



# SPECTRES ATOMIQUES

BARHOUMI. Mourad

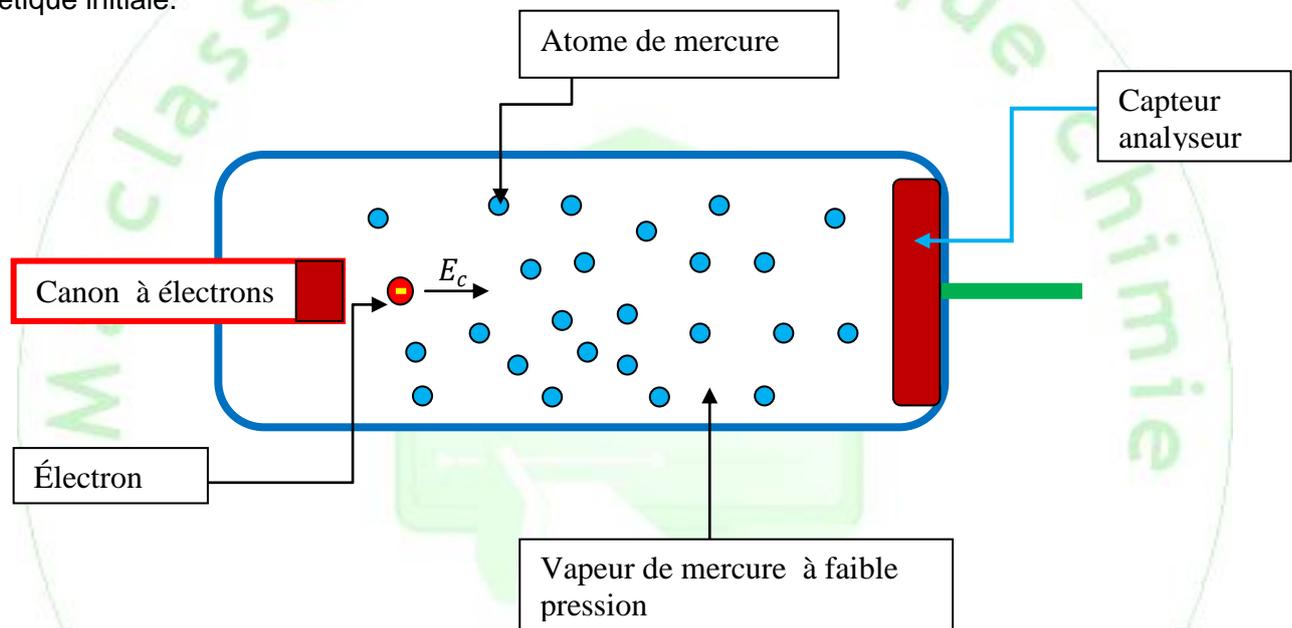
Section : 4M-4Sc.Exp

## I- La quantification de l'énergie transférée à un atome

### 1- Expérience de Franck et Hertz (1914)

#### a- Dispositif expérimental simplifié

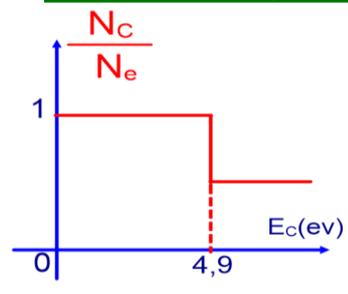
Un canon à électrons : permettant d'obtenir des électrons de même énergie cinétique.  
 Un capteur analyseur : permettant de compter les électrons qui l'atteignent avec la même énergie cinétique initiale.



#### b- Principe

- Les atomes de vapeur de mercure à faible pression sont bombardés avec des électrons d'énergie cinétique  $E_c$  variables.
- Le capteur est réglé de sorte à compter le nombre d'électrons qui l'atteignent avec la même  $E_{Ci}$  initiale et de la comparer leurs  $E_{Cf}$  à la sortie de la chambre à gaz.

#### c- Résultats de l'expérience et interprétation:



$N_e$  : nombre d'électrons par unité de temps initialement émis par le canon

$N_c$  : nombre d'électrons par unité de temps comptés par le capteur

$$1 \text{ e.v} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

- $E_c < 4,9 \text{ eV} \rightarrow \frac{N_c}{N_e} = 1 \rightarrow N_c = N_e$ 
  - ⇒ Donc tous les électrons arrivent au capteur avec la même énergie  $E_c$
  - Pour certains électrons émis peuvent entrer en collision avec les atomes de mercure mais sans céder leur énergie → Il se produit un choc élastique entre l'électron et l'atome de mercure
- $E_c \geq 4,9 \text{ eV} \rightarrow \frac{N_c}{N_e} < 1 \rightarrow N_c < N_e$ 
  - Un certain nombre de ces électrons n'atteignent pas le capteur avec leur vitesse initiale. Ces électrons entrent en collision avec les atomes de mercure et leur cèdent une énergie de valeur 4.9 e.v il s'agit d'un choc inélastique entre l'électron et l'atome de mercure donc ces électrons n'arrivent ne sont plus comptés

#### d-Conclusion :

Lors de la collision d'un atome avec un électron d'énergie cinétique  $E_c$ , l'électron peut lui céder de l'énergie. Cette énergie transférée ne peut prendre que des valeurs particulières. L'expérience de Franck et Hertz met en évidence la quantification du transfert d'énergie entre un atome et le milieu extérieur.

