

## Interaction lumière-matière

(le terme « interaction » indique une rencontre donnant lieu à un échange d'énergie)

### A- Sources de lumière

Présenter différentes sources de lumières, mettre en œuvre dans la mesure du possible des expériences de dispersion afin de les classer en termes de lumière mono ou polychromatique, approcher la main d'une lampe à incandescence et d'une lampe led ou néon : émission d'IR ?

MAIS :

- Pourquoi le professeur semble-t-il considérer la chaleur produite comme issue d'un phénomène similaire à la lumière ?
- Pourquoi ? Comment ? Il va bien falloir s'expliquer sur les phénomènes physiques à l'origine de la production de lumière.

#### 1) Les ondes électromagnétiques (EM)

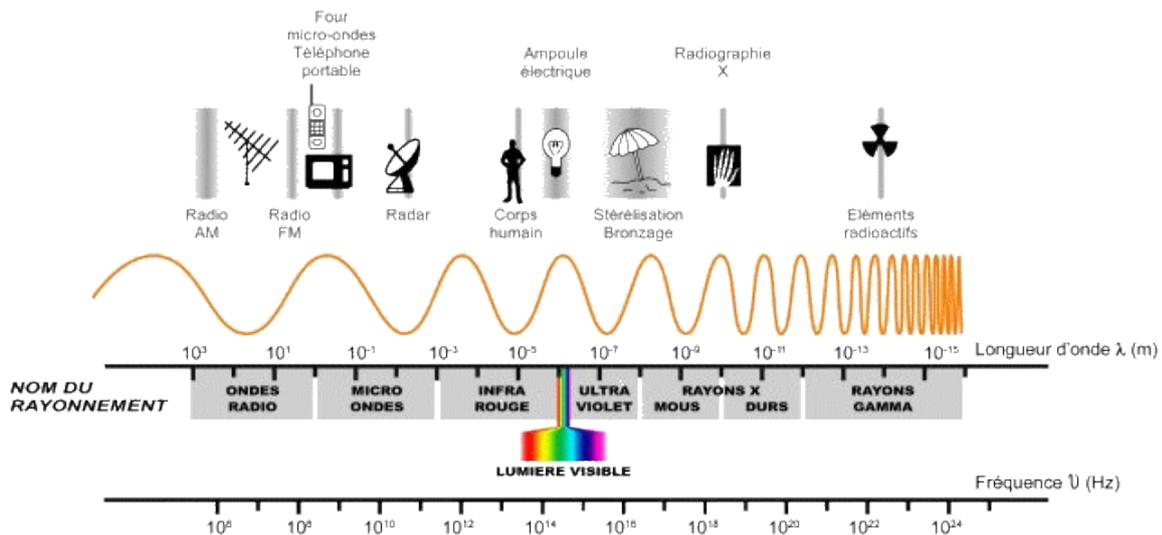
##### a) Description

*Expériences préliminaires (champ magnétique aux voisinage d'un courant électrique, puis champ électrique/tension électrique/courant électrique au voisinage d'une champ magnétique variable)*

- L'agitation des particules chargées (noyaux d'H du Soleil, électrons oscillants dans une antenne, ...), la production d'un champ magnétique autour, la production d'un champ électrique induit, la répétition du phénomène, la propagation, l'onde électromagnétique.

(On note que l'on ne transporte aucune matière, mais que quelque chose se transfère toutefois...)

- La fréquence de l'onde est liée à la fréquence d'agitation de la particule.
- La fréquence de l'agitation de la particule implique forcément la vitesse d'agitation de la particule et donc sa température !
- Plus les fréquences émises sont élevées plus la température est élevée.
- La lumière est une des catégories d'ondes EM



En plus de la fréquence, on remarque ci-dessus une autre grandeur caractéristique des ondes : la longueur d'onde  $\lambda$ . Il s'agit de la longueur parcourue par l'onde pendant une période. La période  $T$ , on le rappelle, est l'inverse de la fréquence  $f$  (ou  $\nu$ , « nu »).

$T$  en s,  $f$  en Hz,  $\lambda$  en m.

**Quelle est l'unité de la grandeur qui relie  $\lambda$  et  $T$  (ou  $\lambda$  et  $f$ ) ?**

**Que représente cette grandeur ?**

b) Loi de Wien (équilibre thermique ou équilibre des flux électromagnétiques ?)

