

Chap 15:

La nature de la lumière

"Si nous savions ce qu'est un rayon de lumière, nous saurions beaucoup de choses".

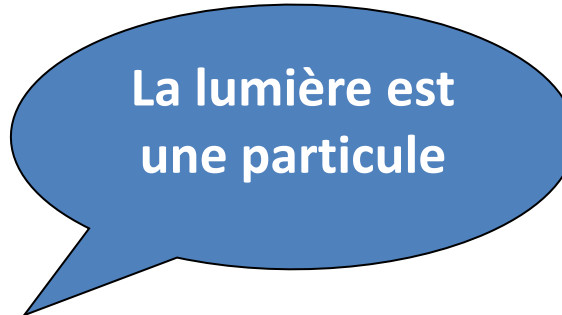
Louis de Broglie.

I. Le contexte :

Petit historique: Au XVII^{ème} siècle, deux scientifiques avaient des visions différentes sur la nature de la lumière.....



Isaac Newton
1643 - 1727



Christian Huygens
1629 - 1695

Qui a gagné ?

L'autorité de Newton laisse la nature ondulatoire de côté
durant plus d'un siècle !

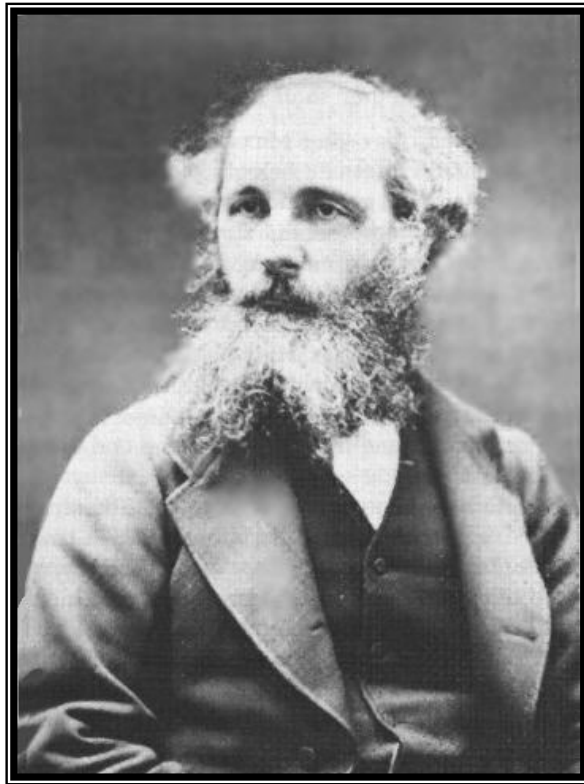
Thomas Young

C'est en 1800 que Young remet en question l'interprétation corpusculaire de la lumière. En observant les couleurs d'une bulle de savon, il voit s'entremêler deux ondes réfléchies, l'une par la face extérieure et l'autre par la face intérieure. Les vitesses de la lumière sont différentes dans l'air et dans l'eau (comme l'a montré aussi Huygens).

**La lumière n'est pas une
particule!**



- **En 1860:** Théorie électromagnétique de Maxwell



Prédictions d'ondes électromagnétiques se propageant à la vitesse de la lumière.

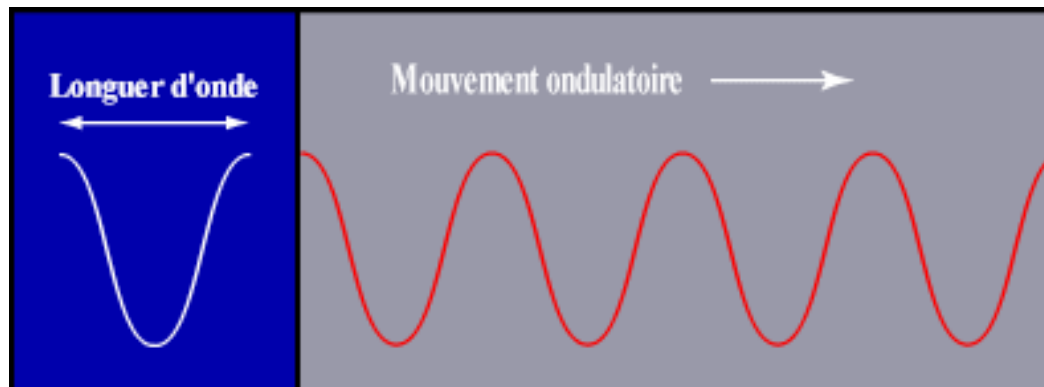
Propriétés de la lumière

La vitesse de la lumière est la même pour toutes les ondes électromagnétiques.

$$c = 3,0.10^8 m.s^{-1}$$

La longue d'onde λ est la distance entre deux crêtes ou deux creux consécutifs.

La fréquence représente le nombre d'oscillations par seconde.

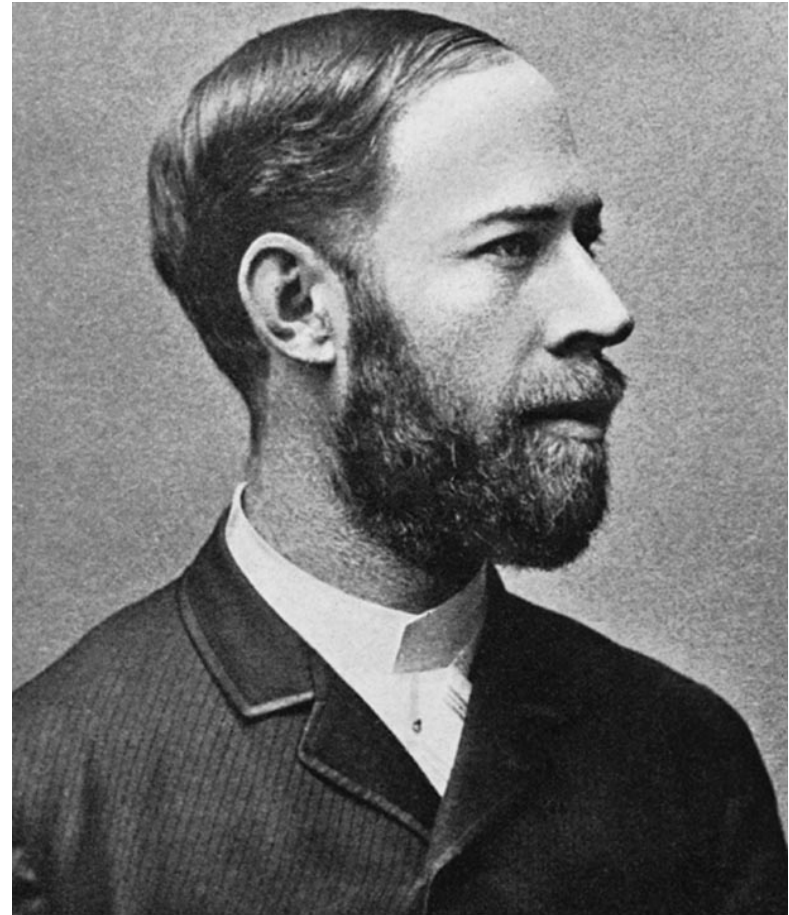


Exemple 1

Soit un rayon X dont la fréquence est de 3×10^{18} Hz. Calculez la longueur d'onde de cette onde électromagnétique.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

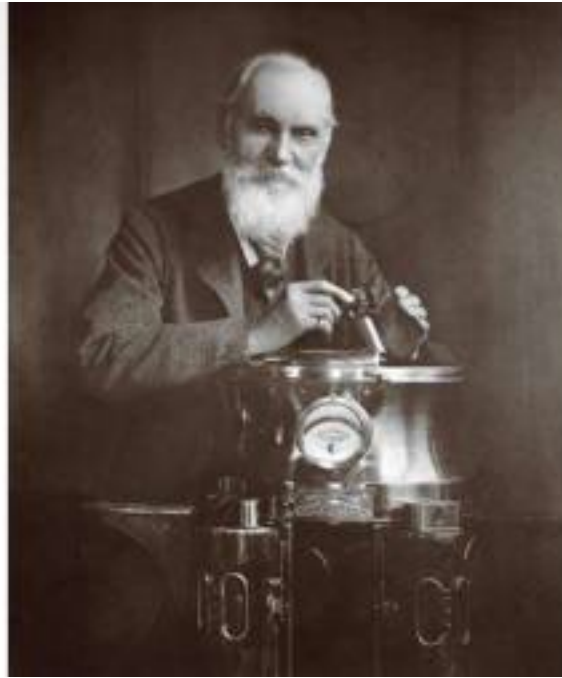
Heinrich Hertz a été le premier à générer et détecter des ondes électromagnétiques