## 2- Niveaux d'énergie d'un atome

### a- Hypothèses de Bohr (1855-1962)

- \* Les variations d'énergie de l'atome sont quantifiées.
- \* L'atome ne peut se trouver que dans certains états d'énergie bien définis.

### b- Niveaux d'énergie

- \* L'énergie d'un atome donné ne peut prendre que certaines valeurs particulières appelées niveaux d'énergie
- \* L'ensemble des niveaux d'énergie associés à un atome est unique.

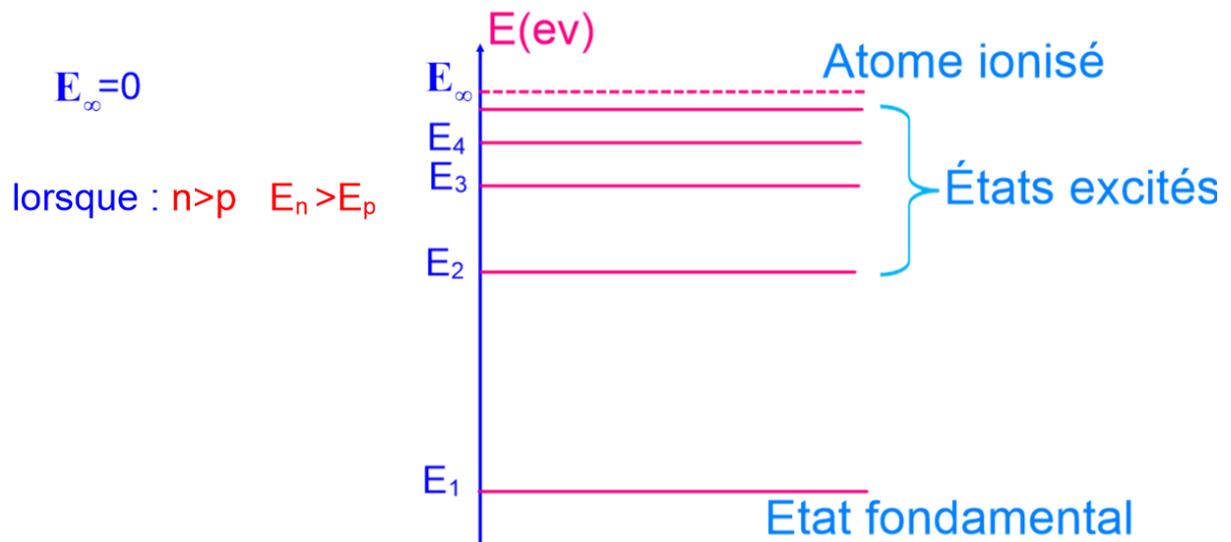
On schématise les niveaux d'énergie d'un atome par des paliers sous forme de traits définis par  $E = \text{cte}$  sur un axe choisi comme axe des énergies

Dans son état le plus stable, un atome est au niveau d'énergie le plus bas : on dit qu'il est dans son état fondamental

Lorsqu'un atome est **dans un état autre que son état fondamental**, on dit qu'il est **dans un état excité**

Les niveaux d'énergie supérieurs sont appelés des états excités.

Le passage de l'atome d'un état de niveau d'énergie  $E_p$  à un état d'énergie  $E_n$  est appelé **un transition**, p et n étant des entiers désignant les numéros des états considérés.

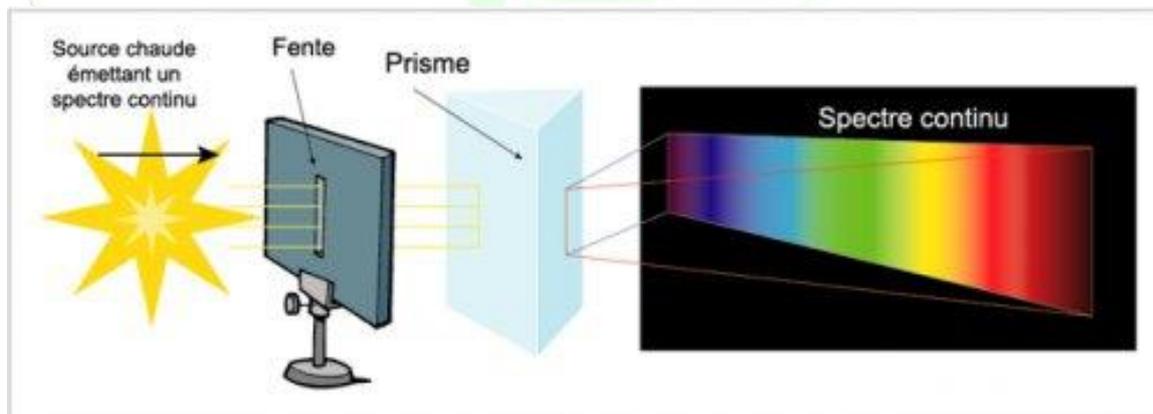


- ❖ Lorsqu'un atome passe d'un état plus bas vers un autre état plus haut il **absorbe de l'énergie**
- ❖ Lorsqu'un atome passe d'un état plus haut vers un autre état plus bas il **cède de l'énergie**

