



# Séminaire de Physique

Du feu de bois à la LED

**Professeur : L. Houssiau**

# Table des matières

## 1. Histoire de l'évolution des moyens d'éclairage

1.1. Les sources lumineuse à combustion .....	4
1.1.1. L'âge du feu .....	4
1.1.2. Les lampes à huile .....	4
1.1.3. Joncs, chandelles et bougies .....	4
1.1.4. Lampes « chimiques » .....	4
1.2. Les lampes électriques .....	5
1.2.1. Les lampes à arc .....	5
1.2.2. Les lampes à incandescence .....	6

## 2. Unités et notions de caractérisation des sources lumineuses

2.1. Unités et définitions .....	7
2.1.1. Candela .....	7
2.1.2. Flux lumineux .....	7
2.1.3. Lumen .....	7
2.1.4. Lux .....	7
2.1.5. Luminance .....	7
2.1.6. Deux jeux d'unités .....	7
2.2. Émission du corps noir .....	8
2.2.1. Loi de Planck .....	8
2.2.2. Loi de Wien .....	8
2.3. Notions de caractérisation .....	9
2.3.1. Température de couleur .....	9
2.3.2. Efficacité lumineuse .....	10
2.3.3. Indice de Rendu des Couleurs (IRC) .....	10

## 3. Description physique des principales lampes actuelles

3.1. Lampes à incandescence classique .....	11
3.1.1. Principe d'émission de lumière .....	11
3.1.2. Spécifications techniques .....	11
3.1.3. Caractéristiques .....	12
3.2. Lampes halogènes .....	12
3.2.1. Principe d'émission de lumière .....	12
3.2.2. Spécifications techniques .....	12
3.2.3. Caractéristiques .....	12
3.3. Lampe à décharges .....	13
3.3.1. Lampes fluorescentes .....	13
3.3.2. Lampe à vapeur de sodium .....	14
3.3.3. Les lampes « éco » .....	15
3.4. Les diodes électroluminescentes .....	15
3.4.1. LED et OLED .....	16
3.4.2. Principe d'émission de lumière .....	16
3.4.3. Fabrication .....	17
3.4.4. Caractéristiques .....	19
3.4.5. LED blanches ? .....	24

## 4. Tableaux généraux

## 5. Marquage des lampes

## 6. Sources principales

6.1. Bibliographiques .....	29
6.2. Sites internet .....	29

# Introduction

La lumière est partout et nous semble tellement banale à tel point qu'on en vient même à oublier de s'interroger à son propos... Après trois années d'études universitaires en physiques beaucoup de questions qui semblent simples restent toujours en suspens.

Voici certaines questions que je me posais et pour lesquelles j'avais envie d'obtenir une réponse quelque peu rigoureuse :

1. Qu'entend-on par lumen, candela, lux, chaleur lumineuse, indice de rendu des couleurs... ?
2. Comment lire les informations se trouvant sur les boites des lampes ?
3. Comment nos ancêtres s'éclairaient-ils ?
4. Pourquoi les tubes des néons sont-ils toujours opaques ?
5. Pourquoi les ampoules de lampes à incandescences sont parfois opaque et parfois pas ?
6. Quelle est la différence entre un lampe halogène et une lampe classiques ?
7. Y a-t-il du gaz dans les lampes à incandescence, si oui est-il dangereux ?
8. Pourquoi les lampes claquent-elles le plus souvent à l'allumage ?
9. Pourquoi les lampes à halogènes sont toujours fines et les lampes à incandescence grosses ?
10. Quels sont les principe physiques qui se cachent derrière la lampe à incandescence, halogènes, fluorescentes, les LED
11. Quelles sont les lampes les plus économiques ?

# 1. Histoire de l'évolution des moyens d'éclairage

## 1.1. Les sources lumineuse à combustion

De toutes les sources possibles et imaginables, il en est une qui ne trouvera sans doute jamais son égal dans l'histoire de l'humanité, c'est le Soleil. Bien avant l'apparition de l'Homme, la Terre jouissait déjà de l'éclairage solaire. De nos jours l'astre solaire constitue toujours notre source principale de lumière. Depuis plusieurs millions d'années, il rythme notre vie quotidienne et ne cesse de susciter la curiosité ainsi que l'émerveillement.

Malheureusement, l'homme ne perçoit en moyenne sa lumière que douze heures sur vingt-quatre et a alors tenté rapidement de combler ce manque.

### 1.1.1. L'âge du feu

Initialement, l'homme de cavernes se contenta de récupérer les branches enflammées par la foudre et d'entretenir ce feu grâce à d'autres branches et herbes sèches. Ensuite l'Homo erectus (-500 000 ans) commença réellement à le dompter et parvient à le créer artificiellement à l'aide de silex ou de bouts de bois frottés l'un contre l'autre.

Malheureusement, beaucoup d'incidents survinrent...

### 1.1.2. Les lampes à huile

On date les premières lampes à huile à 20 000 ans avant J.-C. Les systèmes les plus rudimentaires étaient simplement constitués d'une pierre creuse et d'une mèche en fibres végétales torsadées ou tressées (roseau, chanvre, lin, laine, puis coton) qui se gorgent de liquide par capillarité.

### 1.1.3. Joncs, chandelles et bougies

Alors que la lampe à huile brûlait toujours d'autres techniques sont entrées en compétition : tout d'abord c'est le jonc qui fit son apparition : il s'agit d'une plante verte dont la tige cylindrique et rigide était trempée dans de la graisse végétale ou animale. Ensuite, il y eut une compétition plus sérieuse entre les lampes à huile et la chandelle. La première exigeait une attention constante mais la flamme était d'assez bonne qualité tandis que la seconde réclamait peu de soin mais la flamme était jaunâtre et fumeuse. C'est finalement la lampe à huile qui restera la plus utilisée uniquement parce que cette dernière était plus économique.

*[La chandelle, seulement constituée d'une mèche entourée de suif de bœuf ou de mouton, est plus pratique sans être excessivement chère (mais elle est taxée et l'huile reste plus économique) ]*

Apparurent alors les cierges, fabriqués en cire d'abeille ils avaient les avantages des chandelles tout en éliminant leurs inconvénients. Néanmoins, du fait du prix élevé, cette technologie était réservée au clergé.

Ce n'est qu'au XIV qu'apparut le mot bougie, période à partir de laquelle on commença à produire de la cire en grande quantité. La bougie connut alors de nombreuses évolutions dans sa composition. De nos jours la bougie est faite à partir de paraffine (mélange d'hydrocarbure saturés).

### 1.1.4. Lampes « chimiques »

Jusqu'à présent les combustibles se trouvaient naturellement, mais avec l'apparition d'une chimie de plus en plus poussée à la fin du XVIII<sup>ème</sup> le XIX<sup>ème</sup> connut de nombreuses lampes à combustion telles

que les lampes à essence ou alcool.<sup>1</sup>

## 1.2. Les lampes électriques

### 1.2.1. Les lampes à arc

Vers 1810, Sir Humphry Davy découvre l'arc électrique. Le principe consiste à joindre deux électrodes, généralement en carbone, parcourues par un courant d'une dizaine d'ampères. Avec un tel courant, la chaleur dégagée par effet joule est extrêmement importante. Lorsque l'on sépare lentement les deux électrodes on remarque que le courant passe toujours et ce de manière continue et en créant un arc lumineux.

Normalement il est impossible qu'un courant passe à travers deux éléments disjoints. Mais dans notre cas, puisque les électrodes sont traversées par un courant élevé, elles s'échauffent et il en résulte des vapeurs de carbone. Lorsqu'on sépare les deux électrodes, ce n'est pas du vide qu'il y a entre elles mais bien des vapeurs de carbone dans de l'air ionisé, ce qui permet au courant de se propager.

Bien évidemment, pour que les vapeurs se situent entre les électrodes, la lampe à arc de DAVY était verticale.

Notons que l'arc émet à peine 10% de la lumière totale de la lampe, la majeure partie (85%) est émise par la pointe de l'anode (potentiel négatif), le reste (5%) est émis par la cathode.

Malheureusement, pour H. Davy, le système se consumait beaucoup trop vite (3cm/heure pour un courant de 10 ampères et une distance séparatrice de 1cm) et réclamait une énergie électrique énorme. En effet, pour sa première démonstration publique il lui fallut une batterie de Volta de 2000 disques ce qui engendrait un coût beaucoup trop élevé que pour séduire les acheteurs potentiels. À cela s'ajoute que le fait que la lumière produite était éblouissante, peu chaleureuse et que l'odeur dégagée par la combustion était plutôt désagréable.

Une première amélioration est vite apparue : elle consistait à enfermer le système dans un cloque quasi fermée laissant juste passer l'oxygène nécessaire à la combustion ; ceci permis de passer d'une durée de vie de quelques dizaines de minutes mais avec une intensité lumineuse plus faible.

Malgré cette avancée, ce ne fut pas une révolution : trop onéreuses et demandant un réajustement mécanique régulier, l'engouement ne fut donc pas de mise.

Mais la déception fut de courte durée : dans les années '40, Léon FOUCAULT substitua les électrodes en charbon classique par des électrodes en charbon de cornue : un bon conducteur peu combustible. Malgré les inconvénients restants, dès le début des années '50, la lampe à arc était utilisée avec succès. Que ce soit en Amérique, en France ou en Angleterre, l'utilisation de lampe à arc ne cessait d'augmenter.

Mais c'est surtout le russe Paul JABLOCHKOFF, en 1876, qui révolutionna la technologie de l'arc électrique en réalisant une lampe horizontale : entre les deux électrodes verticales, il plaça une substance isolante à froid mais conductrice électrique à chaud. (typiquement du plâtre ou kaolin) et en utilisant du courant alternatif plutôt que du continu afin d'obtenir une usure égale des électrodes. En effet, le pôle positif se consume plus vite du fait que les électrons quittant l'électrode négative gagnent de l'énergie cinétique et viennent frapper brutalement l'électrode positive.