- **Rayonnement et équilibre thermique**

(d'après « Physique » de Eugène Hecht p 586)

Absorption et émission de rayonnement

Tous les corps émettent donc **de l'énergie électromagnétique** à cause de l'oscillation continue et désordonnée des atomes (et donc des noyaux chargés) qui les constituent. Ce rayonnement dit **thermique** est caractérisé par une gamme de fréquences continue et large, qui résulte des interactions électromagnétiques entre les atomes des solides, des liquides et des gaz denses. Par exemple, à l'instant même, à cause de la chaleur de votre corps, vous émettez une bonne quantité d'ondes E.M. infrarouges (IR). Le processus inverse du précédent est l'**absorption du rayonnement**, évidente lorsque vous vous exposez au Soleil ou lorsque vous vous mettez près d'un feu, vous détectez alors l'énergie des rayonnements, surtout des IR, convertie en chaleur dans votre peau.

La quantité de rayonnement thermique émis par un corps dépend des caractéristiques de sa surface (texture, superficie exposée, couleur, etc.) et de sa température (plus la température est élevée, plus l'énergie émise par seconde est grande).

Par contre, la quantité de rayonnement thermique absorbée par un corps, dépend des caractéristiques de sa surface et de la nature du rayonnement incident arrivant sur ce corps (longueur d'onde, intensité) qui, à son tour, dépend de la température de la source.

Exemple de comparaison : un matériau noir et rugueux rayonne beaucoup d'énergie alors qu'un métal poli (Ag ou Cu, par exemple) rayonne 20 à 30 fois moins dans les mêmes conditions.

En général, un bon émetteur est aussi un bon absorbant et vice-versa, Il en résulte qu'un mauvais absorbeur est un bon réflecteur ou un bon transmetteur : il doit évacuer ce qu'il n'absorbe pas sans conversion définitive d'énergie E.M. (par exemple en chaleur).

- **Equilibre**

Déjà, en 1791 (c'est à dire bien avant de maîtriser un modèle décrivant les ondes électromagnétiques et leurs interactions avec la matière), Prévost considérait la matière, à une température constante, comme étant en **équilibre dynamique**, c'est-à-dire absorbant autant d'énergie qu'elle en émet.

S'il n'en était pas ainsi, la température d'un corps absorbant exposé au Soleil augmenterait indéfiniment (jusqu'à provoquer, par exemple, sa fusion...).

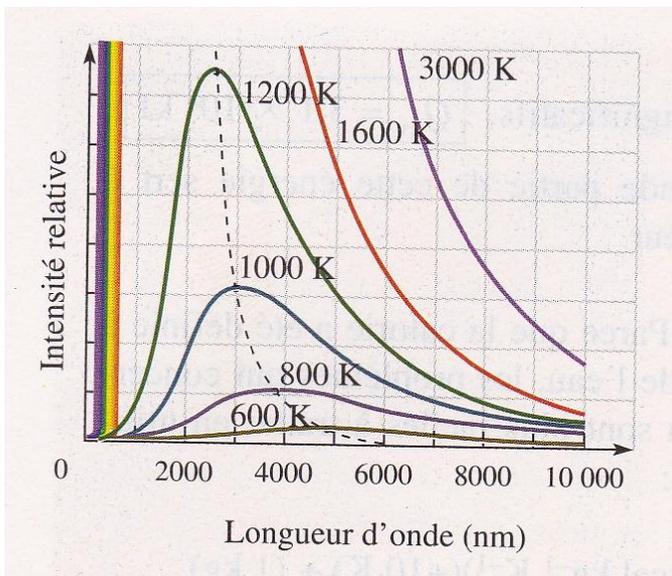
**En fait, l'objet ainsi exposé voit sa température augmenter ainsi que, par conséquent, l'énergie émise par son propre rayonnement, jusqu'à atteindre une température d'équilibre où l'énergie expulsée (rayonnement émis) est égale à l'énergie reçue (rayonnement absorbé).**

- **Remarque**

Une étoile n'est pas en équilibre thermique de la même manière. De l'énergie est communiquée aux noyaux (H, He) par les réactions nucléaires se déroulant au cœur de l'étoile. Cela provoque une agitation de ces noyaux qui caractérisera la température de l'étoile, cette température n'étant pas forcément la même à l'intérieur et à la surface de l'étoile. Là aussi, un équilibre s'établit entre principale énergie reçue (réactions nucléaires) et énergie expulsée (rayonnement thermique).