© 2003 Thomson - Brooks Cole

2. Dernières difficultés de la physique :

Au début du XXème siècle



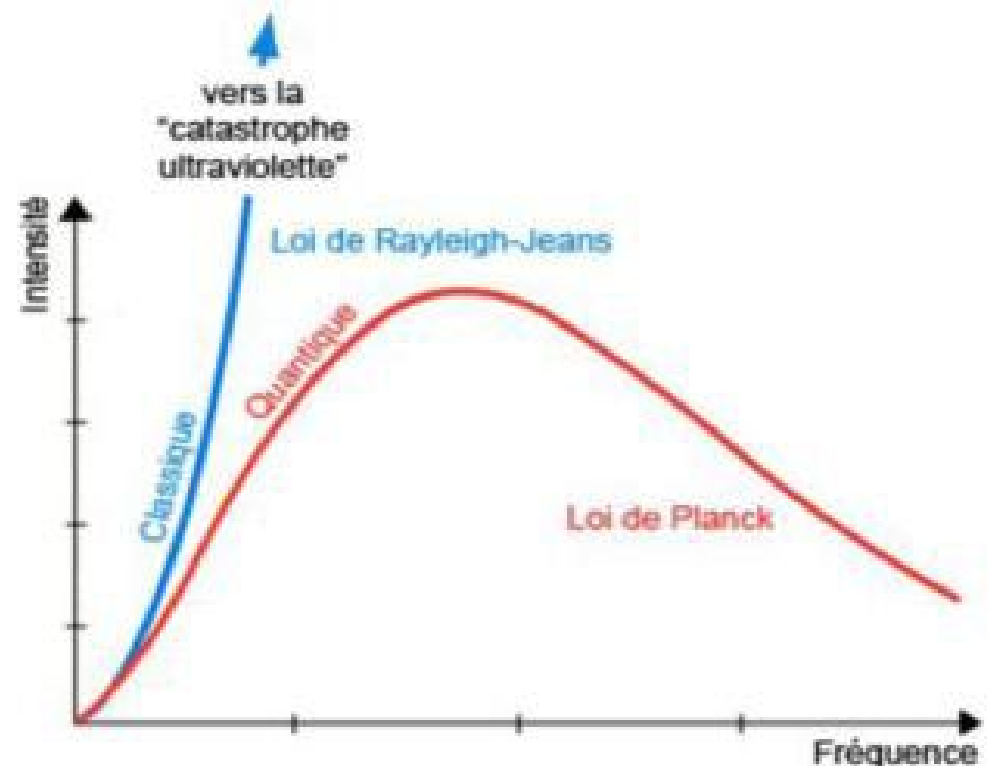
"A part une petite difficulté dans le rayonnement, la Physique est terminée."

Lord Kelvin

2.1. Le rayonnement du corps noir

La loi classique de Rayleigh-Jeans, qui fonctionne bien aux basses fréquences, prédit que la densité d'énergie d'un rayonnement est proportionnelle à la puissance 2 de la fréquence.

Ce résultat est absurde pour les grandes fréquences (rayons ultraviolets) car il implique que l'énergie totale rayonnée par un corps noir est infinie



Un *corps noir* est un corps en équilibre thermique



1900:

La notion de **quantum** (pluriel **quanta**) est née en **1900**, à la suite des travaux du physicien allemand **Max Planck** (1858 - 1947).

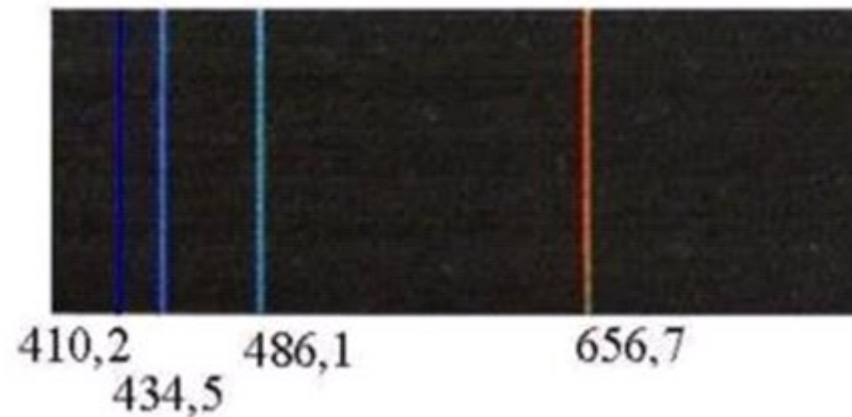
En cherchant à ajuster la courbe aux résultats expérimentaux, Max Planck découvre un ajustement parfait et introduit une constante: h la constante de Planck.

Planck lui-même ne cherchait pas à donner aux quanta une signification physique. **C'était un artifice mathématique.**

2.2. *Le spectre discret de l'hydrogène:*

Le spectre discret de l'hydrogène

Quatre raies d'émission dans le visible **Spectre discontinu** (Série de Balmer)



Série de Balmer : $\bar{\nu} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{p^2} \right)$ p entier > 2

R_H : constante de Rydberg
(relative à l'hydrogène)
 $R_H = 1,096775 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

Formule empirique **Aucune base théorique!!!**

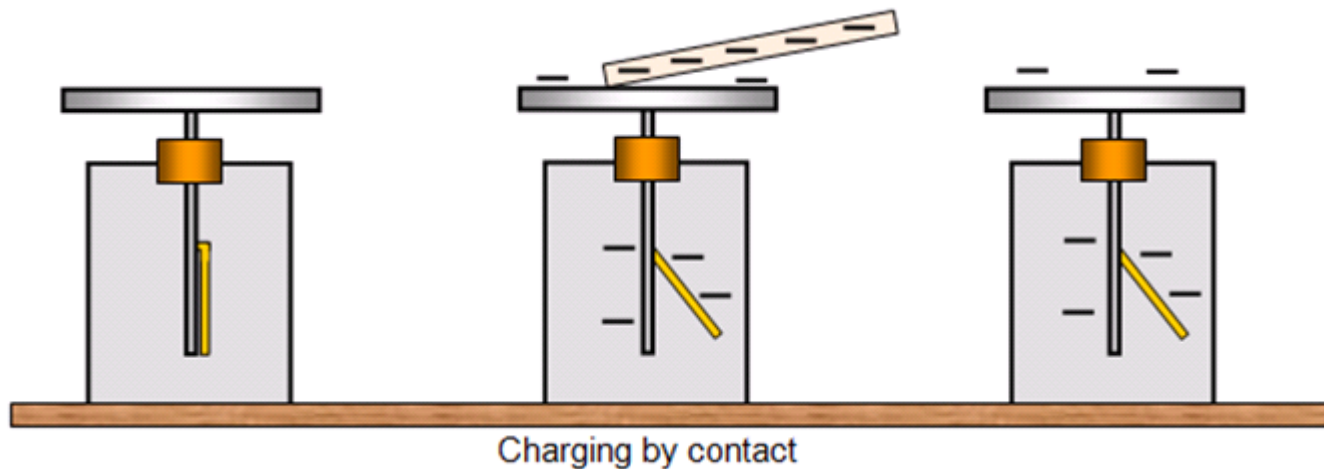
3. Naissance de la mécanique quantique:

3.1. Expérience de Hertz (1887)

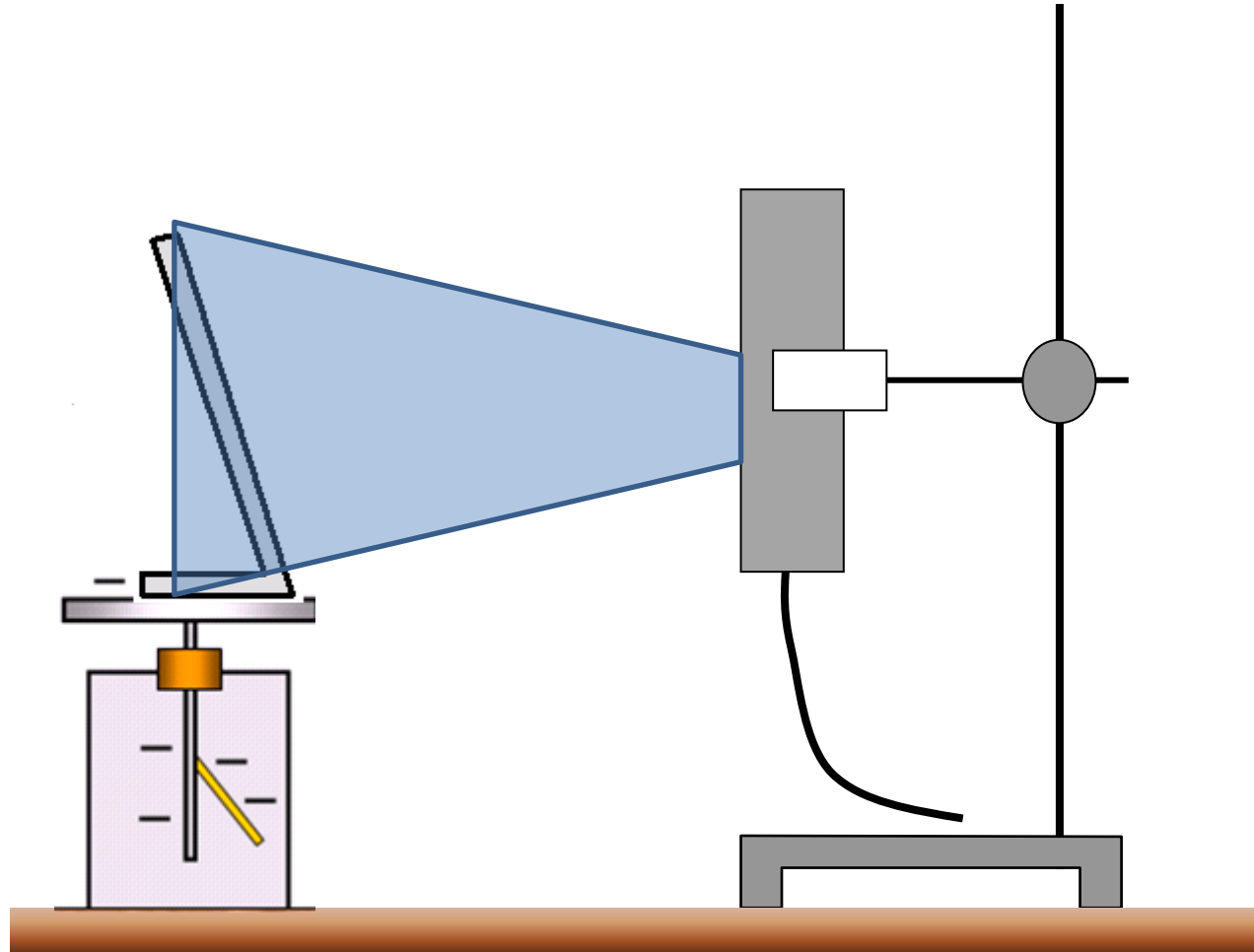
→ Mise en évidence de l'effet photoélectrique sans l'interpréter réellement .