## II- SPECTRES LUMINEUX

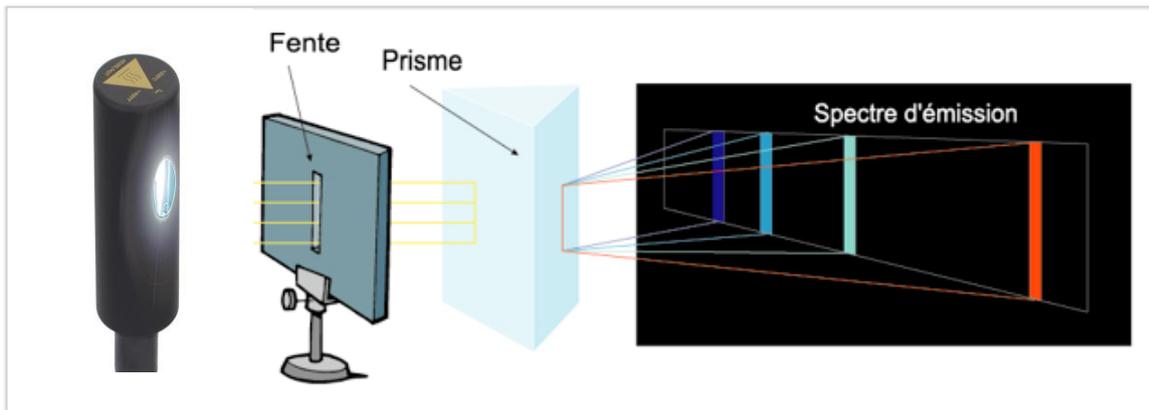
### 1- Spectre de la lumière blanche

On appelle **lumière blanche** toute lumière dont la décomposition par un prisme (ou un réseau) donne une figure colorée qui contient toutes les couleurs de l'arc en ciel.



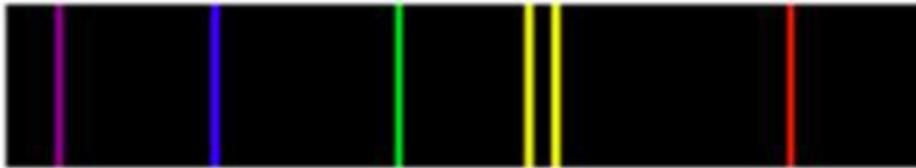
La **lumière blanche** est composée d'une **infinité de radiations colorées** (ou lumières colorées) dont la décomposition (par un prisme ou un réseau) donne une figure colorée contenant une infinité de couleurs.

## 2- Spectre d'émission



Lampe à vapeur de mercure

La lumière émise par une lampe spectrale (lampe à vapeur de mercure) analysée par un réseau donne lieu à un spectre discontinu, constitué de bandes fines multicolores sur fond sombre, appelé **spectre de raies**.

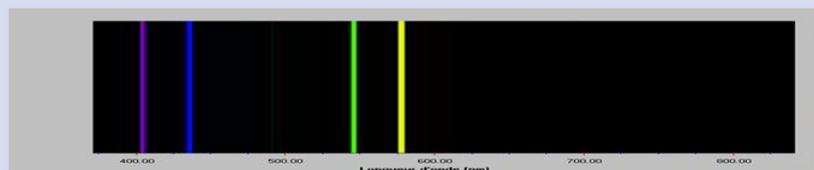


Etant le résultat de la dispersion du faisceau lumineux émis par une lampe à vapeur d'atomes identiques, le spectre de raies est appelé **spectre d'émission**.

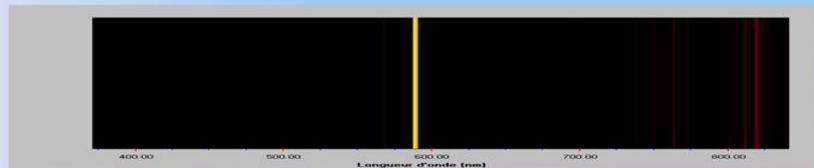
Le spectre d'émission caractérise l'élément chimique qui le produit

