

LES RAYONNEMENTS IONISANTS

Chapitre 1

Les particules, les ondes

Chapitre 2

Les rayonnements en médecine

Chapitre 3

Les rayonnements ionisants

Chapitre 4

Interaction rayonnement-matière

Chapitre 5

Fabrication et détection

Chapitre 1

Les particules, les ondes

1. Quelques outils mathématiques
2. Les particules élémentaires
3. L'atome
4. Les ondes
5. Éléments de Mécanique Quantique

1 Quelques outils mathématiques

1-1 Systèmes d'unités

- Système minimal d'unités à partir desquelles toutes les autres unités vont se définir
- Exemple : en mécanique **le système LMT**

Unités fondamentales			Exemples d'unités dérivées			
Longueur	masse	Temps	Force	Pression	Travail	Puissance
[L]	[M]	[s]				



- Système International SI

Grandeur physique	Dimension	Symbole	Nom
Longueur	[L]	m	Mètre
masse	[M]	kg	kilogramme
temps	[T]	S	seconde
courant électrique	[I]	A	Ampère
température thermodynamique	[θ]	K	Kelvin
quantité de matière	[N]	Mol	mole
intensité lumineuse	[I]	Cd	candela

- Définitions des Unités de base

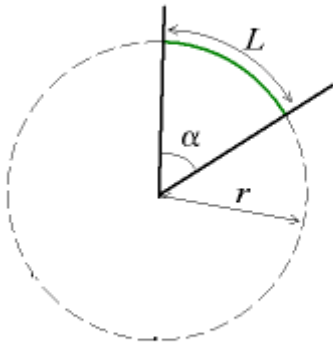
Nom	Grandeur physique
mètre	distance parcourue par la lumière dans le vide en $1/299\,792\,458$ sec

- Unités adaptées

Nom	Symbole
minute	min
heure	h
jour	jour
degré d'angle	°
minute d'angle	'
seconde d'angle	"
litre	ℓ
électronvolt	eV
unité de masse atomique	uma ou u
micron	μm

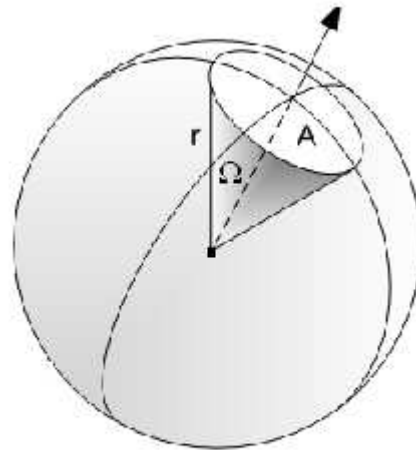
- Unités d'angle

angle



$$\alpha = \frac{L}{r}$$

angle solide



$$\Omega = \frac{A}{r^2}$$

de 0 à 2π radians

de 0 à 4π stéradians

- **Les grandeurs sans dimension** (dimension 0)

rapport de 2 grandeurs de même dimension

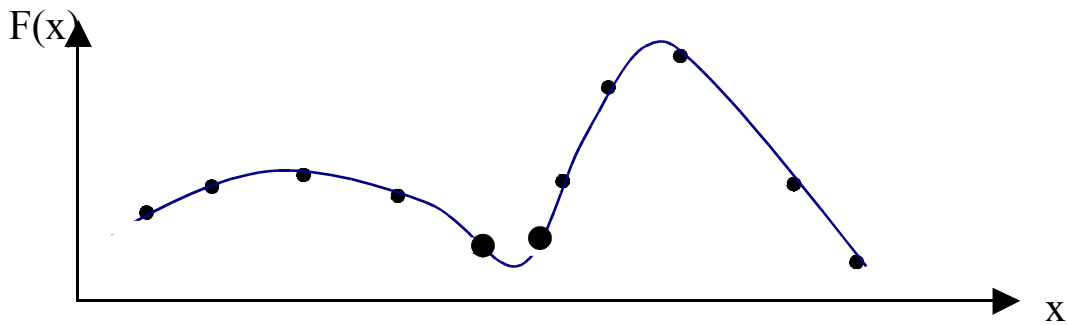
- sans nom : indice optique $n =$ rapport de 2 vitesses
- avec nom : angle ou angle solide

1-2 Fonctions mathématiques élémentaires

1-2-1 La fonction polynomiale

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{k_i} p_{i,j} x_i^j$$

$$f(x) = \sum_{j=1}^{k_i} p_j x^j$$



1-2-2 La fonction exponentielle

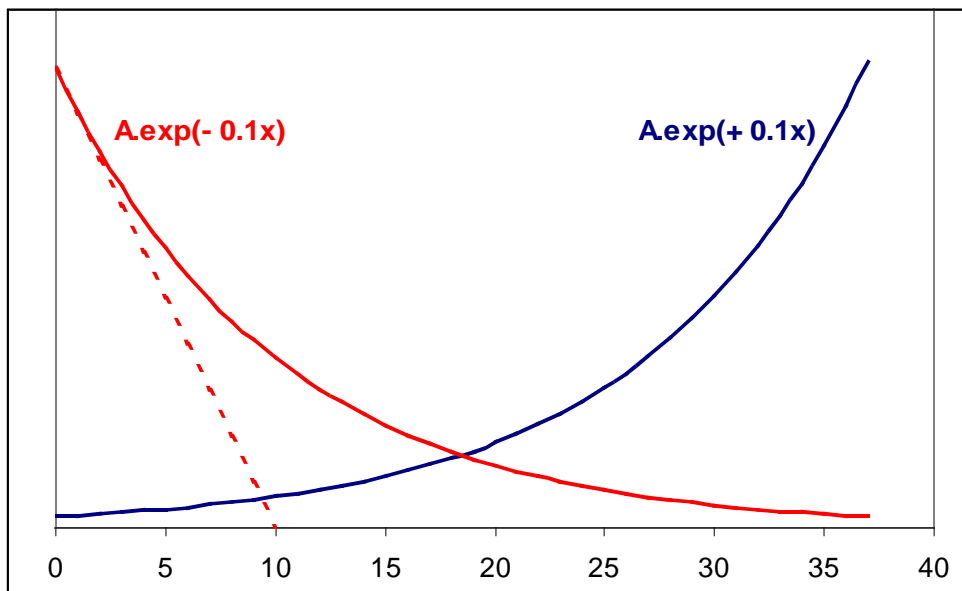
la variation de la grandeur est proportionnelle à la grandeur :

$$\frac{dF}{dx} = \alpha.F \quad \longrightarrow \quad \frac{dF}{F} = \alpha.dx \quad \longrightarrow \quad F = F_0.e^{\alpha.x}$$

F_0 représente la valeur de F quand $x = 0$

→ variation naturelle

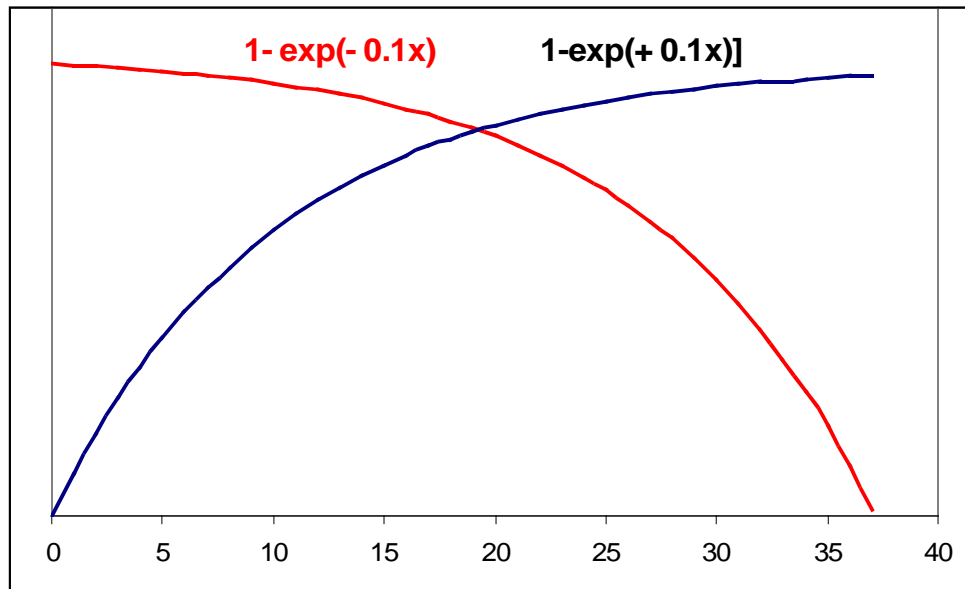
→ le sens de la variation est donné par le signe de α :



