

Matériel protégé par le droit d'auteur

Laurent Massol

**L'USINE
NOUVELLE**



LES LED POUR L'ÉCLAIRAGE

Fonctionnement et performances
Critères de choix et mise en œuvre

2^e ÉDITION



DUNOD

Matériel protégé par le droit d'auteur

Tout le catalogue sur
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^{er} 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

ISBN 978-2-10-074185-4

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

Avant-propos	1
Chapitre 1 : Histoire de l'éclairage : de la bougie à la LED	5
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
Chapitre 2 : Méthodes de mesure de la lumière	27
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
Chapitre 3 : Comment fonctionne une LED ?	49
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
Chapitre 4 : Les LED multipuces et les matrices de LED	75
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

Chapitre 5 : Les semi-conducteurs	87
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
Chapitre 6 : De la puce au boîtier	113
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
Chapitre 7 : Optiques primaires et extraction lumineuse	137
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
Chapitre 8 : Performances des LED	151
8.1 Le pilotage en courant d'une LED	151
8.2 Tension d'alimentation des LED	157
Chapitre 9 : La maturité des différentes technologies de LED	177
9.1 Technologies disponibles pour l'émission de blanc	177
9.2 La technologie RGB	199
9.3 Maturité de la technologie LED	202
Chapitre 10 : Une grande variété d'applications	205
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
Chapitre 11 : Évolutions récentes des technologies LED	241
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
Chapitre 12 : Du composant à l'application d'éclairage	257
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

Chapitre 13 : Marché, acteurs et perspectives	279
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 Préviation des performances des LED : 2015-2018	298
Bibliographie	303
Index	307

Retrouvez les compléments en ligne de cet ouvrage sur le site Dunod à l'adresse : 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.

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

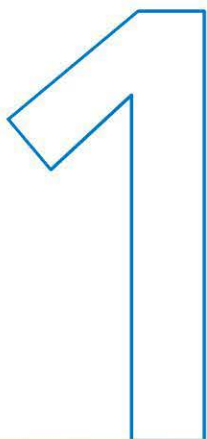
Remerciements

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^e 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^e 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^e 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

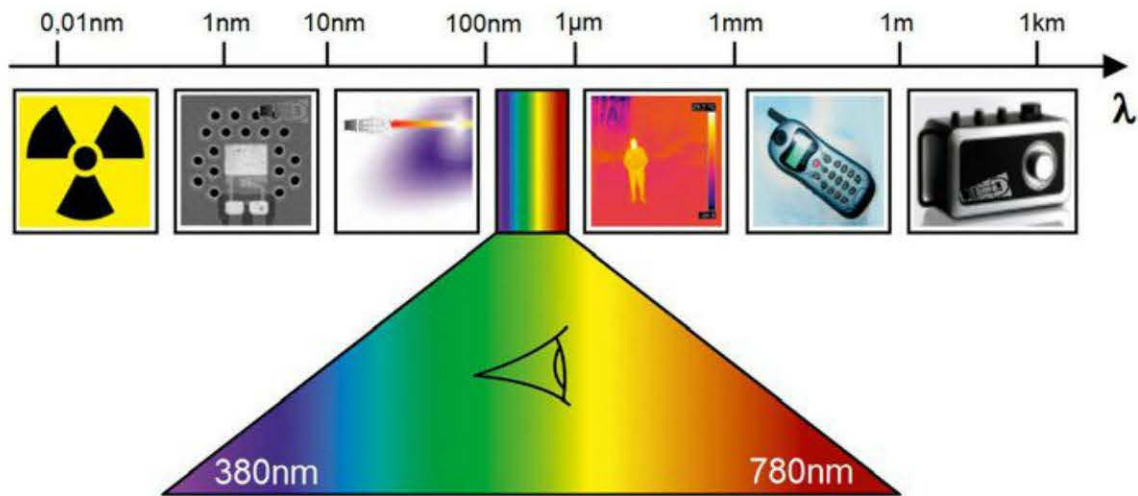


Figure 1.1 – Le spectre visible parmi l'ensemble du champ électromagnétique.

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 ν 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).

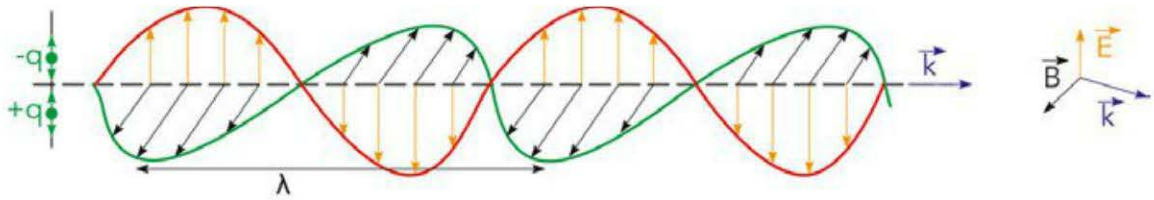


Figure 1.2 – Description de la propagation d'une onde lumineuse.

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^e 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}e siècle et elle a évolué en même temps que les ballasts¹.

Au début du ^{xx}e 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 [50] permet d'atteindre des efficacités lumineuses¹ 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).

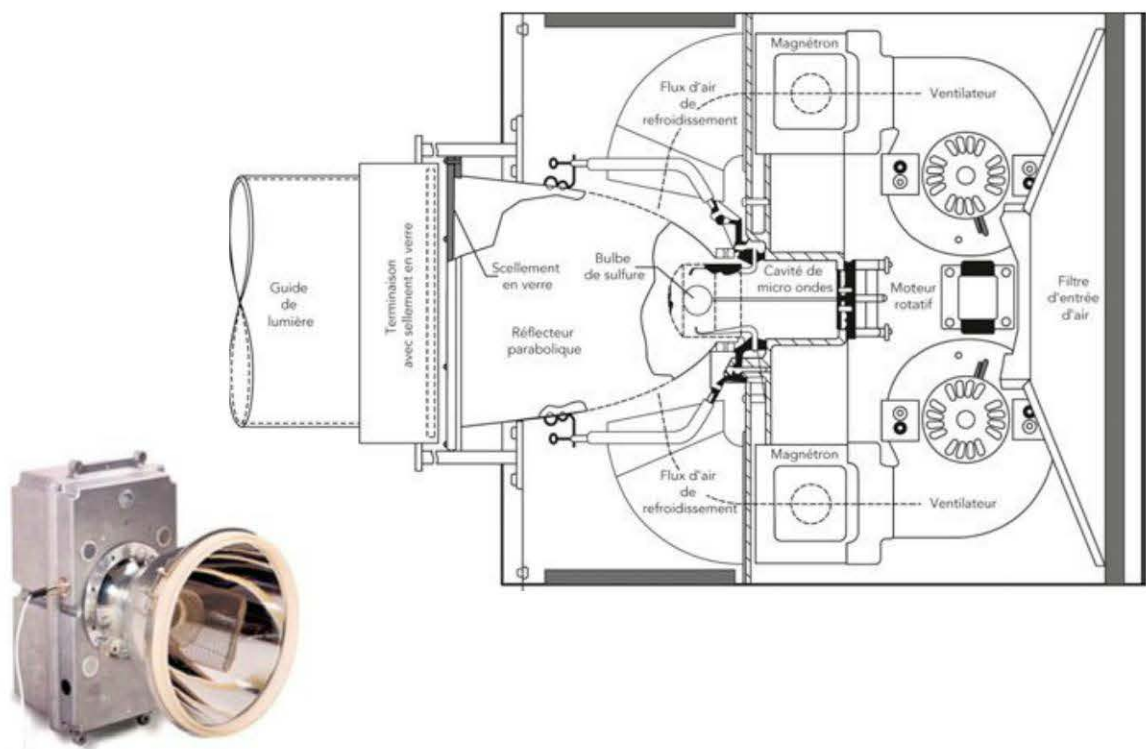


Figure 1.4 – La lampe au soufre (G. Zissis).

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.

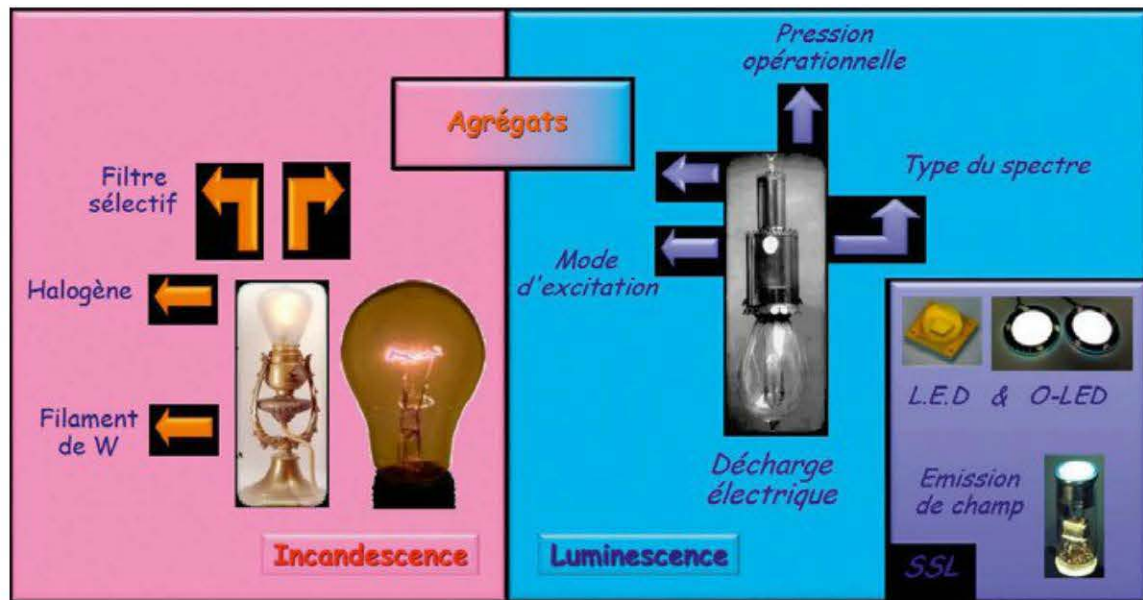


Figure 1.5 – Les méthodes de production de lumière à partir d'électricité (G. Zissis).

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).

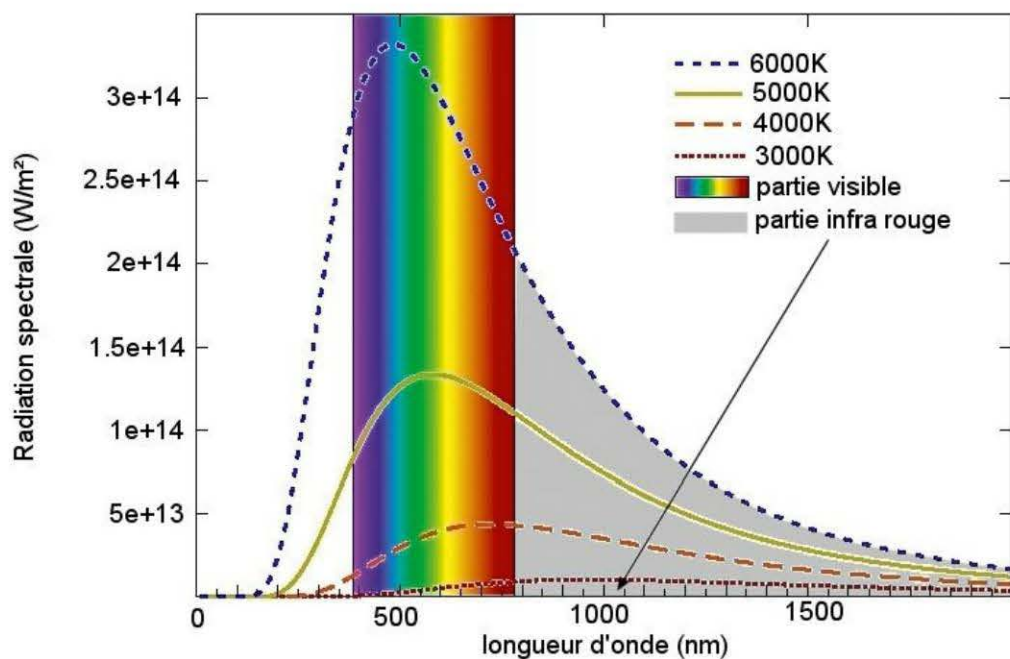


Figure 1.7 – Spectre de source à incandescence à différentes températures de fonctionnement.

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**.

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

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).

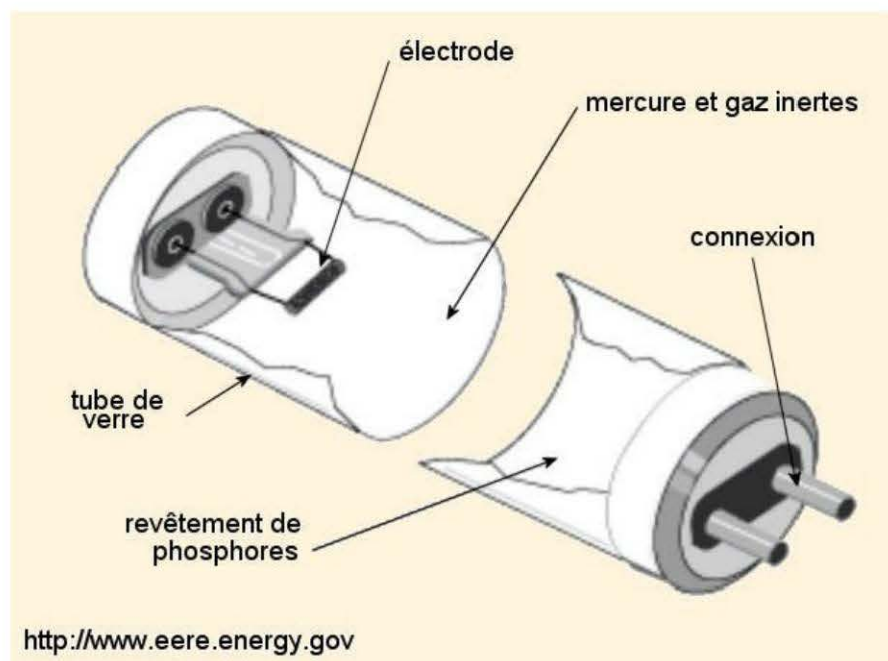


Figure 1.9 – Schéma de principe d'un tube fluorescent.

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. Jusqu'à 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*)	Halogène 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).

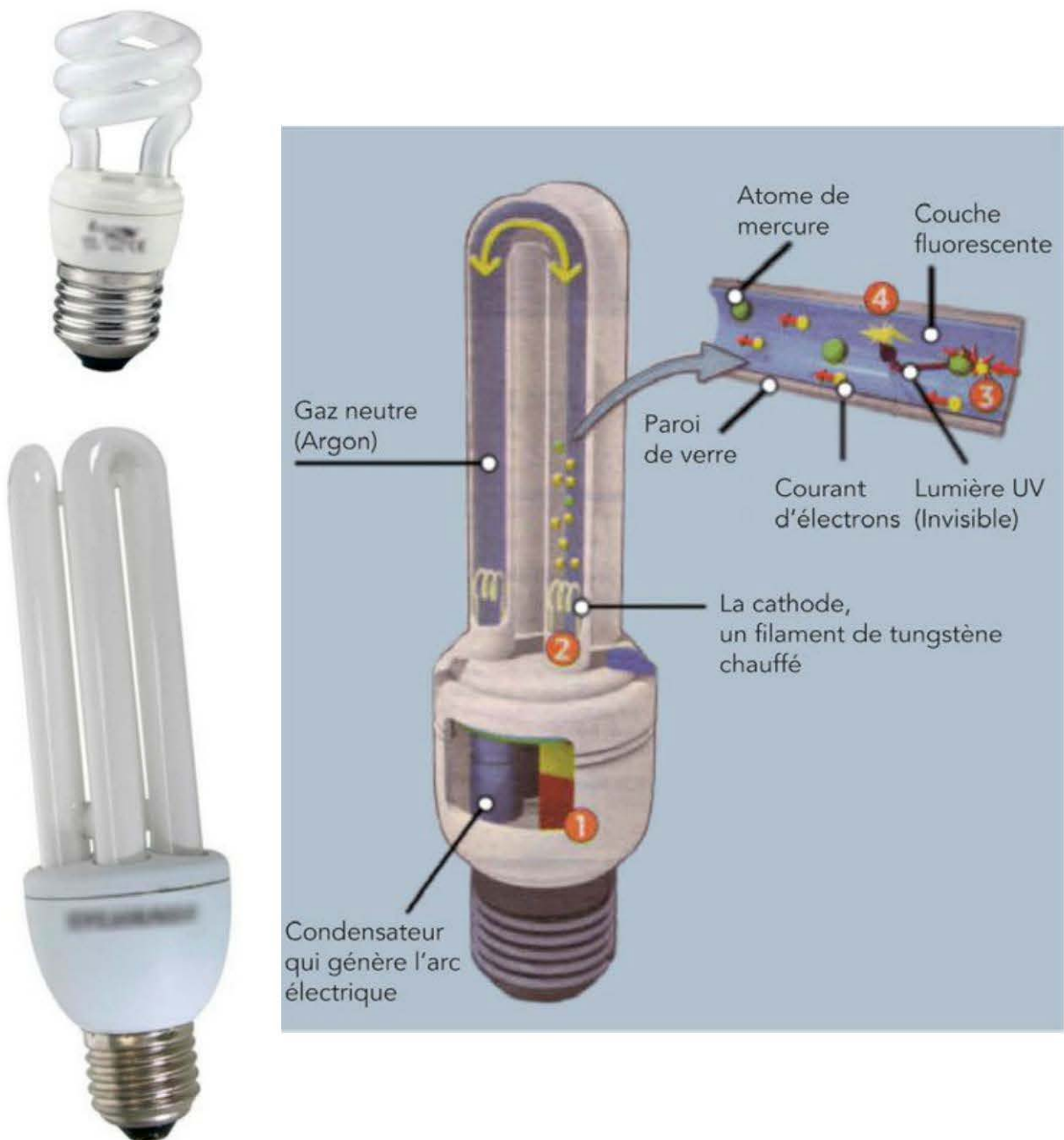


Figure 1.10 – Lampes fluocompactes (G. Zissis).

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).

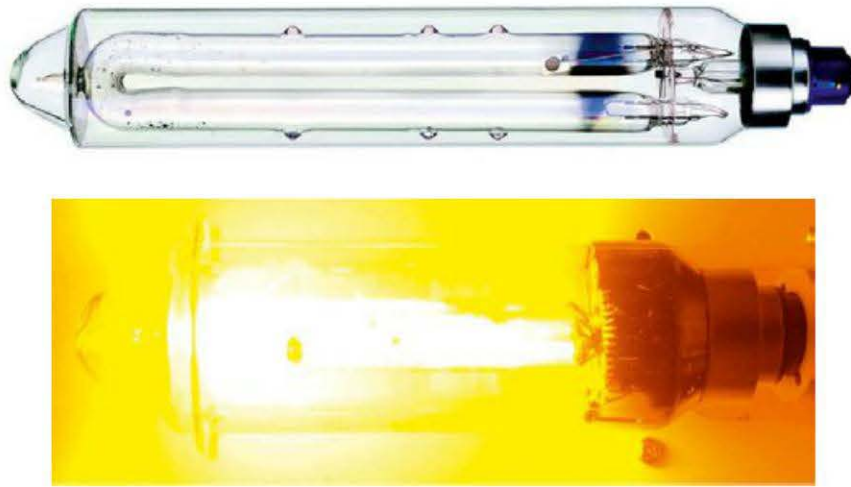


Figure 1.11 – Lampes à sodium.

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.

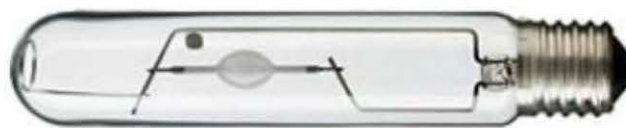


Figure 1.12 – Lampe haute pression.

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^e 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).

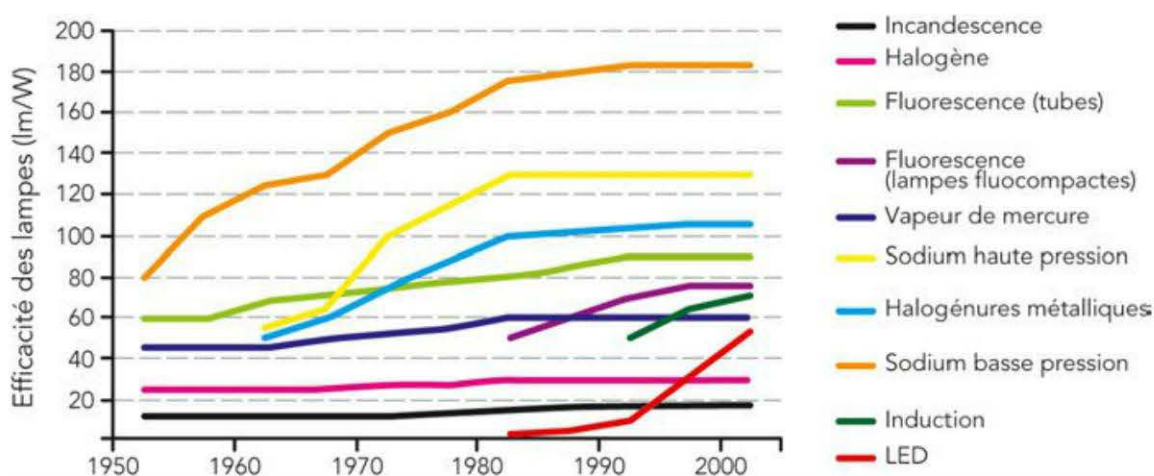


Figure 1.13 – Efficacité des lampes (G. Zissis).

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).

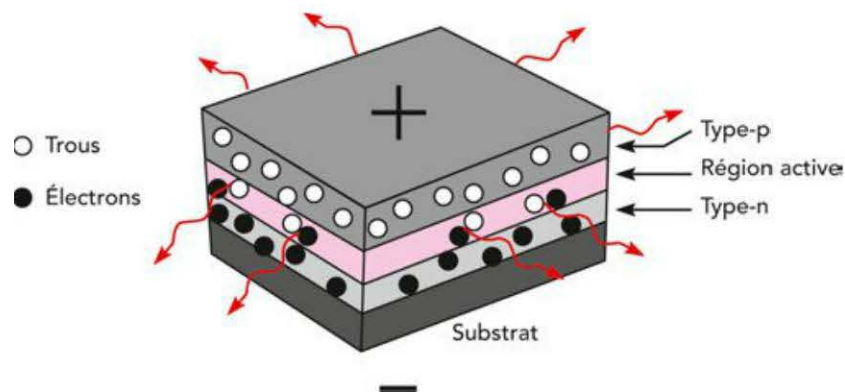


Figure 1.14 – Schéma de la jonction d'une LED.

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

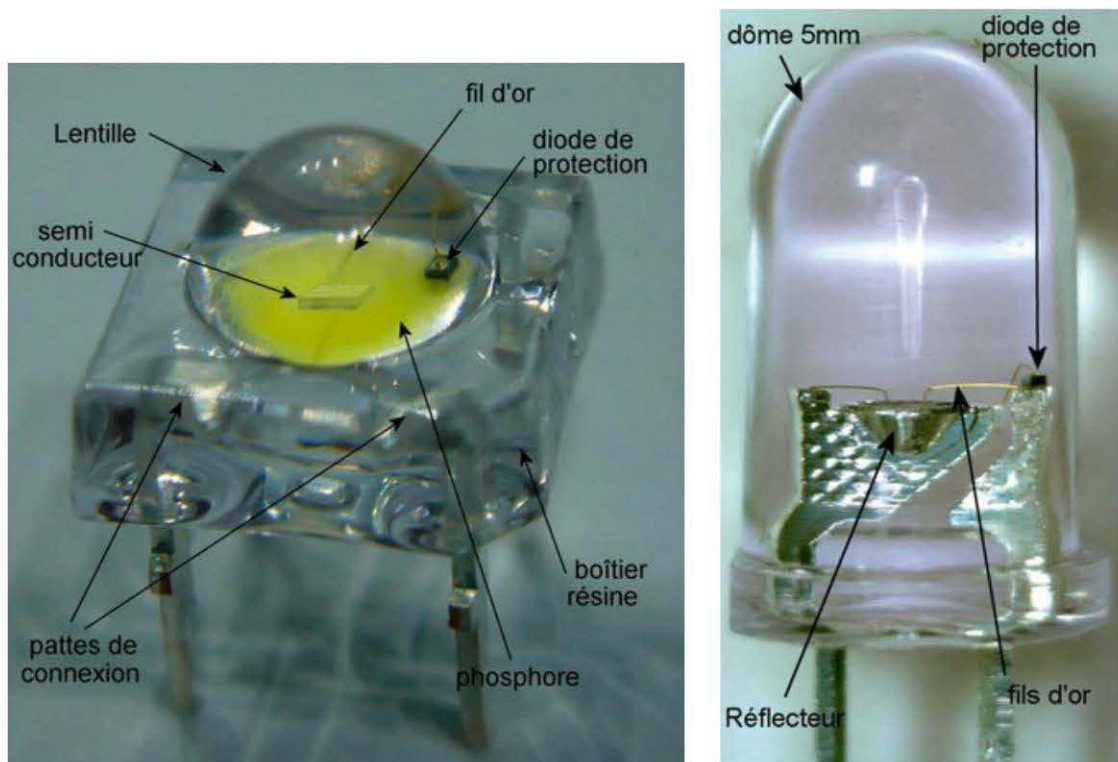


Figure 1.15 – Photo d'une LED type Piranha et 5 mm.

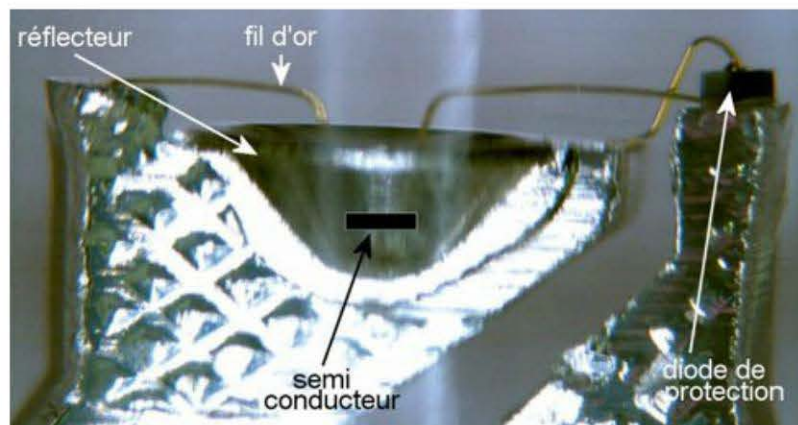


Figure 1.16 – Zoom sur le réflecteur d'une LED de type 5 mm.

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).

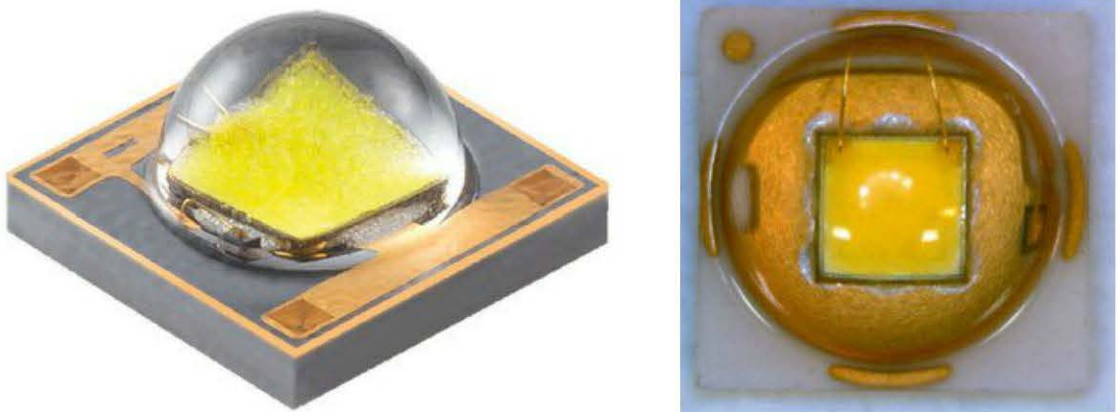


Figure 1.17 – LED de puissance de type 1 W (puce de 900 μm de côté).

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.

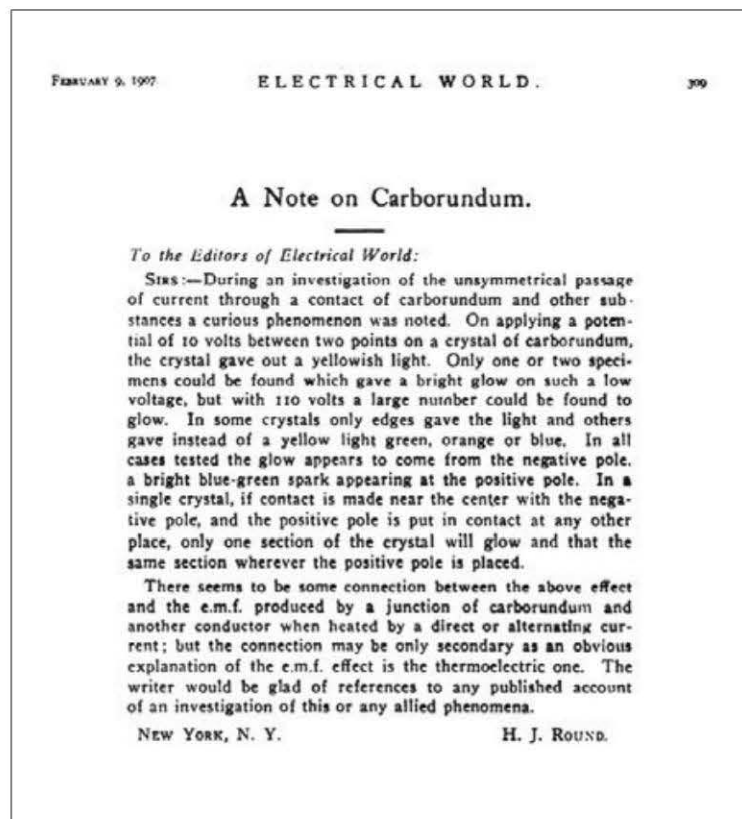


Figure 1.18 – Publication de Henry Round.

1.4 La révolution des éclairages à semi-conducteur

À la suite de cette première découverte, la société CREE réalisa vers 1923 la première émission bleue à partir de carbure de silicium, puis vers 1955 Rubin Braunstein utilisant de l'arséniure de galium, mit en œuvre une émission infrarouge, et, vers 1962, Nick Holonyak réalisa une LED émettant dans le rouge (avec un flux très faible, inférieur à 0,01 lm).

N. Holonyak confia lors d'une interview [56], que *« si tout se passait comme prévu, la lampe du futur serait certainement constituée d'un petit morceau de métal de la taille d'une mine de crayon, qui serait pratiquement indestructible, qui ne pourrait jamais griller et qui convertirait dix fois plus de lumière que ne le font les lampes d'aujourd'hui »*. Cinquante ans plus tard, force est de constater que sa vision était excellente.

N. Holonyak travaillait pour GE, qui mit en vente les LED rouges ainsi produites à un prix de 260 \$ (à titre de comparatif, le prix d'un laser était seulement dix fois plus cher, soit 2 600 \$ de l'époque).

Après avoir rejoint Monsanto en 1967, George Craford mit au point la première LED jaune deux ans plus tard, mais les années qui suivirent virent une bataille sans merci en termes de prix et, à la fin des années 1970, les entreprises comme Texas Instruments et Monsanto se retirèrent du marché. Seul Hewlett-Packard, soutenu par le gouvernement américain, continua d'investir dans le domaine.

Parallèlement et jusque vers la fin des années 1980, les développements sur les LED rouges, jaunes et vertes se multipliaient avec un bémol pour l'efficacité des LED vertes qui n'excèdent pas 1 à 2 %, par un dopage de GaP par du N.

En ce qui concerne les LED bleues, il existait un « consensus » scientifique pendant les années 1980 reposant sur l'hypothèse que, pour fabriquer ce type de LED, l'utilisation du sélénure de zinc était la seule solution. La plupart des ingénieurs de l'époque et la quasi-totalité des entreprises et des laboratoires suivaient cette logique dans la mesure où le cristal possédait 10^7 fois moins de défauts que le GaN (nitrure de gallium) et était donc beaucoup plus stable (100 à 1 000 fois).

Au cours d'une interview sur ses choix stratégiques au courant des années 1980, Shuji Nakamura [56] révéla que la principale motivation qui l'avait poussé à s'obstiner envers et contre tout (y compris contre sa propre direction qui lui demandait d'arrêter) à développer une LED à base de GaN fut un simple constat : son entreprise ne serait pas commercialement en mesure de suivre s'il travaillait sur les mêmes matériaux que la plupart des concurrents de l'époque, même s'il trouvait un concept innovant. Trop d'entreprises avaient investi et elles étaient prêtes à commercialiser à grande échelle les produits développés.

Au lieu de cela, il misa sur une nouvelle méthode de fabrication et modifia le réacteur qui lui permettait de fabriquer ses semi-conducteurs (MOCVD : *MetalOrganic Chemical Vapour Deposition*). En acquérant de l'expérience sur la modification de son réacteur, il prit une avance considérable dans la mesure où ses concurrents devaient attendre plusieurs mois pour que le fabricant de leur réacteur puisse réaliser les modifications qu'ils souhaitaient, alors que lui y parvenait tout seul en quelques heures. Il découvrit ainsi que l'un des principaux problèmes provenait la convection autour de l'échantillon et trouva la solution en ajoutant un flux de gaz inerte perpendiculaire au flux initial, permettant ainsi de réduire cette convection. Il appela son équipement « two-flow » MOCVD (figure 1.19). En 1991, il publia cette découverte dans le *Japanese Journal of Applied Physics*.

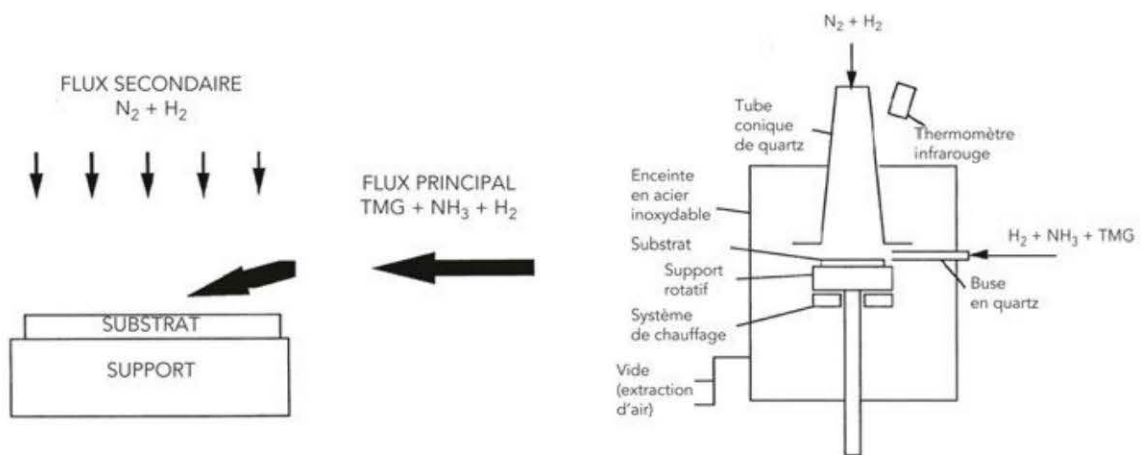


Figure 1.19 – MOCVD standard et schéma de principe d'un double flux développé par Nakamura.

La fabrication du GaN sur substrat de saphir fut possible et, en novembre 1993, la société Nichia annonça la création de la première LED bleue haute luminosité au cours d'une conférence de presse à Tokyo. Deux ans plus tard, en suivant une suggestion de S. Nakamura, Nichia parvint à mettre au point la première LED blanche.

1.4.3 Développement des LED blanches

À partir de 1995, les développements n'ont pas cessé de se succéder, partant d'une efficacité de quelques lumens par watt à la fin des années 1990 à presque 120 lm/W en 2011.

Outre la société Nichia, qui se focalisa plus sur des boîtiers de LED de petite taille avec des puissances de l'ordre de 0,1 W, la joint-venture entre HP et Philips en 1999 marqua le démarrage des LED dites *de puissance*, avec pour la première fois des boîtiers de grosse dimension et des puces semi-conductrices de 1 mm² de surface. Ces premières LED (les Luxeon®) avaient des flux de l'ordre de 10 à 15 lm, pour des

1.4 La révolution des éclairages à semi-conducteur

consommations inférieures à 350 mA autour de 1,2 à 1,4 W. Leur efficacité restait toutefois inférieure à celle des lampes à incandescence.

Puis tous les grands groupes se sont mis à développer des LED blanches : Osram avec ses Golden Dragon® et, au début des années 2000, les boîtiers XL7090 de CREE (figure 1.20).

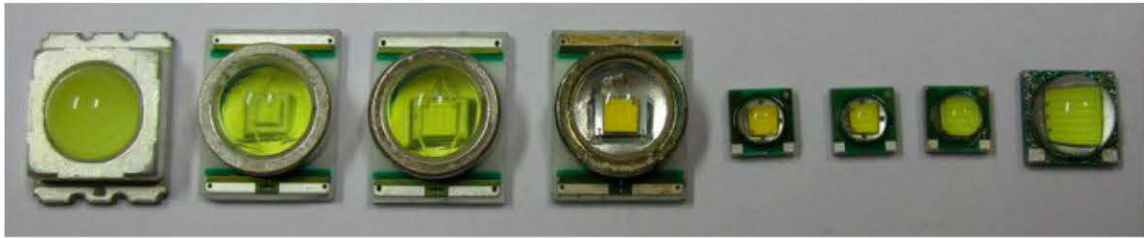


Figure 1.20 – Génération de LED de puissance de CREE sur 10 ans.

Les années 2000 ont été propices aux développements et aux améliorations de tous les paramètres techniques des LED blanches, que ce soit au niveau du semi-conducteur et de la façon de l'alimenter, que ce soit au niveau du boîtier et des substrats utilisés pour dissiper la chaleur dégagée, ou que ce soit encore au niveau des phosphores permettant la conversion du bleu émis par le semi-conducteur en jaune/orange (l'addition des deux fournissant le blanc final).

2

Méthodes de mesure de la lumière

Les propriétés fondamentales de la lumière et celles de la *perception lumineuse*, c'est-à-dire de l'interaction entre le rayonnement et le système de vision humain, ont été largement décrites dans de nombreux ouvrages. L'objectif de ce chapitre n'est donc pas de produire une nouvelle synthèse de la physique du rayonnement ou de la physiologie de l'œil humain mais plutôt d'introduire les notions fondamentales qui permettront de décrypter plus facilement les données et les diagrammes communément employés pour décrire les sources de lumière.

Dans ce chapitre, nous réduirons au minimum les descriptions mathématiques et solliciterons plus l'intuition du lecteur pour lui faire comprendre ces notions de quantification de la lumière.

2.1 Rayonnement, lumière et grandeurs associées

2.1.1 Flux énergétique et longueur d'onde

Avant d'introduire les deux grandeurs fondamentales du rayonnement que sont le flux énergétique et la longueur d'onde, commençons par quelques rappels sur le photon et sur l'œil humain.

Le **photon** est une notion complexe de physique quantique mais il a l'avantage d'être connu du grand public comme particule élémentaire de la lumière. Ce sera amplement suffisant dans le cadre que nous nous sommes fixé ici.

L'œil, de son côté, est certes un détecteur de lumière extrêmement complexe, mais nous le choisissons puisqu'il reste malgré tout le plus familier pour nous.

Associations donc des photons et un œil pour introduire deux grandeurs essentielles du rayonnement : la puissance et la longueur d'onde.

Intéressons-nous d'abord à un photon. Il possède une propriété importante : son énergie. Chaque photon a ainsi une énergie propre. Les photons issus d'une source

de lumière peuvent avoir individuellement différentes énergies et, en pénétrant dans l'œil, ils déposeront chacun cette énergie propre sur la rétine. Plus le nombre de photons recueillis par la rétine sera important pendant un temps donné, plus l'énergie déposée sera importante. En d'autres termes, plus le flux de photons reçus par l'œil sera important, plus la puissance reçue par l'œil sera importante. Nous venons d'introduire une propriété importante de la lumière : sa puissance transportée, appelée *flux énergétique*. Au même titre que n'importe quelle puissance (électrique, mécanique, etc.), elle s'exprime en watts et peut être mesurée par un instrument. Perçue par l'œil, elle donnera une sensation plus ou moins importante de luminosité.

Revenons maintenant sur l'énergie propre d'un photon. Son énergie peut également se traduire sous la forme d'une longueur d'onde, généralement exprimée en nanomètres (nm). L'œil humain a ceci de particulier qu'il est capable, dans une certaine mesure, de discriminer les photons de différentes longueurs d'onde et de les identifier sous la forme de couleurs.

Ainsi, un ensemble de photons incident sur un œil produit deux types d'informations fondamentales pour caractériser le rayonnement (figure 2.1) :

- ▶ la puissance, ou flux énergétique (qui se traduit sous forme de sensation de luminosité) ;
- ▶ la longueur d'onde (qui s'interprète sous forme de couleur).

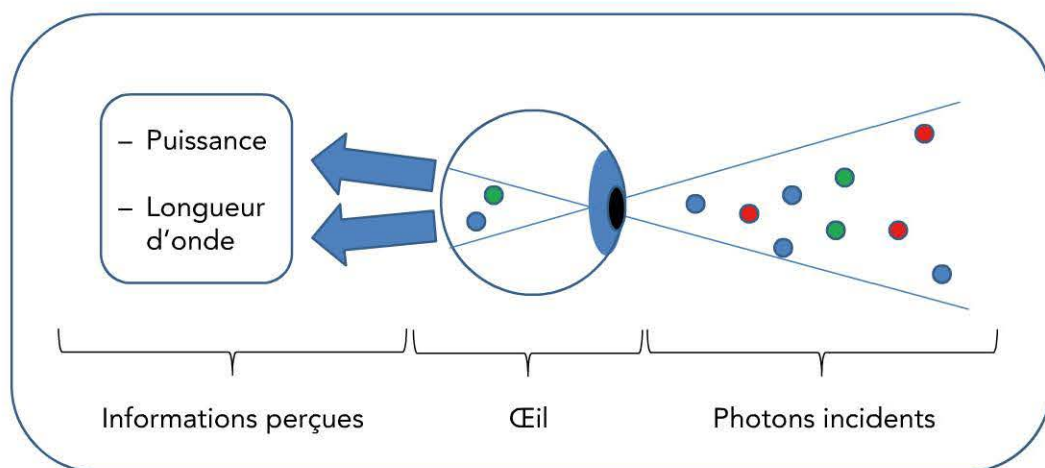


Figure 2.1 – Deux propriétés importantes du rayonnement interprétées par l'œil : la puissance et la longueur d'onde.

2.1.2 Flux spectrique énergétique

Les deux grandeurs mentionnées précédemment sont indépendantes. On peut ainsi les représenter sur un graphique, en exprimant, pour chaque longueur d'onde, la puissance véhiculée correspondante. Cette puissance par unité de longueur d'onde

2.1 Rayonnement, lumière et grandeurs associées

s'appelle le *flux spectrique* énergétique et s'exprime usuellement en watts par nanomètre (W/nm). Le graphique obtenu s'appelle un *spectre*.

Un spectre est une forme de signature pour une source de lumière. Chaque source de lumière a un spectre qui lui est propre et, pour qui est du métier, il est aisé de reconnaître telle ou telle source simplement à la vue de son spectre. À titre d'exemple, la figure 2.2 présente différents spectres typiques des sources de lumière usuelles.

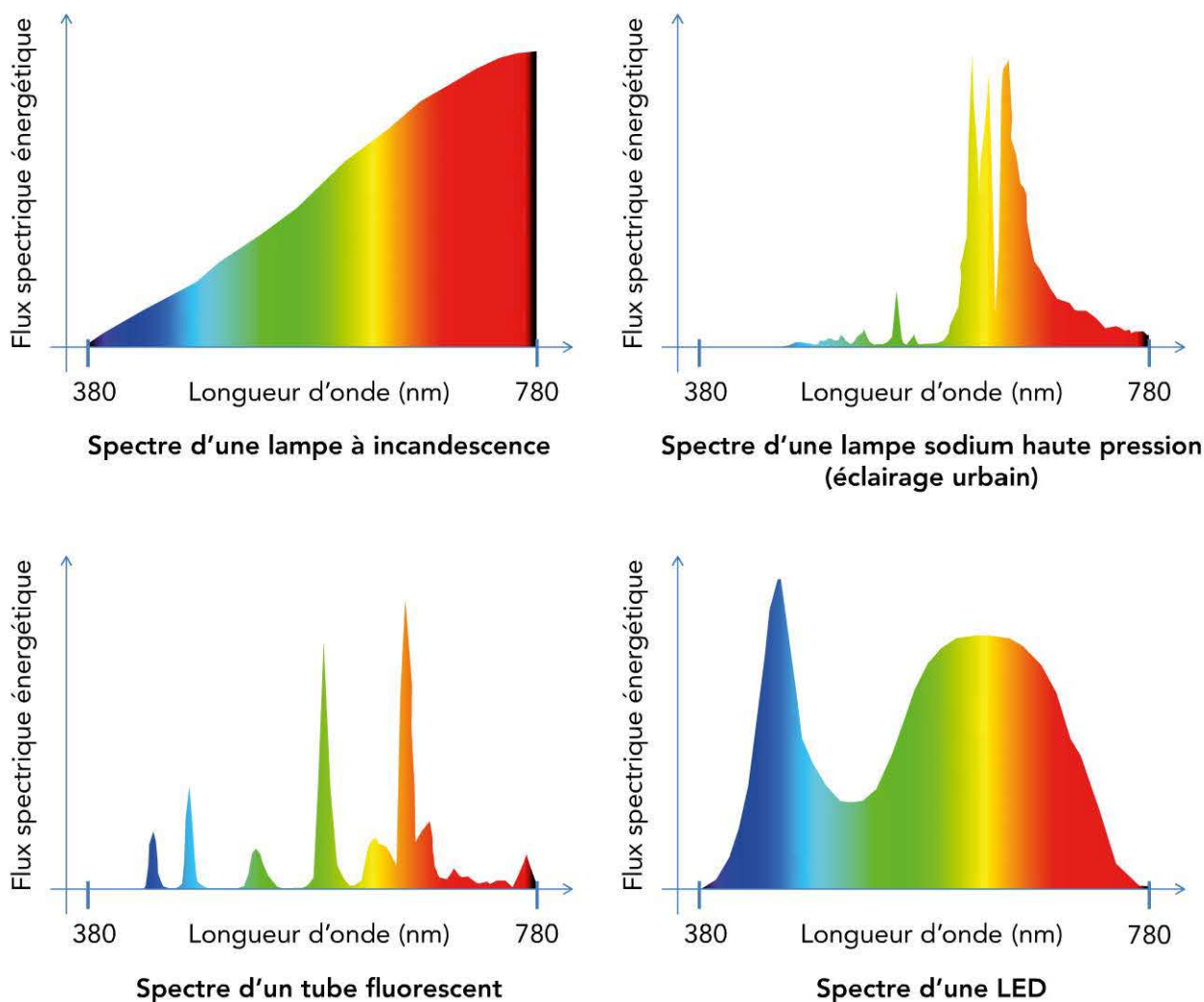


Figure 2.2 – Spectres des sources de lumière usuelles.

Le spectre contient l'ensemble des informations nécessaires à la caractérisation d'une source de lumière et on peut, à partir de lui, calculer les grandeurs suivantes :

- ▶ flux visible ;
- ▶ coordonnées chromatiques ;
- ▶ température de couleur.

Ces notions seront introduites dans la suite de ce chapitre.

Le spectre est ainsi l'élément fondamental de la caractérisation du rayonnement.

Une source qui n'émettrait qu'une seule longueur d'onde serait qualifiée de *monochromatique*. Elle aurait un spectre présentant une seule raie à la longueur d'onde considérée. Quoique très commode pour des besoins théoriques ou pédagogiques, les sources monochromatiques n'existent pas en réalité. Les sources réelles présentent des spectres continus. Ces spectres peuvent s'étendre sur une large gamme de longueurs d'onde (spectre du soleil par exemple), sur une part plus restreinte (les LED colorées) ou sur une part très restreinte (sources quasi monochromatiques comme les lasers).

Le calcul du flux énergétique d'une source à partir de son spectre s'obtient en sommant les contributions à la puissance de chaque longueur d'onde. Puisque les sources ont des spectres continus, ceci se traduit par l'intégration du flux spectrique énergétique sur une gamme de longueurs d'onde choisie.

$$\Phi = \int_{380}^{780} f(\lambda) d\lambda$$

avec :

- ▶ Φ : flux énergétique (W) ;
- ▶ f : flux spectrique énergétique (W/nm) ;
- ▶ λ : longueur d'onde (nm).

2.1.3 Flux visible

Considérons maintenant deux sources imaginaires qui présenteraient un spectre sous la forme d'un rectangle de flux spectrique énergétique d'une valeur de 1 W/nm, d'une largeur de 1 nm, centré respectivement à :

- ▶ 555 nm ;
- ▶ 950 nm.

Le flux énergétique de ces sources (leurs puissances rayonnées) est ainsi de 1 W pour chacune. Pour le lecteur qui ne serait pas familier avec les ordres de grandeur des longueurs d'onde, il faut ici révéler qu'une longueur d'onde de 555 nm produit une sensation visuelle de vert alors que celle de 950 nm, qui se situe dans l'infrarouge, est invisible par l'œil humain.

Deux sources de même flux énergétique vont ainsi produire deux sensations de luminosité différentes. Ceci semble arriver en contradiction avec ce qui a été mentionné à la fin du paragraphe 2.1.1, où le flux énergétique était associé à une sensation de luminosité. Ceci met en évidence le fait que les grandeurs « universelles » de la physique sont inadaptées aux problématiques de la caractérisation des sources de lumière.

2.1 Rayonnement, lumière et grandeurs associées

Revenons donc sur le terme de *lumière*, que nous employons pour la première fois. En effet, depuis le début de ce chapitre, nous n'avons parlé que de rayonnement. La lumière est la portion de rayonnement située entre les longueurs d'onde de 380 nm et 780 nm, zone à laquelle l'œil humain est sensible, à l'exclusion des gammes de longueur d'onde supérieures (ultraviolets, rayons X...) ou inférieures (infrarouges, micro-ondes...). La notion de lumière est donc intimement liée à l'œil humain, ce qui explique la difficulté que l'on a à adapter des grandeurs de la physique à un système physiologique.

Pour tenir compte de la sensibilité de l'œil et ainsi quantifier une puissance rayonnée en relation directe avec la sensation de luminosité produite, une nouvelle grandeur a été créée. Il s'agit du *flux visible*, qui s'exprime en lumens (lm). Ainsi apparaissent deux branches, complémentaires de la science de la caractérisation du rayonnement :

- ▶ la radiométrie, qui s'attache à l'étude et à la quantification du rayonnement, dans sa dimension physique ;
- ▶ la photométrie, qui décrit les propriétés de la lumière, en tant que rayonnement dans la gamme des longueurs d'onde visibles, en tenant compte de la sensibilité de l'œil humain.

Le côté « humain » a son importance. Disons simplement que si un chat s'en donnait la peine, il développerait une science radiométrique identique à la nôtre mais une photométrie différente, puisque la sensibilité de son œil aux différentes longueurs d'onde n'est pas la même que la nôtre.

Précédemment, nous avons pris l'exemple de deux sources de puissance identique mais émettant à des longueurs d'onde différentes : l'une dans la gamme visible, l'autre non. On pourrait se poser la question suivante : est-ce que deux sources émettant 1 watt, toutes deux dans la gamme visible, produiraient la même sensation d'intensité lumineuse ? La réponse est non puisque, même dans le domaine du visible, l'œil humain n'est pas sensible de la même façon aux différentes longueurs d'onde. Par contre, deux sources émettant 1 lumen chacune à des longueurs d'onde différentes seraient perçues aussi lumineuses (bien sûr avec des couleurs différentes). C'est bien là l'intérêt de la définition du lumen.

Le lumen est obtenu en sommant la contribution du flux spectrique énergétique à chaque longueur d'onde d'une source mais, contrairement au calcul du flux énergétique, on applique un facteur de pondération selon la longueur d'onde considérée pour tenir compte de la sensibilité de l'œil humain. Cette sensibilité est bien sûr dépendante des individus et surtout de leur âge, mais la CIE a défini une sensibilité de référence, en 1931, qui est utilisée pour la définition du lumen. Cette sensibilité est quantifiée selon la fonction de visibilité, appelée $V(\lambda)$. Cette fonction est tabulée et ses valeurs peuvent se trouver dans [1]. Une illustration de cette courbe de sensibilité est présentée en figure 2.3.

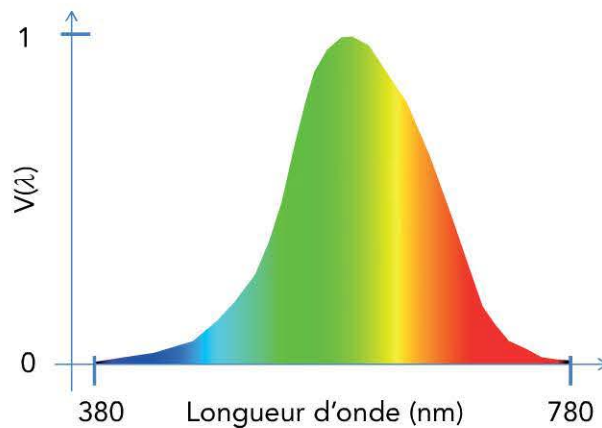


Figure 2.3 – Allure de la fonction de visibilité, ou fonction d'efficacité lumineuse relative spectrale.

À titre d'exemple, on peut imaginer une source de lumière qui émet 1 W à 450 nm, 1 W à 555 nm et 1 W à 650 nm. Le flux énergétique de cette source serait donc de 3 W. Le flux visible serait quant à lui la somme des produits respectifs du flux énergétique à chaque longueur d'onde par la sensibilité à chaque longueur d'onde, soit :

$$1 \text{ W} \times 26 \text{ lm/W} + 1 \text{ W} \times 683 \text{ lm/W} + 1 \text{ W} \times 73 \text{ lm/W} = 782 \text{ lm}$$

Ceci est un exemple basé sur des sources monochromatiques idéales. Pour toutes les sources réelles, la relation qui lie flux spectrique énergétique et flux visible est la suivante :

$$F = K \int_{380}^{780} V(\lambda) f(\lambda) d\lambda$$

avec :

- ▶ F : flux visible (lm) ;
- ▶ K : constante égale à 683 (lm/W) ;
- ▶ V : fonction de visibilité (sans unités) ;
- ▶ f : flux spectrique énergétique (W/nm) ;
- ▶ λ : longueur d'onde (nm).

2.2 Les couleurs et le blanc

2.2.1 Colorimétrie

Jusqu'à présent, nous avons considéré des exemples de sources monochromatiques et indiqué des flux à certaines longueurs d'onde.

Cependant, on peut très bien mesurer en watts le flux énergétique d'une source réelle. Mais cette valeur ne donnera alors aucune information sur la répartition de

2.2 Les couleurs et le blanc

ce flux sur l'ensemble des longueurs d'onde émises par la source. En d'autres termes, à partir du spectre, on peut obtenir un flux mais, à partir d'un flux, on ne peut pas retrouver le spectre. Ceci est également vrai pour le flux visible. Par analogie, si on connaît les notes de tous les élèves d'une classe, on peut calculer la moyenne des notes de la classe. Mais si on ne connaît que la moyenne des notes, on ne peut pas retrouver les notes individuelles de chaque élève.

Poursuivons cette analogie scolaire : imaginons une classe de vingt élèves dont dix ont obtenu 0/20 et dix 20/20. Considérons maintenant une autre classe dans laquelle tous les élèves ont obtenu 10/20. La moyenne des deux classes est de 10/20 et pourtant, le contexte est radicalement différent. Ainsi et de la même façon, une source de lumière perçue comme verte peut présenter un spectre avec une raie dans le vert ou bien deux raies respectivement dans le bleu et l'orangé, ou toute autre forme de spectre continu qui, à première vue, ne laisserait pas supposer que l'ensemble produit une sensation de vert. C'est pour ces raisons que la colorimétrie s'est développée. Là encore basée sur des modèles standard de perception de la lumière, elle permet de qualifier et de quantifier la couleur de la lumière.

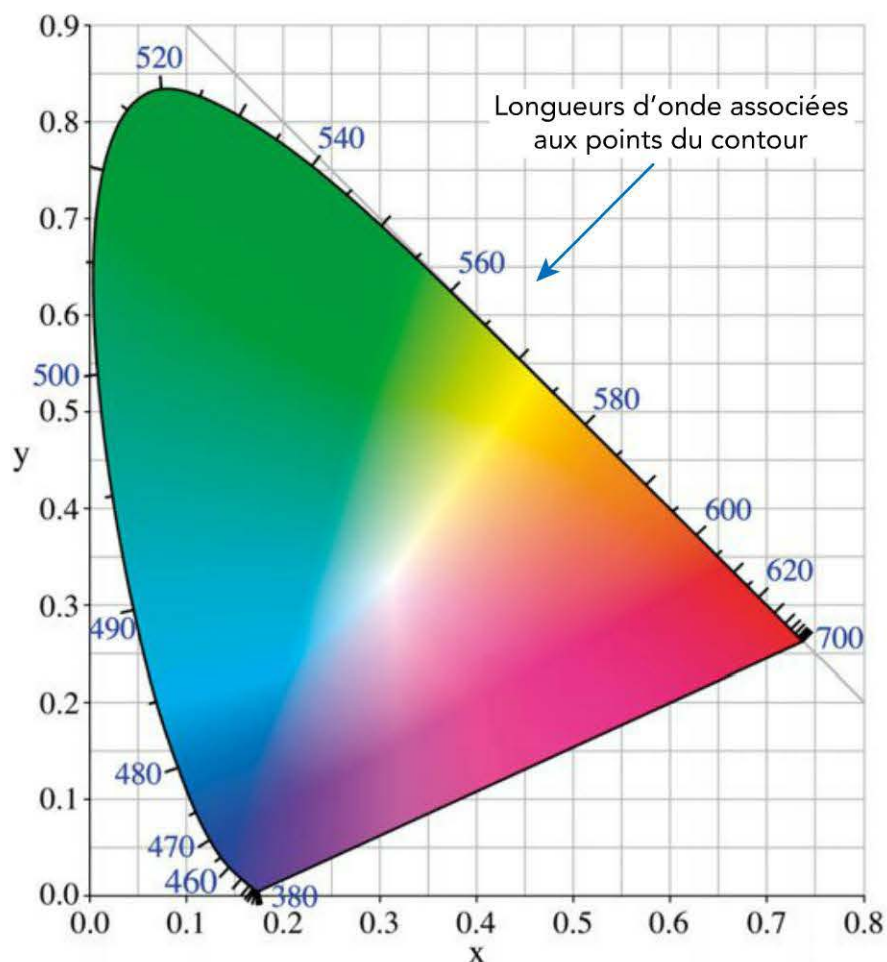


Figure 2.4 – Diagramme colorimétrique CIE 1931.

En 1931, la CIE a édité un diagramme trichromatique x,y . Bien que d'autres types de diagrammes lui aient succédé par la suite (u,v) , (u',v') , ce diagramme reste néanmoins très courant et présent sur nombre de documentations techniques de luminaires.

Il se présente sous la forme d'un diagramme de forme approximativement triangulaire et indique, pour chaque couleur, un point dans un plan à deux dimensions repéré par des coordonnées x et y . Ce point est appelé *point de couleur* et il permet ainsi de qualifier la couleur globale d'une source de lumière.

Sur tout le contour, on retrouve le point de couleur de toutes les sources monochromatiques (on y retrouve les couleurs correspondant à chaque longueur d'onde). La surface délimitée par ce contour présente les couleurs qui peuvent résulter de toute combinaison de différentes longueurs d'onde. Ainsi, le point de couleur peut être défini indépendamment de la forme de son spectre.

2.2.2 La température de couleur

Au centre du diagramme de chromaticité, on distingue une zone des blancs assez étendue et présentant ainsi des teintes plus ou moins marquées. Ceci amène à un constat. La notion de lumière blanche est extrêmement ambiguë. Par exemple, la lumière blanche qu'on utilise dans son salon n'est pas la même que celle utilisée sur son lieu de travail. On qualifie chacune des teintes de ces blancs par des sensations associées :

- ▶ Blanc chaud, pour des ambiances confortables et feutrées,
- ▶ Blanc froid, pour des ambiances stimulantes et des zones de travail.

Ces notions de blanc sont anciennes, et fortement ancrées culturellement puisque depuis la nuit des temps, l'humain est éclairé par des sources de lumière dont la teinte varie entre le blanc chaud (le feu par exemple) et le blanc froid (la lumière diurne d'un ciel nuageux). Historiquement, les hommes ont toujours été éclairés par des sources que nous appellerons thermiques :

- ▶ Issues de la flamme,
- ▶ Issues du soleil,
- ▶ Issues d'un filament d'ampoule à incandescence.

Ces sources thermiques ont la particularité de présenter un rayonnement proche d'un objet physique théorique appelé le *corps noir*. Il s'agit d'une description quantitative du rayonnement d'un corps idéal (nous ne rentrerons pas dans le détail de cet idéal) à l'équilibre thermique à une température donnée. Cette description physique permet de calculer de manière exacte le spectre d'un corps noir pour n'importe quelle température. Ainsi à chaque température, on peut associer un spectre et donc une couleur et donc un point de coordonnées x,y dans le diagramme de chromaticité.

2.2 Les couleurs et le blanc

Pour imaginer cette description, on peut imaginer remplacer ce corps noir par n'importe quel matériau qu'on viendrait chauffer. À partir d'une certaine température, il deviendrait incandescent, au début rouge/orangé (blancs chauds) à température modérée puis blanc bleuté (blanc froid) chauffé « à blanc », c'est-à-dire à hautes températures.

L'ensemble des points de couleur de ces différents blancs reportés sur le diagramme de chromaticité pour toutes les températures représente la courbe du corps noir.

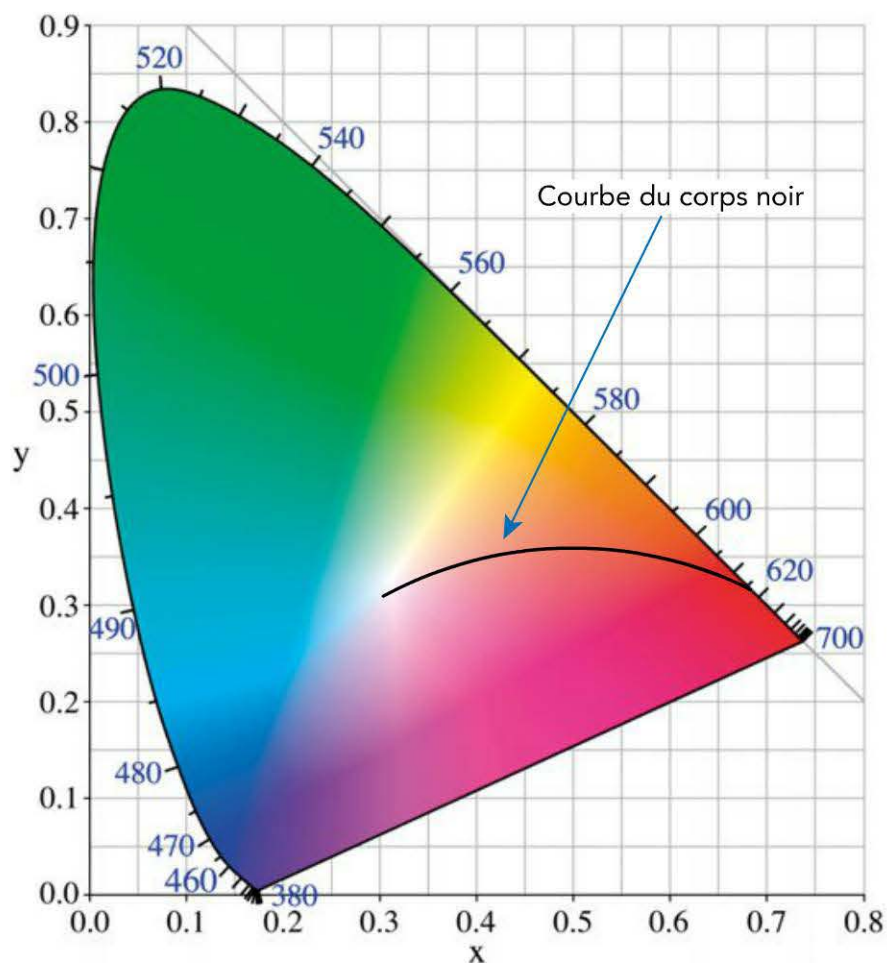


Figure 2.5 – Tracé de la courbe du corps noir dans le diagramme colorimétrique CIE 1931.

C'est ainsi qu'est définie la température de couleur : il s'agit, pour un blanc, de la température à laquelle il faudrait chauffer un corps noir (ou pour simplifier un matériau quelconque) pour obtenir la même teinte de blanc. La température de couleur s'exprime en Kelvins (K).

Soulignons un point important : la notion de blanc chaud/blanc froid est liée à un ressenti de confort et une perception d'ambiance. Elle varie en opposition avec la notion de température de couleur. En effet, un blanc chaud est obtenu pour des températures de couleurs faibles (inférieures à 3 500 K) et un blanc froid pour des températures de couleur élevées (supérieures à 4 500 K).



Figure 2.6 – Bancs illuminés par des luminaires, de gauche à droite, respectivement à 2 500K, 3 000K, 5 500K.

Depuis le développement de sources non thermiques (tubes fluorescents en particulier) les blancs n'ont pas forcément un point de couleur situé sur la courbe du corps noir. À strictement parler, la notion de température de couleur n'a pas de sens dans ce cas. On maintient parfois cependant cette notion (qu'il faudrait appeler rigoureusement *température de couleur proximale*) comme la température de couleur du point le plus proche sur la courbe du corps noir. Il est important de noter que, bien que la différence de teinte entre un blanc froid et un blanc chaud soit significative, tous deux sont effectivement perçus et acceptés comme des blancs par l'humain. Par contre, tout blanc s'éloignant de la courbe du corps noir semble inhabituel et produit un sentiment désagréable (sensation de blanc rosé, blanc verdâtre, blanc jaunâtre). Ceci a un impact sur la nécessité de produire un blanc confortable pour les sources non thermiques (sources à décharge, LED).

2.3 Autres grandeurs énergétiques et photométriques

Pour finir, bien qu'on puisse mathématiquement définir une température proximale de couleur pour une source colorée, il est important de noter que le résultat n'a aucun sens. La température de couleur est là pour qualifier les blancs.