- **Intéressons-nous au rayonnement thermique émis**

Figure ci-dessous : rayonnements thermiques émis par un même corps à différentes températures (graphe obtenu sur la base d'observations et de mesures, c'est à dire de résultats expérimentaux) : l'intensité émise dépend de la longueur d'onde et passe par une valeur maximale !



(commentaires, discussions)

### - *Modélisons ces résultats*

Il a fallu théoriser, expliquer et finalement proposer des formules pour expliquer les résultats mis en évidence par la figure (1). Il nous faut, en gros, deux formules :

- une formule qui explique que l'énergie rayonnée dépend de  $\lambda$  et passe par un maximum très marqué (les lignes en couleur de la figure (1)). Nous présenterons les idées de Kirchoff puis la loi de Stefan-Boltzmann (des révélations sur le fameux **corps noir**).
- une formule qui explique que la longueur d'onde correspondant au maximum d'émission se décale en fonction de  $T$  (courbe en pointillés de la figure). Nous présenterons la loi de Wien.

### - *Le corps noir*

Kirchoff a considéré un objet en équilibre thermique, c'est à dire émettant autant d'énergie qu'il en absorbe. L'objet en question est une sorte de four isolé, c'est à dire que tout ce qui nous intéresse, les rayonnements émis ou absorbés, l'équilibre thermique, se passe à l'intérieur, les parois épaisses et isolantes, nous permettant de considérer que les rayonnements extérieurs n'ont aucune influence et qu'aucun rayonnement émis depuis l'intérieur du four ne traverse les parois vers l'extérieur.

Kirchoff a réalisé des mesures et a pu établir une relation entre la température du four (liée à la quantité d'énergie présente dans le four) et la longueur d'onde des rayonnements E.M. émis.

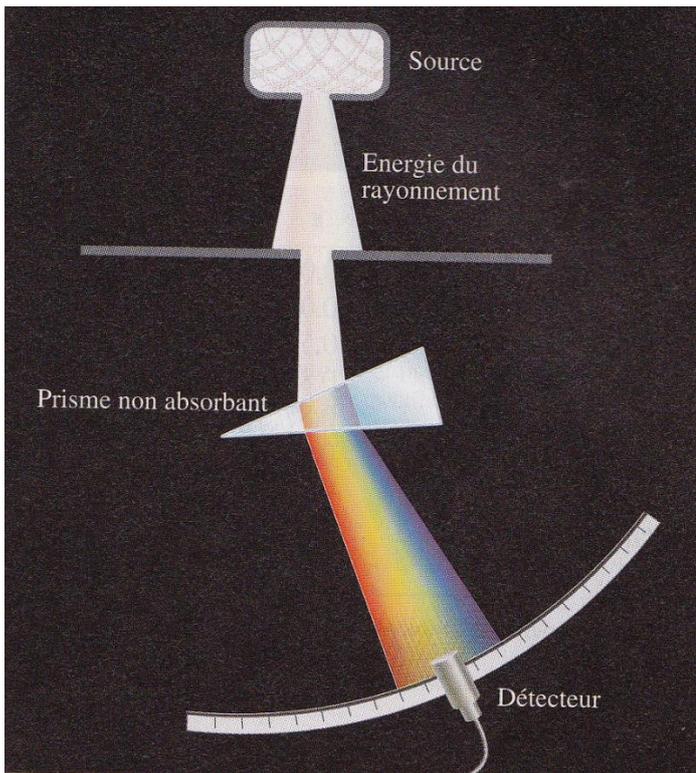
**Résultat** : l'équilibre s'établit de la même manière quel que soit le matériau constituant les parois du four, quelle que soit la dimension du four, l'énergie présente dans le four ne dépend que de  $T$  et  $\lambda$ .

*Illustration concrète* : on a mis dans le four divers objets, de formes, de dimensions et de matériaux différents. On chauffe,  $T$  augmente, on constate qu'ils deviennent tous rouge en même temps (à la même valeur de  $T$ ). La longueur d'onde dominante émise ne dépend que de  $T$  (observation déjà réalisée en 1792 par un céramiste anglais).