**Décroissance
radioactive**

**Croissance d'une
population**

autre forme de variation exponentielle



Chauffage d'un élément de matière

1-2-3 La fonction logarithme

- le logarithme népérien (ou naturel)

$$y = e^x \Rightarrow x = \ln(y)$$

- le logarithme à base 10

$$y = 10^x \Rightarrow x = \log(y)$$

Utilisée pour le tassement des échelles ou pour la modélisation

1-2-4 La fonction sinusoïdale

Fonction périodique ou cyclique caractérisée par l'équation :

$$\frac{d^2S}{dt^2} = -\omega^2 S$$

$$S(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$$

2 - Les particules élémentaires

12 particules élémentaires (+ **antiparticules**) forment la matière :

- 6 quarks
- 6 leptons

2-1 Les quarks

up (u)	→	charge : $2/3e$	($e = 1.62 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)
charm (c)	→	charge : $2/3e$	
truth (t)	→	charge : $2/3e$	
down (d)	→	charge : $-1/3e$	
strange (s)	→	charge : $-1/3e$	
bottom (b)	→	charge : $-1/3e$	

s'associent par trios pour former les **hadrons**

2-2 Les leptons

électron (e^-)	→	charge : $-e$	+ neutrino (ν_e) : masse et charge nulles
muon (μ^-)	→	charge : $-e$	+ neutrino (ν_μ) : masse et charge nulles
tau (τ^-)	→	charge : $-e$	+ neutrino (ν_τ) : masse et charge nulles

2-3 Les interactions et les bosons

Les 12 paires de particules et d'antiparticules interagissent entre elles suivant 4 (ou 3) interactions fondamentales :

Interaction forte → action très faible distance (10^{-15} m)
→ les hadrons

Interaction faible → action très faible distance (10^{-18} m)
→ toutes particules

Interaction électromagnétique → action à grande distance (∞)
→ particules chargées

Interaction gravitationnelle → action à grande distance (∞)
→ particules massives

Ces interactions supposent un échange d'énergie qui peut s'assimiler à un troisième type de particule :

L'interaction forte → le gluon

L'interaction faible → les bosons

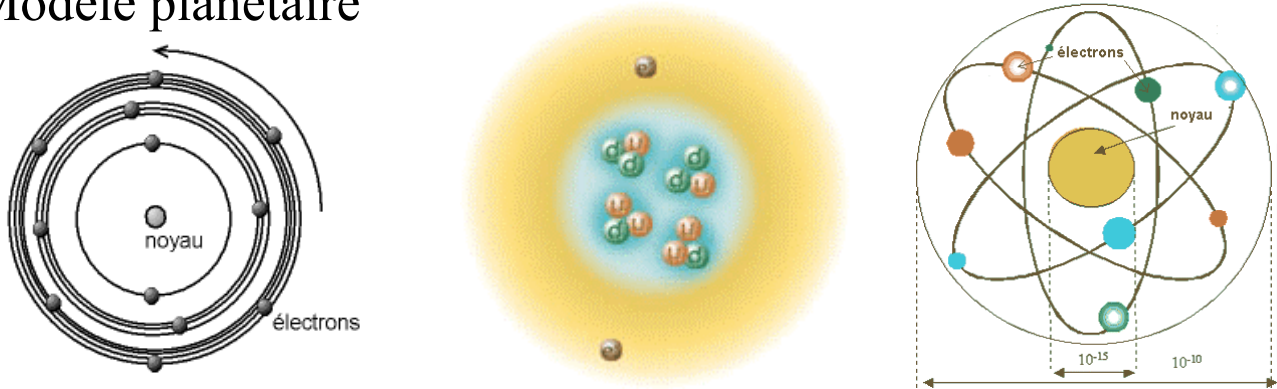
L'interaction électromagnétique → le photon

La gravitation → le graviton

3 - L'atome

3-1 Structure de l'Atome

Modèle planétaire



Le noyau est fait de 2 types de nucléons :

le proton : **p** découvert en 1918

composé de 3 quarks : $uud \rightarrow \text{charge} = 2 \times \frac{2}{3} - \frac{1}{3}e = +e$

masse : $m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1836 \cdot m_e$

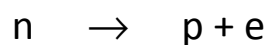
C'est une particule stable

le neutron **n** découvert en 1932

composé de 3 quarks : $udd \rightarrow \text{charge} = \frac{2}{3}e - 2 \times \frac{1}{3}e = 0$

masse : $m_n = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \approx m_p$

particule instable hors du noyau: durée de vie $\approx 15 \text{ min}$



Le cortège électronique :

- nombre d'électrons = nombre de protons

- électrons positionnés en couches \rightarrow niveau d'énergie

- 4 nombres quantiques

3-2 Classification des atomes

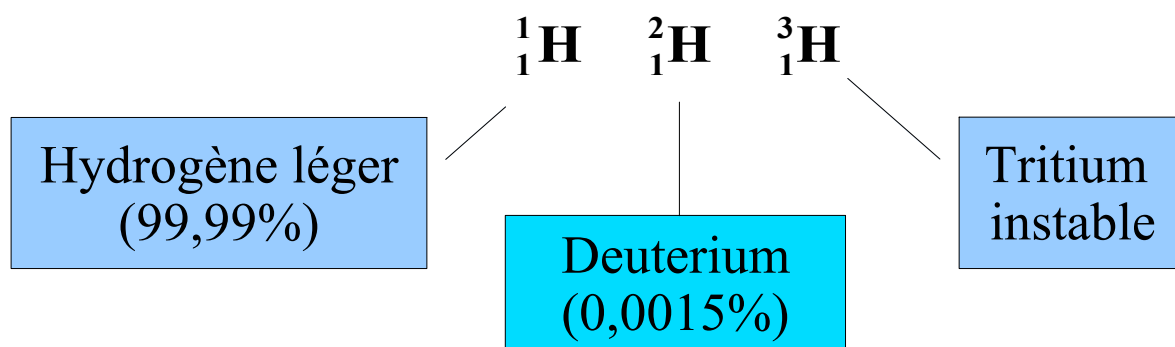
un atome de symbole chimique X est défini par : ${}^A_Z X$

→ Nombre de masse A : nbre de nucléons (protons+neutrons)

→ Numéro atomique Z : nbre de protons (ou d'électrons)

→ On utilise aussi le nombre N : nombre de neutrons ($A - Z$)

Isotopes : même numéro atomique Z . Exemples :