2.3 Autres grandeurs énergétiques et photométriques

Dans les paragraphes précédents, nous avons introduit un ensemble de grandeurs permettant de qualifier et de quantifier la lumière. La puissance rayonnée par une source a été décrite sous la forme d'un flux énergétique ou visible. D'autres grandeurs sont communément utilisées dans le domaine de l'étude et de la mesure de sources de lumière. Ces grandeurs sont diverses déclinaisons du flux et nous allons les décrire brièvement maintenant (elles font l'objet de descriptions exhaustives dans nombre d'ouvrages).

2.3.1 Le flux total, l'efficacité

Le *flux total*, ou *flux*, a été décrit précédemment. Il s'agit de la puissance totale rayonnée par une source de lumière. Ce flux s'exprime en watts, pour les unités énergétiques, et en lumens lorsqu'on s'intéresse à la photométrie. Cette grandeur est importante pour quantifier la quantité de lumière qu'une source est capable de produire.

On la trouve souvent associée à une puissance électrique, sous la forme d'une grandeur reine pour la comparaison de différentes sources de lumière : le lumen par watt (lm/W). En effet, cette grandeur consiste à faire le rapport entre le flux visible d'une source et la puissance électrique qu'elle consomme. Ceci quantifie l'efficacité d'une source : c'est-à-dire sa capacité à assurer son rôle de transformation de l'énergie électrique en énergie lumineuse.

2.3.2 L'éclairement

L'éclairement quantifie le flux issu d'une source de lumière sur une surface réceptrice. Il s'exprime en watts par mètre carré (W/m^2) ou en lux (équivalent de lm/m^2). Cette unité est largement utilisée par les professionnels de l'éclairage puisqu'elle quantifie la lumière qui arrive sur une zone et indique donc « à quel point elle est éclairée ». Ainsi des recommandations sont faites sur l'éclairement des postes de travail dans l'industrie ou le tertiaire, selon les tâches à effectuer.

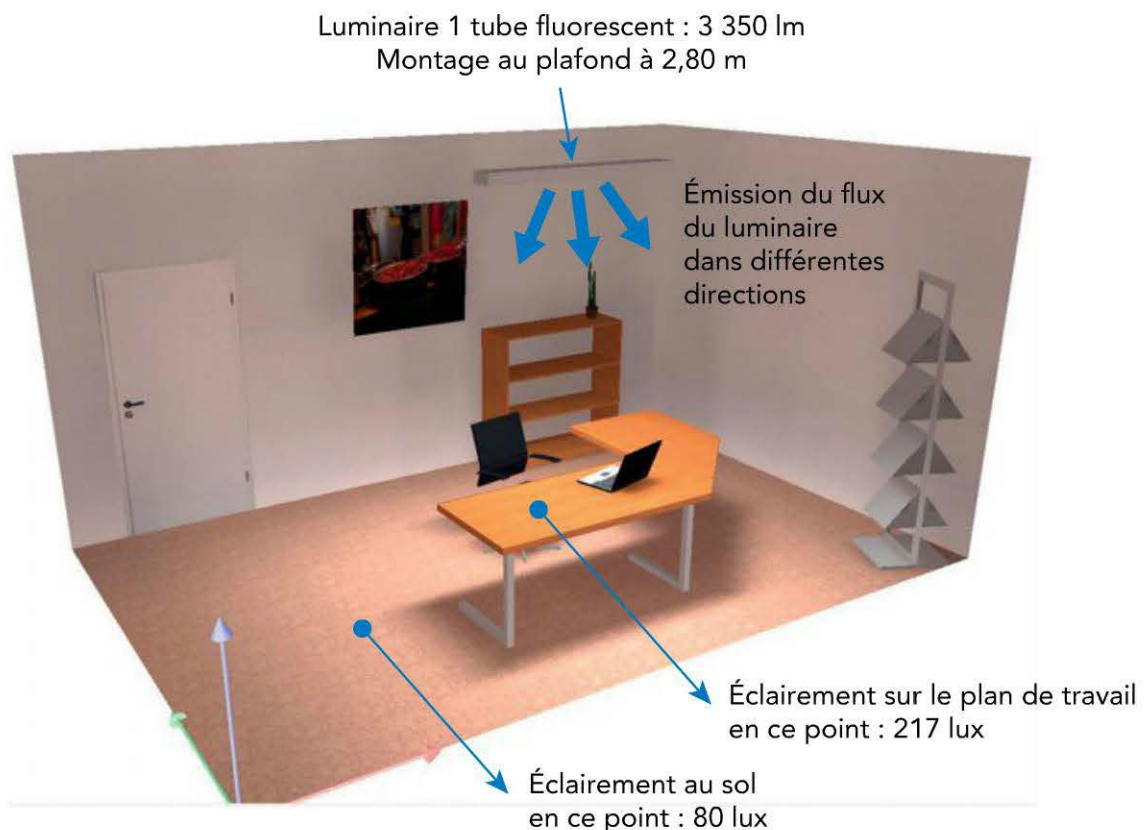


Figure 2.7 – Exemple d'évaluation de grandeurs photométriques dans un projet d'éclairage simple.

2.3.3 La luminance

Cette grandeur est peut-être la plus complexe à comprendre et c'est pourtant une notion qui nous est la plus familière puisque la luminance correspond à « ce qu'on voit ». Elle s'exprime en watts par stéradian et par mètre carré ($\text{lm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) ou en candelas par mètre carré (cd/m^2). Il s'agit du flux émis dans une direction donnée, dans un cône d'ouverture donnée, pour une petite surface émettrice donnée.

Considérons un luminaire en plafonnier à tubes fluorescents. La lumière est émise par toute la surface des tubes, réfléchi par le luminaire, par conséquent chacune de ces surfaces agit comme une source de lumière. C'est ce qu'on entend par surface émettrice. Chacune de ces petites surfaces émettrices rayonne de la lumière dans la direction de notre œil qui en recueille une portion située dans un cône dont l'ouverture est définie par l'ouverture de notre pupille. L'information que l'œil reçoit sur la rétine est donc l'expression directe de la luminance. Cette grandeur est particulièrement importante lorsqu'il s'agit de quantifier le caractère éblouissant d'une source dans son environnement. Elle s'applique bien sûr à tous les types de sources de lumière : les directes (luminaires...) et indirectes (surfaces d'objets...).

2.3 Autres grandeurs énergétiques et photométriques

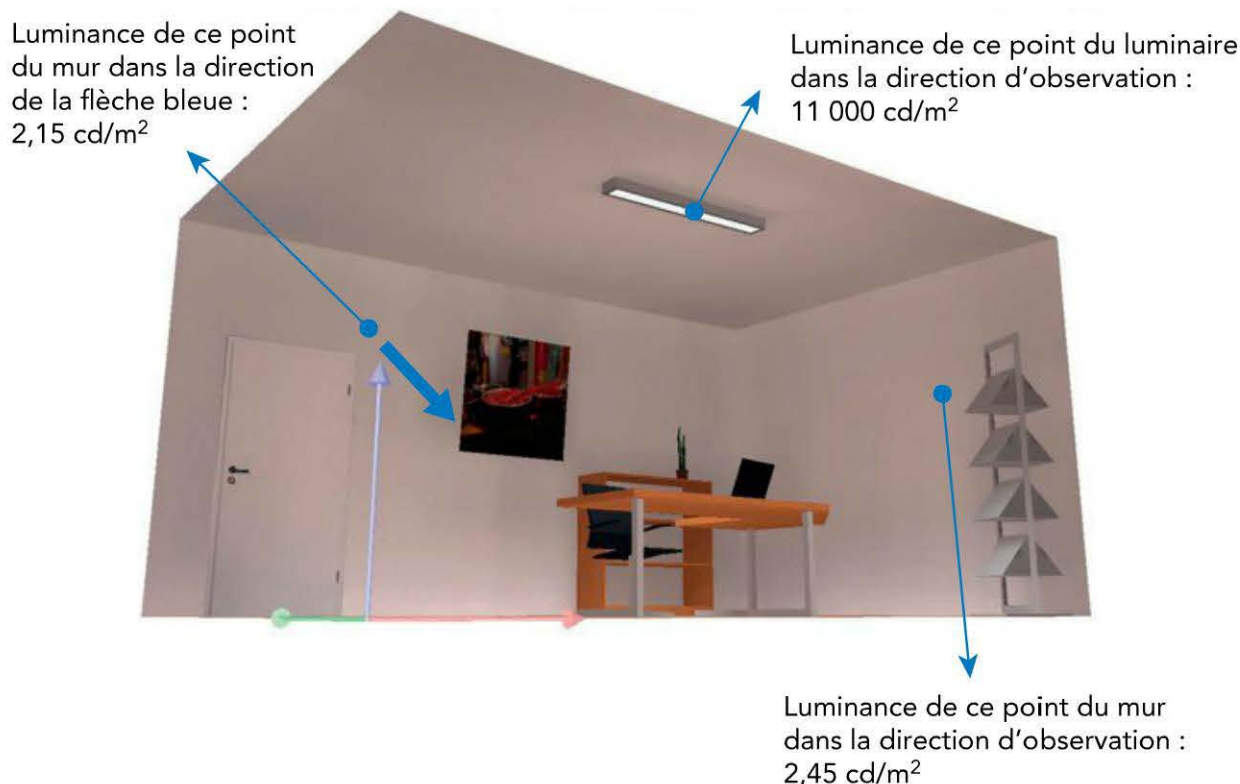


Figure 2.8 – Exemple d'évaluation de luminances dans un projet d'éclairage simple.

2.3.4 L'intensité

L'intensité s'exprime en watts par stéradian (W/sr) ou en candelas (cd, équivalent de lumens par stéradians). À strictement parler, cette grandeur ne concerne que les sources ponctuelles, c'est-à-dire les points lumineux. Il s'agit du flux rayonné dans une direction donnée et dans un cône d'une ouverture donnée. C'est donc l'équivalent de la luminance mais pour une source ponctuelle. Bien que les sources ponctuelles n'existent pas en réalité, on considère souvent qu'une source de lumière réelle, vue d'assez loin (le plafond d'une pièce est souvent considéré comme étant « assez loin ») est une source ponctuelle. Ainsi, on travaille souvent sur l'intensité de luminaires qui ne sont pas ponctuels. Ceci facilite grandement les considérations et calculs, en particulier lorsqu'il s'agit de quantifier l'éclairement produit par une source sur une surface à une certaine distance.

Il est cependant important de noter que les résultats obtenus seraient faux si la surface est trop peu éloignée de la source (il faut considérer environ une distance de 10 fois la plus grande dimension du luminaire). L'intensité est couramment employée pour définir la distribution spatiale du rayonnement d'un luminaire. On trace ainsi un diagramme photométrique d'un luminaire, présentant ses indicatrices.

Les indicatrices sont les graphes des intensités selon l'angle d'observation tracés en système de coordonnées polaires. Elles permettent d'identifier rapidement les spécificités d'un luminaire : directif, symétrique.

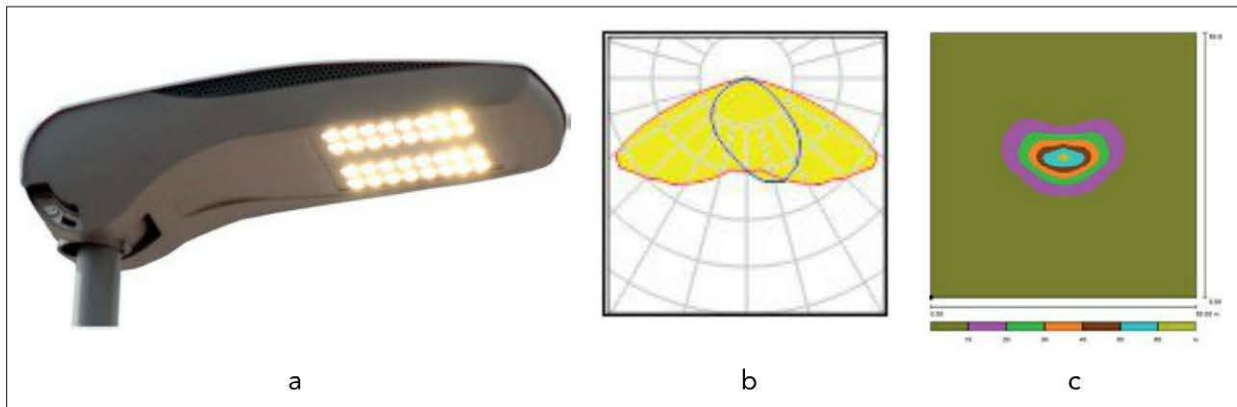


Figure 2.9 – Exemple d'indicatrices d'un luminaire d'éclairage urbain
(a = luminaire d'éclairage urbain ; b = diagramme photométrique ;
c = éclairement obtenu sur une zone de 50 m x 50 m
avec le luminaire placé au centre et monté à 6 m de haut).

2.3.5 Grandeurs énergétiques spectrales

L'ensemble des grandeurs énergétiques mentionnées ci-dessus peuvent se décomposer selon les longueurs d'onde et on peut, pour chacune d'elles, représenter des spectres associés. On parle dans ce cas d'éclairements, luminances, intensités... spectrales et leurs unités respectives sont le $\text{W/m}^2/\text{nm}$, le $\text{W/m}^2/\text{sr}/\text{nm}$ et le $\text{W}/\text{sr}/\text{nm}$.

2.4 Les instruments de mesure

L'une des caractéristiques communes à l'ensemble des instruments de mesure est qu'ils sont sensibles au flux énergétique qu'ils reçoivent. Ils convertissent ainsi un rayonnement reçu en signal électrique.

2.4.1 L'étalonnage

L'élément de base d'un appareil de mesure de l'une des grandeurs mentionnées précédemment est en général une photodiode. Il s'agit d'un semi-conducteur qui a la propriété de convertir des photons incidents en charges électriques. Ces charges sont ensuite comptabilisées (en mesurant un courant par exemple) pour remonter à l'information recherchée. Ainsi, par sa constitution, une photodiode va produire un signal électrique proportionnel au flux incident. Il s'agit ensuite d'établir ce rapport

2.4 Les instruments de mesure

de proportionnalité. C'est ce qu'on appelle l'étalonnage : il s'agit de comparer la valeur du signal électrique obtenu par rapport à la grandeur à mesurer (flux, éclairage, luminance etc...) issues d'une source parfaitement connue et appelée *source étalon*.

Les sources étalon sont généralement des sources de lumière à incandescence. On peut par exemple mentionner les lampes à ruban de tungstène comme étalon de luminance. Cette lampe est dotée d'un ruban de tungstène d'environ 10 mm × 2 mm, chauffé par le passage d'un courant électrique. D'autres lampes étalon existent bien sûr et même des LED étalons sont actuellement en cours de développement.

2.4.2 La mesure de l'éclairement

Il s'agit de la mesure techniquement la plus simple à réaliser. En effet, puisqu'une photodiode produit des charges proportionnellement au flux qu'elle reçoit, dans la mesure où sa surface sensible est définie une fois pour toutes lors de sa fabrication, le signal électrique qu'elle produit est donc également proportionnel à l'éclairement qu'elle reçoit.

Un appareil de mesure d'éclairement, appelé *radiomètre* s'il est destiné à la mesure d'un éclairage énergétique, ou *luxmètre* s'il doit mesurer un éclairage visible, est donc généralement constitué d'une cellule contenant une photodiode, reliée à un boîtier contenant le système électronique de conversion des charges électriques en valeur d'éclairement présentée sur un affichage.

Considérons une source ponctuelle à une certaine distance d'une petite surface sur laquelle on s'attache à calculer le flux. Sans rentrer dans aucune considération mathématique, on imagine bien que le flux reçu par cette surface est maximum lorsqu'on oriente la surface dans la direction de la source, et minimal (nul en fait) lorsqu'on ne présente que la tranche de la surface à la source.

Plus précisément, si on définit l'angle γ comme l'angle entre l'axe passant par la source et le centre de la surface, et un axe perpendiculaire à la surface, l'éclairement s'exprime de la façon suivante :

$$E = \frac{I}{d^2} \cos(\gamma)$$

avec :

- ▶ E : éclairement sur la surface (W/m² ou lux)
- ▶ d : distance entre source et surface de mesure (m)
- ▶ γ : angle entre la direction d'émission de la source et la perpendiculaire à la surface

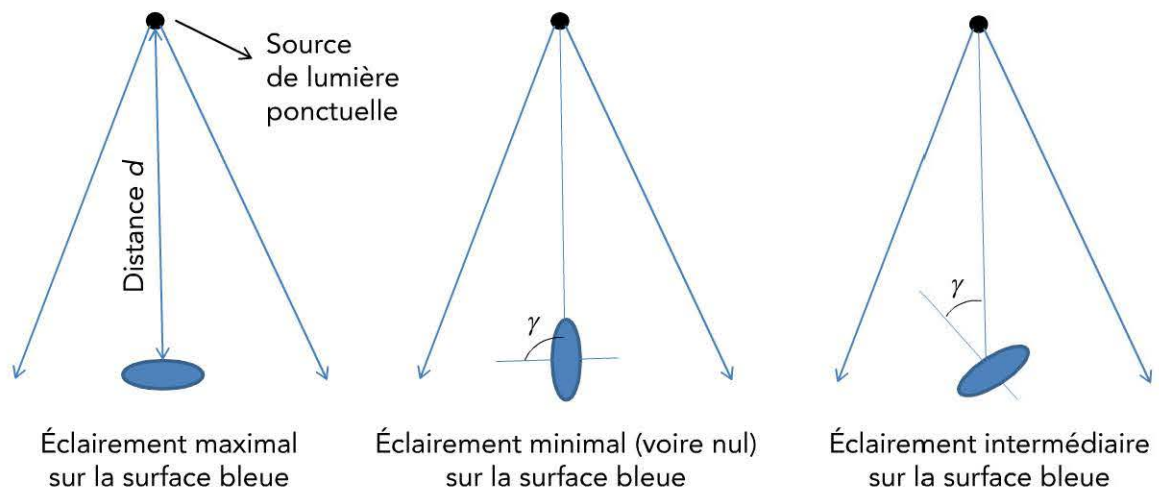


Figure 2.10 – Éclairement sur une surface sous différentes incidences.

Ainsi l'éclairement sur une surface varie selon une fonction cosinus en fonction de son orientation par rapport à la source. Les photodiodes ont un comportement légèrement différent et, pour qu'elles répondent conformément à l'éclairement à mesurer, on les couvre généralement d'un diffuseur qui permet de reproduire la variation mentionnée ci-dessus. Ce diffuseur est appelé *correcteur de cosinus*.



Figure 2.11 – Exemples de luxmètre.

Concernant les luxmètres, il est important de mentionner également que les photodiodes n'ont pas la même sensibilité que l'œil humain selon les longueurs d'onde. Une mesure correcte d'une grandeur photométrique nécessite la correction de cette sensibilité afin qu'elle s'approche au mieux de la fonction $V(\lambda)$. Ceci est réalisé par un ensemble de filtres placés devant la photodiode.

2.4 Les instruments de mesure

Ainsi, si un luxmètre est un système simple dans sa constitution, sa qualité sera conditionnée par le soin apporté dans la conception de son correcteur de cosinus et dans celle des filtres de correction de la sensibilité.

2.4.3 La mesure de l'intensité

Comme il a été mentionné précédemment, l'intensité est une grandeur qui ne s'applique strictement qu'aux sources ponctuelles, qui sont des objets purement théoriques puisque toutes les sources réelles présentent une certaine dimension géométrique. Mais, encore une fois, cette grandeur est pratique pour bien des usages, et on l'obtient généralement par une mesure d'éclairement en utilisant la formule ci-dessous :

$$I = Ed^2 \cos(\gamma)$$

Ceci ne peut être valable que si on se place dans l'approximation de la source ponctuelle, c'est-à-dire que la mesure d'éclairement doit se faire à une distance d'une source de lumière telle qu'on puisse négliger ses dimensions et la considérer comme ponctuelle.

2.4.4 La mesure de luminance

Nous l'avons mentionné précédemment, la luminance, correspond à ce qu'on voit. L'œil est ainsi, entre autres, un dispositif de mesure de luminance. Il va recueillir la luminance de tous les points de son champ de vision et c'est la reconstitution de cette cartographie de luminance qui produit les contrastes et donc l'image. De la même façon, un appareil photo est un dispositif de cartographie des luminances de tous les points d'une scène. Pour être plus précis, une photo en noir et blanc s'approche d'une cartographie de luminance : les luminances des différents points de la scène sont converties en niveaux de gris.

Un luminancemètre classique est généralement constitué d'une photodiode munie d'une optique (un objectif) qui permet de recueillir l'ensemble du faisceau issu de la surface d'une source dans un cône d'émission donné et de le concentrer sur la photodiode. Un luminancemètre est donc souvent doté d'un dispositif de visée qui permet :

- ▶ de pointer un point donné d'une scène dont on cherche à connaître la luminance,
- ▶ de définir une direction de mesure,
- ▶ de délimiter la surface de la source considérée.

De la même façon qu'un luxmètre, un luminancemètre destiné à des mesures photométriques en candélas par mètre carré doit être doté d'une photodiode filtrée de telle sorte que sa sensibilité s'approche de celle de l'œil humain.

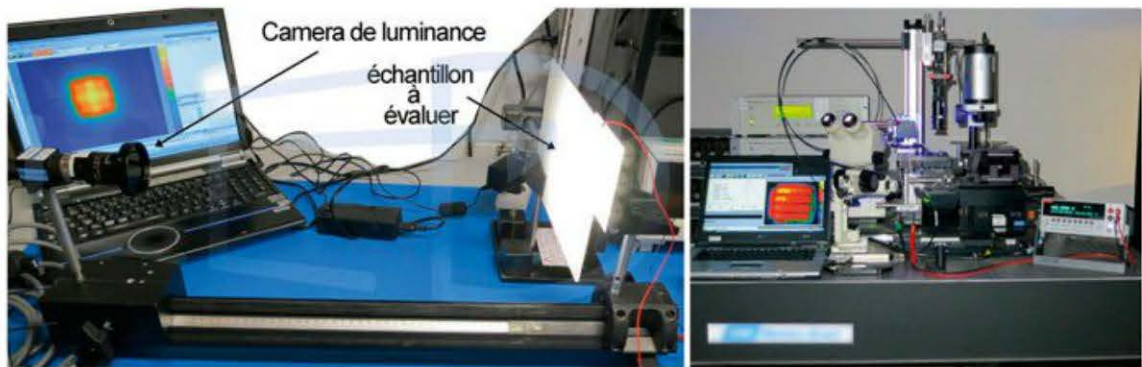


Figure 2.12 – Exemple de luminancemètre.

2.4.5 La mesure de flux

Si le flux est la grandeur la plus simple à comprendre, il s'agit d'une des grandeurs les plus difficiles à mesurer. La difficulté majeure de la mesure réside dans le fait que les sources de lumière traditionnelles émettent leur lumière selon une géométrie d'émission qui leur est propre. Pour prendre l'exemple d'une lampe domestique opalisée, même si elle émet de la lumière approximativement de la même façon dans toutes les directions, son intensité dans la direction de son culot est nulle. Si on cherche à mesurer son flux total rayonné, il faudrait prendre cet élément en compte et mesurer l'intensité qu'elle rayonne dans toutes les directions afin de reconstituer son flux. Ceci se réalise soit de façon directe, par l'utilisation du goniomètre, soit de façon indirecte, en utilisant une sphère intégratrice (ou sphère d'Ulbricht).

Le goniomètre

Un goniomètre est un dispositif mécanique doté d'un détecteur qui permet de mesurer l'intensité émise par une source dans une direction donnée. Cette direction est repérée par deux angles. La mesure consiste à balayer l'ensemble des directions d'émission d'une source de lumière en faisant varier ces deux angles puis à calculer le flux en sommant la contribution dans chaque direction.

La qualité d'une mesure de flux au goniomètre dépend de plusieurs paramètres :

- ▶ Le pas angulaire adopté. En effet, ce pas devra être suffisant pour distinguer les variations brutales d'intensité dans certaines zones angulaires. Cet aspect concerne particulièrement les luminaires directs ;
- ▶ La distance de mesure doit être grande ;
- ▶ La source doit rester immobile dans la mesure du possible. En effet, la position de la lampe conditionne la circulation des courants de convections internes ou externe. La température interne ou externe de la source est ainsi modifiée, ce qui, pour certaines sources, a un impact significatif sur le rayonnement ;

2.4 Les instruments de mesure

- ▶ Le détecteur ne doit recevoir que l'intensité directe issue de la source et toute réflexion contre les murs de la pièce par exemple doit être évitée.

Si elles sont bien réalisées, les mesures goniométriques sont fiables mais présentent les inconvénients suivants :

- ▶ elles sont longues à réaliser : un hémisphère couvert avec un pas angulaire de 5° correspond à 1297 directions pour chacune desquelles il faut effectuer une mesure d'intensité ;
- ▶ elles nécessitent l'utilisation de systèmes mécaniques précis et de grandes dimensions ;
- ▶ elles doivent être réalisées dans une pièce de grandes dimensions.

Les mesures goniométriques nécessitent donc un investissement conséquent et des infrastructures adaptées.

La sphère intégratrice

Considérons une sphère creuse dont la paroi interne est couverte d'un revêtement parfaitement diffusant (figure 2.13). On entend par revêtement parfaitement diffusant un matériau qui, éclairé, va réémettre la lumière de façon identique dans toutes les directions.

Imaginons maintenant qu'on perce un tout petit trou dans cette sphère et qu'on y fasse passer le faisceau d'un laser. Un faisceau laser a une propriété intéressante pour cet exemple, il transporte une puissance identique quelle que soit la distance à laquelle on la mesure. Donc en réalité, dans notre cas, on vient introduire un flux fixé à l'intérieur de la sphère.

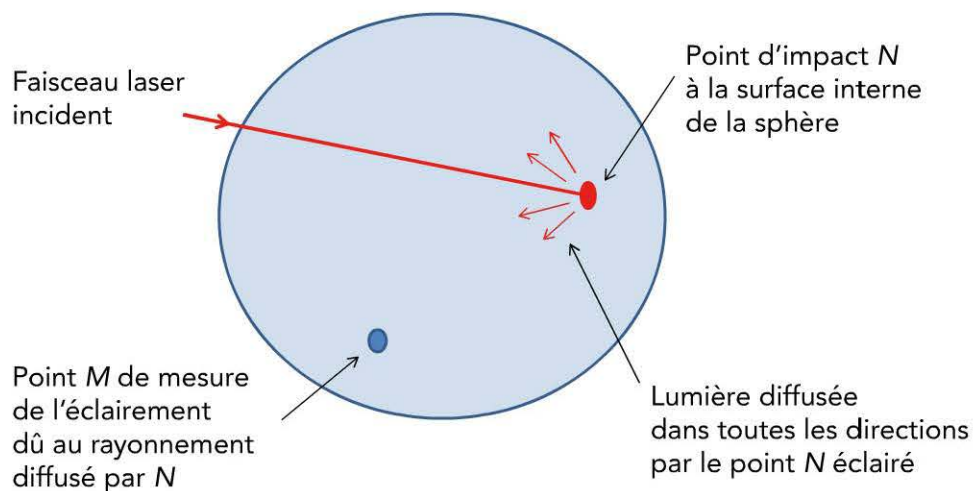


Figure 2.13 – Cas d'un seul faisceau laser incident dans une sphère intégratrice.

Le point d'impact du laser, que nous appellerons N, va réémettre la lumière incidente dans toutes les directions. En un point M, de l'intérieur de la sphère, ce rayonnement va générer un éclairement égal à :

$$E_M = \phi \frac{\lambda}{S} R$$

avec :

- ▶ E_M : éclairement au point M (visible ou énergétique) ;
- ▶ ϕ : flux (visible ou énergétique) ;
- ▶ S : surface interne de la sphère (m^2) ;
- ▶ R : constante liée aux propriétés du revêtement diffusant (sans unité) ;
- ▶ λ : longueur d'onde (nm).

Cette formule montre une propriété particulièrement intéressante : elle n'implique aucunement la position du point M. Donc elle est valable quel que soit le point M choisi. En d'autres termes, si on mesure l'éclairement indirect produit par l'illumination du point N en n'importe quel point M de la sphère, on obtient le même résultat. Qui plus est, la valeur de l'éclairement obtenue est proportionnelle au flux du laser incident.

On commence à entrevoir la propriété importante de la sphère telle qu'on l'a décrite : en un point de la sphère éclairé indirectement, la valeur de l'éclairement est proportionnelle au flux de la source.

Un autre constat à réaliser sur cette formule est qu'aucune hypothèse n'est faite sur la position du point N. En d'autres termes, la valeur d'éclairement mesurée en un point M, fixé, reste la même si on bouge le faisceau laser et qu'on éclaire un autre point de la sphère. Donc si maintenant on vient faire passer dans notre petit trou deux faisceaux lasers qui viennent éclairer deux points N_1 et N_2 distincts, la valeur de l'éclairement recueillie en M sera proportionnelle à la somme des flux incidents des deux lasers.

On va donc considérer maintenant une source de lumière réelle, placée à l'intérieur de la sphère. Cette source va émettre dans toutes les directions des rayons lumineux qui vont éclairer les points de la sphère, de la même façon que nos lasers dans l'exemple précédent. Par conséquent, l'éclairement indirect mesuré en un point quelconque de la sphère sera proportionnel au flux de la source.

Nous arrivons ainsi à la propriété essentielle de la sphère intégratrice : une seule mesure d'éclairement indirect permet d'obtenir une valeur proportionnelle au flux de la source de rayonnement. Ce coefficient de proportionnalité peut être obtenu par étalonnage et la sphère intégratrice permet ainsi la mesure absolue du flux énergétique ou visible.

2.4 Les instruments de mesure

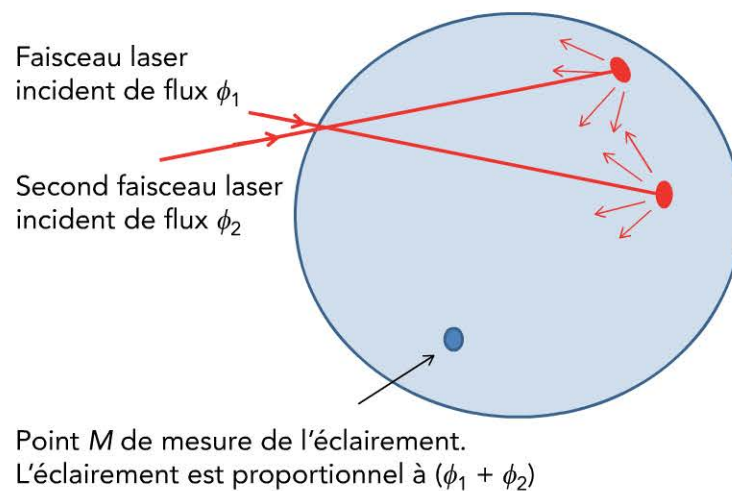


Figure 2.14 – Cas de deux faisceaux laser incidents dans une sphère intégratrice.

On voit ici l'intérêt considérable de la sphère intégratrice par rapport au goniomètre : après étalonnage, une seule mesure permet de déterminer un flux. Cependant, la théorie de la sphère brièvement introduite ici est souvent difficile à mettre en œuvre dans la pratique.

Nous rappelons ici les hypothèses fondamentales qui permettent d'obtenir la propriété importante précédente :

- ▶ Forme sphérique du système de mesure ;
- ▶ Parois internes parfaitement diffusantes ;
- ▶ Éclairement indirect recueilli.

Si les deux premières hypothèses sont souvent réunies la dernière est la plus problématique. En effet, recueillir l'éclairement indirect à la surface interne de la sphère nécessite d'éliminer le rayonnement direct de la source. Ceci se réalise avec un cache qui masque la source du point de vue du détecteur. Cependant, ce cache masque également une certaine proportion de la sphère qui n'est plus « vue » par le détecteur et qui ne contribue donc pas au rayonnement indirect. Le flux mesuré dans ces conditions sera donc sous-estimé.

Ainsi, plus la source de lumière sera de grandes dimensions, plus le cache devra être grand et plus l'erreur de mesure sera importante. Pour limiter cette erreur, il faut minimiser la proportion de surface de sphère masquée par le cache, et donc augmenter le diamètre de la sphère. Ceci explique pourquoi une sphère doit avoir un diamètre bien plus grand que les dimensions de la source à mesurer (cf. figure 2.15).

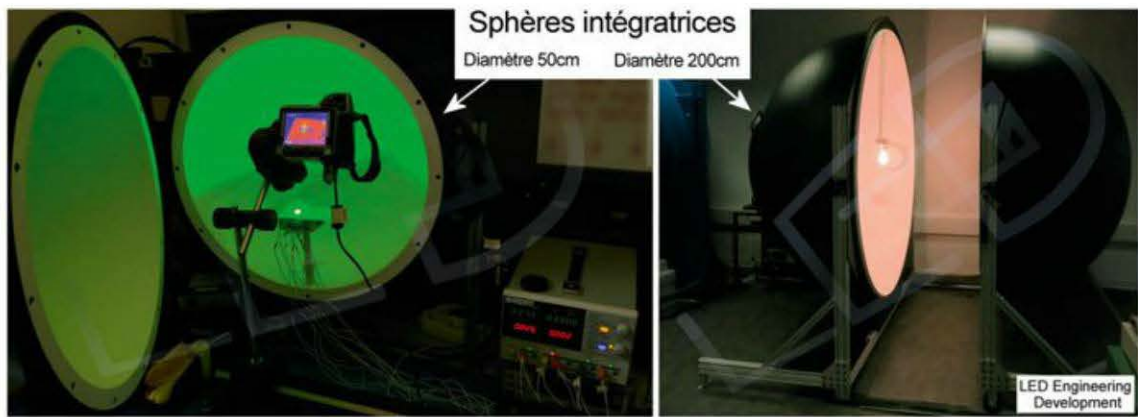


Figure 2.15 – Sphères intégratrices de différents diamètres (adaptées aux dimensions des sources à mesurer).

D'autres éléments viennent perturber les hypothèses fondamentales de la sphère intégratrice et donc rendre les mesures délicates. On ne mentionnera ici que la présence de la source elle-même dans la sphère qui absorbe une partie du rayonnement qu'elle émet. Des techniques permettent de limiter l'impact des éléments perturbateurs mais d'une façon générale, la sphère intégratrice est un système complexe à mettre en œuvre et qui nécessite un étalonnage soigné et une grande rigueur dans les mesures.

3

Comment fonctionne une LED ?

Les LED sont avant tout des diodes. Ce chapitre explique comment sont constitués ces composants et comment ils fonctionnent.

L'émission de lumière blanche a été un premier défi à relever. Une fois cette étape franchie, il a fallu optimiser les procédés d'extraction de la lumière et de dissipation de la chaleur.

3.1 De quoi se compose une LED ?

Les LED ont été considérées dès le départ comme des composants électroniques « standard », pour lesquels les règles habituelles du monde de l'électronique pouvaient être appliquées sans grand changement. Cette façon de voir provient essentiellement du fait que le boîtier des LED était robuste et qu'il n'obligeait pas à se préoccuper des phénomènes thermiques qui étaient de faible puissance.

À la fin des années 1990, les performances ont évolué et les LED sont devenues « multitechnologies ». Il a fallu concevoir des boîtiers plus complexes constitués de différents types de matériaux (résines dures, silicone, métaux...), construits selon différentes méthodes (collage à froid, ou à haute température, ou avec des UV...). De même, les connexions électriques ont fait appel à différents moyens de soudure (*ball bonding* pour les LED à structures verticales, et microbilles pour les LED de type *flip chip*).

La figure 3.1 illustre ce propos et montre un support en céramique (gris) sur lequel est brasée la puce semi-conductrice (et son substrat en carbure de silicium), une bague en métal (identifiée ici comme « boîtier ») sur laquelle est déposée une lentille de verre, scellée avec un matériau d'encapsulation qui protège également la puce semi-conductrice.

Dans cet exemple, la connexion électrique entre la puce semi-conductrice et l'extérieur du boîtier de la LED se fait par deux fils d'or soudés (méthode du *wire bonding*).

en or). Dans d'autres cas, la connexion électrique de la jonction se fait par l'intermédiaire de microbilles (boîtier de type BGA en électronique plus conventionnelle) qui servent à dissiper la chaleur dégagée par la jonction vers l'arrière du boîtier de la LED.

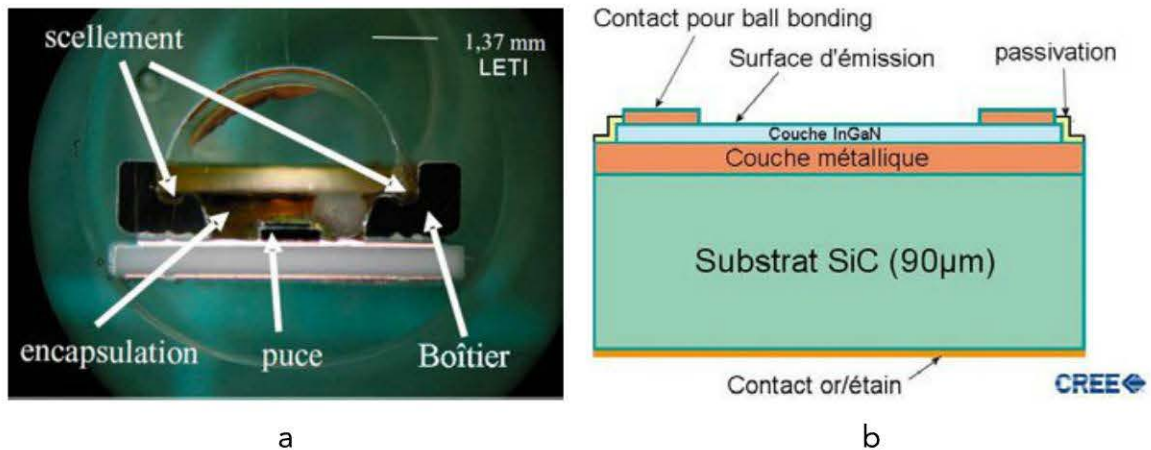


Figure 3.1 – a) Coupe d'une LED du fabricant CREE de type XRE (LETI).
b) Schéma de principe d'un semi-conducteur monté sur son substrat.

3.1.1 Le semi-conducteur

Description générale

Le principe de fonctionnement, rapidement abordé dans le chapitre 1, est maintenant présenté avec de plus amples détails.

Les semi-conducteurs émissifs ont un mode de fonctionnement très proche de celui des semi-conducteurs standard (c'est-à-dire non émissifs comme les diodes Zener, les transistors, etc.).

Les principales différences portent principalement sur trois points :

- ▶ le type de matériau utilisé ;
- ▶ le dimensionnement mécanique des différentes couches des matériaux ;
- ▶ l'architecture d'empilement des différentes couches (réflecteurs supplémentaires, alimentation électrique à des endroits plus adéquats, matériaux conducteurs transparents pour le passage de la lumière).

Le choix du semi-conducteur et celui de sa mise en œuvre se font donc principalement en fonction des trois points cités ci-dessus auxquels s'ajoutent d'autres paramètres qui interviennent également mais de façon moins capitale comme :

- ▶ la surface du semi-conducteur ;
- ▶ la qualité du dopage (tolérances) ;

3.1 De quoi se compose une LED ?

- ▶ la gestion thermique (par une architecture mécanique évoluée).

Les matériaux se classent en trois grandes catégories en fonction de leur aptitude à conduire le courant :

- ▶ les matériaux isolants ;
- ▶ les matériaux semi-conducteurs ;
- ▶ les matériaux conducteurs.

Ces trois types de matériaux sont présents à l'intérieur des LED et, sans entrer dans le détail de leurs propriétés, nous décrirons simplement les phénomènes physiques qui nous permettront de bien comprendre leur rôle et le principe de fonctionnement des LED.

Les matériaux isolants

Ils ont la particularité de posséder un grand écart énergétique entre la bande de valence et la bande de conduction (figure 3.2). De ce fait, aucun électron même excité fortement ne peut atteindre un niveau d'énergie supérieur, et *a fortiori* en redescendre en émettant de l'énergie (qui sera le plus souvent pour nous l'émission de photons).

Les matériaux semi-conducteurs

Ils sont constitués d'un composant majoritaire auquel s'ajoute un composant différent en très faible quantité (dopage) qui leur confère des propriétés de conduction différentes. En effet, en apportant une certaine quantité d'énergie (variable suivant les semi-conducteurs, figure 3.2), certains électrons peuvent passer dans un état d'excitation supérieur.

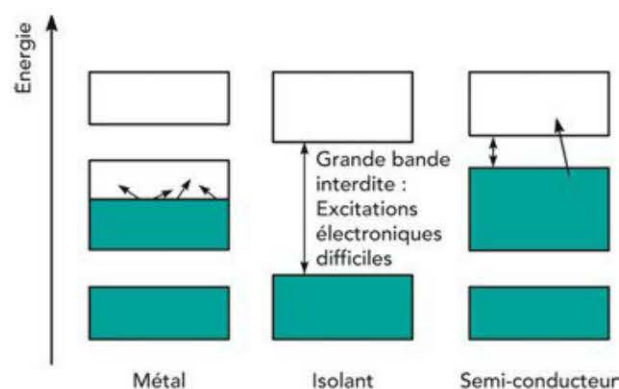


Figure 3.2 – Bandes de conduction et de valence.

En revenant à l'état d'excitation d'origine, les électrons restituent alors, sous différentes formes, l'énergie correspondant à la différence entre les deux niveaux d'énergie.

Les matériaux conducteurs

Ils permettent d'effectuer les contacts et donc d'alimenter le semi-conducteur qu'il faut exciter pour émettre de la lumière.

Principe d'émission

Pour décrire le processus de production des photons en reprenant le descriptif des matériaux semi-conducteurs de la figure 3.2, nous voyons qu'un retour à l'état d'excitation initial de l'électron entraîne une production d'énergie qui se matérialise pour les LED par l'émission de lumière (autrement dit par l'émission de photons).

Cette émission de photons est le résultat de la recombinaison électrons/trous (figure 3.3) et nous verrons plus loin les propriétés de cette énergie lumineuse (longueur d'onde, puissance...).

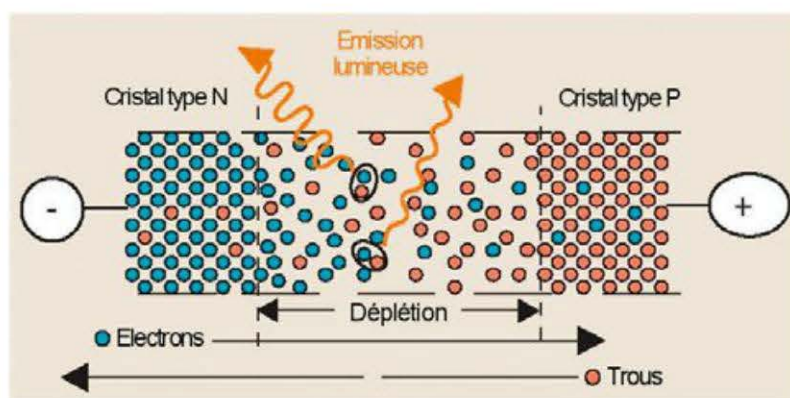


Figure 3.3 – Recombinaison électron/trou : émission lumineuse.

Pour que la lumière émise puisse être utilisée, il faut que l'émission ait lieu dans un milieu le plus transparent possible (d'où les développements importants dans les années 2000 pour améliorer la transparence des électrodes des jonctions).

Enfin, la nature de la lumière (essentiellement sa couleur) dépendra du type de semi-conducteur choisi.

Choix des matériaux

Selon le matériau utilisé et selon le dopage choisi, les propriétés optiques du semi-conducteur sont différentes. En effet, le seuil d'énergie entre la bande de valence et la bande de conduction va influencer sur l'énergie des photons émis et par conséquent sur la longueur d'onde de la lumière émise (figure 3.4a).

3.1 De quoi se compose une LED ?

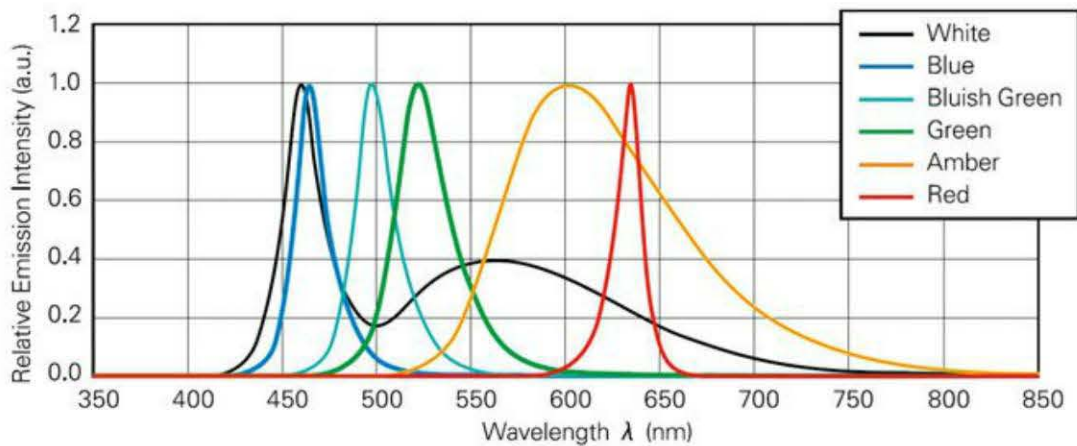
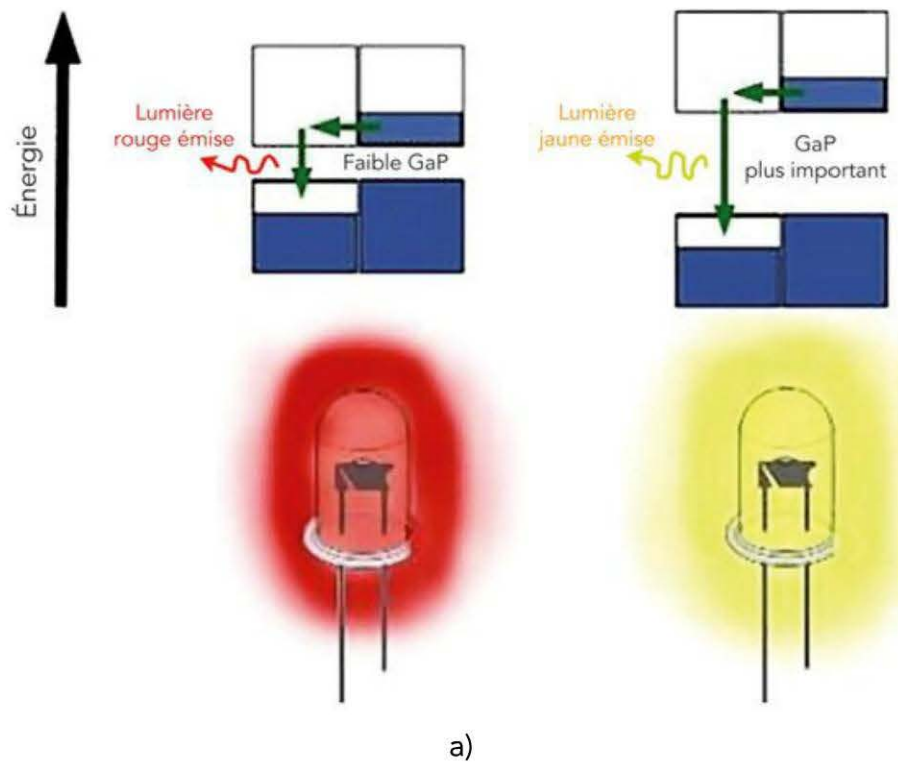


Figure 3.4 – a) Émissions différentes suivant l'écart entre bande de valence et bande de conduction. b) Spectres d'émission de LED de couleur du fabricant Nichia.

Nous pourrions alors, dans une certaine mesure, produire des semi-conducteurs qui émettent des longueurs d'onde déterminées (et donc des couleurs différentes).

Néanmoins, même si les récentes améliorations, tant sur le plan de la qualité des dopages que sur celui des processus de fabrication des semi-conducteurs, nous ont permis d'améliorer les performances (précision sur la longueur d'onde, efficacité lumineuse, largeur de bande à mi-hauteur), il faut préciser que les processus de

fabrication actuels ne permettent pas encore de produire des semi-conducteurs avec des longueurs d'onde très précises (quasi monochromatiques comme pour les lasers) ou bien, à l'opposé, à large bande spectrale. Ils ne permettent pas non plus de fabriquer des LED qui émettent sur tout l'ensemble du spectre visible. On peut préciser par exemple que les longueurs d'onde comprises entre 465 nm et 500 nm sont difficiles à atteindre pour les semi-conducteurs du commerce.

Cette quasi-monochromaticité des LED (largeur de spectre d'émission faible – figure 3.4b) est un problème pour les applications d'éclairage. La méthode couramment utilisée pour créer du blanc utilise néanmoins l'aspect monochromatique de ces composants. En effet, le luminophore qui recouvre le semi-conducteur absorbe en partie la radiation bleue émise par ce dernier et réémet du jaune. La part de bleu non absorbée et mélangée avec le jaune réémis forme un blanc reconstitué.

De façon générale, les semi-conducteurs ont une largeur de bande à mi-hauteur de l'ordre de 20 à 40 nm (largeur spectrale faible – figure 3.4b). Nous discuterons plus loin de cette largeur de bande qui peut avoir une incidence importante sur l'application utilisant les LED considérées.

Ainsi, suivant la radiation que l'on désire émettre (couleur) ou la puissance lumineuse, on choisit le type de semi-conducteur ou/et le type de dopage (figure 3.5).

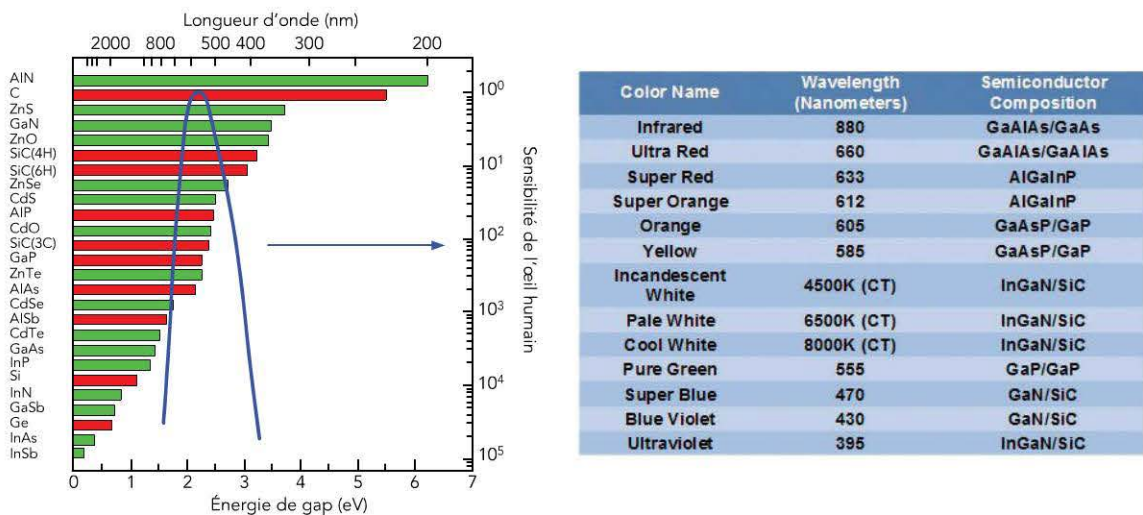


Figure 3.5 – Types de semi-conducteurs selon l'énergie ou la couleur (Nichia).

De la même manière, l'adéquation entre différents types de semi-conducteurs émettant dans le bleu et différents types de luminophores donnera des spectres de lumière blanche de caractéristiques très différentes.

3.1 De quoi se compose une LED ?

3.1.2 Le substrat

Description générale

Le substrat constitue le socle sur lequel le semi-conducteur est fabriqué (figure 3.1). Cette fabrication se fait par dépôts successifs de matériaux semi-conducteurs dopés différemment suivant le type de LED à réaliser.

Idéalement, le substrat devrait être constitué du même matériau que le semi-conducteur pour éviter la création de défauts de structure lors de l'épithaxie. Malheureusement, on ne sait pas construire facilement des substrats en GaN ; par conséquent, on utilise d'autres types de matériaux qui possèdent des propriétés différentes et surtout des paramètres de maille cristallographiques différents (tailles et formes des mailles du cristal). Ce sont ces défauts induits dans le semi-conducteur qui vont limiter ses performances notamment en termes de durée de vie. Pire, les effets thermiques accentuent et propagent ces défauts dans le semi-conducteur. C'est pour ces raisons que la connaissance de la technologie employée dans la conception d'une LED est primordiale pour en évaluer la qualité.

Types et performances des substrats

La puce semi-conductrice (constituée du semi-conducteur de type GaAlAs, AlGaInP, GaAsP, GaN ou InGaN suivant le type d'émission souhaité) doit être mise en œuvre de telle sorte qu'elle puisse dissiper sa chaleur convenablement au sein de la LED. Pour cela, la conductivité thermique du substrat sur lequel elle est fabriquée est primordiale.

De plus, ce substrat doit posséder des propriétés cristallographiques les plus proches possible de celles du semi-conducteur afin d'assurer une continuité des liaisons interatomiques (figure 3.6) et ainsi limiter les écarts de dilatation entre matériaux lors du processus d'hétéro-épithaxie, qui sont en partie à l'origine des défauts du semi-conducteur (notamment les dislocations).

Substrat en saphir

Le saphir est le substrat le plus utilisé, essentiellement à cause de son faible coût (un *wafer* en saphir peut coûter jusqu'à 2 à 3 fois moins cher qu'un *wafer* en carbure de silicium).

Sa conductivité est très moyenne (autour de 46 W/m.K) et son paramètre de maille diffère de près de 15 % de celui du GaN. C'est cet écart qui induit des défauts et diminue la robustesse du couple semi-conducteur / substrat et, par voie de conséquence, limite les performances des LED utilisant ce procédé.

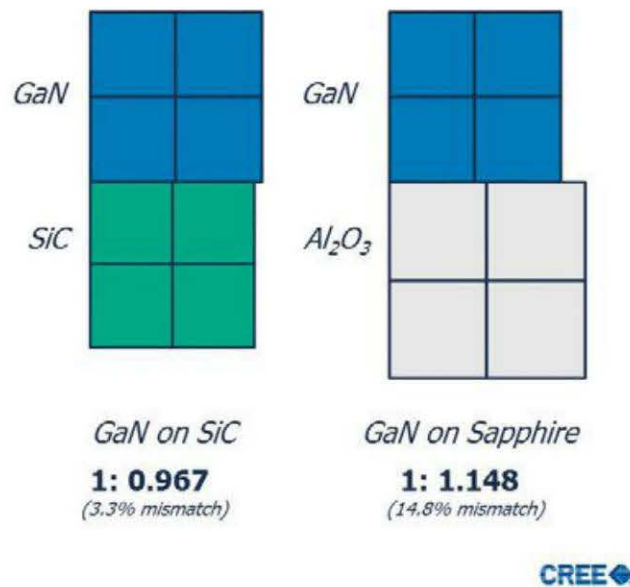


Figure 3.6 – Paramètre de maille du semi-conducteur GaN sur les deux principaux substrats utilisés : saphir et carbure de silicium (CREE).

Substrat en carbure de silicium

C'est l'un des matériaux les plus proches du GaN en termes de paramètre de maille. Plus cher que le saphir, il est aussi meilleur conducteur de chaleur avec une conductivité de 120 W/m.K.

Autres types de substrats

Depuis peu, des substrats tels que le silicium sont en phase de test et des produits commerciaux en volume seront disponibles dès la fin de l'année 2012.

D'autres développements encore se font à base de diamants synthétiques (Sinodiamond) avec des premiers produits de série arrivés sur le marché fin 2011.

Ces nouvelles techniques sont intéressantes et méritent notre attention, il faut cependant que les produits concernés passent tous les tests de fiabilité habituels et qu'ils fassent leurs preuves.

3.1.3 Alimentation du semi-conducteur

Description générale

Les années 2000 ont vu apparaître un nouveau mode d'alimentation des semi-conducteurs : l'alimentation par microbilles. L'inventeur de cette technologie, la société Philips Lumileds, a mis en avant la fiabilité de ce type d'alimentation par rapport à l'alimentation plus « traditionnelle » à base de fils d'or de diamètre de

3.1 De quoi se compose une LED ?

20 à 40 μm . Nous allons décrire ces deux techniques ainsi qu'une troisième, née au début des années 2010 en laboratoire et nommée *direct attach* par son concepteur, le fabricant CREE.

Alimentation par fil d'or

Ce mode d'alimentation est ancien (il a plus de trente ans d'existence) et bien maîtrisé. Il est utilisé dans de nombreux domaines de la microélectronique et peut être mis en œuvre essentiellement suivant deux méthodes : le *ball bonding* ou le *edge bonding*.

Les fils d'or utilisés pour le câblage ont généralement un diamètre de 20 à 40 μm et, suivant la technologie de la puce semi-conductrice, un, deux ou quatre fils sont nécessaires pour réaliser la connexion (figure 3.7).

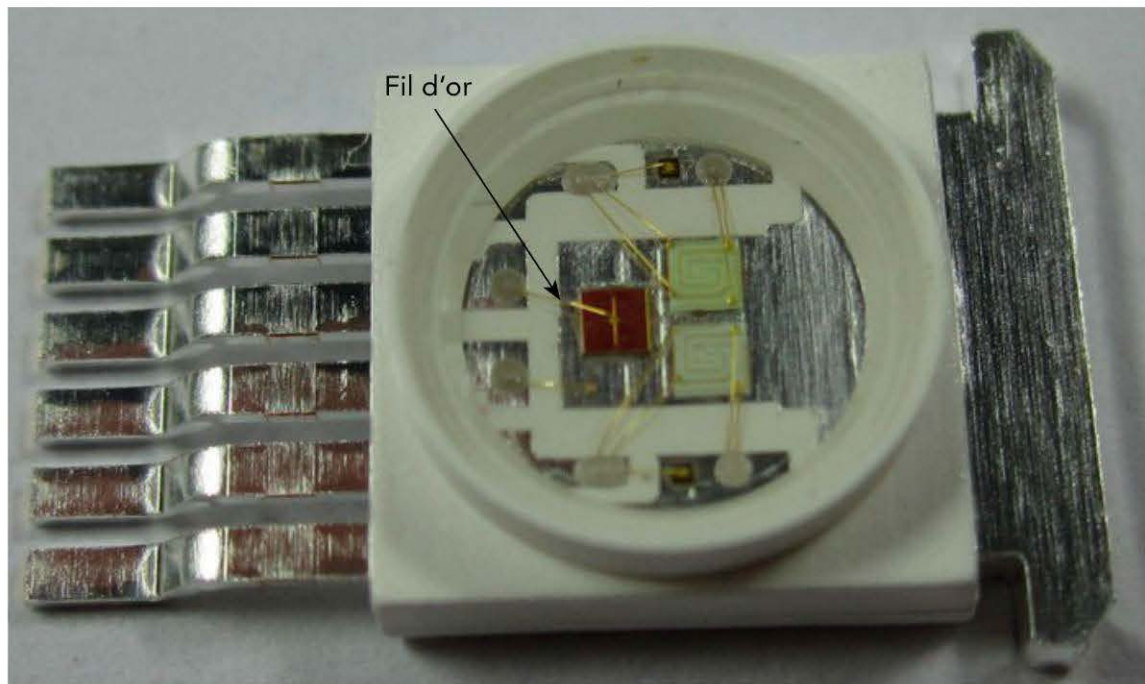


Figure 3.7 – LED RGB Avago.

En ce qui concerne le câblage des LED, c'est le *ball bonding* qui est principalement utilisé (figure 3.8). Il est réalisé à température modérée (entre 100 et 150 °C) par un capillaire très fin qui crée une microbille au bout du fil d'or utilisé par ultrason.

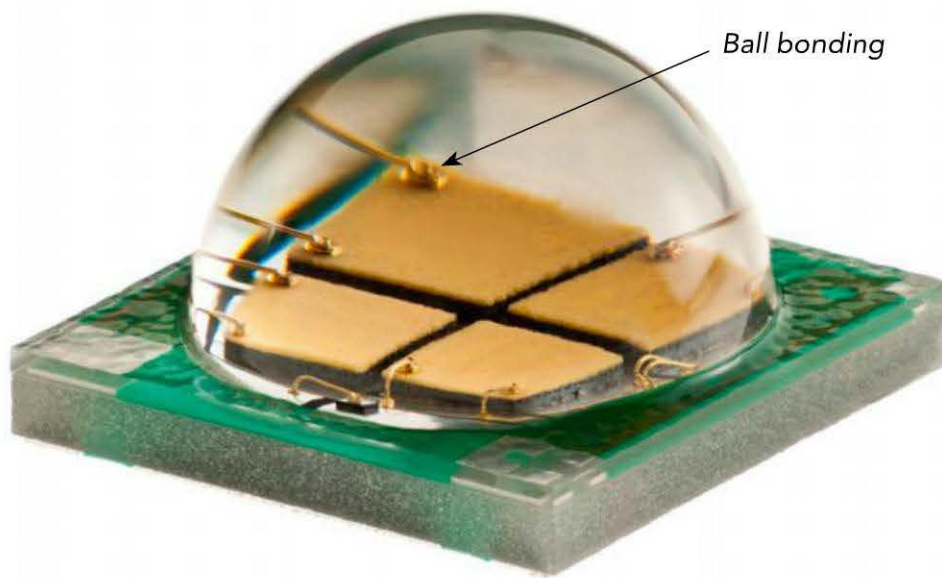


Figure 3.8 – LED multipuce de CREE (modèle XM-L_EZW_Easy-White).

Alimentation par microbille

Dans le cas où le processus de fabrication intègre une étape consistant à retourner la puce semi-conductrice et à la fixer à l'aide de ces microbilles qui assurent à la fois la conduction électrique et la conduction thermique (figure 3.9), on appelle cette puce *flip chip*.

La société Philips Lumileds a été le pionnier pour lancer ce type de technologie, puis l'a amélioré en y ajoutant des films fins (TFFC – *Thin Film Flip Chip* – cf. [65]).

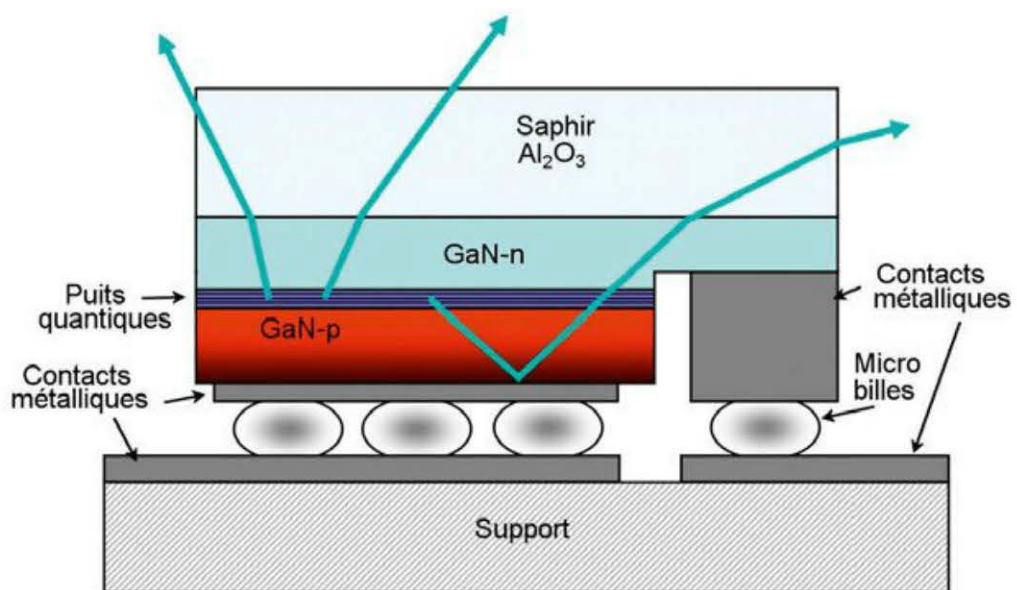


Figure 3.9 – Semi-conducteur de type *flip chip*.

3.1 De quoi se compose une LED ?

Nouveau type d'alimentation : *direct attach*

Cette méthode est récente : elle a été développée en laboratoire courant 2008-2010 et mise sur le marché en bêta test fin 2011. Elle repose sur un contact direct à partir du bord de la puce et élimine les problématiques potentielles liées aux fils d'or.

3.1.4 Le boîtier mécanique

Remarques préliminaires

Les premières LED hébergeaient le semi-conducteur au creux d'un réflecteur (figure 3.10) qui, dans le cas des LED blanches, était rempli d'un mélange de lumino-phore et de résine (permettant d'agglomérer ce luminophore). Au début des années 2000, les boîtiers étaient constitués pour la plupart d'une résine dure. Aujourd'hui, nous nous orientons vers des boîtiers céramiques.

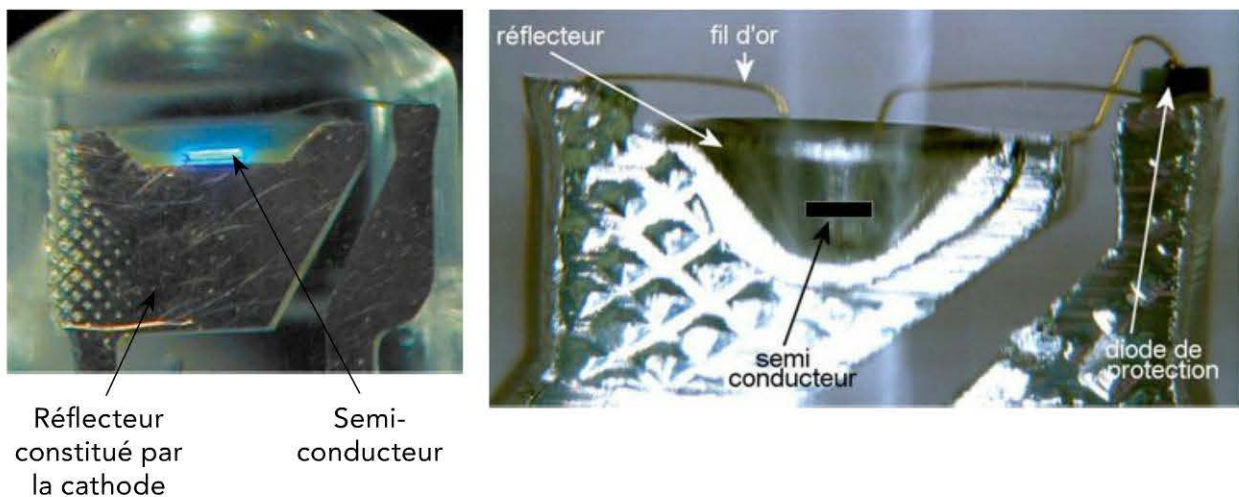


Figure 3.10 – LED de type 5 mm.