→ L'expérience comporte trois étapes :

1^{ère} étape : Initialement la plaque de zinc et l'électroscope sont chargés négativement : l'aiguille de l'électroscope dévie.

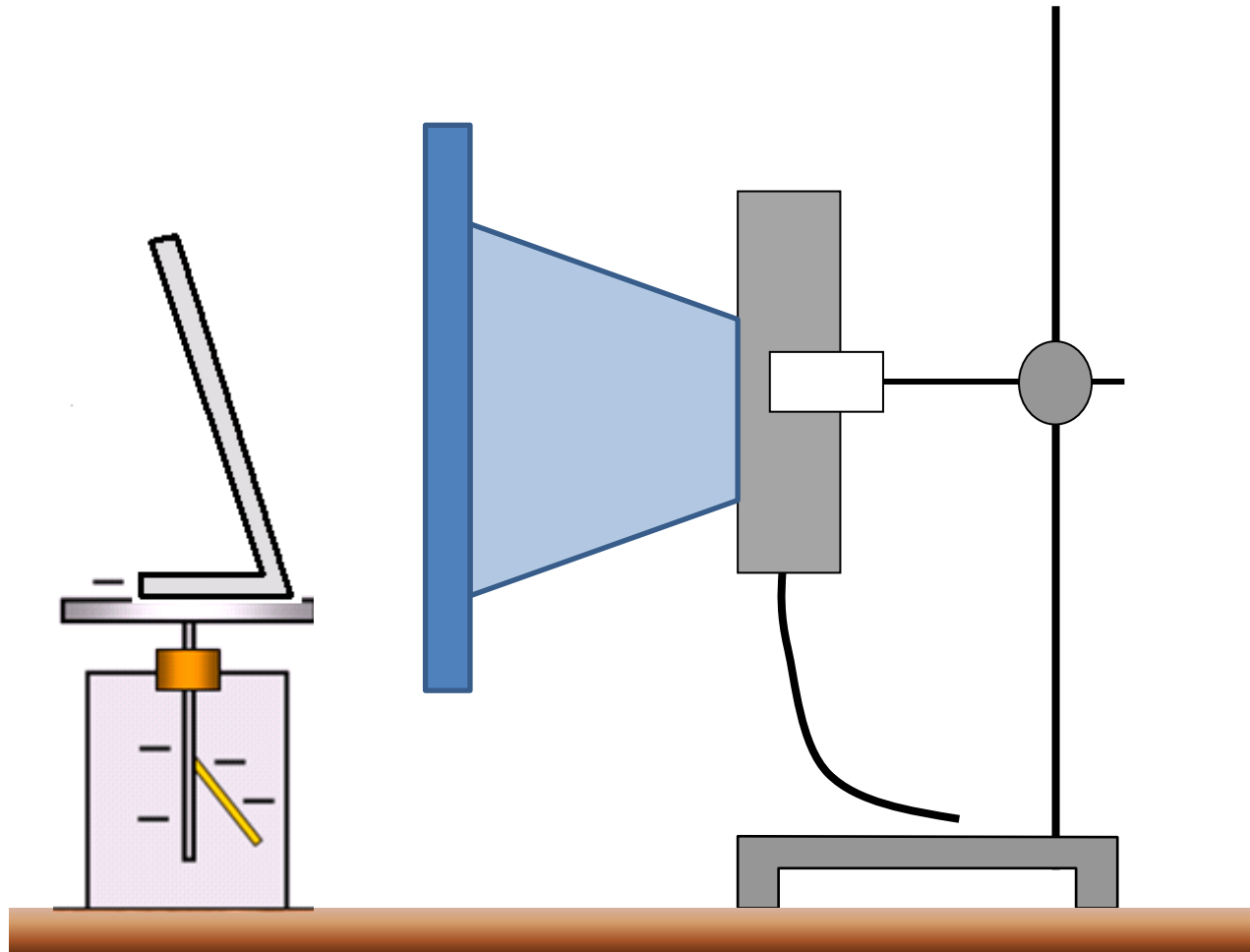


Puis la plaque de zinc est éclairée.
Que peut-on observer ?

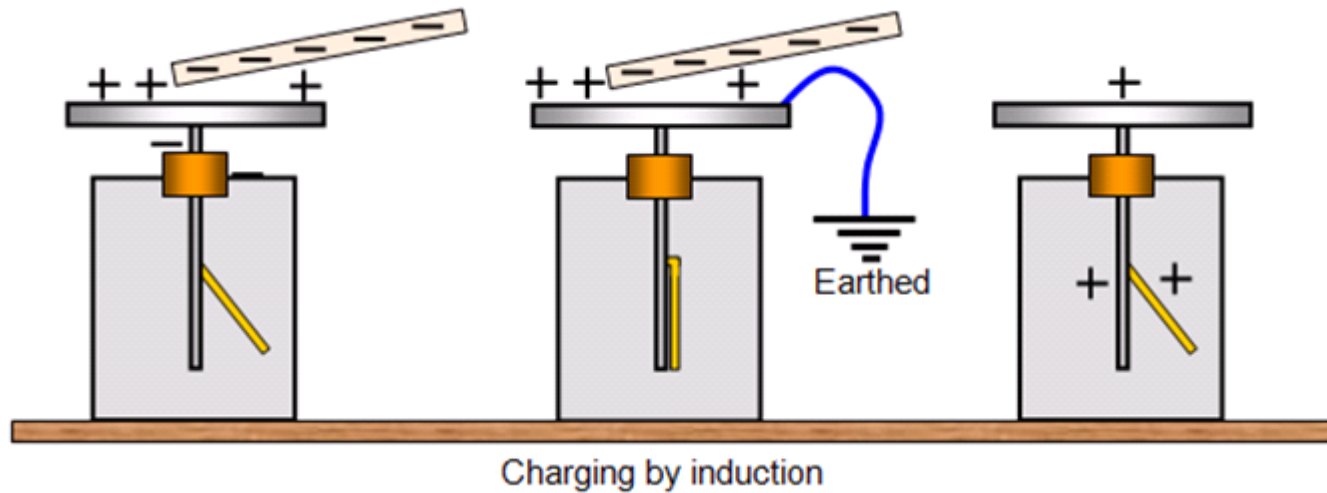


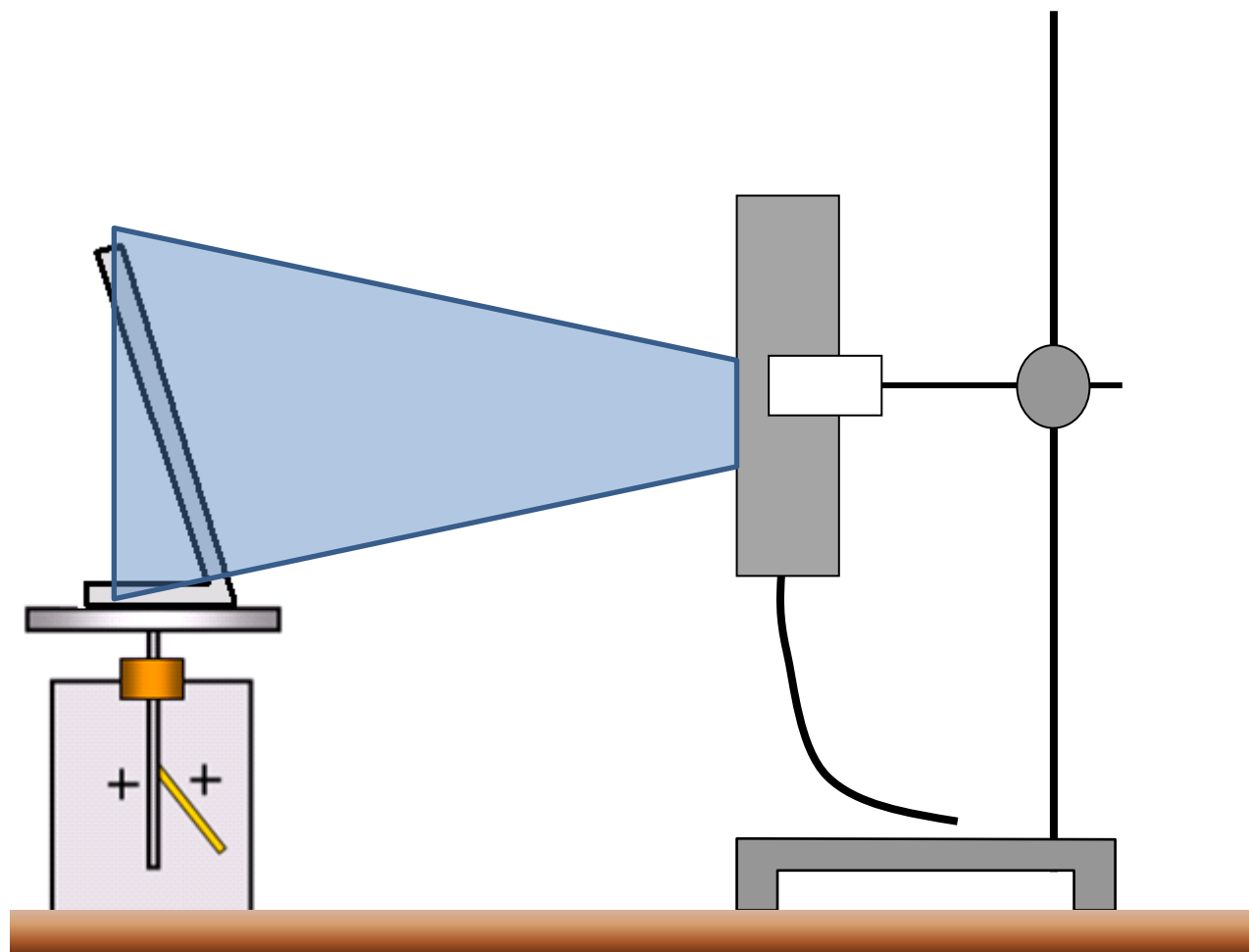
2^{ème} étape :

La plaque de zinc est rechargée négativement et une plaque de verre est interposée entre la lampe et le zinc.