**Le spectre de raies est la carte d'identité de l'espèce chimique :**

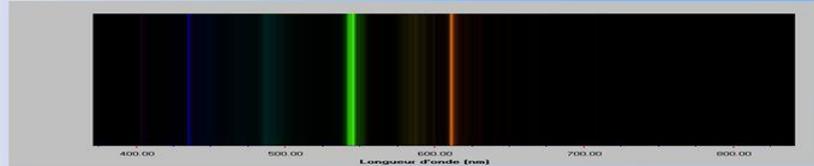
**Hg**  
mercure



**Na**  
sodium

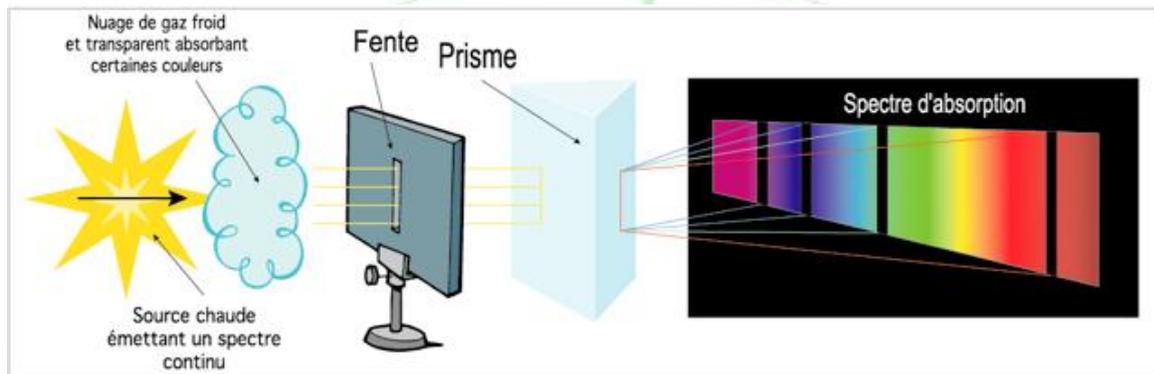


**Ne**  
néon



### 3- Spectre d'absorption

- On appelle **spectre d'absorption** d'une substance le spectre de la lumière obtenue après traversée de cette substance par la lumière blanche ;
- On appelle **spectre de raies d'absorption**, un spectre qui contient des raies sombres (appelées raies d'absorption) sur le fond coloré d'un spectre continu ;
- On appelle **spectre de bandes d'absorption**, un spectre qui contient des bandes sombres (appelées bandes d'absorption) sur le fond coloré d'un spectre continu.



Lorsque des radiations lumineuses traversent un gaz froid sous faible pression ou une solution colorée, certaines radiations peuvent être absorbées. Si le spectre du rayonnement incident est continu, alors il est amputé de certaines raies après le passage au travers du gaz ou de la solution.

#### Exemples



Spectre de raie d'absorption du sodium (en lumière blanche)



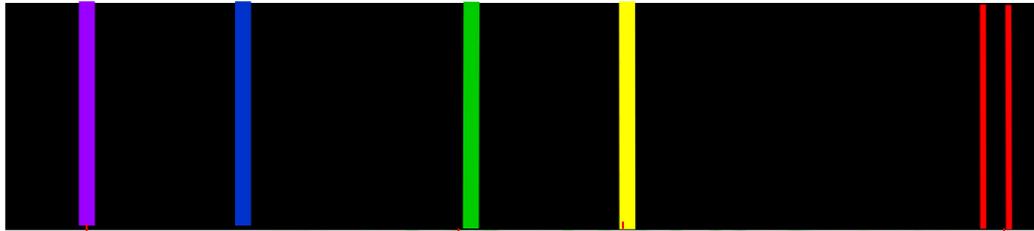
Spectre de bandes d'absorption du permanganate de potassium  
(En lumière blanche)

#### Remarque

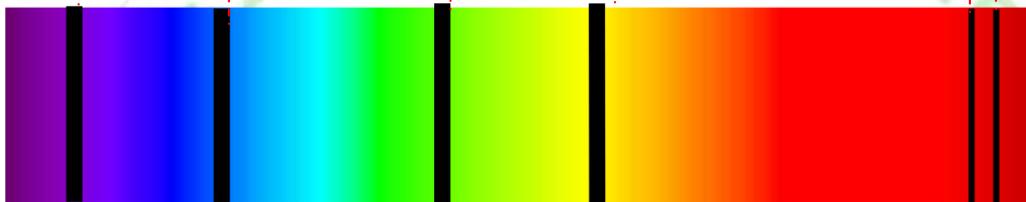
Un élément chimique n'absorbe que les radiations qu'il est capable d'émettre : les raies d'absorption et d'émission de l'élément se situent donc à la même longueur d'onde ( $\Leftrightarrow$  au même endroit) sur les spectres (émission et absorption).

Pour un atome A donné, les longueurs d'onde des raies qu'il émet sont identiques à celles des raies qu'il absorbe

Spectre de raie d'émission d'un élément chimique A



Spectre de raie d'absorption d'un élément chimique A



### Conclusion

- Le spectre de la lumière qui a traversé un gaz, constitué d'atomes ou d'ions simples (sous faible pression et à basse température), est un spectre de raies d'absorption ;
- Chaque entité chimique (atome ou ion) possède un spectre de raies d'émission spécifique, ce qui permet de l'identifier ;
- Un élément chimique n'absorbe, lorsqu'il est éclairé, que les radiations (les couleurs) qu'il émet lorsqu'il rayonne. Un gaz absorbe les mêmes radiations (couleurs) qu'il émettrait s'il était chaud.