Les types de boîtiers

Le packaging d'une LED est la mise en œuvre mécanique de tous les éléments qui la constituent (nous traiterons les lentilles primaires à part). L'une des contraintes du packaging est de parvenir à évacuer le maximum de la chaleur issue de la puce semi-conductrice. Cela se fait d'abord grâce à l'amélioration du contact thermique entre la puce et les pattes d'alimentation, puis en multipliant le nombre de pattes d'alimentation faisant évoluer les boîtiers traditionnels « 5 mm » vers les boîtiers de type « Piranha » (figures 3.11a et 3.11b).

3. Comment fonctionne une LED ?

Puis sont apparus les « pad » thermiques, isolés électriquement ou non, offrant un bon transfert thermique entre le cœur de la LED et son boîtier extérieur (figures 3.11c et 3.11d).

Enfin, la génération des boîtiers céramiques (figures 3.11e et 3.11f) tend à se généraliser maintenant et profite des développements techniques antérieurs (« pad » thermique, type d'alimentation) pour apporter de meilleures performances thermiques notamment en termes de moindre différence de dilatation entre les matériaux constituant la LED ou encore lors de leur utilisation en environnement sévère.

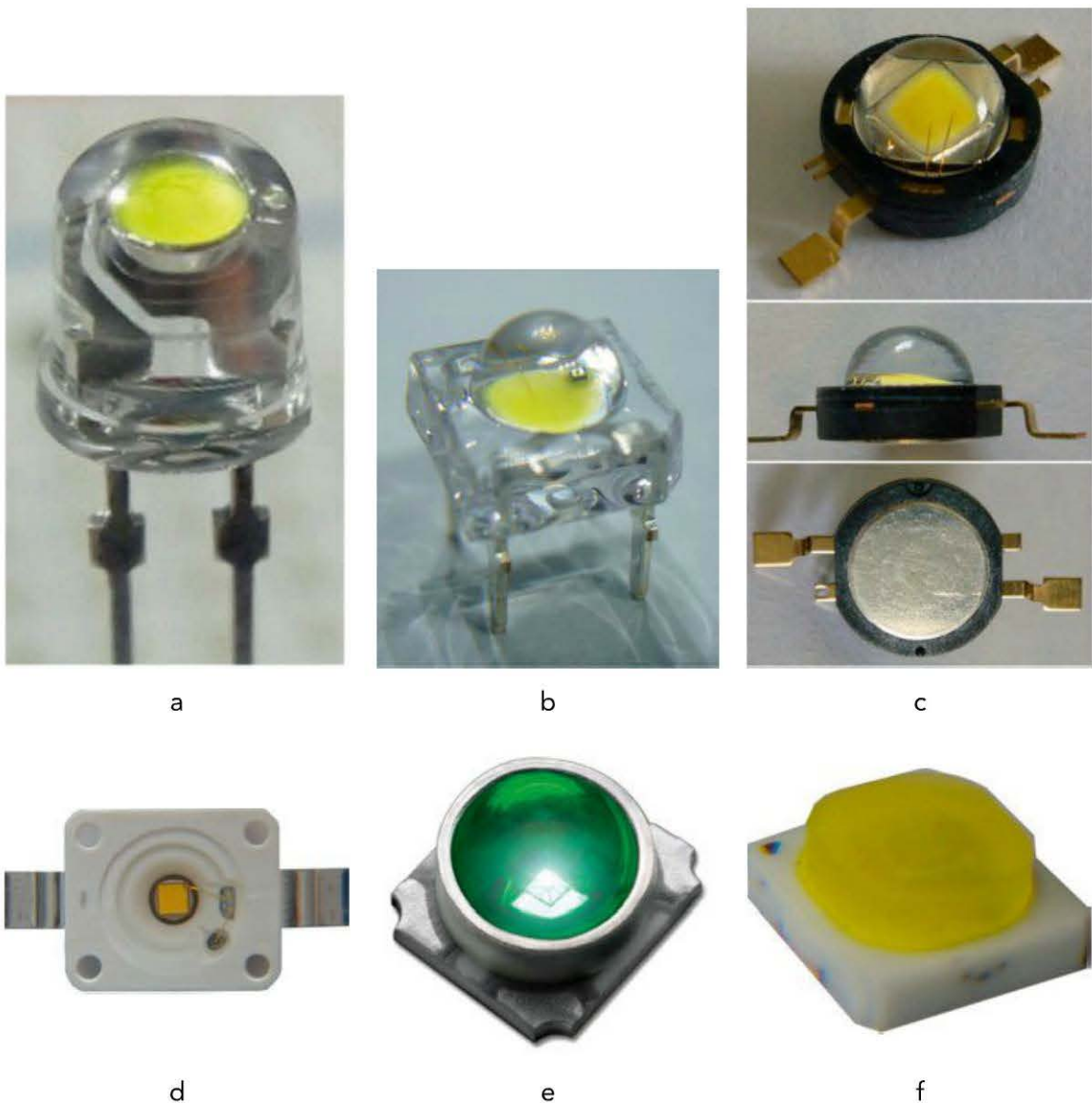


Figure 3.11 – Évolution du boîtier des LED.

3.1 De quoi se compose une LED ?

3.1.5 Le luminophore

Rappel historique

Le luminophore concerne essentiellement les LED blanches (exception faite d'une technologie relativement récente, développée par Philips Lumileds, le *PC amber*).

L'utilisation du luminophore pour la fabrication de lumière blanche est ancienne et d'ailleurs Nichia, l'un des leaders mondiaux dans la fabrication de LED, fut avant tout un fabricant de luminophore pour l'industrie des tubes fluorescents. C'est entre autres pour cette raison que ce fabricant de LED maîtrise cette technologie et atteint des performances en flux lumineux et en qualité colorimétrique parmi les meilleures du marché.

Le chapitre 6 décrira plus en détail le principe de fonctionnement du couple semi-conducteur / luminophore ainsi que les différents types de luminophores présents sur le marché.

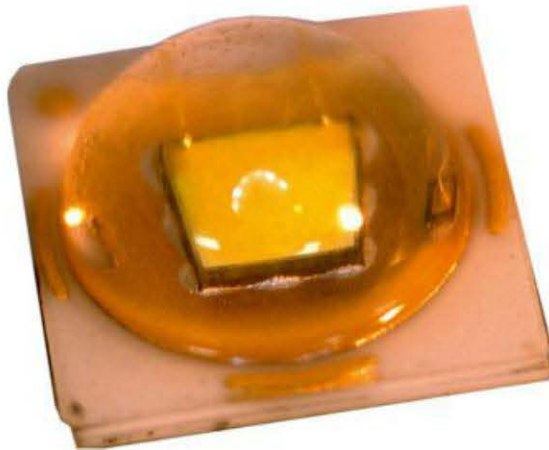
Présentation simple du phénomène physique

Le principe est le suivant : une puce semi-conductrice émet une radiation bleue (autour de 450 nm) dont une partie est absorbée par le luminophore le plus souvent directement en contact avec la puce. Le luminophore réémet alors quasi instantanément une lumière « jaune » (lumière à large spectre contenant en grande partie du jaune) qui, en se mélangeant avec le bleu qui n'a pas été absorbé, reconstitue une lumière blanche.

3.1.6 Résine de protection et dôme de silicone

La LED est un composant complexe faisant intervenir une multitude de technologies (collages, soudures, dépôts) et toutes doivent être hébergées dans un boîtier protégé. Des résines (ou des dômes souvent en silicone maintenant) sont utilisées pour sceller le boîtier une fois le semi-conducteur intégré. Souvent, des gels complémentaires sont utilisés pour assurer l'étanchéité.

Si le luminophore est déposé sur la puce semi-conductrice, la résine ou le dôme de silicone sont alors transparents et participent à l'extraction lumineuse vers l'extérieur de la LED (figure 3.12a). Dans certains cas, le luminophore est noyé dans la résine qui sert d'encapsulation (figure 3.12b).



a



b

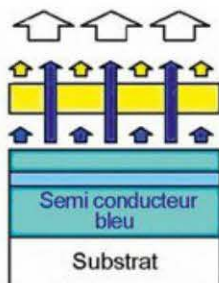
Figure 3.12 – Type de protection au sommet du semi-conducteur.

3.2 Technologie d'émission – fabrication du blanc

3.2.1 Introduction

Les LED sont utilisées depuis longtemps comme voyants lumineux et dans toutes les couleurs, sauf en blanc : les premières apparitions de voyants lumineux blancs remontent au milieu des années 1990, avec entre autres le rétro-éclairage du compteur de vitesse d'une voiture (modèle Passat de Volkswagen).

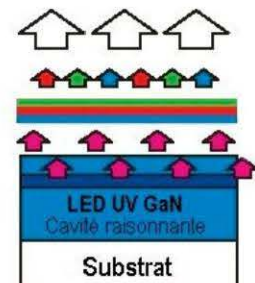
Il est possible de rencontrer des LED employant deux méthodes toutes deux basées sur le même principe d'émission au travers d'un luminophore : l'une basée sur un mélange de plusieurs types de luminophores (de plus en plus employée aujourd'hui – figure 3.13b) et l'autre utilisant un semi-conducteur de type UV également à base de luminophore (figure 3.13c).



a



b



c

Figure 3.13 – Type de protection au sommet du semi-conducteur (d'après Nichia).

3.2.2 Émission lumineuse à partir du semi-conducteur

En appliquant une tension aux bornes d'un semi-conducteur donné et en lui injectant du courant, sa zone active est excitée. Les atomes qui composent cette zone sont alors dans un état énergétique supérieur à leur état fondamental stable. Le courant injecté impose alors un déplacement d'électrons qui, en se recombinant avec des trous, « impose » un retour des atomes à un état plus stable et libère de l'énergie. Si le milieu actif le permet et si cette énergie correspond à celle d'un photon, cette excitation initiale se traduit par l'émission de ce photon avec des caractéristiques optiques propres (longueur d'onde notamment).

Comme décrit au paragraphe « Principe d'émission » du § 3.1.1, l'émission de photons doit se faire au niveau de la zone active de la jonction du semi-conducteur (zone de déplétion), ce qui suppose de mettre en œuvre certaines technologies.

En effet, les deux acteurs de la création potentielle de photons que sont les électrons et les trous peuvent se recombiner en créant seulement une vibration ou un échauffement mais pas le photon attendu. Il s'agit alors d'une recombinaison non radiative (cf. [22] page 35).

Les défauts cristallins sont la cause principale des recombinaisons ne menant pas à une émission de lumière.

De plus, la mobilité des électrons étant différente de celle des trous, leur déplacement est plus lent. Si l'on souhaite que les recombinaisons puissent se faire dans la zone active, il est nécessaire de créer une barrière (dite « barrière d'électrons ») permettant aux recombinaisons de se réaliser dans la zone active P.

Enfin, des techniques permettent d'améliorer ces recombinaisons (et par conséquent la génération de photons) par la mise en œuvre de puits quantiques multiples (MQW) au sein de la zone active.

Une fois le photon émis, il doit être dirigé vers l'extérieur du semi-conducteur pour éviter qu'il ne soit réabsorbé. Suivant le type de LED, il est alors extrait du boîtier vers l'extérieur du composant ou bien envoyé au travers d'une couche de luminaire.

3.2.3 Conversion au travers du luminophore

Le principe de fluorescence est connu et utilisé depuis longtemps. Les tubes fluorescents fonctionnent suivant ce principe, avec une émission initiale de type UV.

Aujourd'hui, à part quelques rares cas, les LED blanches utilisent un semi-conducteur qui émet autour de 450 nm, au travers de luminophores de différents types suivant les applications (figure 3.14).

3. Comment fonctionne une LED ?

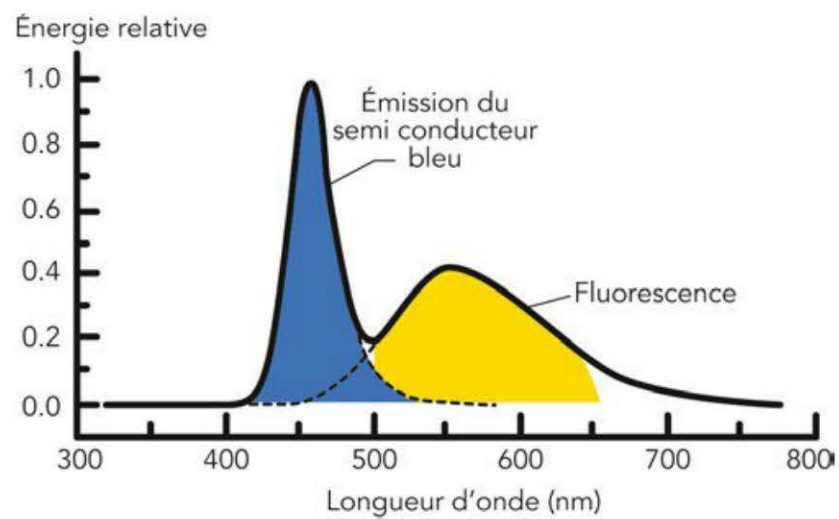
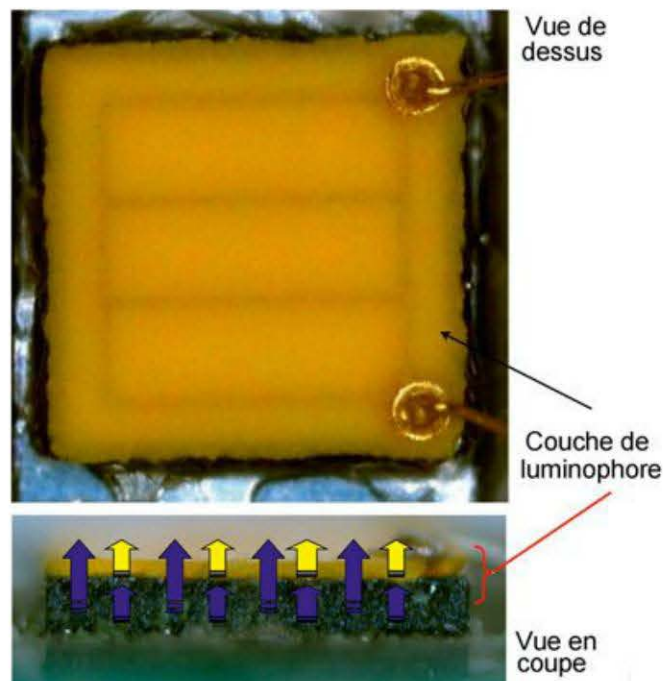


Figure 3.14 – Principe d'émission au travers du luminophore.

Au cours des dernières années, les fabricants de LED ont nettement amélioré la qualité des luminophores (en réalisant des mélanges de différents types) et ont mieux maîtrisé les épaisseurs des couches déposées. De ce fait, la qualité de la lumière émise a été considérablement améliorée en amenuisant cet aspect bleuté des premières LED haute luminosité (figure 3.15).

3.2 Technologie d'émission – fabrication du blanc



Figure 3.15 – Éclairage par la tranche utilisant des LED de mauvaise qualité colorimétrique.

Aujourd'hui, pour les applications d'éclairage, deux méthodes s'affrontent : soit des LED blanches qui intègrent le luminophore dans le composant lui-même (figure 3.16a) et intègrent un système de diffusion de la lumière, soit l'utilisation de LED bleues avec luminophore déporté dans lesquelles le luminophore n'est plus déposé sur la puce semi-conductrice mais intégré au matériau servant à diffuser la lumière (figures 3.16 b et 3.16 c).

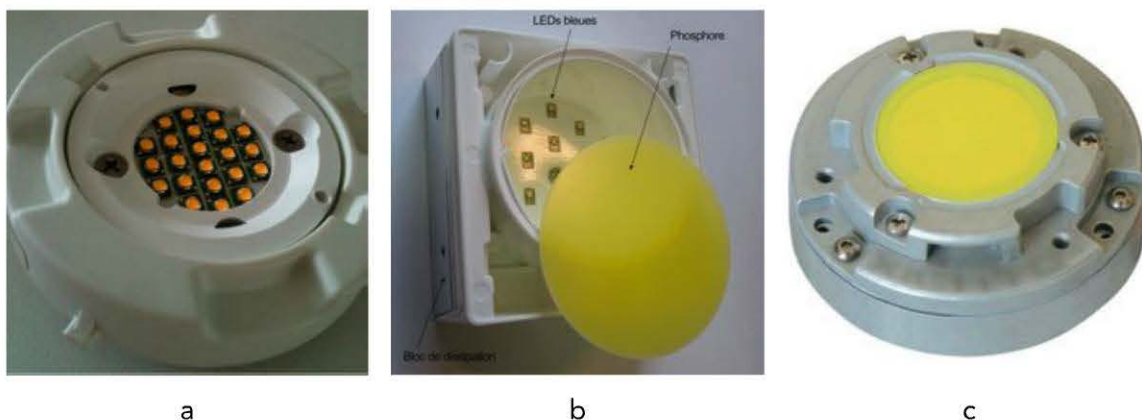


Figure 3.16 – Modules LED utilisant des LED conventionnelles (a) ou type luminophore déporté (b et c).

3.2.4 Extraction lumineuse

Une fois la lumière émise, il faut l'extraire. Les méthodes de mise en œuvre de l'extraction de la lumière se sont faites en plusieurs étapes. D'abord, les réflecteurs des LED 5 mm, dans lesquels étaient intégrées les puces semi-conductrices, dirigeaient la lumière émise par la tranche du semi-conducteur vers le haut. Ensuite, des lentilles primaires ou des surfaces adaptées (texturations) ont été intégrées au-dessus de la puce semi-conductrice recouverte (ou non) de luminophore. Enfin, les techniques de fabrication des LED ont permis d'intégrer des miroirs au-dessus de la couche active au sein même du semi-conducteur.

Réflecteurs

Initialement réalisés parce que l'émission des LED se faisait par la tranche du semi-conducteur (électrodes non transparentes au départ), ces réflecteurs (figure 3.10) ont été intégrés à la plupart des LED 5 mm fabriquées depuis plus de vingt ans. Lorsque les LED blanches se sont développées, les réflecteurs ont permis de recevoir le luminophore de façon simple et de recouvrir le semi-conducteur par un procédé de dépôt sous forme liquide (le luminophore est alors mélangé à une résine liquide, mise en œuvre à l'aide de micropipettes automatisées dans le réflecteur).

Lentilles primaires ou texturations

Les premières lentilles primaires (système optique intégré à la LED) étaient principalement constituées de résines dures et transparentes. Au début des années 2000, les premières lentilles en silicone sont apparues, améliorant le processus d'extraction lumineuse et surtout moins sensibles aux UV que les résines dures, qui s'opacifiaient pour certaines d'entre elles.

Les procédés de texturation sont apparus plus tard, en même temps que les différentes nouvelles mises en œuvre de luminophore sur les puces semi-conductrices des LED.

Miroirs

Logés en dessous de la zone active de l'émission lumineuse de la LED, ces miroirs (figure 3.17) permettent de limiter les pertes vers l'arrière et améliorent le rendement. Ils préservent la ponctualité de l'émission de lumière (contrairement aux réflecteurs qui récupèrent la lumière sur le côté et, de ce fait, augmentent la surface apparente de la puce). Cette propriété peut être un avantage dans des applications nécessitant un traitement optique, ou un désavantage si l'on veut une diffusion maximale de la lumière.

OSRAM AlGaInP Micro-mirror LED



Figure 3.17 – Mise en œuvre de miroir (OSRAM Opto Semiconductor, 2005).

3.3 L'enjeu du boîtier des LED : la dissipation thermique

Les modèles de LED sont très variés et très différents les uns des autres.

Il n'y a pas de norme en termes de dimension et ce sont les applications elles-mêmes qui ont défini au fil du temps les boîtiers les mieux adaptés pour répondre à leurs exigences (tailles, géométrie, méthode de contact).

Les premières LED étaient réalisées dans des boîtiers moulés en résine transparente, d'un diamètre de 5 mm (d'où leur appellation « LED 5 mm »), et, tant que les puissances des composants restaient raisonnables ($< 0,1$ W) pour des applications essentiellement de type voyant lumineux, ce genre de boîtier remplissait bien son rôle.

Au milieu des années 1990, suite au développement par Nichia des semi-conducteurs à base de InGaN/GaN émettant dans le bleu ou dans le vert, les applications de feux tricolores se sont développées, les LED rouges et orange existant déjà. La « technologie 5 mm » s'est implantée mais les premières problématiques de gestion thermique ont commencé à apparaître au grand jour.

Ce boîtier (5 mm) qui est présent partout est facile à souder à la main. Il est donc largement employé pour des applications qui ne requièrent pas de fort flux mais simplement une « brillance », c'est-à-dire une luminance de surface pour servir de point lumineux (voyant). Ce type de LED peut être de qualité médiocre, vendu en vrac sur certains marchés d'électronique en Chine mais pour autant remplir les fonctions qu'on lui réserve. Par exemple, pourquoi monter sur une guirlande de Noël extérieure des LED de bonne qualité qui dureraient 20 000 ou 30 000 heures alors que ces guirlandes sont installées en hiver, fonctionnent la nuit à des températures le plus souvent inférieures à 10 °C, pendant seulement quelques semaines (moins de 800 heures par an) et sont changées au bout de 5 à 7 ans pour des raisons de mode ou d'esthétique ?

Le problème se pose lorsque nous passons à des systèmes de balisage voire de rétro-éclairage ou d'éclairage, où là, non seulement la température dans laquelle les LED fonctionnent est plus importante, mais la durée de fonctionnement à l'année est également beaucoup plus longue et peut dépasser les 5 000 heures par an.

C'est pour ces raisons que les évolutions des boîtiers mécaniques des LED ont avant tout été orientées dans un seul but : extraire le maximum de chaleur du cœur de la LED pour préserver ses performances optiques le plus longtemps possible. La notion de résistance thermique, c'est-à-dire la faculté pour le boîtier de la LED à dissiper la chaleur émise par le semi-conducteur, est alors passée au premier plan.

3.3.1 Les LED 5 mm

Leur mise en œuvre mécanique est simple. Elles sont constituées de deux broches, dont l'une possède un petit réflecteur dans lequel vient se loger le semi-conducteur (cf. § 1.4.1).

Ce type de LED possède une **résistance thermique** de l'ordre de 300 °/W à 400 °/W, ce qui signifie que la différence entre la température de la jonction semi-conductrice de la LED et la température des pattes d'alimentation de la LED est de 300 °C à 400 °C si 1 watt électrique est injecté (en prenant comme hypothèse pour maximiser cette différence que toute l'énergie électrique injectée est transformée en chaleur).

Pour ce type de LED, les puissances électriques injectées sont plutôt de l'ordre de 0,05 W à 0,1 W, ce qui signifie une différence de température comprise entre 15 °C et 40 °C pour la jonction semi-conductrice. Ainsi, une LED fonctionnant dans un environnement thermique autour de 40 °C (ce qui est couramment constaté dans bon nombre d'applications) aurait sa jonction à une température de 55 °C à 80 °C. Si l'on regarde alors les spécifications des constructeurs en termes de flux lumineux et de durée de vie, on se rend compte que cette différence de température joue un rôle très important et peut dégrader fortement et rapidement les composants. Les courbes de la figure 3.18 montrent la baisse de flux de quatre modèles de LED 5 mm, hébergées dans des applications de type « lampe à LED », avec une limite qui définit la durée de vie des composants : 70 % de leur flux initial. En dessous de cette limite, une fois qu'ils ont perdu plus de 30 % de ce flux, on considère qu'ils sont hors service.

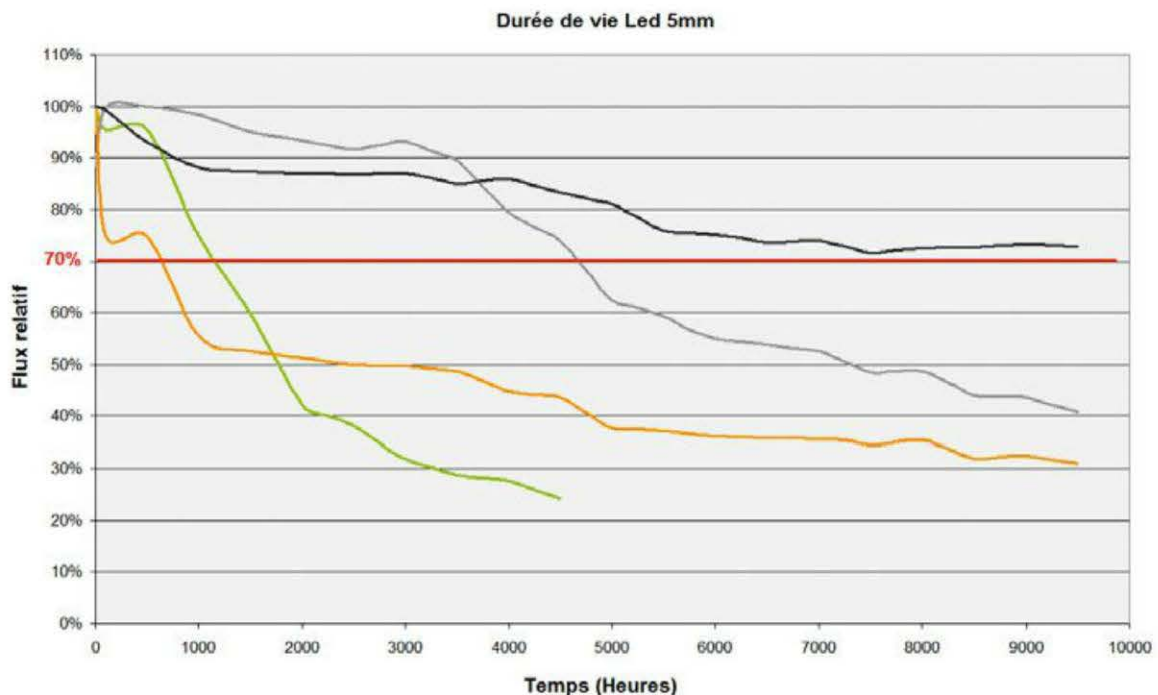


Figure 3.18 – Évolution du flux de LED 5 mm en fonction du temps (applications : lampes à LED).

3.3.2 LED de type piranha

Ce type de LED, dédié au départ aux applications automobiles nécessitant des tenues en température supérieures aux applications standard, a permis des injections de courant plus importantes grâce à une maîtrise de la dissipation thermique largement supérieure à celle des LED 5 mm. Les résistances thermiques de ces LED se situent autour de $100\text{ }^{\circ}\text{W}$ à $150\text{ }^{\circ}\text{W}$, grâce aux quatre pattes d'alimentation et à l'amélioration de la méthode de dissipation au cours du temps.

Au départ (figure 3.19), nous avons de simples pattes d'alimentation réunies deux à deux à l'intérieur de la LED et sur lesquelles étaient positionnés d'un côté la puce semi-conductrice et de l'autre le *bonding* d'alimentation verticale (avec éventuellement la diode de protection).

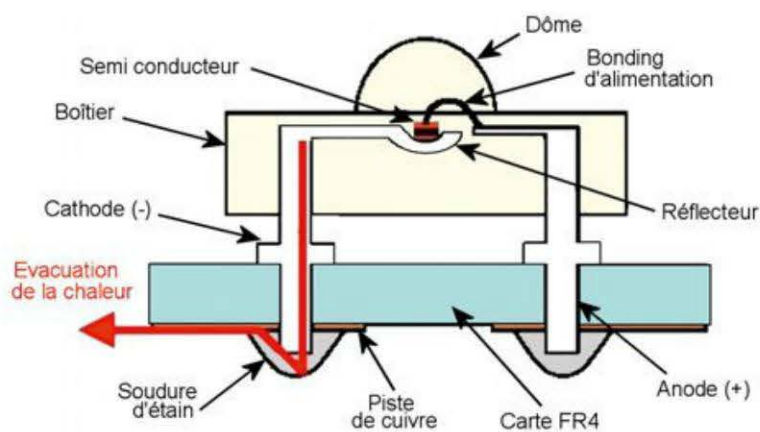


Figure 3.19 – Boîtier de LED de type « piranha » vue de profil.

La chaleur dégagée par la puce semi-conductrice, transite le long des deux pattes au niveau du réflecteur, puis vers l'extérieur du boîtier grâce aux soudures d'étain réalisées sur la carte électronique. Les améliorations mécaniques (figure 3.20) consistant à agrandir la surface métallique du réflecteur, à réaliser des pattes d'alimentation plus larges ou encore à fabriquer une seule patte large pour la cathode et pour l'anode, ont considérablement amélioré les performances thermiques des LED.



Figure 3.20 – Évolution des boîtiers de LED de type « piranha ».

Cela s'est traduit par une diminution de la résistance thermique (figure 3.21) permettant d'atteindre des valeurs proches de 100 °/W.

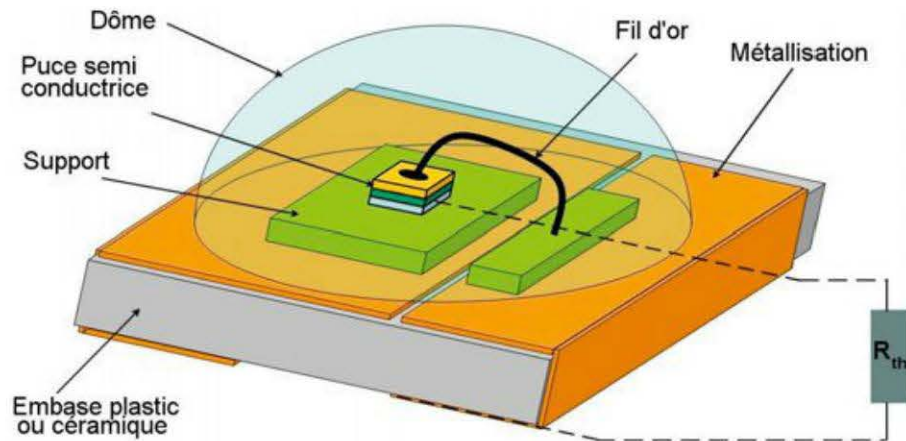


Figure 3.21 – Résistance thermique équivalente entre la jonction semi-conductrice et les pattes de soudure externes de la LED.

Ces résistances thermiques plus faibles facilitent la mise en œuvre des systèmes à LED, avec la possibilité d'une utilisation dans des ambiances thermiques plus chaudes. En effet, la résistance thermique mesurant la capacité du boîtier de la LED à dissiper la chaleur dégagée par la puce semi-conductrice vers l'extérieur impose une température de la jonction (T_j) que l'on peut calculer en première approche (par analogie à la loi d'Ohm et considérant la valeur de la résistance thermique comme constante) de la manière suivante :

$$T_j = T_{\text{patte externe}} + R_{th} (P_{\text{tot élec conso}} - P_{\text{lumineuse}})$$

Avec :

- ▶ T_j : température de jonction de la puce semi-conductrice (en °C) ;
- ▶ $T_{\text{patte externe}}$: température des pattes extérieures de la LED (en °C) ;
- ▶ R_{th} : résistance thermique du boîtier de la LED (en °/W) ;
- ▶ $P_{\text{tot élec conso}}$: puissance électrique totale consommée par la LED (en W) ;
- ▶ $P_{\text{lumineuse}}$: puissance lumineuse émise (en W).

Résistance thermique des LED

La chaleur est l'ennemi premier des LED et le principal paramètre à évaluer lors de leur fonctionnement. Le comportement des LED est différent suivant les modèles et leurs technologies, et il est caractérisé par leur résistance thermique, c'est-à-dire la capacité du boîtier de chaque LED à dissiper la chaleur produite au niveau du semi-conducteur, vers l'extérieur de ce boîtier.

3.3 L'enjeu du boîtier des LED : la dissipation thermique

Pour illustrer la relation forte entre la température de la jonction et la durée de vie, la figure 3.22 donne la durée de vie d'une LED de type piranha en fonction de cette température.

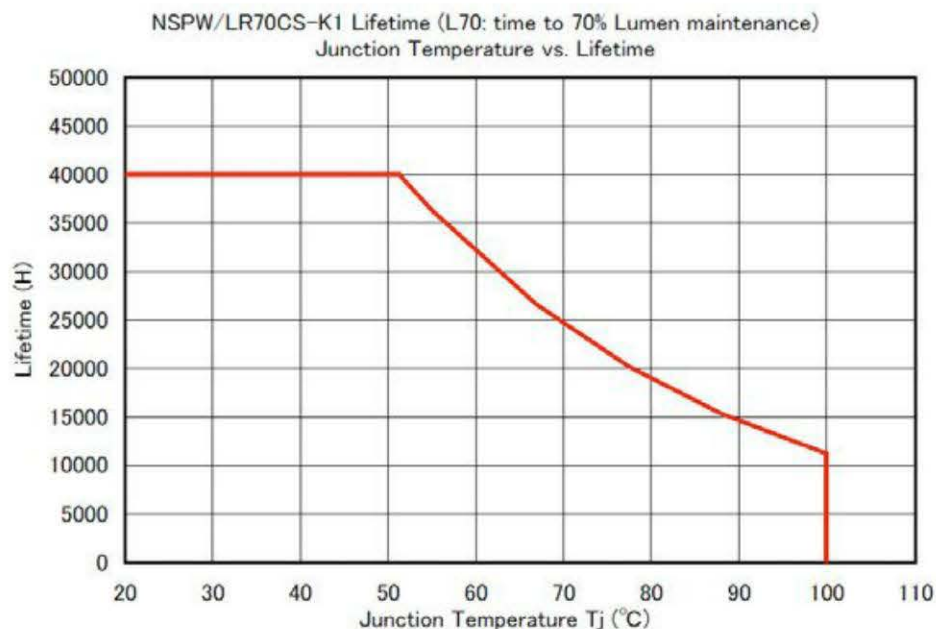


Figure 3.22 – Durée de vie d'une LED (fabricant : Nichia) de type piranha en fonction de la température de jonction.

3.3.3 LED de type CMS en résine

Le début des années 2000 a vu apparaître les premières LED de puissance, avec des puces semi-conductrices supérieures en taille à $150 \times 150 \mu\text{m}$ (environ) utilisée jusque-là. Ces nouvelles générations de puces ont été montées dans des boîtiers de LED possédant pour la première fois des dissipateurs dédiés à l'extraction de la chaleur émise (drain thermique ou « pad » thermique, figure 3.23) et abandonnant

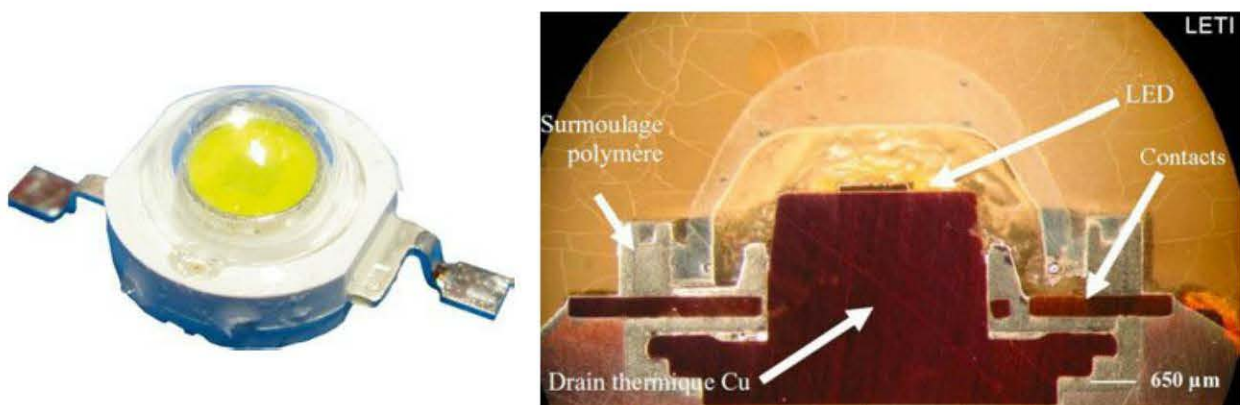


Figure 3.23 – Boîtier de LED CMS en résine dure surmontée d'un dôme de protection (LETI).

de ce fait la dissipation par les pattes d'alimentation. Il faut noter que, souvent, l'une des deux électrodes était en contact électrique avec ce « pad » thermique pour plus de simplicité de design au début de cette nouvelle technologie de boîtier.

Même si l'évolution actuelle semble être définitivement orientée vers les boîtiers céramiques, ce type de LED continue à être fabriqué, pour des raisons d'industrialisation et de coût de processus de fabrication, et il le sera encore pendant de nombreuses années.

Courant 2009, l'obsolescence annoncée par Philips Lumileds de son modèle « K2 » a permis à des acteurs de second rang en termes de qualité de se positionner sur le créneau de ce type de LED. En effet, les cartes réalisées avec cette empreinte de LED (surface de soudure spécifique à chaque LED) ont une durée de vie de 1 à 3 ans, et donc la transition d'une LED à l'autre peut être plus ou moins longue. Si une obsolescence survient, les utilisateurs finaux qui ont réalisé les cartes et surtout mis en œuvre les optiques secondaires sont pour certains d'entre eux obligés de garder le même type de LED le temps de refaire le design du produit. En effet, ni les empreintes (figure 3.24), ni les tailles, ni les hauteurs de positionnement des puces semi-conductrices ne sont identiques.



Figure 3.24 – Pad de dissipation thermique de LED CMS, de gauche à droite : Seoul Semiconductor type P4, Nichia types NS6 et Gaia, Seoul Semiconductor type P2-5 RGB.

3.3.4 LED de type CMS en céramique

Au début des années 2000, les fabricants comme Kyocera ont commencé à proposer des boîtiers de LED en céramique, équipés de drains thermiques et de conduction électrique, mais ce n'est qu'à la fin de cette décennie que le choix de la céramique s'est petit à petit imposé, pour des raisons de compacité et d'endurance aux hautes températures (les contraintes thermiques sont moins importantes entre ce matériau et le substrat du semi-conducteur, diminuant de ce fait les défaillances).

3.3 L'enjeu du boîtier des LED : la dissipation thermique

Les pionniers dans ce domaine sont CREE entre 2002 et 2003, avec le modèle XL7090® qui alliait céramique et métal (figure 3.25), ainsi que Nichia, qui développa aussi des LED en boîtier céramique de plus petite taille, au départ pour des applications de niche (aéronautique, électronique spécifique) puis pour des applications plus standard (enseignes lumineuses).



Figure 3.25 – LED 1 W modèle XL7090 (CREE).

En 2015, l'amélioration des rendements qui s'est encore accentué a permis non seulement d'augmenter les sollicitations des composants (certains peuvent être piloté à près de 3A), mais a également permis aux fabricants de réduire les tailles des boîtiers des LED de puissance tout en garantissant des dissipations thermiques intéressantes afin de maintenir les performances optiques sur le long terme (flux, qualité colorimétrique). Des puces semi-conductrices hébergées habituellement sur des boîtiers « 3535 » (de 3,5 mm de côté, figure 3.26.a) voient leur surface multipliée par 4 pour une même embase (figure 3.26.b). D'autres modèles intégrant de nouveaux types de semi-conducteur ont des lentilles primaires de tailles quasiment identiques à la surface.

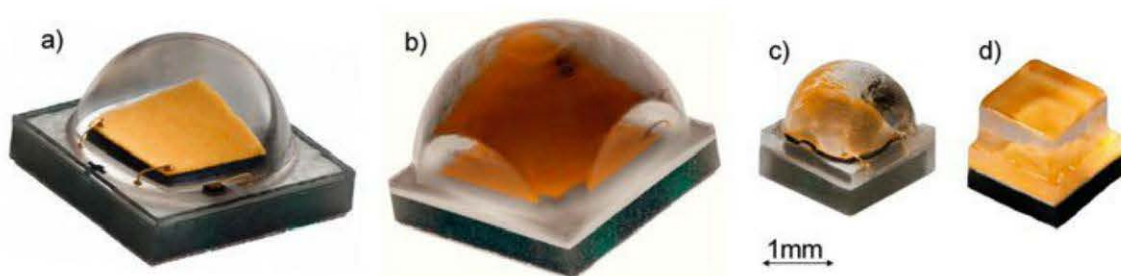


Figure 3.26 – Évolution des boîtiers des LED de puissance (CREE).

4

Les LED multipuces et les matrices de LED

Une LED seule permet rarement de produire une solution d'éclairage satisfaisante. D'où la nécessité de concevoir des dispositifs d'assemblage fiables et performants. Ce chapitre détaille les différentes options possibles : LED multipuces, modules COB et modules de LED.

4.1 La nécessité d'éclairer

Ce sont les applications d'éclairage qui ont poussé les industriels à réaliser des matrices de LED puis des systèmes multipuces. Il ne s'agissait pas alors de réduire les niveaux de luminance ni d'optimiser des optiques, mais uniquement d'un besoin en puissance d'éclairage.

Intégrer plusieurs puces ensemble ne représentait pas de difficultés particulières, le plus délicat était d'assembler des semi-conducteurs qu'il était difficile de fabriquer et de trier (par colorimétrie et flux lumineux).

Nous avons d'abord assisté au cours des années 2002-2005 au développement de systèmes multi-LED, puis la tendance des années 2005-2010 a plutôt été de développer des produits COB (*Chip On Board*). Entre 2010 et 2012, avec différentes tentatives de mise en place de standards (comme Zaga), nous sommes revenus à des modules avec LED unitaires (figure 4.1), en partie du fait que la mise en place de ces standards prenait du temps. Il était alors plus aisé de réaliser des modules multi-LED (figure 4.1 à droite).

Dans les années 2013 et 2014, les plus grands groupes de l'électronique qui représentent plusieurs centaines de milliards de chiffre d'affaires par an (comme Samsung) ont accéléré leurs investissements dans le monde de l'éclairage à travers le développement de nouveaux modèles de LED (comme composants) mais également de plate-forme COB.

Les grands fabricants de LED comme Nichia, Osram ou CREE ont eux aussi accéléré leurs développements des matrices multipuces sur support céramique dont les

premiers développements de produits avait été réalisés dans ce domaine par des fabricants comme Bridelux sept à huit années auparavant.



Figure 4.1 – Matrices multipuces (COB, à gauche) et module multi-LED (à droite).

Il semble qu'en 2015, la croissance des COB s'accélère encore sans pour autant prendre le pas sur les modules multi-LED qui représenteront toujours une certaine flexibilité de design. Toutefois, les frontières ne sont plus aussi franches maintenant, entre les COB, les modules multi-LED et les récentes LED de grosses dimensions qui intègrent un nombre de puces semi-conductrices important (> 10), sur une plateforme à souder en CMS sur une carte électronique (caractéristique des LED).

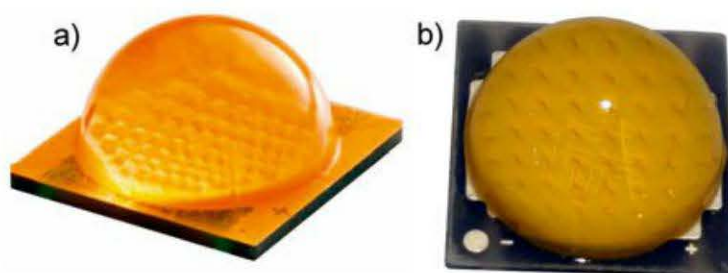


Figure 4.2 – LED de grosse dimension, intégrant un nombre de puces important.

4.2 LED multipuces, module COB, module de LED

Les LED multipuces existent depuis très longtemps car les processus d'intégration électronique ont permis très tôt de réaliser de tels systèmes (il ne s'agit finalement que de câbler plusieurs semi-conducteurs sur une même embase, ce qui se fait depuis plus de quarante ans).

4.2 LED multipuces, module COB, module de LED

Les premières LED multipuces étaient essentiellement des LED bicolores, utilisées comme voyants lumineux.

L'intégration de multipuces dans des LED blanches s'est faite plus tard (courant 2002-2004) pour des raisons essentiellement de performances et de besoin de rétro-éclairage d'écran. De nos jours, ce type de boîtier de LED est très courant et se présente sous différentes formes, avec des nombres de contacts et des nombres de puces hébergées variables, et avec ou sans protection par diode (figure 4.3).

Les modules LED ont quant à eux toujours plus ou moins existé, puisqu'il s'agissait en fait de mettre des LED de façon rapprochée sur un même support. Un exemple familier est donné par les matrices de LED pour les applications de signalétique, routière ou ferroviaire notamment (figure 4.4), qui existent depuis plus de vingt ans maintenant. La densité des composants traversants d'abord puis CMS (composant monté en surface) dans un second temps pouvait dépasser les 150 000 LED par mètre carré.

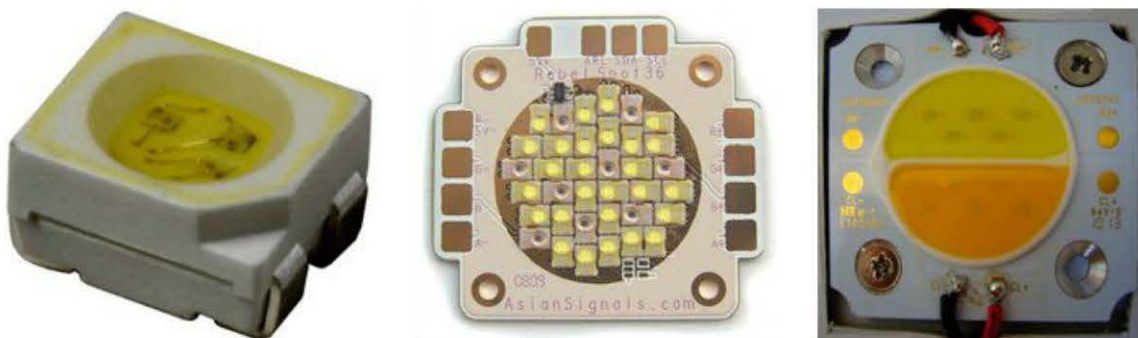


Figure 4.3 – LED multipuces (à gauche), module multi-LED (au centre) et module *chip on board* (à droite).



Figure 4.4 – Affichage en gare utilisant des modules LED.

Le développement des matrices de LED pour l'éclairage proprement dit s'est produit avec l'amélioration des performances des puces semi-conductrices bleues, au début des années 2000.

Les modules COB (*chip on board*) sont beaucoup plus récents. En effet, pour être en mesure de concentrer un grand nombre de puces semi-conductrices sur une petite surface, il fallait être en mesure de dissiper la chaleur émise, d'autant plus que leur rendement et leur durée de vie dépendent en grande partie de ce paramètre.

Le rendement des LED blanches étant inférieur à 10 % début des années 2000, il était difficile de concentrer un grand nombre de ces semi-conducteurs car 90 % de leur consommation électrique était transformée en chaleur, ce qui rendait la dissipation thermique quasi impossible.

Dès lors que les rendements ont atteint 20 à 25 %, la gestion thermique fut possible et certains fabricants savent maintenant implanter de 100 à 300 puces semi-conductrices de 0,5 à 1 W chacune (figure 4.5). Toutefois, dans certains cas, ces intégrations approchent, voire dépassent, les limites thermiques admissibles, et même de gros moyens de dissipation ne permettent pas de faire fonctionner les matrices dans de bonnes conditions.

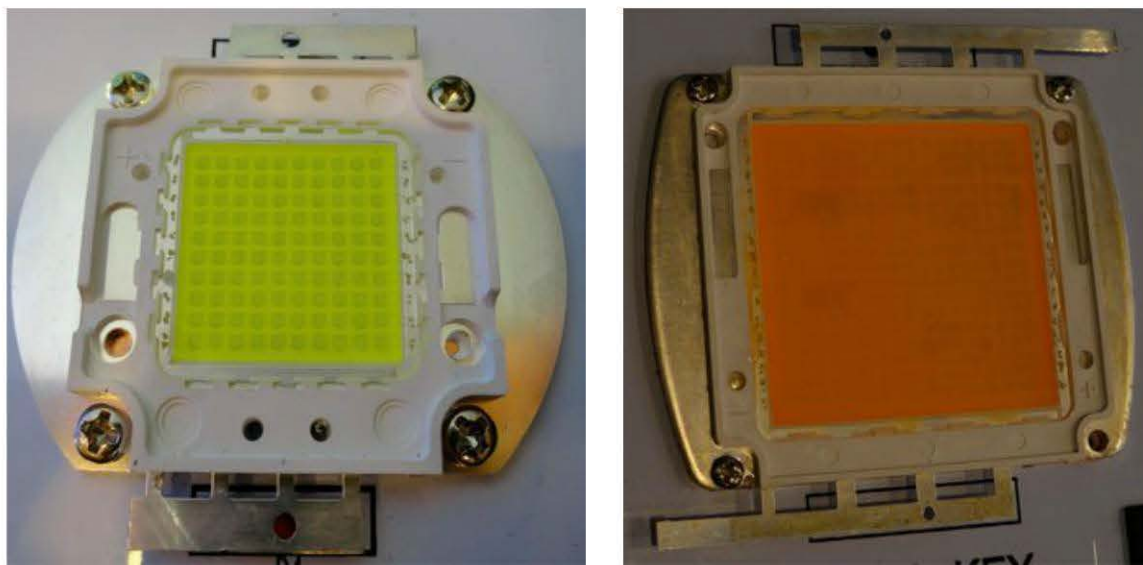


Figure 4.5 – Module COB à 100 puces (gauche) et à 290 puces (droite).

4.2.1 LED multipuces

Ce type de composant est la plupart du temps constitué de puces semi-conductrices de petite taille (< 150 à $200 \mu\text{m}$ de côté), et ce n'est que récemment (courant 2003-2004) que des puces de 700 voire $900 \mu\text{m}$ ont été intégrées à des boîtiers de LED « conventionnels » (boîtier en résine ou céramique, comportant des pattes de soudure ainsi qu'un pad de dissipation thermique, le tout se soudant sur une carte électronique).

4.2 LED multipuces, module COB, module de LED



Figure 4.6 – LED multipuces respectivement à 2, 3 et 4 puces.

Il existe de nombreuses variantes de LED multipuces (figure 4.7) :

- ▶ avec ou sans protection ESD (par diode) ;
- ▶ sur des boîtiers à 2 pattes (de type PLCC2) mais aussi à 4, 6 voire 8 pattes ;
- ▶ avec présence d'un pad central de dissipation thermique ;
- ▶ constituant des LED de faible puissance ($< 0,1 \text{ W}$), de moyenne puissance (entre $0,25$ et $0,5 \text{ W}$) ou de forte puissance ($> 1 \text{ W}$) ;
- ▶ fonctionnant sur le 220 V secteur directement (avec un condensateur complémentaire).

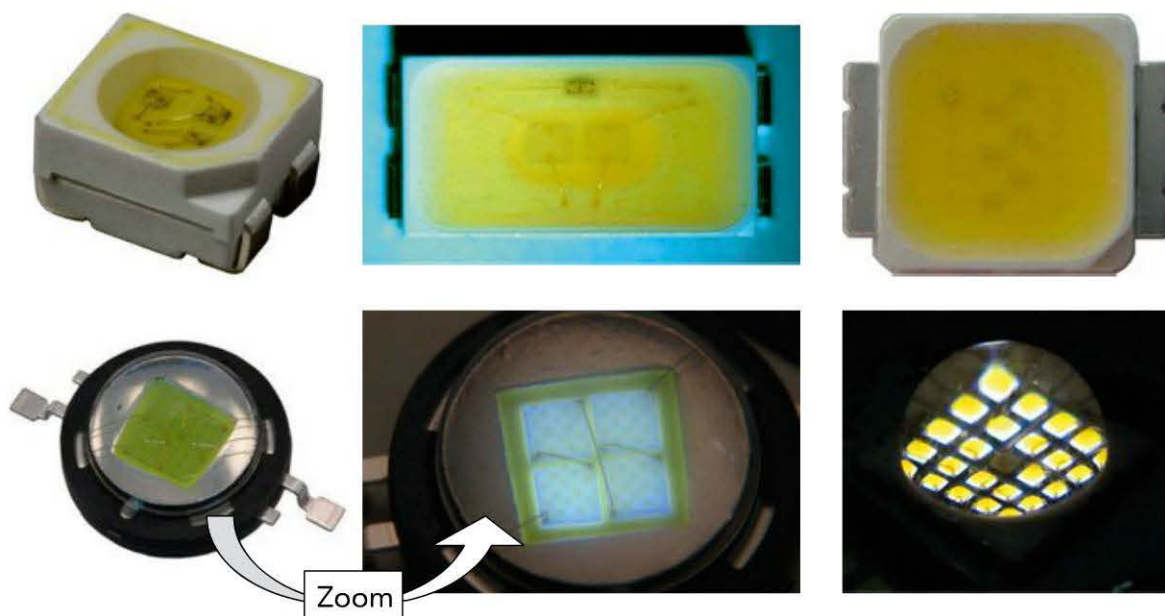


Figure 4.7 – LED multipuces de gauche à droite et de bas en haut : modèle PLCC4 à 3 puces, modèle 5630 à 2 puces, LED de puissance à 6 puces, LED de puissance fonctionnant en alternatif (220 VAC , nombre de puces > 150) et LED hébergeant des puces de $700 \mu\text{m}$.

Courant 2013 et 2014, les développements de LED multipuces se sont faits de façon « relativement équilibrée » entre l'emploi de puces semi-conductrices de petites tailles (entre 100 et 200 μm) et de tailles plus importantes (entre 500 et 700 μm voir 1 mm de côté). Cela a permis de proposer des performances optiques intéressantes tout en ayant de plus larges choix de tensions de fonctionnement, afin de limiter les pertes au niveau des alimentations. Ainsi, des LED à des tensions de fonctionnement supérieur à 30 VDC ont été développées (figure 4.8) et ont été intégrées dans des applications nécessitant des faisceaux lumineux directs.

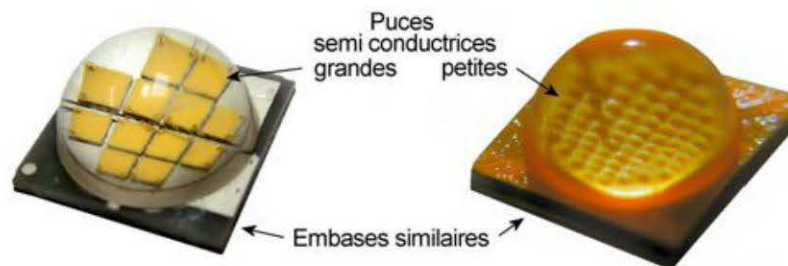


Figure 4.8 – LED multipuces intégrant des puces de grandes dimensions (à gauche) et des puces de plus petite taille (à droite) sur une embase de surface identique.

4.2.2 Module COB (Chip On Board)

La grosse différence entre un module COB et une LED multipuces est qu'il est en lui-même un produit fini. En effet, il ne se soude pas suivant les méthodes conventionnelles sur des cartes électroniques et se fixe en général à l'aide de vis ou de supports dédiés. De plus, il comporte une interface thermique appropriée (graisse, gel, ou silicones souples).

Les supports sur lesquels cette technologie a vu le jour sont l'aluminium et la céramique (figure 4.9). Aujourd'hui, les fabricants les plus connus pour la mise en œuvre de LED discrètes (comme CREE ou Nichia) se lancent dans le développement de modules COB sur aluminium et céramique. D'autres, comme Sharp et Citizen, avaient lancé très tôt ce type de produit : sur support céramique pour Sharp (2005-2006) et sur support aluminium pour Citizen (même époque).

Le point commun des produits de tous ces fabricants est la taille des puces qui n'excède pas 200 μm de côté, leur disposition très dense et leur alimentation en général entre 10 et 20 mA par puce.

Entre 2009 et 2012, il y a eu une forte progression des systèmes sur embase aluminium, avec une forte densité de puces semi-conductrices, mais cette fois-ci de grande dimension (> 300 μm de côté).

4.2 LED multipuces, module COB, module de LED

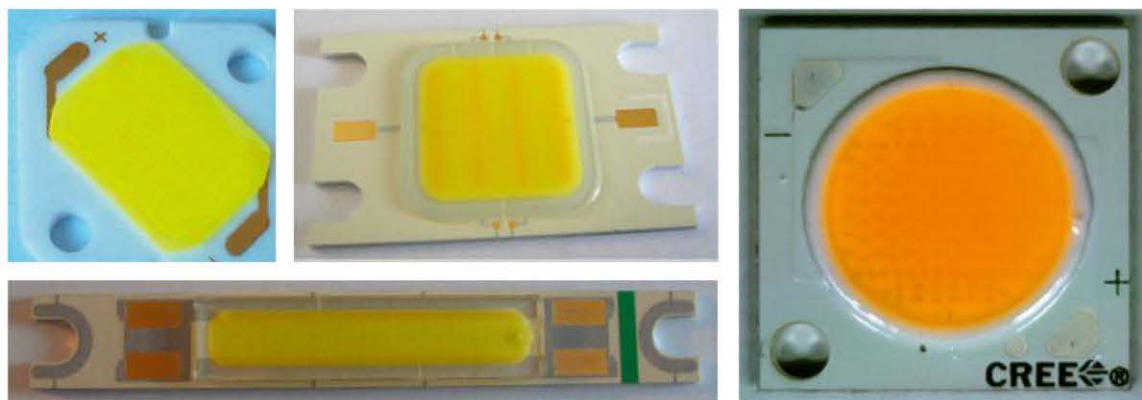


Figure 4.9 – Module COB de gauche à droite et de haut en bas : Sharp (céramique), Citizen (aluminium), CREE (aluminium), Citizen (aluminium).

Bridgelux (fabricant américain) est l'un des plus connus en Europe pour les performances et la qualité globale de ses produits (figure 4.10). Mais, dans le même temps, les produits à bas coûts envahissent le marché (application de type projecteur extérieur par exemple), avec des modules COB de mauvaise qualité.



Figure 4.10 – Module COB de gauche à droite : Bridgelux (50 W), Bridgelux (25 W), fabricant asiatique (30 W).

Comme pour les LED discrètes, l'évolution des performances s'est faite de la manière suivante : d'abord une course au flux lumineux, sans se préoccuper de la qualité colorimétrique (certains modules COB développent, dans des conditions thermiques favorables, plus de 4 000 lm), puis l'amélioration de l'efficacité des modules, avec comme point de mire les 100 lm/W. Enfin, le travail sur le rendu des couleurs, vers la fin des années 2000, « clôture » les développements techniques mis en œuvre.

Le principal avantage de cette technologie réside dans la simplicité de sa mise en œuvre pour un produit d'éclairage, et, si l'on suit les préconisations du constructeur, il est relativement simple de fabriquer un luminaire de forme de faisceau simple. Ainsi, à partir de la photométrie proposée par le fabricant de la matrice COB, la mécanique du réflecteur est basique et permet de créer des luminaires directifs ou de faisceau ovale sans trop de problèmes, sans toutefois atteindre des performances d'uniformité et de précision importantes. Cette simplicité est aussi la raison pour

laquelle on a vu apparaître des luminaires médiocres, ne répondant à aucune norme d'éclairage, qui se contentaient d'émettre un flux lumineux intense (de piètre qualité colorimétrique au départ). Ce type de produit peut éventuellement convenir pour des applications de type projecteur (figure 4.11), et force est de constater que certains produits asiatiques sont relativement efficaces (60 à 90 lm/W parfois, performances constatées courant 2014) pour des coûts très faibles. Leur faible coût provient essentiellement du fait qu'ils sont réalisés dans des boîtiers fabriqués à plusieurs dizaines de milliers d'exemplaires, utilisant des matrices COB de qualité moyenne mais sous-alimentées (ce qui augmente leur durée de vie), avec des alimentations de qualité somme toute correcte que les constructeurs chinois sont les seuls à savoir produire pour moins de 4 \$.



Figure 4.11 – Matrice de 9 puces de 700 μm (droite), projecteur 10 W utilisant une matrice COB (Chine, moins de 15 \$).

4.2.3 Module de LED

La nécessité de se diriger vers une certaine standardisation du marché de l'éclairage a poussé les fabricants à réaliser des sous-ensembles « standardisés » (circuit imprimé + LED + gestion électronique). Le standard Zhaga est un des exemples d'uniformisation que certaines sociétés souhaitent imposer. Il consiste à s'entendre sur la dimension d'un moteur lumineux (matrice de LED avec une surface de circuit libre de composant) ainsi que sur le positionnement des trous de fixation et les contacts électriques de ce moteur lumineux. Cela permet de rendre le produit interchangeable avec des produits de plusieurs fabricants qui adhèrent à ce consortium.

Depuis 2009, le développement de ces modules de LED découle de la volonté de pouvoir réaliser, à partir d'une technologie finalement robuste, la LED, des modules ayant des fonctionnalités (connexion simple, optique complémentaire disponible) et pouvant être utilisés par l'intégrateur final, sans qu'il n'ait à développer son propre produit. Les matrices COB qui ne répondent pas à ce standard sont simples à utiliser

4.2 LED multipuces, module COB, module de LED

mais ne disposent pas de fonctionnalité d'interchangeabilité (dimensions et formes différentes) et demandent à l'intégrateur de réaliser un travail de mise en œuvre plus complexe.

Enfin, ces modules ont vocation à simplifier l'intégration de « moteurs lumineux » permettant à des sociétés initialement hors du monde de l'éclairage de réaliser des luminaires sans trop d'expérience (application *down light* par exemple – figure 4.12 – qui représente l'un des éclairages de type plafonnier les plus mis en œuvre dans des bâtiments ouverts au public).



Figure 4.12 – Down Light à module LED.

Il existe deux niveaux de modules LED. Un premier où on ne retrouve que le support en aluminium et les LED montées dessus (par soudage), et un second dans lequel une électronique complémentaire (gestion de la température du module par exemple) peut être intégrée avec un boîtier en matière plastique.

Le second type de module LED tend à se développer (sous la poussée du consortium Zaga entre autres) car il permet d'être intégré encore plus facilement que les modules COB seuls par les fabricants de luminaires.

Signalons malgré tout l'exception du module de Citizen (figure 4.13, à droite) qui intègre une technologie COB dans un module en boîtier en plastique.



Figure 4.13 – Modules LED, de gauche à droite : Philips, GE, fabricant taiwanais, Citizen.

4.3 Diversité des puces semi-conductrices implantées

Les contraintes techniques pour le domaine de l'éclairage, et qui plus est pour l'éclairage intérieur, sont de deux types : un niveau d'éclairement qui peut être important et une qualité de lumière qui doit être au-dessus de 80 en termes d'IRC.

Jusqu'à la fin des années 2000, les systèmes des fournisseurs (que ce soit des LED discrètes, des modules de LED ou des modules COB) avaient de la peine à atteindre et à dépasser ce niveau de 80.

Dès 2011, des fabricants intègrent différents types de puces semi-conductrices et rajoutent des puces rouges pour améliorer les rendus de couleur et atteindre les performances requises (figure 4.14). En 2012, certains fabricants atteignent même des IRC de 90 tout en maintenant l'efficacité au-dessus de 70 à 90 lm/W pour le module¹. Deux ans plus tard, fin 2014, les rendements se sont encore améliorés et dépassent désormais les 100 lm/W.

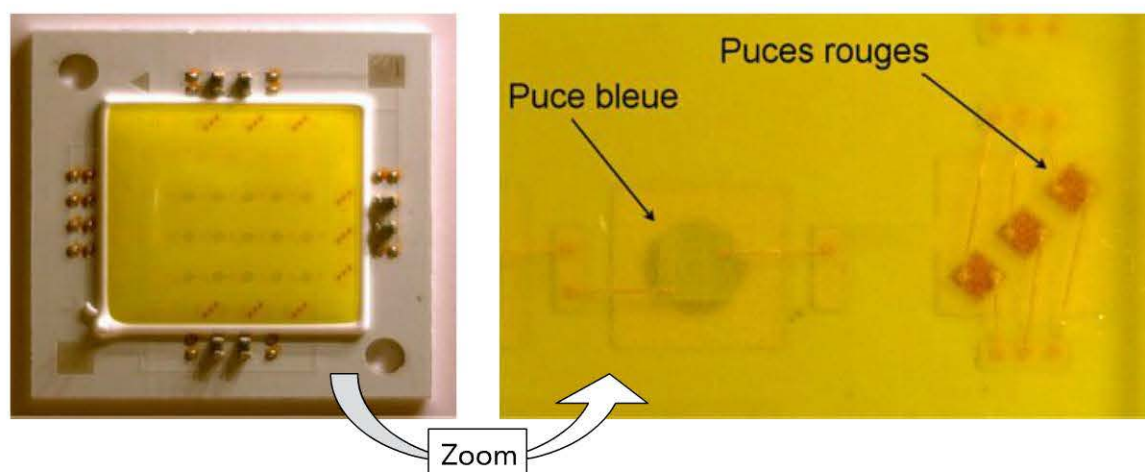


Figure 4.14 – Module COB de Everlight avec deux types de puces semi-conductrices bleues et rouges.

Les fabricants taiwanais sont les précurseurs et les plus actifs en ce qui concerne l'intégration de puces de différentes couleurs. En particulier, le fabricant Epistar, plus connu pour son activité de fabricant de puces semi-conductrices, a développé courant 2008-2009 des boîtiers de LED hébergeant ces deux types de puces (figure 4.15).

1. Différent de l'efficacité système, c'est-à-dire module + système optique + alimentation, qui se situe plus souvent autour de 50 à 70 lm/W.

4.3 Diversité des puces semi-conductrices implantées

En même temps, tous les acteurs se sont confrontés aux problématiques de la durée de vie, de la dérive chromatique (léger changement de couleur au cours du temps) ainsi que de la baisse de flux pour des températures de fonctionnement différentes. Tous ces paramètres sont très différents lorsque l'on passe de puces semi-conductrices rouges à des puces semi-conductrices bleues. Néanmoins, par des mises en œuvre adéquates, en limitant les courants d'alimentation dans les puces rouges et en réalisant des designs thermiques efficaces, toutes ces problématiques sont en train d'être résolues et le seront complètement dans les années à venir.