---

<sup>1</sup> Pour en savoir plus : <http://members.aol.com/lumiara/fr/miscfr.htm>

C'est grâce à cette révolution qu'en 1878, les principales rues de Paris et Londres furent éclairées par des lampes pouvant tenir jusqu'à deux heures. De plus, elles remplacèrent petit à petit les lampes à huile, sources de nombreux incendies.

### 1.2.2. Les lampes à incandescence

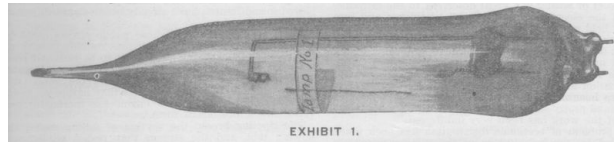
Définition : on dit d'un matériau qu'il est incandescent s'il est lumineux à haute température.

Historiquement il est assez difficile de dire qui a inventé la lampe à incandescence.

En 1801, Sir Humphry Davy rendit brillante une bande de platine en y faisant passer du courant. Mais l'évaporation du matériau était trop rapide pour qu'on puisse en faire une lampe. Et l'observation se suffit à elle-même, H. Davy ne poursuivit pas ses recherches.

En 1840, Warren de la Rue mis sous vide une bobine de platine à travers laquelle il fit passer un courant électrique. L'idée de placer le filament sous vide fut une véritable révolution. En effet, cela permet de pouvoir augmenter la température du filament sans que celui-ci ne brûle et sans qu'il ne réagisse avec d'autres molécules. Cette technique permet donc d'augmenter la longévité des lampes ainsi que leur éclairement. Malgré cette avancée technique, le prix du platine était à ce point élevé qu'il rendit impossible toute exploitation commerciale.

Ce serait<sup>2</sup> quinze ans plus tard qu'Heinrich Göbel aurait mis au point la première ampoule « moderne ». Fabriquée à partir de bambou carbonisé pour le filament, l'histoire raconte qu'au début il aurait utilisé des bouteilles d'eau de Cologne pour l'ampoule.



*Illustration 1:*

Plus tard, en 1879, le chercheur-inventeur autodidacte américain Thomas EDISON dont on dit qu'il est l'inventeur de la lampe à incandescence toujours utilisée de nos jours. L'histoire lui attribue ce titre d'« inventeur de la lampe à incandescence » car contrairement à ses prédécesseurs, il prit le soin de déposer des brevets pour ses inventions. De plus, il poussa un peu plus loin le vide grâce à une trompe à mercure.

Enfin, la dernière invention notable fut celle de Irving Langmuir qui, en 1881, remplaça le vide par du gaz inerte (gaz rares)

---

<sup>2</sup> Il est préférable de mettre la forme conditionnelle car la version allemande sur wikipédia à propos de cette lampe est en contradiction avec d'autres articles.

## 2. Unités et notions de caractérisation des sources lumineuses

### 2.1. Unités et définitions

#### 2.1.1. Candela

Unité de mesure d'*intensité lumineuse* (symb. cd) équivalant à l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence  $540.10^{12}$  Hz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian.

#### 2.1.2. Flux lumineux

Le flux lumineux est la grandeur visuelle qui correspond à la puissance lumineuse émise par une source<sup>3</sup>.

$$F = K_M \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} F_{e,\lambda} v(\lambda) d\lambda$$

$v(\lambda)$  : fonction de sensibilité spectrale (de l'oeil)  $0 \leq v(\lambda) \leq 1$

$F_{e,\lambda}$  : est la densité spectrale de flux énergétique (flux énergétique pour une bande très étroite de longueur d'onde donnée  $\lambda$ ), qui s'exprime en watts/mètre

$K_M = 683 \text{ lm/W}$

#### 2.1.3. Lumen

Unité de mesure de *flux lumineux* (symb. lm), équivalant au flux lumineux émis dans un angle solide de 1 stéradian par une source ponctuelle uniforme située au sommet de l'angle solide et ayant une intensité lumineuse de 1 candela.

Donc  $1 \text{ lm} = 1 \text{ Cd} \cdot \text{sr}$

#### 2.1.4. Lux

Unité de mesure d'*éclairage lumineux* (symb. lx), équivalant à l'éclairage d'une surface qui reçoit, d'une manière uniformément répartie, un flux lumineux de 1 lumen par mètre carré.

Donc  $1 \text{ lx} = 1 \text{ Cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{m}^{-2} = \text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$ .

#### 2.1.5. Luminance

Quotient de l'intensité lumineuse d'une surface par l'aire apparente de cette surface, pour un observateur lointain. Unités :  $\text{Cd}/\text{m}^2$

#### 2.1.6. Deux jeux d'unités

L'oeil n'est pas un capteur linéaire de ce fait pour caractériser une onde électromagnétique on utilise deux jeux d'unités selon qu'on se trouve au niveau de la nature de l'onde (point de vue énergétique) ou bien qu'on se situe au niveau de sa perception (système d'unités photométriques)

<sup>3</sup> [http://fr.wikipedia.org/wiki/Flux\\_lumineux](http://fr.wikipedia.org/wiki/Flux_lumineux)

Grandeurs	Système d'unités	
	Énergétique	Lumineux
Flux lumineux	W	lm
Luminance	W.m <sup>-2</sup> .sr <sup>-1</sup>	Cd.m <sup>-2</sup>
Éclairement	W.m <sup>-2</sup>	lux ou lm.m <sup>-2</sup>
Intensité	W.sr <sup>-1</sup>	Cd ou lm.sr <sup>-1</sup>

## 2.2. Émission du corps noir

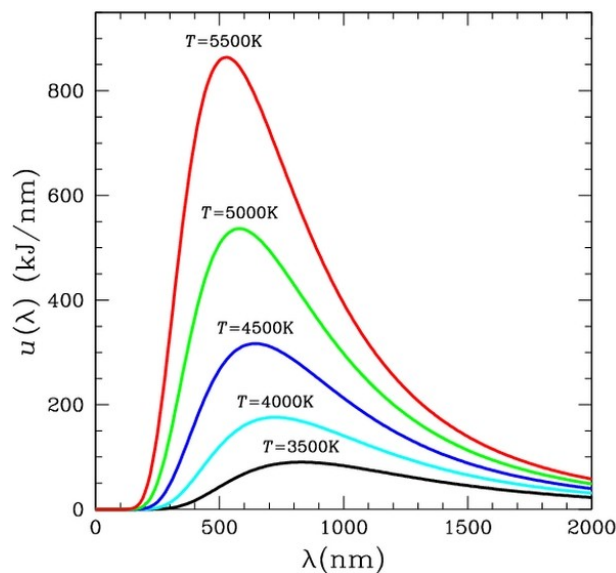
### 2.2.1. Loi de Planck

La loi de Planck prédit l'intensité (radiance spectrale) des radiations électromagnétiques en fonction de la longueur d'onde et de la température du corps noir. [J/(m<sup>2</sup>.sr)]

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^3}{\lambda^5} \frac{\lambda^5}{\exp\left(\frac{hc}{k_B \lambda T}\right) - 1} \quad \text{Équation 1}$$

La loi de Planck est aussi souvent écrite en terme de densité spectrale d'énergie :

$$u(\lambda, T) = \frac{4\pi}{c} I(\lambda, T) [J.m^{-3}] \quad \text{Équation 2}$$



### 2.2.2. Loi de Wien

La loi de Wien dérive de la loi de Planck du rayonnement du corps noir. La loi de Wien décrit la relation liant la longueur d'onde  $\lambda_{\max}$ , correspondant au pic d'émission lumineuse du corps noir, et la température T (exprimée en kelvin). En effet en dérivant l'Équation 2 et en ayant posé



### 2.3.2. Efficacité lumineuse

Elle définit la capacité d'un éclairage de produire un flux important à partir d'un Watt (W) électrique absorbé. Il faut distinguer trois efficacités lumineuses, suivant que l'on tient compte :

- de la source lumineuse seule,
- de la source lumineuse et de son alimentation électrique (transformateur, redresseur, ballast...),
- de la source lumineuse, de son alimentation électrique et des pertes optiques de l'installation (diffuseur, réflecteur...).

Les unités utilisées sont les lumens/watts

### 2.3.3. Indice de Rendu des Couleurs (IRC)

Cet indice, compris entre 0 et 100, définit la capacité d'une source lumineuse de restituer les différentes couleurs du spectre visible des objets qu'elle éclaire et ce sans modifier les teintes, par rapport à une source de référence : la lumière blanche. La lumière solaire possède un IRC de 100 puisque sa lumière est blanche (son spectre visible est continu). Voici un tableau qualitatif donnant une appréciation qualitative de la qualité de la lumière en fonction de son indice IRC :

Indice IRC	Qualité
< 50	Médiocre
50 < IRC < 70	Mauvais
70 < IRC < 80	Acceptable
80 < IRC < 90	Bon
90 < IRC	Très bon