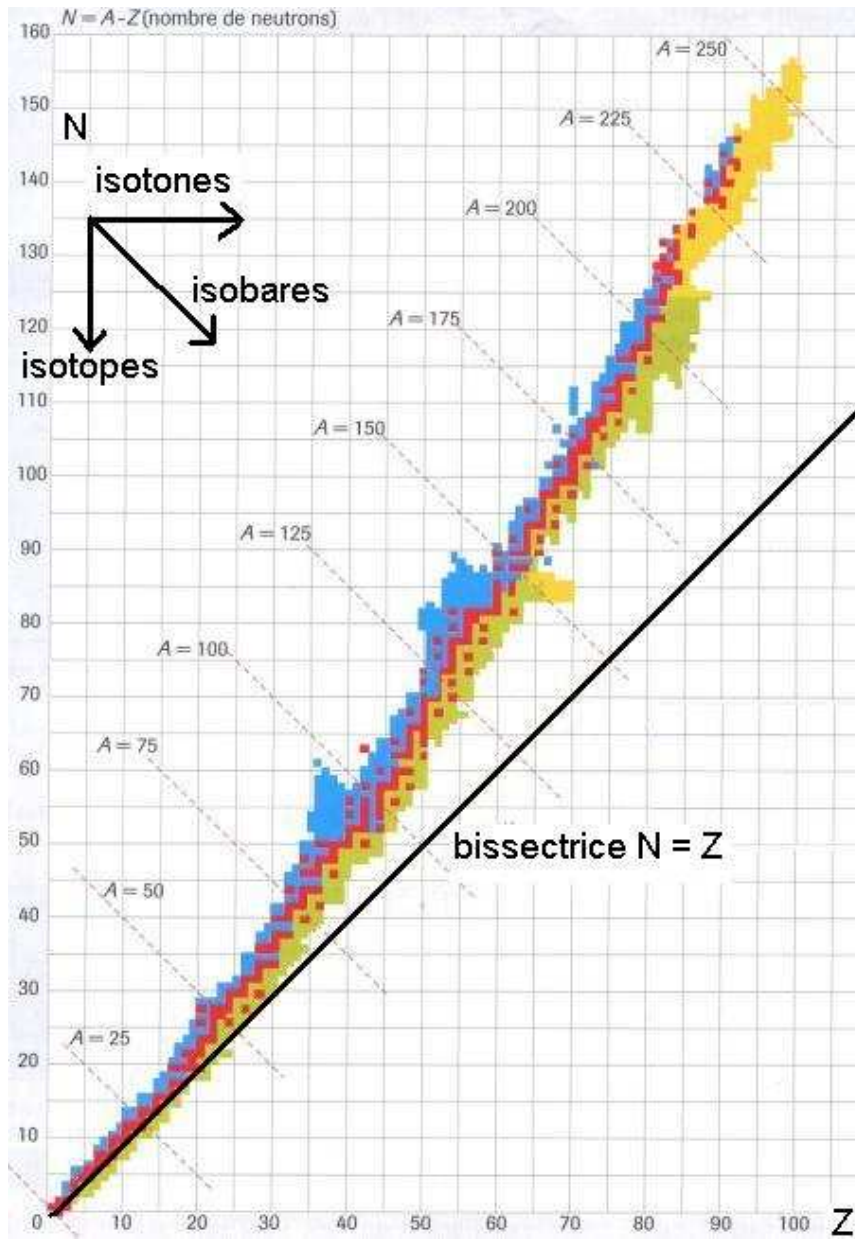
Isobares : même nombre de masse A

Isotones : même nombre de neutrons N

Isomères : même A et Z mais dans des états d'énergie différents.

Classement par nombre de masse A

Vallée de la stabilité



3-3 Unités associées au noyau

- **Unité de masse atomique : u.m.a. ou u**

$$m_e \ll m_p \text{ et } m_n$$

→ le noyau porte toute la masse de l'atome

$$m_p \text{ et } m_n \ll \text{kg}$$

→ il faut définir une nouvelle unité de masse

➡ L'uma est la douzième partie de l'atome de carbone ^{12}C :

$$1 \text{ u.m.a.} = \frac{1}{12} \cdot \frac{12 \cdot 10^{-3}}{N} = \frac{1}{6.02} \cdot 10^{-26} \text{ kg}$$

N = Nbre d'Avogadro
N = $6.0221415 \cdot 10^{23}$

$$m_p = 1,007 \text{ u} \quad m_n = 1,009 \text{ u}$$

▪ **Unité d'énergie : l'ectronvolt - eV**

Les joules : pas adaptés aux énergies nucléaires



1eV = énergie acquise par 1 é ds un potentiel de 1V

$$E = qV$$



$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

▪ **Correspondance masse - énergie**

$$E = mc^2 \qquad c = 299,8 \cdot 10^6 \text{ ms}^{-1}$$

→ joules = kg x c² (m/s)²

▪ **Correspondance uma - eV**

$$1u \times c^2 = \frac{1}{6.02} \cdot 10^{-26} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \cdot \frac{1}{1.6 \cdot 10^{-19}} \cdot 10^6 = 931,502 \text{ MeV}$$

ou encore

$$1 \text{ uma} = 931 \text{ MeV}$$

3- 4 Energie de liaison

La liaison des nucléons par interaction forte



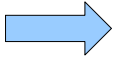
perte de masse de chaque nucléon

Considérons un noyau renfermant Z protons et N neutrons



La masse théorique de ce noyau est : $M = Z \times m_p + N \times m_n$

Mais masse réelle est : $\mu < M$



On appelle **défaut de masse** la quantité :

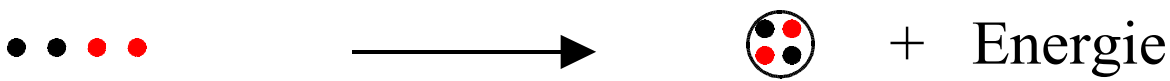
$$\Delta M = |M - \mu|$$

A ce défaut de masse correspond une énergie:

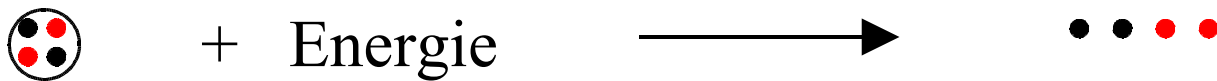
$$\Delta E_\ell = \Delta M \cdot c^2$$

ΔE_ℓ représente l'énergie de liaison du noyau

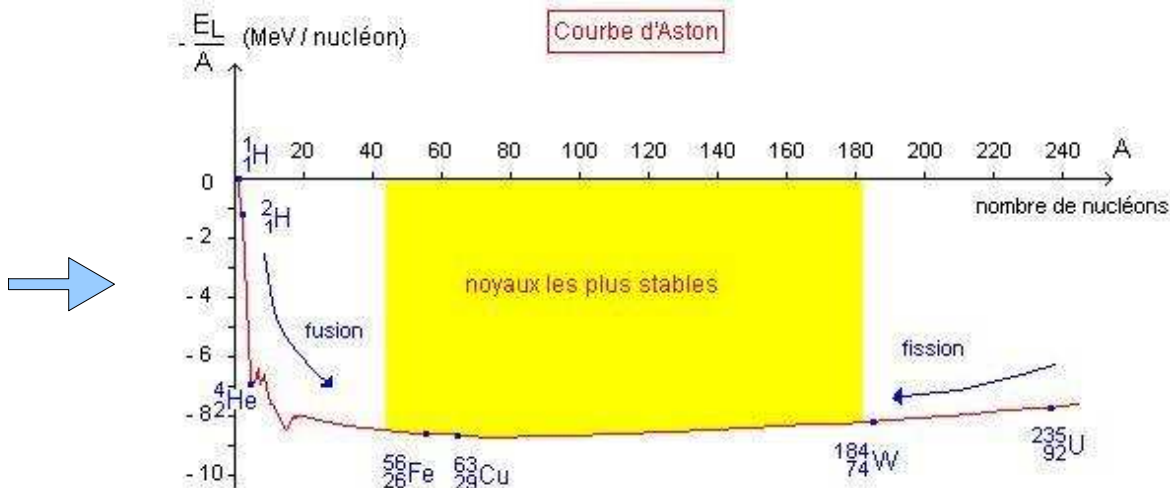
C'est l'énergie qui fut libérée lors de la création du noyau



C'est l'énergie qu'il faut fournir pour détruire le noyau



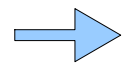
ΔE_ℓ est sensiblement proportionnelle à A