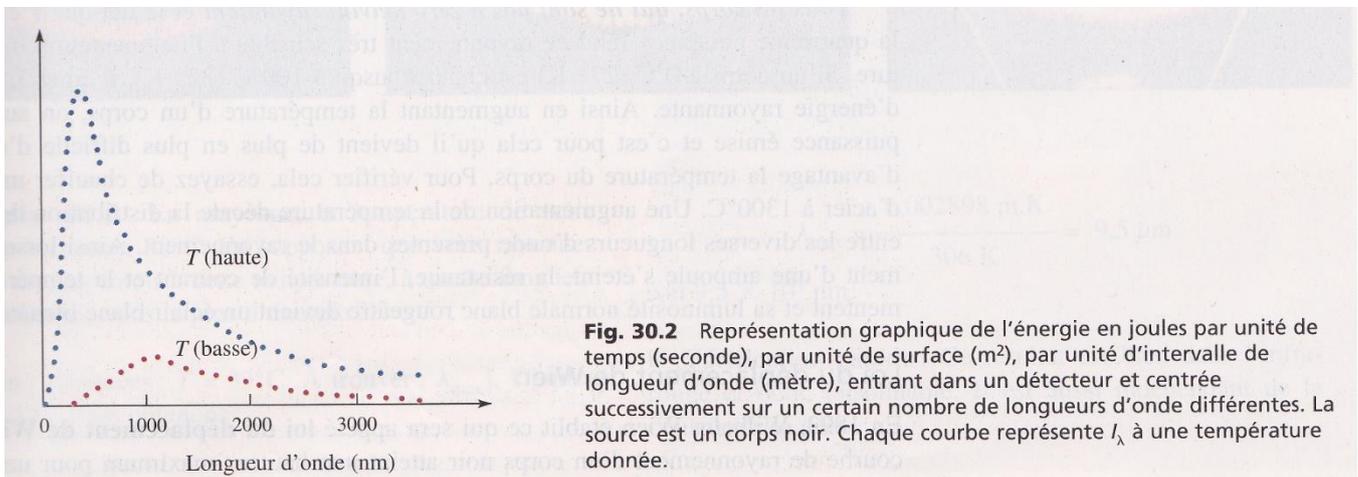
**Remarque de Kirchoff** : Cet objet, s'il est parfaitement isolé, se comporte comme un corps parfaitement absorbant (toute l'énergie émise par l'intérieur des parois est entièrement absorbée et ne s'échappe pas à l'extérieur...), d'où l'appellation « corps noir » puis la présentation de la loi par les termes « rayonnement du corps noir ».

**Remarque** : comment Kirchoff a-t-il pu réaliser des mesures ?

En perçant un petit trou... suffisamment petit pour que l'on puisse négliger l'énergie qui s'en échappe et considérer l'intérieur du four comme maintenu en équilibre thermique.



Le résultat :



- **La loi de Stefan-Boltzmann**

$$P = \sigma ST^4$$

Signification des différentes grandeurs :

- P : puissance totale émise (par l'ensemble des radiations)
- S : superficie de la surface émettrice
- T : température en K
- $\sigma$  : coefficient constant ( $5,6703 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ )

Question : quelle est l'unité de P ?

### Origine de cette formule ?

- D'abord une intuition de Stefan à partir du résultat suivant :

L'énergie totale émise par un fil de platine chauffé (on est loin d'un objet type corps noir, mais bon...) est 11,7 fois plus grande à 1200 °C (1473 K) qu'à 525 °C (798 K)  
(Tyndall, 1865)

L'intuition de Stefan  $(1473)^4 / (798)^4 = 11,6 !!$

Donc P rayonnée est proportionnelle à  $T^4$  (Stefan 1879)

- Puis la loi a par la suite été démontrée par Boltzmann en 1884...