## 3. Description physique des principales lampes actuelles

### 3.1. Lampes à incandescence classique

#### 3.1.1. Principe d'émission de lumière

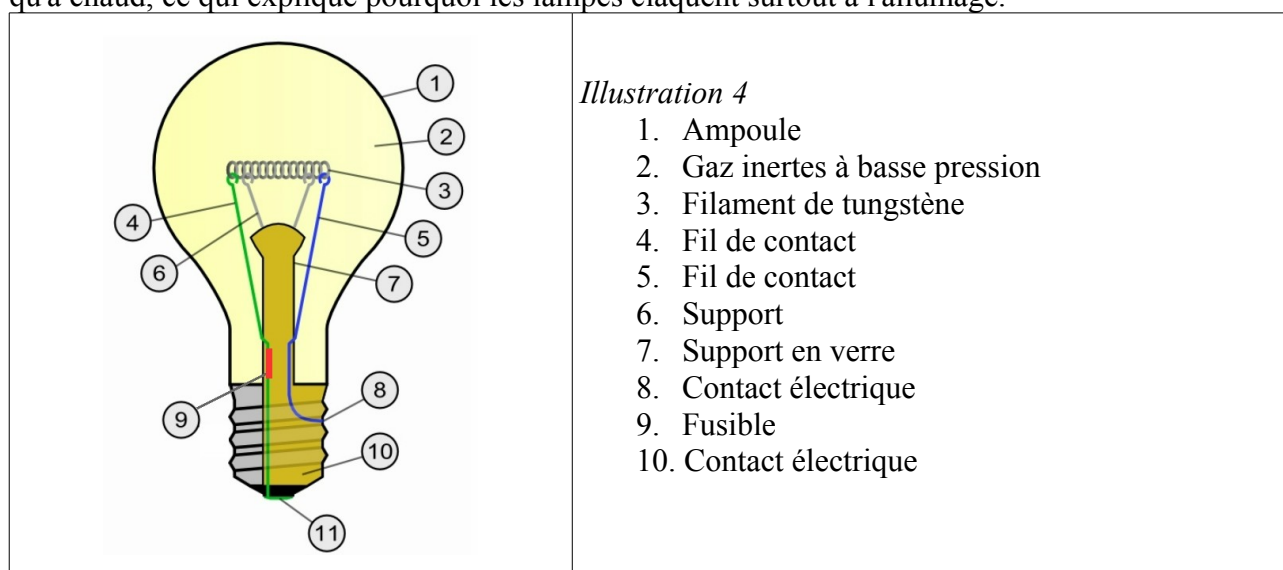
**Définition** : l'incandescence est l'apparition de radiations électromagnétiques lorsqu'un corps est soumis à de haute température.

L'incandescence se fait généralement dans l'infrarouge (sous forme de chaleur). Bien évidemment, l'effet recherché dans les lampes est une émission dans le domaine visible mais seulement 10% de l'émission se fait dans le visible. Le phénomène qui se produit dans ce type de lampe est très simple et bien connu : dans le matériau conducteur parcouru par un courant, les électrons s'entrechoquent impliquant leur excitation. L'électron passe à un niveau d'énergie supérieur et émet un photon en retournant à son état initial.

#### 3.1.2. Spécifications techniques

Les lampes à incandescence sont formées d'une ampoule protectrice en verre sous vide ou remplie de gaz inertes (généralement de l'argon).

Le filament de deux mètres de long est fabriqué en tungstène, un élément réfractaire possédant une température de fusion de (3380°C), est parcouru par un courant de 230mA<sup>4</sup> ce qui l'élève à une température de 2500°C. À cette température deux phénomènes apparaissent. Premièrement, les réactions chimiques sont plus nombreuses et plus rapide à tel point que le temps de vie du tungstène serait à peine d'une seconde à l'air libre du fait de l'oxydation, on placera alors le filament sous vide. Deuxièmement, le filament se sublime et vient noircir la face intérieur de l'ampoule, ce phénomène est diminué lorsqu'on la remplit de gaz inertes. La dégradation du filament est le problème majeur dans ce type de lampes. En effet, certaines zones s'évaporent plus vite que les autres, ce qui les rend plus fragiles. Comme la plupart de métaux, le tungstène possède une résistance plus faible à froid qu'à chaud, ce qui explique pourquoi les lampes claquent surtout à l'allumage.



4  $P=RI^2=50W$  donc  $I=0,227A$  (en courant continu)

### 3.1.3. Caractéristiques

Caractéristiques	Lampe de 25 watts	Lampe de 100 watts
Efficacité lumineuse	8 lm/W	13,8 lm/W
IRC	> 95	> 95
T coul. (K)	2700	2800
Durée de vie	1000 heures	1000 heures

## 3.2. Lampes halogènes

### 3.2.1. Principe d'émission de lumière

Bien que leur nom ne l'indique pas, les lampes halogènes sont des lampes à incandescence leur principe d'émission de lumière est donc identique à celui vu précédemment, c'est de l'effet Joule.

### 3.2.2. Spécifications techniques

Les lampes halogènes diffèrent cependant par le gaz qu'elles contiennent. Le filament est toujours en tungstène mais baigne dans des gaz halogénés (iode ou brome) à haute pression limitant l'évaporation du tungstène. Plus précisément, les vapeurs de tungstène se combinent avec l'halogène et sur le filament, sous l'effet de la chaleur, le composé se redécompose en tungstène + halogène ce qui permet une régénération du filament augmentant ainsi son temps de vie d'un facteur deux.

Il est donc préférable que l'ampoule (en verre) soit la plus petite possible, épousant au mieux le filament pour augmenter le taux de régénération. De plus le verre doit être épais pour résister à la pression et aux variations thermiques. La couleur émise tire sur le bleu avec une forte émission d'UV. Ces derniers sont filtré par le verre en quartz qui contient de l'oxyde de titane et quelques terres rares (selon tables des éléments).

Les matières organiques comme les graisses présentes à la surface de la peau réagissent à chaud et produisent entre autres du graphite (carbone) qui ternit la lampe et diminue son efficacité lumineuse.

Les matières minérales alcalines comme le sel présent sur l'épiderme (chlorure de sodium : NaCl) ont la propriété de réagir à haute température avec le quartz en le fragilisant. cela peut conduire à une rupture de l'ampoule, qui peut être quelquefois très spectaculaire voire dangereuse.

### 3.2.3. Caractéristiques

Les lampes à halogènes ont la réputation d'être grosses consommatrices d'énergie. Cela vient du fait que les modèles de salon, sur pied, consomment 150, 300 et 500 W selon les modèles et remplacent généralement des lampes de moindre puissance. Mais une lampe halogène de 100 W éclaire autant qu'une ampoule classique de 150 W, donc consomme moins pour le même service rendu.

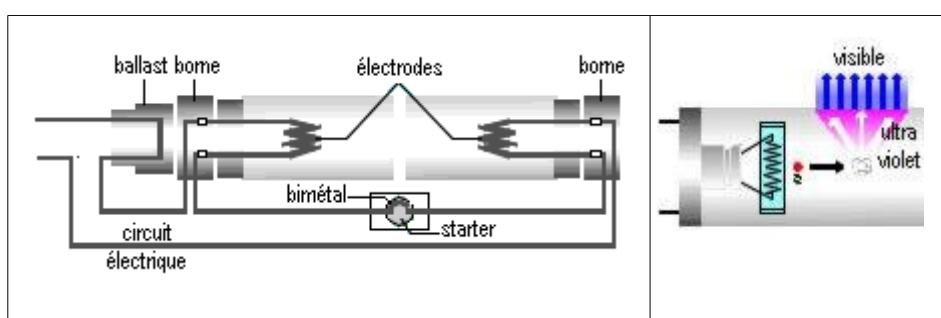
Le *temps de vie* est d'environ 2000heures soit deux fois plus qu'une lampe classique alors que la température atteint 3000K. L'efficacité lumineuse varie généralement de 15 à 30 lm/W.

## 3.3. Lampe à décharges

### 3.3.1. Lampes fluorescentes

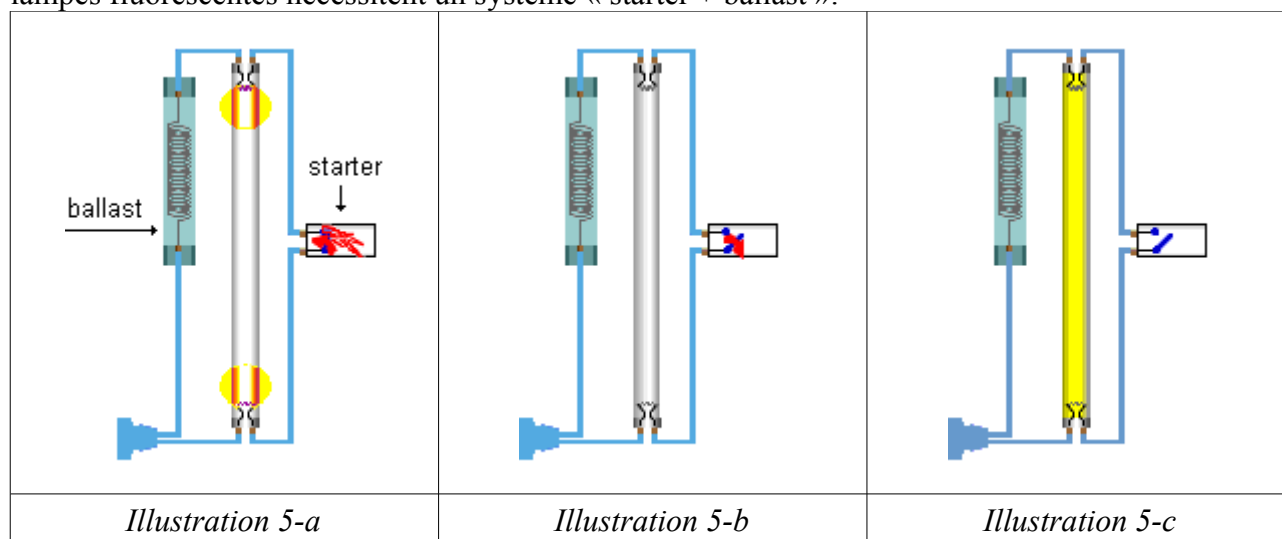
#### 3.3.1.1. Principe d'émission

L'émission de lumière se fait en deux grandes étapes. Premièrement, un électron issu de la cathode va entrer en collision avec un atome du gaz tel que le mercure, l'argon ou le krypton. Cette collision inélastique va causer l'excitation de l'atome de gaz, un électron périphérique va passer dans un état d'énergie supérieur instable et émettre un photon lors du retour à son état initial, malheureusement la longueur d'onde est trop courte, la radiation se fait dans l'UV. Entre alors en jeu la seconde partie du processus qui consiste à enduire la partie intérieure du tube par un matériau phosphorescent qui réémettra de la lumière visible.