4 - Les ondes

4 - 1 L'onde progressive

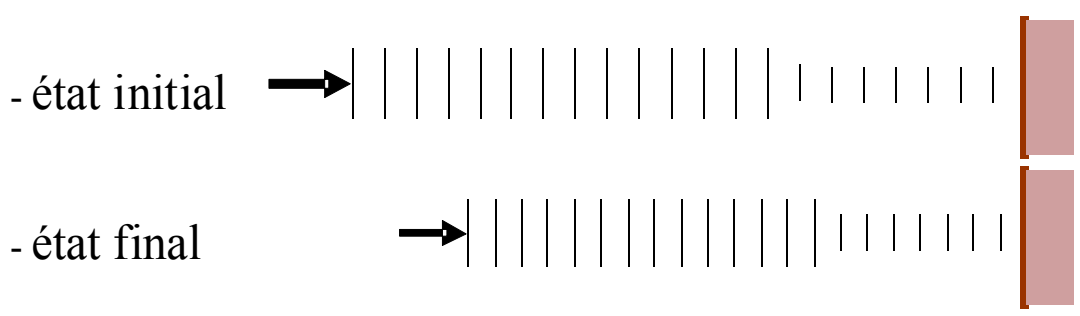
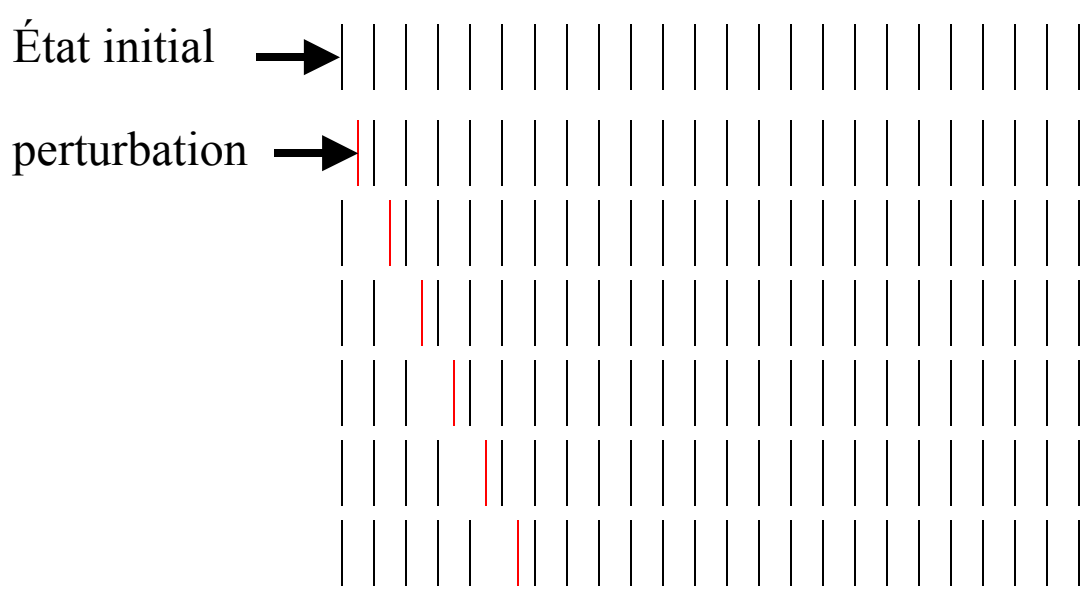
perturbation locale
d'un milieu



propagation de
la perturbation

- Perturbation de la pression (son)
- Perturbation de la densité
- Perturbation de la température
- Déformation mécanique
- Variation d'un champ électromagnétique
- ...

Source d'énergie :



onde progressive = **propagation d'énergie**

Vitesse de **propagation** = **célérité c**

4 - 2 L'onde progressive sinusoidale

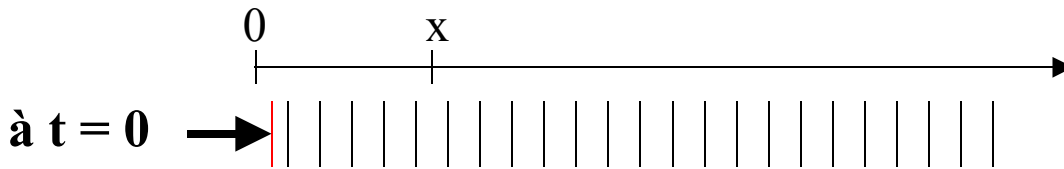
La source provoque une perturbation sinusoidale

$$\Psi(x_0, t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

perturbation quelconque ?



Théorème de Fourier



Δt sec plus tard

$$\Psi(x, t) = A \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{c} x\right)$$

$$\Psi(x, t) = A \cdot \sin(\omega t - kx)$$

$$|\vec{k}| = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} = \text{vecteur d'onde}$$

4 - 2 Equation d'onde

Fonction d'onde $\longrightarrow \Psi(x,t) = A \cdot \sin(\omega t - \frac{\omega}{c} x)$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \Psi^2(x,t)}{\partial x^2} = -\frac{1}{c^2} A \cdot \omega^2 \sin(\omega t - \frac{\omega}{c} x) \\ \frac{\partial \Psi^2(x,t)}{\partial t^2} = -A \cdot \omega^2 \sin(\omega t - \frac{\omega}{c} x) \end{array} \right.$$

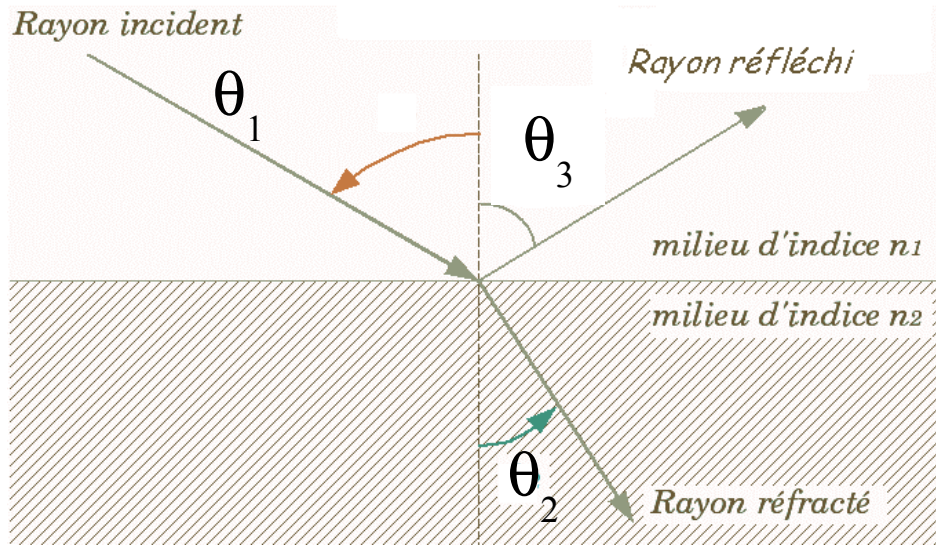
$$\Rightarrow \frac{\partial \Psi^2(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial \Psi^2(x,t)}{\partial t^2}$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{\partial \Psi^2(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial \Psi^2(x,t)}{\partial t^2} = 0}$$