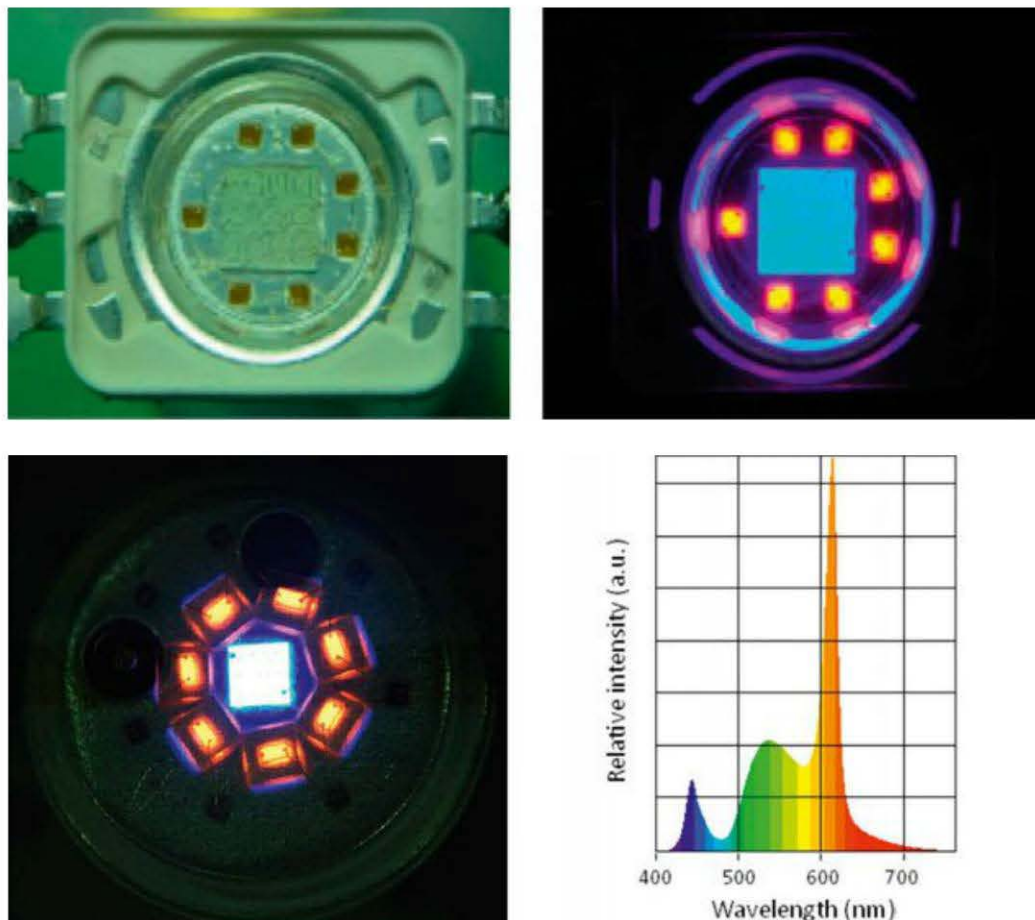


Figure 4.15 – Module COB d'Epistar avec deux types de puces semi-conductrices bleues et rouges (présentation de Ming-Jiunn Jou, PDG d'Epistar, conférence « Strategies in Light », Santa-Clara, 2011).

5

Les semi-conducteurs

Si les LED émettent de la lumière, c'est grâce aux propriétés particulières du semi-conducteur qui les constitue. Ce chapitre explique les mécanismes d'excitation et les structures atomiques qui provoquent l'émission lumineuse. Il passe en revue les différents types de semi-conducteurs (structure verticale, *flip chip*, *direct attach*) et la manière dont ils sont fabriqués.

5.1 Le mécanisme d'émission – théorie des bandes de valence

Le principe de fonctionnement des semi-conducteurs a été rapidement abordé dans le premier chapitre, examinons-le maintenant plus en détail.

Les semi-conducteurs émissifs ont un mode de fonctionnement très proche de celui des semi-conducteurs « standard » (c'est-à-dire non émissifs comme les diodes Zener, les transistors, etc.). Il s'agit toujours d'une excitation extérieure qui apporte une énergie à un système dont les propriétés intrinsèques imposent une réponse particulière.

Dans le cas des LED, l'alimentation doit pouvoir polariser la jonction à sa tension de fonctionnement (par exemple, autour de 1,7 à 2 V pour les LED rouges et autour de 3 V pour les LED blanches), puis on réalise le contrôle du courant injecté. C'est avant toute chose un pilotage en courant qui doit être maîtrisé pour alimenter une LED.

Les caractéristiques de l'émission lumineuse des semi-conducteurs dépendent essentiellement des points suivants :

- ▶ le type de matériaux utilisés ;
- ▶ le dimensionnement mécanique des différentes couches de matériaux ;
- ▶ l'architecture d'empilement des différentes couches (réflecteurs supplémentaires, alimentation électrique à des endroits plus adéquats) ;

- la transparence des matériaux qui composent les électrodes d'alimentation.

Le principe de l'émission lumineuse des LED est le suivant : un semi-conducteur (constitué de fines couches de différents matériaux) est polarisé à l'aide d'une alimentation, et un courant est injecté. Ce courant va exciter les atomes des différentes couches constituant le semi-conducteur, et, dans une zone dite de *déplétion* qui a été définie (et mise en œuvre) dans ce but, l'excitation de ces atomes se traduit par un état énergétique plus élevé qu'à l'équilibre.

Tout système dans un état énergétique instable, qu'il soit électrique, magnétique ou mécanique, a tendance à retourner vers un état plus stable. Ce retour à un état plus stable se produit de façon spontanée grâce à la recombinaison électron/trou.

Si les matériaux ont été judicieusement choisis, l'énergie dégagée par ce retour à l'état stable correspond à l'énergie d'un photon, qui est alors émis, dans une zone bien définie appelée la zone de déplétion (figure 5.1).

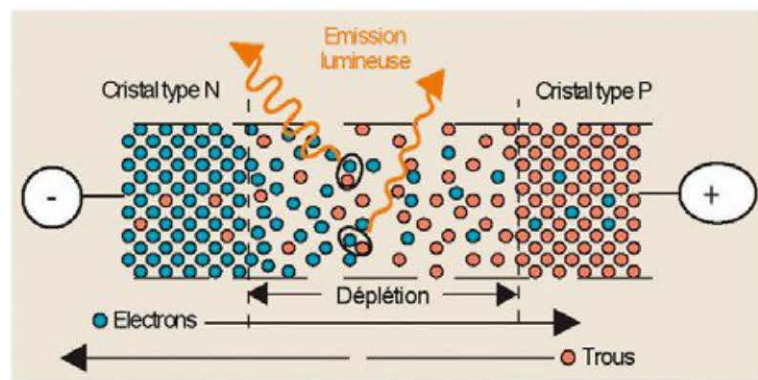


Figure 5.1 – Principe de recombinaison électron/trou au niveau de la zone de déplétion d'une jonction P-N.

La recombinaison électron/trou ne s'accompagne pas forcément d'une émission lumineuse, en raison de phénomènes de recombinaison non radiative que nous allons décrire. L'émission de lumière peut s'expliquer et se décrire grâce à la théorie des bandes énergétiques appliquée aux porteurs de charges (électrons et trous).

Différentes méthodes ont été mises en place afin de favoriser l'émission lumineuse au sein du semi-conducteur (par exemple la mise en œuvre de multiples puits quantiques) et permettre ainsi d'augmenter les rendements des LED.

Pour décrire précisément le phénomène d'émission spontanée des LED, il faut comprendre le principe de recombinaison électron/trou et pour cela comprendre les états énergétiques des atomes qui constituent un semi-conducteur.

Nous allons nous focaliser dans une première étape sur une jonction simple de type P-N (mise en contact de deux matériaux de nature différente).

5.1.1 Description de la jonction P-N

Prenons le cas d'une jonction constituée de GaN dopé avec des atomes différents, l'un de type P (chargé positivement et accepteur d'électrons) et l'autre de type N (chargé négativement et donneur d'électrons). Pour doper un matériau semi-conducteur, on insère des atomes dans le cristal de GaN (hôte) qui confère ensuite au matériau dopé des propriétés électriques différentes suivant la nature des dopants.

À l'équilibre, sans action extérieure appliquée à cette jonction, le système est stable.

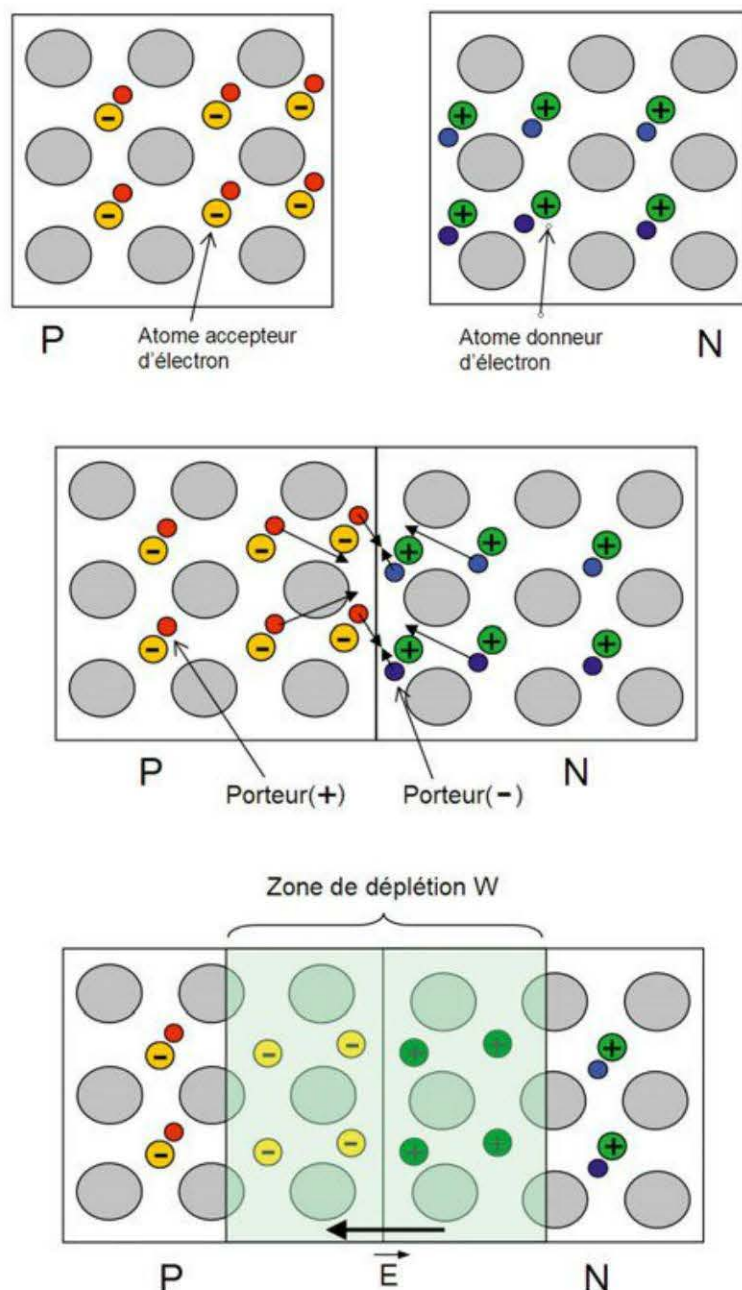


Figure 5.2 – Description d'une jonction P-N.

Lors de la mise en contact des deux matériaux, l'un donneur d'électrons (semi-conducteur de type N) et l'autre accepteur (semi-conducteur de type P), se produit une diffusion « immédiate » des porteurs de charges qui ont tendance à se recombiner pour préserver l'équilibre électrique (figure 5.2). Dans le même temps, les charges fixes (non mobiles) ont tendance à s'opposer à cette diffusion et il se crée un champ électrique au niveau de cette zone de recombinaison qui joue le rôle de « frein » à la diffusion de porteurs mobiles. Une fois l'équilibre atteint, cette zone de déplétion (notée W) est alors dépourvue de charges mobiles, et un champ électrique E , dû aux atomes donneurs et accepteurs qui ont vu leurs charges se recombiner, est créé.

Les LED exploitent ce type de jonction (P-N) et sont constituées de différents types de matériaux suivant les couleurs que l'on souhaite émettre (tableau 5.1). En réalité, il n'y a pas simplement une seule jonction P-N à l'intérieur des LED mais plusieurs et de plusieurs types au sein d'une même LED car il est nécessaire, pour émettre de la lumière avec des bons rendements, de mettre en œuvre une structure plus complexe (et plus efficace).

Tableau 5.1 – Types de semi-conducteurs suivant les couleurs à émettre.

Color Name	Wavelength (nm)	Semiconductor composition
Infrared	880	GaAlAs/GaAs
Ultra Red	660	GaAlAs/GaAlAs
Super Red	633	AlGaInP
Super Orange	612	AlGaInP
Orange	605	GaAsP/GaP
Yellow	585	GaAsP/GaP
Incandescent White	4 500 k (CT)	InGaN/SiC
Pale White	6 500 k (CT)	InGaN/SiC
Cool White	8 000 k (CT)	InGaN/SiC
Pure Green	555	GaP/GaP
Super Blue	470	GaN/SiC
Blue Violet	430	GaN/SiC
Ultraviolet	395	InGaN/SiC

5.1.2 Émission radiative

Dès que l'on polarise la jonction et qu'on lui applique un courant (par conséquent dès que l'on fournit et déplace des électrons), les atomes sont excités et leur niveau énergétique augmente. En revenant à leur état énergétique plus stable, par recombinaison électron/trou, il y a émission d'un photon dont l'énergie correspond justement à la différence entre le niveau énergétique stable et le niveau énergétique excité.

Cette recombinaison électron/trou se produit au niveau de la zone de déplétion notée W (figure 5.3).

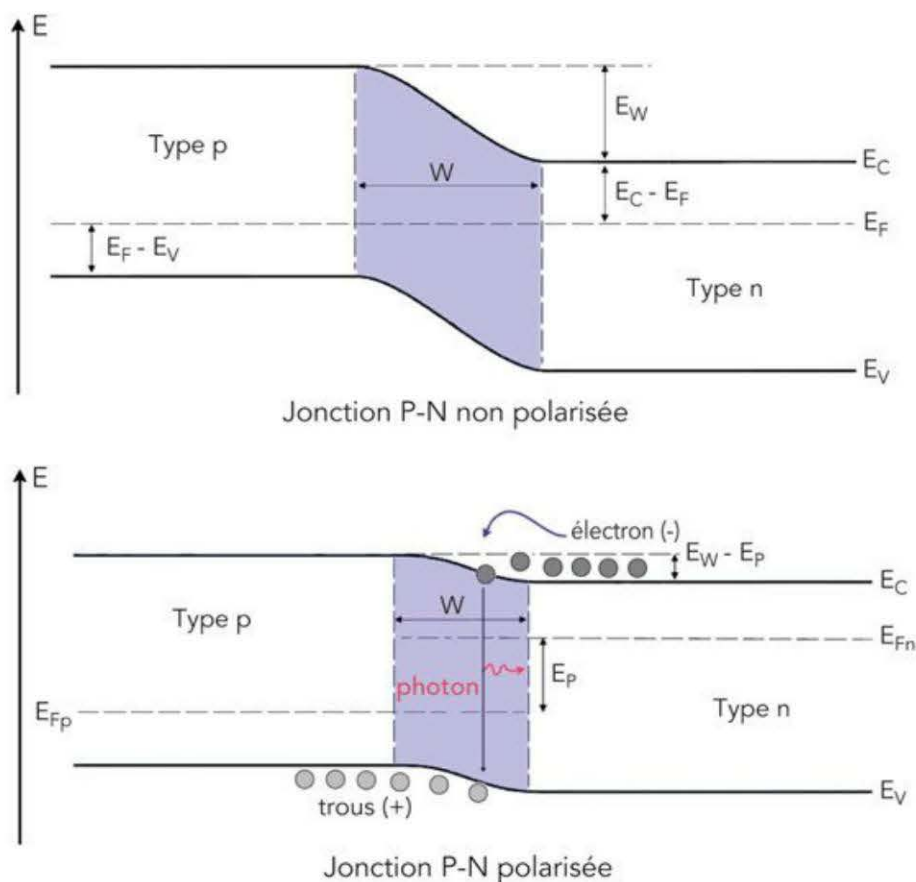


Figure 5.3 – Principe de recombinaison électron/trou – Niveaux énergétiques.

La zone de déplétion W et le champ électrique qui y est présent créent un potentiel de diffusion. C'est ce potentiel de diffusion qu'il faut « dépasser » pour être en mesure d'injecter des charges, et c'est ce potentiel qui représente le seuil de fonctionnement du semi-conducteur.

Comme nous l'avons précisé précédemment, c'est dans la zone de déplétion que doit se faire la recombinaison électron/trou pour non seulement émettre un photon, mais aussi l'extraire vers l'extérieur du semi-conducteur.

Mais les propriétés même du cristal dopé P (dont les quantités de dopant ont un optimum, cf. [22] page 123) ainsi que la mobilité des porteurs de charges positives, qui est bien plus faible que celle des électrons, ont tendance à imposer une recombinaison plus proche de la zone P voire au niveau de cette zone. Or, la forte densité d'impuretés dans un cristal de ce type, additionnée au fait que ses propriétés de résistance électriques ne sont pas très favorables, rend la génération de photon difficile et diminue le rendement.

C'est la raison pour laquelle une méthode qui consiste à bloquer les électrons pour les confiner dans la zone de déplétion lors de la recombinaison, avant la zone de type P, a été développée. Pour cela, une couche complémentaire (en général de AlGaN) est mise en œuvre dans le semi-conducteur pour stopper les électrons et éviter que les recombinaisons puissent avoir lieu hors de la zone de déplétion.

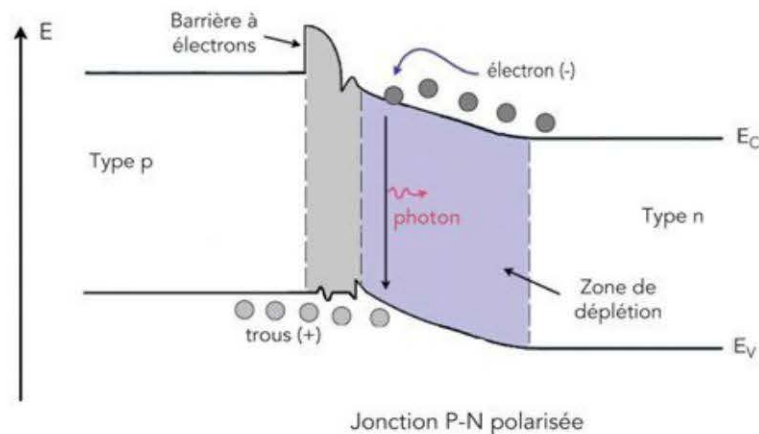


Figure 5.4 – Recombinaison électronique dans la zone de déplétion favorisée par la barrière à électrons.

Pour accentuer encore le confinement des électrons dans la zone de déplétion et améliorer de ce fait l'efficacité des semi-conducteurs, une méthode consiste à intégrer aussi des puits quantiques multiples (*Multiple Quantum Well* – MQW). Ces fines couches de matériaux vont contrôler l'injection des électrons suivant une direction privilégiée, avec comme conséquence de maîtriser l'émission lumineuse au sein du semi-conducteur.

La probabilité d'occupation d'un niveau énergétique pour un électron donné est définie de façon statistique par la densité de probabilité de Fermi-Dirac. Ce niveau énergétique (dit « niveau de Fermi » et noté E_F) dépend de la température du matériau.

5.1 Le mécanisme d'émission – théorie des bandes de valence

À l'équilibre thermodynamique, le niveau de Fermi est le même partout quelle que soit la nature des matériaux (homogènes ou inhomogènes).

Pour aller plus loin

L'émission spontanée est la caractéristique principale qui différencie les LED des lasers, qui possèdent, eux, un milieu amplificateur constitué d'une zone ayant des parois réfléchissantes et semi-réfléchissantes. Dans le cas des lasers, l'émission est dite stimulée alors que, pour les LED, le phénomène qui prédomine largement est celui de l'émission spontanée.

Suivant les semi-conducteurs, les transitions énergétiques des bandes de valence se font de façon directe (*direct-gaps*, figure 5.5 à gauche), c'est le cas pour les semi-conducteurs comme le GaAs, le GaN ou encore le ZnSe [72]. Ce type de transition est en général bien adapté pour l'émission et l'absorption de lumière. Des transitions indirectes (*indirect-gaps*) dans les semi-conducteurs de type GaP ou SiC requièrent quant à elles une action complémentaire, via une troisième particule par exemple (figure 5.5, à droite).

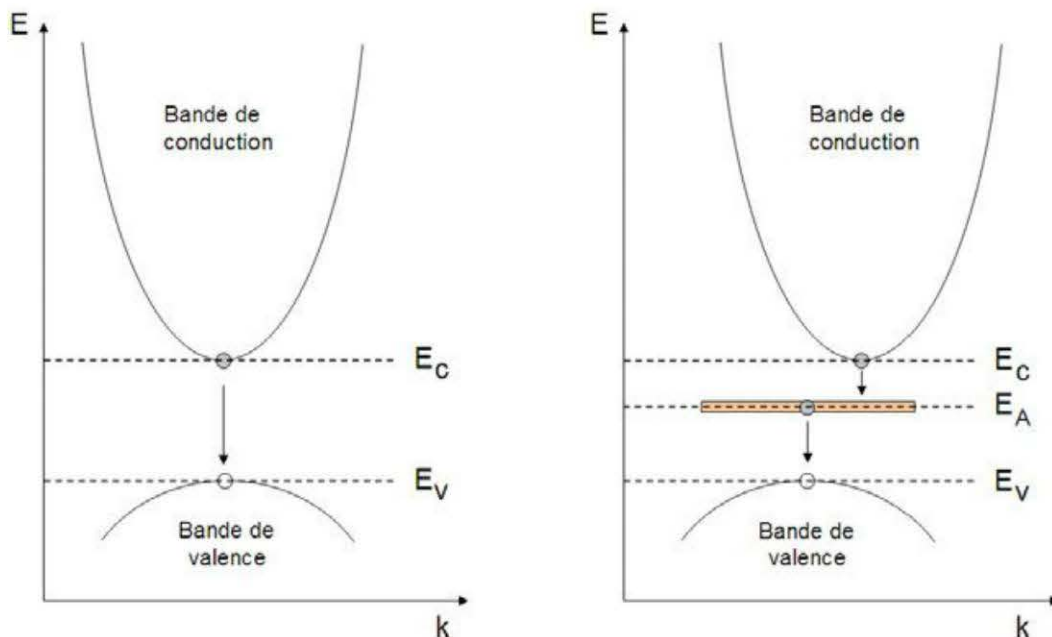


Figure 5.5 – Transition électronique entre bande de conduction et bande de valence.

Les transitions correspondent à des valeurs énergétiques bien déterminées, c'est la raison pour laquelle un même semi-conducteur émet des photons d'énergies différentes mais néanmoins proches les unes des autres (monochromaticité).

L'énergie du photon généré lors de la recombinaison électron/trou se définit de la manière suivante :

$$E_{\text{photon}} = E_c - E_v = h \nu$$

avec h : constante de Planck ; et ν : fréquence de l'émission lumineuse.

Suivant le niveau d'excitation et les propriétés du semi-conducteur, certains atomes et leurs électrons peuvent se situer d'un point de vue énergétique (au niveau de la bande de conduction) dans une position légèrement différente de celle de la position la plus basse permise.

De ce fait, lors des recombinaisons électron/trou, les énergies émises sont toutes différentes tout en étant contenues dans un intervalle qui correspond à la largeur spectrale d'émission du semi-conducteur (figure 5.6). Il faut noter que lorsque la température augmente, la probabilité de recombinaison diminue à cause de la réduction du nombre de porteurs de charge (cf. [22] page 55).

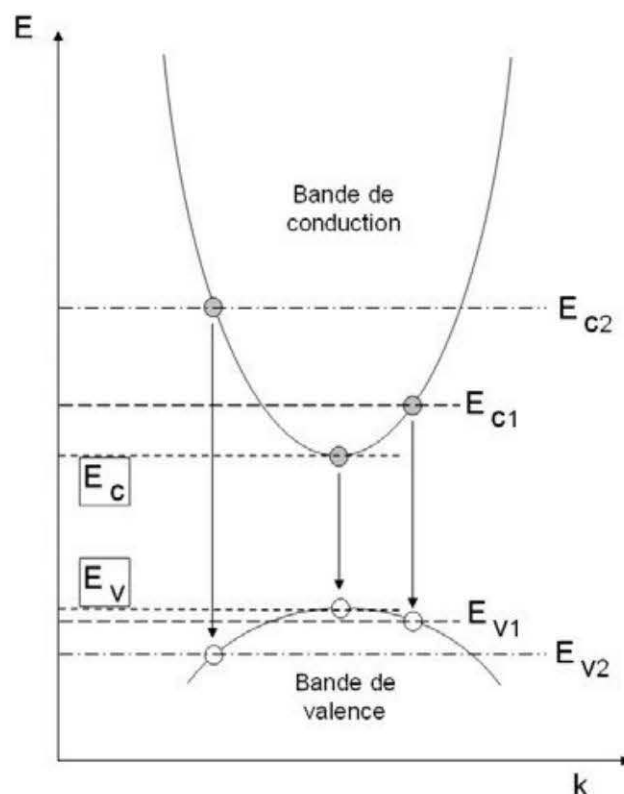


Figure 5.6 – Transition électronique entre bande de conduction et bande de valence pour plusieurs niveaux énergétiques.

Cette dispersion autour de la valeur centrale la plus basse pour la bande de conduction (E_c) et la plus haute pour la bande de valence (E_v) suit une loi parabolique. Ainsi, nous avons pour les électrons et les trous les équations de dispersion suivantes :

5.1 Le mécanisme d'émission – théorie des bandes de valence

- ▶ Loi de dispersion pour les électrons (bande de conduction) :

$$E = E_c + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*}$$

- ▶ Loi de dispersion pour les trous (bande de valence) :

$$E = E_v - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*}$$

avec :

- ▶ $\hbar$: constante de Planck divisée par 2π ;
- ▶ k : vecteur d'onde ;
- ▶ m_e^* : masse effective des électrons ;
- ▶ m_h^* : masse effective des trous.

Cette émission lumineuse de faible largeur spectrale confère aux LED la caractéristique d'une émission lumineuse « relativement » monochromatique, et elle est souvent considérée comme telle même si cette largeur spectrale à mi-hauteur (ce qui permet d'évaluer la monochromaticité) se situe autour de 20 à 40 nm de façon générale et peut atteindre 60 ou 80 nm dans certains cas (figure 5.7).

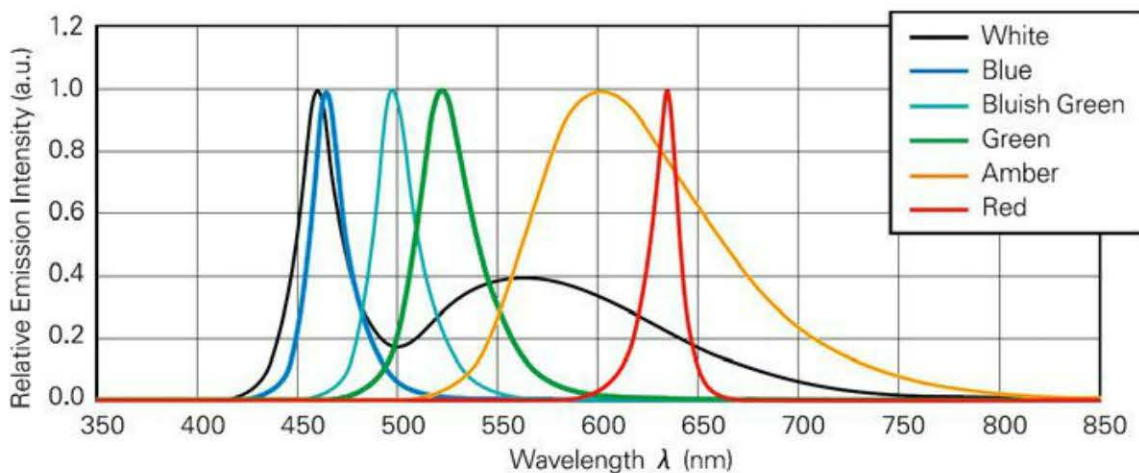


Figure 5.7 – Spectre des principales LED fabriquées par Nichia (catalogue 2011).

Cette monochromaticité provient du fait que les états excités des semi-conducteurs constituant les LED peuvent avoir des niveaux différents (d'où les différentes longueurs d'onde et donc les différentes nuances de couleur émises au sein d'une même couleur), mais ces différences de niveaux ne constituent pas un large panel énergétique. Ainsi, si l'on prend le cas d'une LED verte (figure 5.8), on observe un pic pour une longueur d'onde autour de 520 nm, et tout autour, à des puissances lumineuses plus faibles, des longueurs d'onde qui vont d'un bleu/vert, à un vert/orangé.

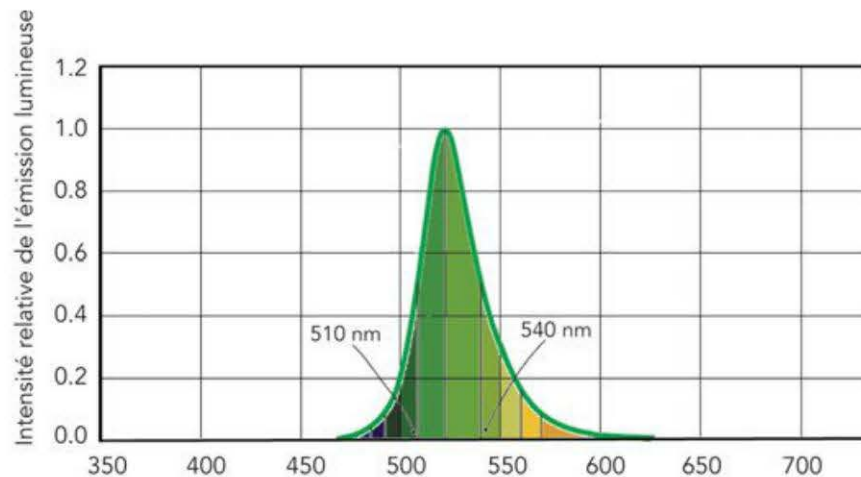


Figure 5.8 – Spectre typique d'une LED verte de longueur d'onde « pic » à 520 nm.

5.1.3 Émission non radiative

Nous avons commencé à exposer ce phénomène de recombinaison non radiative (au niveau de la zone du matériau dopé P).

Les mécanismes de recombinaison non radiative sont multiples, et les principaux sont les suivants : recombinaison au niveau de défauts cristallins, phénomène Auger ou encore émission de *phonons* (vibration mécanique du réseau cristallin) au niveau d'impuretés (cf. [66] page 5).

De façon générale, le phénomène non radiatif prépondérant lors d'une recombinaison électron/trou se fait suivant le mécanisme Auger (figure 5.9 c). La recombinaison génère une énergie qui est transmise soit à un électron dans la bande de conduction qui atteint alors un niveau supérieur, soit à un trou au niveau de la bande de valence qui lui inférieure.

Ce mécanisme de recombinaison non radiative est d'autant plus prépondérant que le courant injecté est fort (forte densité de porteur de charge), ce qui est un réel problème pour l'émission lumineuse des LED qui justement se produit avec des courants forts.

Différentes causes sont à l'origine de ce type de recombinaison non radiative, que ce soit la présence de défauts dans ce cristal, d'atomes étrangers ou encore de dislocations cristallines. Au sein du semi-conducteur, ces recombinaisons se font avec des niveaux d'énergie différents, qui n'ont rien à voir avec les niveaux des transitions énergétiques radiatives (avec émission de photons, figure 5.9 a).

5.2 Types de semi-conducteurs

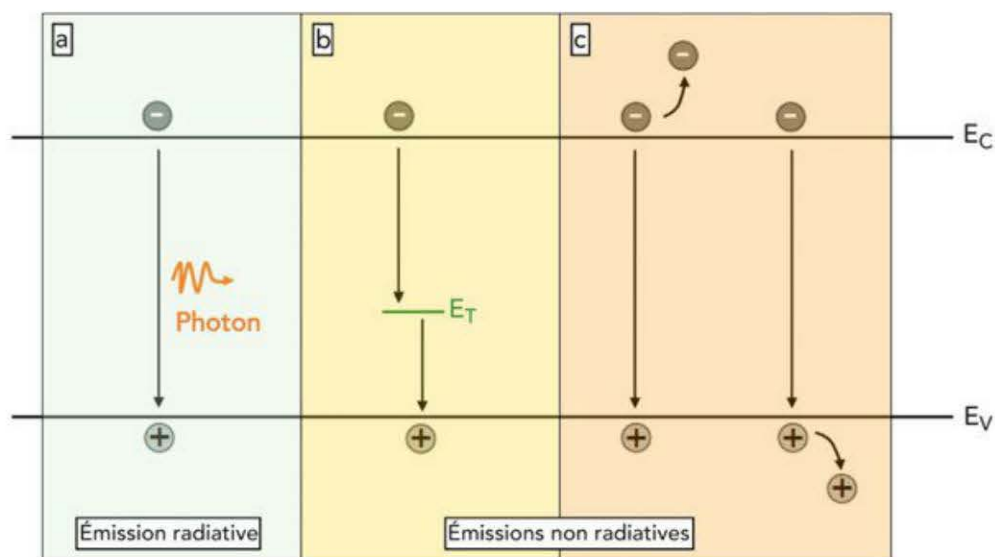


Figure 5.9 – Émissions radiatives et non radiatives.

Nous pouvons aussi noter les recombinaisons qui se font avec des états énergétiques transitoires (figure 5.9 b) plus en profondeur dans le semi-conducteur.

Enfin, il existe également des recombinaisons de surface dues aux discontinuités du matériau (les atomes de surface du semi-conducteur n'ont pas de voisin). Les propriétés du semi-conducteur sont alors différentes en surface, comparées à celles du cristal interne au semi-conducteur.

Toutes ces recombinaisons qui ne génèrent pas de photons constituent l'une des principales sources de perte d'efficacité des semi-conducteurs.

5.2 Types de semi-conducteurs

Semi-conducteur à structure latérale dite « conventionnelle »

Les premières LED commerciales utilisaient le saphir comme substrat pour des raisons principalement économiques. Mais la conductivité électrique de ce substrat étant médiocre, les développements de LED mettant en œuvre ce type de substrat ont eu recours et continuent à avoir recours à une géométrie latérale (figure 5.10 ; cf. [73] page 4).

Les deux électrodes sont alors soudées de telle sorte qu'elles imposent au courant de traverser la zone active du semi-conducteur sans traverser le substrat peu conducteur (figure 5.11).

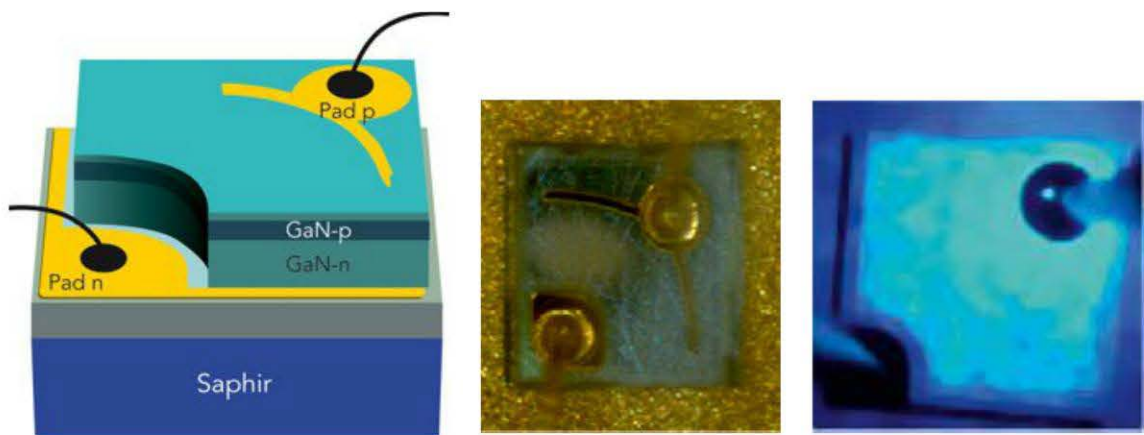


Figure 5.10 – Structure latérale (dite conventionnelle) de semi-conducteur.

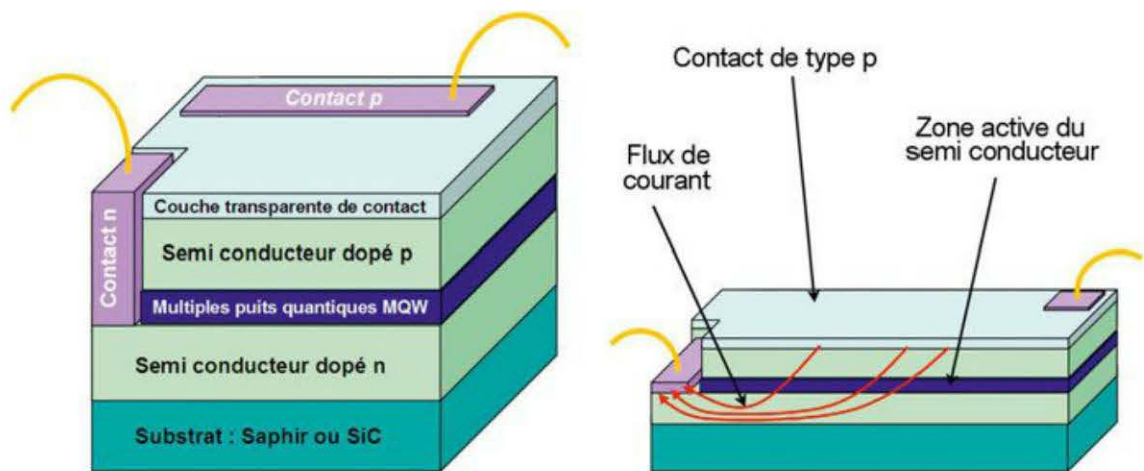


Figure 5.11 – Structure latérale de semi-conducteur : en rouge les lignes de courant.

Le flux de courant entre les deux électrodes est de façon générale non uniforme, notamment pour les LED avec un semi-conducteur de petite taille (< 200 à $300 \mu\text{m}$ de côté) car le contact ohmique au niveau de la cathode (type P) est réduit. Cela pose des problèmes d'efficacité et c'est la raison pour laquelle des améliorations ont été apportées en particulier sur les LED dites de puissance ($> 0,5 \text{ W}$ ou $> 150 \text{ mA}$ environ).

5.2.1 Semi-conducteur à structure verticale

Au départ, les semi-conducteurs dédiés aux LED étaient souvent de type vertical (une électrode sur le dessus, l'autre étant constituée par le dessous du semi-conducteur ; cf. figure 5.10) L'émission lumineuse s'effectuait par les côtés du semi-conducteur dont le sommet était opaque (électrode non transparente). L'extraction lumineuse était peu efficace en raison de cette méthode d'extraction. Aujourd'hui, les électrodes

5.2 Types de semi-conducteurs

transparentes permettent d'atteindre de bonnes efficacités d'extraction lumineuse avec ce type de structures.

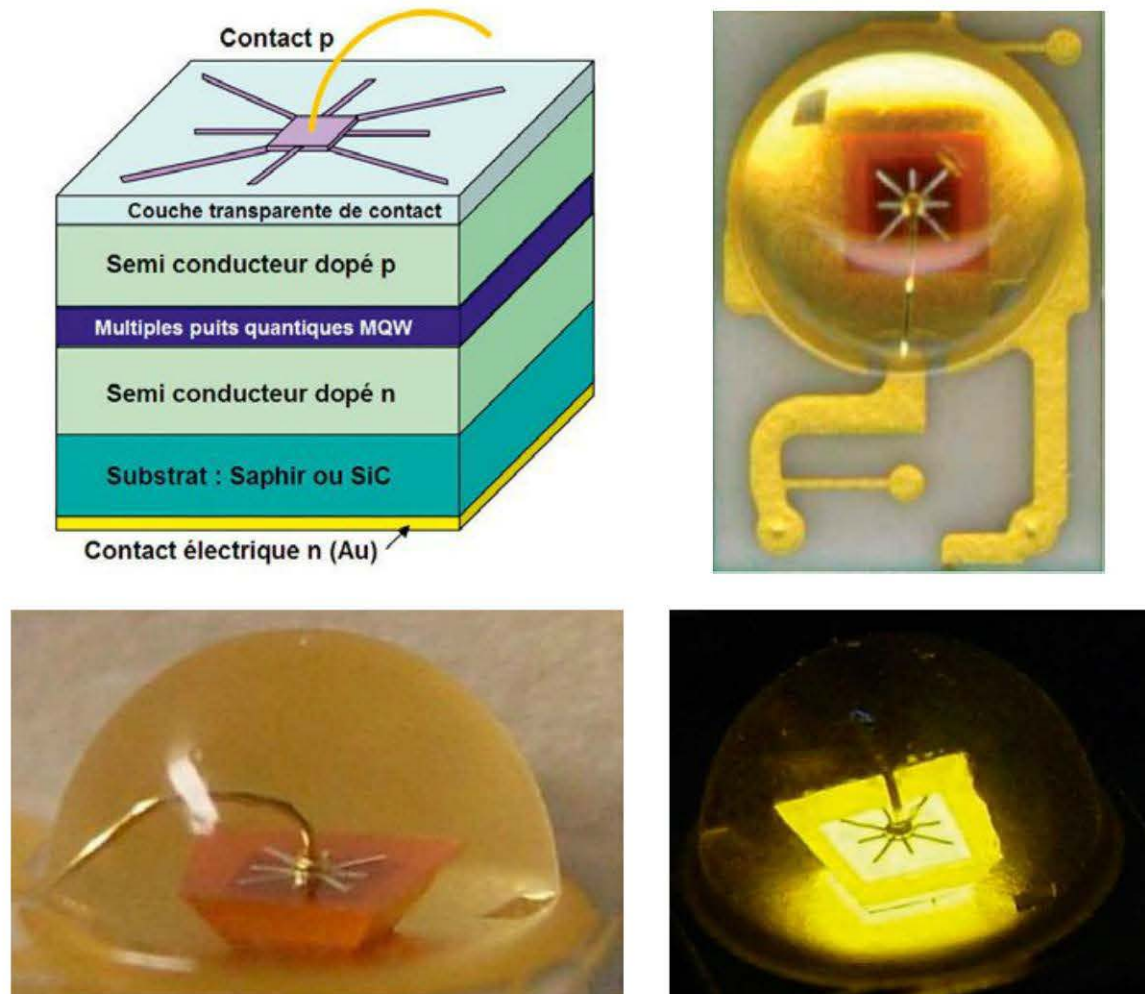


Figure 5.12 – Structure verticale de semi-conducteur (Luxeon Rebel – Philips Lumileds).

Un des avantages de la méthode verticale réside dans le fait que la puce semi-conductrice est soudée (brasage d'alliage d'argent le plus souvent) sur le support de la LED, ce qui permet de dissiper la chaleur dégagée par le semi-conducteur.

Les premières versions de LED à structure de semi-conducteur verticale possédaient une électrode généralement au centre du sommet pour les LED de puissance (et plutôt sur les angles pour les LED de faible puissance, inférieures à 0,1 W). Pour des raisons d'amélioration de l'extraction lumineuse et également d'augmentation de courant injecté, les fabricants ont développé des structures verticales possédant plusieurs contacts sur le dessus (figure 5.13), avec des géométries différentes de dépôt des contacts (en or le plus souvent) et des ramifications pour augmenter la répartition de l'électrode sur toute la surface de la cathode (du côté du GaN dopé P).

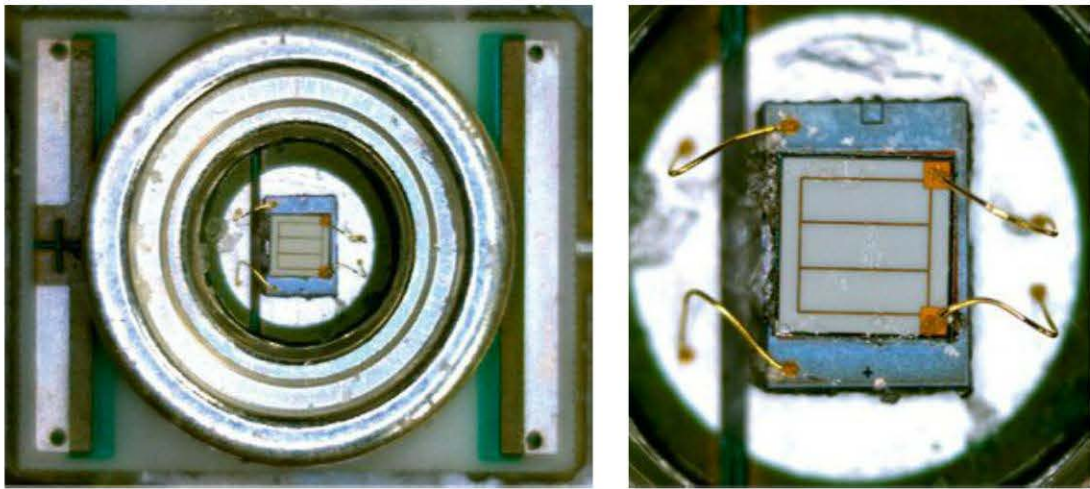
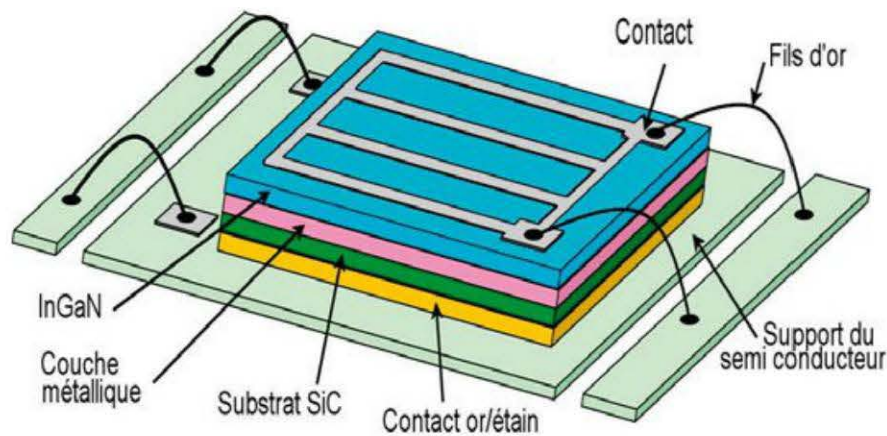


Figure 5.13 – Structure verticale de semi-conducteur (XRE – CREE).

5.2.2 Semi-conducteur à structure latérale de type *flip chip*

La structure *flip chip* repose sur une technologie qui a plus de vingt ans aujourd'hui, à savoir les BGA (*Ball Grid Array*). Elle consiste à réaliser une alimentation électrique par des microbilles en dessous du système électronique, qui permet en même temps de dissiper la chaleur que le système dégage. Les LED de type *flip chip* utilisent ce procédé de fabrication depuis le milieu des années 2000 (figure 5.14), et le pionnier en la matière fut Lumileds.

L'un des avantages offerts par cette technologie est l'absence de contact par fil d'or, ce qui évite de potentiels problèmes de rupture (même si la technologie de *bonding* – contact par fils d'or – peut être aujourd'hui considérée comme robuste et bien maîtrisée).

5.2 Types de semi-conducteurs

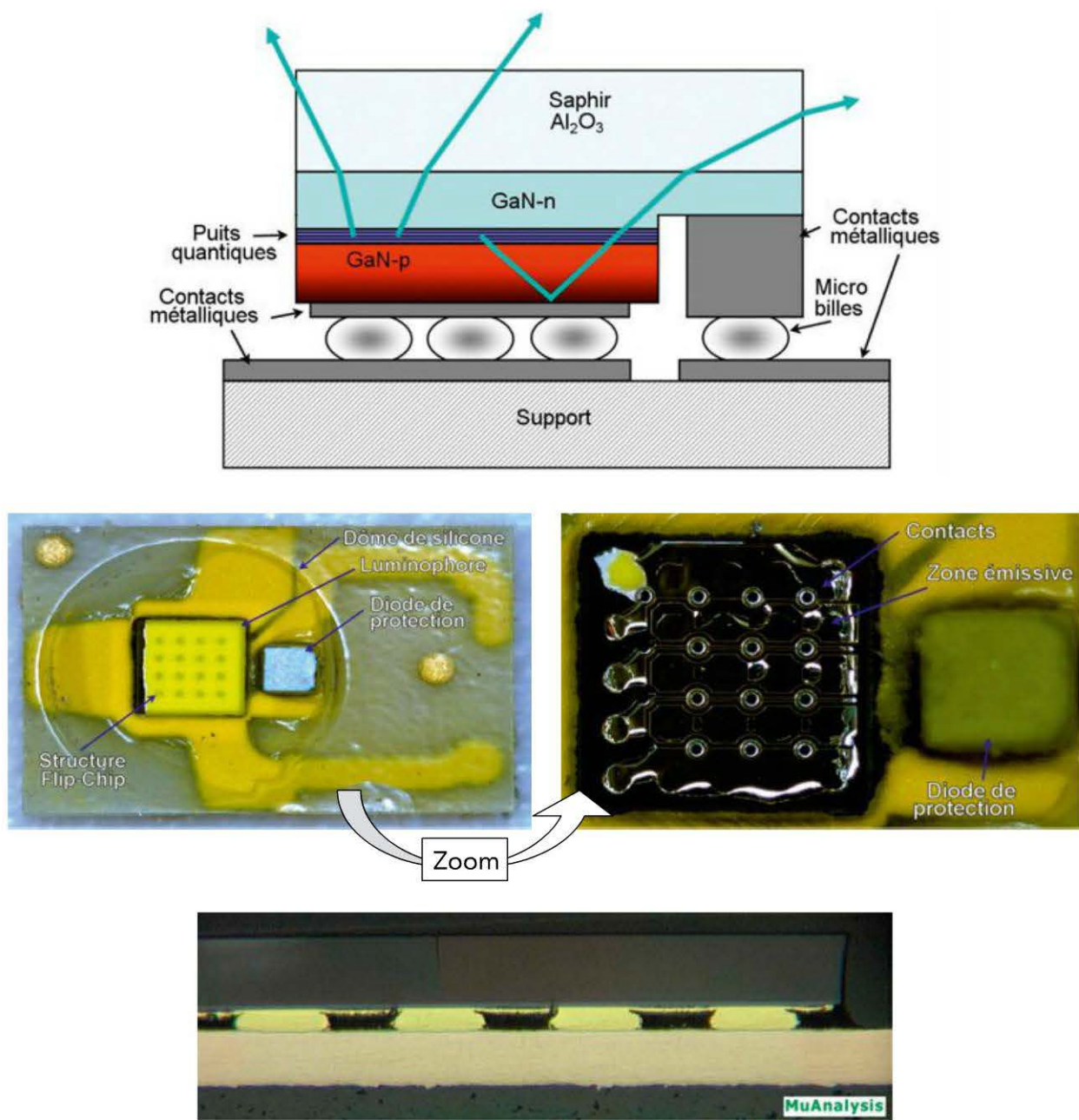


Figure 5.14 – Structure *flip chip* (Philips Lumileds).

De haut en bas et de gauche à droite : schéma de la structure ; LED vue de dessus ; zoom sur partie émissive de la LED (luminophore retiré) ; vue en coupe aux rayons X de la LED (MuAnalysis).

Un autre avantage de cette technologie est de ne plus avoir de fils de contact qui provoquent de légères zones d'ombre sur la surface d'émission. De cette façon, la surface lumineuse est uniforme et peut être mise en forme de façon plus aisée et plus précise (figure 5.15).

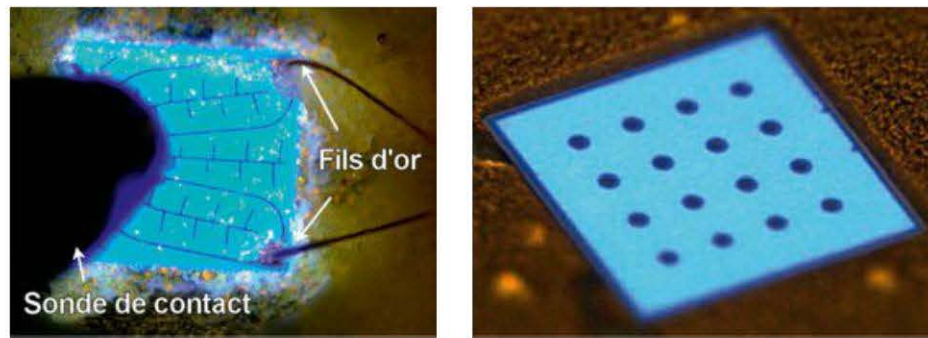


Figure 5.15 – Structure latérale (fils d'or) à gauche et structure *flip chip* à droite.

5.2.3 Semi-conducteur à structure de type *direct attach*

Cette structure de semi-conducteur mise au point autour de 2009-2010 et intégrée dans les LED de puissance fin 2011 (notamment par le fabricant CREE ; figure 5.16) offre une meilleure efficacité et peut être alimentée par des courants plus importants que les puces semi-conductrices plus conventionnelles (1 500 mA pour des puces de 900 μm de côté contre 1 000 mA habituellement).

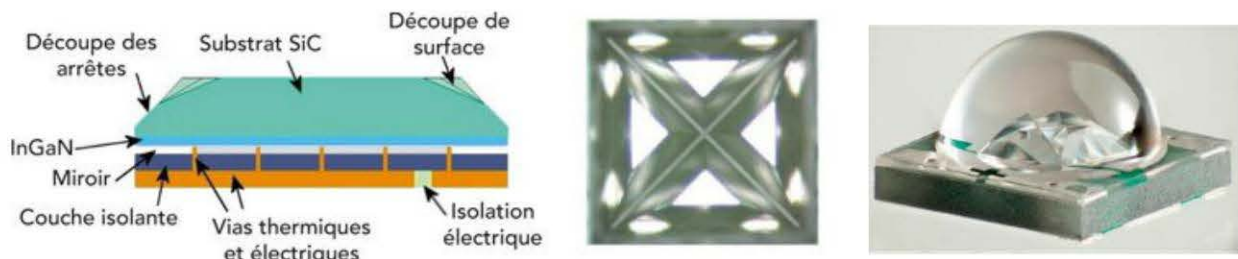


Figure 5.16 – Structure verticale de type « *direct attach* » (CREE).

Cette technologie récente ne permet pas encore aux fabricants de réaliser des dépôts de luminophores très précis d'un point de vue épaisseur, comme sur les puces plus conventionnelles dont la surface est plane. Or c'est en partie la maîtrise de l'épaisseur des luminophores qui confère aux LED leur qualité d'uniformité d'émission lumineuse et de blanc reconstitué (bleu + luminophore jaune). Malgré ce défaut de maîtrise de l'épaisseur, les performances atteintes sont très intéressantes (avec des niveaux d'indice de rendu des couleurs dépassant les 80).

5.3 Méthode de fabrication

Le processus industriel pour la croissance des substrats (dédiés à la croissance épitaxiale seulement, ou substrat hôte) est commun à tous les processus de fabrication

5.3 Méthode de fabrication

des puces semi-conductrices. Seul le type de substrat reste de la responsabilité des fabricants (saphir, carbure de silicium, autre).

La croissance épitaxiale des semi-conducteurs sur les différents substrats dépend des architectures définies par les fabricants de LED (verticales, latérales, *flip chip*), mais les processus globaux et les systèmes de croissance sont similaires. Seules certaines étapes intermédiaires changent.

La mise en œuvre d'un substrat hôte se fait après avoir enlevé le substrat qui a permis la croissance épitaxiale (cette étape a lieu pour les structures de type verticales, mais pour les structures latérales et *flip chip* la méthode diffère légèrement).

L'étape suivante consiste à mettre en œuvre les couches dédiées à la connexion électrique. Elle est réalisée de différentes façons suivant les types de LED. Cette étape est suivie par une dernière action qui consiste à mettre en œuvre les différentes méthodes d'amélioration de l'extraction lumineuse (rugosité de surface par exemple).

Enfin, le test et la découpe des puces unitaires terminent le processus de fabrication.

5.3.1 La fabrication des substrats en saphir et SiC

La méthode la plus connue et la plus utilisée pour la croissance de cristal de silicium est la technique de Czochralski (cf. [67] page 333), en phase liquide.

Dans un premier temps, on fabrique un bloc de matière dans lequel on va découper un cylindre du diamètre désiré. Puis l'opération de découpe fine du futur *wafer* a lieu (figure 5.17) et on finit par un polissage fin (en général inférieur au nanomètre).



Figure 5.17 – Wafer saphir (gauche) et carbure de silicium (droite).

5.3.2 Épitaxie des semi-conducteurs dédiés aux LED : la couche active

La croissance des cristaux sur les différents substrats (saphir, carbure de silicium, silicium, nitrure de galium ou encore oxyde de zinc) se fait généralement selon l'une ou l'autre des manières suivantes : dépôt en phase vapeur (CVD – *Chemical Vapor Deposition*) ou jet moléculaire (MBE – *Molecular Beam Epitaxy*).

La plus employée est une méthode de dépôt en phase vapeur, appelée MOCVD (*Metal Organic Chemical Vapor Deposition*). Cette méthode peut être mise en œuvre de plusieurs façons : verticale, horizontale, verticale modifiée (type « pancake ») ou à flux descendant (figure 5.18).

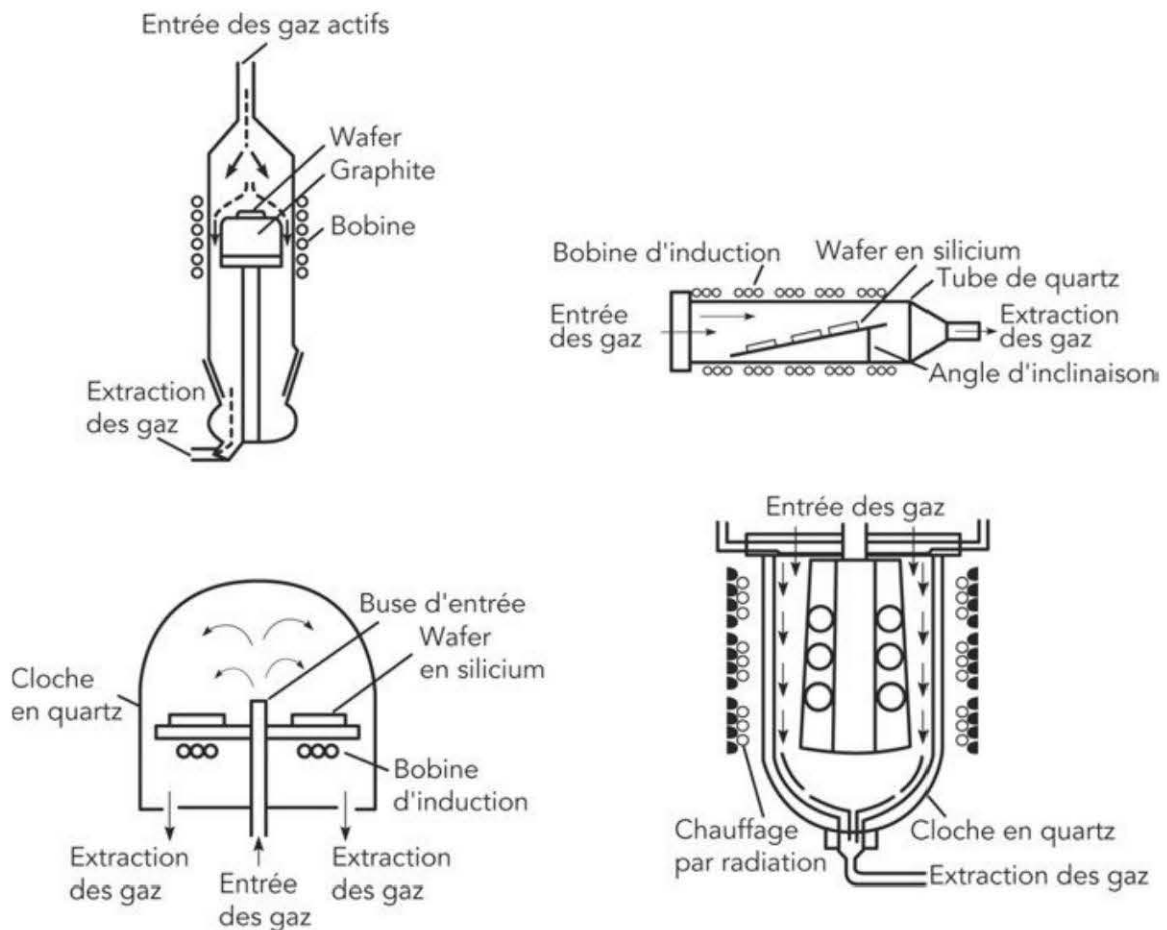


Figure 5.18 – Différents types de réacteurs CVD (*Chemical Vapor Deposition*). De haut en bas et de gauche à droite : verticale, horizontale, pancake, flux descendant.

5.3 Méthode de fabrication

Cette méthode est bien connue de l'industrie des semi-conducteurs, et elle a été utilisée et améliorée par Nakamura à la fin des années 1980 (figure 5.19), permettant de réaliser des LED bleues suffisamment efficaces et puissantes pour mettre au point les premières LED blanches commerciales.

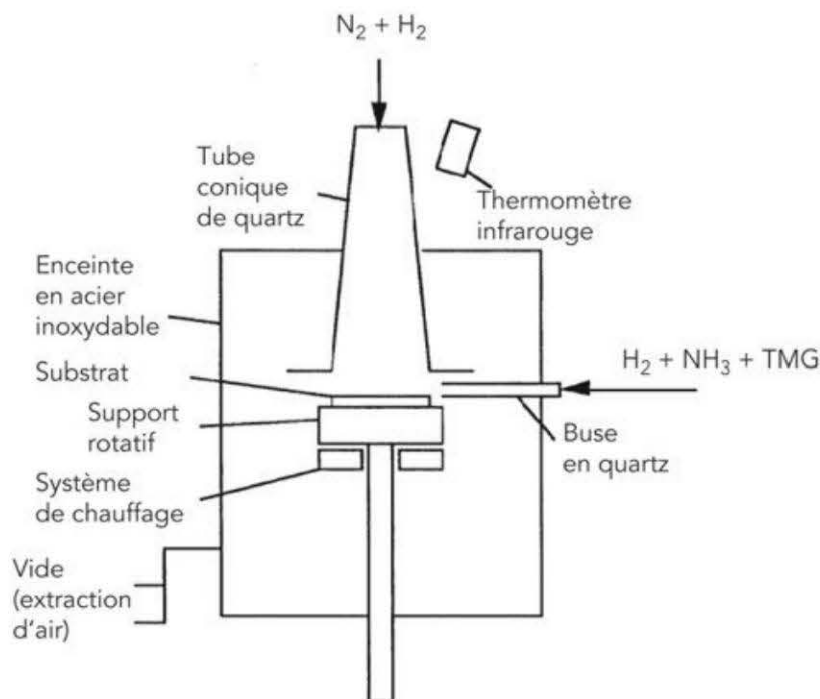


Figure 5.19 – Évaporateur à double flux
(procédé développé par Nakamura, 1989).

La croissance épitaxiale par évaporation (CVD) est aussi connue sous le nom de VPE (*Vapor-Phase Epitaxy*) et peut être réalisée à pression atmosphérique (APCVD – *Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition*), ou à faible pression (LPCVD – *Low Pressure Chemical Vapor Deposition*).

Une variante à cette méthode employant également le dépôt en phase vapeur avec d'autres types de composés est appelée HVPE (*Hybrid Vapor-Phase Epitaxy*). Elle présente comme avantage de réaliser des dépôts plus rapides que la méthode MOCVD mais nécessite des températures plus élevées.

La méthode par jet moléculaire (MBE – *Molecular Beam Epitaxy* ; figure 5.20) est plus lente, typiquement 1 $\mu\text{m/h}$. (cf. [67]). Elle est réalisée en ultravide (autour de 10^{-8} Pa).

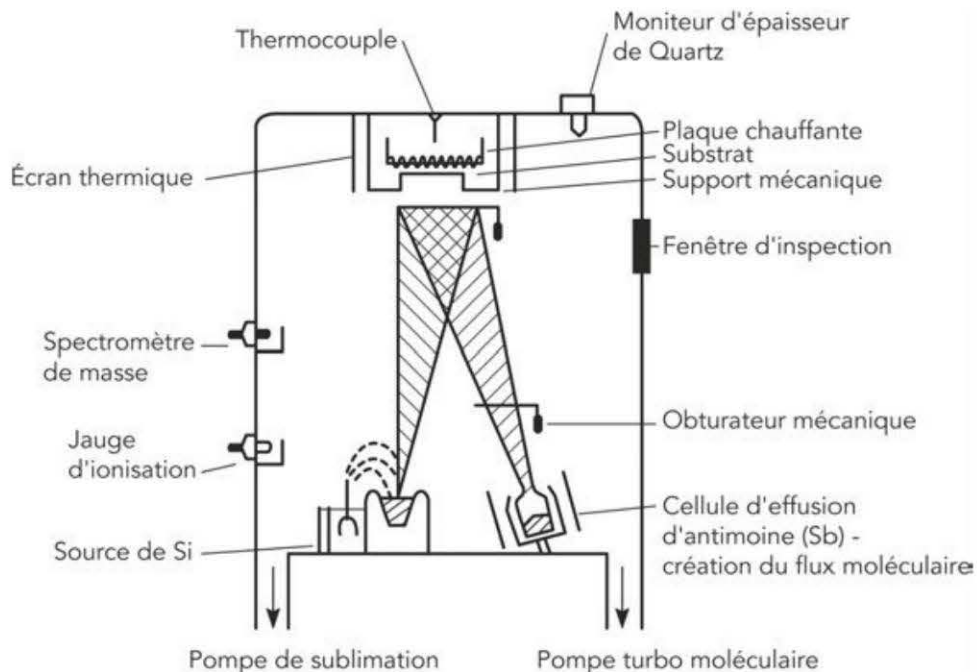
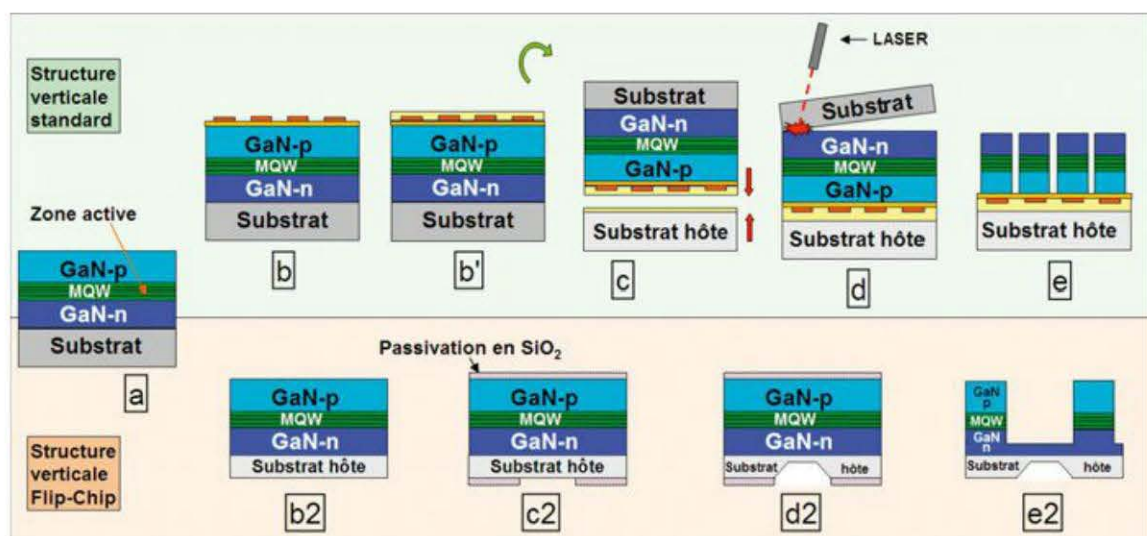


Figure 5.20 – Épitaxie de type MBE.

5.3.3 Les étapes de la fabrication : du wafer épitaxié jusqu'au *bonding*

Suivant les types de structures de semi-conducteurs, les méthodes industrielles diffèrent quelque peu (figure 5.21) mais le choix de différentes méthodes peut aussi intervenir pour une même structure, notamment en termes de découpage des matériaux (exemple : découpe diamant ou découpe laser).