#### 3.3.1.2. Spécifications techniques

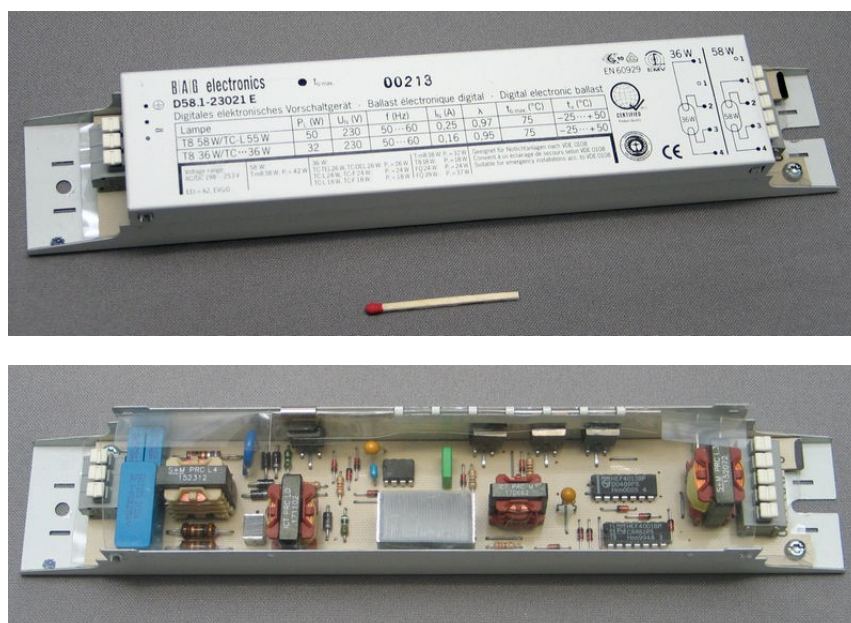
Des tels dispositifs nécessitent un mécanisme d'allumage plus complexe. En l'occurrence, les lampes fluorescentes nécessitent un système « starter + ballast ».



Le starter est composé d'un petit tube rempli de gaz et pourvu d'un bilame. À l'allumage, la mise sous tension provoque un arc électrique au sein du gaz. Celui-ci chauffe le bilame, jusqu'alors ouvert (*Illustration 5-a*), qui se ferme.

Pendant ce temps, un courant circule dans les électrodes. Elles s'échauffent et ionisent le gaz qui les entoure, ce qui facilitera l'allumage. Le bilame étant fermé, l'arc électrique dans le starter disparaît. Le bilame se refroidit alors et s'ouvre (*Illustration 5-b*). Il provoque ainsi une interruption

brusque du courant dans le ballast raccordé en série. Le ballast, composé d'un bobinage de cuivre entourant un noyau de fer (ballast dit inductif ou électromagnétique), va tenter de rétablir ce courant en libérant toute son énergie. Cela provoque une impulsion de tension très élevée entre les électrodes de la lampe (jusqu'à 1500 V) capable d'allumer le tube fluorescent (*Illustration 5-c*). Souvent, cet allumage ne réussit pas en une seule tentative. Si la lampe ne s'est pas allumée, le cycle recommence. En fonctionnement, la tension aux bornes de la lampe est trop faible pour générer un nouveau cycle d'allumage (40 à 110 V). Le starter se maintient donc en position ouverte et le courant traverse la lampe qui reste allumée. À partir de cet instant, le ballast joue le rôle de limiteur de courant et empêche la destruction de la lampe.



### 3.3.1.3. Caractéristiques

Les caractéristiques des lampes fluorescentes sont extrêmement variables :

Caractéristique	Maximum	Minimum
Puissance (W)	14	80
Flux lumineux (lm)	1000	5000
IRC	60	90
T° couleur (K)	2700	6500
Durée de vie (heures)	5000	18 000

Ces valeurs ont été prises pour les tubes les plus fréquemment rencontrés à des températures ordinaires (25 à 35°C) mais la température ambiante influence fortement les performances des tubes (il est assez courant que sous 0°C les tubes ne s'allument pas). Les performances sont également extrêmement liées au ballaste.

### 3.3.2. Lampe à vapeur de sodium

L'émission spectrale du sodium est concentrée dans ses raies D, proches du maximum de sensibilité de la vision humaine (550nm). Cet éclairage est utilisé en éclairage routier pour sa très haute efficacité : 140 lm/W et de sa durée de vie de 8000h. Le rendu des couleurs est très pauvre. Il se justifie en particulier dans les atmosphères avec particules (couloirs routiers souterrains), car étant à bande étroite, il est peu dispersé et très pénétrant (poussières, brouillard).

Que ce soit pour la lampe fluorescente ou de sodium, si on veut élargir les raies du spectre lumineux, il convient d'augmenter la pression en Hg ou Na. En effet, des interactions entre atomes auront lieu ce qui modifie l'énergie de transition des électrons élargissant ainsi les raies d'émission.

### 3.3.3. Les lampes « éco »

Par lampes « éco » on entend souvent lampes « économiques et écologiques ». Le terme plus correct est « lampes basse consommation ».

Les lampes basse consommation, consomment 4 fois moins d'électricité qu'une lampe à incandescence, pour offrir la même lumière, et elle dure 6 à 10 fois plus longtemps.

En fait, cette lampe se compose d'un ballaste électronique associé à un tube fluorescent spécial, replié sur lui-même pour être plus compact. Par rapport à un TL classique, il y donc plusieurs avantages : le facteur de forme qui permet la compatibilité avec des luminaires prévus pour des lampes ordinaires, un meilleur rendement procuré par le ballast électronique, et une meilleure qualité de lumière : les poudres luminescentes utilisées sont sélectionnées pour obtenir un IRC optimal, se rapprochant de celui d'une lampe à incandescence. En outre, le ballast électronique évite le scintillement ("flicker") de la lumière émise, rendant celle-ci moins fatigante pour la vue.

Sans dénigrer les qualités très réelles de ces lampes, il est cependant nécessaire d'attirer l'attention sur certains défauts rarement discutés par les fabricants. Les valeurs annoncées notamment, sont trompeuses : même lorsqu'il est vrai qu'un débit lumineux identique est obtenu avec 1/4 de la puissance électrique d'une lampe classique, il ne sera pas possible d'obtenir la même qualité subjective d'éclairage dans ces conditions ; cela est dû notamment à un IRC moins bon.

De même, la durée de vie annoncée est irréaliste en pratique: celle-ci est calculée en se basant sur les durées de vie théoriques des composants, donc à une température ambiante de 25°C ; dans un luminaire, il est très rare que cette condition soit réalisée. De plus, la lampe est fréquemment installée "la tête en bas", ce qui expose, par convection, le circuit électronique à la chaleur évacuée par le tube. La durée de vie des composants (condensateurs chimiques en particulier) étant très affectée par la température, la lampe défaillera souvent beaucoup plus vite que la valeur annoncée. Un autre élément qui va affecter la durée de vie est la fragilité des composants électroniques face aux surtensions et aux perturbations ; celles-ci peuvent provenir de sources artificielles (machinerie) ou naturelles (foudre) et causer la mise hors service instantanée de la lampe, apparemment sans raison. Il est à noter que les chiffres annoncés ne sont applicables qu'à du matériel fabriqué selon les règles de l'état de l'art : de nombreuses fabrications très bon marché n'ont aucune chance de tenir leurs promesses, même dans des conditions d'utilisation idéales.

Enfin, ces lampes sont source de pollution accrue : lorsqu'elles sont jetées, c'est non seulement la partie défectueuse qui est éliminée, mais aussi tout le reste, composants électroniques, etc. Ce n'est pas anodin, car elles contiennent des métaux lourds (plomb, nickel) et en particulier du mercure, toxique et néfaste pour l'environnement. Sur le plan radioélectrique, elles génèrent également une pollution non négligeable : les harmoniques de la fréquence de l'oscillateur sont gênantes dans les gammes d'ondes longues et moyennes.

## 3.4. Les diodes électroluminescentes

Luminescence : la luminescence est le terme général utilisé pour décrire l'émission de radiation d'un

solide lorsque ce dernier est soumis à une excitation.

L'électroluminescence se produit lorsque qu'on applique au matériau un courant électrique (continu ou alternatif).

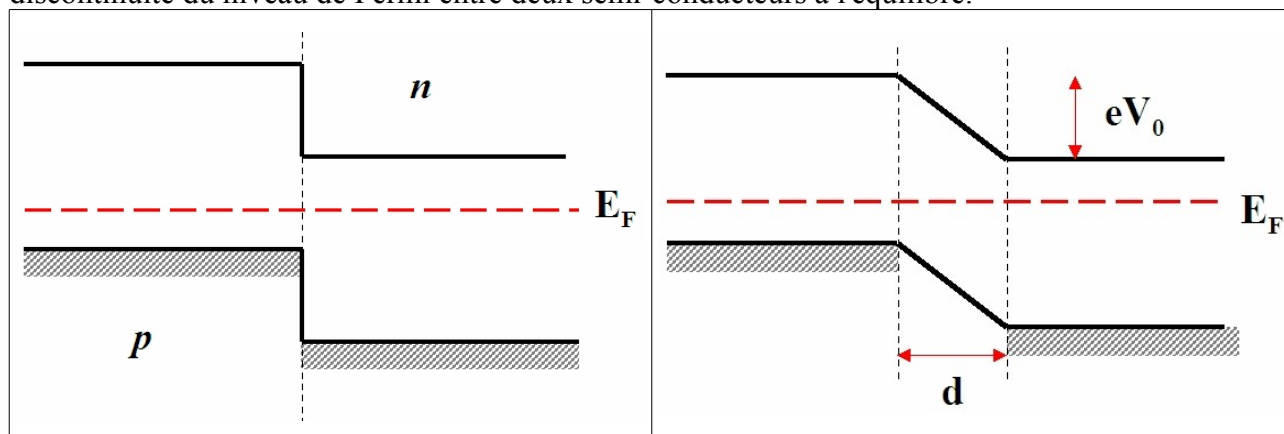
### 3.4.1. LED et OLED

L'acronyme « LED » provient de l'anglais et signifie light-emitting diode qu'on traduit en français par « diodes électroluminescentes » (DEL). La première LED émettant dans le visible a été inventée par Nick Holonyak Jr. en 1962. Aujourd'hui elles servent de témoins lumineux dans la plupart des appareils électroniques. Depuis peu, on commence à parler aussi de OLED, des LED organiques qui pourraient servir de sources étendues (pour remplacer les néons par exemple) alors que les LED classique sont des sources ponctuelles.