Équation d'une onde se propageant à la vitesse c

4 - 3 Effet du milieu

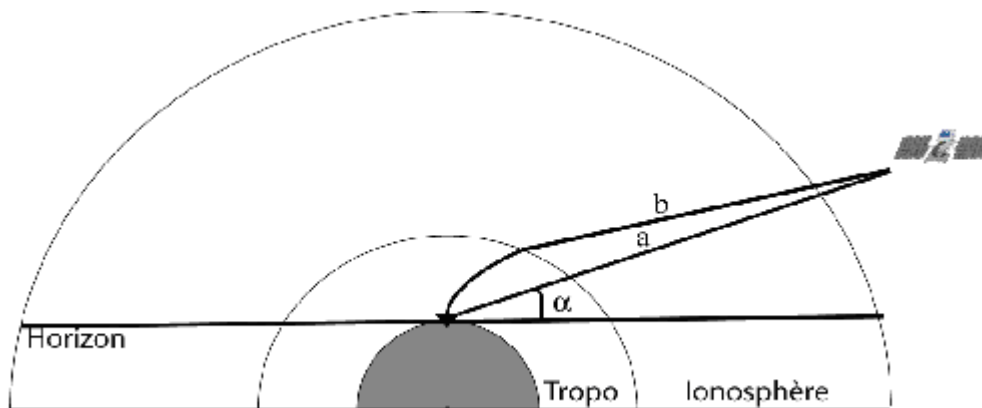
▪ Milieu à variation brutale d'indice



réflexion : $\theta_1 = \theta_3$

réfraction : $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$

▪ Milieu à variation continue d'indice



▪ Milieu fermé

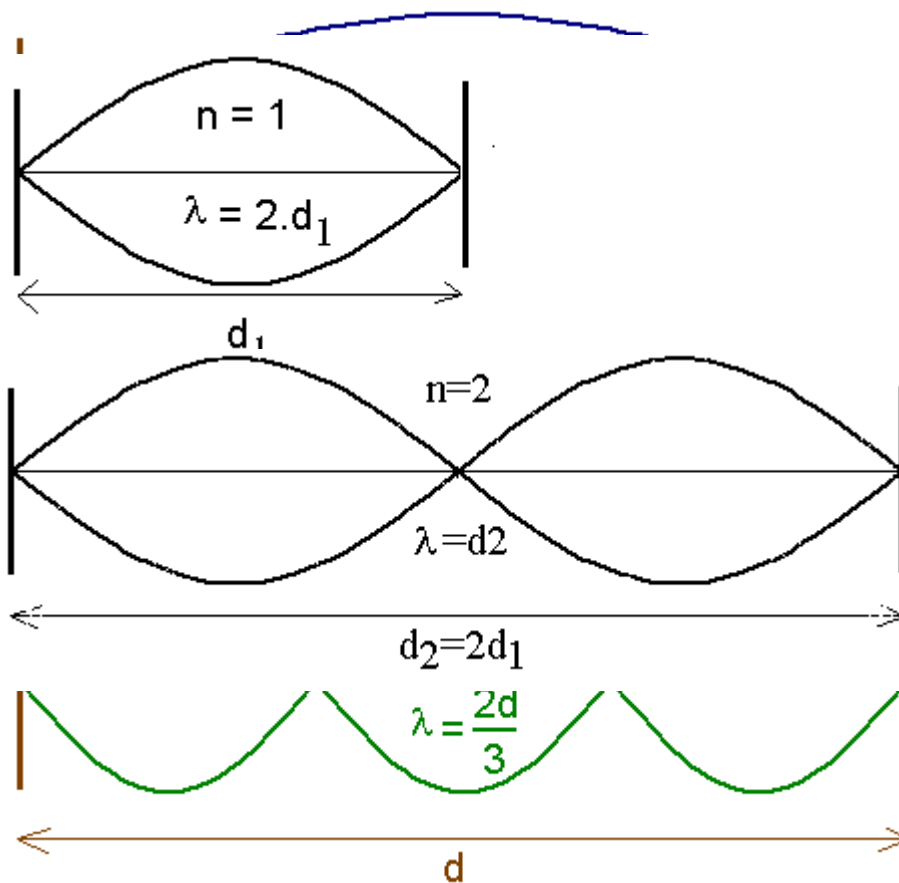
Onde incidente $\longrightarrow \Psi_i(x,t) = A.\sin(\omega t - \frac{\omega}{c}x)$

Onde réfléchie $\longrightarrow \Psi_r(x,t) = A.\sin(\omega t + \frac{\omega}{c}x)$

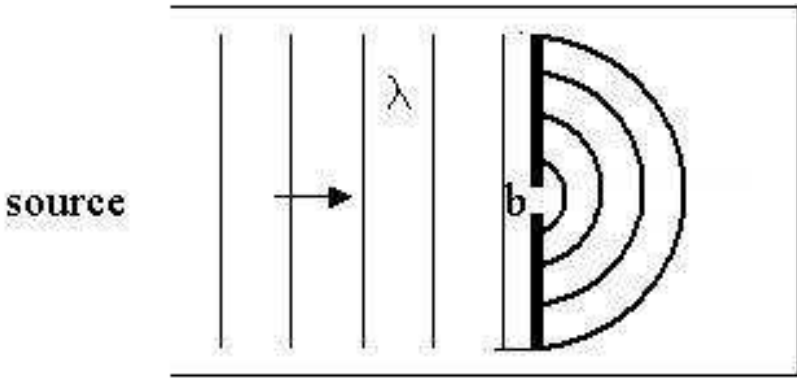
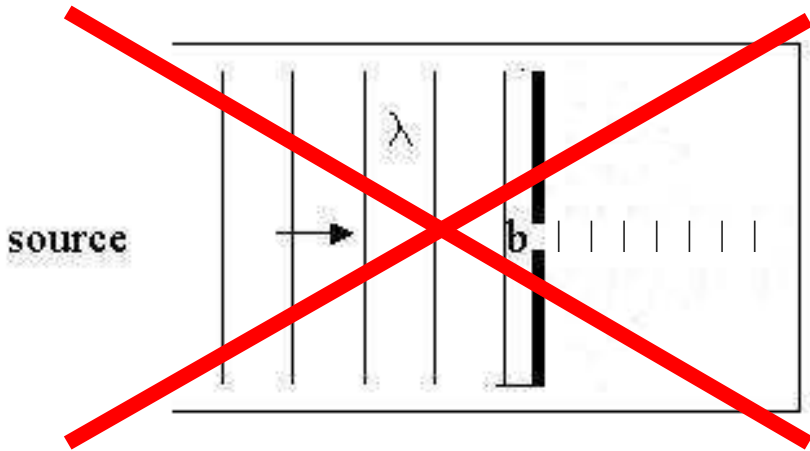
superposition des ondes incidente et réfléchie

ONDES STATIONNAIRES

$$\Psi(x,t) = -2A.\sin(kx)\cos(\omega t) \longrightarrow \lambda = \frac{2d}{n}$$



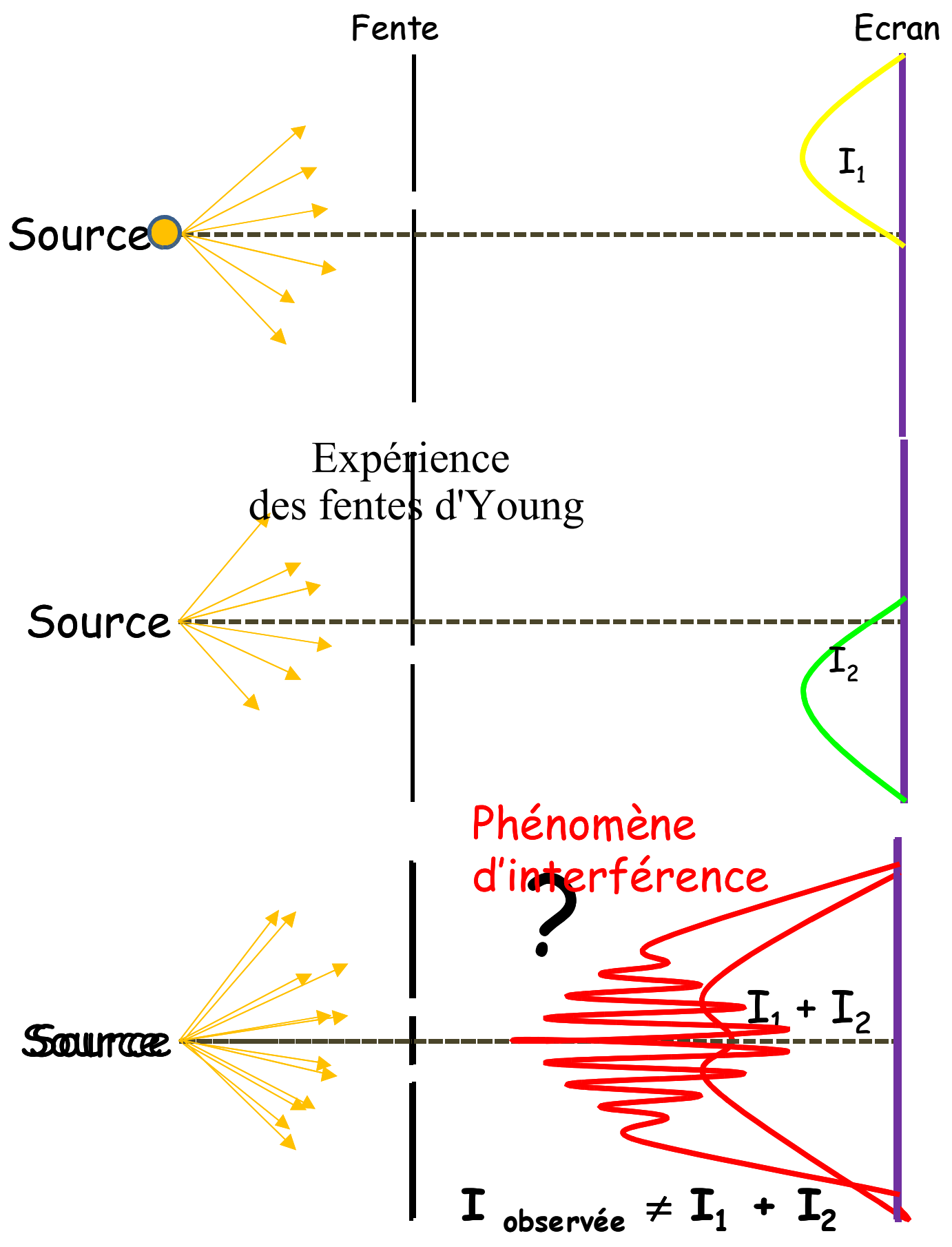
▪ **Obstacle de faible de dimension inférieur à λ**