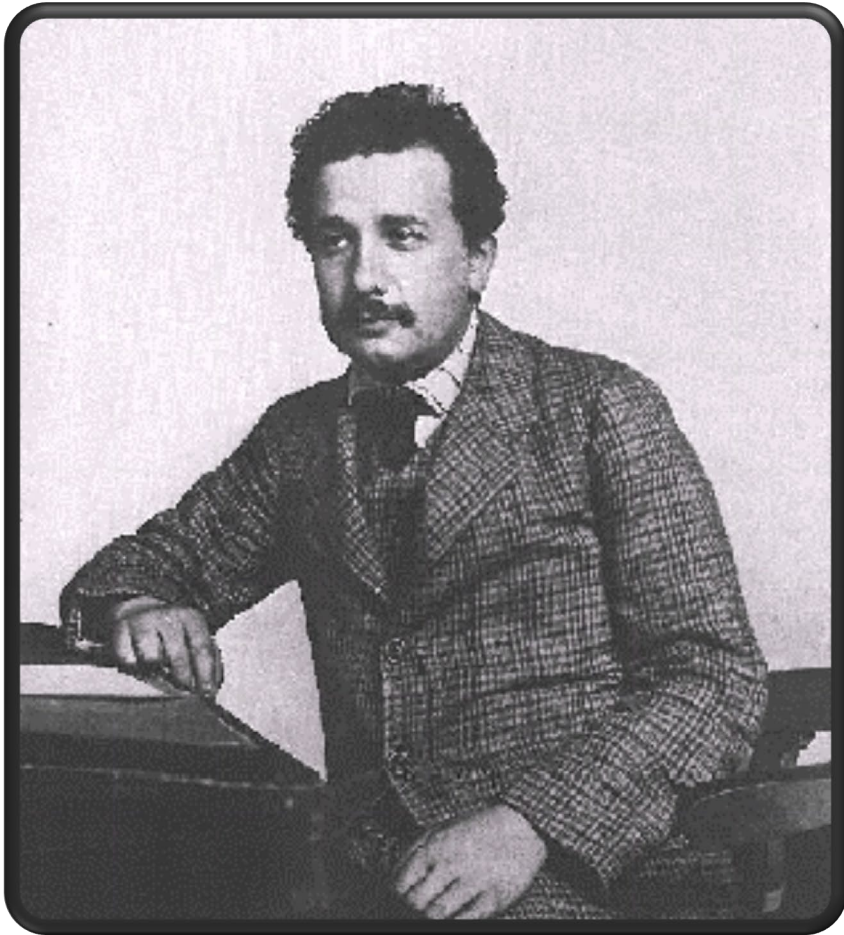


3^{ème} étape : La plaque de zinc est chargée positivement, puis éclairée : que peut-on observer ?





Explication d'Einstein



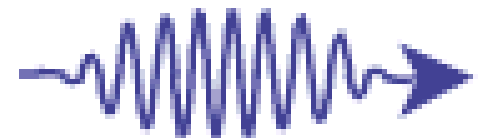
Au lieu de répartir l'énergie d'un faisceau de lumière dans l'espace qu'occupent les ondes électromagnétiques, cette énergie est concentrée dans un petit paquet (photon).

$$E \propto f$$

Serait-il pensable qu'une source de lumière n'émette pas d'ondes électromagnétiques de façon continue, mais plutôt, des petits paquets distincts d'énergie dans toutes les directions?

Ces petits paquets d'énergie seraient comparables à des particules élémentaires qu'on appellerait ***PHOTONS*** qui voyageraient à la vitesse de la lumière. Chaque photon ou **QUANTA** posséderait une quantité d'énergie dont la valeur serait donnée par:

$$E = hf$$



IV- Dualité onde-corpuscule



Louis Victor de Broglie(1892-1987)

Formula l'hypothèse en 1924 :

$$p = h\nu = h/\lambda$$

-Toute particule en mouvement peut être associée à une longueur d'onde selon la relation ci-dessus.

Prix Nobel en 1929 (Nature ondulatoire de l'électron)

Photon : onde et particule
 $M = 0 \text{ kg}$ et $v = c$

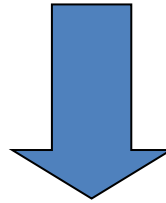
Maxwell

Planck et Einstein



Dualité onde-corpuscule

Photon se comporte à la fois comme une onde et un corpuscule



De Broglie suggère de généraliser
cette dualité à la matière

Photon:
$$p = \frac{E}{c} = \frac{\left(\frac{hc}{\lambda}\right)}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Matière:
$$p = mv = \frac{h}{\lambda}$$

L'aspect « onde » et l'aspect « particule » sont deux images d'un même objet pour la mécanique quantique.

Que voyez-vous ?

une jeune femme élégamment habillée ?

une vieille femme avec un fichu sur la tête ?

En fait, le dessin possède ces deux aspects, mais
n'est ni tout-à-fait l'un ni tout à fait l'autre ...



C'est **Louis de Broglie en 1923** qui étendit cette dualité à toutes les particules matérielles :

« *les particules matérielles, tout comme les photons, peuvent avoir un aspect ondulatoire* »

Soit une particule matérielle de quantité de mouvement $p = m.v$

alors son caractère ondulatoire est caractérisée par la longueur d'onde λ donnée par :

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

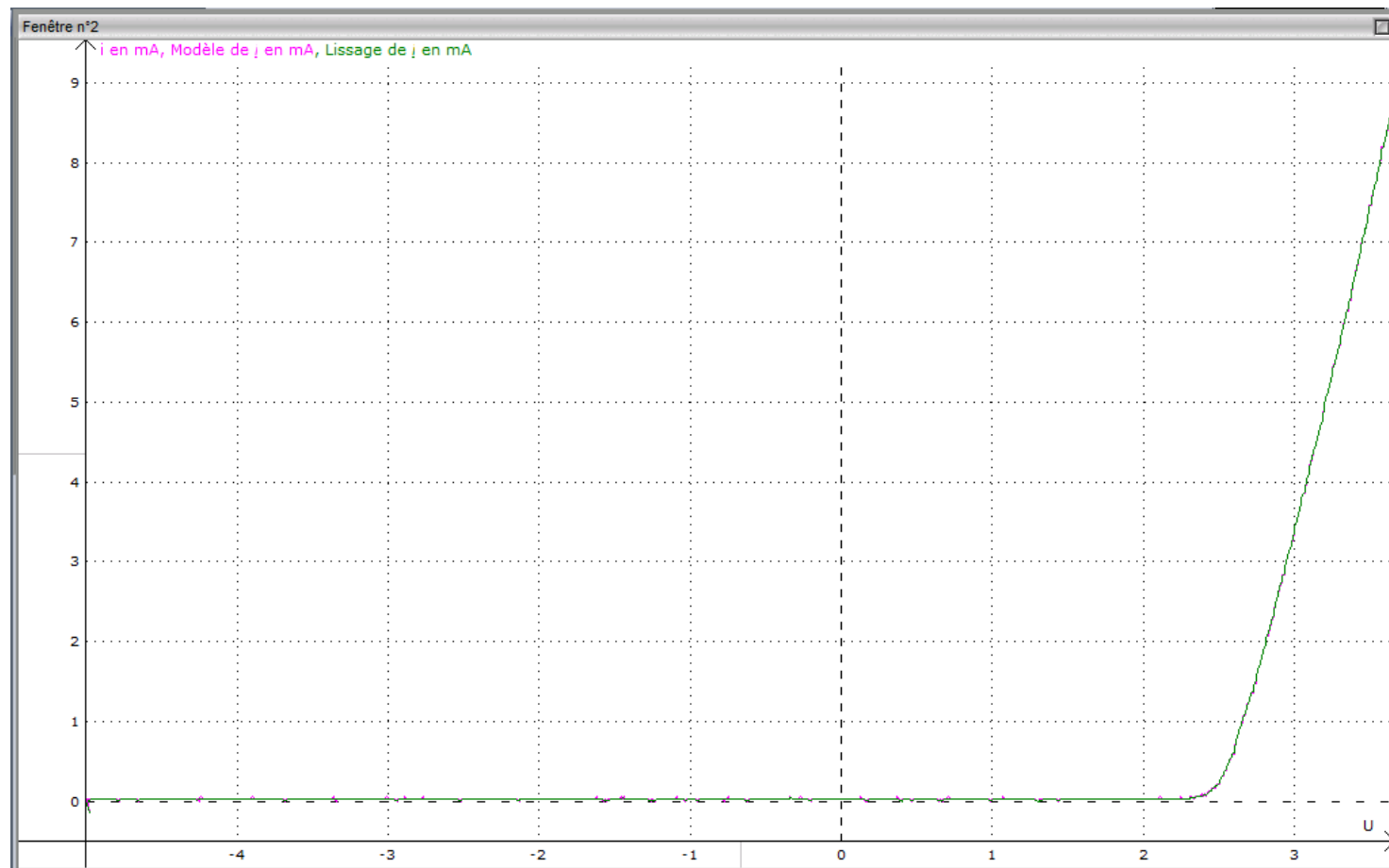
4. Applications:

quantique a aujourd'hui de nombreuses **applications** pratiques : laser, IRM, **led**, horloge atomique, microscope à effet tunnel.