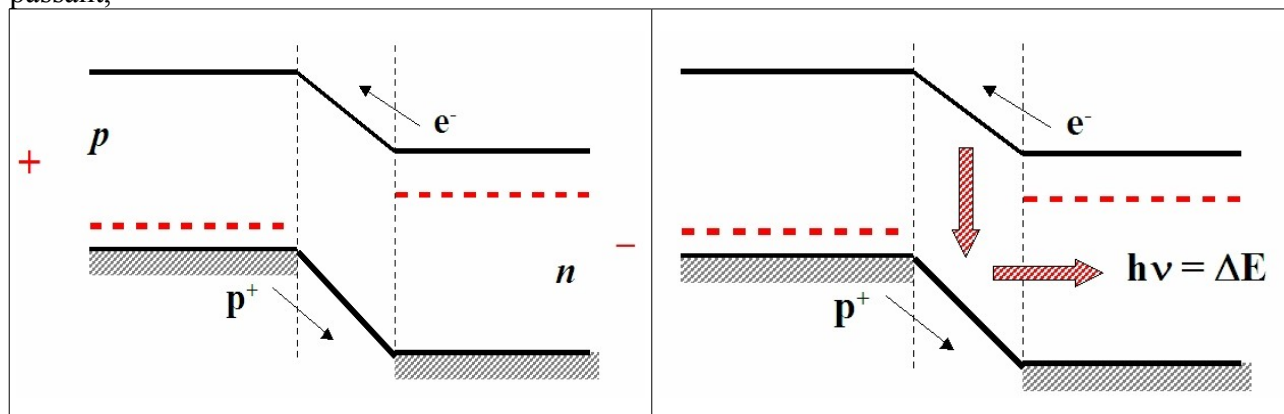
Dans le cadre de ce travail, nous ne nous attarderons pas sur ce dernier type de LED qui n'est qu'au stade expérimental.

### 3.4.2. Principe d'émission de lumière

Comme le dénomination l'indique, les LED sont des diodes, donc des jonction PN. Lorsqu'on met deux semi-conducteurs en contact, les électrons du côté  $n$  (respectivement les trous du côté  $p$ ) vont migrer vers le côté  $p$  (respectivement  $n$ ). Une fois l'équilibre atteint, il ne peut y avoir de courant électrique. Ce qui se traduit par le fait qu'il y a autant d'électrons qui vont de la région  $p$  vers  $n$  que d'électrons qui vont de  $n$  vers  $p$  et de même pour les trous. Ceci entraîne qu'il ne peut y avoir de discontinuité du niveau de Fermi entre deux semi-conducteurs à l'équilibre.



Une fois qu'on applique une différence de potentiel ( $V_a$ ) de sorte à polariser la diode en sens passant,



Pour "allumer" la diode électroluminescente, on la polarise en sens direct (le + sur la zone de type *p*) avec une ddp de  $V_A$  volts. Il s'en suit que les niveaux de Fermi s'éloignent de  $eV_A$  et que la barrière de potentiel s'abaisse de  $eV_A$ . Ainsi, la distance entre le bas de la bande de conduction et le haut de la bande de valence reste constante. Cette distance, exprimée en électron-volt s'appelle l'énergie de gap :  $E_g = E_c - E_v$

C'est lors de la recombinaison d'un électron et d'un trou dans un semi-conducteur qu'il y a émission d'un photon. En effet, la transition d'un électron entre la bande de conduction et la bande de valence se fait par conservation d'énergie, l'énergie perdue par l'électron se transforme en énergie électromagnétique :  $E = h\nu$  où  $\nu$  est la fréquence du photon émis.

Le photon aura alors comme longueur d'onde

$$\lambda = \frac{c \cdot h}{E_g \cdot e} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 6,62 \cdot 10^{-34}}{E_g \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = \frac{1240 \cdot 10^{-9}}{E_g}$$

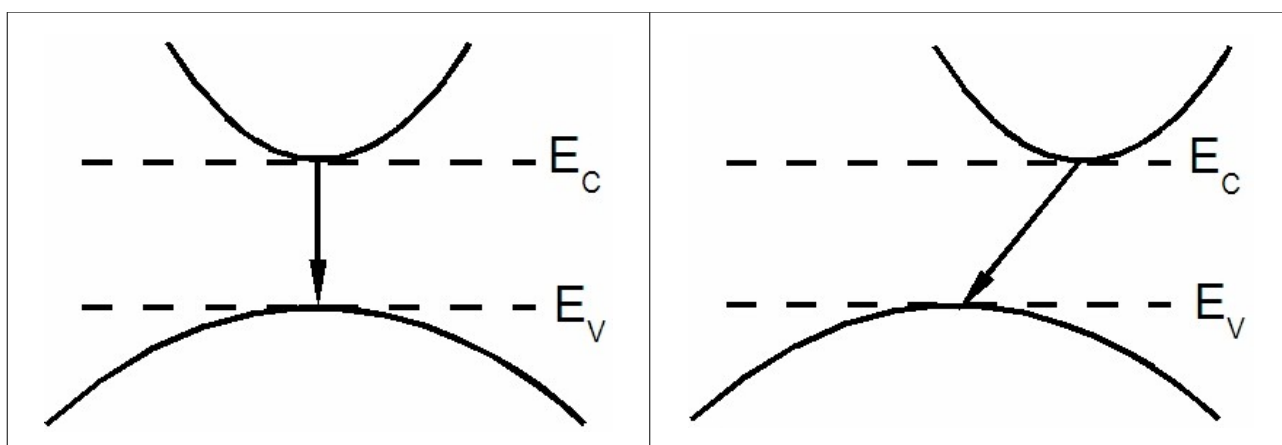
### 3.4.3. Fabrication

En fonction de la couleur qu'on veut obtenir, on utilisera un semi-conducteur différent. Cependant tous les semi-conducteurs ne conviennent pas ; il faut qu'ils respectent deux conditions :

- ils doivent avoir un gap permettant l'émission dans le visible (1,7 à 3 eV);
- le gap doit être direct

La première condition est évidente mais cela l'est moins pour la seconde. Cette seconde condition s'explique par la conservation de la quantité de mouvement qui nécessite un phonon dans le cas d'un gap indirect. Bien que l'énergie emportée par le phonon soit faible (0,02eV) le processus implique maintenant 3 particules diminuant ainsi la probabilité de transition d'un facteur  $10^6$  !

Attention, il se peut qu'un semi-conducteur intrinsèque ait un gap indirect mais que grâce à l'introduction de défauts et suite à des recombinaisons il puisse y avoir luminescence, c'est le cas du GaP.



C'est pourquoi on ne trouve pas de diode au silicium ou germanium qui sont pourtant les semi-conducteurs les plus courants.

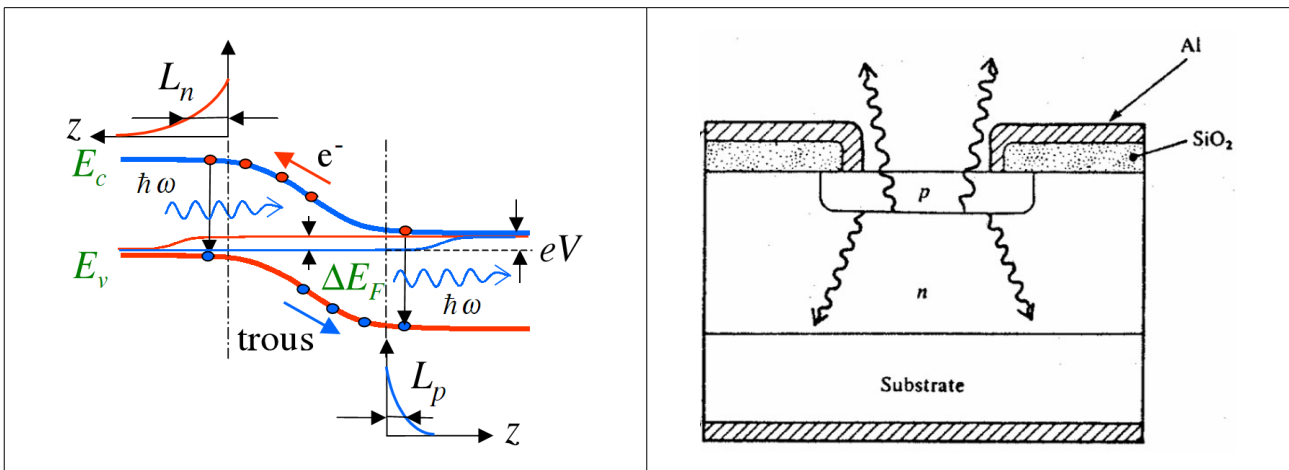
Il faut aussi s'assurer que les recombinaisons électron-trou se fassent près de la surface de sorte à éviter la réabsorption du photon. Comment éviter cela ?