DIFFRACTION

$$b \ll \lambda$$

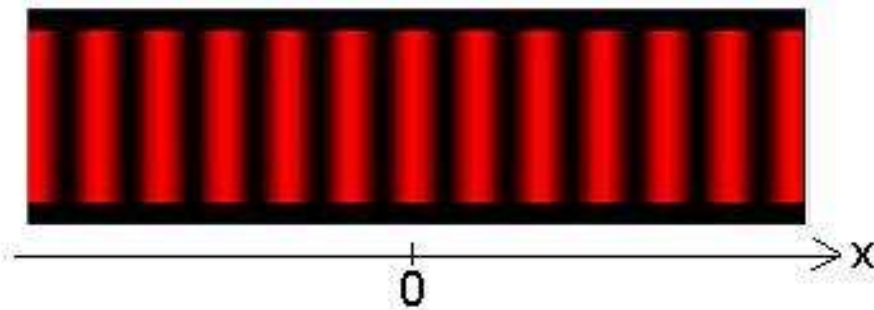
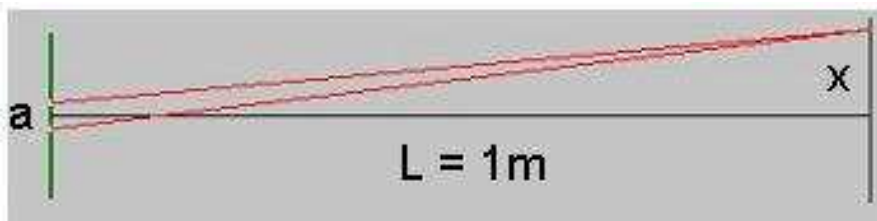
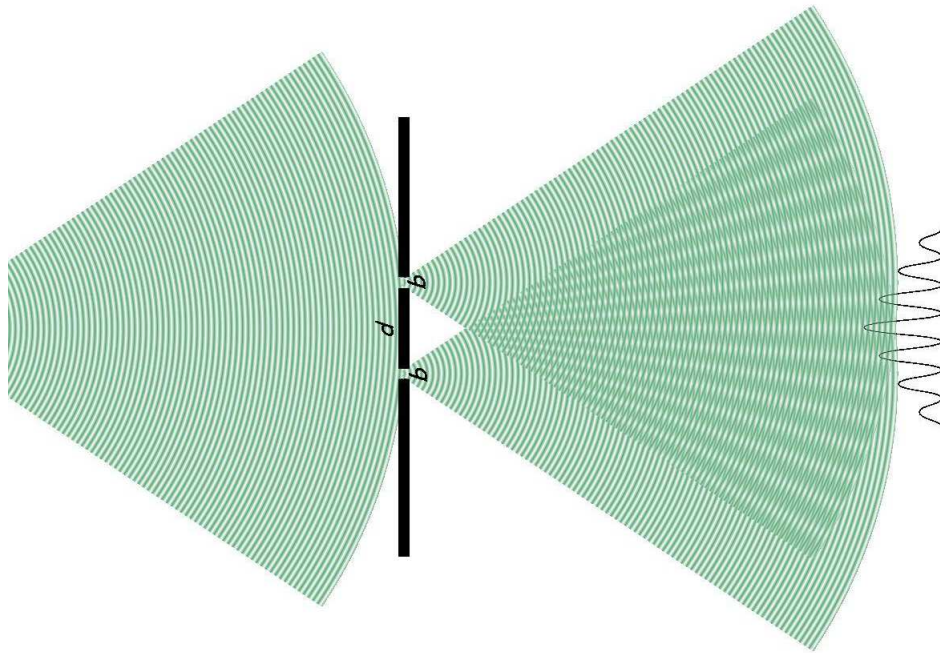
Superposition d'ondes : interférence



Superposition de 2 ondes cohérentes (même ω et φ constant)



