

# LES LED POUR L'ÉCLAIRAGE

Fonctionnement et performances  
Critères de choix et mise en œuvre



Laurent Massol



# LES LED POUR L'ÉCLAIRAGE

Fonctionnement et performances  
Critères de choix et mise en œuvre

2<sup>e</sup> édition

DUNOD

Tout le catalogue sur  
[www.dunod.com](http://www.dunod.com)



Photo de couverture : © John Sturrock

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2012, 2015

5, rue Laromiguière, 75005 Paris

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-073863-2

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

# Table des matières

<b>Avant-propos</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 : Histoire de l'éclairage : de la bougie à la LED</b>	<b>5</b>
1.1 Une brève histoire de la lumière	5
1.2 La lumière : définition, nature et propagation	6
1.3 Retour sur l'évolution de la maîtrise de la lumière	8
1.4 La révolution des éclairages à semi-conducteur	19
<b>Chapitre 2 : Méthodes de mesure de la lumière</b>	<b>27</b>
2.1 Rayonnement, lumière et grandeurs associées	27
2.2 Les couleurs et le blanc	32
2.3 Autres grandeurs énergétiques et photométriques	37
2.4 Les instruments de mesure	40
<b>Chapitre 3 : Comment fonctionne une LED ?</b>	<b>49</b>
3.1 De quoi se compose une LED ?	49
3.2 Technologie d'émission – fabrication du blanc	62
3.3 L'enjeu du boîtier des LED : la dissipation thermique	67
<b>Chapitre 4 : Les LED multipuces et les matrices de LED</b>	<b>75</b>
4.1 La nécessité d'éclairer	75
4.2 LED multipuces, module COB, module de LED	76
4.3 Diversité des puces semi-conductrices implantées	84

<b>Chapitre 5 : Les semi-conducteurs</b>	<b>87</b>
5.1 Le mécanisme d'émission – théorie des bandes de valence	87
5.2 Types de semi-conducteurs	97
5.3 Méthode de fabrication	102
5.4 Évolutions récentes	109
<b>Chapitre 6 : De la puce au boîtier</b>	<b>113</b>
6.1 Packaging électronique	113
6.2 Le substrat	114
6.3 Mise en œuvre de la puce semi-conductrice	119
6.4 Technologie d'alimentation	120
6.5 Les luminophores	124
6.6 Encapsulation – boîtier des LED	131
6.7 Fabrication des LED	131
<b>Chapitre 7 : Optiques primaires et extraction lumineuse</b>	<b>137</b>
7.1 Qu'est-ce qu'une optique primaire ?	137
7.2 Description détaillée des optiques primaires	138
7.3 Méthode d'extraction lumineuse	146
<b>Chapitre 8 : Performances des LED</b>	<b>151</b>
8.1 Le pilotage en courant d'une LED	151
8.2 Tension d'alimentation des LED	157
<b>Chapitre 9 : La maturité des différentes technologies de LED</b>	<b>177</b>
9.1 Technologies disponibles pour l'émission de blanc	177
9.2 La technologie RGB	199
9.3 Maturité de la technologie LED	202
<b>Chapitre 10 : Une grande variété d'applications</b>	<b>205</b>
10.1 Balisage lumineux et « voyants lumineux »	205
10.2 Éclairage publicitaire et enseignes lumineuses	205

10.3 Rétro-éclairage d'écrans	207
10.4 Panneaux d'information et horloges	207
10.5 Éclairage et signalisation routière	208
10.6 Éclairages extérieurs	212
10.7 Éclairages architecturaux et éclairages scéniques	212
10.8 Éclairages résidentiels	214
10.9 Éclairages de bureaux et de zones de passage	214
10.10 Éclairages intérieurs, professionnels et grand public	216
10.11 Éclairage pour les voitures	223
10.12 Éclairage dans les transports en commun	225
10.13 Éclairage de machines-outils	228
10.14 Éclairages décoratifs	229
10.15 Éclairages intérieurs industriels – Entrepôts	230
10.16 Autres types d'éclairage	232
10.17 Maturité mais pas infaillibilité	236
<b>Chapitre 11 : Évolutions récentes des technologies LED</b>	<b>241</b>
11.1 Amélioration de la puce semi-conductrice et du substrat	241
11.2 Performances des luminophores	246
11.3 Méthodes d'alimentation	249
11.4 Méthodes d'extraction lumineuse	250
11.5 Densité lumineuse : évolution des boîtiers des LED	252
<b>Chapitre 12 : Du composant à l'application d'éclairage</b>	<b>257</b>
12.1 Identification des grands domaines d'application des LED	257
12.2 Choix de la technologie LED appropriée	263
12.3 Modes d'intégration et technologies associées	268
12.4 Développements récents de modules LED	275

<b>Chapitre 13 : Marché, acteurs et perspectives</b>	<b>279</b>
13.1 Avantages et inconvénients des LED comparées aux autres technologies d'éclairage	280
13.2 Le marché des LED	284
13.3 Les principaux fabricants de LED	287
13.4 Le coût total de la technologie LED	290
13.5 Prévision des performances des LED : 2015-2018	298
<b>Bibliographie</b>	<b>303</b>
<b>Index</b>	<b>307</b>

**Retrouvez les compléments en ligne de cet ouvrage sur le site Dunod à l'adresse : [www.dunod.com/contenus-complementaires/9782100738632](http://www.dunod.com/contenus-complementaires/9782100738632)**

- la R&D en 2016,
- les LED de A à Z : choix et performances,
- la bibliographie augmentée,
- Guide pour la mesure des performances des LED : quels outils pour quels objectifs ?



# Avant-propos

Les technologies apparaissent, se chevauchent, s'améliorent. Parfois elles coexistent quelques temps, puis les plus récentes font disparaître les précédentes. Souvent elles apportent un complément technique, des possibilités nouvelles, des fonctionnalités innovantes. Mais il est très difficile de prévoir à l'avance leur impact de façon précise.

L'ère du numérique semble avoir pris ses marques et s'être installée de façon durable dans notre civilisation, et la technologie des LED s'inscrit dans cette logique. D'ores et déjà il est légitime de se demander combien de temps mettront les LED pour pousser les technologies d'éclairage plus traditionnelles dans leurs derniers retranchements, avant qu'elles ne disparaissent comme ce fut le cas des téléviseurs à tube cathodique. À moins que l'évolution des anciennes technologies d'éclairage comme les lampes à incandescence (peu à peu interdites à la vente à cause de leur faible rendement) les oriente vers des applications plus décoratives pour lesquelles le numérique a plus difficilement sa place.

Toutefois, même si l'on pressent cette évolution et que l'on perçoit difficilement une autre issue, il serait imprudent d'être catégorique car l'acceptabilité d'une technologie et des systèmes qui l'intègrent dépend de nombreux paramètres et conditions (sociales, économiques, environnementales). Il faut ouvrir la porte aux LED mais il faut aussi leur demander de se mettre au service des utilisateurs, d'apporter de nouvelles solutions et d'atteindre de meilleures performances, avant de leur accorder une place prépondérante. Reléguer au second plan les technologies qui nous ont servi pendant des décennies, sans demander aux LED d'apporter leur contribution serait manquer de respect à ceux qui ont œuvré en leur temps pour l'amélioration de l'éclairage (au sens large) et qui eux aussi avaient été confrontés à ce type d'évolution.

Le récent prix Nobel de Physique 2014 a été décerné à trois Japonais, MM. Akasaki, Amano et Nakamura, pour leurs travaux sur la technologie LED entre 1987 et 1991. J'ai eu la chance de m'entretenir à plusieurs reprises lors de différentes conférences avec le Pr. Nakamura, avec lequel j'ai pu échanger à la fois des idées techniques et technologiques, mais aussi des idées sur l'histoire et l'origine de la LED.