Emettre la lumière grain à grain : échange quantique d'énergie

4.1. Les LEDS

Activité: Estimation de la constante de Planck





Paramètres

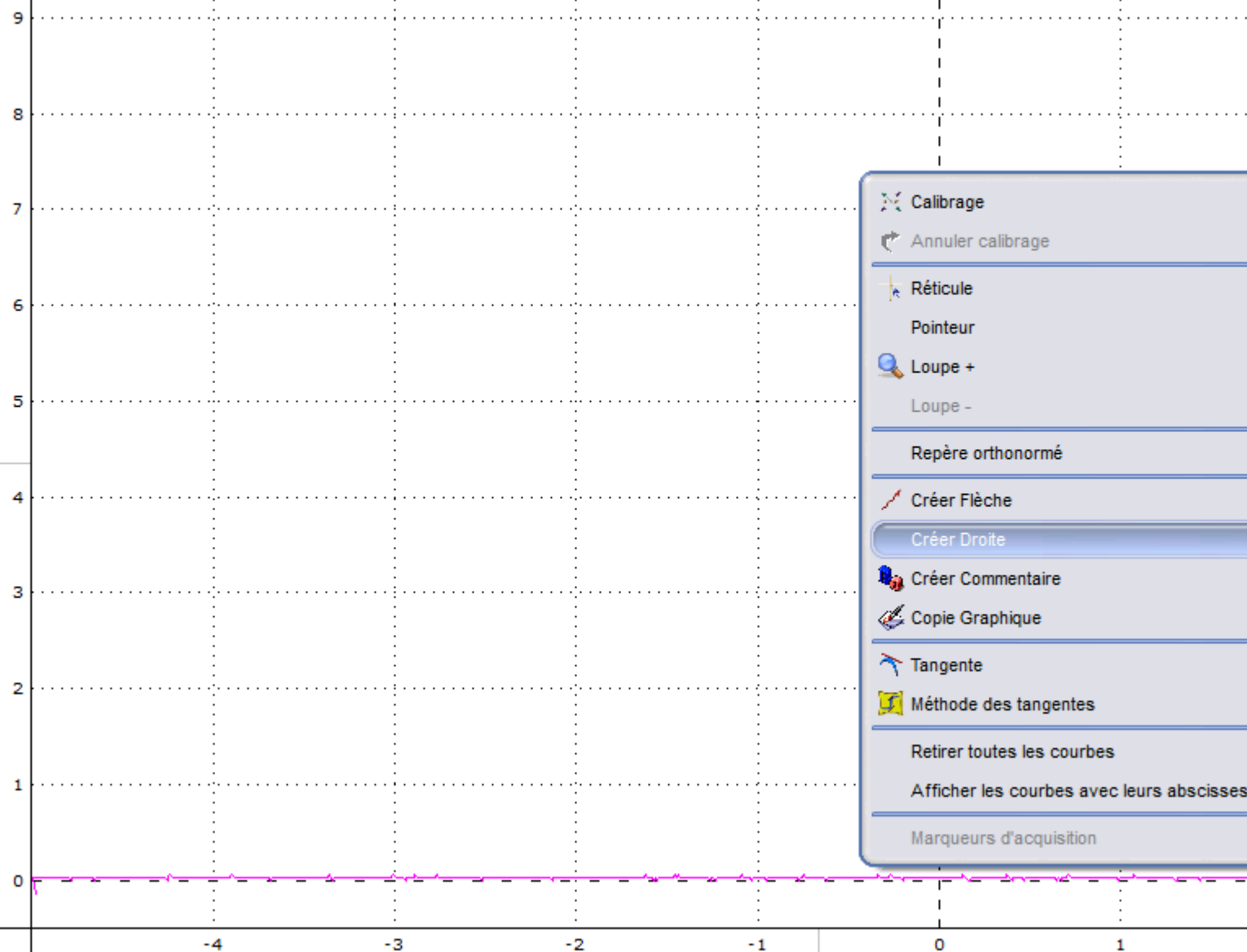
**Courbes**

Pages 1 sur 2 ⇌

■ EA0{1}
fct(Temps)■ SA1
fct(Temps)■ i
fct(U)■ U
fct(Temps)■ EA0{2}
fct(Temps)■ EA0{3}
fct(Temps)■ EA0{4}
fct(Temps)■ EA0{5}
fct(Temps)■ EA0{6}
fct(Temps)■ EA0{7}
fct(Temps)■ EA0{8}
fct(Temps)
 $i = \text{fct}(U)$
 Modèle de $i = \text{fct}(U)$

Fenêtre n°2

i en mA, Modèle de j en mA



Calibrage

Annuler calibrage

Réticule

Pointeur

Loupe +

Loupe -

Repère orthonormé

Créer Flèche

Créer Droite

Créer Commentaire

Copie Graphique

Tangente

Méthode des tangentes

Retirer toutes les courbes

Afficher les courbes avec leurs abscisses

Marqueurs d'acquisition



Paramètres

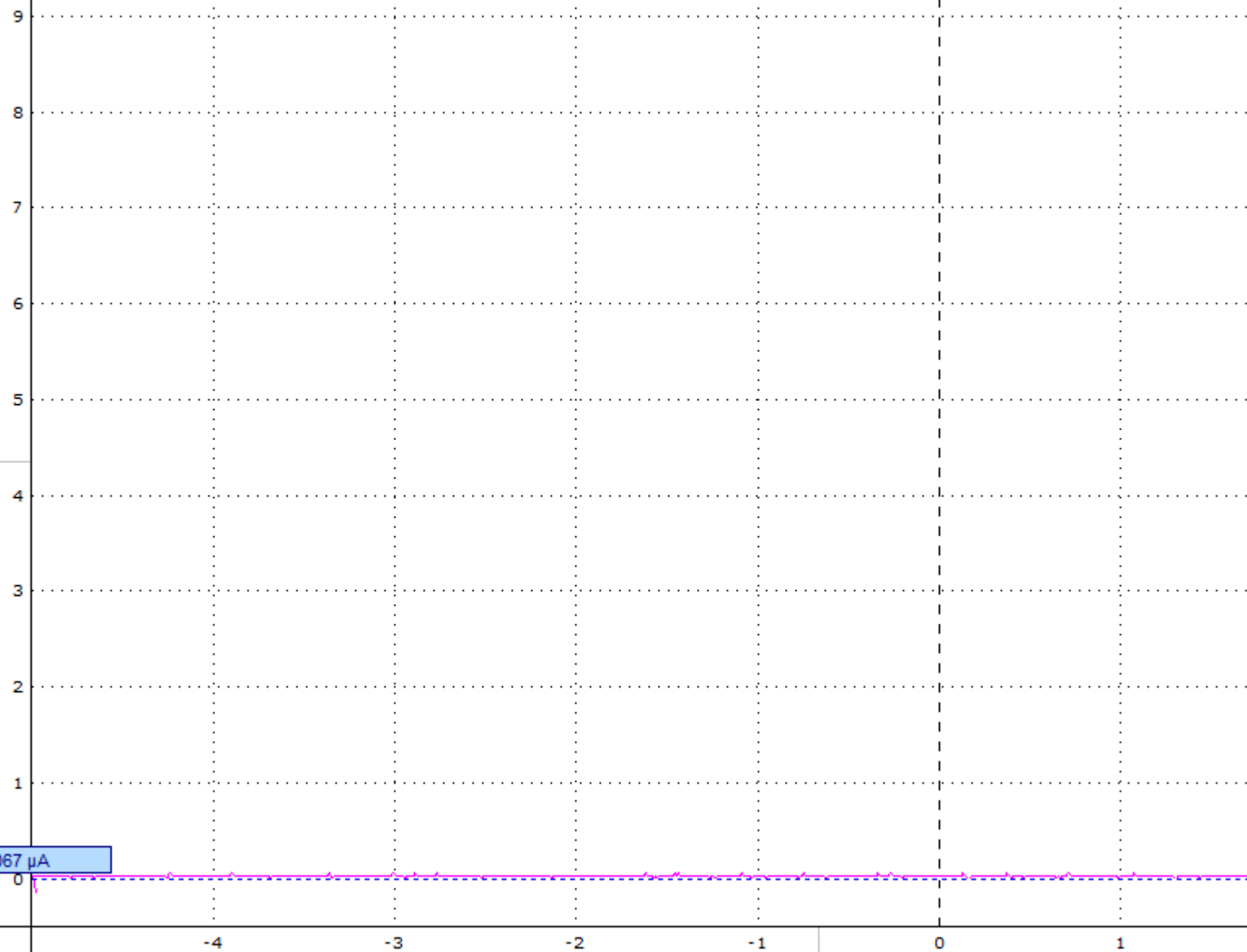
**Courbes**

Pages 1 sur 2 ⇌

- EA0{1}
fct(Temps)
- SA1
fct(Temps)
- i
fct(U)
- U
fct(Temps)
- EA0{2}
fct(Temps)
- EA0{3}
fct(Temps)
- EA0{4}
fct(Temps)
- EA0{5}
fct(Temps)
- EA0{6}
fct(Temps)
- EA0{7}
fct(Temps)
- EA0{8}
fct(Temps)

