au repos ont une représentation ondulatoire, une particule de masse  $m$  et de vitesse  $v$  a une onde de longueur d'onde  $\lambda = \frac{h}{mv}$

### 4) Particules élémentaires:

- **Classification des particules élémentaires:**
  - **Les trois particules fondamentales:** proton, neutron, électron (ou négaton)
  - **Autres particules élémentaires:**
    - Particules légères (leptons):** électron, neutrino, muon, photon.
    - Particules moyennes (mésons):** pion neutre, pion chargé, kaon neutre, kaon chargé.
    - Particules lourdes (baryons):** nucléons (protons, neutrons), hypérons (ksi, sigma, lambda).

Photon ( $\gamma$ )			
Leptons		Electron ( $e^-$ ), Neutrino ( $\nu$ )	
Hadrons	Mésons	Pi ( $\pi^+$ , $\pi^0$ , $\pi^-$ ), K ( $K^+$ , $K^0$ , $\bar{K}^0$ , $K^-$ ), $\eta^0$ , ...	
	Baryons	Nucléons	Proton (p), Neutron (n)
		Hypérons	Delta ( $\Delta^{++}$ , $\Delta^+$ , $\Delta^0$ , $\Delta^-$ ), Sigma ( $\Sigma^+$ , $\Sigma^0$ , $\Sigma^-$ ), Ksi ( $\Xi^0$ , $\Xi^-$ ), $\Lambda^0$ , ...

Type	ATOME	NOYAU	QUARKS	Particules élémentaires	Masses (eV/c <sup>2</sup> )
FERMION (spin 1/2)	LEPTON (léger)			• ÉLECTRON • NEUTRINO électronique • MUON • NEUTRINO muonique • TAU • NEUTRINO de Tau	0,511 M ≈ 0 106 M ≈ 0 1777 M ≈ 0
	HADRON (fort) sensible à l'interaction nucléaire				
	BARYON (lourd)			• 3 quarks	
	NUCLÉON: (spin 1/2)				
	NEUTRON			2 x D + 1 x U	939,6 M
	PROTON			2 x U + 1 x D	938,3 M
	QUARK (spin 1/2)			• Up, Down • Charm, Strange • Top, Bottom	2 85 M 1,2 G & 100 M 170 G & 4,2 G
	GLUON (huit variétés, spin = 1)			force nucléaire entre quarks	0
	MÉSON (léger)			• 2 quarks (1 quark + 2 antiquarks)	
	PIONS (3 variétés) KAONS, etc.			force nucléaire entre nucléons (spin = 0)	140 MeV
force électromagnétique (spin = 1)			• PHOTON	0	
force faible			• W	80,4 G	
force faible			• Z	91,2 G	
symétrie faible (spin = 0)			• Particules de Higgs	> 100 G	
gravitation			• Graviton	0	
BOSON ou particules de jauge (spin 0, 1, 2)					

• **Principaux types d'interactions entre particules:**

Forces de gravitation:

- Intensité faible
- Longue portée
- Quantum d'énergie: graviton



Interactions faibles:

- Intensité : **10<sup>25</sup>** x forces de gravitation
- Courte portée
- Quantum d'énergie: leptons

Interactions électromagnétiques:





- Intensité: **10<sup>37</sup>** x forces de gravitation
- Longue portée
- Quantum d'énergie: photon



Interactions fortes:

- Intensité: **10<sup>39</sup>** x forces de gravitation
- Très courte portée
- Quantum d'énergie : méson

## Les 4 interactions fondamentales

	Force	Fermions	Bosons	Portée	Charge	Intensité relative
	<b>Gravitation</b> Gravité, marées, trajectoire des planètes	Toutes les particules massives	graviton (?)	infinie	masse	10 <sup>-39</sup>
	<b>Electromagnétique</b> Presque tous les phénomènes de la vie courante	Leptons chargés et quarks	photon	infinie	Charge électrique	10 <sup>-2</sup>
	<b>Forte</b> Cohésion des noyaux atomiques	quarks	gluon	10 <sup>-16</sup> m	Charge de couleur	1
	<b>Faible</b> Radioactivité β, Soleil	leptons et quarks	W <sup>+</sup> , W <sup>-</sup> , Z <sup>0</sup> bosons	10 <sup>-18</sup> m	Charge faible	10 <sup>-7</sup>