## III- SPECTRES DE L'ATOME D'HYDROGENE

### 1- NOTION DE PHOTON

On admet qu'une radiation lumineuse de longueur d'onde  $\lambda$  est constituée d'un flux de particules non chargées et sans masse appelées photons. Chaque photon transporte l'énergie :

$$w = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

Ou

- **h** est une constante appelée la constante de Planck.  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  J.s.
- **$\nu$**  fréquence de la radiation (en Hertz )
- **$\lambda$**  longueur d'onde (en mètre)
- **C** : vitesse de la lumière (  $m \cdot s^{-1}$  )

### Remarque

L'énergie d'un photon est appelée quantum d'énergie

## 2- MODELE DE BOHR DE L'ATOME D'HYDROGENE

Pour interpréter le spectre d'émission de l'atome d'hydrogène, Niels Bohr à été amène à conférer à l'atome d'hydrogène un modèle basé sur les postulats suivants :

❖ Le noyau est suppose fixe dans l'atome car sa masse est 1836 fois plus grande que celle de l'électron.

❖ L'électron ne peut graviter autour du noyau que sur des Orbites circulaires bien déterminées. Ces orbites quantifiées sont Dites stationnaires

❖ L'électron n'échange de l'énergie avec l'extérieur que lors de son passage d'une orbite stationnaire a une autre.

## 3- ENERGIE DE L'ATOME D'HYDROGENE

En se basant sur ses postulats, Bohr établit l'expression de l'énergie de l'atome d'hydrogène pour un niveau d'énergie  $E_n$  en fonction de l'énergie  $E_0$  de l'état fondamental

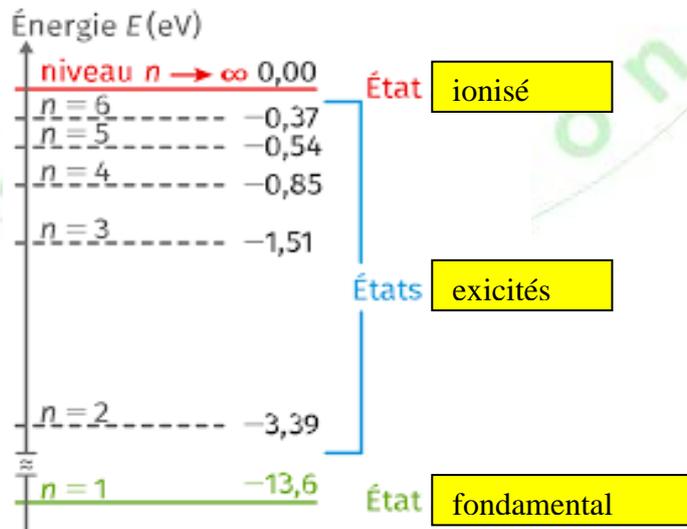
$$E_n = - \frac{E_0}{n^2}$$

Avec

- $E_0 = 13,6 \text{ eV}$  et  $n$  un entier naturel non nul
- $E_n$  est exprime en eV.
- $n \in \mathbb{N}^*$

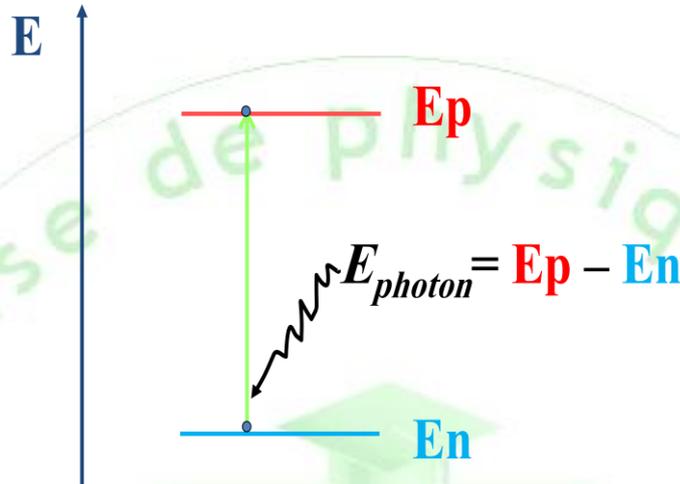
$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$$

- Pour  $n = 1$ ,  $E_1 = - 13,6 \text{ eV}$  ; c'est le niveau d'énergie minimale ou niveau fondamental. Il correspond à l'état le plus stable de l'atome d'hydrogène.
- Pour  $n > 1$  :  $- 13,6 \text{ eV} < E_n < 0$  : l'atome est dans l'un des états excites.
- Pour  $n \rightarrow \infty$ ,  $E_n(\infty) = 0$  : l'atome est ionise, le proton et l'électron sont séparés.