C'est dans cet esprit, conscient et respectueux du passé et désirant apporter de nouvelles solutions, que j'ai écrit ce livre. Les LED ont un formidable avenir, mais elles ont aussi des limites et ne pas en être conscient, ne pas savoir quels sont leurs réelles qualités et défauts, peut aboutir à la réalisation de systèmes de piètre qualité.

L'objectif principal de ce livre est de donner des éléments de réponse précis à ceux qui désirent s'informer sur le fonctionnement des LED et sur leurs réelles performances. La plupart des données fournies ont été constatées et mesurées concrètement lors des nombreux projets auxquels j'ai participé avec mon équipe. L'important pour moi était de présenter des informations fiables que le lecteur puisse exploiter en toute confiance, mais aussi quelques prévisions, bien sûr plus incertaines, pour imaginer ce que pourront être les rendements ou les prix des LED dans les années à venir. Dans cette seconde édition, j'ai repris les éléments techniques qui ont évolué et j'ai remis au goût du jour les performances ainsi que les applications qui ont pu se développer grâce aux améliorations des technologies.

Il fallait aussi rendre cette technologie accessible à tous ceux qui n'ont pas forcément un solide bagage technique dans les semi-conducteurs, et qui sont pourtant amenés à prendre des décisions dans le choix de certains systèmes d'éclairage. Je pense en particulier aux responsables des achats au sein de grandes entreprises ou de PME-PMI, aux designers industriels, aux concepteurs lumière, aux architectes (intérieur et/ou extérieur) ou encore aux responsables marketing. À tous, ce livre apportera des éléments de réponse sur les possibilités et les perspectives dans les prochaines années, en les guidant vers une compréhension des enjeux de la technologie LED.

Il était également impératif de rentrer dans le détail pour ceux qui suivent l'évolution des LED (notamment celles de forte puissance), et qui ont besoin d'informations techniques non seulement du point de vue de la conception des LED mais aussi du point de vue de leur comportement selon les différentes conditions de fonctionnement. Ces ingénieurs et techniciens sont à l'origine de la création de systèmes d'éclairage et ils doivent choisir une technologie en bonne adéquation avec l'application finale. Cela requiert de comprendre et d'appréhender les différentes stratégies mises en œuvre par les fabricants de LED, afin de mieux cerner les capacités des composants proposés et de faire le choix le plus judicieux. Ces acteurs souvent en charge des développements dans les entreprises sont responsables de bureau d'étude, ingénieur d'application ou encore technicien, et apportent les éléments techniques à une solution client.

## Remerciements

Ils orientent les designs en fonction des possibilités proposées par les LED, avec souvent une forte connotation d'évolution des produits, ce qui implique la connaissance d'éléments prévisionnels notamment en termes de performances technico-économiques.

Enfin, dans une période où les changements et les évolutions s'opèrent tous les trois à six mois, il était utile de donner aux responsables de PME des éléments technico-économiques leur permettant d'insérer cette technologie dans leur stratégie de développement. Ainsi, ils pourront grâce à ce livre avoir une bonne idée des capacités actuelles et à venir des LED, imaginer et créer des objets à proposer à leurs clients intégrant non seulement des fonctionnalités nouvelles, mais leur permettant aussi de faire évoluer leur produit.

Au fil des chapitres, nous balayons le monde des LED sans oublier quelques rappels sur la lumière et sa mesure. Comment sont faites les LED ? Quels moyens sont à mettre en œuvre pour fabriquer ces quelques millimètres carrés lumineux qui font tant parler d'eux ? Qu'est-ce qui limite leurs performances ou qui les accroît ? Où sont-elles présentes et où le seront-elles demain ? Autant de questions auxquelles ce livre apporte des réponses avec le cas échéant, des compléments d'informations pour ceux qui souhaitent aller encore plus loin, vers le monde de la recherche.

Je vous souhaite une lecture fructueuse et utile des chapitres qui vont suivre. Vous serez toujours les bienvenus pour tout commentaire, question ou suggestion sur cet ouvrage à l'adresse suivante : [laurent.massol@led-development.fr](mailto:laurent.massol@led-development.fr)

## Remerciements

J'ai une pensée particulière pour mon épouse Magalie, femme sensible, discrète et forte, qui m'a suivi et soutenu dans cette formidable aventure qu'est l'écriture d'un livre ainsi que son évolution vers cette deuxième édition. Mon arme secrète, ma fille Amance qui a grandi en même temps que ce livre, m'a encouragé à apporter une petite contribution au monde de la technique pour lui préparer, à elle et à sa sœur Laurine, un monde meilleur. Marie-Claude et André, mes parents, qui j'espère seront fiers d'avoir fait de moi ce que je suis.

Je remercie sincèrement Sounil Bhosle pour son soutien et plus particulièrement pour ses conseils et son aide dans la rédaction du chapitre 2.

Je remercie également Georges Zissis et son équipe avec laquelle nous avons travaillé sur de nombreux projets techniques ; grâce à eux j'ai pu apporter ma contribution « LED » aux projets d'éclairage qui nous ont été soumis.

Enfin, je souhaite remercier tous ceux qui depuis des années me font confiance et me soutiennent, par leurs questions, leurs challenges et leurs sollicitations.



# Histoire de l'éclairage : de la bougie à la LED

Ce premier chapitre commence par quelques notions simples sur la nature physique de la lumière. Il rappelle ensuite quels procédés ont été utilisés pour l'éclairage au cours des siècles depuis les techniques à base de flamme (lampes à huile, bougies...) jusqu'aux techniques actuelles. Au XIX<sup>e</sup> siècle l'apparition de l'électricité a permis le développement successif des lampes à incandescence, des tubes fluorescents, des lampes halogènes, des lampes fluocompactes, jusqu'à l'apparition des premières LED blanches au début des années 1990.

## 1.1 Une brève histoire de la lumière

Afin de comprendre la difficulté d'interpréter le phénomène de la lumière, il suffit de le décrire de la manière suivante : la lumière permet de révéler les objets qui nous entourent en leur envoyant des particules énergétiques, sans masse apparente et de façon instantanée.

On se rend compte aisément que la simple évocation d'une particule de masse nulle, possédant une certaine énergie et se propageant à très grande vitesse, est difficile à concevoir.

Pendant l'Antiquité Pythagore et Euclide émettent l'hypothèse que c'est l'œil qui permet la vision en émettant un rayon spécifique. Pendant presque 2 000 ans, c'est de cette façon que nous appréhendons le phénomène, sans différencier les paramètres de la lumière (teinte, saturation et clarté), mais en l'imaginant comprise entre deux extrémités, le noir et le blanc.

D'un point de vue géométrique la lumière était considérée comme un rayon lumineux et c'est sur cette base que René Descartes (1596-1650) posa les bases de l'optique géométrique.

La théorie de l'« hétérogénéité » des rayons lumineux (Isaac Newton, 1642-1727) montrant que la lumière n'était pas définie par un seul rayon mais par un ensemble de rayons colorés, puis les hypothèses sur la nature corpusculaire de la lumière furent des avancées considérables pour son interprétation.

La théorie ondulatoire de Christian Huygens (1629-1695) quelques années plus tôt au milieu du XVII<sup>e</sup> siècle fait une analogie avec la propagation d'une onde mécanique à la surface d'un liquide et décrit le phénomène lumineux comme une onde en opposition avec la théorie corpusculaire.

Même si Newton pose la première pierre de l'explication du phénomène de diffraction, celui des interférences constatées par Thomas Young (1793-1829) vers 1800 n'était pas encore convenablement expliqué. C'est Augustin Fresnel (1788-1827) qui permit quelques années plus tard de comprendre ce phénomène et celui de la polarisation de la lumière. Aujourd'hui encore c'est l'expérience des fentes de Young qui explique le mieux la dualité rayon/onde lumineux.