On sait que les porteurs excédentaires diffusent et se recombinent par transitions radiatives. Leur densité décroît donc de manière exponentielle en s'éloignant de la région de charge d'espace. Les longueurs de diffusion  $L_n$  et  $L_p$  sont données ci-dessous en fonction des coefficients de diffusion  $D_n$  et  $D_p$  eux-mêmes fonction de la mobilité des porteurs  $\mu_n$  et  $\mu_p$ .

$$L_x = \sqrt{D_x \tau_x} \quad ; \quad D_x = \mu_x \frac{k_B T}{e} \quad ; \quad \mu_x = \frac{e \tau_x}{m_x^*} \quad x = p \text{ ou } n$$

Puisque la mobilité de trous est significativement plus faible que celle des électrons, la longueur de diffusion des électrons  $L_n$  est plus grande que la longueur de diffusion des trous du côté  $n$ ,  $L_p$ .  $L_n$  est typiquement de l'ordre de quelques microns. C'est donc du côté  $p$  que la zone sur laquelle les photons seront émis est la plus large.

C'est la raison pour laquelle les LED sont fabriquées avec la zone  $p$  proche de la surface émettrice comme indiqué sur le schéma de structure d'une DEL ci-dessous.

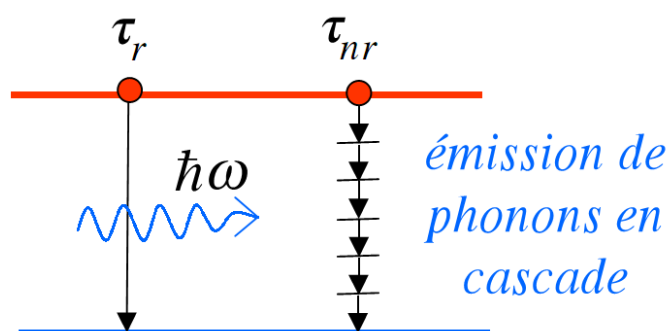


La zone de génération de photons la plus large (soit la zone  $p$ ) est placée près de la surface émettrice afin de limiter de problème de la réabsorption. En effet, les photons émis pourraient toujours être réabsorbés par transition d'un électron vers la bande de conduction. Cet électron pourra alors se désexciter de manière soit radiative soit non radiative. S'il est désexcité de manière radiative, on retrouve le photon initial et rien n'est perdu quant au rendement de la LED. Mais il faut garder à l'esprit que l'électron peut se désexciter de manière non radiative avec une probabilité non négligeable surtout si l'électron excité se trouve près d'une surface ou tout autre défaut de la structure cristalline car il sera alors principalement désexcité de manière non radiative par cascade de phonons. Du point de vue du rendement, il y a donc un intérêt évident à faire en sorte que les photons soient générés dans une région la plus proche possible de la surface d'émission de la LED. De cette façon les photons ont beaucoup moins de chance d'être réabsorbés. Si la région  $n$  était mise près de la surface émettrice, cette condition ne serait pas satisfaite car tous les photons seraient générés très près de la zone de charge d'espace et devraient encore traverser toute la région  $n$  où ils auraient de bonnes chances d'être réabsorbés.

### 3.4.4. Caractéristiques

#### 3.4.4.1. Collision avec les phonons

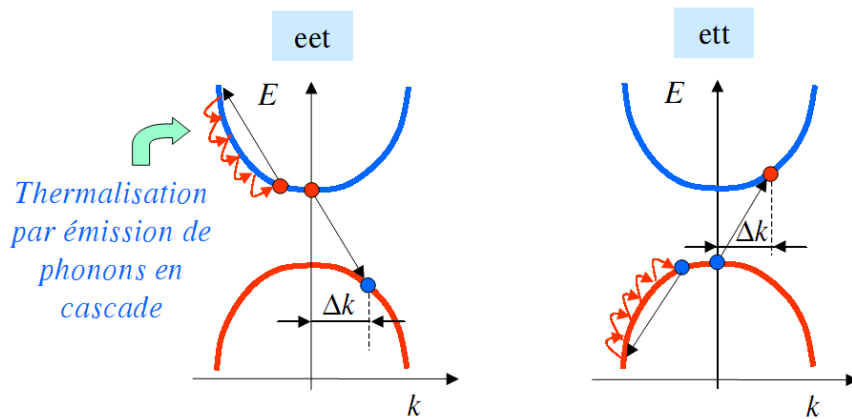
Le rendement est conditionné par les transitions non radiatives. Un exemple important de transition non radiative est la transition par transfert d'énergie avec les phonons du réseau cristallin. Puisque l'énergie des phonons est généralement plus faible que celle du gap, il faut des échanges d'énergie avec plusieurs phonons pour une seule transition. On peut estimer que pour descendre tout le gap soit une énergie de l'ordre de 1eV, l'électron doit céder son énergie à  $\sim 40$  phonons. Ceci ne peut bien entendu pas se faire en une seule fois car la probabilité d'interaction entre un tel nombre de particules est infime. En pratique l'échange a lieu par étape grâce à l'existence de niveaux électroniques intermédiaires comme indiqué sur le schéma suivant. Si de tels niveaux intermédiaires n'existaient pas, une telle émission de phonons en cascade ne pourrait pas se produire et les transitions radiatives seraient alors privilégiées. On comprend ainsi l'importance des défauts et des impuretés dans les S-C destinés aux applications optiques. En pratique pour les applications optiques, on cherchera à éviter les dislocations, les lacunes, les impuretés chimiques et les interactions avec les surfaces du matériau s-c.



#### 3.4.4.2. Recombinaison Auger

Un autre mécanisme très important de recombinaisons non radiatives responsable de la limitation du rendement des DEL est la recombinaison Auger. Lors d'une recombinaison Auger, l'électron cède son énergie à un autre électron de la bande de conduction. Ce dernier monte donc dans la bande mais il est très vite thermalisé ( $10^{-13}$ s) par interaction avec le réseau cristallin (cascade de phonons). L'énergie est donc perdue sous forme de phonons (échauffement) et aucun photon n'est émis. Ce mécanisme de recombinaison non radiative est représenté schématiquement à la figure de gauche ci-dessous. On notera que l'interaction entre l'électron qui descend et l'électron Auger doit respecter la conservation de la quantité de mouvement.

La figure de droite illustre le même phénomène avec un électron Auger dans la bande de valence : l'électron qui descend donne son énergie et sa quantité de mouvement à un électron profond de la bande de valence, celui-ci est thermalisé par cascade de phonons. Il est habituel d'interpréter ce mécanisme en terme de transition de trous. L'électron qui descend est vu comme un trou qui monte grâce à un échange d'énergie avec un trou de la bande de valence. Ce trou « Auger » est alors thermalisé et remonte dans la bande par cascade de phonons. Pour différencier les deux mécanismes, on appelle le premier effet Auger eet et le second effet Auger ett. Ces lettres signifient recombinaison électron-trou par l'intermédiaire d'un électron (ou d'un trou) Auger (la particule Auger étant représentée par les lettres du milieu e et t dans eet et ett, respectivement).



À la figure ci-dessous nous illustrons les deux mécanismes de recombinaison Auger dans une jonction  $p-n$  polarisée. Puisque le mécanisme eet fait intervenir deux électrons simultanément sa probabilité est proportionnelle au carré de la densité électronique, soit  $n^2$ . Ce mécanisme affectera donc plus particulièrement les recombinaisons qui se font en région de type  $n$ . De même le mécanisme Auger ett, faisant intervenir deux trous simultanément, est proportionnel au carré de la densité de trous, soit  $p^2$ . Il affecte donc les recombinaisons du côté  $p$  et est négligeable du côté  $n$ . Puisque le mécanisme eet exige la présence d'un état électronique libre, c'est à dire un trou, dans la bande de valence sa probabilité est également proportionnelle à  $p$  soit une probabilité globale proportionnelle à  $n^2p$ . Il en est de même pour le mécanisme ett qui met en jeu un électron de la bande de conduction (il faut un électron dans la bande de conduction pour que le trou puisse y monter). La probabilité associée à l'effet Auger eet est donc proportionnelle à  $p^2n$ .

Les formules ci-dessus définissent les taux de recombinaison Auger  $R_A$  pour les deux mécanismes eet et ett. Les constantes de proportionnalité  $C_n$  et  $C_p$  sont appelées les coefficients Auger. Comme le taux  $\tau_A^{eet}$  représente le nombre de trous qui disparaissent par unité de temps du côté  $n$ , soit  $R_A^{eet} = -dp/dt$ , on peut définir la durée de vie Auger eet comme étant  $\tau_A^{eet} = 1/C_n n^2$ . De même pour l'effet Auger ett on a  $\tau_A^{ett} = 1/C_p p^2$ . Ce sont ces durées de vie qui conditionneront le rendement des LED. Notons que pour les applications optiques on utilise des semi-conducteurs fortement dopés afin d'atteindre aisément des degrés d'excitation élevés (le degré d'excitation est proportionnel à la densité de porteurs injectés qui est d'autant plus élevée que le dopage de la jonction  $p-n$  est élevé). Comme les durées de vie Auger sont inversement proportionnelles aux concentrations de porteurs, on voit qu'il faudra être attentif à l'effet Auger en ce qui concerne le rendement de la génération de lumière et un compromis devra être établi entre rendement et excitabilité.

Donc :

$$R_A^{eet} = C_n n^2 p = \frac{p}{\tau_A^{eet}} \quad \text{Équation 7}$$

Ordres de grandeurs :

$$C_n = 10^{-31}, n=10^{18}, \tau_A^{eet} = 10^{-5}\text{s}$$

Conclusion : si le dopage est élevé, il y a compétition entre les combinaisons radiatives et les recombinaisons Auger.