Figure 5.21 – Étapes de fabrication de semi-conducteur de types vertical standard et *flip chip*.

5.3 Méthode de fabrication

Malgré ces différences et ces nuances au niveau du processus de fabrication entre structures de types latérale, verticale et *flip chip*, beaucoup d'étapes sont communes ou relèvent de méthodes très proches. Nous allons donc décrire l'une d'entre elles pour illustrer l'ensemble de ces étapes.

Après avoir réalisé l'épitaxie des couches actives sur le substrat adéquat (souvent en saphir – figure 5.22a), il faut préparer la structure d'ensemble du semi-conducteur, à savoir sa géométrie verticale ou latérale.

Pour le type de structure verticale standard, la surface du côté du GaN dopé P est traitée et recouverte d'une couche permettant de jouer le rôle de miroir et d'accroche sur le substrat hôte (en SiC le plus souvent). Puis le substrat initial est enlevé au laser et, enfin, le *wafer* (constitué du substrat final) est « prédécoupé » soit par une méthode mécanique soit par laser (figure 5.22b).

La structure de type *flip chip* présente une différence du point de vue du substrat hôte. En effet, le substrat initial n'est pas enlevé mais mis en forme après que le système a été passivé pour que l'attaque sélective puisse se faire sur les zones qui intéressent (figure 5.22c). La suite du processus reste proche de celle de la structure verticale standard, avec une découpe de la surface du *wafer* pour créer dans un second temps les puces semi-conductrices unitaires.

L'étape suivante consiste à réaliser la couche de contact qui va permettre d'injecter le courant d'alimentation, *via* les contacts ohmiques (cette couche est nécessaire pour permettre la soudure du fil d'or d'alimentation pour les structures verticales standard et latérales conventionnelles). Un dépôt est alors réalisé (TCL – *Transparent Contact Layer*) sur le sommet du *wafer*.

Suivant la technologie de semi-conducteur verticale ou latérale, le dépôt du contact sur lequel va être réalisé le *bonding* se fait directement sur la surface TCL (structure verticale) ou après attaque d'une partie de la surface (*Mesa Etching*, cas des structures latérales).

Les puces sont ensuite découpées unitairement après avoir été testées. Elles sont mises sur un support qui va permettre de les intégrer sur le support de la LED.

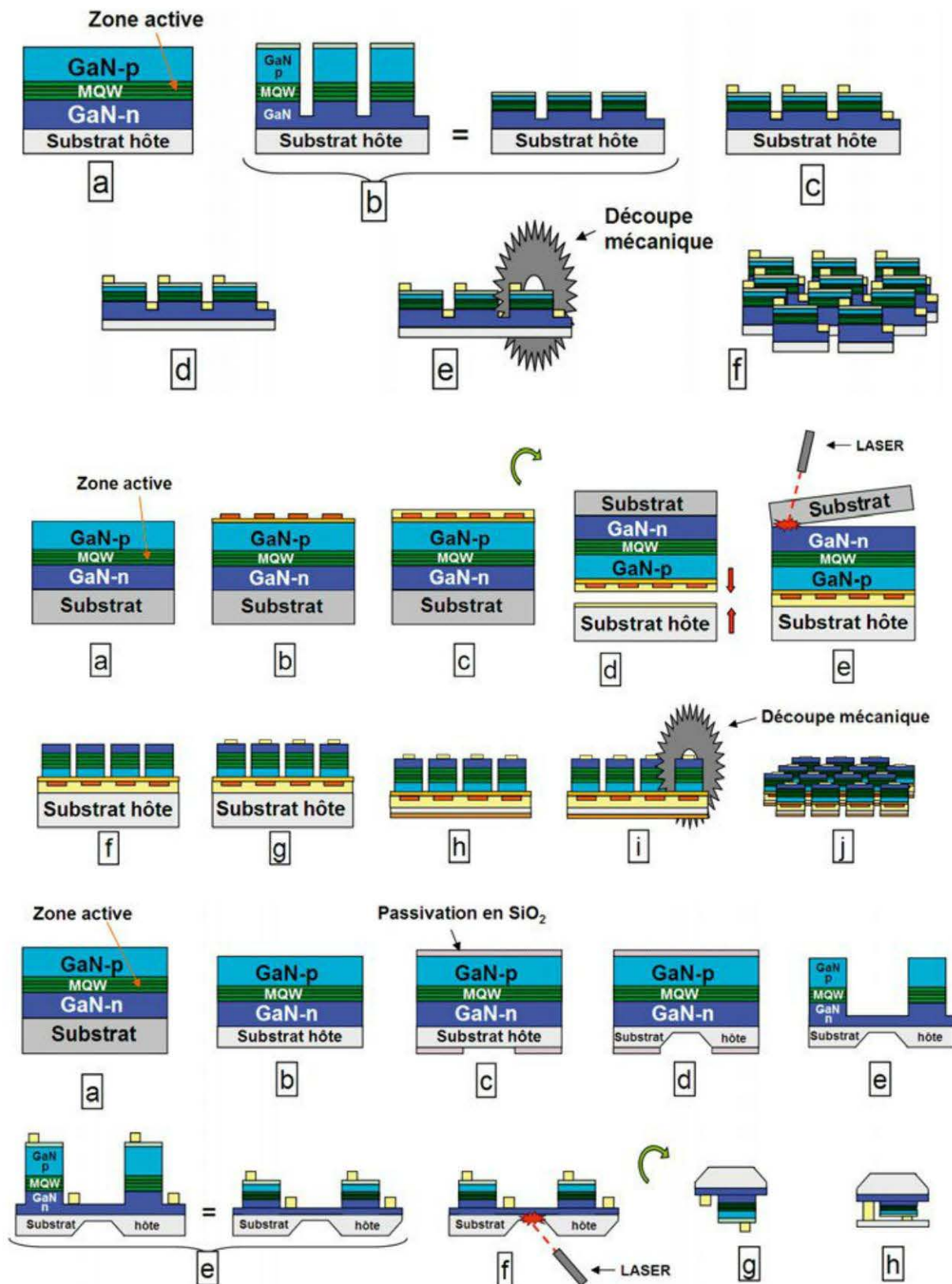


Figure 5.22 – Étapes de fabrication de semi-conducteur
(de haut en bas : structure latérale (de a à f), structure verticale standard (de a à j),
structure verticale *flip chip* (de a à h)).

5.4 Évolutions récentes

Les axes d'amélioration entre 2000 et 2010, notamment pour les LED de puissance (courants d'alimentation supérieurs à 150 mA), ont été les suivants (figure 5.23) :

- ▶ optimisation des géométries et choix de matériaux transparents pour améliorer l'extraction lumineuse ;
- ▶ structures de semi-conducteur différentes et processus de fabrication associés améliorés ;
- ▶ amélioration des contacts ohmiques pour l'injection de courant.

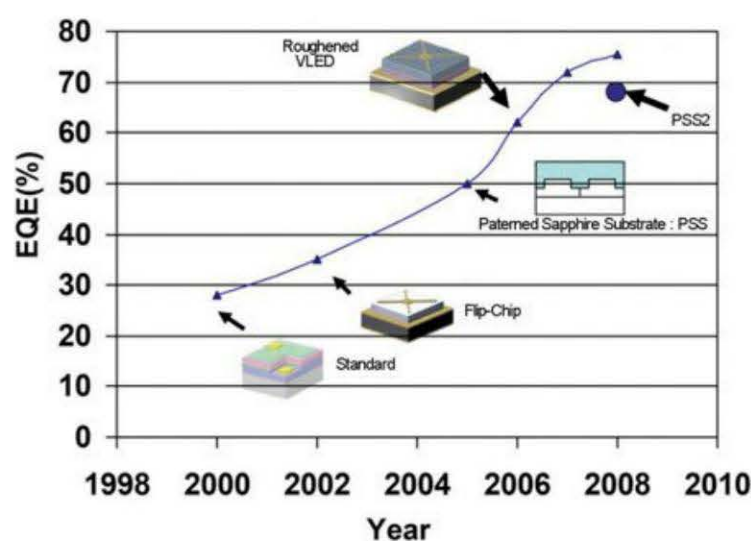


Figure 5.23 – Évolution des technologies de semi-conducteur (Nakamura).

5.4.1 Géométrie des semi-conducteurs

Les semi-conducteurs avaient au départ une géométrie de type parallélépipédique (1991 à 1998 ; figure 5.24), puis les processus industriels ont permis de mettre en forme des matériaux, notamment de forme conique, pour une extraction de lumière plus importante.

Par la suite, des géométries de type triangulaire ou hexagonal ont été développées, mais elles sont encore en 2012 au stade de processus de laboratoire ou au stade préindustriel. Nous les verrons apparaître dans les prochaines années très certainement.

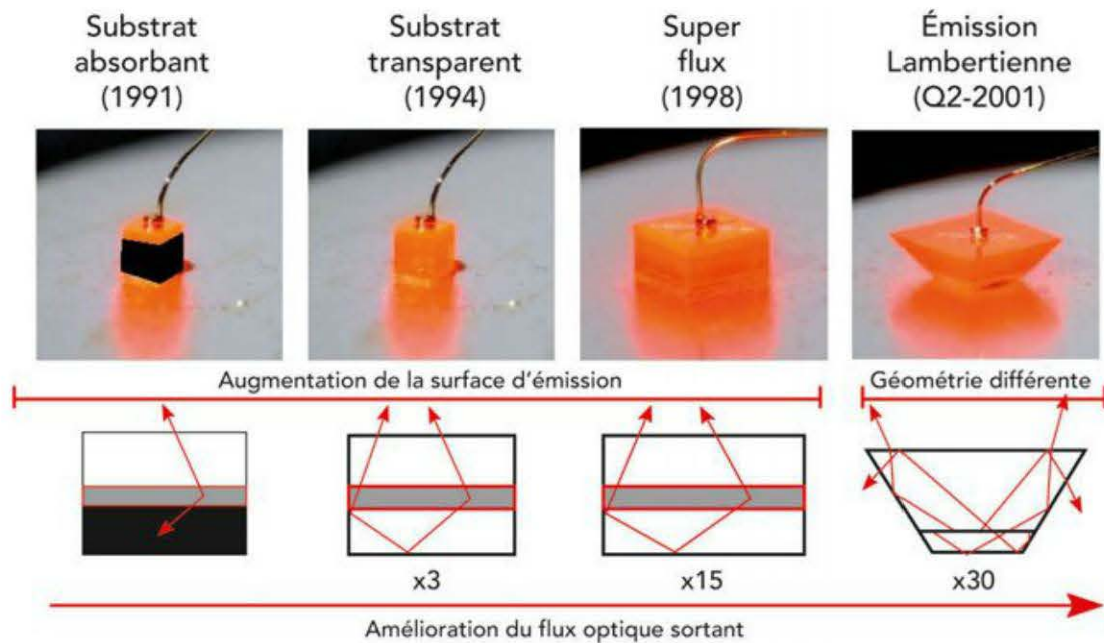


Figure 5.24 – Évolution des géométries de semi-conducteurs (Philips Lumileds).

5.4.2 Les structures de semi-conducteur : *flip chip* / *direct attach*

La technologie *flip chip*, initialement mise en œuvre par Lumileds autour des années 2003-2004, a permis non seulement d'améliorer la mise en forme du flux lumineux (pas de fil d'or au-dessus du semi-conducteur), mais aussi de réaliser l'alimentation du semi-conducteur en même temps que la dissipation de sa chaleur.

À la fin des années 2010, c'est au tour de CREE d'innover avec une géométrie dite *direct attach* (cf. § 5.1.4), dont nous rappelons le schéma ci-dessous.

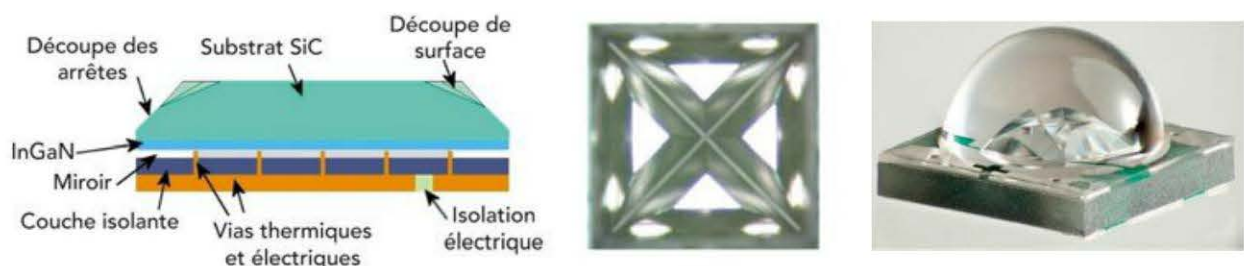


Figure 5.25 – Structure verticale de type *direct attach* (CREE).

5.4.3 Contacts ohmiques pour l'injectif de courant

Pour favoriser le passage du courant au travers du semi-conducteur de façon à ce que les densités de courant soient plus uniformes (et donc améliorer l'efficacité du semi-conducteur), l'anode et la cathode ne sont pas seulement constituées d'une

5.4 Évolutions récentes

petite surface de contact mais peuvent posséder des ramifications, ce qui uniformise le passage du courant. Cette amélioration s'est faite pour les deux types de structures latérale et verticale (figure 5.26), et, pour ce qui est de la structure de type *flip chip*, les améliorations qui ont été réalisées se situent plus au niveau des microbilles de contact, sous le semi-conducteur.

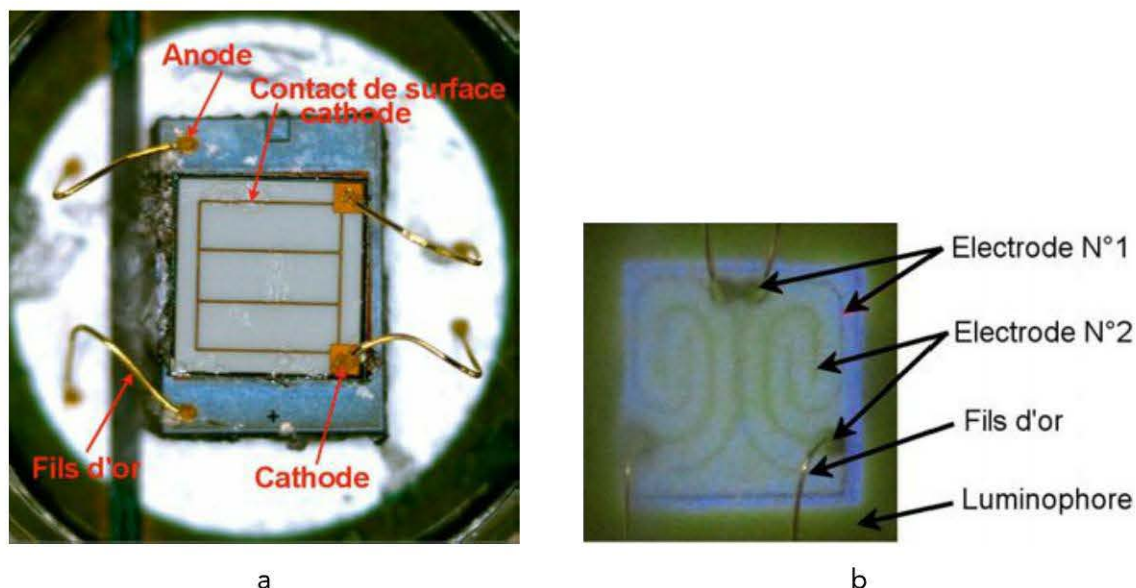


Figure 5.26 – a) Structure verticale de semi-conducteur de type 1 W ;
b) Structure latérale de semi-conducteur de type 1 W.



De la puce au boîtier

Ce chapitre explique d'abord le processus de fabrication des différents types de substrats sur lesquels vont s'insérer les semi-conducteurs. Il détaille ensuite le montage du substrat avec le cristal semi-conducteur, et la façon dont ce dispositif est alimenté en électricité.

Ensuite, le rôle des luminophores qui transforment en lumière blanche la lumière émise par le semi-conducteur est expliqué en détail, avant de terminer par l'insertion de cet ensemble dans un boîtier adapté.

6.1 Packaging électronique

Depuis leur apparition, les systèmes électroniques intégrés ont été placés au cœur d'un boîtier qui assurait les fonctions suivantes : alimentation électrique, protection mécanique et dissipation thermique.

Les LED ont la particularité d'intégrer un semi-conducteur qui émet de la lumière, et celle-ci doit être guidée vers l'extérieur du boîtier de la façon la plus efficace possible. Cela implique l'utilisation de matériaux transparents qui jusqu'à présent étaient peu utilisés en électronique ou micro-électronique. La dissipation thermique est importante pour tous les systèmes électroniques compacts, mais elle est d'autant plus importante pour les LED que les matériaux qui la composent (les luminophores des LED blanches par exemple) y sont très sensibles et que leurs efficacités décroissent rapidement avec l'augmentation de la température.

Enfin, l'avantage important des LED comme composant électronique face aux autres composants est qu'elles ont bénéficié dès le départ d'un important développement industriel (en particulier pour les LED dites de puissance). Ce qui a permis des avancées technologiques en termes de méthode d'alimentation (fil d'or, microbilles) mais également en termes de processus industriel de fabrication, et qui a accéléré leur développement et l'amélioration rapide de leurs performances.

Le boîtier des LED et les méthodes de mise en œuvre de la puce semi-conductrice et des luminophores ont évolué de façon importante ces dix dernières années, en grande partie grâce aux besoins de puissance lumineuse d'une part et de compacité d'autre part (cf. figure 6.1).

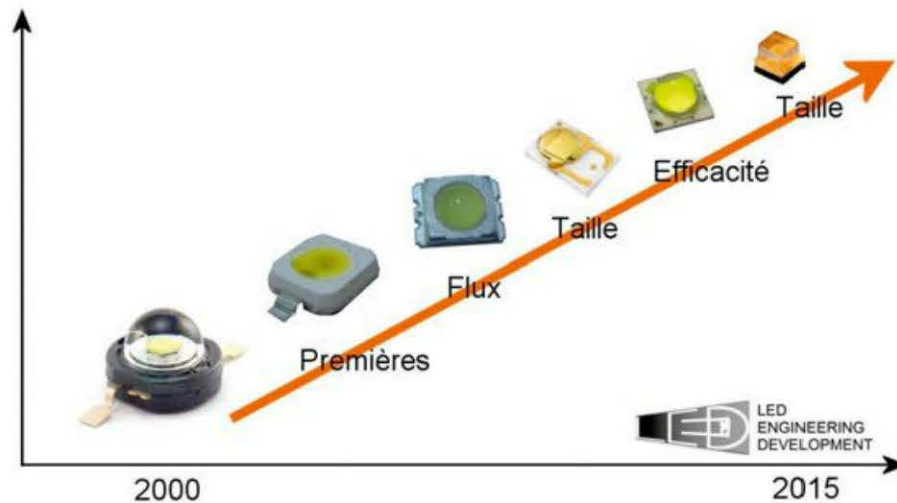


Figure 6.1 – Évolution des boîtiers des LED.

6.2 Le substrat

De nombreux problèmes dans la qualité des dépôts lors de l'épitaxie (fabrication du semi-conducteur) proviennent du fait qu'il n'existe pas de substrat de cristaux de GaN ou de substrat avec des paramètres de maille identiques à ceux du GaN qui soient de qualité suffisante ([66] page 20).

Actuellement les substrats les plus utilisés pour la croissance épitaxiale sont le **saphir** (Al_2O_3) et le **carbure de silicium** (SiC). Mais de récents développements ont démontré que de nouveaux substrats sont disponibles et apportent des solutions industrialisables comme le ZnO ou encore d'autres substrats à base de silicium (Si).

L'idéal serait un substrat de même paramètre de maille que le semi-conducteur que l'on fait croître dessus. Les substrats GaN remplissent ces conditions, mais ils sont encore fabriqués en trop petites quantités pour atteindre les objectifs de prix imposés par le marché des LED.

6.2.1 L'épitaxie

Il s'agit d'une technique qui consiste à faire croître de façon orientée, un cristal sur un autre (le substrat). Dans la fabrication des LED, nous avons à faire la plupart du temps à une hétéro-épitaxie (le cristal hôte et le cristal que l'on fait croître étant de

6.2 Le substrat

nature différente). Or les différences de paramètre de maille entre le cristal que l'on fait croître et son substrat induisent des défauts qui limitent les performances des LED, en particulier leur durée de vie.

De plus, au cours de ce processus de croissance, les températures des matériaux varient énormément (plusieurs centaines de degrés). Les coefficients de dilatation du substrat et du GaN étant différents, des défauts supplémentaires sont induits limitant d'autant les performances du semi-conducteur (cf. Nakamura 2000).

Tableau 6.1 – Caractéristiques physiques des principaux semi-conducteurs et substrats

Propriétés cristallines		AlN	GaN	InN	A-Al ₂ O ₃	6H-SiC
Paramètre du réseau cristallin (Å) (structure wurtzite)	a	3.1114	3.186	3.5446	4.758	3.081
	c	4.9792	5.178	5.7034	12.991	15.092
	c/a	1.600	1.625	1.609	2.730	1.633(x3)
Coefficient de dilatation thermique ($\times 10^{-6} \text{C}^{-1}$)	a	4.2	5.59	5.7	7.5	4.2
	c	5.3	3.17	3.7	8.5	4.68
Énergie de bande (eV) à 300K pour réseau du type Wurtzite (W) et Zincblende (Z)	W	6.2 D	3.39 D	1.89 D		
	Z	5.1 D	3.2 D	2.2 D		
Paramètre du réseau cristallin (Å) (structure zincblende)	a	4.38	4.52	4.98		
Distance entre noyaux atomiques (Å)		1.89	1.94	2.15		1.88
Énergie de cohésion (eV)	E _{cch}	2.88	2.24	1.93		3.17
Densité (g/cm ³)	d	3.26	6.10	6.99	3.97	3.217

Nous constatons donc que suivant les substrats choisis pour la croissance épitaxiale, les défauts peuvent être plus ou moins abondants et avoir un impact plus ou moins fort sur les performances globales (efficacité, durée de vie) des semi-conducteurs des LED.

Il existe différentes techniques de croissances épitaxiales pour les LED (page 354 de [67]) ; les principales sont la **méthode MOCVD** (*Metal-Organic Chemical Vapour Deposition*) et la **méthode MBE** (*Molecular-Beam Epitaxy*).

La méthode MOCVD est la plus répandue et la moins coûteuse pour la fabrication des LED.

6.2.2 Substrat de carbure de silicium (SiC)

Précisons tout d'abord que le carbure de silicium, utilisé dans la fabrication des LED est principalement de type wurtzite hexagonal (6H-SiC).

Utilisé au départ dans des céramiques ou dans des applications de type abrasif, le SiC existe depuis longtemps et a permis à l'électronique de se développer notamment en termes de puissance. L'un des pionniers à avoir réalisé des LED utilisant ce substrat est le fabricant CREE qui possède toujours actuellement l'un des meilleurs savoirs en la matière.

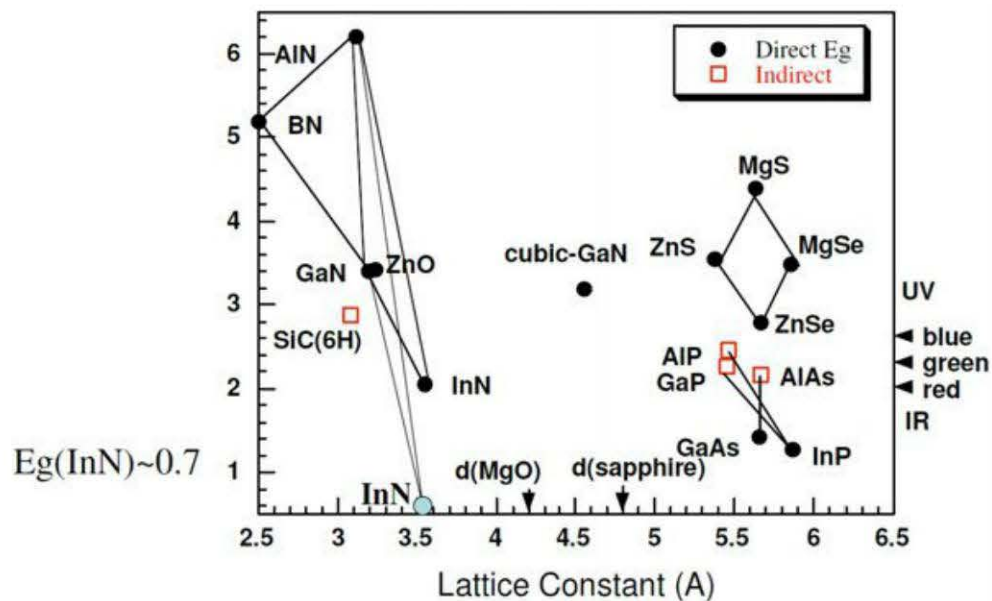


Figure 6.2 – Paramètre de maille et bande interdite (Nakamura 2007).

Le paramètre de maille du carbure de silicium (6H-SiC) est proche de celui du cristal de GaN ce qui limite les défauts lors du processus d'épitaxie (cf. figure 6.2).

De plus, la conductivité thermique du carbure de silicium est importante (environ 490W/mK), ce qui en fait un candidat intéressant pour la fabrication des LED car il permet de dissiper la chaleur émise du semi-conducteur vers l'extérieur du boîtier notamment pour les LED de structure verticale.

L'orientation de l'épitaxie sur le carbure de silicium, de par sa symétrie identique à celle du GaN, se fait suivant un axe identique (l'axe C est orienté suivant la croissance épitaxiale).

Le silicium est très utilisé dans l'industrie du semi-conducteur et ses différents procédés de fabrication et de mise en œuvre sont connus depuis longtemps.

Néanmoins, il est difficile en pratique de créer de grandes surfaces « atomiques » planes à partir de SiC en raison de la nature de la structure 6H.

6.2 Le substrat

De plus, même si le SiC est proche du GaN en termes de paramètre de maille (différence de seulement 3,3 %), il est relativement loin de celui de l'InN avec près de 14 % de différence.

Enfin, le substrat de carbure de silicium est relativement cher à fabriquer (un même *wafer* est deux à trois fois plus cher en carbure de silicium qu'en saphir).

6.2.3 Substrat de saphir (Al_2O_3)

C'est le substrat le plus utilisé car le moins cher à fabriquer pour les applications LED. Il est pourtant un piètre conducteur de chaleur avec une conductivité thermique dix fois moins bonne que celle du carbure de silicium (figure 6.3).

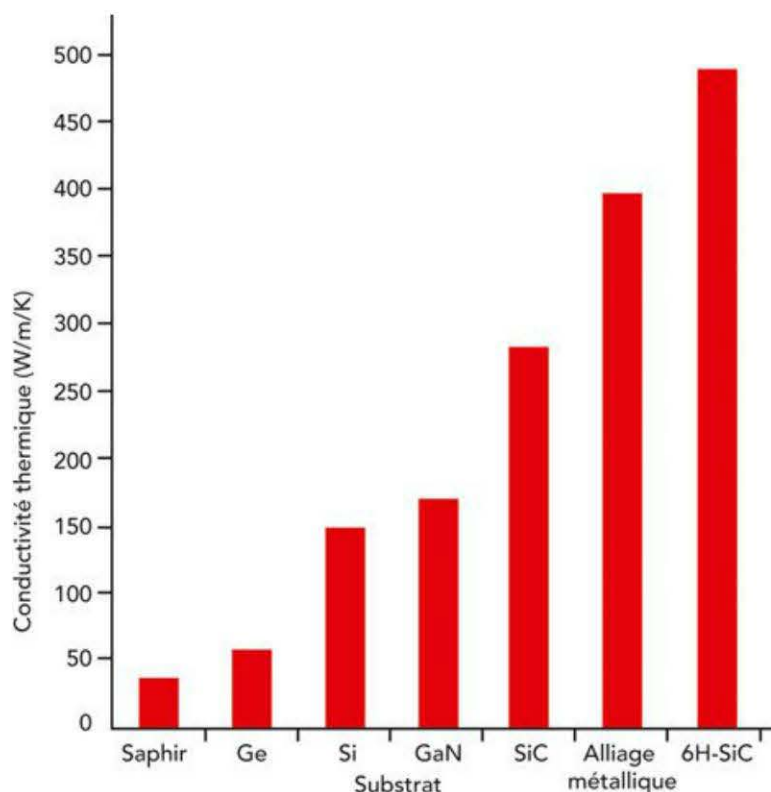


Figure 6.3 – Conductivités thermiques de plusieurs types de substrats.

L'un des avantages du saphir est son indice de réfraction qui lui confère une transparence au-dessus de 150 nm, permettant de mettre en œuvre une architecture de LED de type *flip chip*. De plus, la surface du carbure de silicium est plutôt grossière comparée à celle du saphir, induisant des défauts de microstructure en plus grand nombre.

En première approche, les grandes différences de paramètre de maille entre le saphir et les composés GaN et InN, qui sont respectivement de 14,8 % et 25,4 %, font du

saphir un candidat relativement mauvais en tant que substrat hôte. Néanmoins, certains processus de fabrication (croissance en films fins) permettent d'y avoir recours comme substrat pour faire croître les nitrures avec de bons résultats.

Le substrat saphir est non polaire à la différence du carbure de silicium.

Suivant l'orientation de l'épitaxie (croissance du GaN), nous obtenons des semi-conducteurs polaires, semi-polaires ou non polaires (cf. [66] Nakamura et figure 6.4). L'avantage des orientations semi-polaire ou non polaire est l'obtention potentielle de meilleurs rendements lumineux dans le vert.

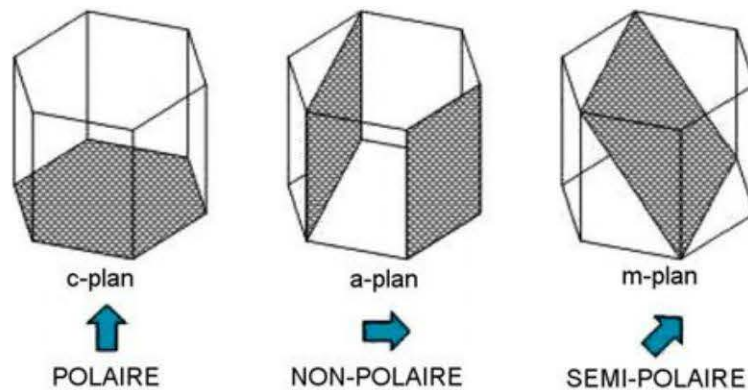


Figure 6.4 – Orientations polaire, non polaire et semi-polaire du GaN.

6.2.4 Substrat GaN

Ce substrat est relativement difficile à fabriquer, mais présente des caractéristiques très intéressantes puisqu'il est de même nature que le cristal que l'on fait croître. Au début des années 2000, des sociétés spécialisées sur ce type de substrat (comme Lumilog) ont développé des applications bien spécifiques sans réellement trouver un créneau pour les LED en production de masse.

Courant 2014, la société Sora (fondée par Steve Jim Speck, DenBaars, et Shuji Nakamura en 2008) qui développe la croissance du GaN sur substrat GaN pour les LED, a présenté de nouvelles générations de leurs lampes à LED intégrant cette technologie. Les densités de courant importantes qui avaient été démontrées courant 2009-2010, ont ainsi pu être mises en œuvre concrètement dans un produit commercial. En effet, l'efficacité relative des LED sur substrats « conventionnels » en saphir et carbure de silicium, décroît de façon exponentielle. De plus, des hypothèses de décroissance au-delà de $100\text{A}/\text{cm}^2$ (toujours sur le même type de décroissance exponentielle) montrent que le GaN sur saphir ou carbure de silicium peut difficilement être utilisé, alors que le GaN sur GaN permet de limiter la perte d'efficacité relative à moins de 20 % (contre plus de 50 % pour les autres types de substrats).

6.3 Mise en œuvre de la puce semi-conductrice

6.2.5 Substrat Si

Ce substrat très peu cher est très utilisé dans l'industrie du semi-conducteur.

Ainsi, même si ses paramètres de maille et son coefficient de dilatation thermique n'en font pas un concurrent idéal, il permet de réaliser des *wafer* de grande taille (jusqu'à 300 mm de diamètre à comparer aux *wafer* de 2, 4 et 6 pouces, respectivement 50, 100 et 150 mm de diamètre environ, actuellement mis en œuvre dans l'industrie des LED).

Des sociétés comme Lattice Power mettent en avant ce substrat peu cher en utilisant des méthodes connues et maîtrisées pour le développement des LED à bas coût.

6.2.6 Autres types de substrats

De récents développements ont démontré que l'on pouvait mettre en œuvre des substrats de type diamant (société Sino Diamond LED, figure 6.5) ou encore de type graphite.

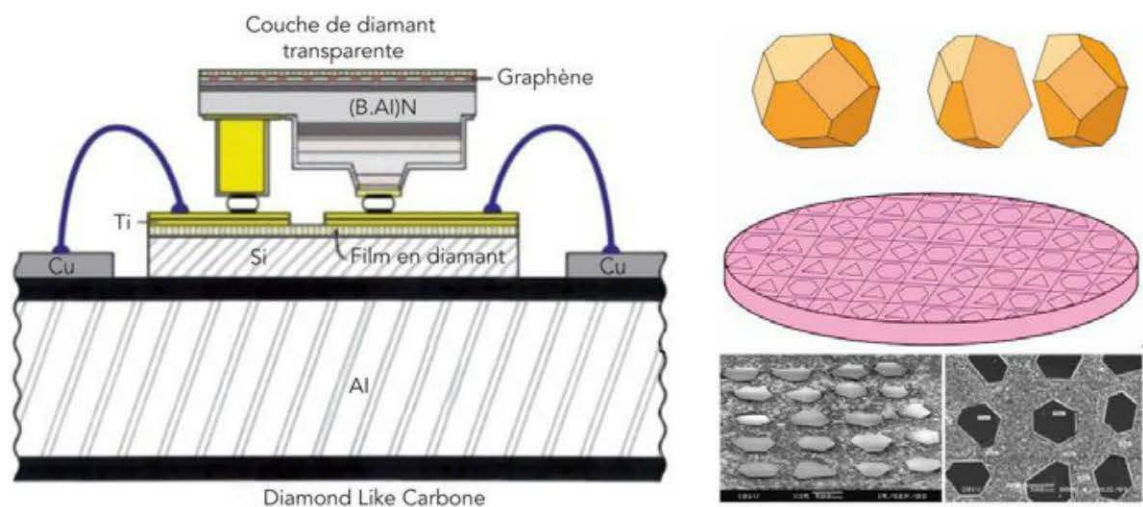


Figure 6.5 – Substrat additionnel en diamant (Sino Diamond LED).

6.3 Mise en œuvre de la puce semi-conductrice

On entend par puce semi-conductrice le couple constitué par le substrat et le cristal dopé contenant la zone active et émissive. Elle est produite dans un réacteur suivant différentes méthodes, puis découpée et positionnée sur un support souple afin d'être intégrée au boîtier de la LED par un robot (figure 6.6).

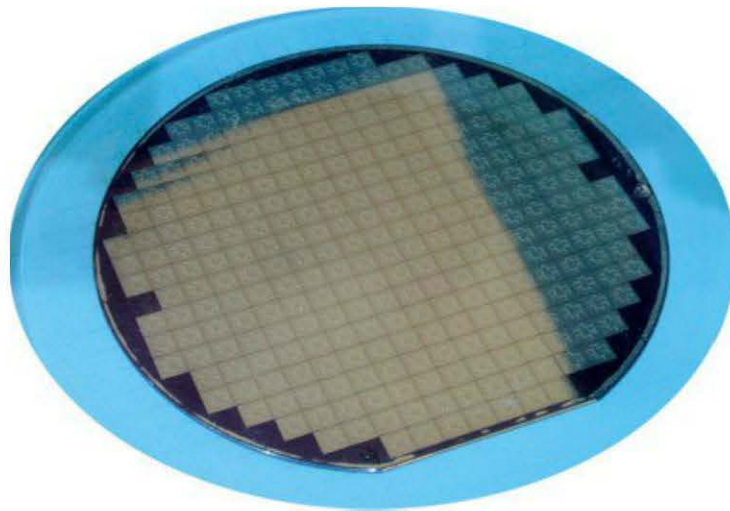


Figure 6.6 – Wafer découpé avant mise en œuvre des puces semi-conductrices dans leur boîtier de LED.

Le brasage de la puce se fait à l'aide d'un alliage de métal conducteur (électrique et thermique) sur une embase de LED (figure 6.7) qui peut être en céramique métallisée ou sur un support de type cuivre (doré la plupart du temps).

Cette opération est cruciale car elle détermine la qualité de la conduction thermique de la puce semi-conductrice vers le boîtier (lui-même assurant le transfert vers l'extérieur de la LED) et c'est souvent à cet endroit que les défauts et/ou la mauvaise qualité des LED se révèle.

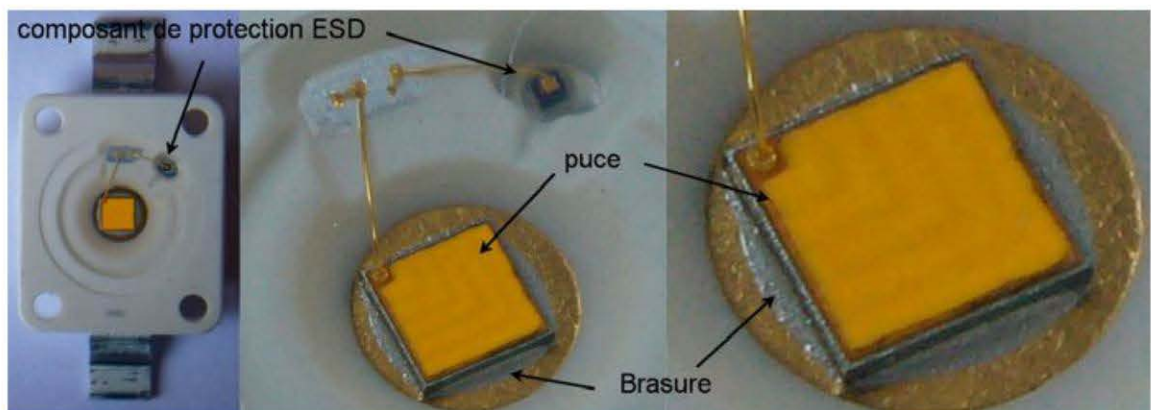


Figure 6.7 – Brasure d'une puce semi-conductrice (LED OSRAM).

6.4 Technologie d'alimentation

Suivant la méthode de fabrication du semi-conducteur, la mise en œuvre de l'alimentation est différente. Les évolutions des boîtiers ainsi que les découvertes de

6.4 Technologie d'alimentation

matériaux transparents ont beaucoup fait évoluer les stratégies des fabricants. De plus, les LED ont largement bénéficié des méthodes employées en électronique « plus conventionnelle », comme les BGA (*Ball Grid Array*) permettant une alimentation par le dessous de la puce semi-conductrice, évitant la mise en œuvre d'un fil d'or d'alimentation qui obstrue légèrement le faisceau lumineux.

6.4.1 Alimentation par fil d'or

C'est une technologie qui peut paraître fragile compte tenu du diamètre des fils qui est de l'ordre de quelques microns de diamètre (entre 15 μm et 30 μm en général) pour des courants dépassant parfois 500 mA, mais elle est maîtrisée depuis longtemps, fiable et finalement relativement robuste (figure 6.8).

Il existe plusieurs types de *bonding* à partir d'un fil d'or : le *ball bonding* et le *wedge bonding*.

Dans le cas des LED, le type majoritairement employé est le *ball bonding*, à partir de fils d'or de diamètre autour de 10-15 μm pour les LED de faible puissance et jusqu'à 30-40 μm lorsque nous sommes en présence de LED avec des consommations supérieures à 0,5 W et des courants de plusieurs centaines de milliampères.

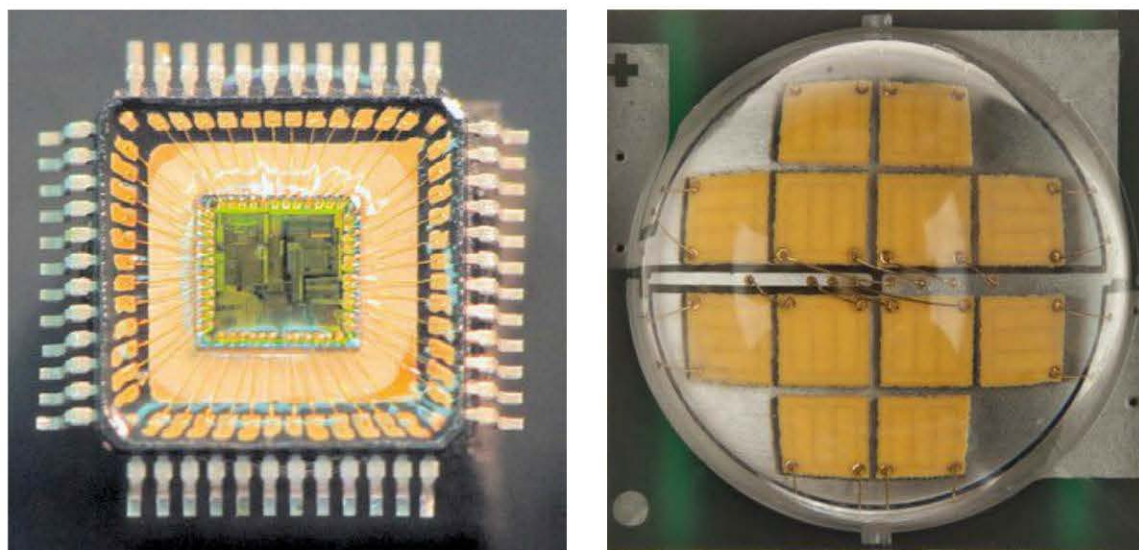


Figure 6.8 – Technologie *ball bonding* en électronique « standard » et pour des LED multipuces.

Les fabricants développent ensuite des stratégies différentes de métallisation des puces semi-conductrices pour permettre la soudure à un ou plusieurs endroits de la surface, suivant que la technologie employée soit de type vertical, latéral ou *flip chip* (avec complément d'alimentation par des fils d'or, mais cette dernière méthode est de moins en moins employée. Cf. figure 6.9).

Outre le type de mise en œuvre, des méthodes complémentaires et dérivées sont utilisées pour par exemple, limiter les effets de trop fortes densités de courant au travers du semi-conducteur. Ainsi, on retrouve les mêmes architectures, avec un doublement des fils d'or.



Figure 6.9 – LED technologie *flip chip* utilisant également des fils d'or de connexion (modèle K2 – Philips Lumileds).

La méthode d'alimentation par fils d'or peut être considérée aujourd'hui comme fiable. De plus, nous constatons sur les applications qui rencontrent des problèmes, que la rupture d'alimentation par coupure des connecteurs (fil d'or) est relativement rare, à part dans des cas très précis de sur-courants très importants (plusieurs ampères).

6.4.2 Alimentation par microbille

Cette technologie issue de l'électronique plus traditionnelle met en œuvre des microstructures (microbilles) pour permettre non seulement d'alimenter le semi-conducteur, mais également pour dissiper la chaleur qu'il produit (figure 6.10). Nous rappelons d'ailleurs sur ce point que les LED actuelles (et donc les semi-conducteurs), ont des rendements variant de 20 % à 60 %, ce qui signifie qu'une grande partie de l'énergie électrique consommée par le semi-conducteur est transformée en chaleur. C'est la raison pour laquelle il faut impérativement que les fabricants de LED aient une méthode de dissipation de bonne qualité.

L'objectif du développement de la structure *flip chip* était double : d'abord s'affranchir d'un système de connexion par fils d'or (évitant les éventuels problèmes de fiabilité et améliorant l'extraction de lumière en annulant les obstacles que constituent ces fils d'or), mais aussi trouver de nouveaux moyens de fabrication plus fiables et moins coûteux.

6.4 Technologie d'alimentation

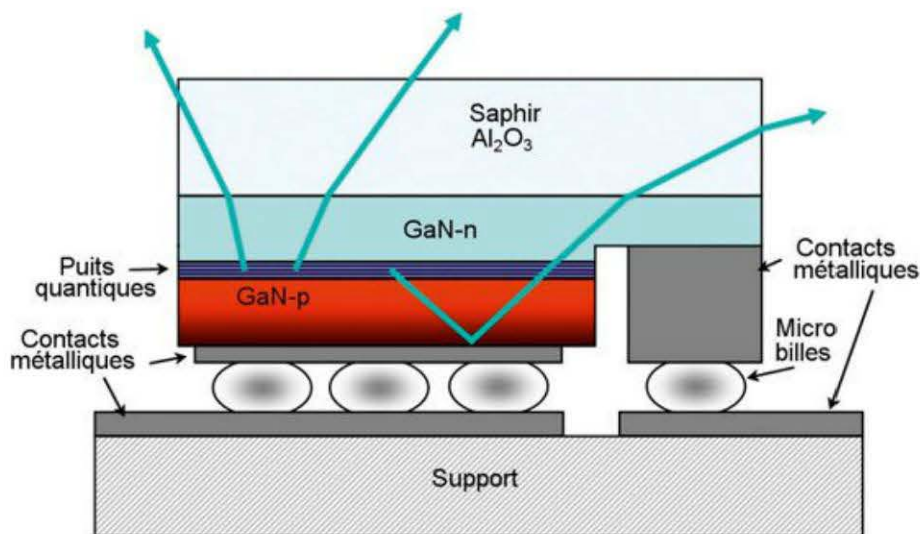


Figure 6.10 – LED technologie *flip chip*.

De plus, la transmission du courant alimentant la puce semi-conductrice pouvait alors mieux se gérer (choix du nombre de microbilles « libres ») et l'évacuation de chaleur pouvait se faire par les mêmes canaux que l'alimentation, ce qui simplifie le dispositif. Le développement de ce type de technologie a été positif en termes d'amélioration d'efficacité et a permis des mises en œuvre optiques plus simples en raison de l'absence de fils d'or de connexion. Toutefois, la taille des microbilles, leur proximité et le fait que les diamètres de contact réel entre les deux couches métalliques soit plus faible que « prévu », ont montré les limites de cette technologie avec comme conséquence que la technologie à fils d'or standard reste compétitive et bien présente sur le marché actuel.

Des fabricants comme Toyoda Gosei ont essayé au cours des dernières années d'améliorer cette technologie, notamment du point de vue de la transmission de la chaleur dégagée par le semi-conducteur, mais des progrès restent encore à faire.

Cette technologie possède un dernier avantage, celui de permettre les dépôts de luminophore de façon plus aisée et plus précise, ainsi que de surmonter la puce par des optiques plus rapprochées, améliorant de ce fait les rendements et l'extraction lumineuse (figure 6.11).

La technologie *flip chip* apporte sans aucun doute des améliorations sur bon nombre de points techniques mais elle n'est maîtrisée que par certains gros fabricants et reste encore chère. D'ici quelques années, de plus en plus d'acteurs seront capables de la mettre en œuvre et d'apporter à leur tour des idées qui accentueront alors la trop légère différence que nous constatons aujourd'hui avec la technologie plus traditionnelle à fils d'or.

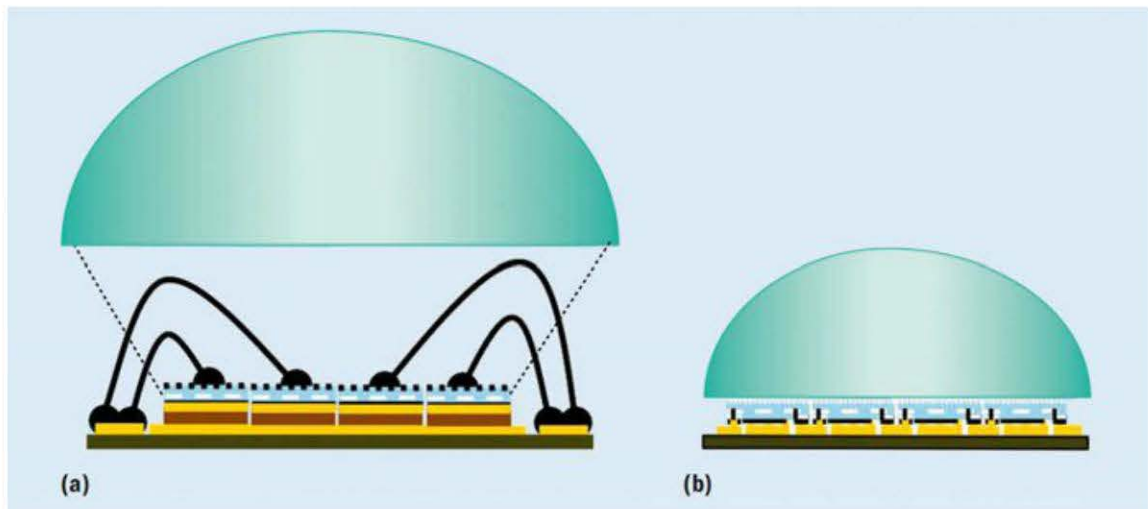


Figure 6.11 – Avantage de la technologie *flip chip* : mise en œuvre d'optiques plus proches.

6.5 Les luminophores

Ces matériaux appelés communément *phosphores* (terme anglais), permettent de réaliser des LED blanches à partir de l'émission bleue d'un semi-conducteur. Nous avons décrit ce principe dans le chapitre 3 et nous le rappelons brièvement : un semi-conducteur émet une lumière bleue qui, en passant au travers d'une épaisseur de luminophore (type YAG), est absorbée en partie. La part absorbée est restituée en partie sous forme de lumière de plus faible énergie (figure 6.12) et additionnée en sortie de la LED à la part de bleu non absorbée, reconstituant ainsi en partie un spectre de lumière blanche.

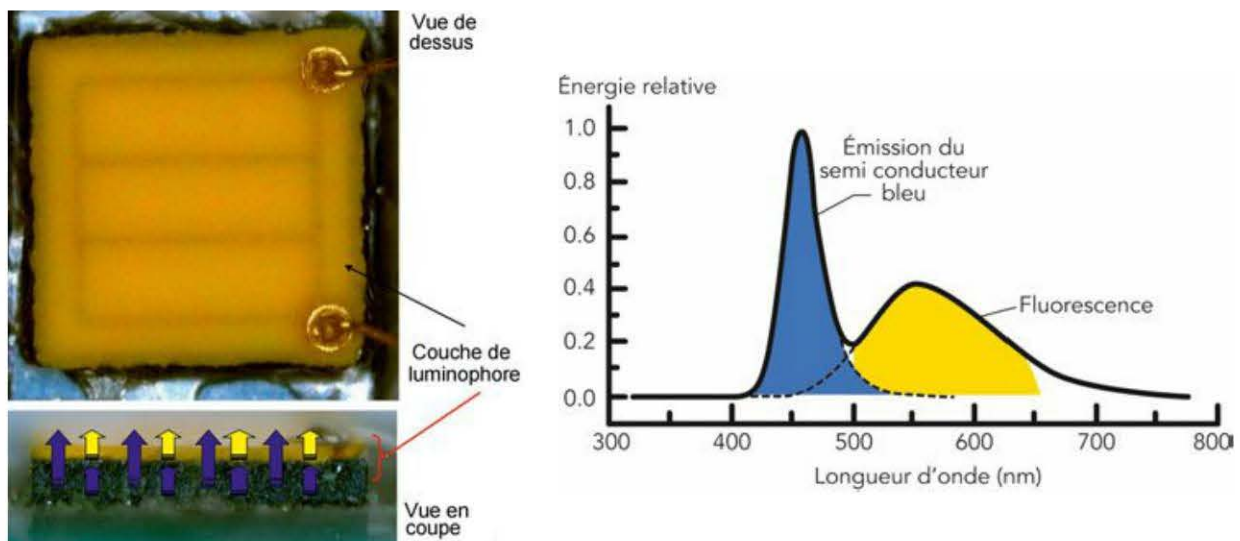


Figure 6.12 – Principe d'émission au travers du luminophore.

6.5 Les luminophores

Ce principe est connu depuis longtemps, et dans tous les cas de figure, les longueurs d'onde d'excitation sont plus courtes (plus énergétiques) que les longueurs d'onde réémises : c'est le phénomène décrit par Stokes (figure 6.13).

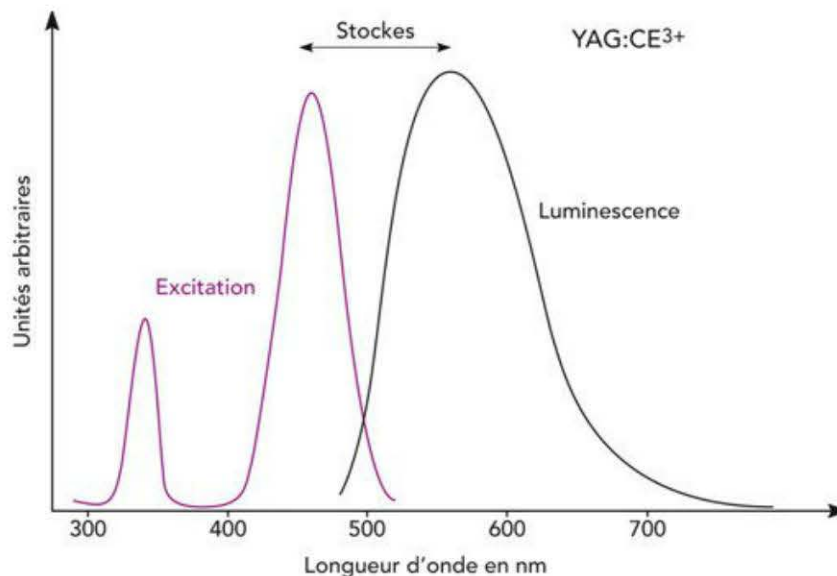


Figure 6.13 – Principe d'excitation et de luminescence des luminophores.

Les luminophores sont constitués de particules de différentes tailles (figure 6.14), noyées dans des matériaux transparents hôtes. La lumière se propage à l'intérieur de ce mélange qui contient une certaine quantité et un (des) certain(s) type(s) de luminophore(s).

Suivant la taille des grains, leur densité et l'épaisseur que doit traverser la lumière excitatrice, les spectres résultants sont différents pour un même type de luminophore. C'est là que se situe le savoir-faire des fabricants de LED à la fois dans le dosage des matériaux et dans leur mise en œuvre.

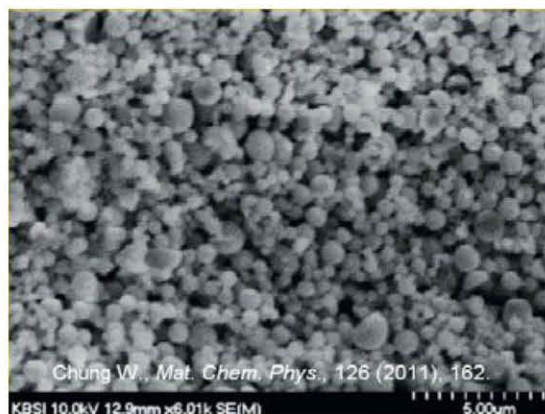


Figure 6.14 – Grains de luminophore vus au microscope électronique à balayage (Chung W.).

Initialement, certains fabricants de LED (comme Nichia) étaient avant tout des fabricants de ce type de matériau. Cela explique la grande diversité des luminophores sur le marché, le grand nombre de brevets déposés et la faible place laissée aujourd'hui à de nouvelles découvertes dans ce domaine.

L'enjeu pour les LED est de trouver un luminophore qui soit sensible dans un intervalle de longueurs d'onde pour lequel les semi-conducteurs aient de bons rendements d'une part, et d'autre part réémettent un spectre le plus large possible et le plus près possible du spectre d'émission du semi-conducteur. Ainsi, le spectre résultant serait issu d'un composant efficace et le plus large possible donnant une excellente qualité de lumière blanche. En réalité, nous sommes encore loin de cet idéal.

Pour reconstituer le spectre visible, de 400 nm à 750 nm, il faut émettre dans le bleu (le plus près de 400 nm) et que la conversion du luminophore complète le spectre par une émission dans le vert, le jaune et le rouge. Mais il y a un « creux » entre 470 et 520 nm qui est difficile à combler et qui est caractéristique des spectres des LED blanches (figure 6.15).

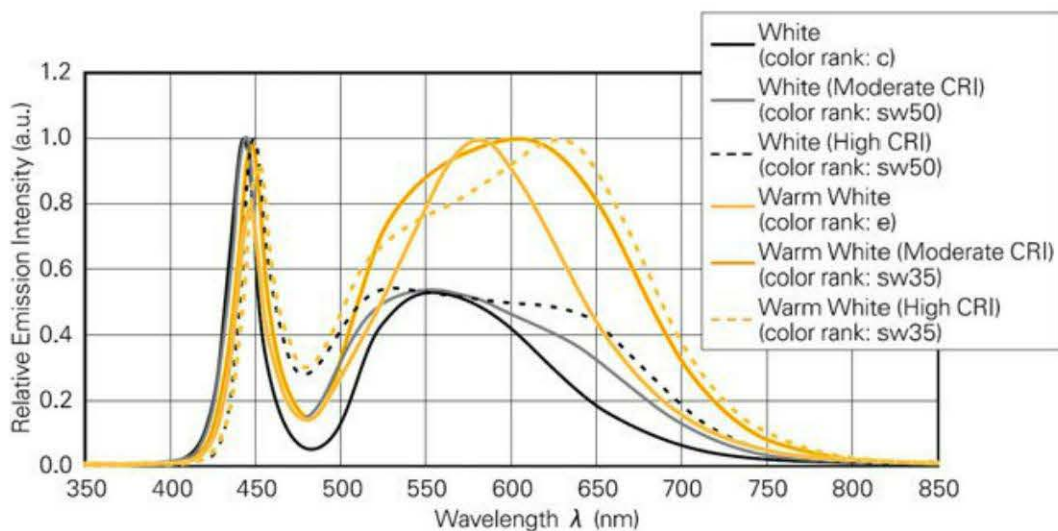


Figure 6.15 – Spectre des principales LED blanches du fabricant Nichia.

Bien sûr, il existe pour des applications particulières, des luminophores qui permettent d'atteindre presque tous les domaines du spectre visible, mais avec des rendements bas et des coûts importants.

La piste explorée au début des années 2000 par le fabricant Toyoda Gosei utilisait un semi-conducteur émettant dans l'UV autour de 390 nm avec des luminophores différents du YAG habituel, et fournissait un blanc de meilleure qualité avec une stabilité colorimétrique accrue pour différents courants de pilotage [70] Cette méthode fut utilisée jusqu'à la fin des années 2007-2008 puis abandonnée par le

6.5 Les luminophores

fabricant au profit de la technologie plus traditionnelle en bleu + YAG, essentiellement pour des raisons de rendements trop faibles.

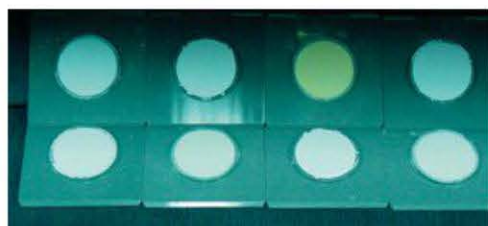
Récemment, Samsung a développé une LED de 1 W à partir de 6 puces semi-conductrices UV et un luminophore, mais cette technologie reste encore marginale.

6.5.1 Les différents types de luminophores

Il existe de nombreux types de luminophores qui ont existé à différentes longueurs d'onde et qui réémettent des spectres très différents (figure 6.16). Leur processus de fabrication sont relativement identiques, seuls les coûts des matériaux diffèrent.

Application	Excitation	Blue	Green	Red
Écran cathodique	<10kV	ZnS:Ag ⁺	ZnS:Cu ⁺ , Al ³⁺ ZnS:Au ⁺ , Cu ⁺ , Al ³⁺	Y ₂ O ₂ S:Eu ³⁺
Écran type FED (field emission display)	Low Von	ZnS:Cu ⁺ , Al ³⁺	SrGa ₂ S ₄ :Eu ²⁺	Y ₂ O ₂ S:Eu ³⁺
Écran plasma	147/172 nm	BaMgAl ₁₀ O ₁₇ :Eu ²⁺ ; BaMgAl ₁₄ O ₂₃ :Eu ²⁺ BaMg ₂ Al ₁₆ O ₂₇ :Eu ²⁺ ; CaMgSi ₂ O ₆ :Eu ²⁺ Sr ₃ Al ₁₀ SiO ₂₀ :Eu ²⁺ ; (Sr,Ca) ₅ (PO ₄) ₃ Cl:Eu ²⁺	Zn ₂ SiO ₄ :Mn ²⁺ (Y,Gd)BO ₃ :Tb ³⁺ BaAl ₁₂ O ₁₉ :Mn ²⁺	(Y,Gd)BO ₃ :Eu ³⁺
Lampe fluo-compacte avec Hg	254 nm (LPVM)	(SrCa) ₁₀ (PO ₄) ₆ (Cl,F) ₂ :Sb ³⁺ , Mn ²⁺ BaMgAl ₁₀ O ₁₇ :Eu ²⁺ (Ba,Sr)MgAl ₁₀ O ₁₇ :Eu ²⁺ , Mn ²⁺		
	365 nm (HPVM)	/		
Lampe fluo compacte sans plomb	172 nm	BaMgAl ₁₀ O ₁₇ :Eu ²⁺	LaPO ₄ :Tb ³⁺	(Y,Gd)BO ₃ :Eu ³⁺
	440/460 nm	(Y,Gd) ₃ (Al,Ga) ₅ O ₁₂ :Ce ³⁺ / (Ba,Sr,Ca)Si ₂ O ₄ :Eu ²⁺		
LED	440/460 nm	/	SrGa ₂ S ₄ :Eu ²⁺	SrS:Eu ²⁺ Sr ₂ Si ₅ N ₈ :Eu ²⁺
	370/420 nm	BaMgAl ₁₀ O ₁₇ :Eu ²⁺	SrGa ₂ S ₄ :Eu ²⁺	BMS:Eu ²⁺ , Mn ²⁺

Éclairage visible



Éclairage d'excitation

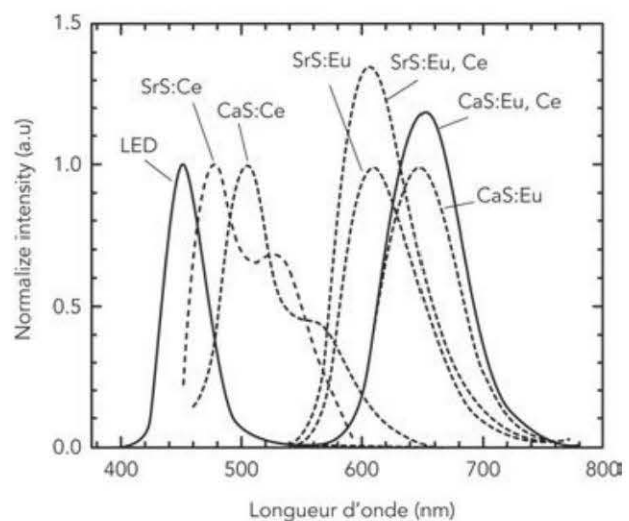


Figure 6.16 – Luminophores de différentes qualités et sensibilités (ICMCB).

Actuellement sur le marché, la plupart des fabricants intègrent une puce semi-conductrice qui émet entre 450 et 470 nm et utilisent du YAG (de formule : $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$) peu cher et somme toute efficace.

Pour autant, c'est une tendance qui tend à se confirmer, l'emploi de multi-phosphores permet d'atteindre des qualités de blanc très intéressantes, et la plupart des grands fabricants de LED maîtrisent aujourd'hui cette technologie.

6.5.2 Cas des multiluminophores

C'est la principale évolution des cinq dernières années pour la technologie LED. Pour atteindre de meilleures performances en termes de colorimétrie et limiter « le creux » au niveau des longueurs d'onde 470-520 nm, le mélange de différents luminophores s'est petit à petit développé.

De plus, l'évolution des rendements des semi-conducteurs bleus à 440-460 nm (supérieurs à 50 %) a entre-ouvert la porte des applications d'éclairage d'intérieur pour les LED. De ce fait, la réalisation de blancs plus chauds impossibles à réaliser jusque-là (autour de 2500-3000 K) est devenue possible. Les fabricants ont même entrepris de se rapprocher du spectre d'émission des lampes à incandescence proche de 3000 K avec certaines réussites (figure 6.17).

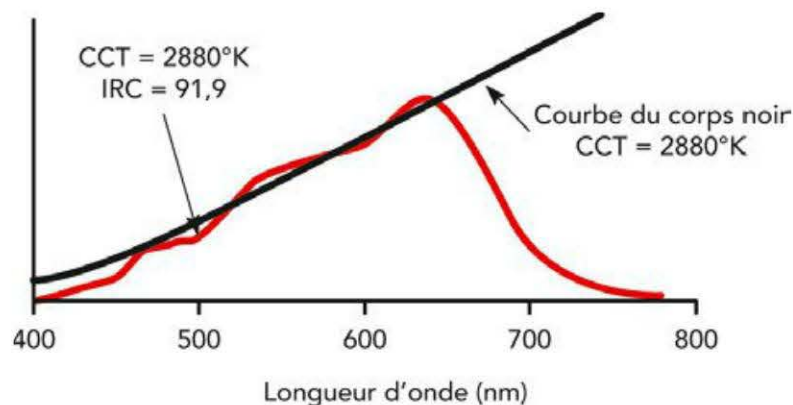


Figure 6.17 – Spectre LED à deux luminophores jaune et rouge (Philips Lumileds).

Suivant les dosages des différents types de luminophores mélangés entre eux, la qualité du blanc émis est différente. En choisissant judicieusement la quantité des luminophores et leur épaisseur, il est possible de fixer le type de blanc émis et donc la colorimétrie. Ainsi, la température de couleur et l'indice de rendu de couleur peuvent être définis (figure 6.18).

6.5 Les luminophores

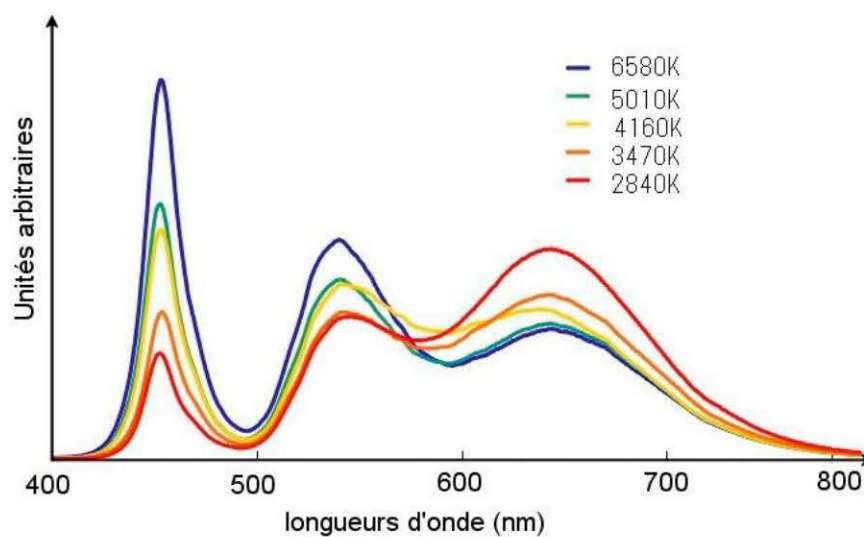


Figure 6.18 – Spectre de LED à multiples luminophores de mélanges différents (ICMCB).