Enfin, c'est au début du XX<sup>e</sup> siècle qu'Albert Einstein (1879-1955) décrit l'effet photoélectrique en définissant la lumière par des *photons*. Il développa et approfondit pour cela une idée initiée par Max Planck (1858-1947) sur les quanta d'énergie.

Dès lors, la description du phénomène physique qu'est la lumière était complète, et les outils scientifiques mis à la disposition des chercheurs suffisants pour permettre aux générations suivantes de continuer à décrire de nouveaux phénomènes, et d'aller plus en profondeur dans le cœur de la matière pour en découvrir sa composition.

## 1.2 La lumière : définition, nature et propagation

### 1.2.1 Définition

Le rayonnement électromagnétique présente une large plage de longueurs d'onde et la lumière constitue une petite partie de l'émission énergétique que nous connaissons actuellement. Si l'on décrit la lumière comme une onde électromagnétique (au sens de Huygens), sa place au sein de l'ensemble des ondes électromagnétiques ne représente finalement qu'une toute petite partie (figure 1.1).

Parmi les radiations décrites à ce jour, ce sont les rayons cosmiques qui ont les fréquences les plus importantes (supérieures à  $10^{20}$  Hz) et par conséquent les longueurs d'onde les plus courtes (inférieures à  $10^{-13}$  m, c'est-à-dire inférieures à 0,0001 nm). Puis par ordre de décroissance en fréquence viennent les émissions radioactives, les rayons X, les UV, la plage du visible, les infrarouges, les micro-ondes et, à l'autre bout de l'échelle spectrale, nous avons les ondes de transmission radio dont la longueur d'onde peut dépasser le kilomètre.

## 1.2 La lumière : définition, nature et propagation

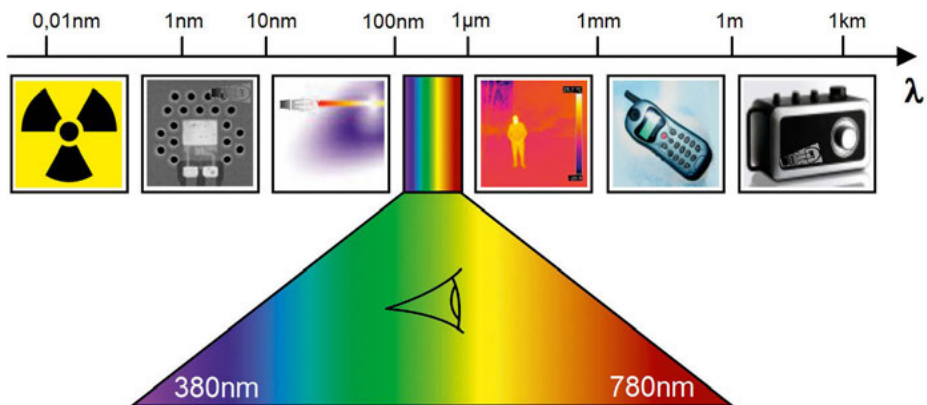


Figure 1.1 – Le spectre visible parmi l'ensemble du champ électromagnétique.

L'homme est plus ou moins sensible à toutes ces émissions électromagnétiques et son œil est sensible uniquement aux ondes lumineuses.

Ainsi, nous parlons souvent de « lumière visible », ce qui constitue un pléonasme puisque la lumière est la partie visible du rayonnement électromagnétique.

### 1.2.2 Nature et propagation de la lumière

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que la lumière avait été successivement décrite comme une onde puis comme une particule, mais ce n'est qu'avec Albert Einstein, vers 1916, et sa théorie de la relativité générale, suivie de celle des quanta décrits par Max Planck, que les bases de la mécanique quantique purent être posées et qu'apparut le concept de la dualité onde/particule.

Ainsi le **photon** permet la description de la lumière en tant que particule. Cette particule de masse nulle véhicule une énergie proportionnelle à la fréquence de l'onde à laquelle elle appartient. La relation qui lie cette énergie à la fréquence est la suivante :

$$E = h\nu$$

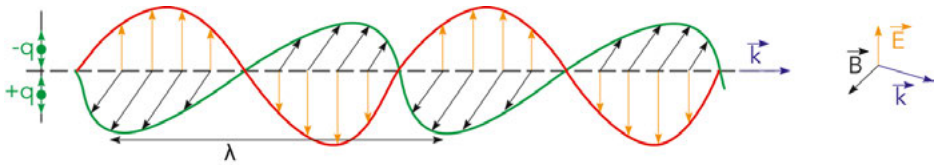
dans laquelle  $h$  est la constante de Planck, et  $\nu$  la fréquence de la particule.

La théorie ondulatoire nous a fourni des outils pour décrire et expliquer la propagation de la lumière sous forme d'onde. Cette propagation a été décrite de façon précise par James C. Maxwell (1831-1879) et formalisée par les célèbres équations qui portent son nom.

Le rayonnement électromagnétique (par opposition au rayonnement corpusculaire) peut être décrit sous la forme d'une onde électromagnétique qui se décompose

en ondes dites **monochromatiques**. Ces ondes monochromatiques sont souvent représentées par un dipôle électrostatique vibrant, dépendant de deux champs, l'un électrique et l'autre magnétique.

Dans la majeure partie des cas, la propagation se fait en considérant une onde plane décrite par les deux champs, l'un électrique et l'autre magnétique, suivant un vecteur de propagation (figure 1.2).



**Figure 1.2** – Description de la propagation d'une onde lumineuse.

Pour traduire cette propagation en équations mathématiques, nous pouvons nous appuyer sur les équations de Maxwell et ne représenter l'onde que par un seul de ses champs (le champ électrique par exemple, ce qui se fait le plus souvent) et ainsi avoir :

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi) \cdot \vec{E}_0$$

L'onde se propage suivant la direction donnée par le vecteur  $\vec{k}$ , et a pour amplitude  $\vec{E}_0$ .

La description ondulatoire de l'onde et de sa propagation, faisant intervenir les champs électriques et magnétiques, ne remet pas en cause le principe de la nature corpusculaire de la lumière.

### 1.3 Retour sur l'évolution de la maîtrise de la lumière

Depuis la découverte du feu par l'homme et jusqu'au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle, les différentes civilisations se sont éclairées uniquement à la lumière d'une flamme.

Puis en l'espace d'un siècle sont apparues successivement toute une série de technologies telles que la lampe à incandescence, la lampe à arc, le tube fluorescent...

Il y eut d'abord Humphry Davy et Michael Faraday (son assistant), au tout début des années 1800, qui produisirent pour la première fois un arc lumineux à l'aide de deux électrodes de charbon [52].

En 1875, Henri Woodward et son partenaire Mathew Evans déposèrent un brevet décrivant la première lampe à incandescence à base de filament de carbone [54]. Trois ans plus tard, sir Joseph Wilson Swan déposa lui aussi un brevet pour l'invention d'une lampe de même type mais dont les performances étaient très moyennes.



### 1.3 Retour sur l'évolution de la maîtrise de la lumière

Vers 1879, un certain Thomas Edison acheta le brevet de Woodward et Evans et se lança dans une vaste campagne de tests (différents filaments dans différents environnements gazeux), ce qui lui permit d'améliorer considérablement les performances du procédé. Dans une certaine confusion, il déposa lui aussi la même année un brevet. Swan l'attaqua en justice et gagna. Edison eut entre autres l'obligation d'intégrer Swan au sein de la nouvelle compagnie créée sous le nom *Edison and Swan United Electric Company*.