$i = \text{fct}(U)$
Modèle de $i = \text{fct}(U)$

Fenêtre n°2

 i en mA, Modèle de j en mA-4.067 μ A

5. Retour sur le spectre de l'hydrogène



Niels Bohr (1885-1962)

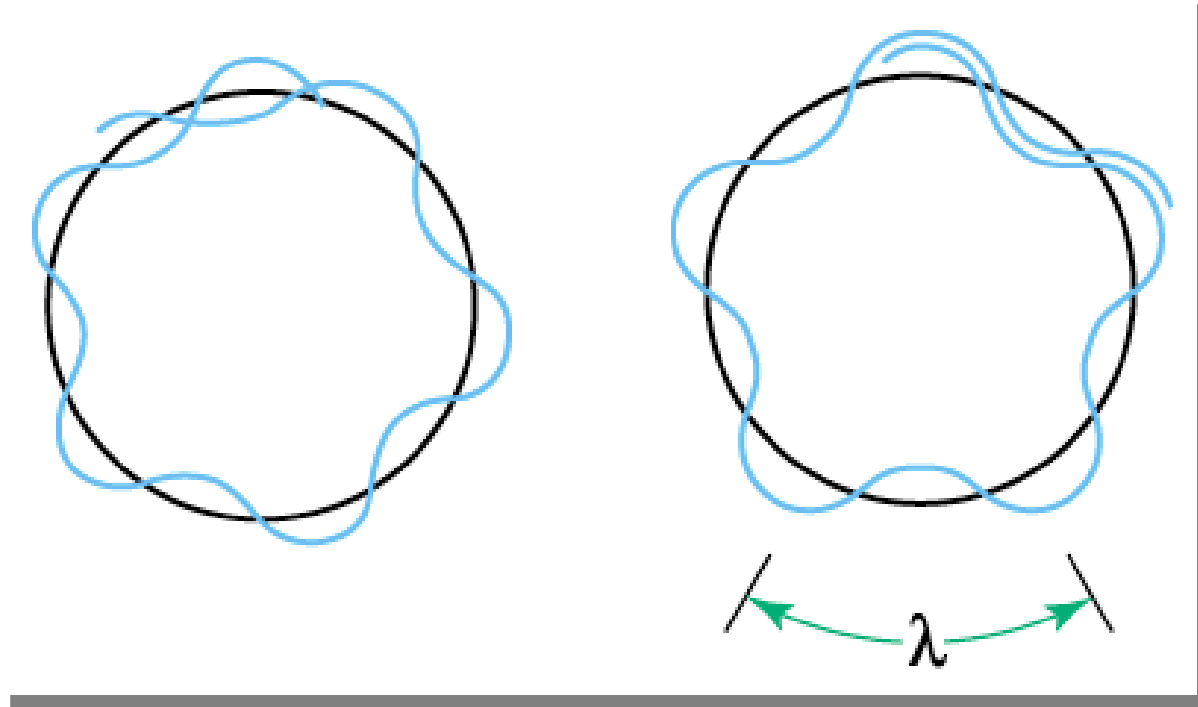
Modèle de structure de l'atome en 1913

Prix Nobel en 1922 « pour ses études de la structure des atomes et des radiations qui en proviennent ».

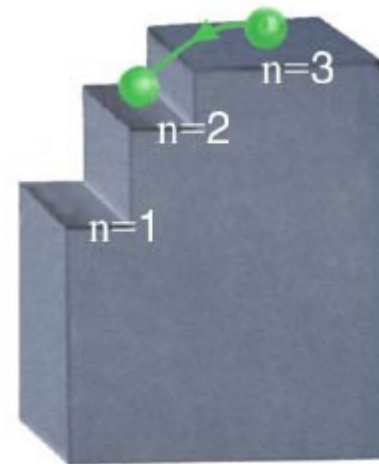
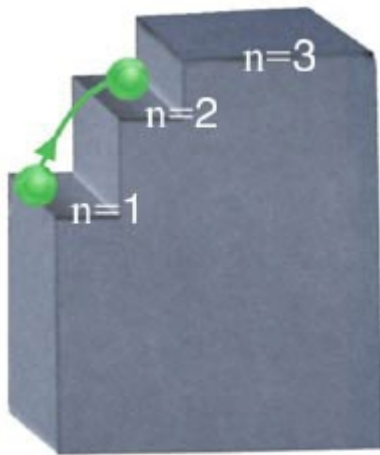
Vu en 2^{de} : Modèle de l'atome (modèle de Rutherford + structure électronique en couche)

Le premier postulat de Bohr

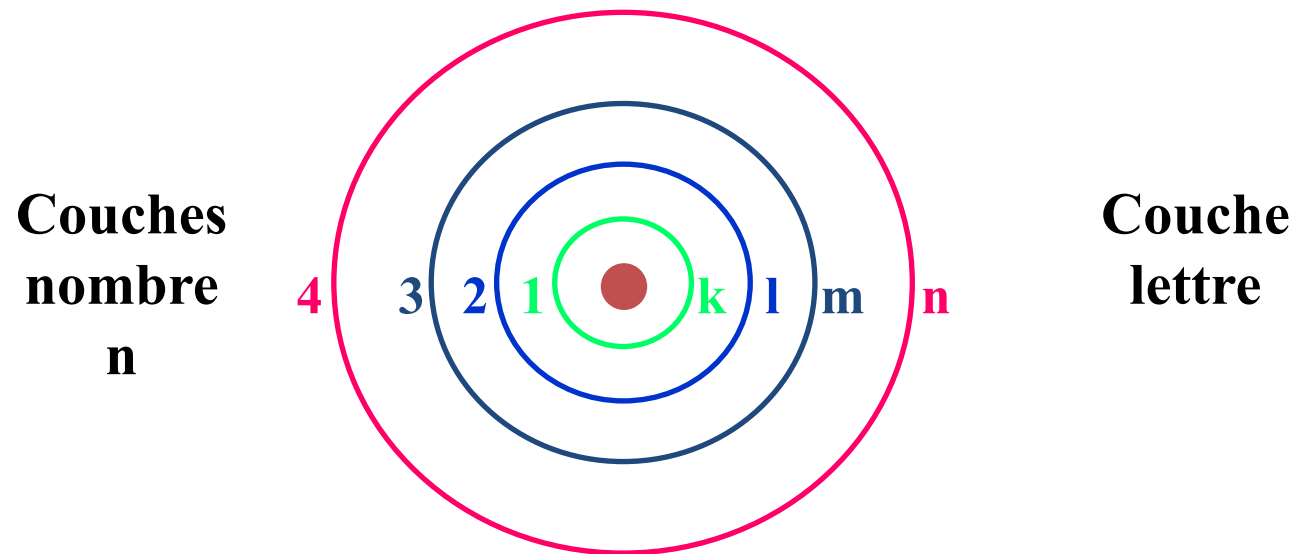
1. L'électron se déplace uniquement sur certaines orbites circulaires appelées « *états stationnaires* ».



Le palier de l'escalier représente la position du noyau; chacune des marches de l'escalier représente une orbite permise. L'électron qui monte l'escalier peut demeurer à la première marche. Il peut aussi bondir de la première marche à la deuxième ou encore à la troisième ou à la quatrième... L'électron doit donc absorber de l'énergie pour monter une marche. **Il ne peut cependant s'arrêter entre deux marches.** C'est le même principe quand l'électron descend l'escalier sauf que, cette fois-ci, pour descendre une marche, il doit libérer de l'énergie. Vous comprenez maintenant ce qu'est la **quantification de l'énergie!**