6.5.3 Méthodes de dépôt des luminophores

Les premières LED blanches possédaient un réflecteur qui permettait aux fabricants de couler une faible quantité de luminophore au-dessus de la puce semi-conductrice bleue. Le luminophore était donc déposé au départ, sans contraintes d'épaisseur particulières. C'est toujours le cas pour les LED bas coût et/ou employant cette ancienne méthode de dépôt, y compris pour des LED de puissance autour de 1 W (figure 6.19).



Figure 6.19 – Dépôt de luminophore – Helios Crew Corp.

Au cours des années 2003-2004, le processus de dépôt s'est amélioré suite aux démonstrations qui ont été réalisées par différents groupes de recherche. Ainsi, la maîtrise de l'épaisseur du luminophore a permis d'augmenter les performances des LED en améliorant leurs qualités colorimétriques. Une méthode particulière appelée *conformal coating* mise en œuvre pour la première fois par Philips Lumileds, consiste à déposer le luminophore en épaisseur constante. Suite à cela, les dépôts se sont faits uniquement sur la puce semi-conductrice (LED de puissance) augmentant encore la qualité des LED (figure 6.20).

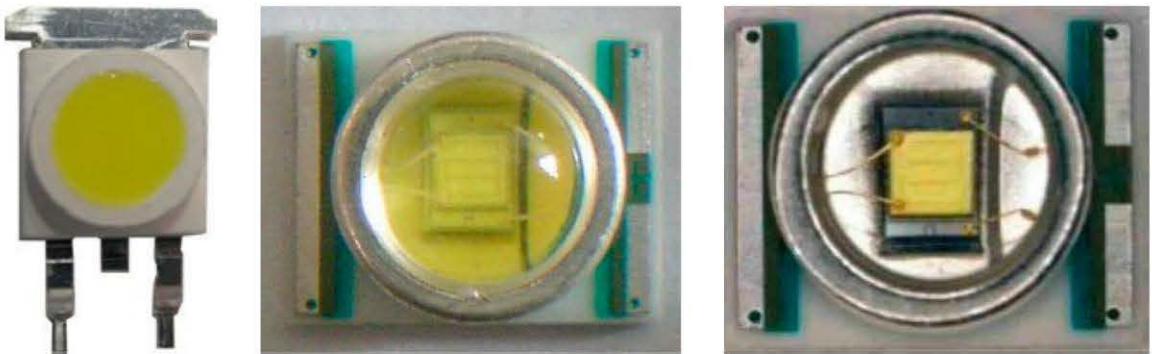


Figure 6.20 – Dépôt de luminophore. De gauche à droite : sans maîtrise de l'épaisseur, « conformal coating », « chip coating ».

Une autre méthode consiste à noyer le luminophore dans une résine silicone qui sert également de dôme et donc de protection de la LED. Cette méthode est beaucoup employée par Nichia (figure 6.21) et lui permet d'augmenter les angles d'émission des LED jusqu'à 150 voire 160°. De plus, la surface réelle d'émission lumineuse n'est alors plus celle de la puce, mais celle du dôme de silicone (plus grande) et cela réduit d'autant la luminance de surface et donc l'éblouissement de la LED.

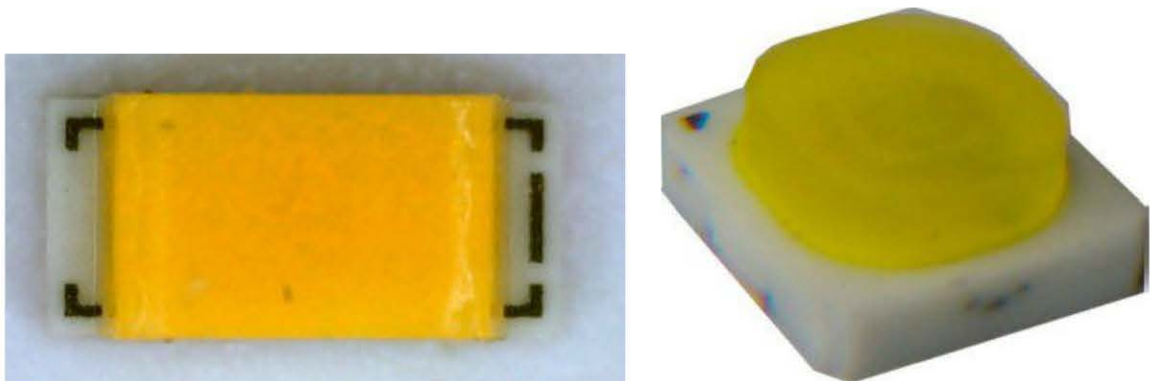


Figure 6.21 – Luminophore noyé dans de la silicone (LED Nichia).

6.6 Encapsulation – boîtier des LED

Au chapitre 3 nous avons effectué une description du packaging des LED.

Nous rappelons brièvement ici l'évolution qu'ont connue les LED à partir des boîtiers réalisés en résines dures et transparentes (par des moules), jusqu'aux récentes LED sur des supports de céramique coiffées de dômes silicone, en passant par les boîtiers en résines dures développés au début des années 2000 (figure 6.22).

Une des évolutions majeures réside dans le dépôt des luminophores directement sur le wafer de fabrication des puces semi-conductrices.

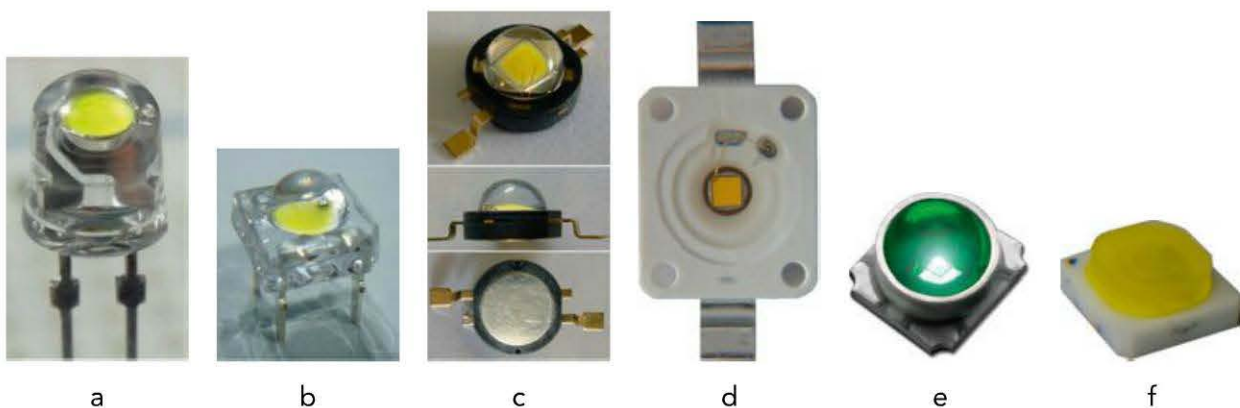


Figure 6.22 – Évolution du boîtier des LED.

6.7 Fabrication des LED

Peu de fabricants maîtrisent le processus complet de fabrication des LED depuis le substrat jusqu'à la fourniture de composants (LED) livrés en bandes.

Nous pouvons décomposer le processus de fabrication en plusieurs étapes (figure 6.23), dont les principales sont décrites ci-dessous :

- ▶ Croissance du substrat et découpe de celui-ci (saphir ou carbure de silicium),
- ▶ Dépôt des couches de semi-conducteur (épitaxie),
- ▶ Découpe laser des puces semi-conductrices,
- ▶ Intégration des puces dans le boîtier des LED.

Suivant l'architecture du semi-conducteur qui a été décrite au chapitre 5, l'intégration de la puce semi-conductrice dans le boîtier ne se fait pas de la même manière. Le processus de connexion de l'alimentation change également entre une structure de type verticale, une structure de type *flip chip* ou encore une structure de type *direct attach* (développement récent de CREE en 2012), technologie développée par CREE courant 2012 et améliorée en 2013 et 2014 avec des formes et des tailles de puces semi-conductrices différentes.

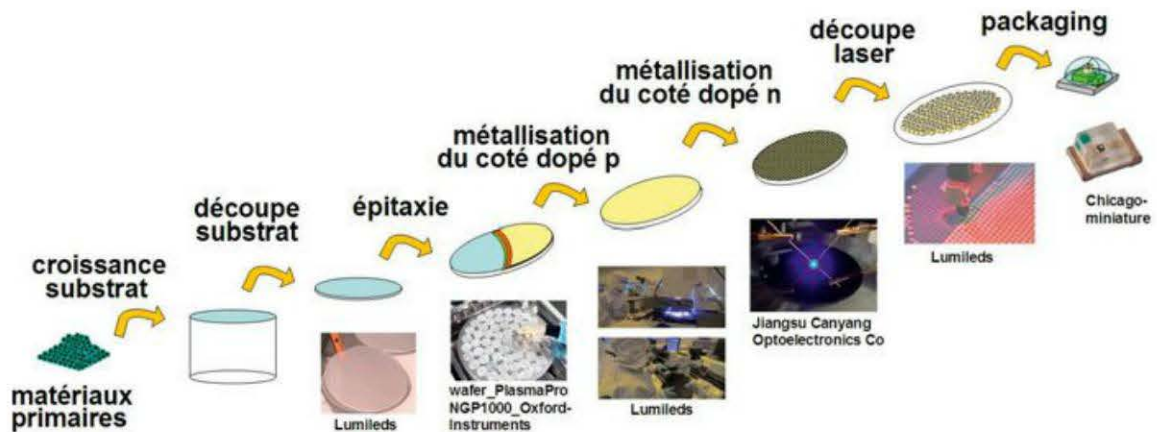


Figure 6.23 – Principales étapes de la fabrication d'une LED.

6.7.1 LED de type 5 mm

C'est la plus simple des intégrations possibles dans la mesure où d'une part, la connexion se fait par l'intermédiaire d'un seul fil d'or (dans la plupart des cas), et d'autre part, la base du semi-conducteur sert de seconde électrode.

Les premières LED 5 mm avaient (et ont toujours) cette architecture. Le processus de fabrication est resté le même (figure 6.24).

Le support et le réflecteur de la LED sont réalisés de façon mécanique sur des alliages conducteurs électriques et thermiques (souvent par emboutissage). Dans le réflecteur, la puce est brasée (soudée à l'aide d'un alliage souvent à base d'argent) sur une embase traitée préalablement. La connexion par fils d'or se fait ensuite de façon automatique (parfois manuelle notamment en Asie), puis on réalise le dépôt des luminophores de façon grossière en coulant les luminophores (mélangés à des résines qui durcissent ensuite) dans le réflecteur.

Le boîtier extérieur de ce type de LED est réalisé avec une résine époxy transparente qui est mise en œuvre à l'aide de moules spécifiques.

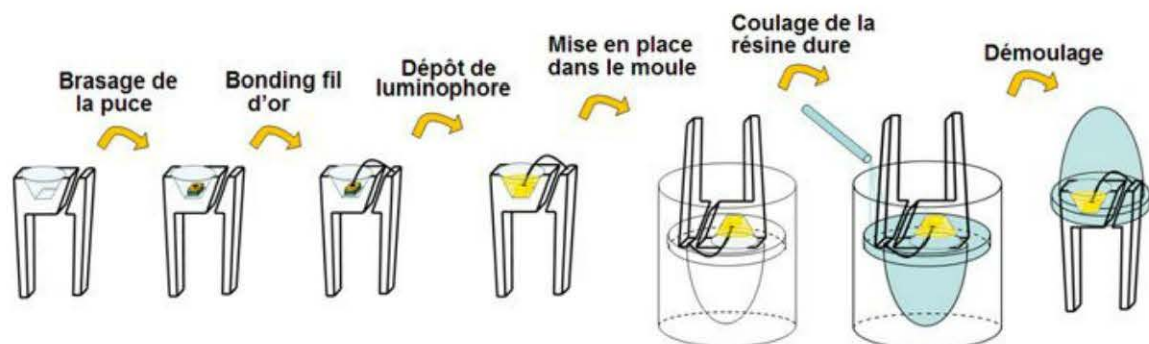


Figure 6.24 – Étapes de fabrication de LED 5 mm.

6.7.2 LED CMS de faible puissance

Il existe principalement deux types de LED CMS de basse puissance (figure 6.25), celles qui ont un support avec une lentille de protection (plutôt pour des applications de voyants lumineux) et celles qui ont un boîtier en plastique dans lequel on vient couler une résine de protection (avec des luminophores pour les LED blanches).

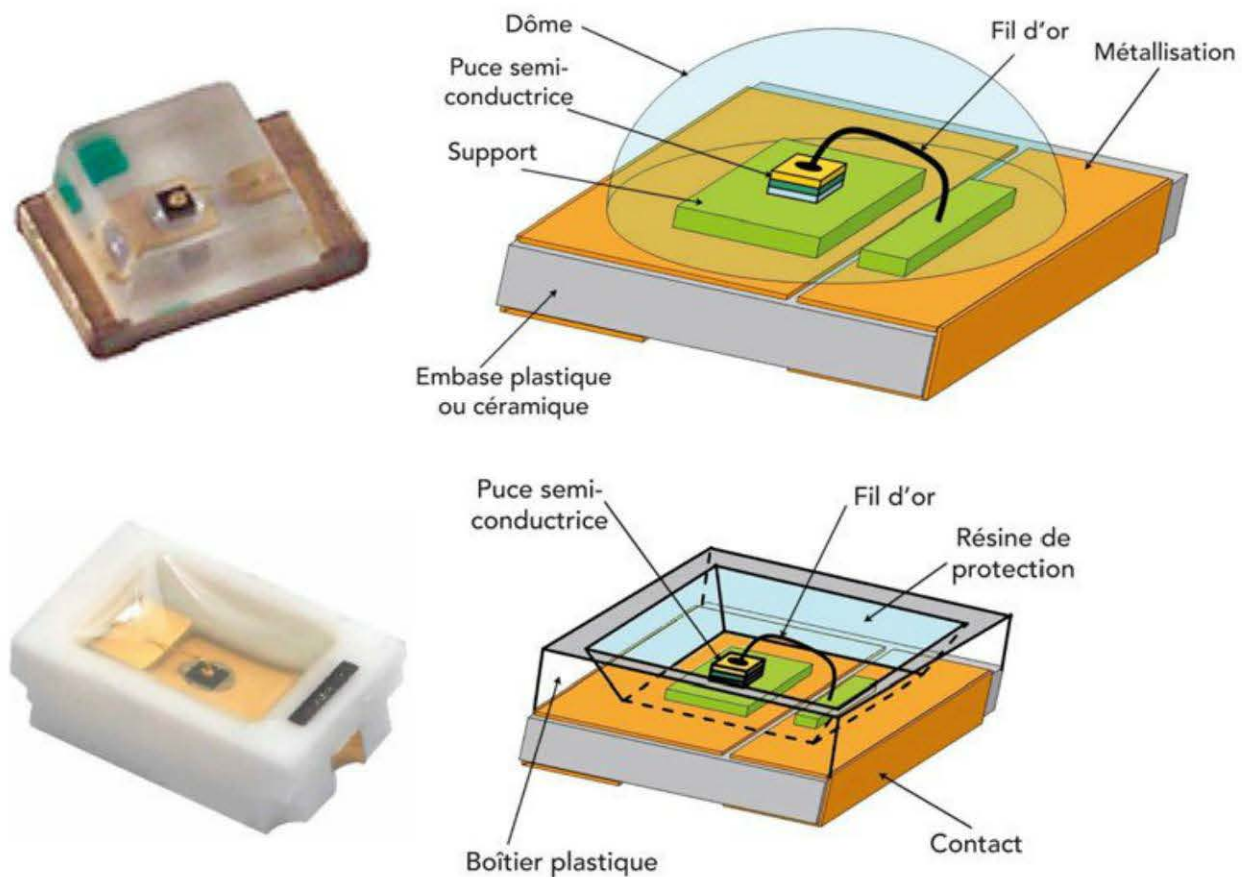


Figure 6.25 – Structure de LED avec intégration de puce de type verticale.

Les étapes de fabrication sont les suivantes :

- ▶ Fabrication du boîtier, ou plat ou en cuvette ou en plastique ou en céramique ;
- ▶ Brasage de la puce semi-conductrice ;
- ▶ Mise en œuvre de la connexion par fils d'or ;
- ▶ Dépôt de la résine de protection soit en silicone souple préformée et soudée à l'aide d'une interface, soit coulée dans le boîtier de la LED (avec pour les LED blanches, des luminophores noyés dans cette résine de protection).

Ce type de LED peut être réalisé en grandes séries pour des coûts relativement faibles, inférieurs à 5 centimes de dollar l'unité. La méthode de fabrication du boîtier est basée sur des plaques d'alliages métalliques pris en sandwich dans des moules

dans lesquels on injecte un plastique dur. On obtient alors des plaques plus ou moins grandes de boîtiers nus, maintenus les uns aux autres par de petits morceaux de l'alliage qui a servi à réaliser les contacts métalliques des LED.

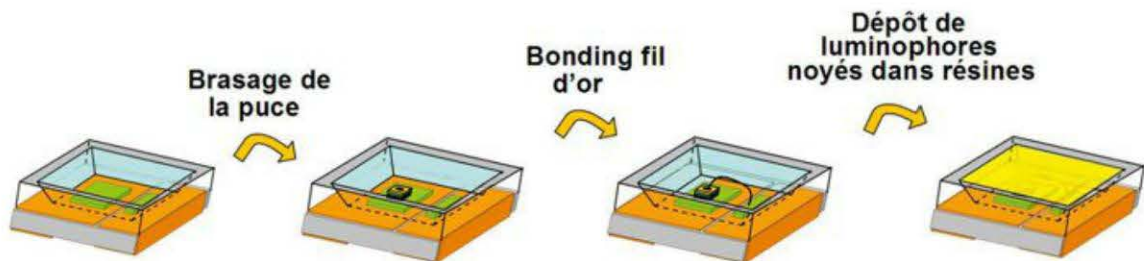


Figure 6.26 – Étapes de fabrication de LED CMS basse puissance.

La connexion par fils d'or et la mise en œuvre de la résine transparente (ou mélangée aux luminophores dans le cas des LED blanches) sont deux étapes simples, notamment dans le cas de puces semi-conductrices verticales, où un seul *bonding* est nécessaire.

6.7.3 LED CMS de forte puissance

Les puissances électriques consommées par ces modèles de LED peuvent dépasser 2 watts, ce qui signifie que les boîtiers doivent être capables de dissiper jusqu'à 1,5 W de chaleur provenant du cœur du semi-conducteur puisque globalement leurs rendements se situent autour de 30 à 50 % (à des courants entre 500 mA et 700 mA en 2015).

C'est principalement cette raison qui complique l'architecture des boîtiers et donc les processus de fabrication car cette extraction de chaleur doit être faite en même temps et avec les mêmes matériaux que l'extraction de lumière. De façon générale, les matériaux transparents ne sont pas très conducteurs de chaleur et les fabricants de LED ont développé des méthodes de gestion thermique couplées à l'extraction lumineuse, sous différents axes :

- ▶ Sélections des rares matériaux transparents et néanmoins conducteurs thermiques « corrects » ;
- ▶ Architecture de puce semi-conductrice dont la partie basse possède des matériaux qui permettent d'évacuer la chaleur, et dont la partie haute émet la lumière en contact avec des matériaux transparents sans vocation à dissiper (technologie *flip chip*, figure 6.10) ;
- ▶ Enfin, la texturation des surfaces des matériaux (création de microstructures) permet d'augmenter encore le rendement et donc de diminuer la chaleur dégagée dans le cœur de la LED.

6.7 Fabrication des LED

Ces dernières années ont vu une évolution qui tend à simplifier quelque peu les processus de fabrication des LED par le recours à une embase céramique comme plateforme et à un dôme de silicone souple qui sert à la fois de protection et de guidage de faisceau lumineux. Mais cela n'a pas été toujours le cas et des LED avaient (et ont toujours pour certains modèles) des lentilles de protection en verre ou encore des parties en métal, rapportées sur l'embase et collées suivant des procédés plus ou moins complexes. On cite à titre d'exemple la première version de LED de puissance de CREE (boîtier XL) qui entourait et maintenait la lentille de protection (en verre) à l'aide d'une bague carrée en alliage d'aluminium. Cette lentille de verre surnageait au-dessus du semi-conducteur grâce à un gel excessivement mou. D'ailleurs, ce type de boîtier était très sensible à l'humidité car de l'eau pouvait s'introduire entre la lentille de verre et la bague, aboutissant à des dégradations « par effet pop-corn ».

Mises à part les puces semi-conductrices « verticales », pour lesquelles l'intégration et la connexion électrique sont similaires qu'il s'agisse de LED CMS de faible ou de forte puissance, les autres types de puces nécessitent des connexions différentes et en plus grand nombre.

De plus, les LED de puissance sont mises en œuvre avec un composant supplémentaire qui est une diode de protection contre les décharges électrostatiques. Outre le composant lui-même qu'il faut intégrer, une connectique à fil d'or supplémentaire est à réaliser. Certaines LED de basse puissance hébergent également ce type de composant de protection, essentiellement dans le cas de LED relativement chères (à partir de 0,20 \$ en 2015).

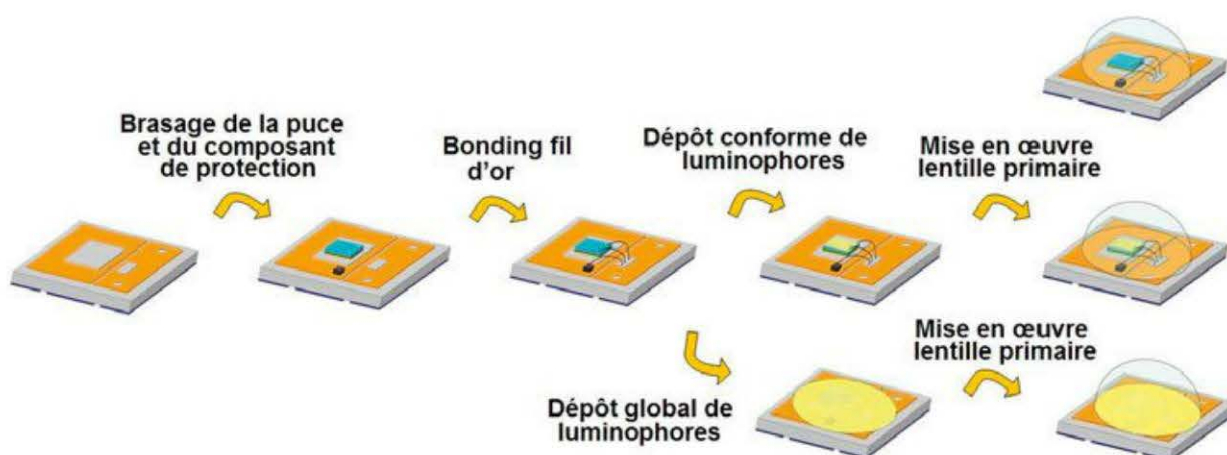


Figure 6.27 – Étape de fabrication de LED CMS forte puissance.

Pour terminer citons des architectures dans lesquelles la puce semi-conductrice « latérale » est déposée sur un socle (de cuivre en général) qui joue le rôle de pad thermique. Dans ce type de montage, le moulage en résine plastique autour du socle et des pattes d'alimentation est plus complexe à mettre en œuvre que les embases de céramiques.



Optiques primaires et extraction lumineuse

Une fois que les composants « électroniques » de la LED ont émis le flux lumineux, il faut mettre en œuvre un certain nombre de dispositifs « optiques » pour récupérer, canaliser et utiliser avec le moins de pertes possible la lumière produite.

Ce chapitre se concentre sur les optiques dites « primaires » car faisant partie intégrante de la LED.

7.1 Qu'est-ce qu'une optique primaire ?

Une puce semi-conductrice et son système d'alimentation (constitué de fils d'or) sont relativement fragiles. Dès le départ, les fabricants de LED ont cherché à protéger mécaniquement cet ensemble de l'extérieur tout en préservant ses propriétés d'émission lumineuse.

Quelle différence existe-t-il entre optique primaire et optique secondaire ? L'optique primaire appartient au composant et en fait partie intégrante. Les optiques secondaires sont des systèmes qui viennent s'ajouter en complément pour optimiser et adapter le faisceau lumineux à l'application. Leur rôle est plus de mettre en forme de la lumière émise par la LED que d'extraire cette lumière, rôle qui revient à l'optique primaire.

Dans la majeure partie des cas, les optiques primaires sont réalisées dans un double but : extraire le maximum de lumière du semi-conducteur et obtenir un faisceau de lumière le plus ouvert et le plus lambertien¹ possible afin de pouvoir ensuite utiliser une optique secondaire de la façon la plus efficace possible.

L'optique primaire est donc soudée et solidarisée à la LED tandis que l'optique secondaire est montée dans un second temps. Il existe différents types de lentilles secondaires. Certaines se placent par l'intermédiaire d'un support circulaire,

1. Une source lambertienne est une source dont la luminance est constante indépendamment des axes suivant lesquels on l'observe.

lui-même fixé au moyen d'un autocollant double-face. D'autres se fixent mécaniquement à un support possédant des picots qui seront insérés en force dans le circuit imprimé (figure 7.1). D'autre encore se fixent sur la mécanique extérieure de l'application qui a été calculée pour que l'alignement entre la LED et la lentille soit optimal.

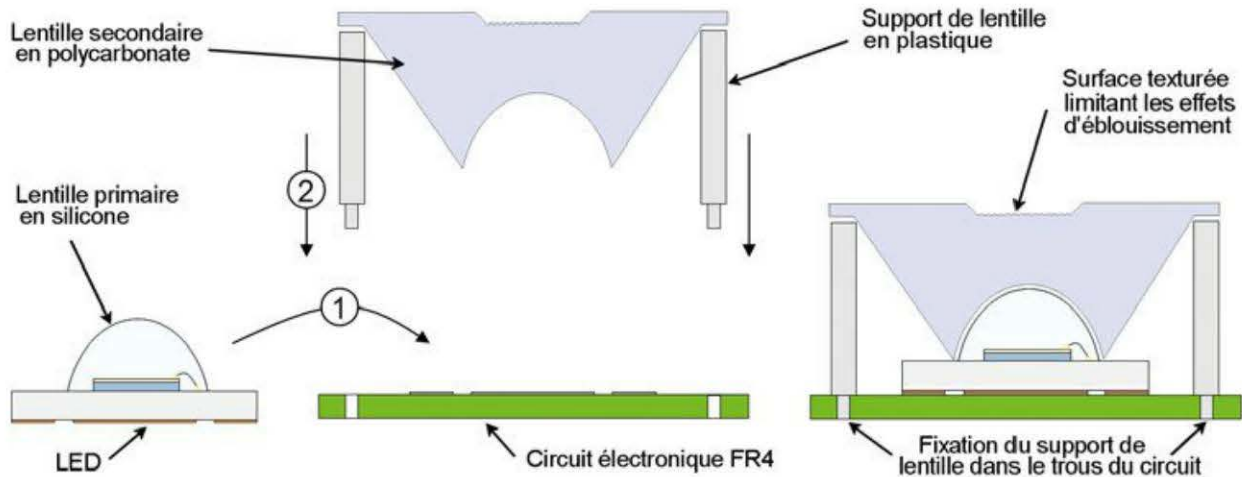


Figure 7.1 – Mise en œuvre d'une lentille secondaire sur une LED.

7.2 Description détaillée des optiques primaires

Suivant les modèles de LED, les optiques primaires peuvent prendre des aspects très différents. En effet, selon qu'il s'agisse d'une LED CMS (*Composant monté en surface*), d'une LED traversante de diamètre 5 mm ou encore d'une LED de puissance sur une embase céramique, leur optique primaire sera mise en œuvre différemment et elle sera constituée de matériaux différents.

Si nous reprenons ces trois exemples pour une LED blanche on observera une optique primaire constituée :

- ▶ du mélange résine et luminophore pour la LED CMS,
- ▶ d'époxy pour la LED traversante 5 mm,
- ▶ de silicone transparente pour la LED de puissance (lentille préformée et collée ensuite sur le dessus de la LED).

Les résines époxy sont disponibles et peu chères du fait qu'elles sont utilisées dans d'autres domaines industriels ; ajouté à la faible dissipation thermique des premières LED de type 5 mm, ce type de résines a été fortement employé. Leurs propriétés de transparence et de dureté, ainsi que leur fort indice de réfraction de 1,52 (p. 90 de [75]), en font un excellent candidat pour la fabrication de ce type d'optique primaire. En outre, ce matériau permettait par la même occasion de construire un boîtier complet pour la LED (figure 7.2.a).

7.2 Description détaillée des optiques primaires

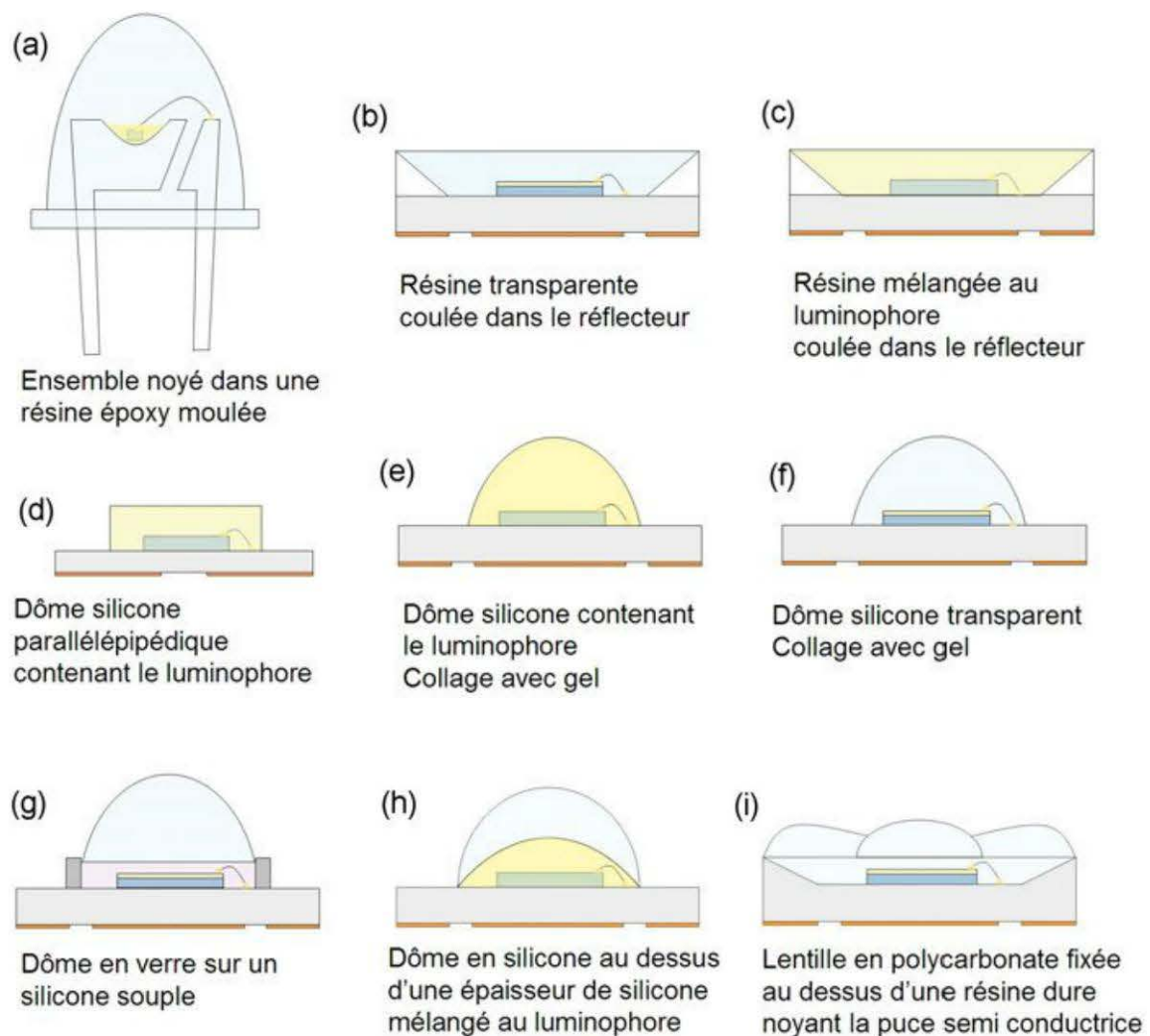


Figure 7.2 – Différents types de lentilles primaires.

Puis, le développement massif des LED blanches à luminophore a poussé les fabricants de LED à intégrer ce luminophore dans des résines souples ou dures, qui ont non seulement joué le rôle de liant pour ce luminophore mais également celui de lentille primaire (figure 7.2.c).

D'autres méthodes plus marginales utilisant comme optique primaire des lentilles de verre surmontées de matériaux souples (figure 7.2.g) ont été développées au début des années 2000 mais tendent à disparaître au profit de lentilles en silicone qui se généralisent petit à petit chez tous les fabricants de LED de puissance ($> 0,5$ W).

7.2.1 Les LED de faible puissance

Ce sont des modèles dont les puissances électriques consommées se situent autour de quelques dizaines de milliwatts. Ces modèles, très nombreux et très variés, utilisent une large gamme de matériaux sur lesquels vient se fixer l'optique primaire.

La plus connue et la plus utilisée d'entre toutes est incontestablement la LED dite « 5 mm » (ou son équivalent « 3 mm ») (figure 7.3), qui est largement employée pour des applications d'affichage (intérieur comme extérieur).

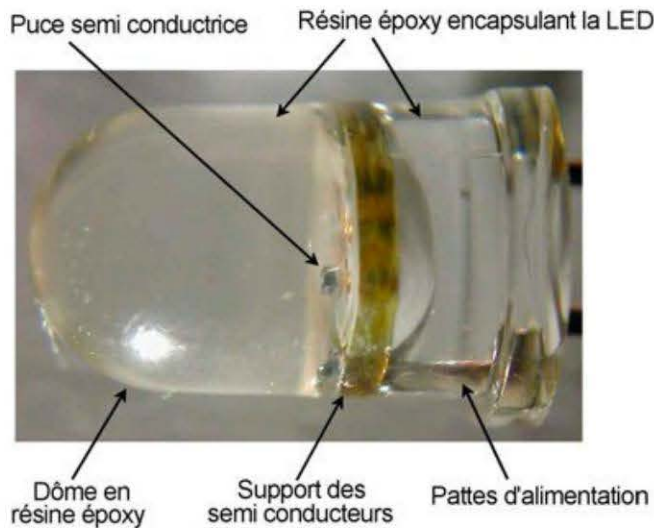


Figure 7.3 – LED 5 mm.

Le boîtier de cette LED est réalisé en résine époxy et il joue non seulement la fonction de protection mécanique de l'ensemble du composant, mais aussi la fonction « optique primaire » par une forme en dôme.

Cette résine transparente conduit mal la chaleur et vieillit en s'opacifiant sous l'effet de la chaleur. De même, les UV émis par la lumière naturelle ont tendance à faire diminuer la transparence de ce matériau et participent au vieillissement de ce type de LED.

Il existe de nombreux modèles de LED basse puissance qui sont réalisés entièrement en résine époxy (figure 7.4).

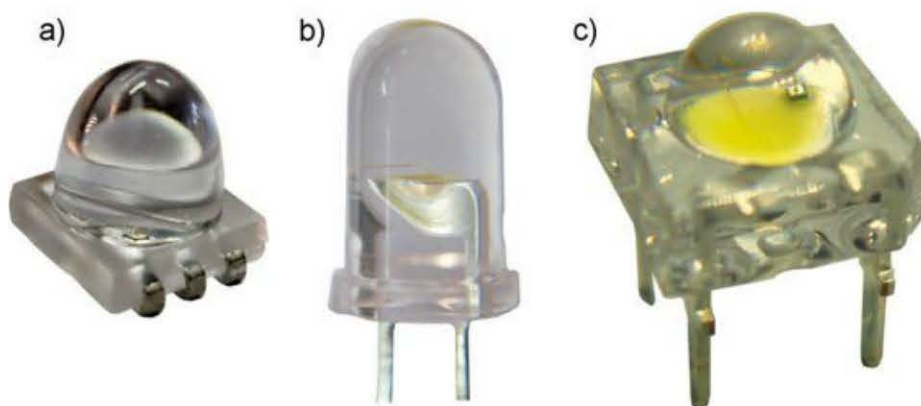


Figure 7.4 – Optique primaires en époxy.

7.2 Description détaillée des optiques primaires

Les LED qui possèdent de petits boîtiers en résines dures peuvent aussi être coulées dans de la résine époxy (figure 7.5) qui joue également un rôle de protection. La surface de la résine est plane avec une légère incurvation due aux phénomènes de bord entre les deux matériaux (la résine époxy et la résine du boîtier). Qu'il s'agisse de LED blanches à émission vers le haut (figure 7.5 a et d), de LED de couleur et/ou RGB (figure 7.5.b) ou encore de LED blanches avec une émission latérale (figure 7.5.c), la méthode de dépôt est identique, et se fait par une micro-seringue qui coule le mélange dans le boîtier.

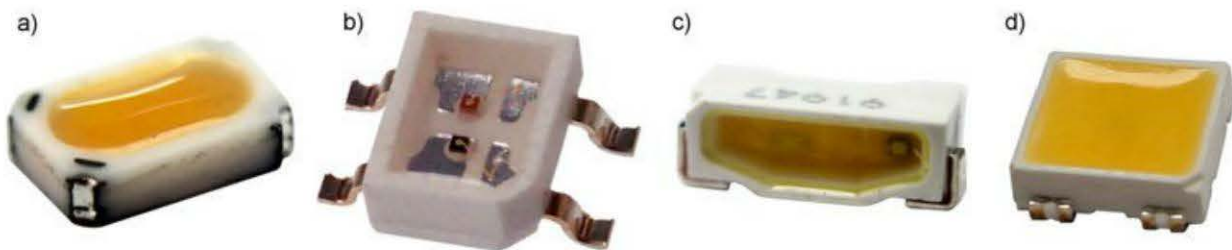


Figure 7.5 – LED avec protection de la puce par une résine dure.

D'autres LED de faible puissance possèdent également des lentilles primaires en silicone qui sont soit moulées (et mélangées avec un luminophore dans le cas des LED blanches) puis collées sur la LED, soit moulées directement tête-bêche sur la LED (figure 7.6).



Figure 7.6 – LED avec dôme silicone (Nichia avec a, b et c respectivement des LED verte, blanc froid et blanc chaud).

7.2.2 Les LED de forte puissance

Au début des années 2000, la frontière entre LED de forte puissance et LED de faible puissance aurait été plus simple à définir qu'aujourd'hui car les LED proposées étaient plus simples et se répartissaient principalement entre deux types de technologie de puces semi-conductrices : petite taille de l'ordre de 50 à 150 μm de côté, et grande taille entre 400 et 700 μm de côté.

Dix ans plus tard, non seulement la taille des puces semi-conductrices s'est diversifiée et varie de 50 μm à 1500 μm de côté, mais les fabricants ont aussi diversifié leur manière d'intégrer ces puces dans les boîtiers en mettant plusieurs puces dans une même LED, voire en intégrant différents types et tailles de puces au sein d'un même composant.

Nous pouvons toutefois considérer qu'à partir de 0,25 W, les enjeux de gestion de la chaleur sont tels qu'ils imposent aux fabricants de LED la mise en œuvre d'un système de dissipation thermique complémentaire aux simples pattes d'alimentation (ou bien que les pattes d'alimentation soient dimensionnées pour pouvoir dissiper suffisamment de chaleur). Dans ce contexte, il existe des modèles de LED dites « de faible puissance » (autour de 0,3 W par exemple) dotées d'une lentille primaire en silicone, et des LED de consommation supérieure à 1 W qui utilisent des résines dures et transparentes.

De façon générale, les LED ayant des puissances comprises entre 1 et 5 W (mono-puce ou multi-puce) sont principalement munies d'optiques primaires en silicone, et plutôt en forme de dôme (figure 7.7).

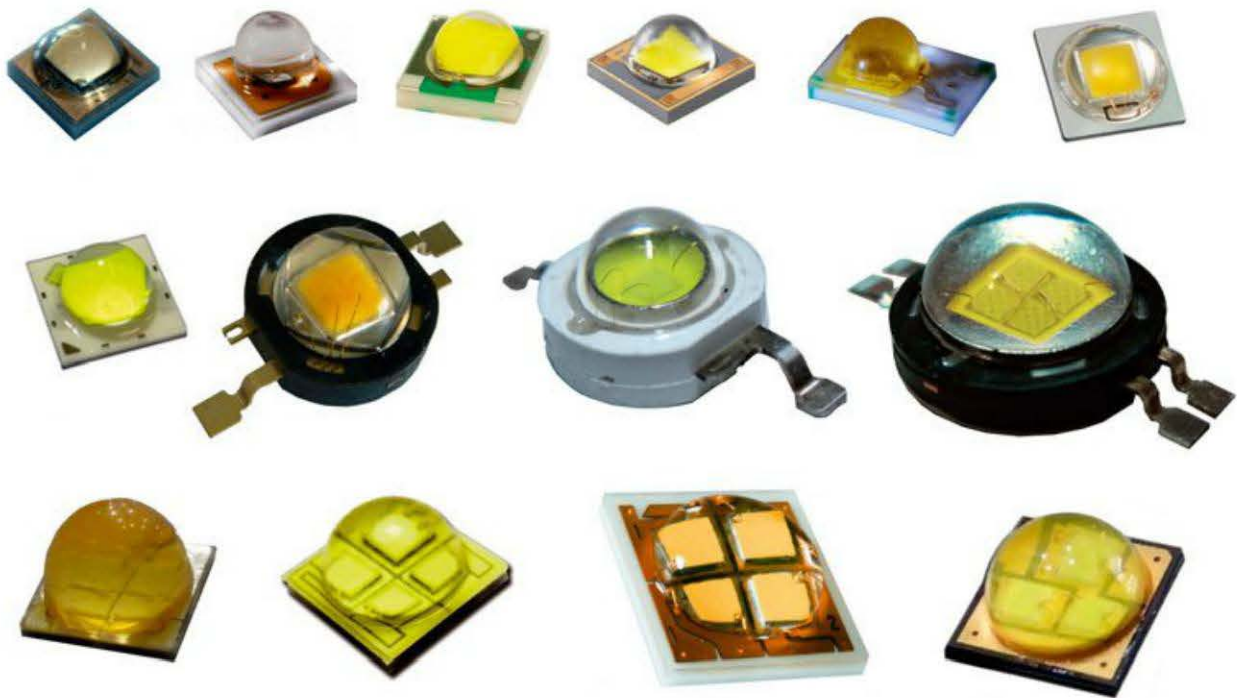


Figure 7.7 – LED de puissance (1-5 W) de différents fabricants.

Malgré cette tendance au développement de nouveaux modèles de LED avec un dôme silicone et un support plat souvent en céramique (figure 7.8.d), il faudra encore compter pendant plusieurs années sur les boîtiers plus anciens possédant un réflecteur (figure 7.8.a) de types *batwing* (avec pattes sur le côté – figure 7.8.d) ou avec des dômes de verre (figure 7.8.c).

7.2 Description détaillée des optiques primaires

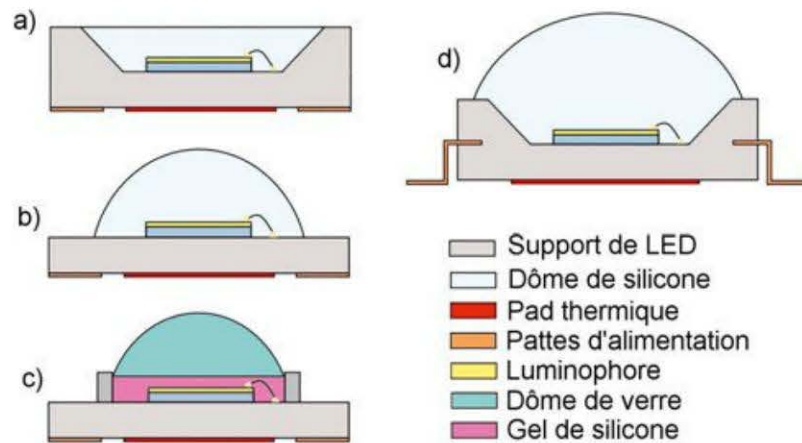


Figure 7.8 – Schéma de type de LED de puissance.

7.2.3 Les matrices Chip-On-Board (COB)

Il est très rare de trouver des matrices de type COB possédant une lentille primaire spécifique. La plupart du temps, ces types de composants sont réalisés de façon identique en quatre étapes principales (figure 7.9) :

1. Fabrication du support en aluminium ou en céramique, qui est réalisé comme un circuit imprimé et qui va recevoir les puces semi-conductrices ;
2. Soudure des puces semi-conductrices par brasage d'alliage en argent directement sur le support avec un contact thermique direct permettant de dissiper convenablement la chaleur ;
3. Câblage (*bonding*) pour relier entre elles l'ensemble des puces semi-conductrices. On réalise alors une matrice qui possède un certain nombre de branches de puce

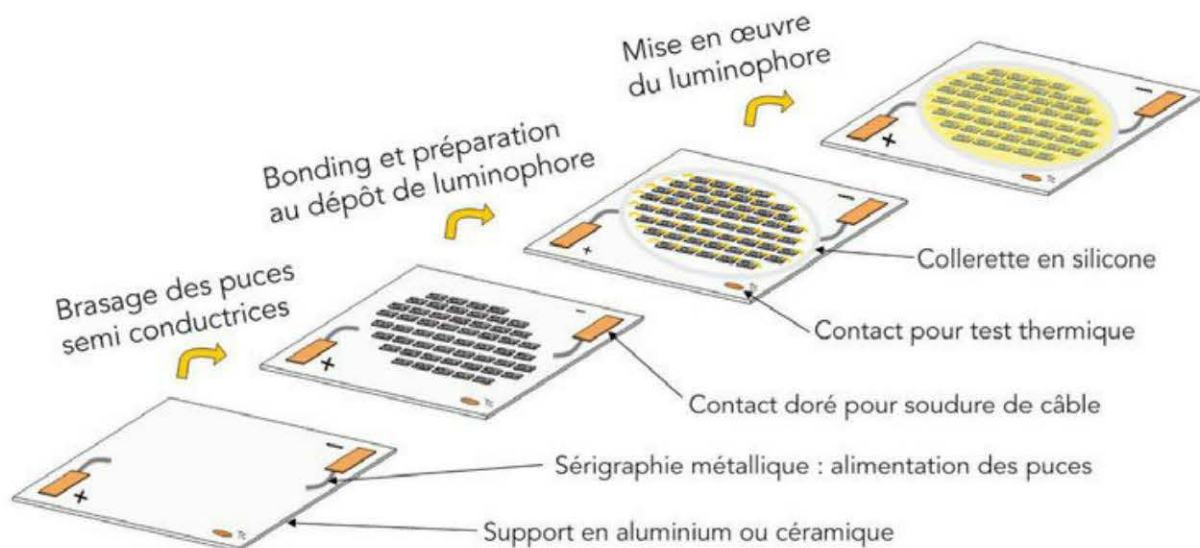


Figure 7.9 – Étapes de fabrication d'une matrice COB.

en série, ces branches étant elles-mêmes mises en parallèle afin d'alimenter l'ensemble à l'aide d'un seul câble ;

4. Dépôt d'une bague de silicone souple autour des puces à l'aide d'une seringue automatique. Cette opération permet dans un second temps de déposer au milieu un mélange constitué de silicone et de luminophore en garantissant une épaisseur relativement constante.

Ainsi, la majeure partie des matrices COB présentent une face avant plane, constituée de ce type de silicone (de différentes souplesses) et sont relativement fragiles (figure 7.10).

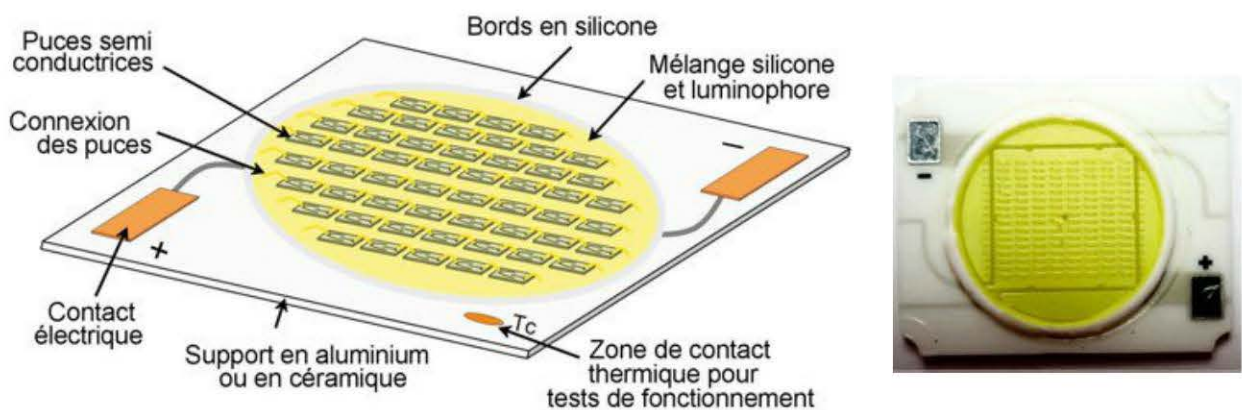


Figure 7.10 – Matrice COB (128 puces semi-conductrices faibles puissance).

Elles doivent être protégées par une optique secondaire plus robuste et moins sensible lorsqu'elles sont intégrées dans un produit d'éclairage. De plus, leur nettoyage est délicat et doit se faire à l'aide de produits à base d'alcool.

Une autre méthode consiste à fabriquer un boîtier en résine dure et opaque (en général blanche ; figure 7.11), qui possède le support métallique, les pattes d'alimentation et dont le centre constitue le réceptacle dans lequel seront soudées les puces semi-conductrices et sera coulé le mélange silicone-luminophore.

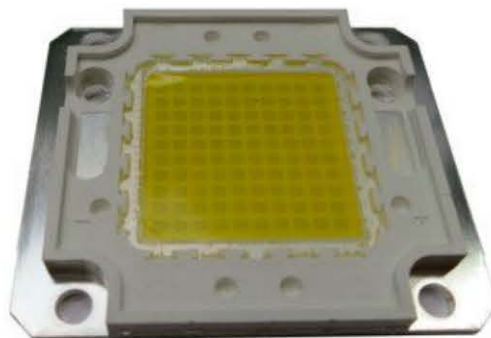


Figure 7.11 – Optique primaire en silicone dans un boîtier en résine dure.

7.2 Description détaillée des optiques primaires

Il existe également des modèles dans lesquels la bague de silicone qui est déposée autour des puces semi-conductrices avant la mise en œuvre du mélange de silicone et de luminophore est en métal. Elle est alors collée sur le support qui est généralement en aluminium (figure 7.12).

Enfin, la lentille primaire peut aussi avoir été fabriquée seule et mise en œuvre par collage sur un premier mélange de silicone et de luminophore (figure 7.12).

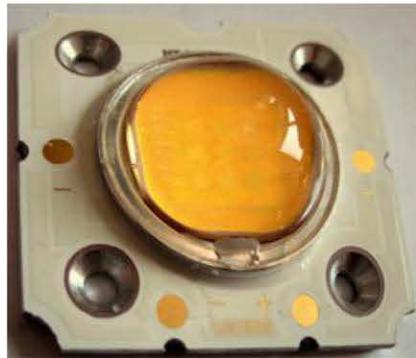


Figure 7.12 – Optique primaire avec bague métallique.

Dans la majeure partie des cas, les matrices COB sont composées d'un nombre de puces plus ou moins important (d'une dizaine jusqu'à près de 300 puces), soudées de façon rapprochée et noyées dans un mélange de silicone et de luminophore (silicone seule lorsqu'il s'agit de matrice de couleur ou RGB). Le but est d'extraire le maximum de lumière au travers d'une lentille primaire la plus économique possible pour proposer un flux utile maximal à l'intégrateur qui mettra en œuvre une optique secondaire adaptée à son application.

7.2.4 Cas des optiques primaires spécifiques

Il s'agit d'optiques primaires qui font partie intégrante de la LED (figure 7.13) mais qui sont réalisées pour des applications spécifiques. La société Stanley a par exemple développé une LED qui étale le faisceau de façon horizontale permettant de créer une forme ovale (figure 7.13.a). Osram de son côté, a intégré des optiques à large faisceau pour des applications d'éclairage général (figure 7.13 b et c), ainsi que des optiques diffusantes et texturées en surface pour des applications infrarouges (figure 7.13.d).

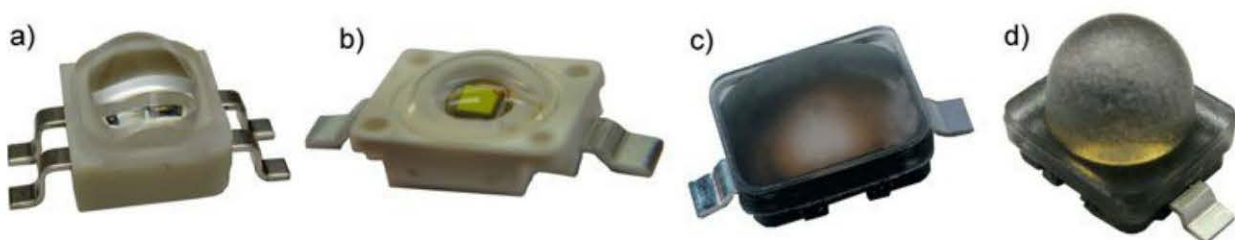


Figure 7.13 – Optiques primaires spécifiques.

7.3 Méthode d'extraction lumineuse

Les améliorations récentes en termes de mise en œuvre d'optiques primaires pour optimiser l'extraction de la lumière produite par le semi-conducteur ont permis d'atteindre un tel niveau d'efficacité que la marge de progression est dorénavant relativement faible (de l'ordre de 5 à 15 % suivant les différentes évaluations).

Pour décrire les différentes méthodes d'extraction lumineuse, nous allons considérer plusieurs phénomènes limitant la propagation de la lumière à partir du semi-conducteur.

7.3.1 Ce qui limite la propagation de la lumière

La lumière est générée sur l'ensemble de la surface du semi-conducteur depuis que des électrodes transparentes ont été mises au point.

Ainsi, la première étape consiste à transmettre la lumière émise par le semi-conducteur vers la lentille primaire. L'indice de réfraction des semi-conducteurs étant élevé, il faut mettre en œuvre une optique primaire ayant elle aussi l'indice le plus élevé possible, pour avoir une plage angulaire de transmission de la lumière la plus large possible. La géométrie de la surface du semi-conducteur peut aider à la transmission de la lumière, avec notamment de la texturation¹ qui est au contact du matériau de l'optique primaire et qui augmente la transmission de lumière (figure 7.14).

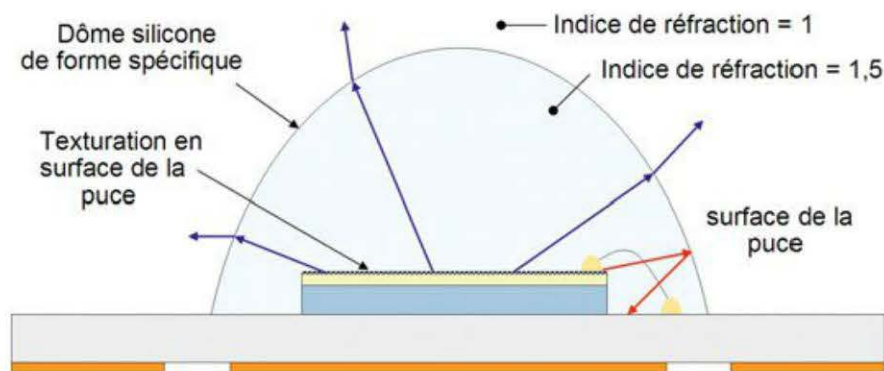


Figure 7.14 – Optique primaire spécifiques.

Une fois que la lumière a pénétré dans l'optique primaire, l'interface suivante est celle avec l'air. Pour favoriser une bonne transmission, il faut jouer sur la forme de la lentille (souvent en silicone) et tenir compte de son fort indice pour optimiser

1. Il s'agit d'une surface qui a été travaillée et qui n'est pas uniformément plane, mais qui possède un relief lui permettant d'améliorer l'extraction lumineuse.

l'extraction de la lumière. Un dôme sphérique en silicone d'indice de l'ordre de 1,5 à 1,6 permet d'atteindre de bons résultats et d'éviter les réflexions internes renvoyant les rayons vers le substrat, le support ou le semi-conducteur et qui sont alors absorbés (figure 7.14 : rayon rouge).

La propagation au travers de la lentille primaire est possible grâce à sa transparence. Les premières résines époxy jaunissaient et s'opacifiaient avec le temps. Les silicones utilisées aujourd'hui sont bien moins sensibles aux UV que les résines époxy et leur tenue face aux hautes températures et au vieillissement est bonne.

7.3.2 Fabrication et mise en œuvre des optiques primaires

Nous avons vu au paragraphe 2, les différentes optiques primaires mises en œuvre suivant les types de LED. Le but ici est de comprendre quelles sont les tendances et les raisons des choix technico-économiques qui ont été faits.

Le choix de lentilles primaires en silicone

Le choix de la silicone tend à se confirmer chez la plupart des fabricants. Privilégié au départ pour les LED de puissance (au milieu des années 2000), ce matériau transparent avec une transmission proche de 99 % commence à se généraliser y compris pour des LED de plus faible puissance. Néanmoins, il reste plus cher que les résines époxy et plus coûteux à mettre en œuvre.

En effet, alors que les résines époxy se coulent généralement dans les réceptacles des LED, les lentilles primaires en silicone font appel à trois méthodes de fabrication :

- ▶ Le dépôt tête-bêche du support de la LED sans lentille sur un moule contenant la silicone, qui se fixe ainsi sur le support de la LED (figure 7.15.a). Cette manière de procéder est bien adaptée aux LED possédant des supports céramiques plats.
- ▶ L'injection de la silicone dans un moule qui coiffe le support de LED et la puce semi-conductrice soudée dessus [75]. Sur les modèles de LED avec support céramique plat, cette méthode dépose de la silicone sur une partie de cette surface plane (figure 7.15.b). Elle est très adaptée pour les modèles de LED possédant un boîtier de résine dure avec un réflecteur.
- ▶ Enfin, une technique dédiée aux LED qui ne possèdent pas de luminophore déposé directement sur la puce met en œuvre une lentille préformée déposée à l'envers sur un support (moule) et remplie de silicone et de luminophore (figure 7.15.c). Le support de la LED est ensuite déposé dessus.

Dans les trois cas, l'utilisation d'un film fin pour éviter que la silicone accroche le moule est mise en œuvre avant dépôt de la silicone puis retirée ensuite.

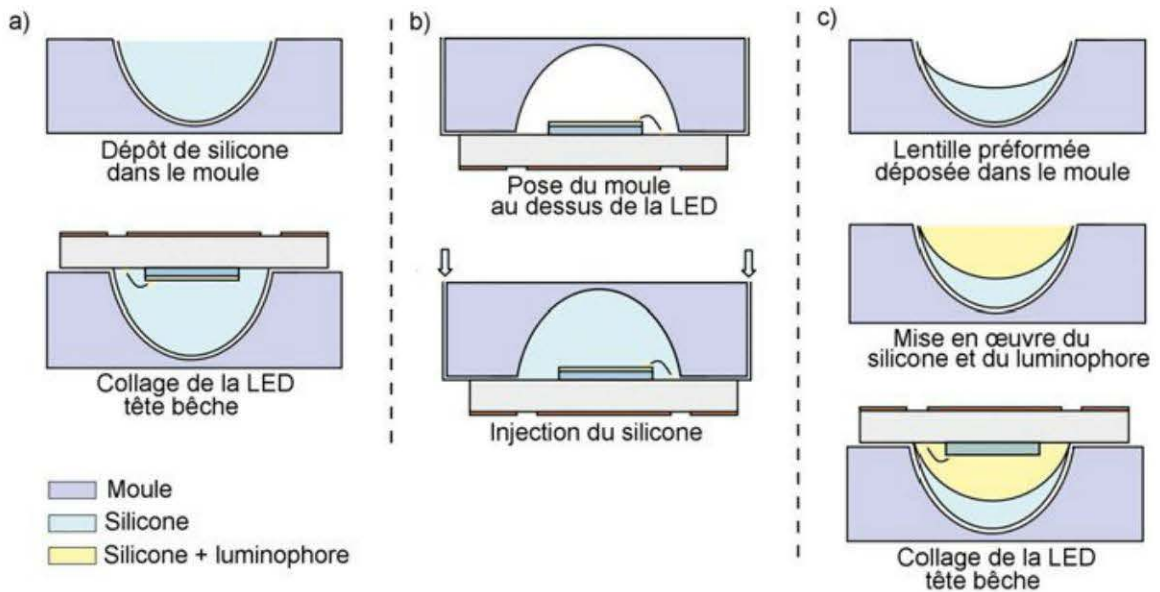


Figure 7.15 – Fabrication des optiques primaires.

Quelques points sont toutefois à noter à propos de ce type d'optique primaire. La souplesse de la silicone le rend plus fragile que les résines époxy et la texture légèrement collante de sa surface peut capter d'éventuelles poussières. Il est donc nécessaire de protéger les applications qui intègrent des LED à lentilles primaires en silicone.

Le choix de lentilles primaires en résine époxy

Ce choix est largement préféré pour les applications de LED basse puissance nous l'avons dit, notamment pour les applications de signalétique extérieures dans lesquelles les composants (LED) sont souvent à l'air libre, soumis aux intempéries et noyés dans des résines souples et opaques pour assurer l'étanchéité du système complet.

Pourtant, les résines époxy résistent plus difficilement que les silicones aux variations de température et des microfissures finissent par se créer puisque ce matériau est rigide, ne peut pas se dilater et s'adapter aux petits mouvements des interfaces sur lesquelles il est collé. C'est l'une des raisons pour lesquelles les LED de puissance, dont la dissipation thermique se fait en face arrière, ont une faible épaisseur de résine époxy dans les cas où cette technologie a été choisie. En effet, le haut de la LED peut se trouver en contact direct avec des températures de l'ordre de 10 à 15 °C, alors que l'intérieur proche de la puce semi-conductrice peut atteindre une centaine de degrés.

Les LED de types 3 et 5 mm dégagent de faibles puissances thermiques de telle sorte que la température interne proche de la puce et au contact de la résine époxy dépasse rarement 60 °C lorsque le dôme complet est plongé à 20 °C. Ainsi, l'emploi de résine époxy reste intéressant.

7.3 Méthode d'extraction lumineuse

De plus, le pouvoir d'accroche de ces résines est bien supérieur à celui des silicones (d'un rapport 2 à 3) de telle sorte que le processus de fabrication des LED est facilité ; il ne nécessite pas de préparation des surfaces de contact entre les différentes parties de la LED lors de l'assemblage par moulage.

En définitive, c'est avant tout un choix économique qui oriente les fabricants vers l'utilisation de ce matériau pour l'encapsulation des LED.

Autres matériaux d'encapsulation pour lentille primaire

Le PMMA par exemple (*PolyMethylMethacrylate*) est parfois utilisée mais de façon plus marginale, puisqu'il est sensible aux UV et à la température (il s'opacifie en jaunissant, limitant le flux et faisant dériver le spectre).

8

Performances des LED

Les caractéristiques d'une LED sont bien sûr dépendantes de ses constituants et de son architecture, mais aussi de la manière dont elle est alimentée. Ce chapitre fait le tour des différents types de tension utilisées pour les LED. Il aborde également les problèmes de dissipation de la chaleur.

8.1 Le pilotage en courant d'une LED

Les LED sont avant tout des diodes et présentent donc le même comportement électrique que les autres diodes (mis à part certains modèles qui ne supportent pas d'être polarisés en inverse).

Les caractéristiques électriques (courant/tension) des LED et notamment celle de la jonction P-N ont été décrites de façon précise pour la première fois par Schockley. L'équation complète du courant en fonction de la tension (et d'autres paramètres comme les taux de diffusion des électrons et des trous ou encore la durée de vie des porteurs de charges) est relativement complexe et nous ne la présenterons pas ici.

8.1.1 Comportement électrique non idéal

La fonctionnalité d'une simple diode est avant tout de permettre le passage d'un courant dans un seul et unique sens. Son rôle est donc d'empêcher le passage du courant dans un sens et de le laisser passer sans aucune contrainte dans l'autre sens.

Les LED ont vocation à éclairer (même si on utilise parfois leur fonction de diode électrique), et la fonctionnalité de blocage du courant et de seuil en dessous duquel elles n'émettent pas de lumière, n'est que la conséquence non désirée de la « nature première » des LED : ce sont avant tout des semi-conducteurs.

L'équation de Schockley décrit le comportement « idéal » d'une jonction P-N, alors qu'en réalité cette jonction est hébergée dans un boîtier. Des effets parasites existent

(pertes ohmiques) et viennent modifier ce comportement « idéal ». Ainsi, la pente de la courbe très caractéristique des diodes s'infléchit un peu mais reste néanmoins très abrupte (figure 8.1.a).

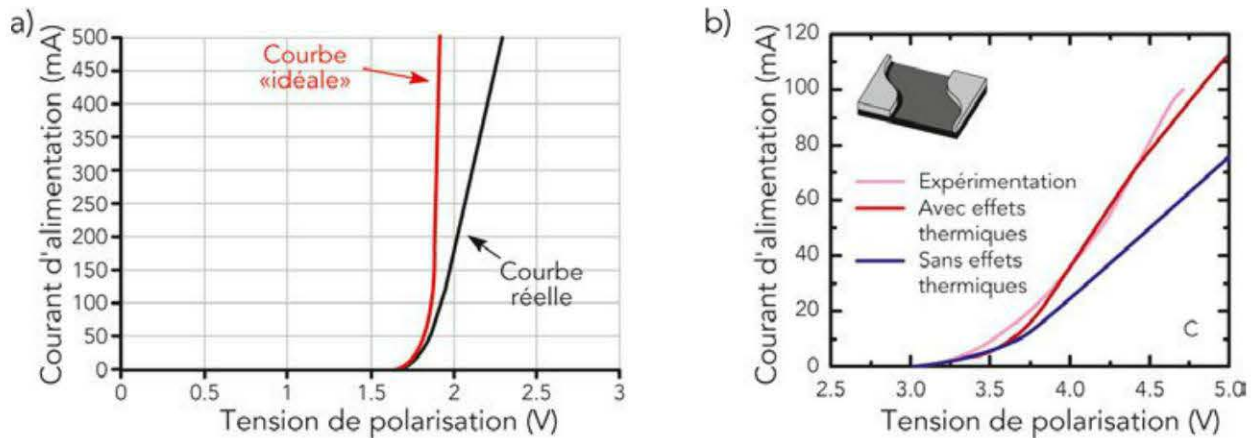


Figure 8.1 – Courbes du courant en fonction de la tension d'alimentation. a) Avago ; b) puce évaluée dans le cadre de tests. (K.A. Bulashevich-STR, Inc., janvier 2007).