Vinrent ensuite bon nombre d'améliorations de ce principe, notamment l'utilisation de matériaux différents pour le filament (tungstène), ou encore un vide d'air un peu plus poussé dans le bulbe de verre. Plus tard, l'addition de gaz supplémentaires dans le bulbe permettra d'améliorer encore ce mode d'éclairage.

Les technologies de vide d'air et de « nettoyage » des bulbes de verre ayant fait de gros progrès, il a ensuite été possible de limiter les oxydations et de remplacer cet air par des gaz ou des composés (sels). Sont alors apparues des lampes à incandescence de type **halogène**, ou encore des lampes à décharge qui recouraient à des mélanges de gaz ou à des plasmas denses.

La technologie des **tubes fluorescents** (plus communément appelés « tubes néon ») a également fait son apparition au début du xx<sup>e</sup> siècle et elle a évolué en même temps que les ballasts<sup>1</sup>.

Au début du xx<sup>e</sup> siècle (en 1907 pour être précis), H. J. Round s'aperçut que le passage d'un courant asymétrique au travers d'un cristal de carbure de silicium (SiC) provoquait une émission de lumière. Vers 1923, la première électroluminescence bleue fut réalisée par la société CREE avec du carbure de silicium puis, en 1955, Rubin Braunstein découvrit l'émission infrarouge de l'arséniure de gallium (GaAs).

Mais ce n'est qu'en 1962 que Nick Holonyak (de la General Electric Corporation) mit en évidence officiellement pour la première fois une émission lumineuse issue d'un semi-conducteur [56]. En 1969, George Craford, qui avait rejoint Monsanto deux années plus tôt, réalisa la première LED jaune par un dopage d'azote.



Figure 1.3 – La première LED (1962).

1. Ballast : système ferromagnétique d'abord (« simple enroulement de cuivre ») puis électronique qui fournit l'énergie nécessaire aux lampes de type fluorescent à partir d'une tension plus faible (celle du secteur).

Les années 1970-1980 ont vu alors se développer à la fois les LED mais également les lasers, basés sur le même principe d'émission, avec une cavité résonnante en plus. Ce procédé sera d'ailleurs repris plus tard pour certains types de LED.

Vers la fin des années 1980, les recherches en laboratoires ont démontré la possibilité d'émettre des radiations vertes et bleues, mais ce n'est qu'en 1993 que la première LED bleue suffisamment puissante a vu le jour, suivie deux ans plus tard de la première LED verte d'intensité lumineuse importante.

### 1.3.1 Les sources artificielles de lumière

Bien des idées ont germé dans l'esprit des scientifiques depuis ces deux derniers siècles, y compris des systèmes qui associent optique et mécanique. Ainsi, la lampe au soufre sans électrode [50] permet d'atteindre des efficacités lumineuses<sup>1</sup> de l'ordre de 100 lm/W mais nécessite un refroidissement qui s'opère par rotation d'une partie de la source ce qui rend le système complexe et peu robuste (figure 1.4).

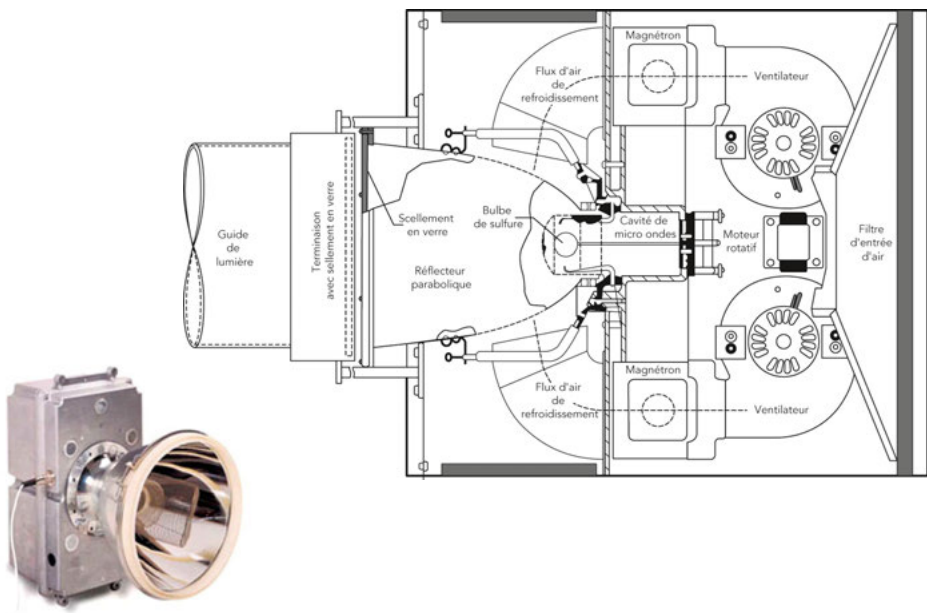


Figure 1.4 – La lampe au soufre (G. Zissis).

1. Efficacité lumineuse et rendement lumineux : En toute rigueur, l'efficacité lumineuse d'une source est le rapport entre le flux lumineux visible et la puissance radiative totale de la source (en lm/W « optique »). Le rendement lumineux est le rapport entre le flux lumineux visible et la puissance électrique consommée par la source (également en lm/W). Dans le langage commun, nous parlons souvent d'efficacité lumineuse alors que nous voulons exprimer le rendement lumineux.

### 1.3 Retour sur l'évolution de la maîtrise de la lumière

Aujourd'hui, la production de lumière artificielle se fait toujours de deux façons : soit par **incandescence**, soit par **luminescence** [51]. Il n'y a pas d'autre méthode connue à partir de l'électricité et de ces deux méthodes se déclinent en un grand nombre de technologies qui sont résumées sur la figure 1.5.

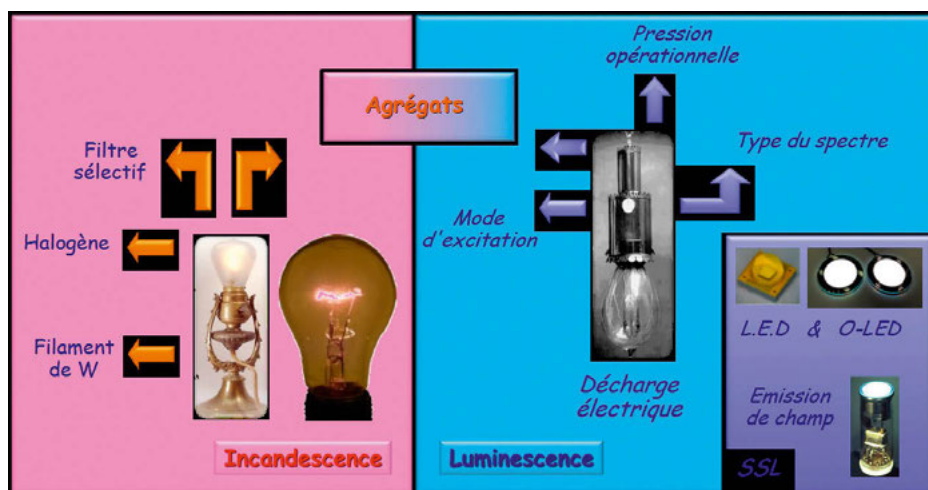


Figure 1.5 – Les méthodes de production de lumière à partir d'électricité (G. Zissis).

#### Les lampes à incandescence

Depuis plus de deux siècles, c'est la méthode la plus utilisée pour créer de la lumière à partir d'électricité. Même si l'efficacité de cette technologie est toute relative, avec des rendements de l'ordre de 5 %, près de 300 millions d'ampoules sont vendues en France chaque année.