• **Lois de conservation:**

Soit l'interaction de deux particules P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>: P<sub>1</sub> + P<sub>2</sub> → P<sub>1</sub> + P<sub>2</sub> + P<sub>3</sub>

**Les principales lois de conservation:**

- ✓ **Conservation de l'énergie:** l'énergie des particules de gauche = l'énergie des particules de droite (m<sub>1</sub> + m<sub>2</sub>) c<sup>2</sup> + E1 + E2 = (m<sub>3</sub> + m<sub>4</sub> + m<sub>5</sub>) c<sup>2</sup> + E3 + E4 + E5 → pas de création d'énergie.
- ✓ **Conservation de la charge électrique:** la charge électrique des particules de gauche = la charge électrique des particules de droite → pas de création d'électricité.
- ✓ **Conservation de la quantité de mouvement:** la quantité de mouvement des particules de gauche = la quantité de mouvement des particules de droite (en somme vectorielle) m<sub>1</sub>  $\vec{v}_1$  + m<sub>2</sub>  $\vec{v}_2$  = m<sub>3</sub>  $\vec{v}_3$  + m<sub>4</sub>  $\vec{v}_4$  + m<sub>5</sub>  $\vec{v}_5$ .

## V. RAYONNEMENT COHERENT ET RAYONNEMENT INCOHERENT:

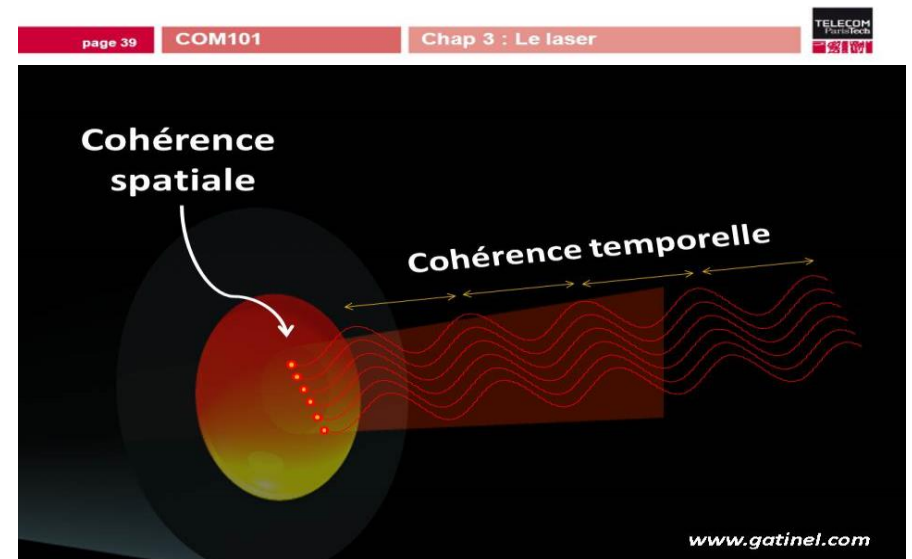
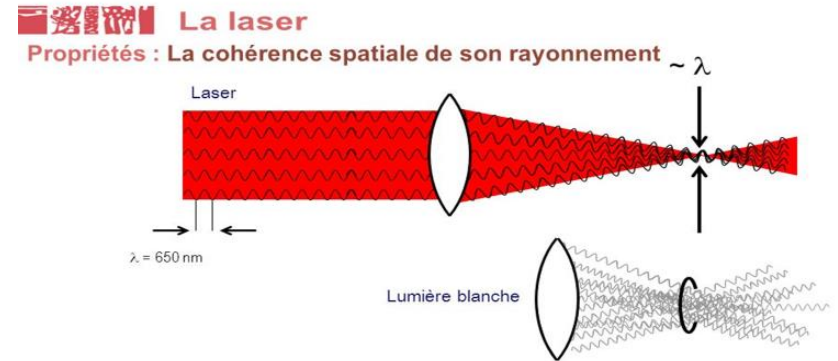
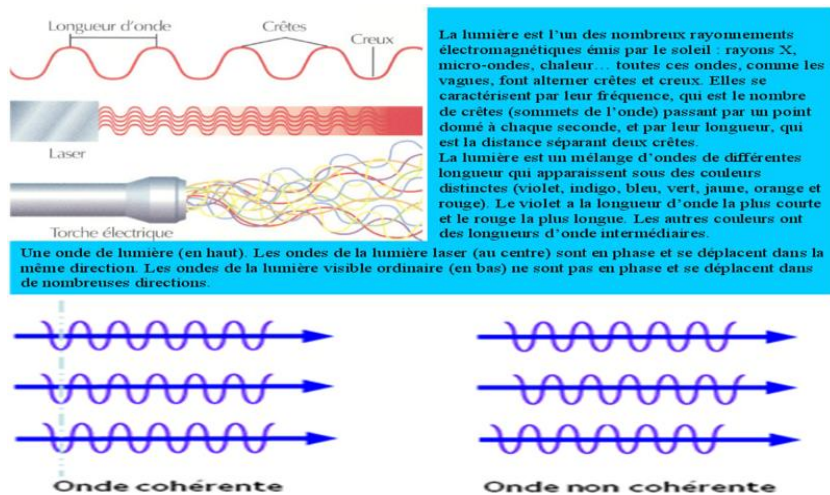
### 1) Cohérence spatiale:

Si deux rayons issus de **deux points différents** d'une source, au **même instant** peuvent donner naissance à des interférences (sont en phase), exp: lasers.

### 2) Cohérence temporelle:

Si deux rayons issus d'un **même atome** de la source à des **instants différents** peuvent donner naissance à des interférences (sont en phase), exp: lasers.

La notion de cohérence est liée à l'existence de **relations de phase** bien déterminées entre deux radiations (ie, à la possibilité de les faire interférer).



## Cohérence temporelle

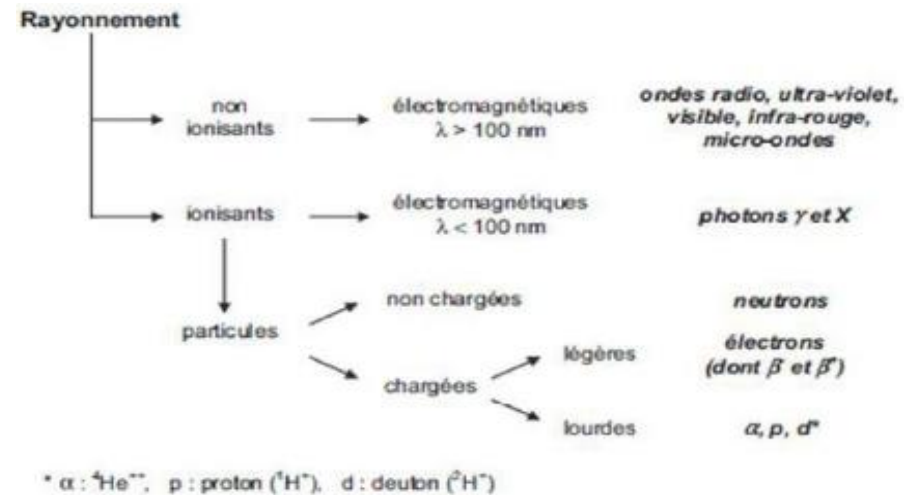
Emission laser

Train d'onde de longue durée

Emission source ordinaire

Suite de trains d'onde de courte durée ayant entre eux des différences de phase aléatoires

L'émission de lumière par un laser s'effectue par des trains d'onde très longs, beaucoup plus longs que ceux émis par une source ordinaire (bonne *cohérence temporelle*). Cela joue sur la monochromaticité.



## VI. RAYONNEMENTS IONISANTS ET NON IONISANTS:

### 1) Rayonnements ionisants:

- Énergie **suffisante** pour arracher un électron à une structure moléculaire biologique (pour ioniser H et O): énergie **> 13,6 eV**  
Exemples: Rayonnement électromagnétique (X,  $\gamma$ ).
- L'énergie d'ionisation des principaux atomes d'intérêt biologique (en eV):  
C: 11,24 / **H: 13,54** / **O: 13,57** / N: 14,24 eV

### 2) Rayonnements non ionisants:

- Énergie **insuffisante** pour ioniser H et O.
- Toutes les radiations électromagnétiques d'énergie **< 13,6 eV**.  
Exemples: UV, visible, IR.
- L'énergie d'ionisation des principaux atomes d'intérêt biologique (en eV):  
C: 11,24 / **H: 13,54** / **O: 13,57** / N: 14,24 eV
- Les photons des rayonnements UV les plus énergétiques ont une énergie de **12,4 eV**, ceci justifie qu'on nomme les rayonnements non ionisants toutes les radiations électromagnétiques d'énergie **< 13,6 eV**.