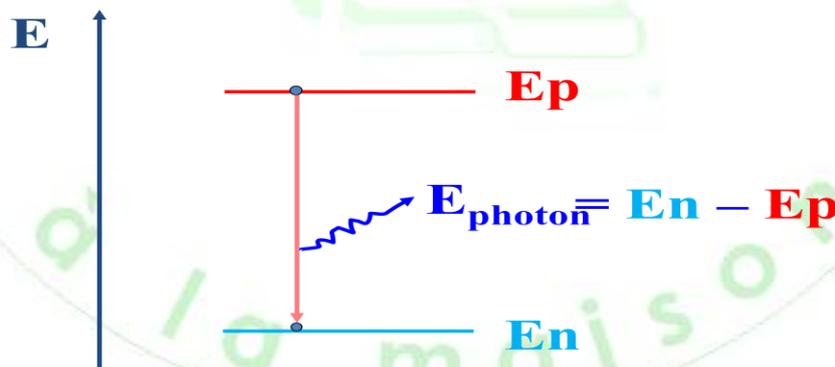
#### 4- INTERPRETATION DES RAIES D'EMISSION

Grace a un apport extérieur d'énergie, par exemple sous l'effet d'un rayonnement ou par collision avec un atome ou une autre particule matérielle, l'atome peut passer d'un niveau  $n$  a un niveau  $p$  ( $p > n$ ). Dans ce cas, l'atome absorbe juste l'énergie nécessaire au changement de niveau :



$$\Delta E_{n,p} = E_p - E_n = -\frac{13.6}{p^2} - \left(-\frac{13.6}{n^2}\right) = 13.6 \times \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{p^2}\right) = E_0 \times \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{p^2}\right)$$

- Lorsqu'un atome se désexcite en passant d'un niveau  $p$  vers un niveau  $n$  ( $p > n$ ), il restitue l'énergie :  $\Delta E_{p,n} = E_n - E_p$  en émettant un photon d'énergie  $h\nu = -\Delta E_{p,n}$ .



$$h\nu = -\Delta E_{p,n} = \Delta E_{n,p} = (E_p - E_n) = E_0 \times \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{p^2}\right)$$

$$h \frac{c}{\lambda} = E_0 \times \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{p^2}\right) = E_n - E_p \rightarrow \lambda_{p,n} = \frac{h \cdot c}{E_0 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{p^2}\right)}$$

❖ Pour les transitions aboutissant au niveau excité  $n = 1$

$$\Delta E_{p,1} = E_n - E_p = E_1 - E_p$$

$$h\nu_{p,1} = -\Delta E_{p,1} = \Delta E_{1,p} = E_0 \times \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{p^2} \right) = E_0 \times \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{p^2} \right)$$

$$\lambda_{p,1} = \frac{h \cdot c}{E_0 \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{p^2} \right)}$$

Pour  $n = 1$  et  $p = 2$ ,  $\Delta E_{2,1} = E_2 - E_1 = 10,2 \text{ eV} = 16,32 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ,  
or  $\Delta E_{2,1} = h\nu_{2,1}$ , d'où

$\nu_{2,1} = 2,4 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$  : fréquence de la radiation  
et

$$\lambda_{2,1} = \frac{c}{\nu_{2,1}} = 121 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 121 \text{ nm} : \text{longueur d'onde de la radiation}$$

Pour tout  $p > 2$ ,  $\Delta E_{p,1} = h\nu_{p,1} > \Delta E_{2,1}$ , d'où  $\nu_{p,1} > \nu_{2,1}$ .

**Donc, il en est de même pour toutes les transitions aboutissant au niveau fondamental  $n = 1$ .**

Ces transitions constituent une série de raies invisibles **appelée série de Lyman**.

❖ Pour les transitions aboutissant au niveau excité  $n = 2$  :

$$\Delta E_{p,2} = E_2 - E_p$$

$$h\nu_{p,2} = -\Delta E_{p,2} = \Delta E_{2,p} = E_0 \times \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{p^2} \right)$$

$$\lambda_{p,2} = \frac{h \cdot c}{E_0 \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{p^2} \right)}$$

Les raies correspondant aux transitions qui aboutissent au niveau excité  $n = 2$  constituent la **série de Balmer**.

❖ Pour les transitions aboutissant au niveau excité  $n = 3$  :

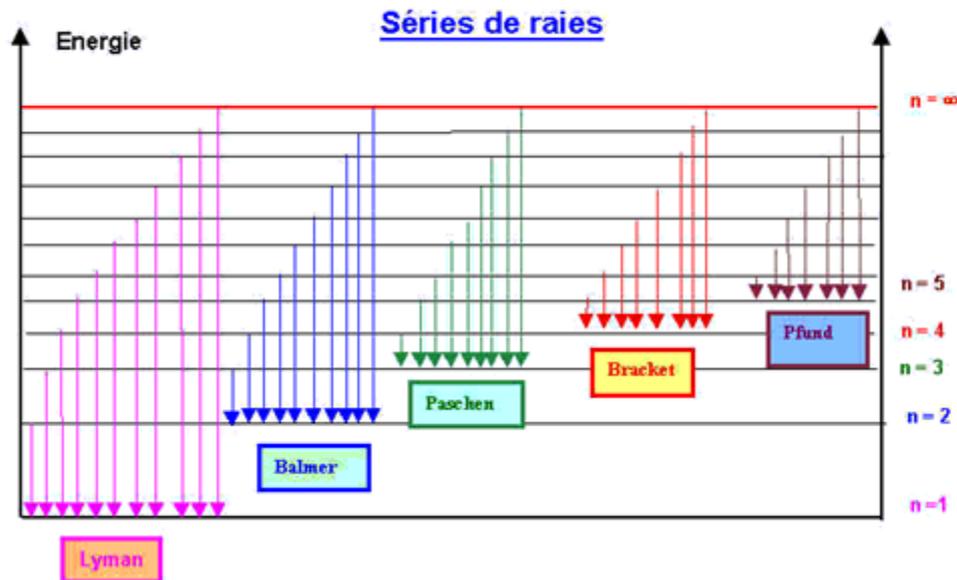
$$\Delta E_{p,3} = E_3 - E_p$$

$$h\nu_{p,3} = -\Delta E_{p,3} = \Delta E_{3,p} = E_0 \times \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{p^2} \right)$$

$$\lambda_{p,3} = \frac{h \cdot c}{E_0 \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{p^2} \right)}$$

Les raies correspondant aux transitions qui aboutissent au niveau excité  $n = 3$  constituent la **série de Paschen**.