Les techniques sur les différentes parties qui constituent les lampes à incandescence (filament, support de filament, type de verre, gaz interne) ont évolué, mais globalement nous retrouvons la même géométrie et les mêmes éléments, à savoir un filament de tungstène tenu par un support et alimenté par des conducteurs rigides, le tout dans un bulbe de verre vidé de son air ou dans lequel un gaz a été introduit. Un culot solidarise le tout (figure 1.6).

Suivant leur nature, les filaments sont soumis à des tensions différentes et le courant qui les traverse les chauffe jusqu'à les rendre « rouge incandescent ».

Ils émettent alors une lumière correspondant à celle qu'émettrait un corps noir chauffé à la même température (souvent autour de 2 500 à 3 000 K pour la plupart des lampes à incandescence).

## 1. Histoire de l'éclairage : de la bougie à la LED

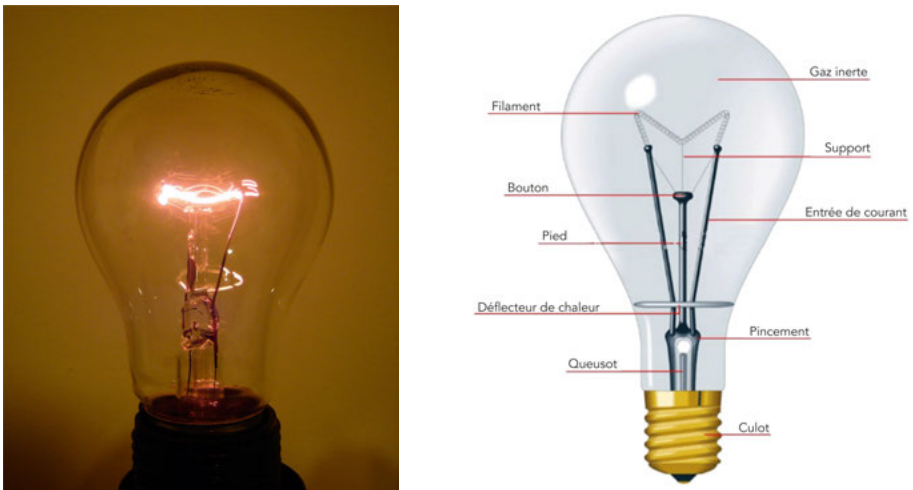


Figure 1.6 – Lampe à incandescence.

Cette lumière possède un spectre continu, elle est en grande partie constituée d'infrarouges, d'où la faible efficacité de lampes à incandescence dans le visible, qui est inférieure à 5 % dans la plupart des cas (figure 1.7).

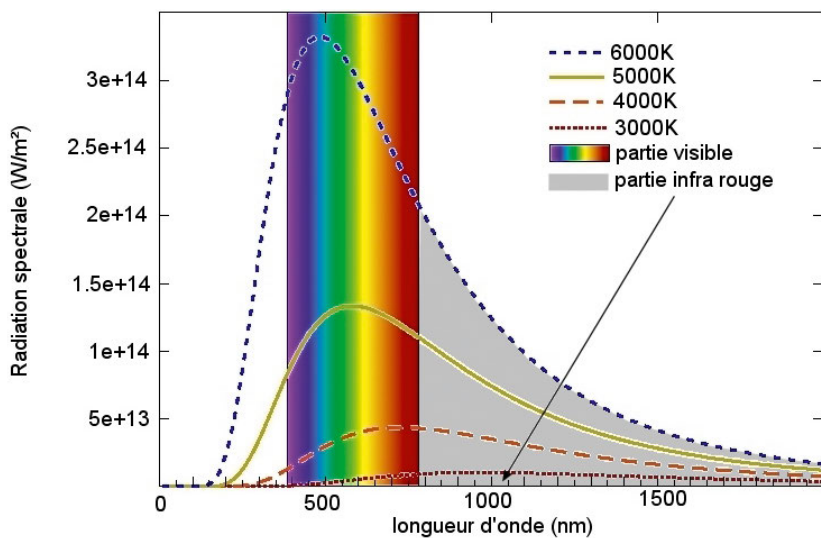


Figure 1.7 – Spectre de source à incandescence à différentes températures de fonctionnement.

### 1.3 Retour sur l'évolution de la maîtrise de la lumière

Ces dernières années ont vu apparaître de nouveaux types de lampes à incandescence grâce à l'amélioration des filaments maintenant capables de supporter des courants plus élevés, et grâce à l'usage de gaz internes différents. Ces lampes ont des spectres lumineux autour de 4 000 K qui sont considérés d'un point de vue lumière comme plus froids mais qui correspondent à une température de fonctionnement plus élevée. Ainsi, leur efficacité a pu dépasser légèrement les 20 à 25 lm/W. Sur la figure 1.7, on comprend que plus la température de couleur d'émission est importante, plus l'émission se fait dans la partie visible du spectre.

Enfin, si l'on regarde la taille et la forme des lampes à incandescence qui existent sur le marché, on s'aperçoit d'une grande diversité, qui va de la lampe de quelques millimètres présente dans les petits voyants lumineux à des lampes excédant les 500 W que l'on trouve dans les projecteurs extérieurs (figure 1.8).



**Figure 1.8** – Les différents types de lampes à incandescence.

#### Les lampes fluorescentes basse pression

Appelées communément « tubes néon » pour les tubes fluorescents linéaires, ou encore « lampes à économie d'énergie » pour les modèles plus compacts, ces lampes fonctionnent de la même manière depuis leur mise au point vers 1930. Deux électrodes aux deux bouts du tube de la lampe créent un arc électrique qui ionise le gaz contenu dans le tube (constitué en partie de mercure et de gaz neutre), lui-même recouvert sur sa surface interne de phosphore. Les atomes de mercure (entre autres) excités par cette ionisation produisent une lumière de courte longueur d'onde (UV) qui excite les particules de phosphore, lesquelles émettent à leur tour de la lumière qui cette fois-ci est blanche. C'est le principe de la **fluorescence**.

La fluorescence a été découverte vers 1840 par l'Irlandais sir George Stokes. Puis vers 1850 l'Allemand Heinrich Geissler réussit à mettre au point un système suffisamment performant pour vider d'air un tube, y introduire du mercure et ainsi compléter le processus.

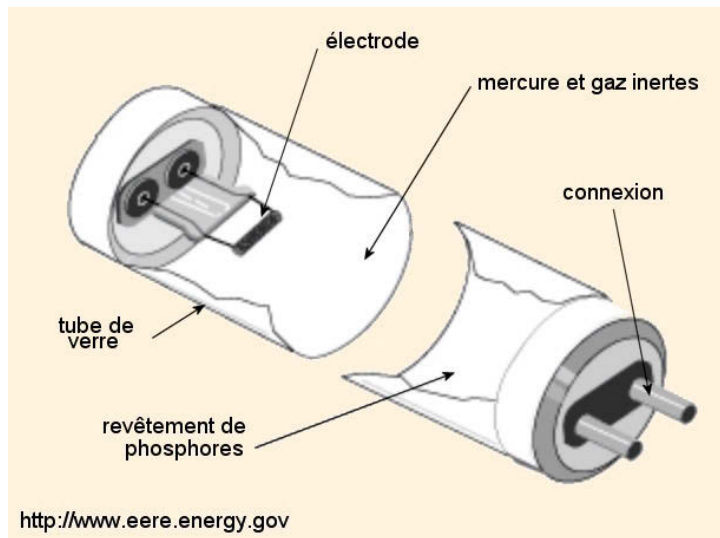
Finalement, c'est encore Thomas Edison aidé de Nikola Tesla qui développa l'une des premières versions de lampe fluorescente autour de 1890.

Enfin, un Français nommé Jacques Risler déposa un brevet sur la mise en œuvre et le dépôt de poudre fluorescence à l'intérieur d'un tube de verre.