### La loi de Wien

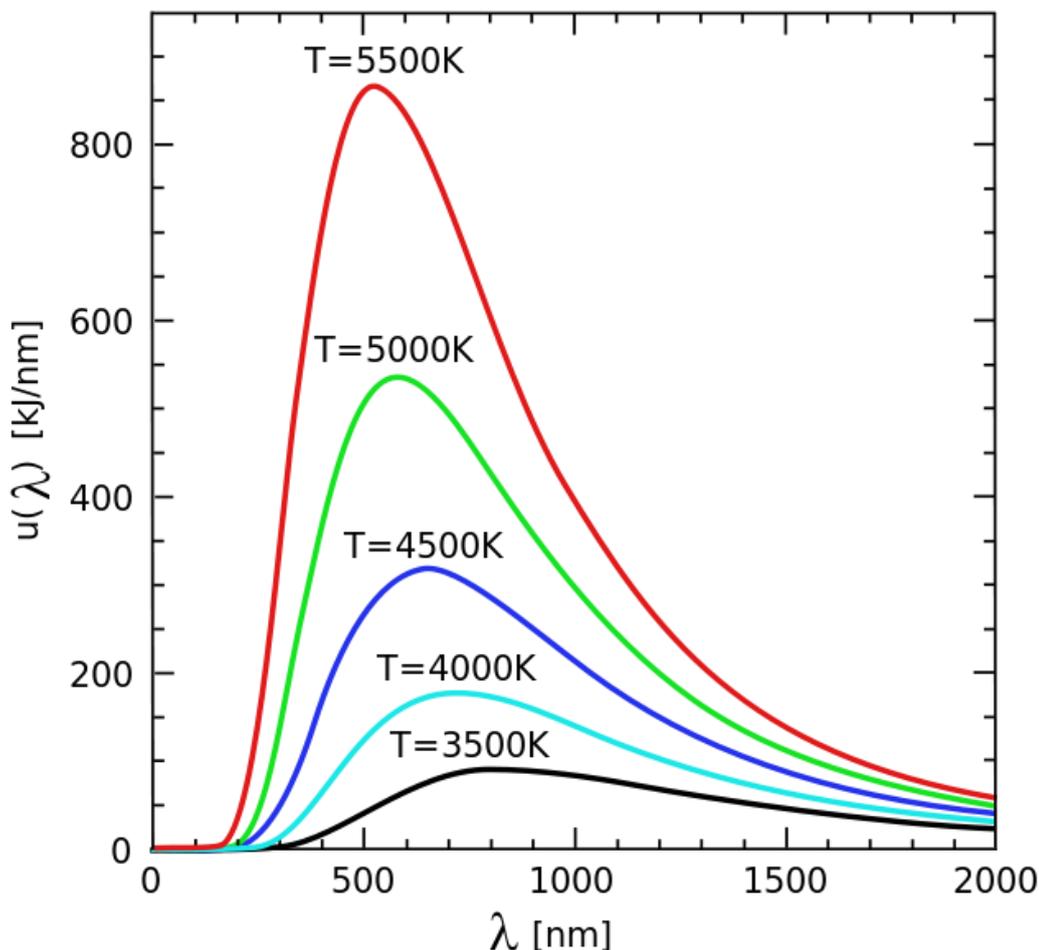
Nous savons que la courbe d'un rayonnement émis par un corps noir atteint un maximum pour une longueur d'onde qui dépend de la température du corps (courbes p 4 et p 6). Ce que Wien a mis en évidence (nous rejoignons enfin notre cours de 1<sup>ère</sup> S), c'est que «  $\lambda_{\max}$  » se déplace vers des valeurs plus petites si la température du corps augmente. La loi s'est même précisée sous la forme :

$$\lambda_{\max} T = \text{constante}$$

la constante, notée  $\sigma_w$  vaut  $2,898 \cdot 10^{-3}$  dans le système international d'unités.

Quelle est l'unité de  $\sigma_w$  ?

Vérifions en exploitant le graphe ci-dessous :



- Remarque à propos de la constante  $\sigma_w$  :

$$\sigma_w \text{ s'exprime en fait en fonction de constantes de la physique : } \sigma_w = \frac{hc}{4,9651k}$$

Avec  $c$  la célérité de la lumière dans le vide,  $h$  la constante de Planck et  $k$  la constante de Boltzmann ( $c$  et  $h$  sont des constantes fondamentales de la physique).

## B- Le photon et l'énergie qu'il transporte

### 1) Un résultat expérimental troublant : l'effet photoélectrique (une animation est présentée pour aider...)

On envoie un rayonnement E.M. (par exemple on éclaire) sur de la matière en considérant qu'à partir d'une certaine valeur d'énergie apportée, il y en aura suffisamment pour arracher les électrons les plus externes à l'attraction de leur noyau.