Orbites électroniques



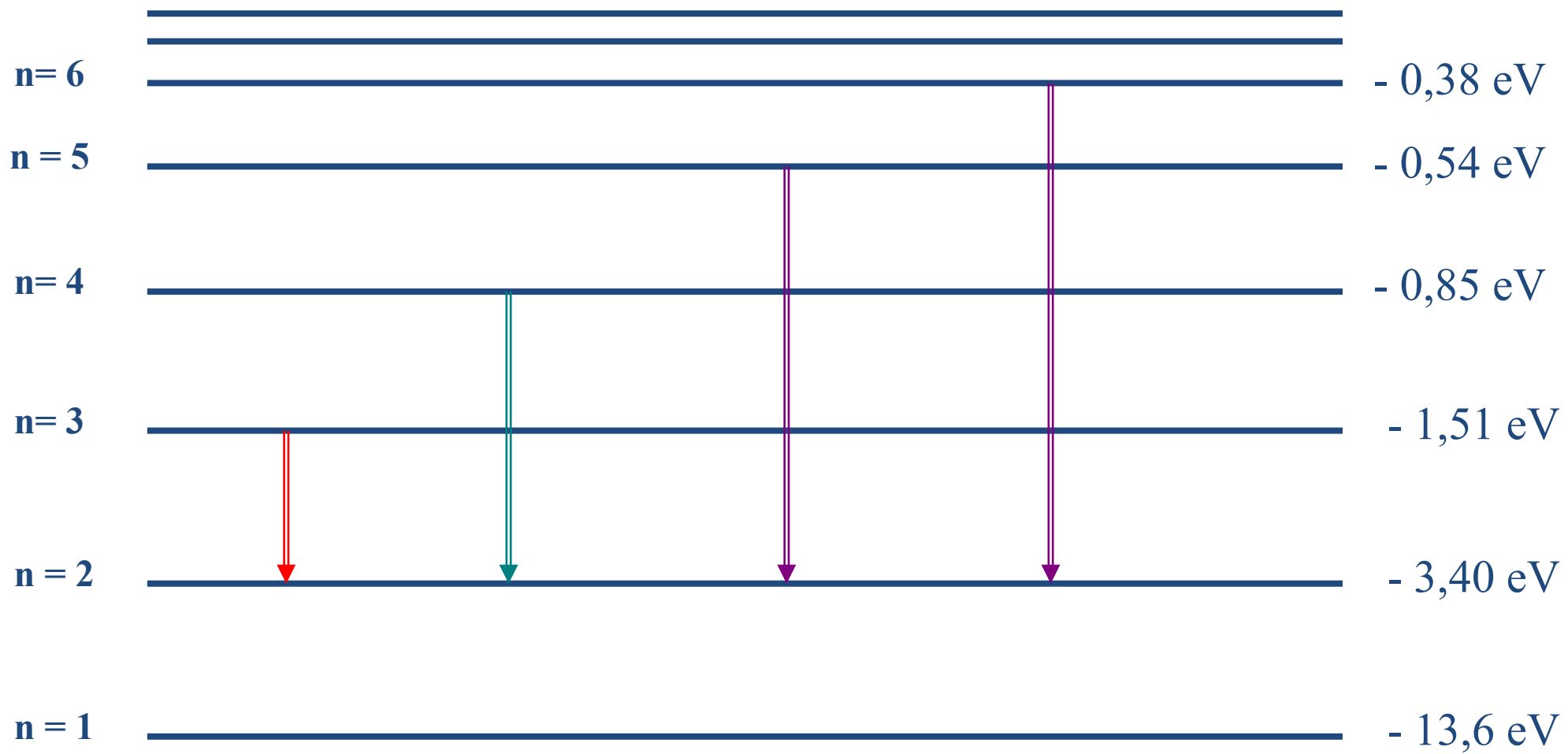
- Le modèle atomique de Bohr est simple et utile pour comprendre certains concepts
- Les niveaux d'énergie ou couches électroniques contiennent des e^-
 - Chaque niveau possède une énergie de blindage (E_b)
 - e^- qui passent à une couche supérieure gagnent de l'énergie
 - e^- qui passent à une couche inférieure perdent de l'énergie

Le second postulat de Bohr

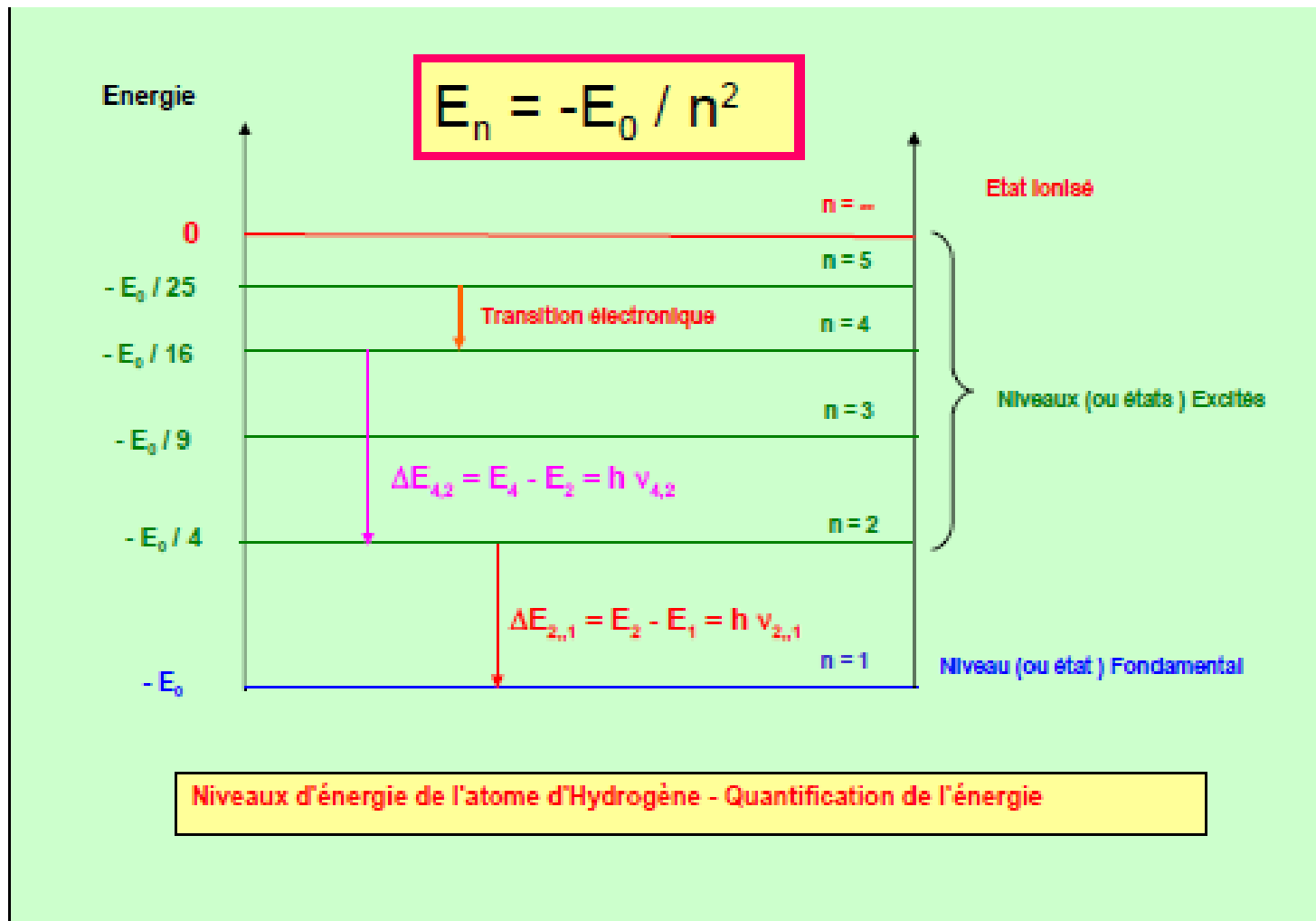
2. Émission d'un rayonnement seulement si l'électron passe d'une orbite permise supérieure à une orbite permise inférieure.

$$h\nu = E_i - E_f$$

où, h est la constante de Planck et E_i et E_f représentent l'énergie initiale (i) et l'énergie finale (f).



Spectre d'émission de Atome d'hydrogène [ANIMATION](#)



Avec $E_0 = 13,6 \text{ eV}$

Raie - Transition	Energie (J)	Fr quence ν (10^{15} Hz)	Longueur d'onde (nm)	Domaine spectral	Nom de la Série
4 → 3	1,06 10^{-19}	0,16	1874	I.R	Bracket
4 → 2	4,09 10^{-19}	0,62	486	Visible	Balmer
4 → 1	2,04 10^{-18}	3,09	97,2	U.V	Lyman
3 → 2	3,02 10^{-19}	0,46	656	Visible	Balmer
3 → 1	1,93 10^{-18}	2,93	102,5	U.V	Lyman
2 → 1	1,63 10^{-18}	2,5	121,5	U.V	Lyman

[RETOUR](#)

Exercice :

1) Calculer la valeur de la constante de Rydberg R_H
(On pourrait aussi insister sur l'unité de cette constante)

2) On considère l'atome d'hydrogène

a) quelle est en eV, la plus petite quantité d'énergie qu'il doit absorber pour :

- passer au 1^{er} état excité ?
- passer du premier état excité à l'état ionisé ?

b) Quelles sont les longueurs d'onde des raies du spectre d'émission correspondant au retour :

- de l'état ionisé au 1^{er} état excité ?
- du premier état excité à l'état fondamental ?

3) Si l'électron de l'Hydrogène est excité au niveau $n=4$, combien de raies différentes peuvent-elles être émises lors du retour à l'état fondamental. Classer les transitions correspondantes par longueurs d'onde croissantes du photon émis.