Dans les S-C fortement dopés tels que ceux utilisés dans les applications optiques, ce sont les

recombinaisons Auger qui conditionnent le rendement (les autres mécanismes de recombinaison non radiative sont en général négligeables). Pour estimer le rendement il faut donc comparer les *temps de vie* radiative  $\tau_r$  et Auger  $\tau_A$ . Les formules ci-dessous expriment la compétition entre les deux effets. Les deuxièmes termes des membres de droite représentent les contributions à la génération de photons.

$$R_A^{eet} = C_n n^2 p = \frac{p}{\tau_A^{eet}} = -\frac{dp}{dt} \quad \text{Équation 8}$$

$$R_A^{eet} = C_p p^2 n = \frac{n}{\tau_A^{eet}} = -\frac{dn}{dt} \quad \text{Équation 9}$$

Concrètement, un bon semi-conducteur doit avoir à la fois un gap direct et un taux de recombinaisons Auger faible.

Matériau	Gap direct		Gap indirect		
	GaAs	GaSb	GaP	Si	Ge
$r$ ( $\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$ )	$7,2 \cdot 10^{-10}$	$2,4 \cdot 10^{-10}$	$5,4 \cdot 10^{-14}$	$1,8 \cdot 10^{-15}$	$5,3 \cdot 10^{-14}$
$\tau_r$ (s) à $10^{18} \text{cm}^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$4,2 \cdot 10^{-9}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$
$E_g$ (eV) à 300K	1,435	0,72	2,26	1,12	0,66
C ( $\text{cm}^6 \text{s}^{-1}$ )	$10^{-31}$	$10^{-25}$	$8 \cdot 10^{31}$	$3 \cdot 10^{31}$	$10^{31}$
Processus	ett	ett	ett	eet	eet,ett
$\tau_A$ (s) $10^{18} \text{cm}^{-3}$	$10^{-5}$	$10^{-11}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$10^{-5}$

On observe que bien que le GaSb a un gap direct, il ne convient pas pour les LED puisque le temps de vie Auger est supérieur au temps de vie radiative.

### 3.4.4.3. Rendement quantique interne de luminescence

Le rendement quantique interne est défini de manière naturelle comme étant le rapport

$$\eta_{\text{int}} = \frac{R_r}{R_r + R_{nr}}$$

Que l'on peut récrire en fonction des temps de vie

$$\eta_{\text{int}} = \frac{1/\tau_r}{1/\tau_r + 1/\tau_{nr}} = \frac{1}{1 + \tau_r/\tau_{nr}}$$

Cette expression tend vers 1 uniquement si le gap est direct, que le dopage est limité (peu d'effet Auger), peu d'impuretés et de défauts (limite les cascades de phonons)

### 3.4.4.4. Rendement des LED

Nous nous intéressons maintenant au rendement global des DEL. Nous devons pour cela considérer la puissance électrique que requiert la polarisation de la jonction,  $P_{\text{elec}} = I.V$  où  $I$  est fourni par la

réponse en courant de la jonction  $p-n$  donnée ci-dessous. Mais, comme nous venons de le voir, tous les photons créés ne sont pas émis en raison du phénomène de réabsorption.

Le rendement global d'une DEL est par définition le rapport de la puissance lumineuse émise sur la puissance électrique consommée. C'est donc le produit de la tension appliquée  $V_a$  par le courant par traversant la jonction ; le courant étant le nombre d'électrons passant la jonction par seconde multiplié par la charge de l'électron.

$$\eta = \frac{P_{\text{lumineuse}}}{P_{\text{électrique}}} = \frac{\hbar \omega \cdot \text{nbr de photons émis/s}}{e \cdot V_a \cdot \text{nbr d'e}^- \text{ passant la jonction/s}} \quad \text{Équation 10}$$

$$\eta = \frac{\hbar \omega}{e \cdot V_a} \frac{\text{nbr de photons émis/s}}{\text{nbr de photons créés/s}} \frac{\text{nbr de photons créés/s}}{\text{nbr d'e}^- \text{ passant la jonction/s}} \quad \text{Équation 11}$$

$$\eta = \frac{\hbar \omega}{e \cdot V_a} \eta_{\text{optique}} \eta_{\text{interne}} \quad \text{Équation 12}$$

Certains matériaux, comme le GaAs ont un rendement interne proche de  $\eta=1$ . Qu'en est-il du rendement optique ?

#### 3.4.4.5. Rendement optique

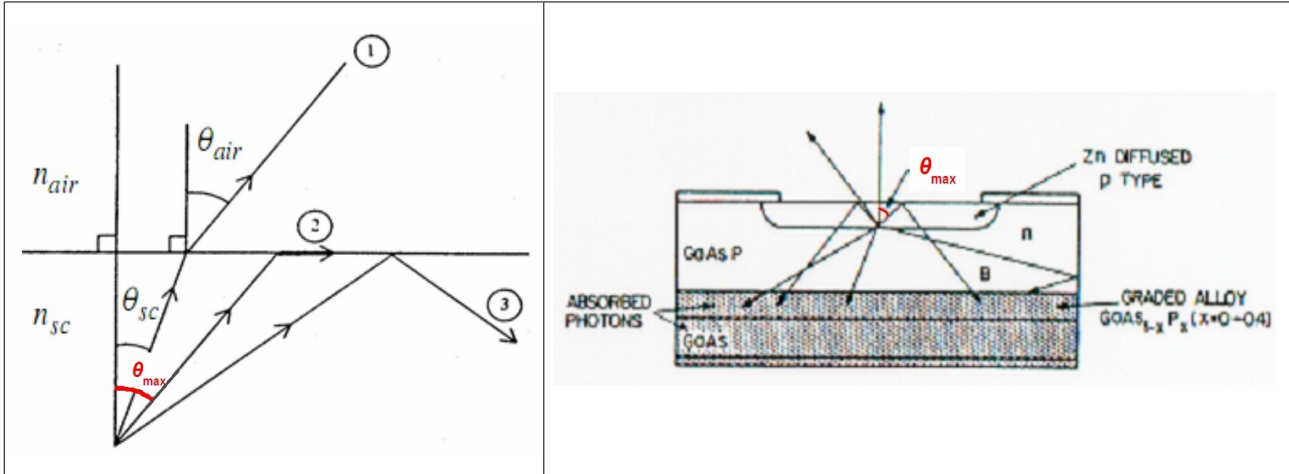
Nous discutons ici le rendement des DEL en fonction de leur structure (en particulier, leur géométrie). La structure des DEL est en effet déterminante pour leur rendement. Ceci provient du fait que l'indice de réfraction des S-C est élevé et occasionne, dès lors de nombreuses réflexions (voir plus bas). Ces réflexions ont pour effet d'augmenter le trajet des photons dans le S-C et donc d'augmenter le risque de réabsorption et diminuer le rendement. Cet effet est d'autant plus marqué que les réflexions renvoient les photons loin de la surface émettrice et en particulier vers le substrat. Le substrat contient plusieurs interfaces inévitablement associées à des défauts et donc à une augmentation de la réabsorption (voir schéma ci-dessous).

De plus, il est à noter que l'émission spontanée étant isotrope (pas de direction privilégiée), les photons sont

émis dans toutes les directions. Beaucoup seront donc perdus par réabsorption directe sur les parois et interface de la DEL. En ce qui concerne les réflexions, il y en a de deux types : les réflexions de Fresnel dues au passage d'un changement abrupt d'indice et les réflexions internes totales (voir schéma de droite ci-dessous).

Rappelons la loi issue de Snel-Descartes :

$$\theta_{\text{max}} = \arcsin\left(\frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{sc}}}\right)$$



Les réflexions de Fresnel sont partielles et le coefficient de réflexion associé  $R$  est donné ci-dessous en fonction des indices de réfraction du S-C ( $n_{sc} = 3$  à  $4$ , typiquement) et de l'air ( $n_{air} = 1$ ). À incidence normale ce coefficient de réflexion vaut à peu près 30% et il augmente quand l'angle d'incidence  $\theta_{sc}$  augmente. Si l'angle d'incidence dépasse la valeur critique de l'angle de réflexion totale  $\theta_{max}$  dont l'expression est donnée ci-dessous, la réflexion est de 100%. L'angle de réflexion totale est typiquement de l'ordre de  $15^\circ$ , ce qui signifie que tous les photons émis dans une direction faisant un angle supérieur à  $15^\circ$  par rapport à la normale à la surface émettrice restent à l'intérieur du S-C et finissent par être réabsorbés. On voit ainsi immédiatement que le rapport entre le nombre de photons émis et le nombre de photons générés dans la jonction (autrement dit, le rendement optique) sera très faible si aucune précaution n'est prise. Il est en général de l'ordre de 1%.