On voit les choses de la façon suivante : Il y aura probablement une énergie « seuil » et si on apporte plus, on communiquera une énergie cinétique  $E_c$  supplémentaire de plus en plus grande à l'électron arraché. C'est d'ailleurs cette énergie cinétique des électrons éjectés qui est mesurable.

$$\text{Soit : } E_{\text{apportée}} = E_{\text{EM}} = E_c + E_{\text{seuil}}$$

Or que constate-t-on ? que l' $E_c$  (mesurable) est indépendante de l'intensité  $I$  du rayonnement E.M. envoyé, mais qu'elle est fonction affine de la fréquence  $\nu$  de ce rayonnement :

$$E_c = a \times \nu - b \quad \text{On comprend que } b \text{ c'est } E_{\text{seuil}} \text{ et on mesure pour } a \text{ une valeur constante, notée } h.$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ S.I. (constante de Planck)}$$

$$\text{Soit } E_c + E_{\text{seuil}} = h\nu$$

Si  $I$  augmente, le nombre d'électrons éjectés augmente, mais pas leur  $E_c$ .

### Donc ?

- L'énergie E.M. reçue et utilisée par un électron est fortement dépendante de la fréquence du rayonnement E.M. envoyé sur la matière.

### Mieux :

- L'énergie de tout rayonnement électromagnétique de fréquence  $\nu$  est transportée par paquets d'énergie de valeur  $h\nu$ . (Max Planck, 1900)
- L'énergie des rayonnements E.M. est donc **quantifiée**, c'est-à-dire qu'elle ne peut pas prendre n'importe quelles valeurs.

Si l'on diminue l'intensité du rayonnement, on véhicule moins de paquets d'énergie  $h\nu$ , mais on apportera toujours aux électrons des valeurs d'énergie toutes égales à  $h\nu$ .

Si l'on éclaire de la matière avec ce rayonnement, on n'apporte jamais autre chose que des paquets (quanta) d'énergie de valeur  $h\nu$ . L'énergie qui a permis d'arracher un électron c'est  $W$  et elle vaut  $h\nu$ . (évidemment on constate qu'elle n'est pas la même selon la nature de l'atome et le type d'électron. Pour l'é unique de l'atome d'H, elle vaut 13,6 eV)

Si maintenant on fixe  $\nu$  et que l'on éclaire plusieurs matériaux différents, il y aura forcément des électrons qui auront, par exemple, besoin de plus d'énergie que cette valeur  $h\nu$  apportée... eh bien ils ne seront pas arrachés et le rayonnement passera sans que son énergie soit absorbée.

Mais alors ? L'énergie des électrons d'un atome est aussi quantifiée ?

## 2) Le photon

Einstein a tenu à associer un objet transporteur du quantum d'énergie  $h\nu$ . Il n'est pas matériel mais il est considéré comme une entité élémentaire : terminaison « on ».

Il est présent, dans tout rayonnement E.M et en particulier dans le plus célèbre, la lumière.

Il est le grain d'énergie lumineuse.

Il est le photon.

## C- L'énergie des électrons d'un atome ou d'un groupe d'atomes

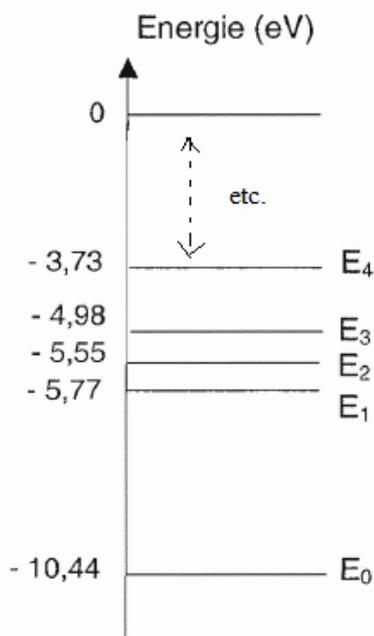
### *Interprétation de la composition de la lumière émise par des atomes de mercure (gaz) auxquels on a apportés de l'énergie*

Proposer préalablement des exemples concrets de ce que veut dire « apporter de l'énergie à un système » afin de considérer que lorsqu'un système échange de l'énergie, il passe d'un état initial à un état final. Le symbole  $\square E$  est présenté.

Conclusions (lumière Hg)

- L'énergie apportée est convertie en lumière (en énergie lumineuse)
- Il n'y a que quelques raies de couleurs, il n'y a donc que quelques valeurs d'énergies produites
- Il n'y a donc que quelques états d'énergies possibles pour les atomes de mercure !

Diagramme d'énergie des électrons d'un atome (cas du mercure gazeux)



D- Photons et atomes : la rencontre

E- Quelques précisions enfin possibles sur les lumières Néon, LASER, et LED