Des études expérimentales¹ ont décrit ce phénomène dû au dégagement de chaleur au niveau de la jonction semi-conductrice (figure 8.1.b) qui peut être plus ou moins marqué suivant les modèles de LED, la taille du semi-conducteur et leur technologie.

Les LED possèdent donc un seuil en tension en dessous duquel elles ne conduisent pas le courant (et par conséquent n'émettent pas de lumière). À partir du moment où ce seuil, qui diffère suivant les types de LED, est dépassé, elles commencent à conduire le courant de façon progressive. La plupart des LED ne sont pas testées pour un courant inférieur à 25 % du courant qui a été défini comme le courant normal de fonctionnement. Ainsi, leurs tensions de fonctionnement à des courants très bas ne sont pas connues. Malgré cela, le pilotage des LED en sous-alimentation est chose courante.

8.1.2 Tension d'alimentation suivant le type de LED

Les LED sont donc des diodes non idéales et cette particularité de seuil de fonctionnement en tension en dessous duquel elles ne fonctionnent pas (figure 8.2), constitue un problème plutôt qu'un avantage. En effet, suivant les types de LED (suivant la couleur qu'elles émettent et donc le type de leur semi-conducteur), cette tension de seuil varie.

1. *Current Spreading and Thermal Effects in Blue LED Dice*, jan2007 [83].

8.1 Le pilotage en courant d'une LED

De plus, au sein d'un même modèle fabriqué par le même fabricant, des différences notables existent et posent parfois des problèmes de design de produit.

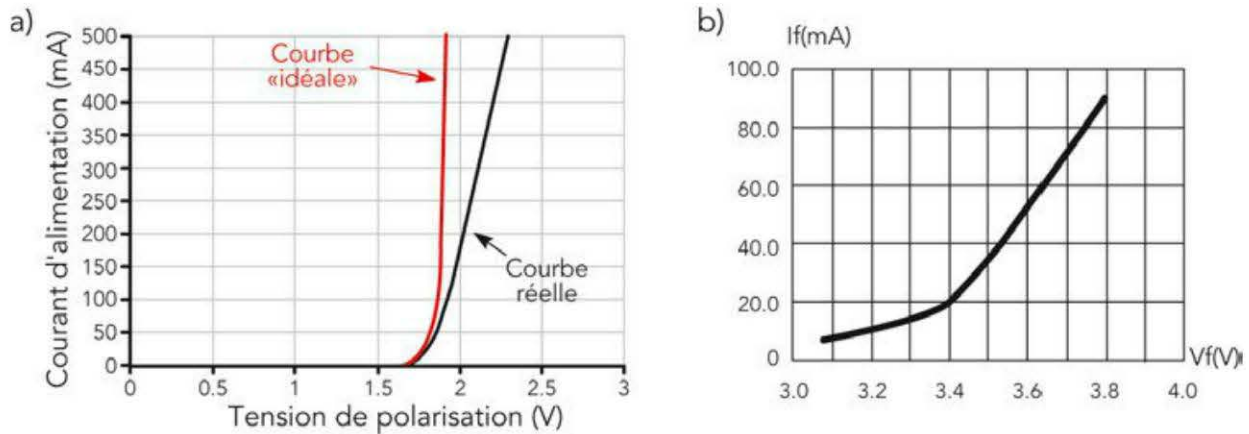


Figure 8.2 – Courbes du courant en fonction de la tension d'alimentation (a) Avago ; b) Bivar) – tension de seuil de démarrage (Avago – Bivar).

Il existe quatre modes de fonctionnement des LED :

- ▶ De 0 volt (tension de polarisation nulle) à la tension de seuil, aucun courant ne traverse la LED ;
- ▶ Puis, lorsque la jonction commence à être « suffisamment » polarisée pour laisser passer un courant, nous sommes dans la partie où le comportement de la LED est non linéaire et difficilement contrôlable ;
- ▶ Ensuite, nous entamons la partie la plus souvent utilisée par les intégrateurs de LED, qui est relativement linéaire, non seulement dans la relation entre le courant et la tension de polarisation, mais également entre le courant et le flux émis par la LED ;
- ▶ Enfin, la 4^e et dernière phase correspond à la saturation du semi-conducteur, accompagnée en général d'échauffements importants, phase pendant laquelle le courant, la tension de polarisation et le flux n'évoluent pas du tout de façon linéaire. Cette dernière phase est à éviter car elle représente une zone critique pour la LED, avec potentiellement une détérioration du semi-conducteur.

Certains modèles de LED sont particulièrement difficiles à piloter à l'approche de la tension de seuil. Celle-ci est parfois elle-même difficile à évaluer si l'on considère qu'avant cette tension aucun courant ne passe et qu'après, le courant augmente d'abord de façon non linéaire sur une très petite plage de tension, puis de façon linéaire sur une plage plus grande. Cette difficulté à cerner la tension de seuil (figure 8.2.b) dépend des composants et de leur qualité de fabrication (notamment la qualité du semi-conducteur) et de son intégration.

8.1.3 Polarisation de la jonction et maîtrise du courant

La principale raison pour laquelle une LED doit impérativement (sauf cas exceptionnels dont nous parlerons plus tard) se piloter en courant, c'est le fait que non seulement la tension de polarisation aux bornes des LED pour un même courant et une même température peut être très différente d'une LED à l'autre, mais de plus, que cette tension de polarisation à courant constant varie de façon inversement proportionnelle à l'augmentation de la température de la jonction.

Deux autres points qui découlent en partie des deux premiers sont à noter. D'une part, le fait qu'un faible accroissement de tension aux bornes d'une LED peut engendrer une forte augmentation du courant qui la traverse (figure 8.1.a – courbe rouge), et d'autre part, la variation inversement proportionnelle de la tension de polarisation avec la température de la jonction n'est pas identique pour tous les composants de même technologie, voire franchement différente lorsqu'il s'agit de LED de couleurs différentes (figure 8.3).

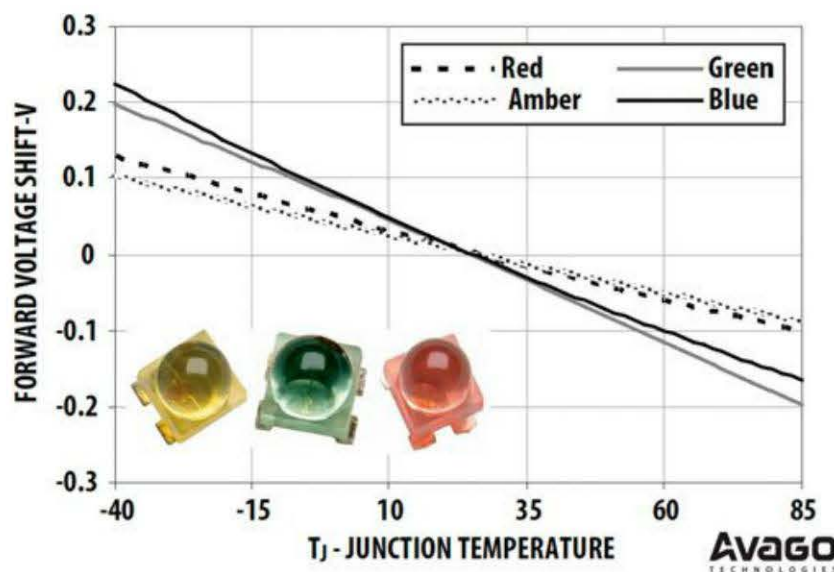


Figure 8.3 – Variation du V_f des LED en fonction de la température et du type de LED (Avago).

Ainsi, le V_f nominal est donné pour une température de jonction de 25 °C (figure 8.3). Lorsque la température de jonction varie, si la LED est pilotée en tension, autrement dit si le système qui alimente la LED s'efforce de maintenir une certaine tension aux bornes de la LED, le courant traversant la LED va augmenter.

Prenons l'exemple d'un design électronique qui a été réalisé pour alimenter une LED rouge. Le pilotage s'effectuant en tension, la valeur du courant traversant la LED a été choisie et calculée en fixant le courant aux bornes de cette LED (figure 8.4, point 1)

8.1 Le pilotage en courant d'une LED

avec un maintien de la température de jonction à 25 °C (figure 8.4, point 2). Lors du fonctionnement du système, la température de jonction ne peut être maintenue et augmente pour atteindre une température de 75 °C (figure 8.4, point 3). Cela se traduit par une diminution de la tension nécessaire à la LED à cette nouvelle température (figure 8.4, point 4), par rapport à la tension prise comme référence pour le courant initial choisi.

Puisque l'alimentation s'efforce de maintenir la tension initialement prévue pour une jonction à une température de 25 °C (2,1 V – figure 8.4, point 1), alors que le besoin de la LED pour délivrer le courant initialement prévu est maintenant inférieur (figure 8.4, point 4), cela revient à alimenter la LED à une tension supérieure à la valeur initiale (figure 8.4, point 5), et donc à un courant de fonctionnement également supérieur (figure 8.4, point 6).

Ce processus d'augmentation du courant de fonctionnement engendre un dégagement de chaleur plus important, ce qui fait que la température de jonction augmente encore, diminuant de ce fait le niveau de la tension de fonctionnement et aboutissant à une nouvelle augmentation de courant. Ce phénomène peut ainsi aboutir à un « emballement thermique », l'augmentation de température de la jonction engendrant l'augmentation de courant, elle-même créant une nouvelle augmentation de température.

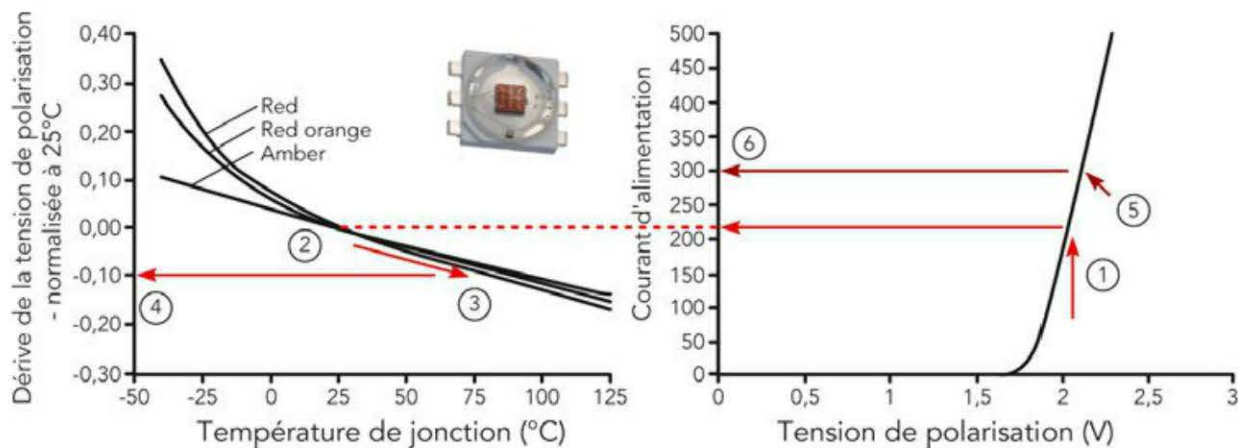


Figure 8.4 – Effet « d'emballement du courant » d'une LED pilotée en tension (Avago).

8.1.4 Différents types de LED pilotables à des courants de 1 à 1 500 mA

Le courant admissible par les LED est très variable suivant les modèles. Nous parlons souvent de densité de courant plutôt que de courant proprement dit, et donc de surface de puce semi-conductrice associée.

L'une des problématiques des fabricants de puces réside dans l'uniformité des plaques de silicium réalisées avec différentes méthodes, et l'uniformité des dépôts complémentaires qui sont effectués pour réaliser le semi-conducteur des LED avant découpe. La qualité de cette uniformité joue un rôle très important dans l'efficacité des LED et dans leur colorimétrie.

Au départ, les techniques de dépôts étant moins maîtrisées, il était relativement difficile de fabriquer des puces semi-conductrices de grande taille ($\geq 1 \text{ mm}^2$) en maintenant des uniformités de bonne qualité et donc des efficacités importantes (figure 8.5) et des colorimétries proches sur un même *wafer* (*wafer* = plaque de silicium avec matériaux complémentaires).

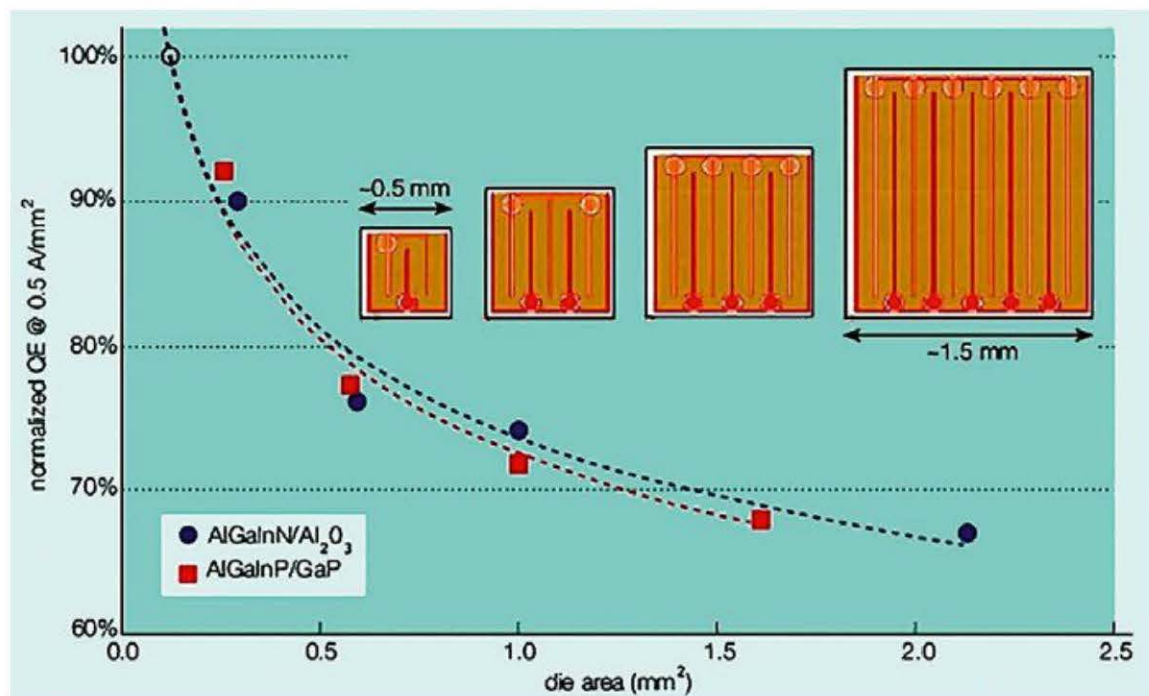


Figure 8.5 – Efficacité des puces semi-conductrices en fonction de leur surface (Philips Lumileds – 2005).

Les méthodes de fabrication se sont petit à petit améliorées et il est aujourd'hui (en 2012) relativement facile, sans beaucoup réduire les durées de vie des composants et sans diminuer la qualité de la lumière émise, d'alimenter les LED (de puissance) avec des densités de courant moyen sur la puce autour de 100 à 120 A/cm². Dans certains cas, on peut aller au-delà, jusque 200 A/cm², mais la LED est alors plus fortement sollicitée et ses performances décroissent plus rapidement.

Pour les modèles de LED basse puissance et de puissance intermédiaire, les densités de courant se situent plus aux alentours de 30 à 40 A/cm².

8.2 Tension d'alimentation des LED

L'évolution des tensions d'alimentation des LED doit être dissociée de celle des puces semi-conductrices qui sont hébergées dans les LED, car jusqu'à la fin des années 2000, les LED monopuces étaient quasi-majoritaires. La tension de la LED était donc celle de la puce, mais depuis plus de dix ans les LED multipuces se développent, et la tension des LED est en définitive celle d'une association en série et/ou en parallèle de plusieurs puces semi-conductrices.

Le choix du semi-conducteur et la tension de polarisation varient suivant la couleur de l'émission lumineuse (autour de 1,7 à 2 V pour un rouge ou encore 3,3 V pour un bleu). Cette tension peut parfois poser des problèmes lors de l'intégration des LED dans les applications, notamment lorsque le système d'éclairage utilise le secteur (230 VAC) comme source d'énergie.

8.2.1 Évolution des semi-conducteurs

De 2002 à 2012, les tensions d'alimentation des LED ont globalement diminué, avec néanmoins des disparités importantes entre les différentes couleurs. De façon générale pour la plupart des constructeurs, les rouges et ambres n'ont pas vu leur tension diminuer de beaucoup, passant de 2,2-2,4 V (valeurs typiques constatées) à 2-2,2 V. Ce n'est pas le cas des LED bleues qui pour certaines (le modèle Golden Dragon de Osram par exemple), affichaient une tension de 3,8 V au début des années 2000 et ne nécessitent plus aujourd'hui (2015) qu'une tension de l'ordre de 3 V ou légèrement inférieure (pour un courant d'alimentation identique de 350 mA).

Les développements au début des années 2010 ont permis d'atteindre des valeurs proches de 3 V (voire moins) pour les LED blanches et bleues, et de 3,4 à 3,6 V pour les LED vertes (en prenant comme référence des LED de puissance alimentées à 350 mA). Le fabricant CREE avec son modèle de LED blanche XP-G Gen2, atteint par exemple 2,7 V à 350 mA à une température de jonction autour de 85 °C. En 2015, la plupart des fabricants de LED blanches affichent des tensions de fonctionnement comprises entre 2,7 V pour les plus basses à 2,9 V pour des courants de fonctionnement de l'ordre de 350 mA (LED de puissance).

L'importance de cette baisse de tension de polarisation à courant constant (350 mA par exemple) provient du fait que les systèmes d'éclairages mettent en œuvre très souvent des LED en série et sont donc limités sur le nombre de LED qu'il est possible d'alimenter. Ainsi, pour les applications qui sont développées à partir de tensions continues de 12 et 24 V, passer en dessous de 3 voire de 2,8 V (à 350 mA) pour certaines LED blanches de dernière génération, permet de mettre en série quatre composants avec le système de régulation sous 12 V ce qui améliore l'efficacité (le système de pilotage du courant est alors dit *low drop*).

Par ailleurs, cette diminution de la tension de polarisation à courant constant a participé à l'amélioration de l'efficacité des LED, et cela grâce à deux points techniques. D'abord, en fournissant un flux identique pour une consommation plus faible, l'efficacité augmente de facto. Ensuite, puisque la taille des LED s'est réduite relativement vite au fil des années, il était indispensable qu'il y ait une baisse de la consommation d'énergie pour assurer le dégagement de chaleur (1,4 W consommé au début des années 2000, contre 1,1 W en 2010).

Système de pilotage *low drop*

Système qui pilote le courant dans les LED avec une faible différence entre la tension d'entrée et la tension de sortie de telle sorte que si un système est alimenté avec une alimentation de 12 V, lui-même ne nécessitant que quelques dixièmes de volt, il peut être aisément mis en série avec 3 LED à 3,2 V chacune voire 4 LED à 2,8 V chacune afin que le total entre la somme des tensions nécessaires pour les LED et le système de pilotage soit inférieur à 12 V, la tension délivrée par l'alimentation.

Les résistances thermiques des LED ont également diminué pendant la même période (de 12-14°/W à moins de 6°/W), et cette baisse de la quantité de chaleur à dissiper a permis de diminuer la température de fonctionnement des composants. Cela a eu pour conséquence de les rendre un peu plus efficaces (à courant constant, si la jonction est plus froide, le flux est plus important).

8.2.2 Types de tension d'alimentation disponibles : DC, HV ou AC

L'alimentation en basse tension mode continu (DC) est l'une des caractéristiques principales et remarquables des sources lumineuses que sont les LED. Mais depuis le départ, les fabricants de solutions d'éclairage ont été confrontés aux problèmes de conversion de l'énergie disponible sous forme de tension alternative du secteur (110 ou 230 VAC), en énergie directement exploitable pour les LED. La plupart des LED blanches requièrent une tension de fonctionnement autour de 2,8 à 3,2 V et plusieurs approches techniques sont possibles pour adapter cette tension à celle disponible.

La plus répandue d'entre elles est l'utilisation d'alimentations qui convertissent la tension du secteur en tension continue plus basse (souvent comprise entre 9 et 36 V). Une autre méthode consiste à abaisser cette tension alternative à un niveau considéré comme « moins dangereux » ou « de sécurité » : il s'agit de « basses tensions » (BT) ou de « très basses tensions » (TBT ou TBTS pour les très basses tensions de sécurité) qui se situent en courant continu autour de 120 V (dans des zones sèches). Enfin, la dernière manière de procéder est plus complexe pour les intégrateurs car elle leur demande de développer la solution d'éclairage en amenant la tension alternative du secteur directement sur la carte contenant les LED.

8.2 Tension d'alimentation des LED

C'est dans ce contexte que les fabricants de LED ont développé des solutions permettant de s'affranchir de certaines de ces solutions d'alimentation, souvent coûteuses et complexes (figure 8.6.a), mais qui restent encore aujourd'hui efficaces et rentables, au regard des efficacités de ces nouveaux composants récemment développés (LED) dont nous allons décrire les caractéristiques.

Ces solutions ont consisté tout d'abord à intégrer plusieurs puces semi-conductrices en série dans les LED (ou plusieurs branches de plusieurs puces en série) afin d'augmenter la tension de fonctionnement des LED blanches (figure 8.6.b). Ces types de LED fonctionnant en mode continu, elles peuvent avoir des tensions de fonctionnement de 6 à 50 V, voire 100 V.

Puis les processus de fabrication et d'intégration des puces dans les boîtiers des LED se sont améliorés et perfectionnés, permettant de baisser les coûts de fabrication tout en intégrant un plus grand nombre de puces (de 50 à plus de 100 puces semi-conductrices dans une même LED de quelques millimètres de côté). Des LED fonctionnant directement en 110 ou 220 VAC ont ainsi pu être mises au point (figure 8.6.c).

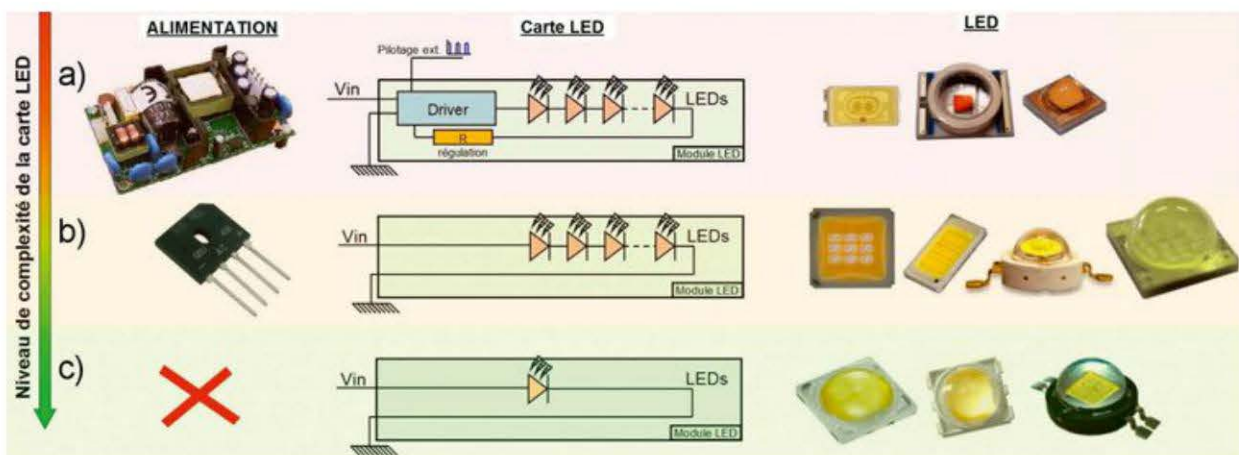


Figure 8.6 – Type d'alimentation et de carte LED en fonction du type de LED
(a) standard basse tension (DC) ; b) haute tension continue (HV-DC) ;
c) haute tension alternatif (HV-AC)).

LED fonctionnant en tension DC

C'est le plus répandu des types de tension d'alimentation pour des LED blanches (ou de couleur), comprises entre 1,7 V (LED rouges) et 3,8 V (certaines LED vertes ou ultraviolettes). Les LED de forte puissance hébergeaient en général une seule puce jusqu'au milieu des années 2000, puis les fabricants se sont mis à produire des LED de puissance hébergeant plusieurs puces en parallèle qui se répartissaient alors le courant (figure 8.7.a – LED de Seoul Semiconductor aujourd'hui obsolète et remplacée par le modèle Z7 en figure 8.7.d) ou avec des puces en série, figure 8.7.b

– modèle de Senslité). Certains fabricants comme Nichia ont opté pour des puces de puissance intermédiaires, en les associant à la fois en parallèle et en série (figure 8.7.c).

Enfin, les fabricants des boîtiers de LED hébergeant plusieurs puces semi-conductrices (dans ce cas-là de forte puissance essentiellement) ont pour la plupart opté pour une indépendance de l'alimentation de chacune des puces hébergées dans la LED (figure 8.7.d et figure 8.7.e, respectivement Seoul Semiconductor et EdisonOpto), permettant à l'intégrateur de contrôler chacune des puces indépendamment des autres.

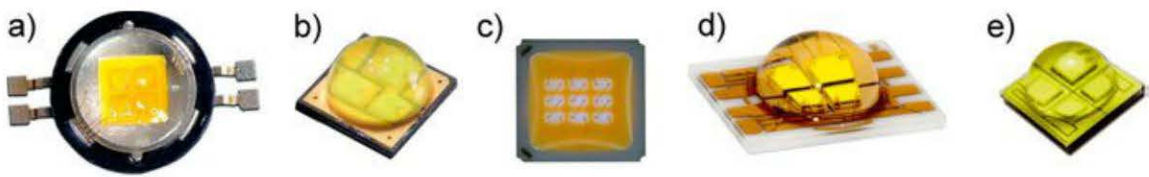


Figure 8.7 – Modèles de LED de tension d'alimentation de type DC, associant des puces semi-conductrices en parallèle (a), en série (b), en série et en parallèle (c) et pilotables indépendamment (d et e).

LED fonctionnant en tension HV

Il est important de préciser que les LED de type HV sont essentiellement développées pour l'éclairage blanc.

Les LED colorées sont utilisées dans des applications souvent très différentes les unes des autres, associant des nombres de LED très variés. De plus, elles ont des comportements différents des LED blanches face aux paramètres extérieurs, notamment vis-à-vis de la température, pouvant impliquer des variations de tensions d'alimentation importantes avec la variation de température.

Arbitrairement, on considère que la tension d'alimentation de la LED est de type « HV » à partir du moment où elle dépasse les 40 à 50 V. Néanmoins, nous définirons ici une limite moins franche et plus basse en considérant qu'à partir du moment où les LED (blanches car il s'agit essentiellement de ce type de LED) ont été développées avec un nombre de puces semi-conductrices en série, elles permettent de remplir une fonctionnalité d'alimentation ou de la faciliter.

Ainsi, des modèles fonctionnant entre 9 et 10 V en courant nominal, permettent de simplifier des systèmes fonctionnant sous 12 VDC, par exemple pour des fonctionnalités d'éclairage à une seule source lumineuse (spot lumineux) nécessitant plus de flux qu'une simple LED de puissance de type 1 W (en mode DC), limitée elle autour de 100 à 200 lumens. Les LED n'hébergeant que deux puces en série (de tension d'alimentation comprise entre 6 et 7 V) ne sont pas considérées comme des LED de type HV, même si cela facilite grandement le design des produits lorsque la compacité du système d'éclairage est critique.

8.2 Tension d'alimentation des LED

Les plus actifs ces dernières années en LED de type HV sont incontestablement les fabricants asiatiques (Seoul Semiconductor (figure 8.8.a), Everlight (figure 8.8.b), Samsung et américains (Philips Lumileds – figure 8.8.c et d). Le taiwanais Epistar a joué un rôle de premier plan en tant que fabricant de puces semi-conductrices de type HV et a particulièrement poussé ce type de développement.

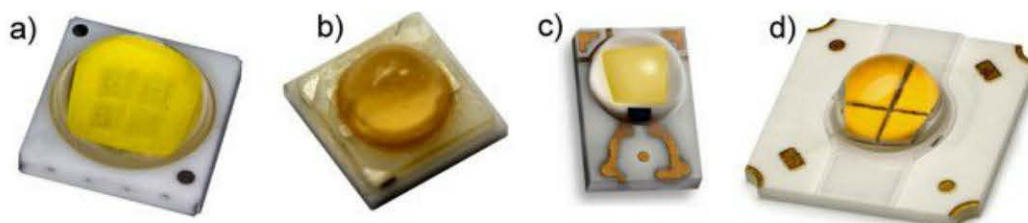


Figure 8.8 – LED de type HV (a) Seoul ; b) Everlight ; c et d) Philips Lumileds).

Ces LED ne peuvent pas fonctionner en mode alternatif et doivent être utilisées avec une électronique qui fournit un courant continu. Néanmoins, le redressement de la tension alternative du secteur (230 VAC) n'a pas impérativement besoin d'être filtré et lissé.

Des fabricants comme Seoul Semiconductor proposent des modules de ce type de LED (figure 8.9.b), montés avec une électronique conçue spécialement à cet effet, et qui peuvent être utilisés directement sur le secteur. On constate sur la figure 8.9 la nette simplification entre le module avec des LED de type HV (figure 8.9.b) et leurs homologues de type DC (figure 8.9.a).

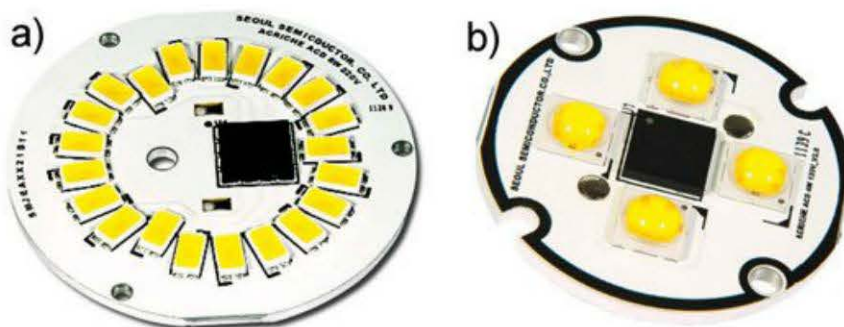


Figure 8.9 – Modules constitués de LED DC (a) et de LED de type HV (b).

LED fonctionnant en tension AC

C'est le coréen Seoul Semiconductor (figure 8.10.a) qui a le premier développé une LED fonctionnant directement sur le secteur (à 230 VAC) accompagnée d'une petite résistance de régulation et d'un condensateur de filtrage en entrée. Pendant longtemps, il a été le seul sur le marché à proposer une telle technologie qui a d'ailleurs

eu beaucoup de difficultés à s'imposer, en particulier du fait de son faible rendement et de sa durée de vie réduite comparée aux LED plus traditionnelles.

À partir de 2010, en même temps que les performances des modèles existants s'amélioraient, de nouveaux acteurs sont entrés en jeu comme Samsung (figure 8.10.b) qui a proposé à son tour des composants à brancher directement sur le secteur (110-230 VAC).

Mais les performances restaient malgré tout inférieures à celles des LED standard en mode DC, en particulier le rendement, qui était 20 % supérieur sur les modèles de type DC pour des caractéristiques de flux et de colorimétrie identiques.

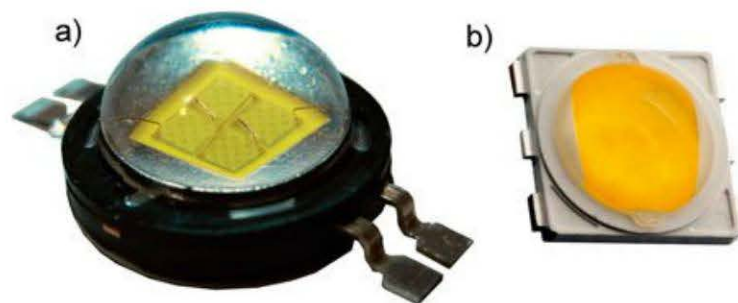


Figure 8.10 – LED de type AC (a) Seoul ; b) Samsung).

En termes de durée de vie, puisque nous sommes en présence d'un grand nombre de petites puces semi-conductrices mises en série (et en parallèle), cela signifie que non seulement la durée de vie est plus faible que celle de LED équivalentes en flux et en puissance possédant des semi-conducteurs plus gros, mais qu'en plus elles sont plus sensibles à une augmentation de la température de fonctionnement. Malgré cela, leurs durées de vie restent très intéressantes (autour de 40 000 h pour une jonction à 80 °C et pour un blanc neutre, et seulement 20 000 h si la jonction atteint les 100 °C).

8.2.3 Rendement des LED

Lorsque l'on parle de rendement, il faut impérativement associer les conditions techniques qui permettent d'atteindre la performance annoncée, mais également les conditions économiques (prix, délais, types de fabrication), sans quoi l'information est finalement peu exploitable. En effet, les annonces de fabricants disant avoir dépassé les 200 à 250 lm/W au sein de leurs laboratoires sont difficilement exploitables et ne permettent pas aux industriels et aux utilisateurs d'envisager des applications à court terme, car les conditions d'obtention des résultats peuvent impliquer de réelles difficultés pour passer à l'échelle industrielle et commerciale. Cela donne néanmoins une information sur les capacités potentielles de cette technologie, et c'est de cette manière qu'il faut appréhender l'information.

Origines des pertes dans une LED

Comprendre l'origine des pertes (essentiellement sous forme de chaleur) est une chose primordiale pour évaluer au plus juste le rendement des LED et pouvoir l'améliorer. Il est nécessaire de décomposer leur fonctionnement et d'évaluer à chaque étape de conversion de l'énergie les pertes associées (figure 8.11).

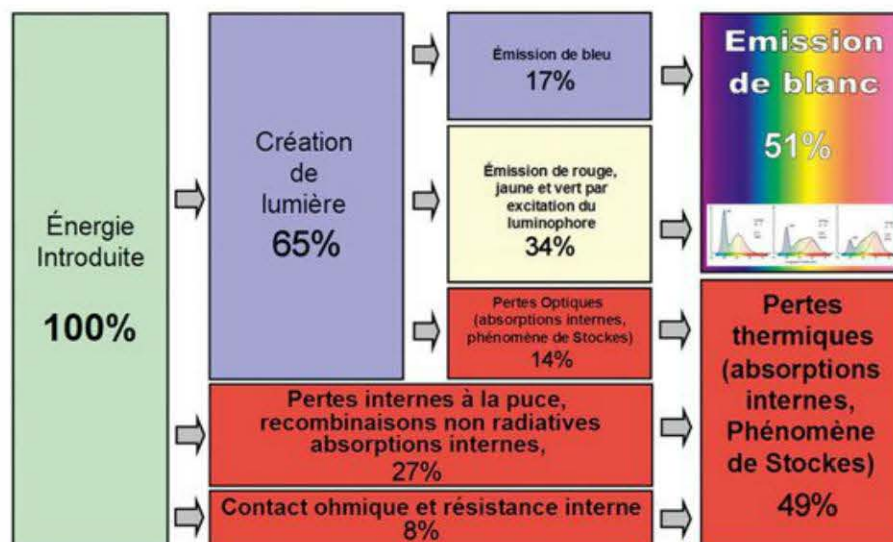


Figure 8.11 – Origines des pertes énergétiques dans une LED (cas favorable).

Globalement, deux tiers de l'énergie absorbée par les LED (sous forme électrique) sont convertis en chaleur essentiellement au niveau du semi-conducteur, et dissipés par conduction vers l'extérieur du boîtier de la LED grâce au pad thermique.

Limites théoriques physiques

La conversion de l'énergie électrique en énergie lumineuse consiste à exciter des atomes, à créer des manques d'électrons (« trous ») et à recombinaison judicieusement les paires électron/trou dans le semi-conducteur. D'autres paramètres sont à prendre en compte une fois que cette énergie lumineuse est créée, comme la sensibilité de l'œil par exemple et le fait que celui-ci possède un filtre avec un maximum de sensibilité au niveau du vert.

Ainsi, une lumière verte peut avoir une efficacité lumineuse¹ à 680 lm/W (à ne pas confondre avec le rendement des LED) car nous sommes au niveau maximum de la

1. L'efficacité lumineuse s'exprime en lumens par watt. C'est le rapport entre l'énergie radiative émise par la source de lumière (en watts) et la conversion de cette puissance par l'œil au travers de son filtre naturel ($V(\lambda)$). Pour rappel, le **rendement** des LED est le rapport entre le flux en lumens et la puissance électrique consommée par LED.

sensibilité de l'œil (si la longueur d'onde de la lumière émise est monochromatique à 555 nm – cf. [22] page 278), mais le rendu colorimétrique est très faible.

La courbe de sensibilité de l'œil $V(\lambda)$ (figure 8.12.a) couplée à la notion de qualité de lumière (définie par l'indice de rendu des couleurs et la température de couleur de la lumière), vont ainsi donner les limites physiques des systèmes d'éclairages à LED (sur la technologie de type puce bleue + luminophore – figure 8.12.b).

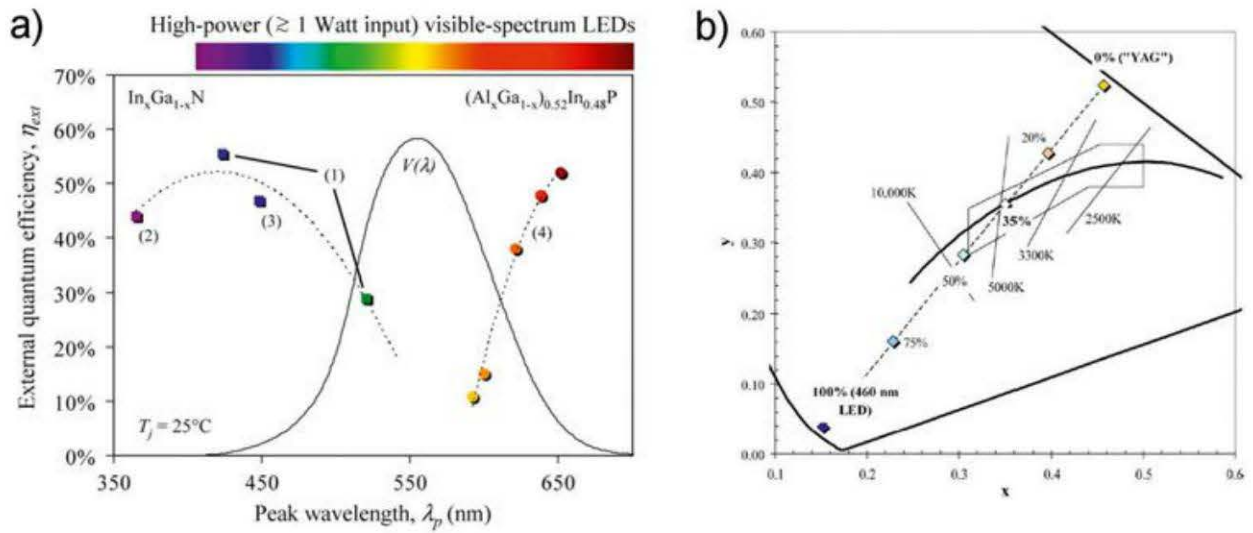


Figure 8.12 – Calcul de l'efficacité maximale utilisant la technologie bleue + luminophore (Michael R. Krames – *Journal of Display Technology* Vol 2, n° 2, juin 2007).

Les performances des LED en termes d'extraction lumineuse sont intéressantes en bleu et en rouge mais bien plus faibles dans la zone du vert si on les compare à la courbe de sensibilité de l'œil (cette zone est souvent appelée le *green gap* – figure 8.12.a). Ainsi, les composants verts disponibles ont pour la plupart une longueur d'onde maximum autour de 520-525 nm et sont peu disponibles près de 550 nm (proche de la longueur d'onde pour laquelle l'œil est très sensible).

Les LED de couleur qui émettent dans des longueurs d'onde entre 510 et 580 nm sont beaucoup moins fréquentes sur le marché à cause du « vide » dans ces longueurs d'onde (*green gap*). Mais, la plupart des LED blanches sont réalisées en employant la technologie de type puces + luminophores excités en bleu et émettent en partie dans cette zone en longueur d'onde difficilement accessible de façon directe, c'est-à-dire à l'aide d'un semi-conducteur (figure 8.13).

La conversion de cette énergie bleue en jaune/vert/rouge est dépendante du type de luminophore, de sa qualité de fabrication et de l'épaisseur déposée sur la puce semi-conductrice. En fonction de tous ces paramètres, le pourcentage de conversion dans la zone sensible de l'œil (autour de 500-620 nm) peut être plus ou moins important,

8.2 Tension d'alimentation des LED

et le mélange entre la lumière bleue non convertie (entre 450 et 460 nm) et celle qui l'a été (afin de reconstituer une lumière « blanche ») possède des propriétés colorimétriques différentes.

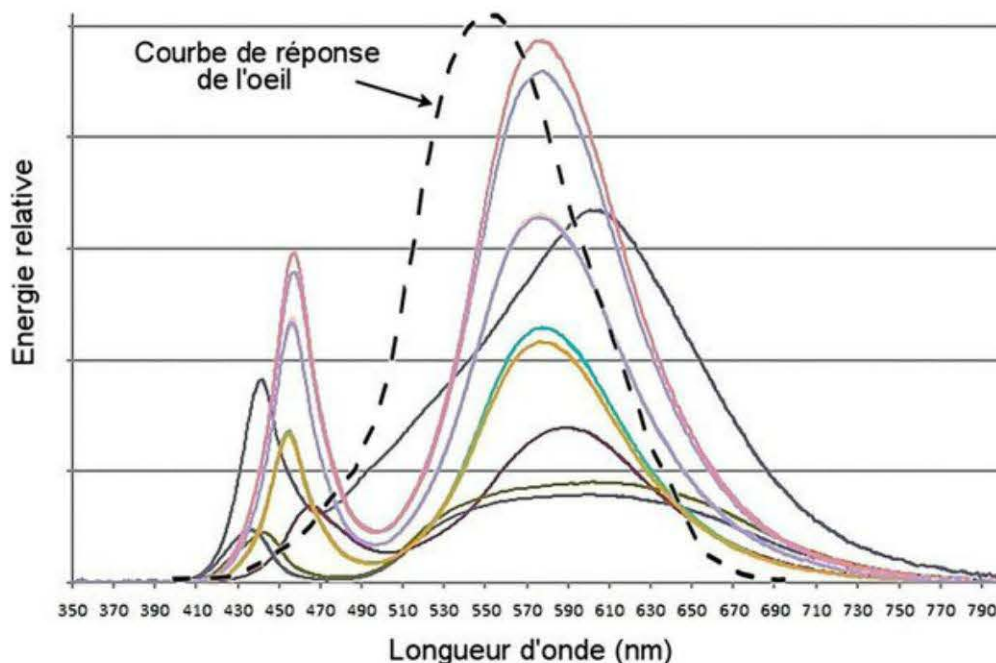


Figure 8.13 – Spectre de différentes LED de technologie « puce bleue + luminophore » superposés à la courbe de réponse de l'œil (Led Engineering Development).

Prenons l'exemple d'une LED ayant un spectre pour lequel la température de couleur est de 5 000 K, avec une qualité spectrale correspondant à un mélange de bleu et de lumière convertie respectivement de 35 % et 65 % (figure 8.14.a).

L'efficacité lumineuse de la radiation bleue, si aucune proportion de bleu n'est convertie en vert/jaune, est de 51 lm/W. Si au contraire, tout le bleu est absorbé et transformé en vert/jaune, elle est de 420 lm/W. Pour une LED blanche à 5 000 K, une partie du bleu est convertie en vert/jaune (65 %) et l'autre partie est émise directement de la puce semi-conductrice (35 %). L'efficacité lumineuse d'une telle LED est de 283 lm/W.

Le rendement des puces semi-conductrices actuellement sur le marché (part de l'énergie lumineuse émise sur la consommation électrique totale) se situe pour la plupart des fabricants entre 40 et 60 % (alimentées à courant nominal), ce qui donne pour une LED blanche ayant un spectre correspondant à une température de couleur de 5 000 K, un maximum de rendement global (quantité de lumens émis par watt électrique consommé) compris entre 110 et 170 lm/W.

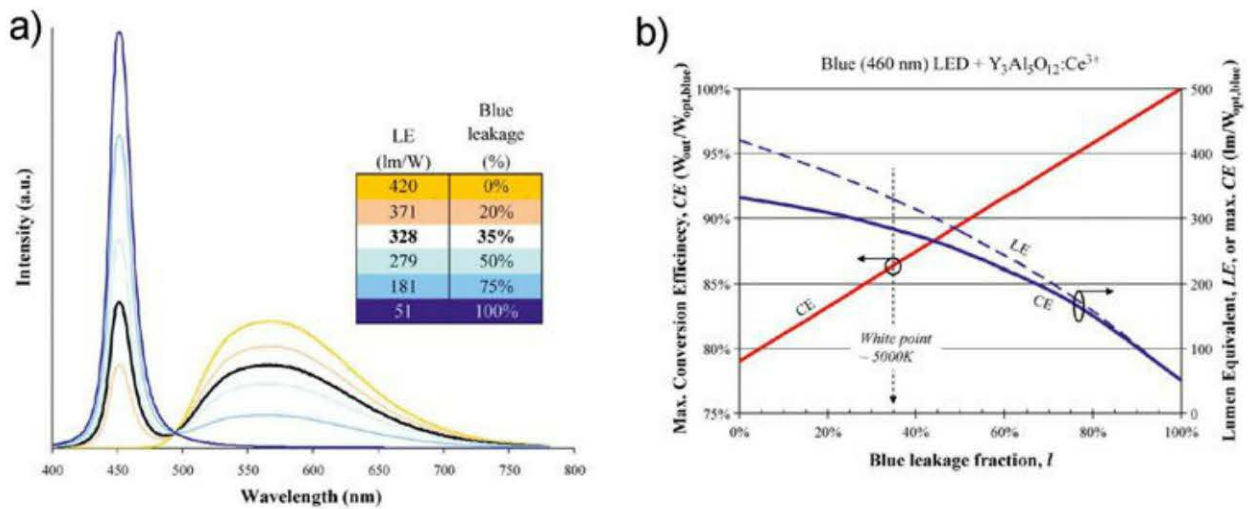


Figure 8.14 – Calcul de l'efficacité maximale utilisant la technologie bleue + luminophore (Michael R. Krames – *Journal of Display Technology* Vol 2, n° 2, juin 2007).

Rendements des composants du commerce en 2015

Toutes technologies confondues, ce sont les LED de puissance qui possèdent les meilleurs rendements, notamment grâce à leur capacité de dissipation thermique. Les performances atteintes font état de rendements pour des produits commerciaux compris entre 35 et 55 %. Certaines LED bleues atteignent parfois 60 % de rendement (près de 600 mW de lumière pour une consommation électrique de 1 W).

Les LED blanches « de bonne qualité » quant à elles, ont des rendements compris entre 25 % et 40 % (jusqu'à 50 % dans certains cas particuliers). Les LED dites « de bonne qualité » sont des LED qui ont des processus de fabrication maîtrisés et répétables, dont les fabricants peuvent garantir la production sur plusieurs mois ou plusieurs années avec un maintien des performances, voire une amélioration de ces dernières (meilleur flux par LED, colorimétrie mieux maîtrisée, excellente uniformité de caractéristiques entre LED).

Dans certains cas, ce rendement s'écroule pour descendre à moins de 15 %, par exemple dans le cas de températures de fonctionnement élevées ou encore pour des LED bas coût (intégrant des puces semi-conductrices fabriquées suivant des processus peu précautionneux et peu précis), qui ont vocation à servir de voyants lumineux et à n'être alimentées que sous quelques milliampères.

Les LED blanches sont constituées, en plus du semi-conducteur, d'une couche de luminophore qui accentue la difficulté de fabrication et qui nécessite un savoir-faire important pour atteindre des rendements élevés. Néanmoins, les rendements atteints par la plupart des fabricants « de rang 1 » (top 40 des fabricants de LED) se situent autour de 110 à 130 lm/W, pour des LED de colorimétrie blanc neutre (autour de 4 000 K) et alimentées à courant nominal (autour de 350 mA pour les LED de puissances).

8.2 Tension d'alimentation des LED

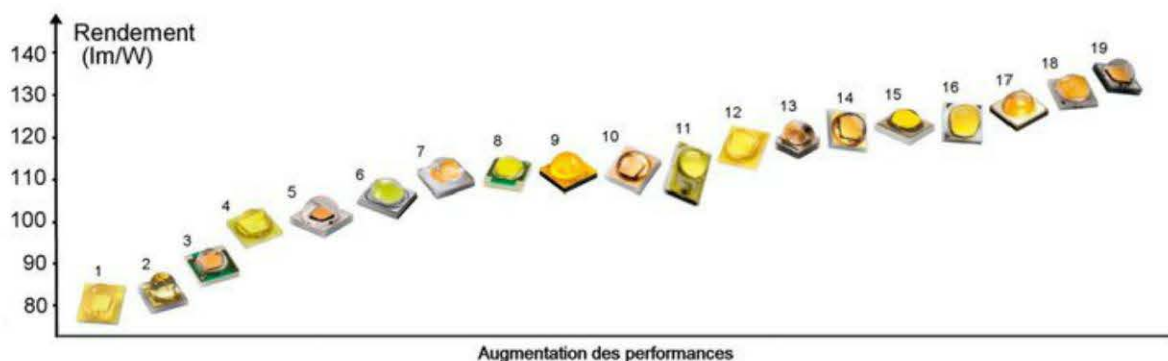


Figure 8.15 – Rendement lumineux de quelques modèles de LED de type 1 W (1 = Edison Opto ; 2, 7, 17 = Osram ; 3, 5, 8, 9, 13, 19 = CREE ; 4, 12 = Seoul ; 6, 15 = Samsung ; 10, 14 = LG Innotek ; 11, 16 = Philips Lumileds ; 18 = Nichia).

Des tests sont réalisés en permanence dans différents laboratoires et bureaux d'étude. Les informations qui en sont issues laissent entrevoir des perspectives d'augmentation supplémentaire de 10 à 15 % dans les prochaines années, mais cette croissance commence à s'infléchir et seule une rupture technologique pourra faire croître encore beaucoup ces performances.

8.2.4 Évolution des performances face aux paramètres externes

De nombreuses confusions et méconnaissances de la technologie ont été à l'origine de « rumeurs » qui sont restées longtemps ancrées dans l'esprit des gens. L'exemple le plus représentatif est l'idée que les LED ne chauffaient pas. Cette idée reçue s'est installée pendant de trop longues années pour deux principales raisons.

La première s'explique par le fait que les LED d'ancienne génération (3 et 5 mm en époxy transparent ou coloré) et essentiellement de couleur (le blanc n'est apparu qu'au milieu des années 1990 de façon significative) ne dégageaient pas beaucoup de chaleur... tout simplement parce qu'elles consommaient très peu d'énergie. En effet, pilotées à 20 mA sous des tensions de 2 à 3,5 V, la puissance dissipée même avec des rendements très faibles (inférieurs à 5 % dans certains cas) ne dépassait pas quelques dizaines de milliwatts.

La seconde est apparue un peu plus tard avec le développement des LED blanches et l'utilisation d'un vocabulaire ambigu pour décrire le type de couleur qui au départ était d'un blanc très froid. Cette expression colorimétrique (« LED froide ») a contribué à diffuser cette idée fausse de faible chaleur dégagée par les LED bien au-delà du démarrage et de la commercialisation des premières LED de puissance, dont les rendements proches de 15 %, dégageaient pourtant une chaleur perceptible.

La chaleur, ennemi n° 1 des LED

Une LED est un ensemble de technologies et de matériaux réunis dont les comportements sont très variables face à un accroissement de chaleur. De ce fait, l'impact global de la chaleur sur les paramètres des LED se traduit souvent par des évolutions non linéaires, qui sont plus difficiles à appréhender.

La première chose à préciser est le fait que, pour un fonctionnement à courant identique, le flux lumineux d'une LED diminue de façon importante. Néanmoins, cette baisse correspond à une variation tout aussi importante de la température de jonction. De façon générale, la courbe qui représente la décroissance du flux d'une LED en fonction de la température est donnée en fonction de la température de jonction et le 100 % est pris pour une jonction à 25 °C (figure 8.16.a). D'autres fabricants préfèrent donner des informations avec une référence de flux à 100 % prise à une température différente et elle-même mesurée à un endroit différent, par exemple la température ambiante (figure 8.16.b).

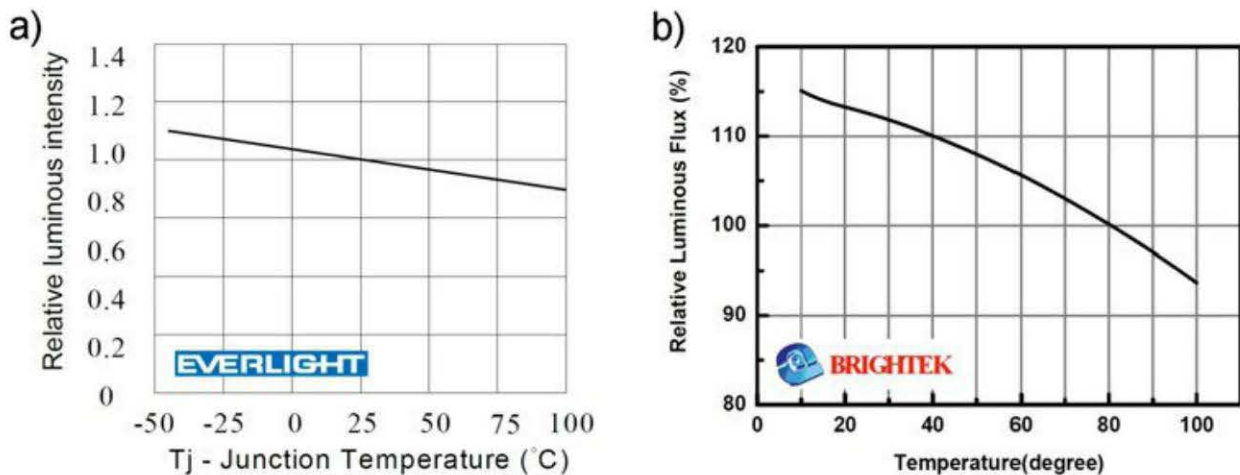


Figure 8.16 – Flux relatif en fonction de la température de jonction
(a = Everlight – réf : 62-217B-XK2C-SXXXXXXXXXXZ15-2T_V1)
et de la température ambiante (b = Brightek – réf : 1ZHW58FWYIAZ3).

La baisse du flux lorsque la température de la jonction augmente est beaucoup plus sensible pour les LED de basse puissance ou de puissance intermédiaire, que pour les LED de forte puissance (souvent de surface de puce supérieure à 0,5 mm²), qui sont capables de supporter sans trop de difficultés des températures de 80 à 90 °C.

De façon générale pour les LED de forte puissance (au-delà de 90 °C ou si la température dépasse les 2/3 de la température maximale admissible par le composant évalué lorsqu'il est alimenté à son courant nominal), il est recommandé de prendre des précautions complémentaires notamment en termes de courant d'alimentation. Des

8.2 Tension d'alimentation des LED

abaques sont disponibles pour connaître le courant maximum admissible au-delà duquel le fabricant ne garantit plus les performances des LED (figure 8.17).

La figure 8.17 présente également des cas de figure avec des intégrations de LED différentes en termes de performance thermique. Ce sont les courbes données pour différentes résistances thermiques entre la jonction de la LED (son semi-conducteur) et l'ambiance dans laquelle le boîtier de la LED est exposé. Une faible résistance thermique des LED et un bon design thermique de l'application d'éclairage permettent un pilotage des LED à des courants plus élevés tout en maintenant les performances.

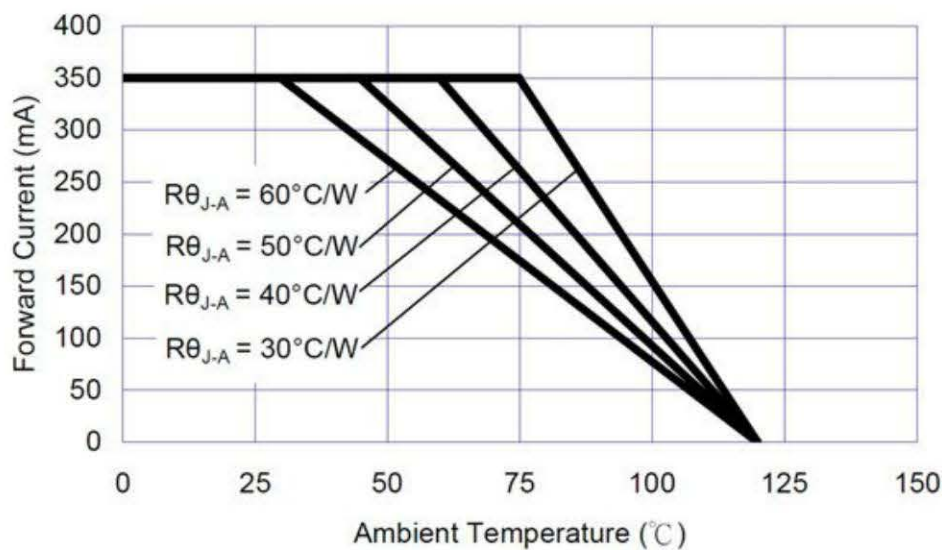


Figure 8.17 – Courant maximum admissible en fonction de la température ambiante et de la résistance thermique entre la jonction et l'ambiance de la LED (ProLight Opto Technology Corporation – réf : 1W-PG1C-1NWx-DL-1.4).

Toutefois, ces documents ne donnent qu'une information sur la limite d'utilisation des LED. Cela ne signifie pas que les autres paramètres (comme la durée de vie par exemple) sont préservés et stables jusqu'à cette limite, mais seulement qu'au-delà de cette limite, le constructeur ne s'engage plus sur le fonctionnement global du composant.

Il est donc impératif d'évaluer l'impact de la chaleur sur toute la plage de fonctionnement de la LED, et notamment sur sa durée de vie.

Les documentations standard sur les LED donnent rarement, voire jamais d'informations sur les durées de vie des composants pour différentes températures de fonctionnement. La plupart du temps, ce sont des documents complémentaires que certains fabricants ne possèdent pas, car nombreux sont les constructeurs de LED (de qualité moyenne) qui n'ont pas les moyens de réaliser des essais représentatifs et donc de pouvoir proposer des informations fiables sous forme de graphes.

Pour pallier cette situation, il faut non seulement être en mesure de réaliser des tests pendant plusieurs milliers d'heures, mais il faut également posséder des bases de données antérieures avec des tests réalisés sur des versions de LED certes anciennes, mais encore représentatives de la technologie utilisée par le constructeur et cela sur des temps plus longs. Ainsi, une corrélation devient possible entre des tests normatifs sur quelques milliers d'heures, des tests sur des durées de plusieurs dizaines de milliers d'heures et enfin sur une expertise des comportements du composant par analyse des matériaux employés, des méthodes de fabrication et des caractéristiques de vieillissement de ces matériaux pris séparément. En croisant toutes ces considérations, il est possible de parvenir à de bonnes approximations sur la durée de vie des LED.

La variation de la durée de vie des LED peut être représentée de différentes manières, de façon continue pour un intervalle de température fixé (figures 8.18.a et 8.18.c), ou de façon discontinue pour des températures choisies par le fabricant et représentatives d'une application en particulier ou d'une norme (figure 18.b). Nous pouvons citer par exemple les températures retenues dans les normes de tests de composants qui sont 55 °C, 85 °C et 105 °C.

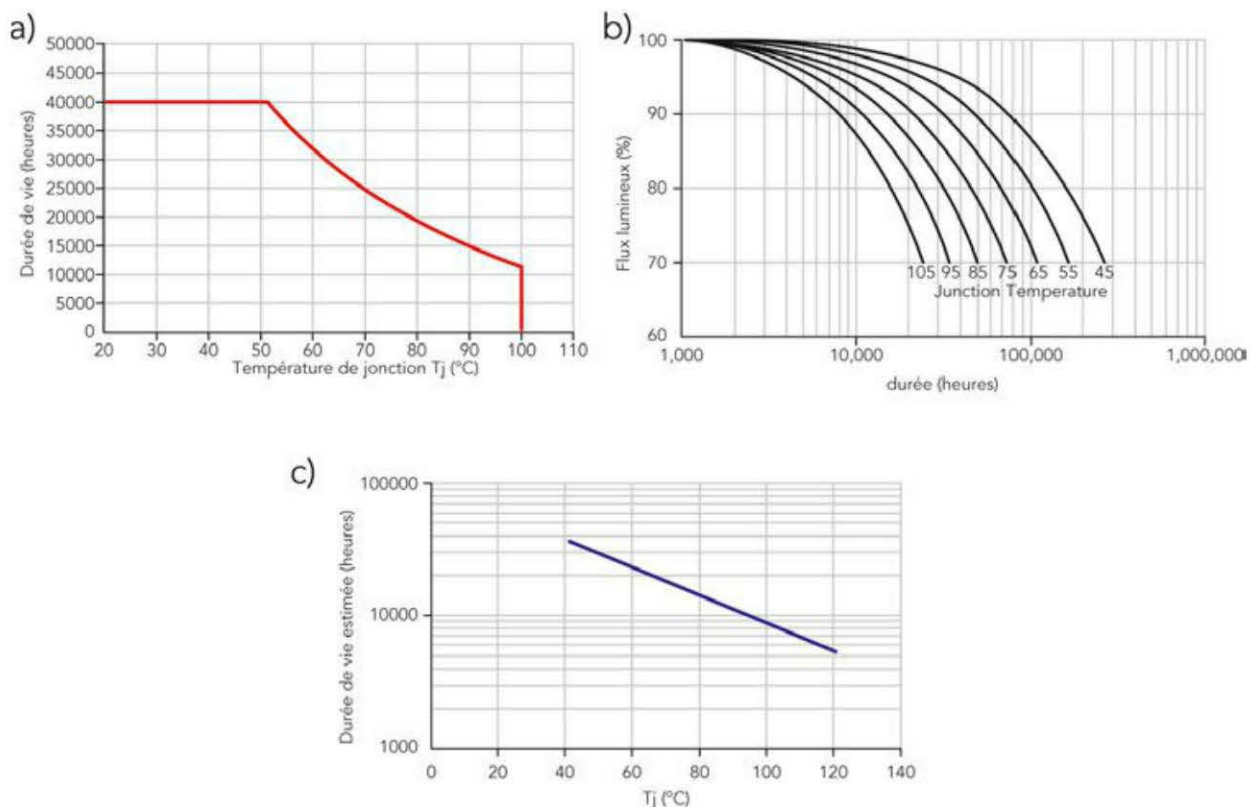


Figure 8.18 – Durée de vie en fonction de la température de jonction (d'après Nichia, CREE).

Certains fabricants ont fait évoluer leur façon de sélectionner les composants lors de la production en les testant non plus à 25 °C de jonction, mais à 85 °C, relativement

8.2 Tension d'alimentation des LED

proche des conditions de fonctionnement réel. C'est le cas de certains modèles de CREE (tri des composants appelé « binning » – cf[ab]). Les LED n'ont pas toutes le même comportement face à la température, notamment du fait qu'elles sont fabriquées avec des semi-conducteurs différents, ou encore du fait qu'elles intègrent des luminophores qui eux aussi ont des performances différentes suivant leur température de fonctionnement. Les LED ambres (mise à part la technologie « PC amber » qui utilisent le principe de conversion de l'émission bleue avec un luminophore – cf[ac]) et rouges voient leur flux varier de façon bien plus prononcée que les modèles verts ou bleus (figure 8.19).

Les LED blanches quant à elles, impliquant l'utilisation d'un semi-conducteur bleu (parmi les moins sensibles à la chaleur) et un luminophore lui aussi moins efficace à plus grande température, se situent en dessous des performances de leurs homologues bleues et vertes pour ce qui est de la décroissance de flux, mais sont bien plus performantes que les LED de types rouge, orange et ambre.

Le type de LED « PC amber » est un cas particulier, car ce modèle intègre une puce semi-conductrice de type bleu, avec un luminophore très spécifique émettant principalement une lumière ambre (blanc très chaud).

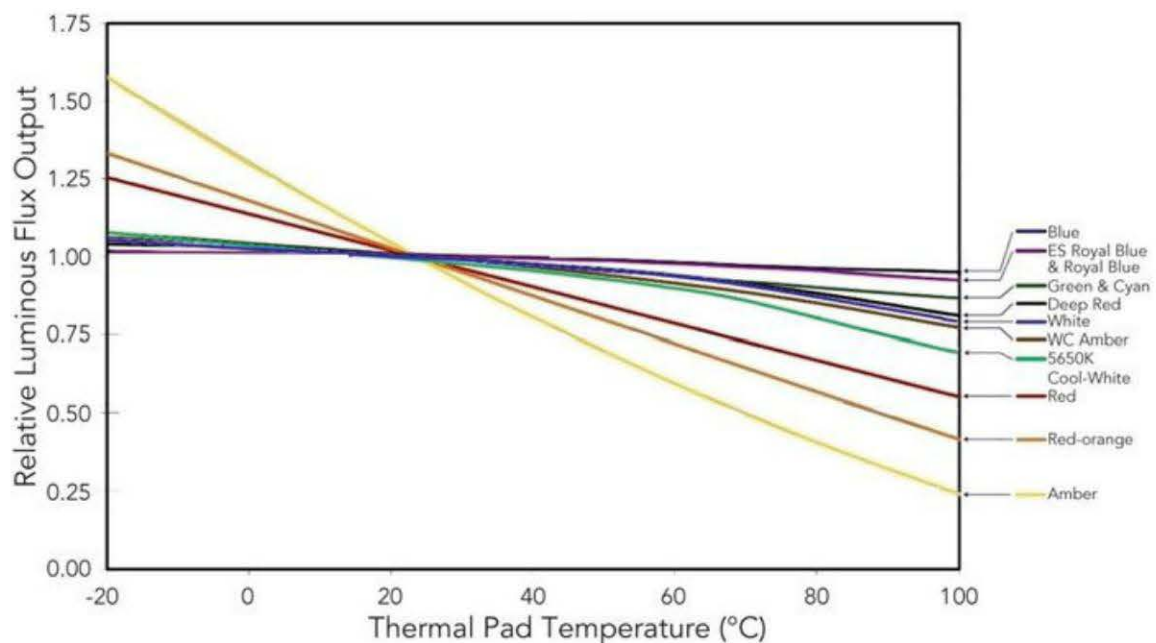


Figure 8.19 – Variation du flux en fonction de la température du pad thermique d'une LED de puissance (Philips Lumileds – modèle Rebel).