Les lampes fluocompactes telles que nous les connaissons firent leur apparition vers le milieu des années 1970, développées par Edward E. Hammer alors ingénieur de développement chez General Electric

### **Les tubes fluorescents**

Ce sont les premiers modèles de lampes fluorescentes basse pression qui ont été développés, pour des questions de simplicité de mise en œuvre. En effet, réaliser un tube de verre de section uniforme est chose aisée pour un souffleur de verre à condition que les tubes soient linéaires (figure 1.9).



**Figure 1.9** – Schéma de principe d'un tube fluorescent.

Pour fonctionner, ce type de tube a besoin de décharges hautes tensions afin d'ioniser le mélange mercure / gaz inertes. Un ballast permet de réaliser ces décharges à partir d'une tension secteur de 90 à 220 VAC. Jusque dans les années 1990, ces ballasts étaient majoritairement ferromagnétiques.

### 1.3 Retour sur l'évolution de la maîtrise de la lumière

Les récents développements de l'électronique de puissance ont permis de développer de nouveaux systèmes d'alimentation plus performants, et nous sommes passés de l'ère des ballasts ferromagnétiques de grosse dimension, lourds à cause de bobinages de cuivre importants et d'une efficacité toute relative, à des ballasts électroniques plus compacts, plus légers et plus efficaces.

L'efficacité des tubes fluorescents a tout de suite supplanté celle des lampes à incandescence (tableau 1.1), et cette efficacité s'est encore améliorée ces dix dernières années pour atteindre les 100 lm/W dans certains cas. Néanmoins, les tubes fluorescents du commerce, vendus en grande quantité, sont plus proches des 80 lm/W.

**Tableau 1.1** – Principales caractéristiques des sources de lumière

	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)	15 000 à 50 000	1 000	5 000 à 15 000	10 000 à 16 000	12 000 à 22 000	1 000 à 3 000	16 000 à 20 000	4 000 à 10 000
Échauffement	Conduction	IR et conduction	Conduction	Conduction	Conduction	IR et conduction	Conduction	Conduction
Robustesse	Excellente	Moyenne	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	Moyenne	Mauvaise	Mauvaise
lm/watt	80 à 140	12 à 20	50 à 80	140 à 180	100 à 130	15 à 30	50 à 70	70 à 90
Flux lumineux (lm)	100 à 800	100 à 800	100 à 800			100 à 800	500 à 1 000	50 à 1 500
Taille	Faible	Petite à moyenne	Moyenne à grande			Petite à moyenne	Moyenne à grande	Moyenne à grande
Rendu des couleurs (IRC)	Mauvais à bon	Excellent	Mauvais à bon	Très mauvais	Mauvais	Excellent	Mauvais à bon	Moyen à très bon

#### **Les lampes fluocompactes**

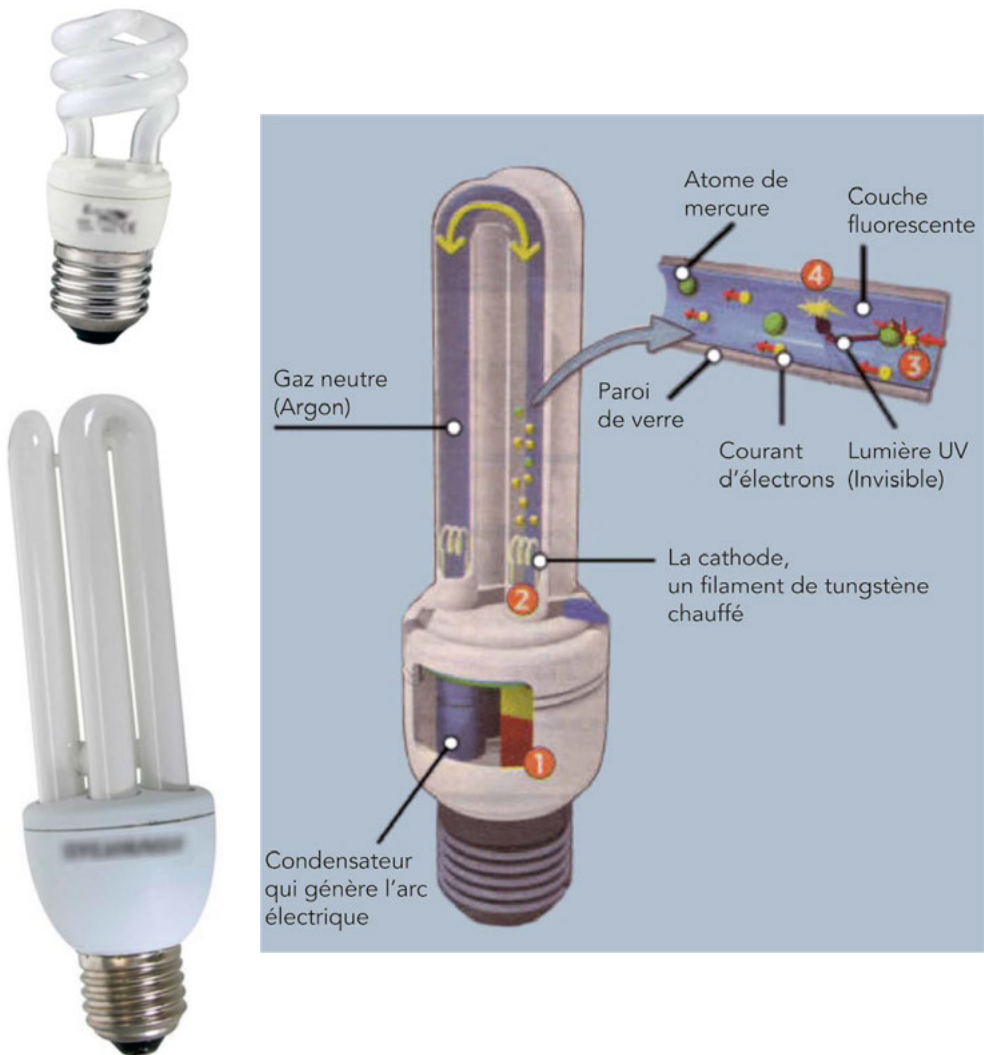
L'apparition en masse de ce type de lampe date d'une vingtaine d'années, et cette technologie a connu au départ quelques déboires, du fait de son introduction sur le marché de la grande consommation avec des produits de qualité médiocre en raison d'objectifs de prix de vente très bas. Pour cette raison, la plupart des produits étaient fabriqués avec des matériaux ne permettant pas d'atteindre les performances escomptées (50 à 60 lm/W et une durée de vie supérieure à 6 000 ou 7 000 h).



## 1. Histoire de l'éclairage : de la bougie à la LED

Le grand public n'a pas pris la pleine mesure des avantages de cette technologie au démarrage, car il était confronté souvent à des durées de vie courtes, des allumages lents et des qualités de lumière toutes relatives. Aujourd'hui, nous sommes revenus à des niveaux de prix et de qualité de produits conformes aux attentes, et les acteurs qui proposent des produits efficaces à des prix raisonnables ont leur place.

Le fonctionnement des lampes fluocompactes est le même que celui des tubes fluorescents. Toutefois, elles sont constituées de tubes de verre recourbés, faisant parfois plusieurs boucles afin d'atteindre la compacité visée (figure 1.10).



**Figure 1.10** – Lampes fluocompactes (G. Zissis).



## 1.3 Retour sur l'évolution de la maîtrise de la lumière

Leur efficacité (souvent autour de 50 lm/W) est bien moins intéressante que celle des tubes de technologie similaire, ce qui en fait une « cible technique » pour la technologie LED, présentant des efficacités similaires ou supérieures avec d'autres avantages comme nous le verrons plus tard.