- ❖ Les raies correspondant aux transitions qui aboutissent au niveau excité  $n = 4$  constituent la **série de Brackett**
- ❖ Les raies correspondant aux transitions qui aboutissent au niveau excité  $n = 5$  constituent la **série de Pfund**



## 5- INTERPRETATION DES RAIES D'ABSORPTION

Considérons un atome d'hydrogène dans l'état d'énergie  $E_n$ .  
Quand il reçoit un photon d'énergie  $h\nu$  deux éventualités se présentent :

- ❖ **L'énergie du photon est insuffisante pour ioniser l'atome.**
  - Si l'énergie du photon correspond exactement à une transition possible entre le niveau d'énergie  $E_n$  et un niveau excité d'énergie  $E_p$ , avec  $p > n$ , la radiation de fréquence  $\nu$  est absorbée ; la conservation de l'énergie conduit à la relation :  
$$\Delta E_{n,p} = E_p - E_n = h\nu$$

Le spectre d'absorption présente alors **une raie noire** correspondant à la fréquence  $\nu$ .



- Si l'énergie du photon ne correspond pas à une transition électronique possible, le photon n'est pas absorbé, mais diffuse, c'est-à-dire renvoyé avec la même énergie dans une direction a priori quelconque.

❖ **L'énergie du photon est supérieure ou égale à l'énergie d'ionisation de l'atome.**

Si l'énergie  $h\nu$  du photon est supérieure à l'énergie d'ionisation  $E_i$ , le photon peut être absorbé : une partie de son énergie permet l'ionisation de l'atome ; le reste est transféré sous forme d'énergie cinétique à l'électron éjecté.

$$h\nu = E_i + E_c$$

Ainsi, un photon d'énergie quelconque peut être absorbé par l'atome d'hydrogène pourvu que cette énergie soit au minimum égale à l'énergie d'ionisation.

#### **IV- Application à l'astrophysique**

**Quelles informations l'étude des spectres des étoiles peut-elle nous fournir ?**

##### 1) Température d'une étoile

On a dit que plus un corps est chauffé à une température élevée, plus le spectre de la lumière qu'il émet est enrichi en radiations de courtes longueurs d'onde (bleu – violet) :



Bételgeuse

Rouge

$T = 3000\text{ °C}$



Soleil

Jaune

$T = 6000\text{ °C}$



Sirius

Blanche

$T = 11000\text{ °C}$



Rigel

Bleue

$T = 20000\text{ °C}$

##### 2) Identifier un atome dans l'atmosphère d'une étoile

Le spectre des étoiles que l'on reçoit sur Terre est un spectre d'absorption. En l'analysant, on peut retrouver les éléments responsables de cette absorption

##### 3) détermination de sa composition chimique. d'une étoile

- La lumière d'une étoile est émise par sa surface (*gaz chaud sous forte pression*). Cette lumière traverse l'atmosphère de l'étoile composée de plusieurs gaz *sous faible pression*.
  - ==> absorption de radiations,
  - ==> raies noires d'absorption sur le spectre continu de l'étoile.
- La position des raies sombres permet de déterminer les entités chimiques présentes dans l'atmosphère
  - ==> détermination de sa composition chimique.

Ex : Le Soleil est essentiellement composé d'hydrogène H et d'hélium He (92 % et 7,8 %)

## Exercice

L'énergie d'un atome d'hydrogène est quantifiée ces valeurs discrètes vérifient la relation et ne peut prendre que les valeurs suivantes

$$E_n = -\frac{E_0}{n^2} \quad \text{avec } n \in \mathbb{N}^*$$

Sur le diagramme de **la figure-1** on représente trois niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène

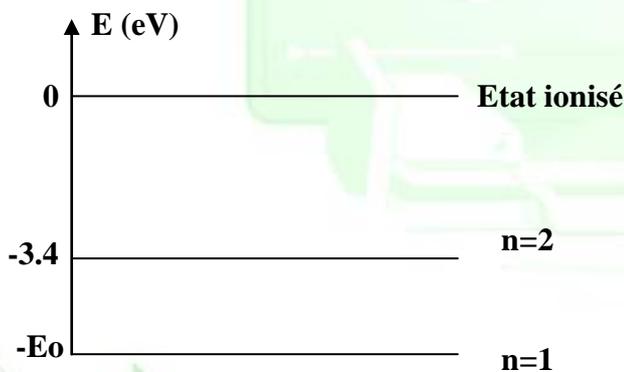


Figure-1

1-

- a- En justifiant, déduire en électron-volts la valeur de  $E_0$
- b- Définir l'état fondamental de l'atome d'hydrogène ; quelle est sa valeur