INTERFERENCE



5 - Éléments de mécanique quantique

5 - 1 Dualité Onde-Corpuscule

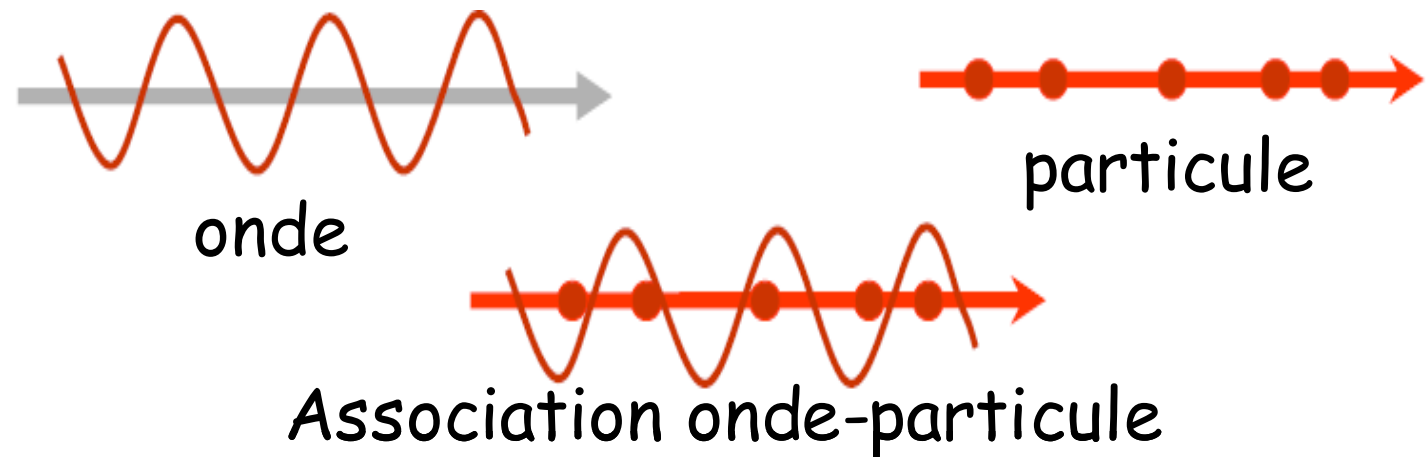
Mécanique classique



plusieurs phénomènes non expliqués



nouvelle idée : donner un aspect corpusculaire et ondulatoire à toute particule



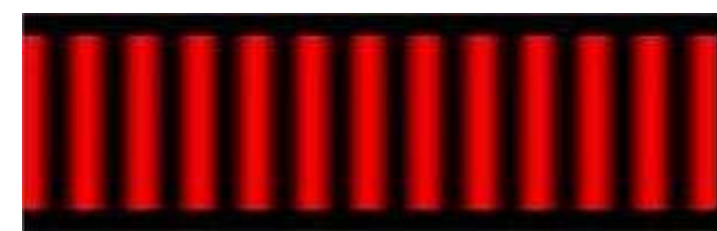
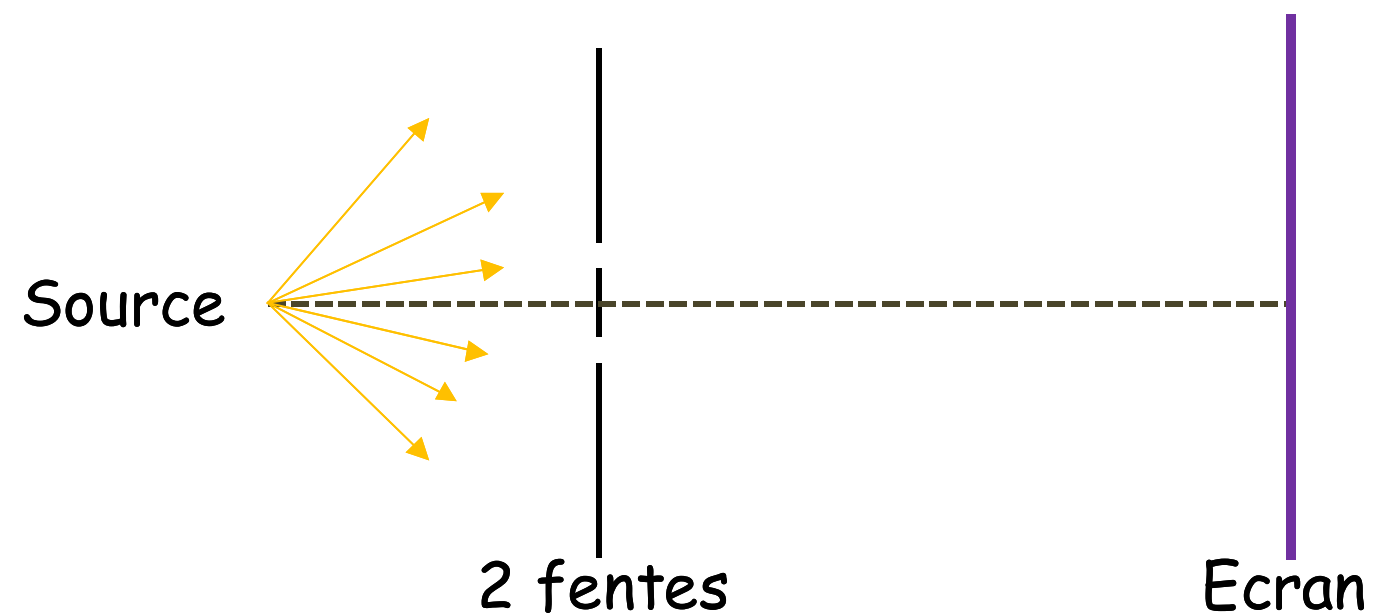
Exemple 1 : onde électromagnétique \Leftrightarrow photon

problème d'interférence \rightarrow aspect ondulatoire

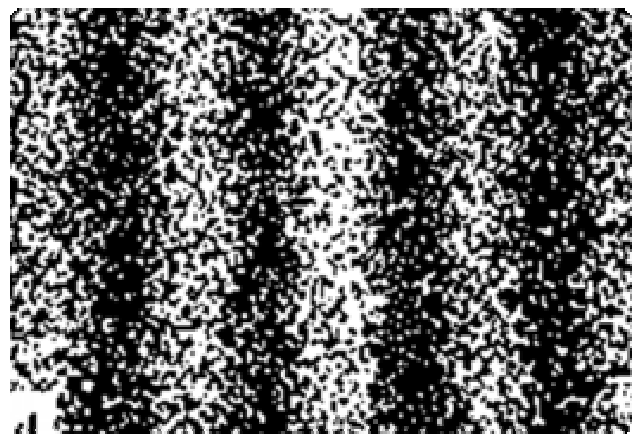
interaction avec la matière \rightarrow aspect corpusculaire

Exemple 2 :

phénomène d'interférence observé avec des e^-



Interférence de 2 faisceaux lasers

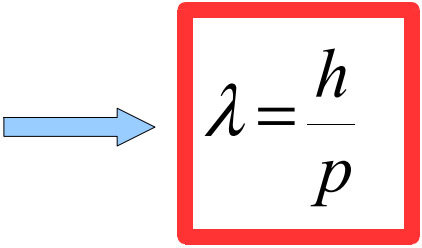


Interférence de particules

Relation de de Broglie

Aspect ondulatoire : $\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{u}$

Aspect corpusculaire : $\vec{p} = m\vec{v}$


$$\lambda = \frac{h}{p}$$

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

Constante de Plank

- Pour un homme de 70kg courant à 10km/h

$$\rightarrow \lambda = 3,4 \cdot 10^{-36} \text{ m} \quad \text{insignifiant !}$$

- Pour un é accéléré dans un potentiel de 100 V

$$\rightarrow \lambda = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

\Rightarrow dimension de l'atome !

\Rightarrow diffraction par la matière possible

Vérifié expérimentalement (1927)

5 - 2 Conséquences

Orbite atomique discrète (cas d'1 é et d'1 p):

L'é évolue ds milieu fermé → **ondes stationnaires**

$$\lambda = \frac{2d}{n} \quad \text{avec ici } d = 2\pi r$$

Chaque valeur de **n** définit une orbite

$$r_n = n^2 r_0 \quad \text{avec } r_0 = 0.5/Z \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Niveau d'énergie:

A chaque orbite correspond une énergie :

$$E(\text{eV}) = -13,6 \frac{Z^2}{n^2}$$

Si plusieurs électrons → effet d'écran → Z^*

Relation de quantum:

Quelle énergie attribuer à la particule associée à l'onde?

$$E = h\nu$$

5 - 3 L'atome en mécanique quantique

Equation de Schrödinger

(fonction de probabilité de présence)

Nbre quantique principal **n** :

valeurs entières positives

K (n=1) L(n=2) M(n=3)

correspond aux orbites classiques

Nbre quantique **ℓ** : valeurs de 0 à n-1

s(ℓ=0) p(ℓ=1) d(ℓ=2) f(ℓ=3)

associé au moment cinétique orbital

Nbre quantique magnétique **m** : de -ℓ à +ℓ
(2ℓ+1 valeurs)

associé au moment magnétique orbital

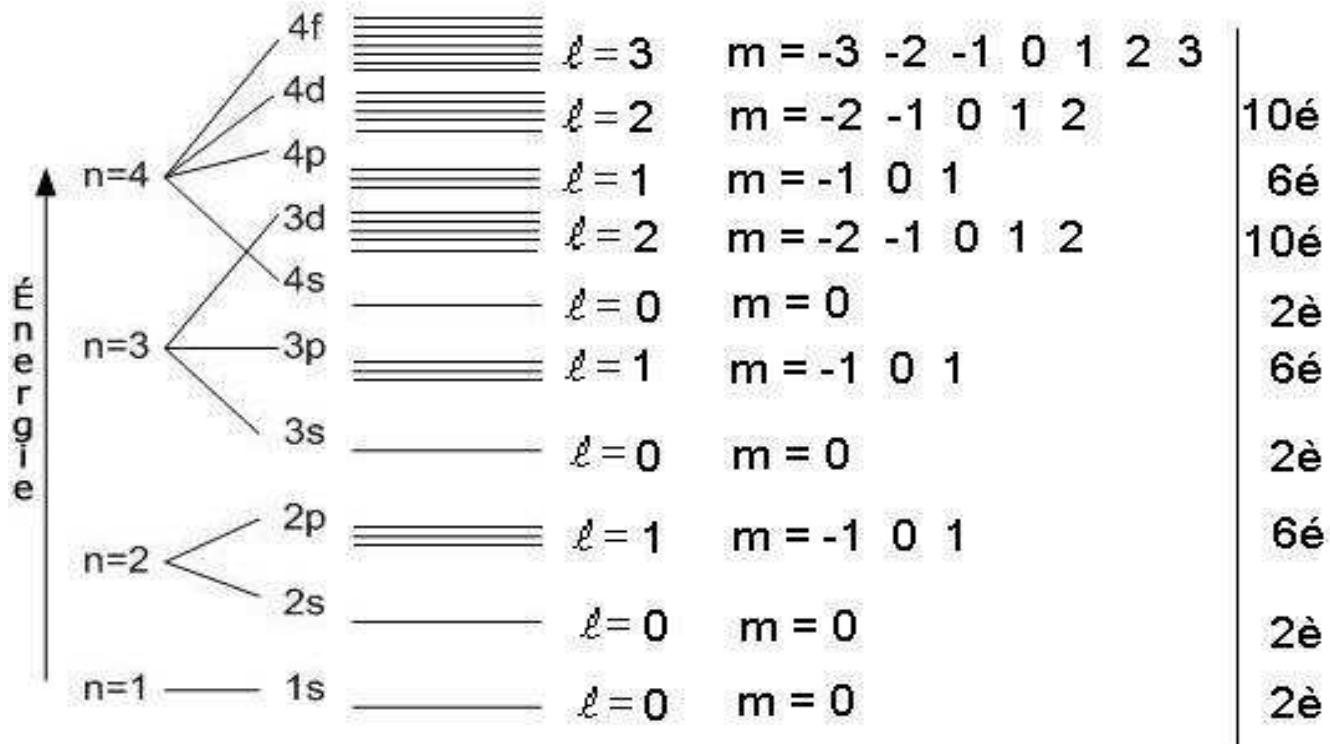
Nbre quantique de spin **s** : -1/2 +1/2