Pour  $n_{air}=1$  et  $n_{sc}=3,6$  :

$$\theta_{max} = \arcsin\left(\frac{1}{3,6}\right) \approx 16^\circ \quad \text{Équation 13}$$

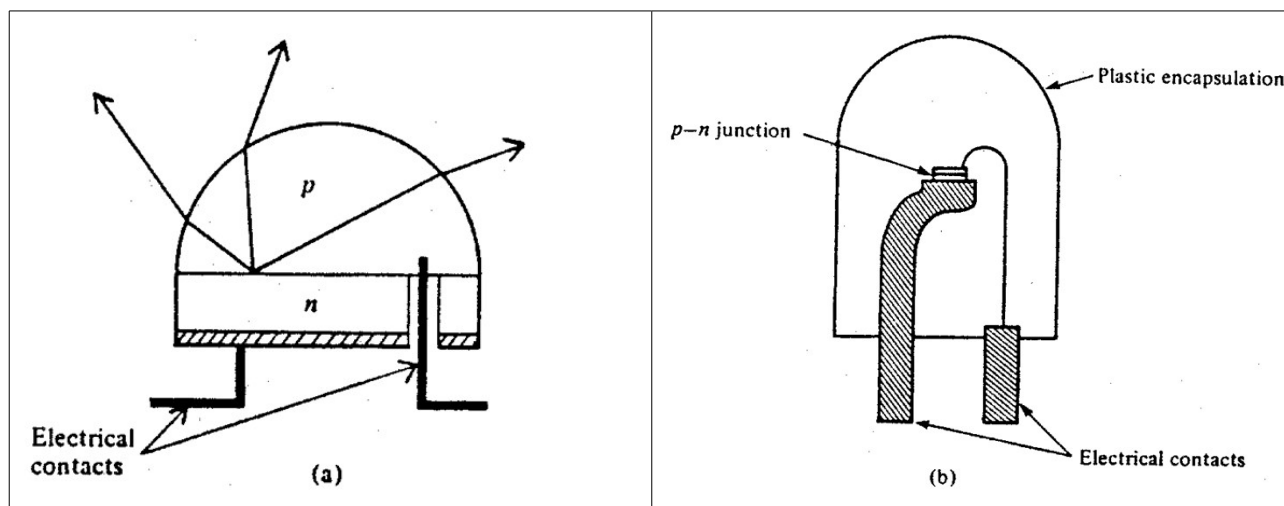
$$R = \left(\frac{n_{sc} - n_{air}}{n_{sc} + n_{air}}\right)^2 \approx 30\% \quad \text{Équation 14}$$

On peut montrer que la fraction de photons qui passe d'un milieu à l'autre est

$$\eta_{opt} \approx \frac{1}{4} \left(\frac{n_{air}}{n_{sc}}\right)^2 (1 - R) \quad \text{Équation 15}$$

Soit  $\eta_{opt} \approx 1,3\%$  dans le cas du GaAs.

Pour augmenter le rendement optique, deux moyens simples existent



### 3.4.5. LED blanches ?

Les LEDs blanches possèdent un spectre très particulier. Contrairement aux autres couleurs "classiques" il est bien plus "large".

En outre, les LEDs blanches répondent à la loi de Haitz. Cette dernière relie le flux (exprimé en lumen), l'efficacité (exprimée en lumen par watt) et la puissance (exprimée en watt) .

#### a) MÉTHODE I: Mélange de leds de couleur

La mise au point de leds blanches par la méthode du "mélange des couleurs" consiste à mettre ensemble des leds rouges verts et bleues ou encore bleues et jaunes.

Avantages :

- Bonne efficacité lumineuse
- Réglage possible de la température de couleur en agissant séparément sur l'intensité des leds
- IRC de 80

Inconvénient :

- Taille du dispositif (difficile à minimiser) - le vérifier
- Un mélange homogène des couleurs est difficile à obtenir

En pratique, pour obtenir du blanc il faut que les leds émettent une lumière monochromatique correspondant aux maximums de sensibilité de chaque type de cône présents dans notre oeil: 450 nm (bleu), 550 nm (vert), 620 nm (rouge). Si on ne dispose pas de leds émettant à cette fréquence précise, il faut compenser en "jouant" sur l'intensité de l'émission.

#### B) MÉTHODE II: Led bleu + phosphore

Pour obtenir du blanc, on utilise une led bleu possédant une couche à base de phosphore. C'est la méthode la plus utilisée à l'heure actuelle. Les photons "bleus", au contact de la couche phosphorescente engendrent des photons "jaune". Cela engendre du blanc car jaune+bleu=blanc (cf le diagramme de chromaticité xyY). °Quand il est dit "photon bleu", il faut entendre "photon qui engendre de la couleur bleu".

Avantages :

- En trouver car il en existe puisque c'est la méthode la plus utilisée

Inconvénients :

- Mauvais IRC (75 au maximum)

- "Halo" gênant. Du au fait que la lumière bleu est directive alors que la jaune est multidirectionnelle.

*C) MÉTHODE III: La méthode Schubert*

Cette méthode est proche de la II et utilise des leds appelées PRS-LED (Photon Recycling Semiconductor Led). Deux régions actives sont présentes dans la led: une primaire qui émet du bleu et une secondaire qui absorbant une partie du rayonnement bleu engendre des photons jaunes. Leur réunion donne naissance à un rayonnement blanc.

*D) MÉTHODE IV: Leds UV aux trois phosphores*

Cette méthode repose sur une led UV et différents phosphores. Les photons "UV", au contact des différents phosphores, leur font émettre des couleurs complémentaires.

Avantages :

-Bon IRC (proche des lampes fluorescentes)

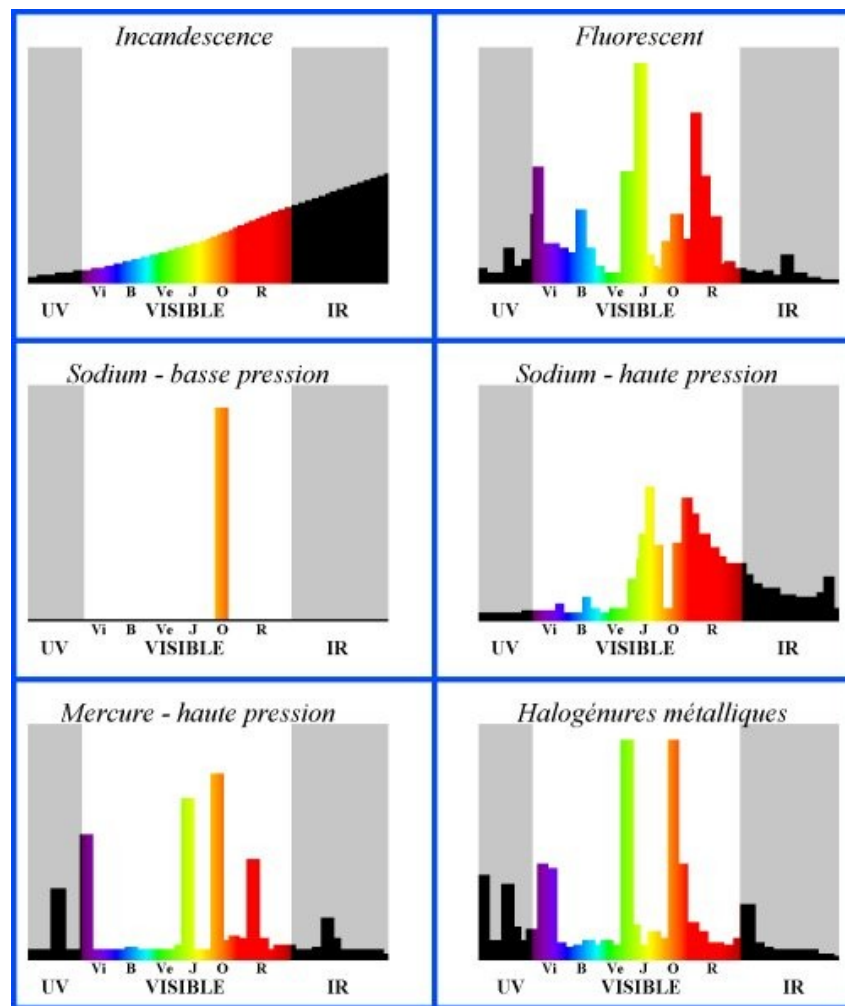
Inconvénients :

-Le rayonnement UV doit être intégralement absorbé puis re-émit par les phosphores

## 4. Tableaux généraux

	LED	Lampe classique à incandescence	Lampe à fluorescence	Lampe au sodium (BP*)	Lampe au sodium (HP*)	Halogène	Mercure (HP*)	Halogénure métallique
Prix	Moyen à Élevé	Faible	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen
Durée de vie (h)	50.000 à 100.000	1.000	10.000 à 20.000	16.000	12.000 à 22.000	2.000 à 4.000	16.000 à 20.000	6.000 à 10.000
Échauffement	Inexistant	Important	?	?	?	Élevé	?	?
Solidité	Très bonne	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise
lm/Watt	12 à 60	12 à 20	50 à 80	140 à 180	100 à 130	15 à 30	50 à 70	70 à 90
Flux lumineux (lm)	5 à 20	Plusieurs centaines						
Taille	Faible	Petite à Moyenne	Moyenne à grande			Petite à Moyenne	Moyenne à grande	Moyenne à grande
Rendu des couleurs (IRC)	Moyen à Bon	Excellent	Mauvais à bon	Très mauvais	Mauvais	Excellent	Mauvais à bon	Moyen à très bon
Utilisation	Voyants	Éclairage domestique	Éclairage public et domestique	Éclairage urbain		Éclairage domestique	Éclairage urbain	Éclairage public et domestique

Classe de rendu des couleurs	Très bon		Bon		Moins bon	Mauvais	Non défini
	1A	1B	2A	2B	3	4	-
Indice du rendu des couleurs	90-100	80-89	70-79	60-69	40-59	20-39	<20
Lampes à incandescence et lampe halogène à incandescence		x					
Tubes fluo	x	x	x	x	x		
Lampes fluo compactes	x	x					
Lampes à vapeur de mercure haute pression				x	x		
Lampes aux halogénures métalliques	x	x	x	x			
Lampes à vapeur de sodium haute pression		x		x	x	x	
Lampes à vapeur de sodium basse pression							x



## 5. Marquage des lampes

Tube fluorescent avec un marquage 840 indiquant un IRC de 80 à 90 et une température de couleur de 4000k (Blanc froid)



## 6. Sources principales

### 6.1. Bibliographiques

Edison, Ronald W. Clark (trad. Edouard Guignonis), Ed. Belin 75006 Paris, 1986  
Optoelectronics, J. Wilson et J. Hawkes, Prentice Hall, Wilshire, 1998

### 6.2. Sites internet

<http://www-energie.arch.ucl.ac.be/CDRom/eclairage/equipements/eclequtypeballast.htm>  
<http://www.lampreview.net>