2- **La figure -2** représente le spectre de l'atome d'hydrogène



Figure-2

- a- S'agit-il d'un spectre d'émission ou d'absorption ?
- b- En s'aidant du diagramme d'énergie de la figure-1 justifier le caractère discontinu du spectre de l'atome d'hydrogène

3- Sachant que l'atome d'hydrogène passe du niveau d'énergie correspondant à  $p$  au niveau  $n$  ( $p > n$ )

- a- Préciser si l'atome absorbe ou perd de l'énergie au cours de cette transition
- b- Montrer que la longueur d'onde  $\lambda$  de la radiation associée à cette transition est donnée par la relation suivante

$$\lambda = 9.12 \times 10^8 \times \frac{(n^2 \times p^2)}{(p^2 - n^2)} \text{ en (mètre)}; n, p \in \mathbb{N}^* (p > n)$$

c- Calculer  $\lambda$  pour  $n=2$  et  $p=3$

4- L'atome d'hydrogène étant dans un état correspondant au niveau  $n=3$ , il est éclairé par une lumière monochromatique de longueur d'onde  $\lambda = 1.28 \mu\text{m}$ . Sachant que l'atome d'hydrogène absorbe cette radiation dans quel nouvel état se trouve l'atome

5- L'atome d'hydrogène étant dans un état correspondant au niveau  $n=3$ , il reçoit un photon d'énergie  $E_1 = 2.5 \text{ eV}$

- a- Calculer l'énergie nécessaire pour ioniser l'atome d'hydrogène se trouvant à l'état  $n=3$
- b- En déduire que le photon d'énergie  $E_1$  peut arracher un électron
- c- Calculer son énergie cinétique

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}, \quad h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}; \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

### Correction

1-

a-  $E_2 = -\frac{E_0}{2^2} \Rightarrow E_0 = -4 \times E_2 = -4 \times (-3.4) = 13.6 \text{ eV}$

b- C'est l'état le plus stable correspondant au niveau d'énergie le plus bas  $E_1 = -E_0 = -13.6 \text{ eV}$

2-

a- Il s'agit d'un spectre d'émission : c'est le résultat de la dispersion du faisceau lumineux émis par l'atome d'hydrogène

b- Chaque raie d'un spectre est associée à l'émission ou l'absorption d'un photon lors d'une transition atomique donc les échanges d'énergies entre la matière et la lumière se font de manière discontinue

3-

a-  $p > n \Rightarrow p^2 > n^2 \Rightarrow -p^2 < -n^2 \Rightarrow -\frac{E_0}{p^2} > -\frac{E_0}{n^2}$

$\Rightarrow E_p > E_n \Rightarrow \Delta E_{p,n} = E_n - E_p < 0$

$\Rightarrow$  l'atome perd de l'énergie sous forme d'un rayonnement

$$b- h\nu_{p,n} = -\Delta E_{p,n} = \Delta E_{n,p}$$

$$= E_p - E_n$$

$$\rightarrow \frac{hc}{\lambda} = -\frac{E_0}{p^2} - \left(-\frac{E_0}{n^2}\right) = E_0\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{p^2}\right) = E_0\left(\frac{p^2 - n^2}{p^2 n^2}\right)$$

$$\lambda = \frac{hc}{E_0} \frac{p^2 n^2}{p^2 - n^2} = \frac{6.62 \times 10^{-34} \times 3 \cdot 10^8}{13.6 \times 1.6 \times 10^{-19}} \left(\frac{p^2 n^2}{p^2 - n^2}\right) = 9.12 \times 10^{-8} \frac{p^2 n^2}{p^2 - n^2} \text{ en (mètre)}$$

$$c- n=2 \text{ et } p=3 \rightarrow \lambda = 9.12 \times 10^{-8} \frac{p^2 n^2}{p^2 - n^2} = 9.12 \times 10^{-8} \frac{3^2 \times 2^2}{3^2 - 2^2} = \mathbf{0.656 \times 10^{-6} \text{ m}}$$

$$4- n=3 \text{ et } p=? \rightarrow 1.28 \times 10^{-6} = 9.12 \times 10^{-8} \frac{p^2 \times 3^2}{p^2 - 3^2} \Rightarrow 14 = \frac{p^2 \times 9}{p^2 - 9} \Rightarrow \frac{9}{14} = 1 - \frac{9}{p^2}$$

$$\Rightarrow \frac{9}{14} = \frac{9}{p^2} \rightarrow p^2 = \left(\frac{14}{9}\right) \times 9 \rightarrow p=5$$

$$5- a- \Delta E_i = E_i - E_3 = \frac{13.6}{3^2} = 1.51 \text{ eV}$$

b-  $E_1 > \Delta E_i \rightarrow$  l'énergie du photon est supérieure à  $\Delta E_i$  donc ce photon ionise l'atome d'hydrogène initialement à l'état excité  $n=3$

$$c- E_c = E_1 - \Delta E_i = 2.5 - 1.51 = 0.99 \text{ eV}$$