associé au moment magnétique de spin

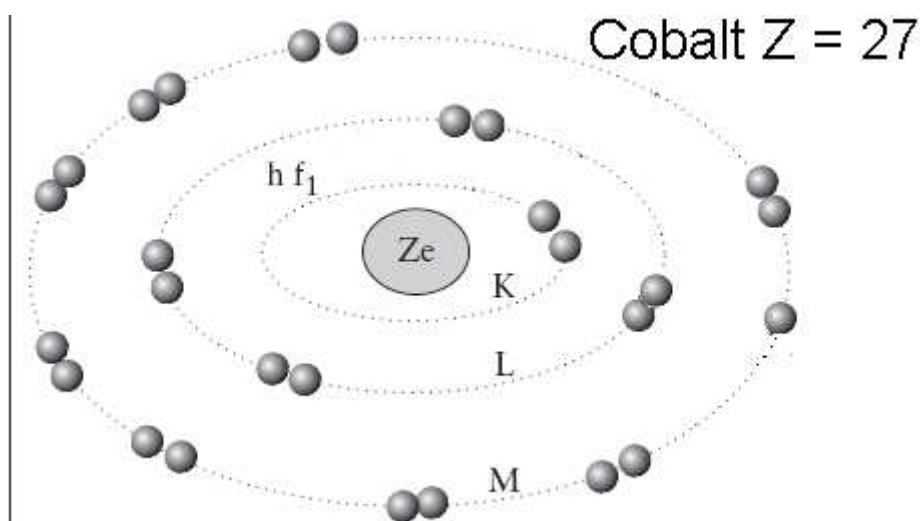
Règle d'exclusion de Pauli :

1 é  4 nombres quantiques

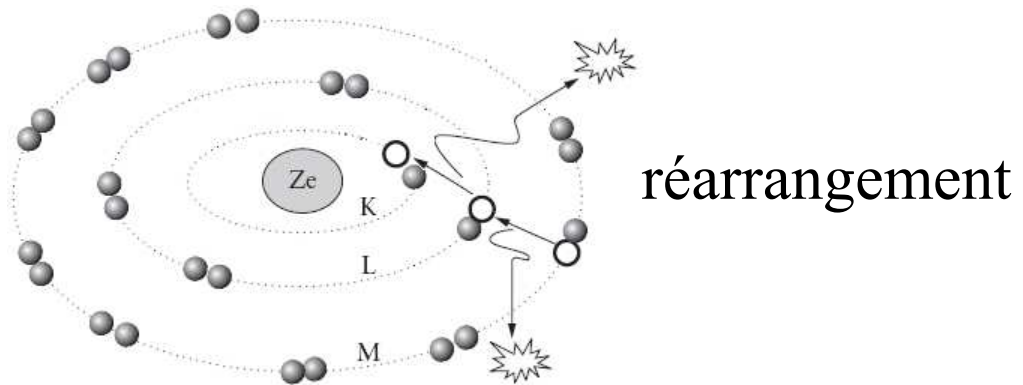
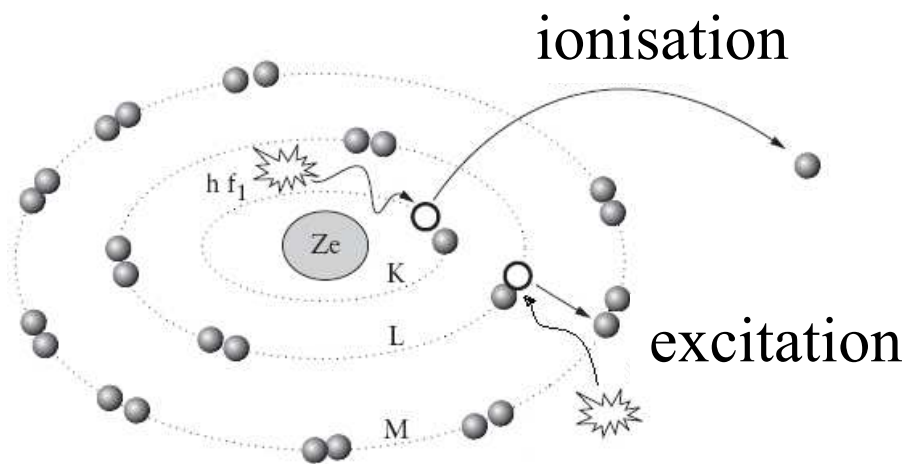
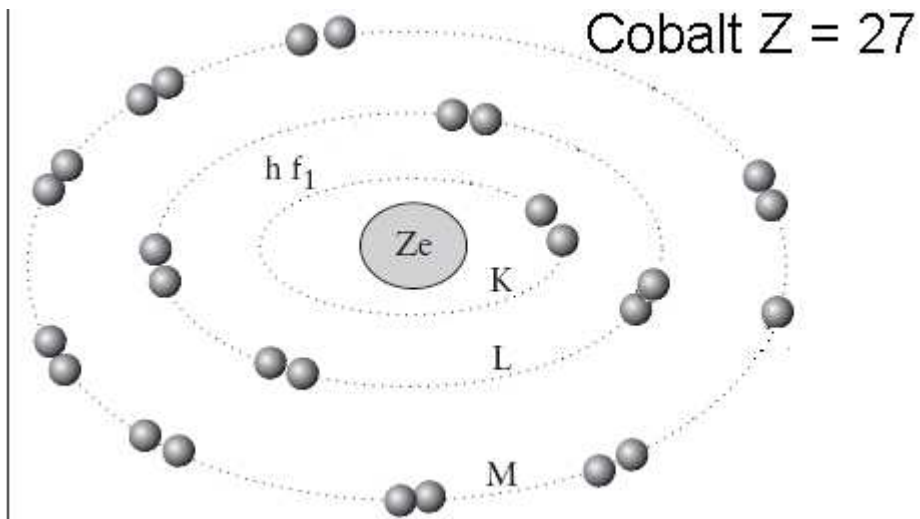
Sur une couche de niveau n on peut positionner $2n^2$ électrons



- ⇒ d'un point de vue énergétique une couche « pleine » est considérée comme stable :
- ⇒ L'atome est stable quand les é occupent les niveaux d'énergie les plus bas
- ⇒ Si ce n'est pas le cas l'atome est dit "excité"



atome stable, ionisé, excité



5 - 4 Le noyau en mécanique quantique

Equation de Schrödinger
(fonction de probabilité de présence)

Les nucléons sont organisés en couches

Existence de 4 nombres quantiques pour
chaque espèce, neutrons et protons

Règle d'exclusion de Pauli :

1 proton	↔	4 nombres quantiques
1 neutron	↔	4 nombres quantiques