En termes de durée de vie, nous pouvons nous reporter au tableau 1.2, sachant que ce type de lampes à fluorescence se situe dans un intervalle allant de 5 000 à 8 000 h la plupart du temps, bien moins que les tubes fluo qui peuvent atteindre 12 000 à 15 000 h de fonctionnement.

**Tableau 1.2** – Comparatif des lampes à incandescence (interdites à la vente en 2018) et des lampes fluocompactes grand public et professionnelle : coût des différentes solutions d'éclairage pour l'utilisateur sur une durée de 15 000 heures.

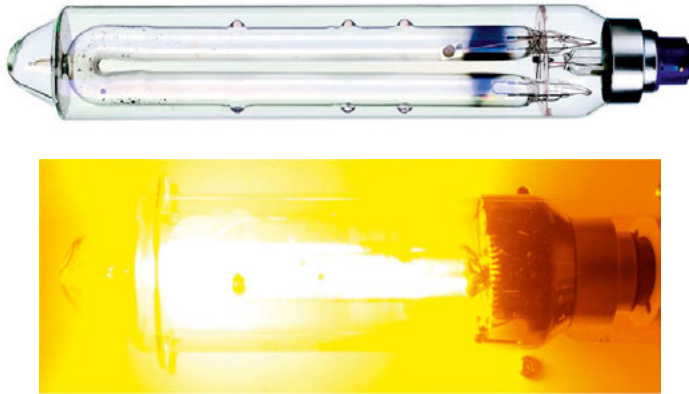
	Ampoule à incandescence	Lampe fluocompacte « grand public »	Lampe fluocompacte « professionnelle »
Coût d'achat d'une ampoule	1 €	8 €	15 €
Durée de vie	1 000 h	8 000 h	15 000 h
Nombre d'ampoules nécessaires	15	2	1
Coût d'utilisation	108 €	21,6 €	21,6 €
Coût total	123 €	37,6 €	36,6 €
Gain		85,4 €	86,4 €

Convention sur le retrait de la vente des lampes à incandescence et la promotion des lampes basse consommation.

### Les lampes sodium basse pression

C'est leur bonne efficacité lumineuse (supérieure à 100 voire 120 lm/W) qui a poussé le déploiement de ce type de lampe, notamment en France, même si leur rendu des couleurs est médiocre avec un indice de rendu des couleurs (IRC) seulement de l'ordre de 20 à 30.

Leur principe de fonctionnement consiste à réaliser une première décharge grâce à un mélange de néon et d'argon, qui permet de vaporiser petit à petit le sodium initialement sous forme solide. La lampe passe doucement d'un aspect rouge à une couleur jaune orangé (autour de 590 nm) ; l'émission lumineuse de ce type de lampe possède une largeur spectrale très faible (d'où le mauvais rendu de couleurs).



**Figure 1.11** – Lampes à sodium.

Les deux principaux points négatifs de ce type de lampe sont l'impossibilité d'un redémarrage à chaud et le fait qu'il faille attendre plusieurs minutes avant que la lampe éclaire de sa pleine puissance.

### **Les lampes haute pression**

Il existe une grande variété de lampes haute pression parce qu'il est possible d'incorporer différents composés à l'intérieur du brûleur. Initialement, le mercure utilisé dans ce type de lampe présentait une qualité de lumière médiocre (indice de rendu des couleurs entre 30 et 50). Le fait d'ajouter des halogénures métalliques améliora considérablement la qualité spectrale de la lumière émise mais imposa des températures de fonctionnement plus importantes, en partie à l'origine du développement dans les années 1960 de brûleurs en alumine polycristalline translucide.

Dès lors, il fut possible aussi de réaliser des lampes de pressions supérieures, diminuant les quantités de mercure nécessaires pour leur bon fonctionnement.



**Figure 1.12** – Lampe haute pression.

### 1.3.2 Évolution des performances et des technologies

Les lampes à incandescence et les lampes à arc sont apparues au même moment, mais la technologie à décharge (arc) impliquait un développement technique et technologique important, que les industriels n'étaient pas en mesure de réaliser à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle.

Par contre, le développement de la lampe à incandescence fut chose relativement aisée, et elle supplanta dans un premier temps toutes les autres technologies.

Depuis dix ans, l'évolution de toutes ces technologies dites « anciennes » (incandescence, fluorescence basse pression, décharges haute pression, etc.) tend à se stabiliser (figure 1.13).

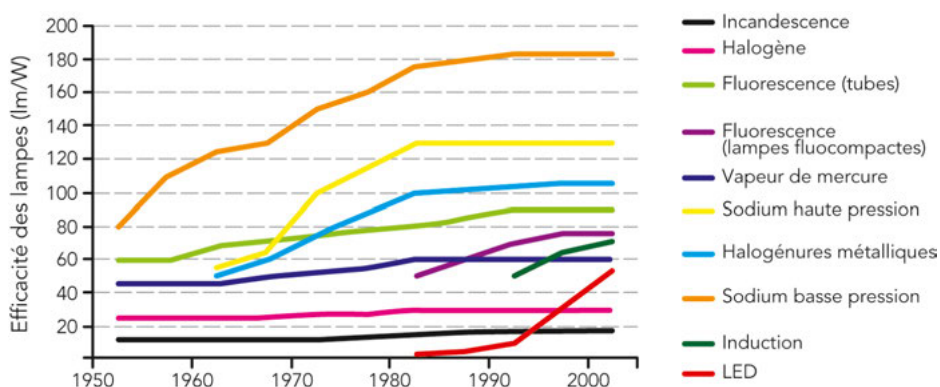


Figure 1.13 – Efficacité des lampes (G. Zissis).

Les nouvelles technologies semi-conductrices (LED) ou plus récemment encore à base de composés organiques (OLED) proposent des nouvelles possibilités d'application et des alternatives techniques à ces anciennes technologies d'éclairage.

## 1.4 La révolution des éclairages à semi-conducteur

Les LED existent en fin de compte depuis plus de 100 ans mais, pendant les 90 premières années de leur vie, elles ont été reléguées au second plan, cantonnées dans un rôle de voyants lumineux au début des années 1970. C'est pour cette application (indicateur) qu'elles ont été d'abord utilisées, intégrées dans des montres puis des calculatrices jusqu'à ce qu'au début des années 1980 les cristaux liquides fassent leur apparition et remplacent totalement les LED dans ces applications [22].

### 1.4.1 Description de la technologie LED

Cette technologie se différencie par le fait que la zone active de l'émission lumineuse est entièrement solide et composée de couches de matériaux dopés différemment.

Pour décrire simplement le principe de fonctionnement, partons du principe que nous avons une jonction de type P-N, constitué d'un matériau dopé P dit « accepteur » d'électrons et d'un matériau dopé N dit « donneur » d'électrons.

Au niveau de l'interface entre ces deux types de matériaux, les recombinaisons « électron-trous » sont possibles. C'est la région active du semi-conducteur, encore appelée « zone de déplétion », où sont générés les photons issus de ces recombinaisons (figure 1.14).

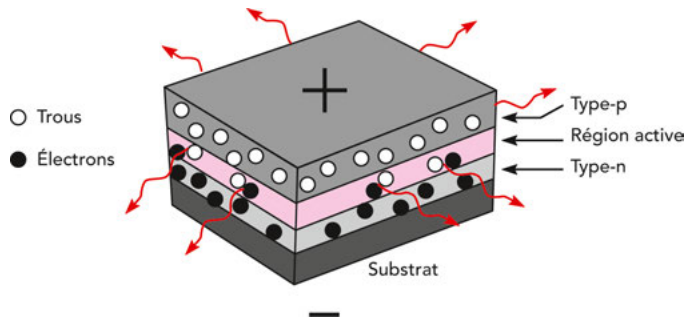


Figure 1.14 – Schéma de la jonction d'une LED.