1) On peut donc facilement démontrer :

$$h\nu = E_m - E_n = \frac{-E_0}{m^2} - \frac{-E_0}{n^2} = E_0 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad \nu = \frac{c}{\lambda} \quad \text{d'où : } h \frac{c}{\lambda} = E_0 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

$$\text{et } \lambda = \frac{hc}{E_0} \times \frac{1}{\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}}$$

REM: E_0 doit être en J

ou encore

$$\frac{1}{\lambda_{mn}} = R_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

avec la constante de Rydberg : $R_H = \frac{E_0}{hc} = 1,096 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

- Transition de m infini à $n=1$

Energie d'ionisation: on déduit la valeur de λ :

$$\lambda_{mn} = 9,13 \times 10^{-8} \text{ m}$$

2)

a) $\Delta E_{p,n} = E_0 (1/p^2 - 1/n^2)$ avec $n > p$

$$\Delta E_{2,1} = E_0 (1/1^2 - 1/2^2) = 3/4 E_0 = 3/4 * 13,6 = 10,2 \text{ eV} = 1,63 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

$$\Delta E_{\text{infini},2} = E_0 (1/2^2 - 1/\text{infini}^2) = 1/4 E_0 = 1/4 * 13,6 = 3,4 \text{ eV} = 5,4 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

b) $\Delta E = h \nu$ $\nu = \Delta E / h = C / \lambda$ **$\lambda = h C / \Delta E$**

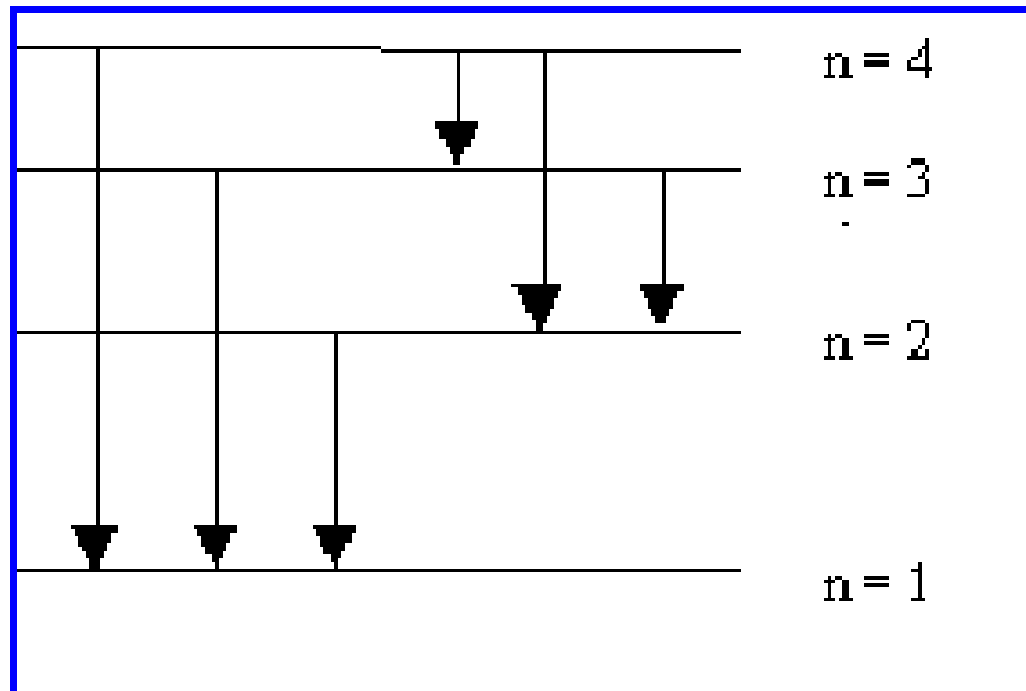
$$\lambda_{\text{infini},2} = h C / \Delta E_{,2} = 6,62 \cdot 10^{-34} * 3 \cdot 10^8 / 5,4 \cdot 10^{-19} = 3,678 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda_{\text{infini},2} = 367,8 \text{ nm}$$

$$\lambda_{2,1} = h C / \Delta E_{2,1} = 6,62 \cdot 10^{-34} * 3 \cdot 10^8 / 1,63 \cdot 10^{-18} = 1,226 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda_{2,1} = 122,6 \text{ nm}$$

3) 6 raies possibles :



$n = 3 \rightarrow n = 2$: Balmer-alpha ou H-alpha ;

$n = 4 \rightarrow n = 2$: H-beta ;

$n = 2 \rightarrow n = 1$: Lyman-alpha ;

$n = 3 \rightarrow n = 1$: Lyman-beta ;

,

Exercices d'application sur le microscope électronique et les ondes de De Broglie

Exercice 1

Dans un microscope électronique, on utilise une tension d'accélération de 100 kV.

Quelle est la longueur d'onde de Broglie des électrons ?

Comparez-la avec la longueur d'onde de la lumière visible. Conclure.

Exercice 2

Calculez la longueur d'onde de Broglie d'une voiture de 2000 kg et de vitesse 30m/s.

Quelle taille de réseau serait nécessaire pour observer la nature ondulatoire de cet objet ?

Conclure.

Corrections.

Exercice 1

Dans un microscope électronique, on utilise une tension d'accélération de 100 kV.
Quelle est la longueur d'onde de Broglie des électrons ?

$$\lambda = h/p \text{ avec } p=mv \text{ et } E_c = \frac{1}{2} p^2/m \text{ donc on trouve}$$
$$\lambda = h/(\sqrt{2Em})$$

$$\lambda = \frac{6.625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{\sqrt{2 \times 1 \cdot 10^5 \times 1.6 \cdot 10^{-19} \times 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ Jkg}}}$$

Comparez-la avec la longueur λ

Donc 10^{-5} fois la longueur d'or

$$= 3.88 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 0.00388 \text{ nm}$$

e est

100 fois plus petite que la distance interatomique dans un réseau cristallin (10^{-10} m), on peut faire des images avec une résolution atomique dans un microscope électronique à transmission.

Exercice 2

Calculez la longueur d'onde de Broglie d'une voiture de 2000 kg et de vitesse 30 m/s.

Quelle taille de réseau serait nécessaire pour observer la nature ondulatoire de cet objet ? Conclure.

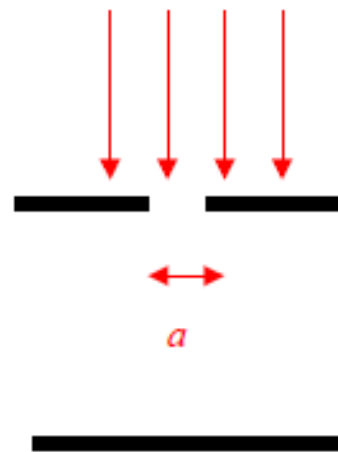
$\lambda = h/p = h/mv$ on a

$$\lambda = \frac{6.625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}^2}{2000 \times 30 \text{ kgm}}$$

Comme pour avoir une diff $= 1.1 \cdot 10^{-38} \text{ m}$ comparable à la longueur d'onde, dans la vie on ne peut pas observer les effets dus à la nature ondulatoire des objets macroscopiques.

REM: Cette longueur d'onde est 10^{-28} fois la distance interatomique dans un cristal .

• Diffraction d'un jet de particules par un trou



Particules
d'impulsion p

Description quantique en terme d'onde plane de longueur d'onde (de Broglie)

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

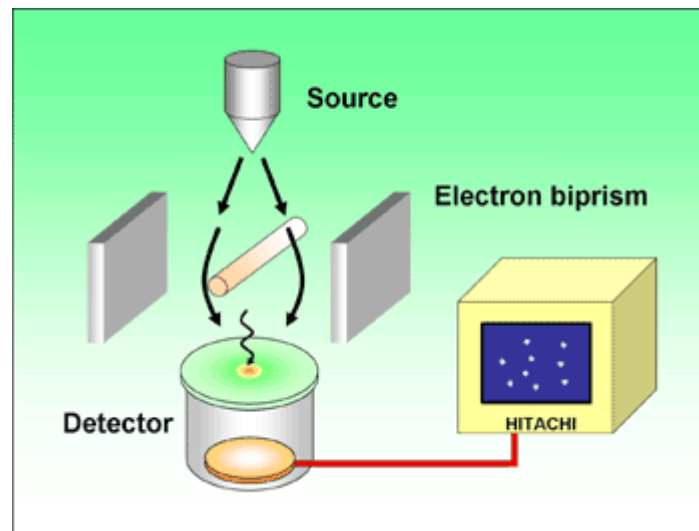
Les phénomènes non classiques seront dominants si :

$$\lambda > a \Rightarrow pa < h \quad \text{« action »}$$

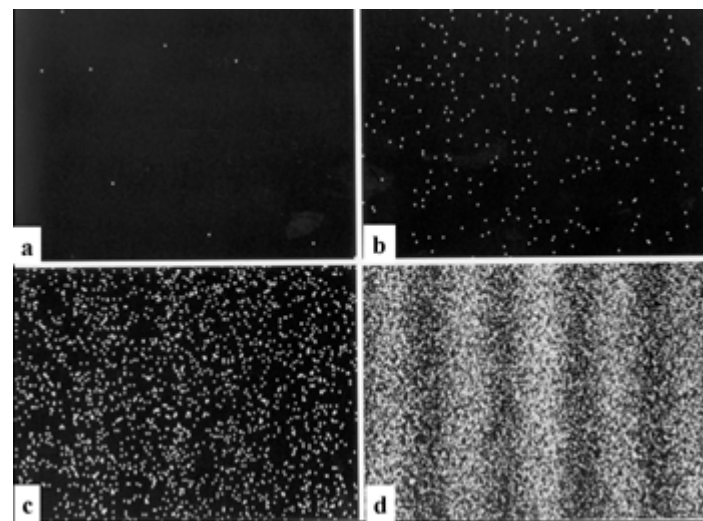
• Ordres de grandeur ($h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$)

Système considéré	Masse (kg)	Vitesse (m/s)	Taille de l'ouverture (m)	$\frac{pa}{h}$
Homme passant une porte	70	1	1	10^{34}
Globule rouge dans un capillaire	10^{-16}	10^{-1}	10^{-4}	10^{11}
Electrons à travers une fente	9×10^{-31}	700	10^{-6}	1

Vérification expérimentale:



<http://rdg.ext.hitachi.co.jp/rd/movie/doubleslite-n.wmv>



II. Applications