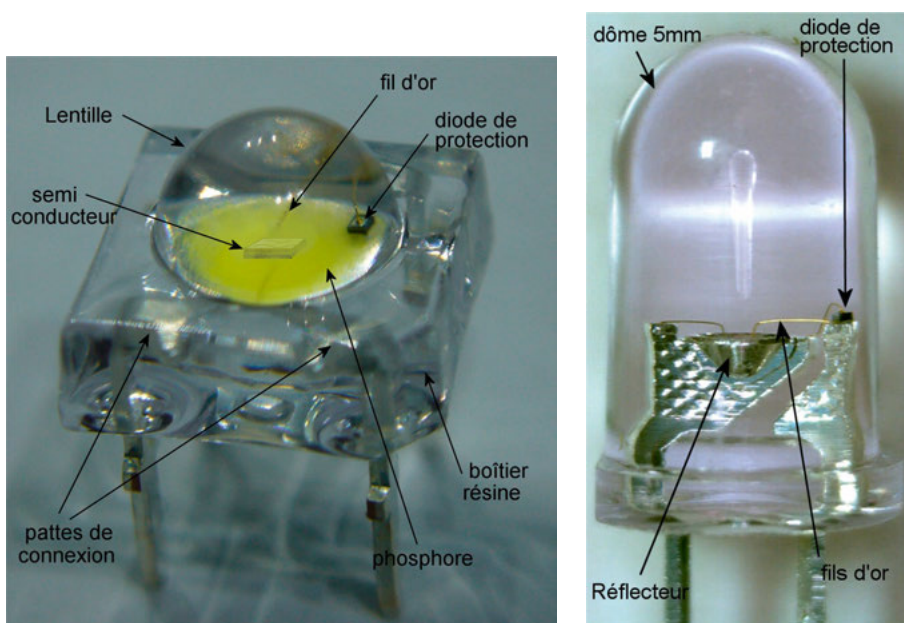
Suivant la qualité des dopants, les épaisseurs des matériaux et les épaisseurs des différentes zones, les recombinaisons sont plus ou moins énergétiques, et les photons émis sont alors de longueurs d'onde variables. C'est en maîtrisant ces paramètres au moment de la fabrication du semi-conducteur que l'on peut fabriquer différents types de LED, émettant des couleurs différentes.

Pour émettre ces photons, il faut polariser cet empilement de différentes couches à l'aide d'une tension qui le caractérise (un semi-conducteur bleu s'alimente sous 3 VDC environ, un semi-conducteur rouge plutôt autour de 1,7 VDC) et faire passer un courant maîtrisé au travers la jonction P-N.

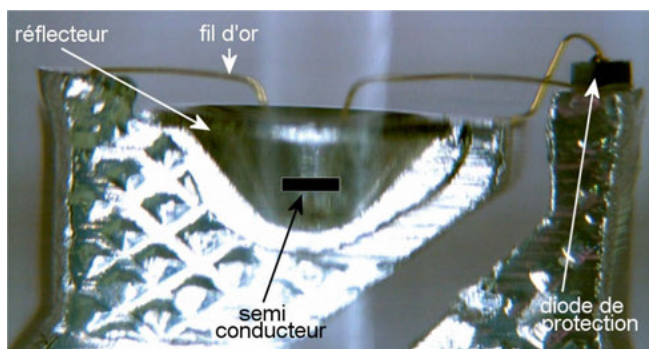
Une fois ces photons émis, il faut les collecter et les orienter vers l'extérieur de la LED. Celle-ci est constituée d'une puce semi-conductrice hébergée dans un boîtier en résine (figure 1.15) ou plus récemment en céramique.

Pour extraire la lumière émise (notamment des LED 5 mm visibles sur la figure 1.15), la technologie initiale consistait à mettre le semi-conducteur dans un petit réflecteur (figure 1.16) et de noyer le tout dans une résine transparente, moulée de façon sphérique en son sommet.

## 1.4 La révolution des éclairages à semi-conducteur



**Figure 1.15** – Photo d'une LED type Piranha et 5 mm.



**Figure 1.16** – Zoom sur le réflecteur d'une LED de type 5 mm.

Aujourd'hui, les LED sont en grande partie réalisées suivant une géométrie de type CMS (composants montés en surface), où la puce semi-conductrice n'est plus dans un petit réflecteur, mais directement mis sur un substrat (idéalement bon conducteur thermique). C'est le cas pour la plupart des LED de semi-puissance et de puissance (qui consomment entre 0,125 et 1,5 W).

Suivant les fabricants et les modèles, ces LED sont coiffées d'une lentille au-dessus du semi-conducteur ayant pour vocation d'extraire un peu plus la lumière émise ou simplement de mettre en forme le faisceau lumineux (figure 1.17).

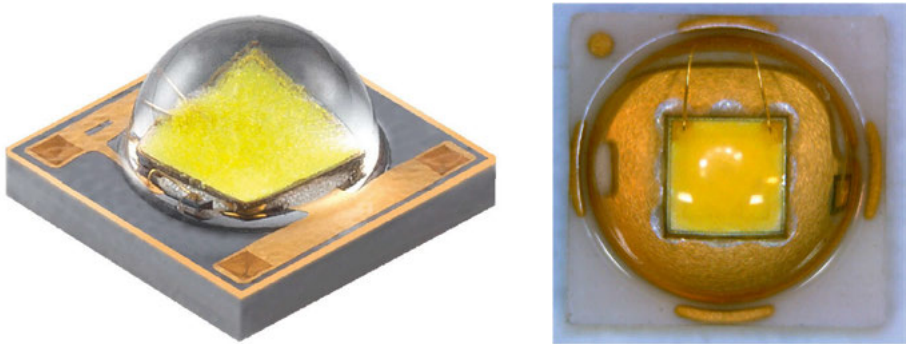


Figure 1.17 – LED de puissance de type 1 W (puce de 900  $\mu\text{m}$  de côté).

### 1.4.2 Rappel historique : de Round à Nakamura

C'est donc Henry Round qui rapporta en 1907 ce « curieux phénomène » (figure 1.18) qui se produisait en appliquant une tension aux bornes d'un cristal de carbure de silicium (SiC). Ce matériau était utilisé à cette époque comme abrasif car ses propriétés de résistance mécanique sont proches de celles du diamant, et sa production peu onéreuse.

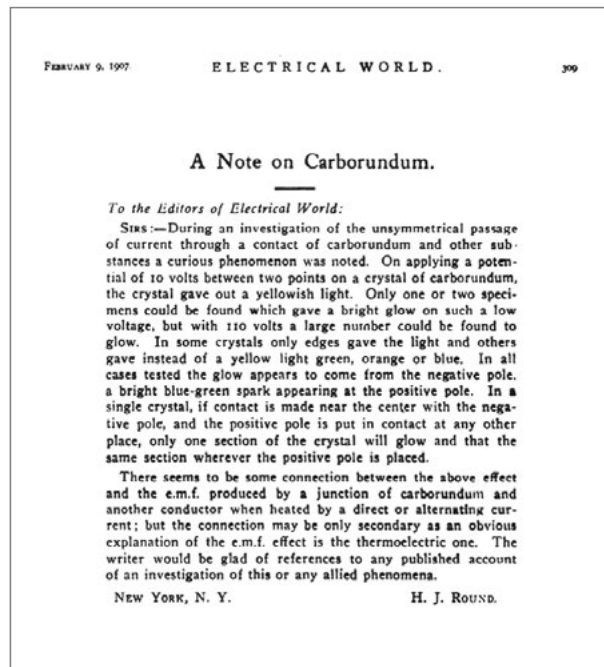


Figure 1.18 – Publication de Henry Round.