La dérive chromatique est aussi un paramètre que les fabricants évaluent et présentent dans leurs documentations.

Les LED de couleur ont non seulement une variation en flux différente suivant le type de semi-conducteur utilisé en fonction de la température à laquelle elles sont exposées, mais leur dérive chromatique est tout aussi variable selon les modèles et les couleurs (figure 8.20). Cela pose des problèmes aux fabricants de systèmes d'éclairage de type RGB car ils doivent non seulement corriger les baisses de flux en fonction de la température à laquelle fonctionne le système (donc modifier les proportions de différentes couleurs pour atteindre l'objectif), mais ils doivent aussi contrôler au maximum la dérive chromatique des LED, pour que les couleurs obtenues après mélange rentrent dans les tolérances d'acceptabilité de l'œil (aucune différence perçue).

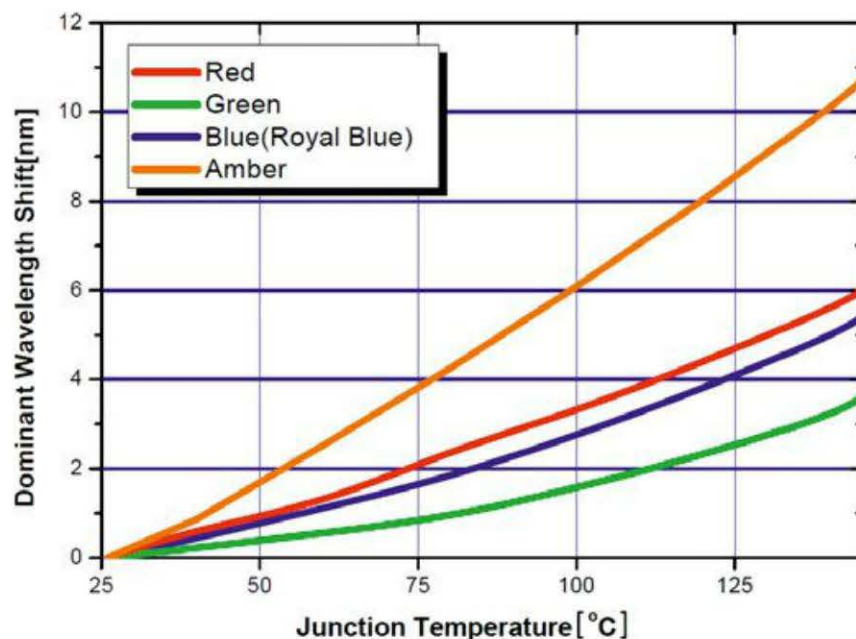


Figure 8.20 – Variation de la longueur d'onde dominante d'une LED de puissance de couleur en fonction de la température de jonction à courant constant – Seoul Semiconductor (Modèle P4).

Les LED blanches, constituées en grande partie d'un semi-conducteur bleu et d'un luminophore, subissent également des modifications spectrales. Cette dérive provient de deux paramètres, d'une part de la dérive du spectre de la LED bleue, et d'autre part de la baisse d'efficacité de façon non uniforme du luminophore. Ces deux phénomènes cumulés contribuent au décalage du spectre des LED blanches vers des couleurs de température plus importantes (plus froides).

Rappelons brièvement le lien qui existe entre l'action de la chaleur et la tension de fonctionnement des LED sur les performances des semi-conducteurs. La tension de fonctionnement diminue avec l'augmentation de la température de jonction. Parfois, des systèmes électroniques de régulation atteignent leur limite en raison

de la faible valeur de la tension d'alimentation du système complet. La plupart du temps, lorsque le système d'éclairage fonctionne dans des températures ambiantes supérieures à 25 °C, le système démarre à froid, chauffe, puis se stabilise. Il est alors possible de pallier cette tension d'alimentation système trop faible pour des éclairages qui ne requièrent pas un allumage instantané à 100 % du flux. On le fait en dimensionnant le système de telle sorte que la régulation ait besoin que les LED atteignent une certaine température. On diminue ainsi le besoin de tension à leurs bornes pour un courant identique, ce qui permet alors au système de régulation de jouer son rôle de contrôle en ayant à ses bornes une tension suffisante pour le situer dans sa plage de régulation.

En effet, le fonctionnement du système de régulation du courant nécessite une tension minimum à ses bornes, et puisqu'il est en série avec les LED, il y a une répartition qui se fait entre les LED et le système de régulation. La tension totale d'alimentation est stable, et au fur et à mesure que les LED chauffent, le courant augmente et la tension aux bornes des LED diminue. De ce fait, la tension aux bornes du système de régulation augmente jusqu'à atteindre son seuil de fonctionnement pour lequel il se met à réguler le courant. La tension aux bornes des LED se stabilise alors (à température stable), et si la tension d'alimentation augmente à son tour, c'est le système de régulation qui absorbe cette augmentation. Il faut toutefois être très précautionneux sur ce type de mise en œuvre et s'assurer que le système est stable même dans la plage de non-régulation (correspondant au démarrage à froid).

Les limites des courants d'alimentation

De nombreux fabricants de systèmes d'éclairages ont flirté avec les limites d'alimentation des LED, essentiellement pour fournir le maximum de lumière pour le minimum de composants intégrés au système, et cela au détriment souvent de la qualité globale des produits.

Il est vrai que les fabricants de LED ont très tôt lancé une « offensive » proposant des composants pouvant soi-disant fonctionner à des courants élevés (supérieurs à 1 A pour des puces semi-conductrices inférieures à 0,6 mm²). Dans un certain nombre de cas, il est tout à fait possible de faire fonctionner des LED avec de forts courants (jusqu'à plusieurs ampères), mais cela nécessite une connaissance relativement pointue du composant et des semi-conducteurs qui le constituent, ainsi qu'un savoir-faire en développement d'alimentations. Souvent, lorsque les courants de pilotage sont importants, un contrôle actif de la température des LED est intégré au système.

S'il fallait donner une valeur pour laquelle, dans un grand nombre de cas et avec une maîtrise correcte de l'intégration de la LED le composant reste dans un mode de fonctionnement qui n'altère pas trop ses performances (y compris sur le long terme), on pourrait la fixer à 150 % de la valeur nominale du courant donnée par le

fabricant. Au-delà de 150 % du courant nominal annoncé, il est impératif de prendre un certain nombre de précautions.

Outre le fait qu'en injectant plus de courant dans la LED par l'intermédiaire du semi-conducteur, on diminue son efficacité, on observe également à température constante, une variation de sa longueur d'onde dominante (figure 8.21). Ainsi, la couleur d'une LED varie en fonction du courant d'alimentation appliqué, ce qui pose quelques difficultés notamment pour le choix des luminophores dans le cas des LED blanches qui ont un intervalle d'absorption déterminé en longueur d'onde. C'est en partie ce phénomène de variation qui est à l'origine de la baisse d'efficacité des LED blanches lorsque le courant augmente à température de jonction constante.

Cette variation est différente suivant les types de LED et suivant la température, ce qui complexifie quelque peu le développement de systèmes RGB car cette variation peut atteindre 3 ou 4 nanomètres et commencer à être perçue par l'œil.

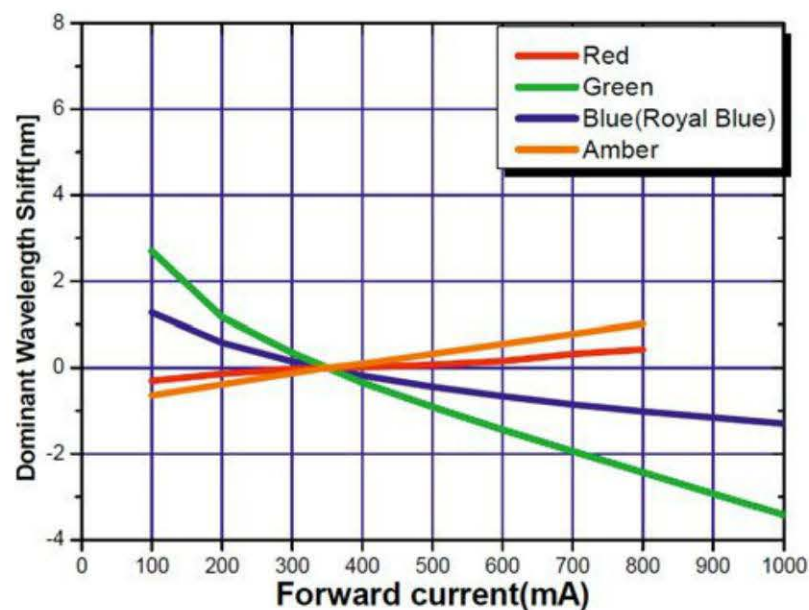


Figure 8.21 – Variation de la longueur d'onde dominante d'une LED de puissance de couleur en fonction du courant de pilotage à température de jonction constante – Seoul Semiconductor (Modèle P4).

Modes de pilotage : avantages et inconvénients

Si nous partons du principe qu'une LED doit se piloter en courant, il reste maintenant à définir comment ce courant doit être injecté pour produire la lumière adéquate. La réponse vient en partie des capteurs qui reçoivent cette lumière et l'utilisent. S'il s'agit de l'œil (application d'éclairage), nous sommes face à un capteur dont le temps d'intégration est relativement long (de l'ordre de plusieurs dixièmes de seconde) et

pendant ce laps de temps, il est permis de réaliser des moyennes de signaux d'amplitudes et de fréquences différentes. S'il s'agit d'une caméra, son temps de réponse est inférieur au millième de seconde et les possibilités sont plus restreintes.

Il existe principalement deux modes d'alimentation : le mode continu dans lequel le courant est stable et envoyé de façon continue et identique dans la LED, et le mode pulsé qui envoie des impulsions d'amplitude constante (ou variable), à intervalles réguliers et d'une largeur déterminée.

Ces deux modes peuvent agir différemment sur les performances des LED : sur leur efficacité, leurs coordonnées chromatiques, ou encore leur durée de vie au sein du système d'éclairage.

Impact sur le flux des LED

Les LED sont constituées d'un semi-conducteur dont la réponse est très rapide (inférieure à la microseconde) et qui n'est pas très sensible au type d'alimentation si l'on regarde le flux émis moyen sur un temps de quelques secondes ou de quelques dixièmes de seconde. Quand on parle « d'insensibilité », on suppose qu'une même puissance électrique envoyée aux LED dans les différents modes ne fait pas varier son flux de plus de 1 à 3 % (les erreurs de mesures sont souvent supérieures à 3 voire 5 %).

Mais puisque les LED ont des performances thermiques différentes et que les systèmes qui les hébergent ont eux aussi des comportements thermiques variables d'un système à l'autre, il peut y avoir des différences de flux dues à des différences d'efficacité inhérentes au système.

Pilotage et efficacité

Pour un courant donné et un modèle de LED fixé, l'efficacité du mode de pilotage continu et celle du mode pulsé peuvent être identiques. Mais dans les deux cas, si l'on balaie une plage de courant, on s'aperçoit d'une variation d'efficacité qui provient entre autres de la capacité de la LED à dissiper la chaleur qu'elle génère et donc de son inertie thermique.

Impact sur la chromaticité des LED

L'un des premiers à avoir révélé ce comportement est le professeur Nadarajah Narendran [87] du Lighting Research Center de New York. Il a étudié en 2005 des systèmes de LED blanches (de type puce bleu plus luminophore, mais aussi en RGB) et a mesuré l'impact de la dérive chromatique pour différents courants suivant les modes d'alimentation continu ou pulsé (figure 8.22). Le résultat de cette étude a montré que non seulement la dérive chromatique est plus importante en mode continu qu'en mode pulsé, mais que cette dérive ne se fait pas de la même manière dans les deux cas.

Humidité et matériaux incompatibles

Lors du développement d'un système à LED, suivant l'environnement dans lequel le système va fonctionner, le choix du type de LED est important car certains modèles sont plus sensibles à l'humidité que d'autres. D'autre part, le processus de fabrication des cartes électroniques qui contiennent les LED est également un facteur qui peut avoir un impact sur le long terme, notamment en ce qui concerne la préservation de l'ensemble des performances électriques et optiques des LED.

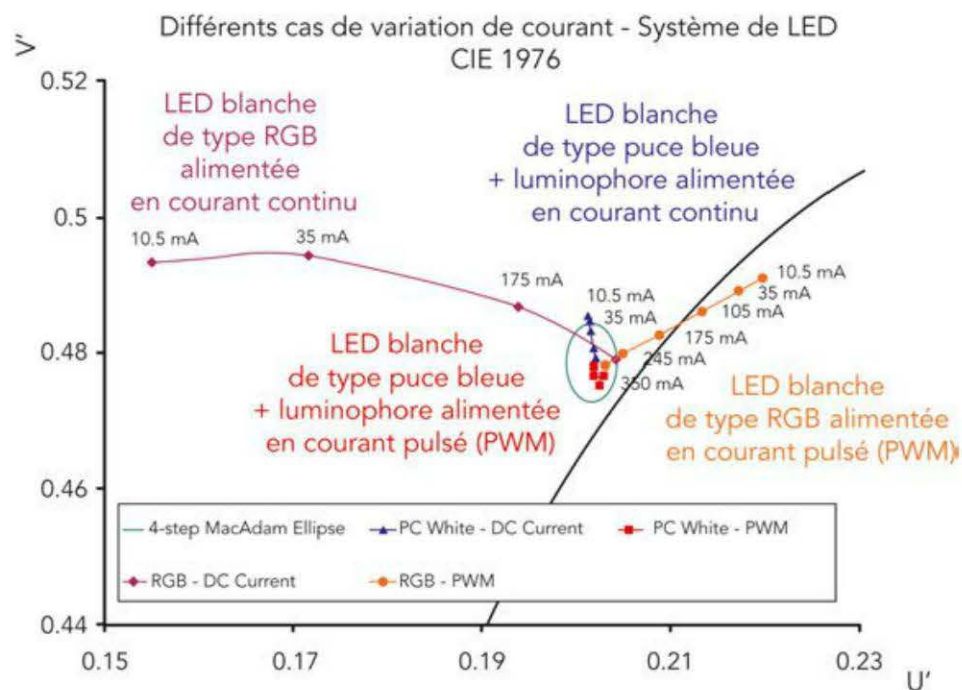


Figure 8.22 – Dérive chromatique de LED blanche et RGB - Narendran (2005).



La maturité des différentes technologies de LED

Les fabricants de LED ont recours à diverses technologies pour obtenir un flux lumineux blanc. Ce chapitre détaille ces options et revient sur les notions de colorimétrie, de rendement lumineux et de gestion de la chaleur produite.

9.1 Technologies disponibles pour l'émission de blanc

Au chapitre 3, nous avons pris connaissance des différentes méthodes qui permettent de créer une lumière blanche à partir d'un semi-conducteur de type bleu ou proche UV couplé à un ou plusieurs types de luminophores.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser plus particulièrement aux fabricants de LED et à leurs produits. Rappelons que la création de lumière blanche à partir d'un semi-conducteur peut se faire de différentes manières : on peut réaliser le mélange des trois couleurs primaires en proportions adéquates à l'aide de trois semi-conducteurs émettant du rouge, du vert et du bleu, ou bien utiliser un semi-conducteur de type bleu (en général autour de 450 nm) couplé à un ou plusieurs luminophores, ou bien encore utiliser un semi-conducteur de type proche UV (entre 405 et 410 nm) couplé également avec un ou plusieurs luminophores (figure 9.1).

9.1.1 Différentes méthodes suivant les fabricants

La maîtrise du packaging des LED et notamment de la gestion thermique, c'est-à-dire l'extraction de la chaleur produite par le semi-conducteur et le(s) luminophore(s), a permis aux fabricants de développer des composants plus efficaces dont les propriétés colorimétriques permettaient d'envisager des applications d'éclairage inédites.

Cette maîtrise a aussi ouvert la porte à des technologies qui avaient été testées quelques années auparavant (2004-2005). En effet, la possibilité de dissiper plus facilement la chaleur limite les effets du vieillissement prématuré. C'est le cas par exemple pour les LED qui mettent en œuvre un semi-conducteur de spectre proche

UV (autour de 400-410 nm) et dont le rendu de couleur est très intéressant mais dont l'efficacité comparée à celle des LED plus standard (excitation à 450 nm d'un luminophore de type YAG) est deux fois moindre.

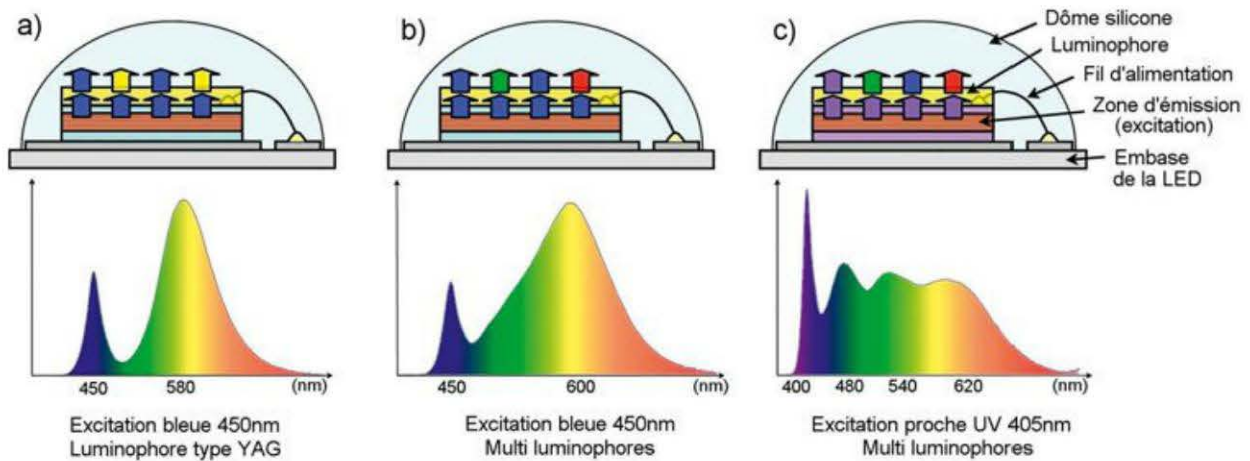


Figure 9.1 – Les trois principales méthodes de création de blanc à partir d'un seul semi-conducteur.

Semi-conducteur bleu avec luminophore YAG:Ce^{3+}

Les LED blanches communément appelées YAG sont les plus répandues et les plus utilisées pour des applications qui requièrent avant tout d'excellentes efficacités pour un coût le plus bas possible. Le YAG [76] (Yttrium Aluminium Garnet = $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$) est un luminophore très connu de la famille des *garnets* [78], utilisés par les plus grands fabricants de LED.

Suivant la qualité et les méthodes de fabrication du luminophore (figure 9.2), suivant les propriétés du matériau dans lequel il est noyé (silicone, résine voire céramique)

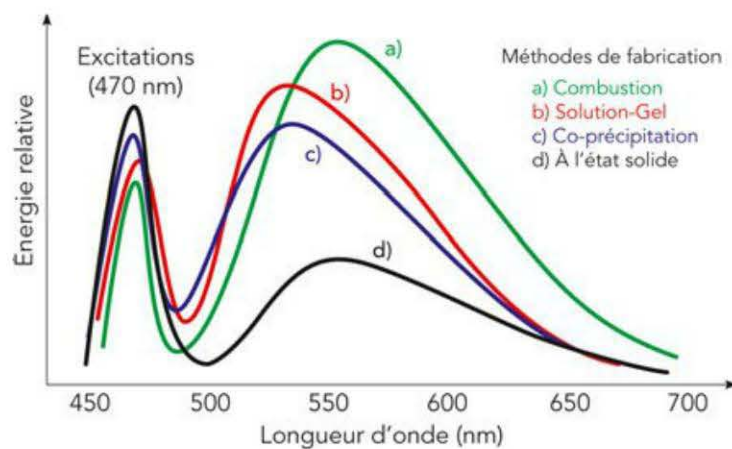


Figure 9.2 – Spectres de LED blanches utilisant un luminophore de type YAG fabriquées de différentes méthodes - Yuexiao PAN [8].

9.1 Technologies disponibles pour l'émission de blanc

et enfin suivant les épaisseurs, le spectre de réponse résultant peut être légèrement différent. Ce sont ces différences entre fabricants de LED qui font leur spécificité.

Pour améliorer la qualité spectrale du couple semi-conducteur bleu + luminophore YAG (notamment dans le rouge), le luminophore peut être modifié et associé à des composés supplémentaires (Pr^{3+} par exemple).

Les nitrures peuvent également jouer un rôle dans l'amélioration du spectre d'émission des LED blanches qui utilisent un luminophore de type YAG (figure 9.3). Cette méthode (association avec un luminophore de type $\text{CaAlSiN}_3:\text{Eu}^{2+}$) sera traitée dans les paragraphes suivants.

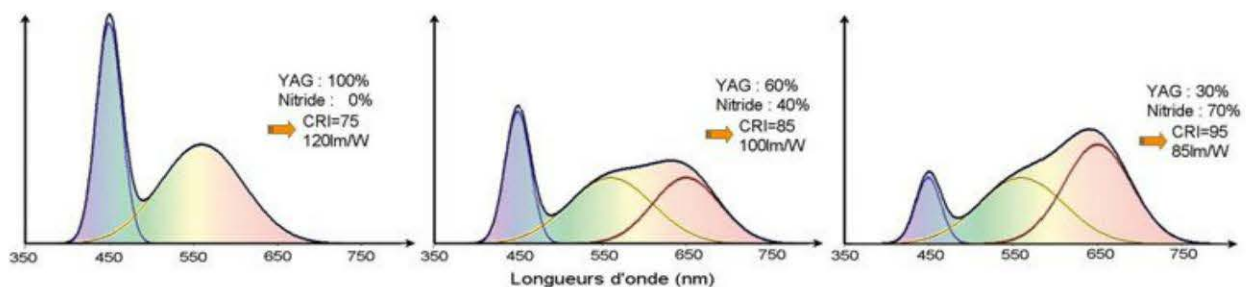


Figure 9.3 – Spectre de LED blanche utilisant un luminophore de type YAG mélangé à un nitrure.

Semi-conducteur bleu avec multi-luminophores

C'est l'une des principales améliorations des années 2000 pour les LED de puissance notamment ($> 0,5 \text{ W}$). Elle a non seulement permis d'augmenter les performances en termes d'efficacité (lm/W), mais aussi de proposer des composants de qualité colorimétrique pouvant être intégrés dans des produits d'éclairage. Le principe est le même que pour la mise en œuvre d'un luminophore YAG seul. Les types de matériaux, leur proportion et leur qualité sont les paramètres qui différencieront les LED entre elles.

Les fabricants Nichia, Toyoda Gosei, Osram, Seoul Semiconductor ont été parmi les plus actifs pour développer de nouveaux luminophores et de nouveaux mélanges. Certaines LED peuvent atteindre des IRC supérieurs à 85-90. D'autres possèdent des spectres très caractéristiques, comme une température de couleur très chaude, proche de celle de la lampe à incandescence, autour de 2000 K (figure 9.4).

Semi-conducteur proche UV avec multi-luminophores

Cette approche avait été initiée par Toyoda Gosei en 2001, épaulé par le fabricant de luminophores Toshiba Corporation et mettait en œuvre un semi-conducteur proche UV (autour de 380-390 nm) et des luminophores RGB. Elle a été mise en suspens dans un second temps.

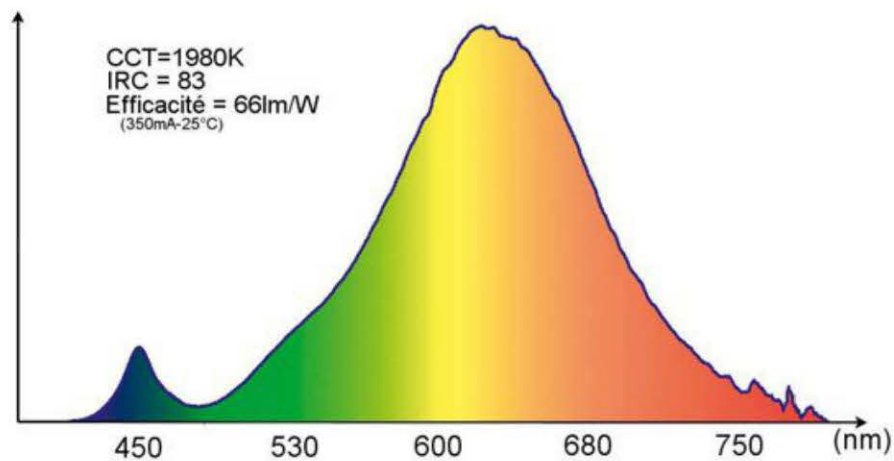


Figure 9.4 – Spectre de LED de puissance en blanc chaud autour de 2 000 K.

Depuis 2010 la société Mitsubishi Chemicals a mis sur le marché un modèle de LED utilisant des semi-conducteurs proche UV, autour de 400-410 nm (figure 9.5). Des luminophores RGB ont été choisis et mélangés de telle sorte que l'indice de rendu des couleurs atteint sans trop de problème 85, avec une efficacité comprise entre 50 et 60 lm/W ce qui reste très inférieur aux performances des composants de type semi-conducteur bleu couplé à du YAG voire à des multi phosphores. L'intérêt de ce type de source (proche UV + luminophore RGB) réside dans la qualité colorimétrique. En effet, l'indice de rendu de couleur (IRC) n'est pas idéal pour évaluer la qualité spectrale des LED. Néanmoins, il reste le seul indicateur simple et validé par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) pour évaluer la qualité colorimétrique des LED. La valeur de l'IRC étant basée sur le calcul d'une moyenne « de satisfaction » d'un nombre limité de couleurs, elle peut parfois ne pas être représentative de la « vraie » qualité de la lumière émise, ressentie par l'œil. Ainsi, même si l'IRC de la technologie couple semi-conducteur proche UV + luminophores RGB n'atteint pas des valeurs de 95 ou plus, le spectre résultant est néanmoins très intéressant pour bon nombre d'applications, dans la mesure où il possède en moyenne moins de « lacunes spectrales », c'est-à-dire de zones de spectre où il y a peu d'émission lumineuse.

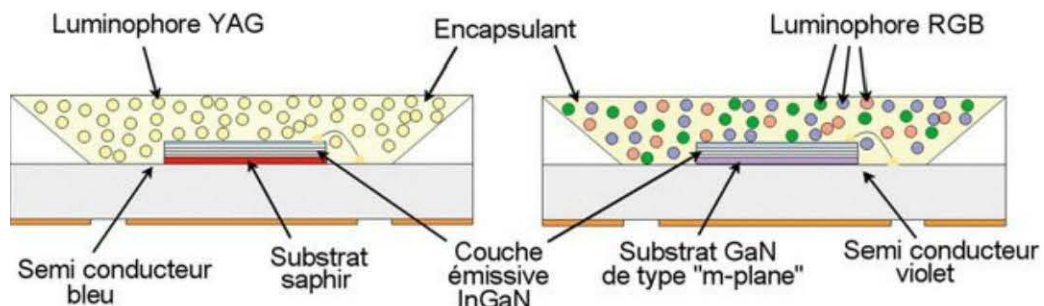


Figure 9.5 – Comparatif entre une LED de type bleu + luminophore YAG et une LED de type violet + luminophore RGB.

9.1.2 Performances récentes en 2014-2015

Il convient de définir le périmètre technique dans lequel nous allons donner les informations.

Nous avons dépassé la phase de croissance forte des LED pendant laquelle chaque jour de nouvelles performances étaient atteintes. La recherche académique est de plus en plus active dans ce domaine et de gros industriels, peu impliqués au début des années 2000, consentent maintenant d'énormes investissements. C'est le cas par exemple de Samsung (présent depuis longtemps mais discret), de LG, ou encore de Mitsubishi.

D'autre part, les acteurs historiques du monde des LED que sont Nichia, Osram, Toyoda Gosei, CREE, Philips Lumileds, Everlight, ou bien Stanley, font des annonces sur les performances atteintes au sein de leurs laboratoires qui suscitent à la fois intérêt et questionnement. Ainsi, fin 2011, Osram annonçait un rendement de 200 lm/W pour une LED rouge (autour de 609 nm) alimentée à 40 mA et 168 lm/W à 350 mA. Dans la même période, CREE de son côté, en alimentant de façon impulsionnelle une LED blanche (température de couleur de 4500 K) à 350 mA, a pu atteindre une efficacité d'environ 231 lm/W. Enfin, même des fabricants de puces semi-conductrices comme Epistar, n'ayant pas vocation *a priori* à fabriquer des LED complètes mais uniquement à fournir le semi-conducteur, réalisent des essais sur des LED basse puissance et présentent des résultats d'efficacité de 197 lm/W à 15 mA (courant nominal pour la LED en question). En 2014, la barrière des 300 lm/W semble avoir été atteinte pour des modèles de LED en blanc « neutre/froid » (autour de 5000 K). Ces produits de CREE sont toutefois des échantillons de laboratoire, sélectionnés et difficilement reproductibles en grands volumes, mais qui nous permettent certaines projections.

C'est dans ce contexte de forte évolution et progression, que nous allons tenter de dresser un état des lieux des performances de LED qui sont à la fois disponibles sur le marché en volume, sans problèmes d'approvisionnement et à des prix accessibles.

Résistance thermique des LED

Encore aujourd'hui en 2015, dans l'esprit de beaucoup de gens, y compris de professionnels, les LED ne chauffent pas ou peu. Il est vrai que les modèles de type 5 mm consomment très peu d'énergie et par conséquent ne peuvent pas en restituer beaucoup. En réalité, le rendement global des LED blanches est compris entre 15 % et 50 % dans la plupart des cas. Ce qui signifie par conséquent que 50 à 85 % de l'énergie consommée sous forme d'électricité est dissipée en chaleur. Au début des années 2000, le rendement des LED blanches n'était que de 7 à 15 % (autour de 15 à 25 lm/W) et donc cette idée que les LED ne chauffaient pas était encore plus fausse à cette époque que maintenant.

On mesure l'importance de la gestion thermique de ces composants lorsqu'ils sont dans une application, d'autant plus que leurs propriétés optiques (qualité de la lumière émise notamment) et surtout leur durée de vie, dépendent directement de leur température de fonctionnement.

Cette gestion thermique impose au fabricant du système d'éclairage de connaître les performances thermiques internes des LED, et en premier lieu leur résistance thermique (notée R_{th} – figure 9.6), qui représente la capacité de la LED à dissiper la chaleur générée au niveau du semi-conducteur (et du luminophore lorsqu'il s'agit d'une LED blanche) vers son pad thermique (ou vers ses pattes d'alimentation selon les cas).

Ainsi, connaissant ce paramètre (R_{th}), il est possible de remonter à l'information primordiale qu'est la température de jonction du semi-conducteur (T_j) par la relation suivante :

$$T_j = T_{pad} + R_{th} \cdot (P_{elec} - P_{opt})$$

avec :

T_j = Température de jonction du semi-conducteur (°C)

T_{jpad} = Température au niveau du pad thermique de la LED ou des pattes servant à la dissipation, ou encore au niveau précisé par le fabricant des LED pour réaliser cette mesure (°C)

R_{th} = Résistance thermique entre la jonction du semi-conducteur et le pad thermique (°/W)

P_{elec} = Puissance totale électrique consommée par la LED (W)

P_{opt} = Puissance optique émise par la LED (W)

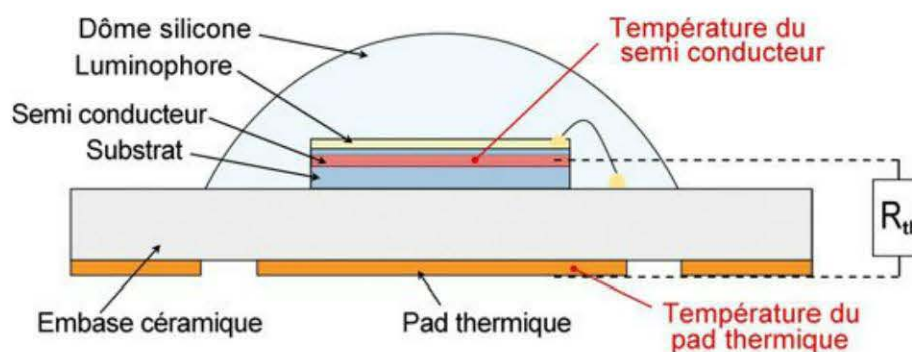


Figure 9.6 – Coupe d'une LED de puissance CMS : résistance thermique (R_{th}) entre la jonction du semi-conducteur et le pad thermique.

Ainsi, une résistance thermique faible signifie que le passage de la chaleur est aisé entre le cœur de la LED (le semi-conducteur) et son pad thermique, et donc que la capacité à dissiper la chaleur est grande. C'est le but que recherchent les fabricants.

9.1 Technologies disponibles pour l'émission de blanc

La résistance thermique est souvent considérée à tort comme constante, alors que cette valeur a tendance à augmenter lorsque le composant (LED) fonctionne à des températures de plus en plus hautes. Or c'est au moment où nous aurions besoin que les performances thermiques du composant s'accroissent, qu'au contraire elles diminuent. C'est un point à prendre en considération lors des simulations et des calculs d'intégration.

Enfin, les valeurs données dans les documentations sont des valeurs typiques de façon générale et sont souvent plus importantes dans la réalité (augmentation de l'ordre de 1 à 2°/W pour des LED de puissance de type 1 W).

De façon générale, les résistances thermiques des LED sont en adéquation avec la puissance électrique et la puissance optique qu'elles développent. En effet, rien ne sert d'avoir une résistance thermique excessivement faible de l'ordre de 5°/W par exemple si la puissance électrique totale consommée est 0,06 W (20 mA en continu sous 3 V). Dans ce cas la différence de température entre la jonction et les pattes d'alimentation de la LED servant à la dissipation est de l'ordre d'un quart de degré.

De façon générale, un design thermique ayant pour objectif d'atteindre une résistance thermique « plus raisonnable » de 20 à 40°/W suppose de maîtriser les augmentations de température de jonction (1 à 2 °C), sans mettre en œuvre des moyens technologiques importants qui entraîneraient une hausse des prix.

Bien entendu, pour des puissances électriques supérieures, donc des puissances dissipées plus grandes, la résistance peut jouer un rôle très important. Par exemple si nous considérons une LED de type 1 W, de résistance thermique de 5 °/W, avec un rendement de 40 % et si nous l'alimentons à 500 mA (ce type de LED peut supporter jusqu'à 1,5 A dans certains cas), sa puissance dissipée sera :

$$P_{\text{dissipée}} = P_{\text{élec}} - P_{\text{opt}}$$

$$P_{\text{dissipée}} = P_{\text{élec}} \times (1 - 40\%)$$

$$P_{\text{dissipée}} = (2,9 \times 0,5) \times (1 - 0,4)$$

$$P_{\text{dissipée}} = 0,87 \text{ W}$$

La différence entre la température de jonction et la température du pad de la LED (soudé sur la carte électronique) sera donc :

$$T_j - T_{\text{pad}} = R_{\text{th}} \cdot P_{\text{dissipée}}$$

$$T_j - T_{\text{pad}} = 5 \times 0,87$$

$$T_j - T_{\text{pad}} = 4,35^\circ$$

Si une LED de ce type possédait une résistance thermique de 15°/W au lieu des 5°/W pris pour le calcul, la différence de température entre la jonction et le pad thermique

pour les mêmes conditions de température et d'alimentation serait de plus de 13°, c'est-à-dire 9° de plus que pour une résistance thermique de 5°/W. Dans ce cas, les répercussions sur les performances optiques et surtout sur la durée de vie pourraient être non négligeables (de l'ordre de 5 à 10 % de baisse de durée de vie pour 9-10° de plus de température de jonction en fonctionnement).

Pour les LED de puissance de type 1 W, les résistances thermiques se situent souvent entre 3 et 15°/W pour l'ensemble des fabricants (figure 9.7).

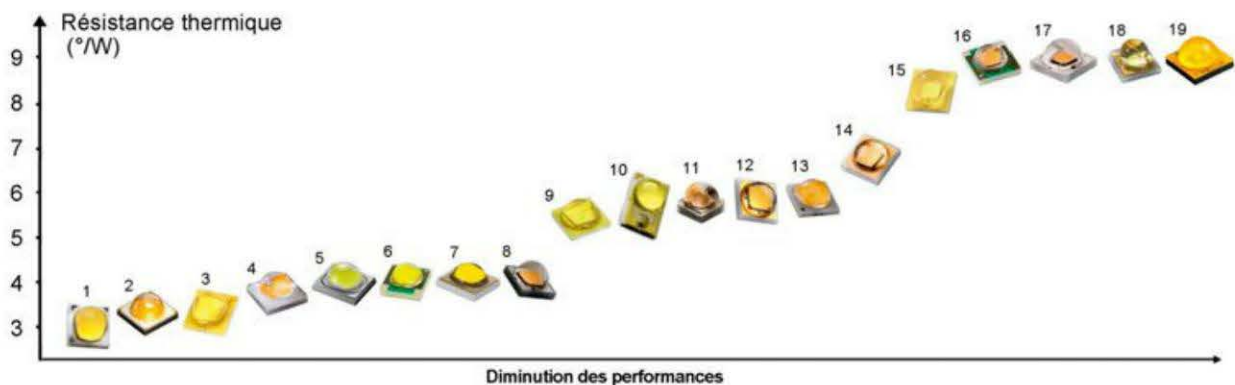


Figure 9.7 – Résistances thermiques de quelques modèles de LED de type 1 W (1, 10 = Philips Lumileds ; 2, 4, 18 = Osram ; 3, 9 = Seoul ; 5, 7 = Samsung ; 6, 8, 11, 16, 17, 19 = CREE ; 12, 14 = LG Innotek ; 13 = Nichia ; 15 Edison Opto).

Les LED basse puissance se situent plutôt autour de 150 à 300°/W, et en ce qui concerne les LED de puissance intermédiaires (0,1 W à 0,3 W) nous sommes plus autour de 15 à 80°/W.

Flux lumineux des LED

Nous l'avons montré, il existe de nombreux types de LED, de boîtiers et de puissance, mais nous allons nous concentrer sur les composants les plus utilisés en éclairage et en rétro-éclairage.

Début 2012, les composants disponibles sur le marché en volume (c'est-à-dire par plusieurs dizaines de milliers de pièces) pour les « trois grandes familles » que sont les LED de puissance de type 1 W, les LED de puissance intermédiaire (entre 0,1 et 0,3 à 0,5 W) et les LED de basse puissance (comprises entre 0,04 W et 0,1 W), permettaient d'atteindre les flux suivants :

- ▶ LED de puissance de type 1 W (figure 9.8) : entre 80 et 150 lumens (à des courants de pilotage de 350 mA et pour des températures de pad thermique comprises entre 45 et 75 °C). Pour des courants supérieurs, le rendement baisse mais les flux peuvent atteindre des niveaux intéressants (plus de 250 lumens à 700 mA pour une température de jonction de 85 °C) ;

9.1 Technologies disponibles pour l'émission de blanc

- ▶ LED de puissance intermédiaire : entre 15 et 55 lumens (à des courants de pilotage de 30 à 150 mA et pour des températures de pad thermique comprises entre 45 et 75 °C) ;
- ▶ LED de basse puissance : entre 2 et 10 lumens (à des courants de pilotage de 5 à 30 mA et pour des températures de pad thermique comprises entre 40 et 55 °C).

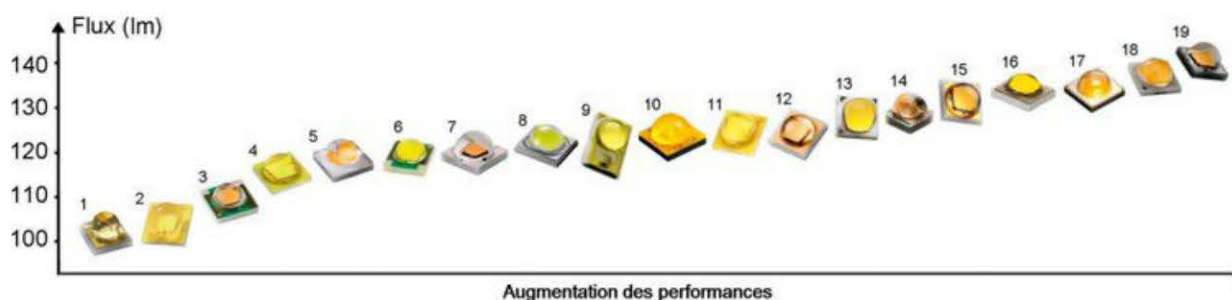


Figure 9.8 – Flux disponible de quelques modèles de LED de type 1 W
(1, 5, 17 = Osram ; 2 = Edison Opto ; 3, 6, 7, 10, 14, 19 = CREE ; 4, 11 = Seoul ; 8, 16 = Samsung ; 9, 13 = Philips Lumileds ; 12, 15 = LG Innotek ; 18 = Nichia).

Suivant les fabricants, des informations complémentaires figurent dans les documentations notamment les baisses de flux en fonction de la température de jonction du semi-conducteur, ou encore en fonction du courant d'alimentation (là nous parlons plutôt de baisse de rendement).

Certains, comme Bridgelux, ont très tôt proposés des flux à des températures de fonctionnement à chaud. Le flux annoncé était appelé des « lumens chauds », sous-entendu lorsque le composant est en fonctionnement et à une certaine température de fonctionnement. Souvent, les fabricants choisissent la valeur de 85 °C comme température de fonctionnement de la jonction à chaud, valeur qui tend à être adoptée au sein des normes qui se mettent en place. Courant 2014, nous avons vu apparaître des documentations présentant non seulement des flux à des température de jonction (T_j) de 85 °C, mais aussi pour des courants de 700 mA. Dans certains documents, nous trouvons même plus qu'une seule information qui correspond à l'utilisation réelle du composant. C'est le cas pour le fabricant OSRAM par exemple.

Rendement lumineux des LED

Nous avons précisé la différence entre efficacité lumineuse et rendement lumineux au chapitre 1 même si la plupart des acteurs dans le domaine des technologies LED parlent de l'une et de l'autre sans réellement faire la différence. Dans les deux cas, ils souhaitent exprimer presque toujours la même idée : combien de lumens sont émis par la source pour quelle consommation en watts.

Cette idée correspond au rendement lumineux et non à l'efficacité lumineuse qui elle traduit le rapport entre le flux lumineux visible émis par la source et le flux radiatif (l'ensemble visible et non visible des radiations) émis par cette même source.

Ce rappel effectué, précisons un peu plus les conditions pour lesquelles nous donnerons des valeurs. Celles-ci sont pour la plupart issues de mesures réelles effectuées au sein de laboratoires dans les conditions prévues par les différentes normes qui fixent les méthodes et les conditions d'essais.

D'abord et avant tout, les conditions thermiques dans lesquelles les composants sont immergés lors des essais sont primordiales. Pour des LED seules, hors d'un système d'éclairage, il faut être en mesure de connaître la température de la jonction (c'est-à-dire la température au niveau du semi-conducteur). Pour cela, nous avons besoin de deux informations que sont la température du pad de dissipation thermique de la LED (ou la température d'une patte d'alimentation en particulier) et la résistance thermique de la LED entre la jonction et ce pad de dissipation thermique.

De façon générale, on maximise les erreurs en estimant que toute l'énergie électrique a été dissipée sous forme de chaleur au niveau de la jonction et on utilise la loi simplifiée (équation 9.1) qui donne la température de la jonction (difficilement accessible) en fonction de la température du pad thermique (qui elle peut être mesurée à l'aide de thermocouple).

D'autre part, les rendements lumineux sont fortement dépendants de la qualité et des types de luminophores. Les LED en blanc chaud (entre 2500 et 3000 K) ont des rendements presque 5 à 10 % inférieurs à ceux de leurs homologues de type blanc neutre (entre 3000 et 4000 K), elles-mêmes ayant des rendements inférieurs de 5 à 15 % à ceux des LED de type blanc froid (entre 4500 et 6000 K).

De plus, suivant les tailles des puces semi-conductrices (de 50 μm jusqu'à 1 500 μm de côté) et suivant leur technologie (type d'alimentation, type de substrat), les densités de courant admissibles sont différentes avec des rendements associés différents. Le rendement global des LED blanches par exemple peut varier de 10 à 45 % suivant ces technologies et les modèles de LED.

Enfin, les rendements sont encore souvent donnés pour des températures de jonction autour de 25 °C, ce qui signifie un pad de LED (soudé sur la carte électronique) à une température de 10 à 15 °C, ce qui n'arrive jamais ou quasiment jamais pour des produits d'éclairage au sens large. Il faut donc se reporter à la documentation et regarder quelle est la baisse de flux (donc de rendement) pour la température de jonction en « fonctionnement normal », en général entre 45 et 75 °C sur la carte voire plus dans certains cas.

Les rendements constatés pour des LED de puissance type 1 W en début 2012, pour des composants de type neutre (autour de 4 000 K), générant des flux de l'ordre de

9.1 Technologies disponibles pour l'émission de blanc

90 à 120 lumens et à des prix (par quantité de 10 000 à 50 000 pièces) autour de 1 \$ (inférieur à un euro), sont souvent compris entre 80 lm/W et 100 lm/W. Fin 2014, les rendements constatés (dans les mêmes conditions de fonctionnement) se situent autour de 110 à 120 lm/W (figure 9.9), pour des prix proches d'un demi dollar pour des volumes de 10 000 à 50 000 pièces.

Pour des rendements supérieurs, autour de 130 voire 140 lm/W, soit les quantités approvisionnées doivent être plus importantes (de l'ordre de quelques centaines de milliers à plusieurs millions de LED) pour maintenir ces niveaux de prix autour de 0,6-0,7 \$, soit pour des quantités faibles les prix peuvent « s'envoler », autour de 1,5 \$ à 2 \$ l'unité, voire plus.

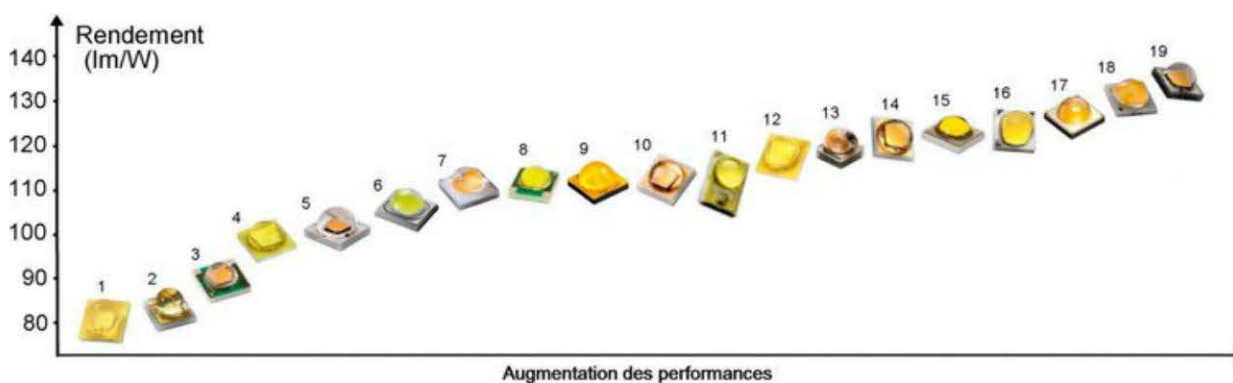


Figure 9.9 – Rendement lumineux de quelques modèles de LED de type 1 W (1 = Edison Opto ; 2, 7, 17 = Osram ; 3, 5, 8, 9, 13, 19 = CREE ; 4, 12 = Seoul ; 6, 15 = Samsung ; 10, 14 = LG Innotek ; 11, 16 = Philips Lumileds ; 18 = Nichia).

Pour des LED de basse puissance ou de puissance intermédiaire, les composants disponibles sur le marché début 2012 affichaient des performances intéressantes, parfois supérieures à celles des LED de type 1 W (pour des flux de 7 et 11 lumens, voire 12 lumens). En 2014-2015, l'augmentation des rendements des LED de basse puissance (flux de 5 à 15 lumens) et de puissance intermédiaire (flux de 25 à 50 lumens) s'est faite de façon légèrement inférieure à celle des LED de puissance, mais les talonnent de près avec des rendements constatés proches de 120, à 130 lm/W à température de fonctionnement réelle.

Suivant les fabricants, les valeurs annoncées dans les documentations (flux, coordonnées chromatiques, tension d'alimentation) peuvent être données pour des courants d'alimentation continus ou impulsionnels, et nous l'avons vu, pour des températures de jonction différentes. Il est donc indispensable de bien s'assurer des conditions de mesure pour pouvoir comparer les composants entre eux. Un flux donné pour une LED alimentée avec un courant impulsionnel (temps d'alimentation de quelques dizaines de millisecondes), peut voir sa valeur baisser de 3 à 5 % si ce même composant est alimenté en courant continu. Même si les fabricants jouent de

plus en plus la carte de la transparence, il n'en reste pas moins que les conditions d'alimentation sont souvent peu accessibles, souvent en annexes, nécessitant un réel effort pour les obtenir.

La figure 9.10 présente une barrette qui intègre des LED de puissance intermédiaire, alimentées à leur valeur nominale (60 mA) par un système à découpage hébergé sur la carte. La mesure du rendement (sur la plage complète d'utilisation à savoir 9 à 30 VDC) pour le système complet varie de 105 à 114 lm/W.

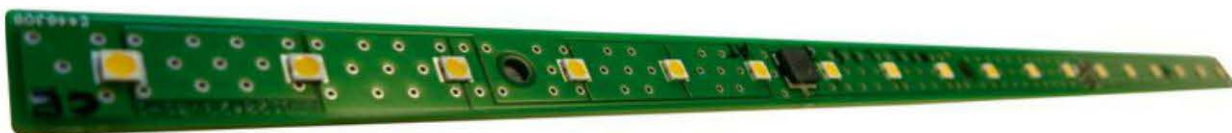


Figure 9.10 – Barrette de LED de type Nichia d'un rendement global (alimentation comprise) autour de 110 lm/W.

Courant 2012, les LED de basse puissance et de puissance intermédiaire présentaient des performances intéressantes en termes de rendement. Néanmoins, elles souffraient du fait que leur rendement s'effondrait beaucoup plus vite que les LED de type 1 W lorsque l'on augmentait leur courant d'alimentation et leur température de fonctionnement, même en restant dans des intervalles prévus par le constructeur. Entre 2012 et fin 2014, nous avons vu apparaître de plus en plus de LED dites de moyenne puissance (hébergeant initialement des puces semi-conductrices de petites tailles, fonctionnant autour de 50 à 60 mA en nominal), équipée de puces de plus grosses dimensions, voire de 2 puces en série et/ou en parallèle. Les courants admissibles de ces composants sont passés de ces 60 mA à 80 mA habituels, à plus de 150 mA, avec des rendements supérieurs à 100 lm/W, y compris pour des températures de fonctionnement « réelles », dans des applications d'éclairage (comme des *down-light* ou encore des dalles lumineuses « 600×600 »).

Qualité colorimétrique des LED

Les technologies mises en œuvre pour la création à partir d'une LED d'un blanc le plus proche possible des sources lumineuses habituelles, connues depuis longtemps et acceptées de tous (à savoir la lumière de type incandescence, voire la lumière issue du soleil), ont été présentées au paragraphe 9.1.1.

Nous rappelons ici simplement les résultats obtenus en termes de spectre, de température de couleur corrélée (CCT) et d'indice de rendu des couleurs (IRC) s'il fallait raccrocher les performances colorimétriques à des chiffres.

Évaluation spectrale

Le spectre d'une source lumineuse est sa signature. C'est le meilleur paramètre pour évaluer la qualité de cette source et la plupart des autres indices en découlent (comme l'IRC et la CCT).

Suivant les applications, les formes des spectres que visent les fabricants de LED sont différentes. Ainsi, pour un type d'éclairage intérieur, ayant vocation à assurer un éclairage d'ambiance chaleureux, on s'orientera vers des composants présentant des performances spectrales de même forme que les sources lumineuses de type incandescence. Des fabricants intègrent dans leur boîtier de LED des puces complémentaires rouge, verte et bleu cyan, afin d'améliorer le spectre global de la LED. C'est par exemple le cas pour le fabricant Excelitas Technologies (anciennement Perkin Elmer) qui en rajoutant une puce rouge et une puce bleu cyan, couplées à deux puces blanches (de type blanc chaud), obtient un spectre proche de celui de l'illuminant A de référence, avec des IRC de l'ordre de 93 à 95 (figure 9.11).

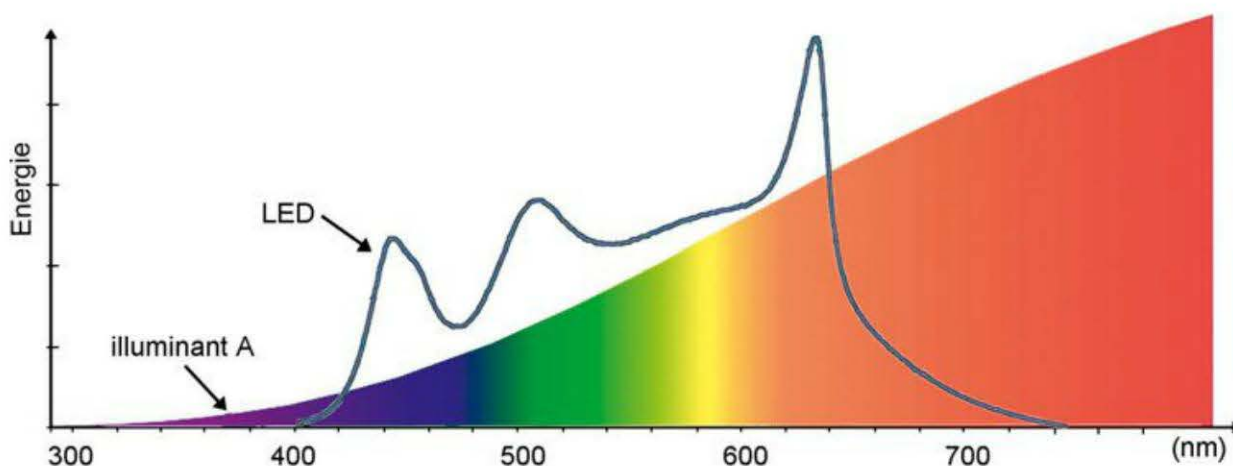


Figure 9.11 – Comparatif entre le spectre de référence de l'illuminant A (incandescence) et le spectre d'une LED RGBW (blanche avec puces RGB complémentaires).

D'autres fabricants encore n'intègrent qu'une puce rouge complémentaire en plus des deux ou trois puces blanches, ce qui améliore le spectre résultant.

Enfin, certains préfèrent miser sur un luminophore très performant, c'est le cas de Seoul Semiconductor qui propose des LED de puissance intermédiaire avec un spectre de qualité (figure 9.12.a et b) et un indice de rendu de couleur supérieur à 90-95.

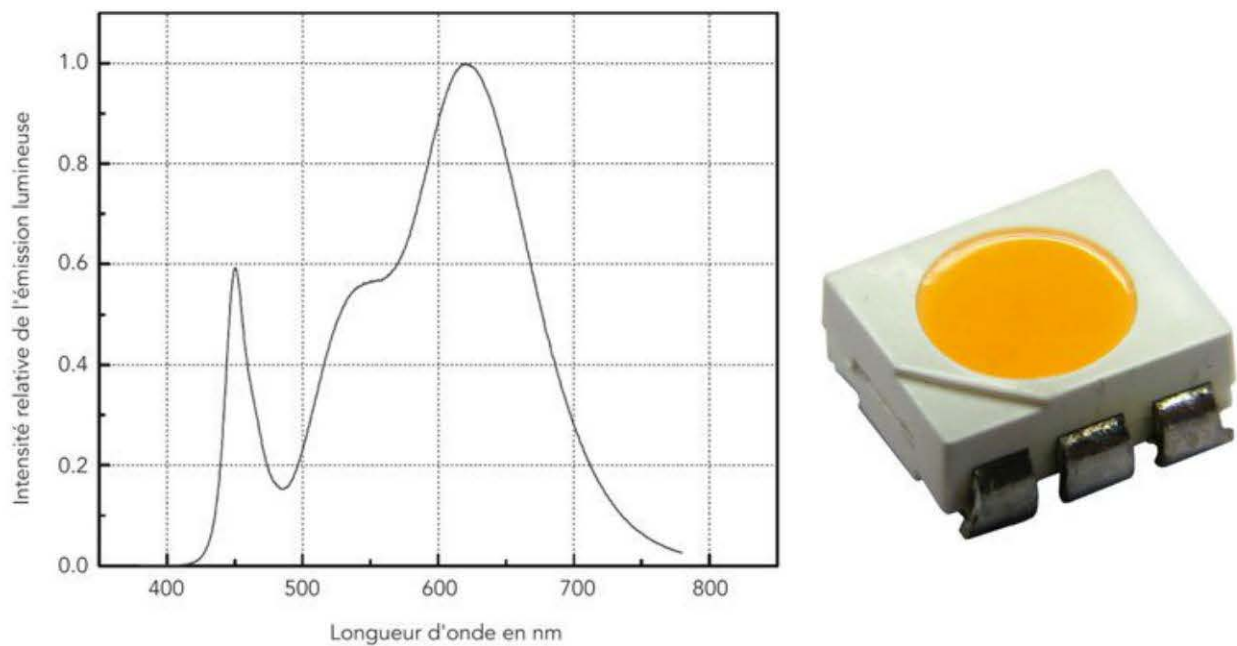


Figure 9.12 – LED blanc chaud Seoul Semiconductor (courbe spectrale issue de la documentation constructeur).

Suivant les applications, le spectre de référence est différent et il est alors plus difficile d'évaluer la qualité spectrale autrement que par des essais réels. Par exemple, le spectre de référence D65 (qui correspond à l'éclairage naturel du soleil pour une température de couleur de 6 500 K et qui avait été mis en œuvre courant 1964 en raison de l'importance que prenaient alors la technologie fluo compacte (tube fluo), est très différent de l'illuminant A [79].

La couleur de température corrélée (CCT)

On utilise souvent ce paramètre pour définir la colorimétrie d'une LED blanche et préciser si le type de lumière émise est plutôt proche de celui d'une bougie (blanc très chaud légèrement orangé) ou à l'opposé de celui d'un tube fluorescent (blanc plus froid).

L'acronyme CCT signifie *Correlated Colour Temperature* (température de couleur corrélée). Souvent on emploie les mots de « température de couleur » pour CCT, et cet abus de langage a fait que petit à petit, les utilisateurs ont pu oublier l'origine de ce paramètre.

La théorie du corps noir permet de définir les propriétés du spectre d'une source lumineuse. Un matériau (corps noir) chauffé à une certaine température émet un spectre optique caractéristique de cette température. Par définition, le corps noir émet un spectre que l'on a qualifié d'idéal (il est notamment continu).

9.1 Technologies disponibles pour l'émission de blanc

On dit alors qu'une source de lumière possède une température de couleur particulière (5000 K par exemple) quand son spectre d'émission s'approche du spectre d'un corps noir (spectre idéal) qui serait chauffé à cette température de 5 000 K.

Mais ce n'est qu'une approximation qui dans certains cas peut être relativement loin de la réalité car il existe pour une même température de couleur (corrélée) plusieurs choix de coordonnées chromatiques. Ainsi, deux LED ayant des températures de couleur identiques peuvent être légèrement différentes en termes de spectre.

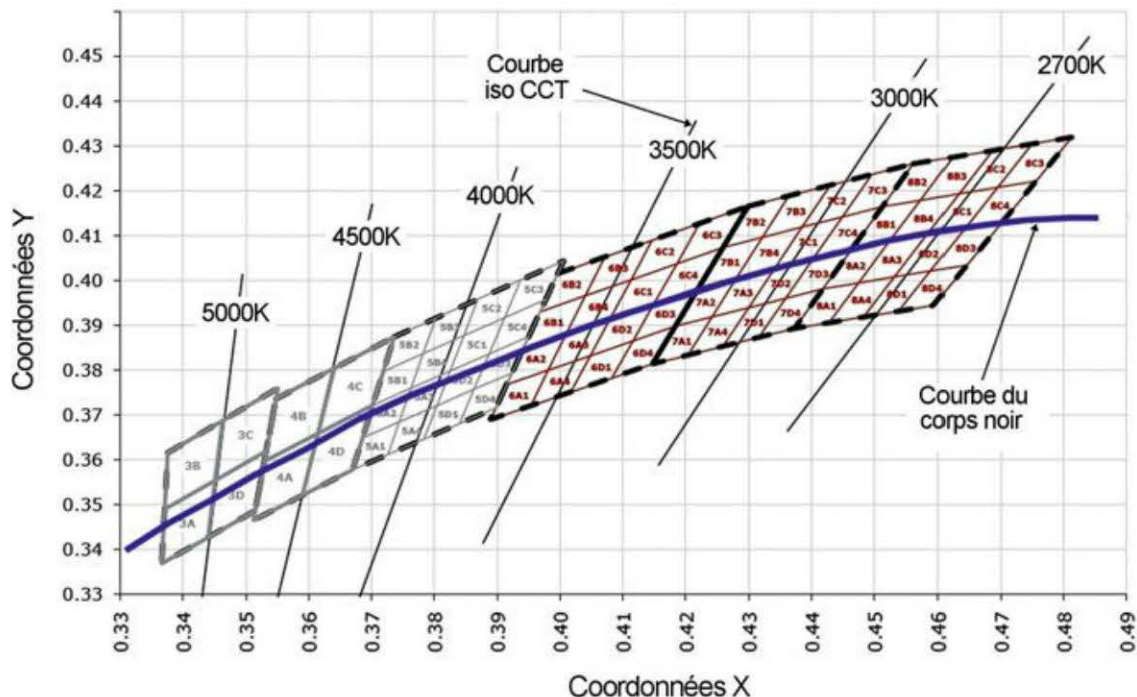


Figure 9.13 – Coordonnées chromatiques de LED (CREE) avec courbes iso CCT.

L'indice de rendu de couleur (IRC)

L'IRC (Indice de rendu des couleurs) n'est pas adapté à des sources que nous pourrions qualifier « d'un peu trop monochromatique ». Cet indice (de valeur allant de 0 à 100) représente une moyenne de notes données par un individu pour évaluer la qualité colorimétrique d'une source, en comparant des échantillons de couleur définis par la CIE (Communauté internationale de l'éclairage), éclairés par une source de référence (continue spectralement) et par la source à évaluer. Ce nombre fini d'échantillons (jusqu'à 15) éclairés par des sources continues, permet de caractériser la qualité de ces sources. Mais si ces échantillons sont éclairés par des sources de spectre discontinu, il est possible que pour certains d'entre eux, la source à caractériser ne soit pas en mesure de leur envoyer suffisamment de puissance dans

les longueurs d'onde nécessaires. Ainsi, le rendu de l'échantillon en question est mauvais.

De plus, puisqu'il s'agit d'une moyenne, un indice de 70 pourrait être le résultat d'une source qui possède des manques spectraux importants (dans le rouge par exemple), mais compensés par les autres parties du spectre, et il serait néanmoins qualifié de « correct » (en éclairage extérieur par exemple). Dans le graphique ci-dessous, l'IRC (CRI en anglais) de trois types de LED blanches du fabricant Nichia sont représentés (figure 9.14).

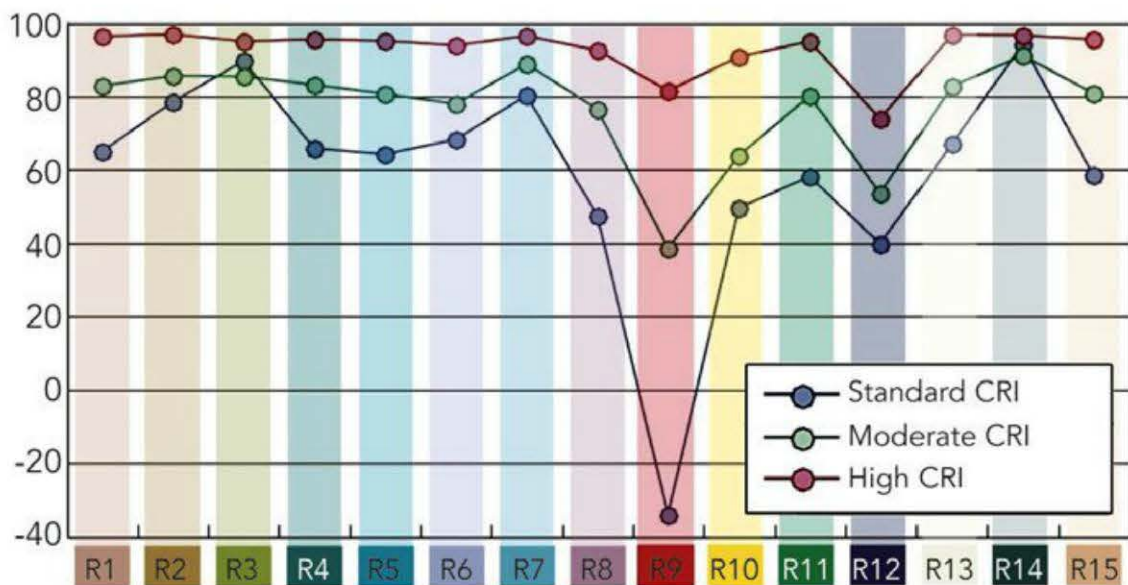


Figure 9.14 – IRC de 3 modèles de LED blanches (fabricant Nichia).

Même si les LED blanches (avec luminophore) sont loin d'être monochromatiques au sens où l'entend la communauté scientifique (c'est-à-dire quelques nanomètres de largeur spectrale), elles ne sont pas non plus des sources continues.

Néanmoins elles peuvent, en première approche, être qualifiées à l'aide de cet indice, quitte ensuite à être évaluées plus finement pour des besoins particuliers. Les améliorations en efficacité des puces semi-conductrices bleues, ainsi que la qualité du phosphore et la maîtrise de son dépôt, ont permis de réelles améliorations en moins de cinq ans. Entre 2012 et 2014, mises à part des LED dédiées à des applications spécifiques (notamment celles qui utilisent des guides d'onde absorbant certaines longueurs d'onde), les valeurs atteintes en IRC oscillaient en grande majorité entre 65 et 80. Pour obtenir des IRC supérieurs à 80, il fallait se rapprocher des fabricants possédant les brevets relatifs aux luminophores et/ou auprès de ceux qui ont des licences d'exploitation de ces technologies. Ainsi, au prix d'un rendement inférieur (de 5 à 10 % par rapport à des LED d'IRC = 75 par exemple) et pour

quelques centimes de plus (LED de type 1 W), des IRC de 90 à 95 pouvaient être atteints. En 2015, le développement des luminaires dédiés à l'éclairage intérieur pour lequel les IRC minimum demandés sont en général de 80, a poussé les fabricants à proposer de plus en plus de LED ayant un IRC supérieur à cette valeur. Dans le même temps, les applications d'éclairage extérieur qui ne requièrent pas ce niveau colorimétrique, mais plutôt un rendement très important, a contre-balancé quelque peu cette tendance, et des composants présentant des spectres entre blanc neutre et blanc froid (autour de 4 500 K) avec des IRC autour de 70 à 75 ont continués à se développer.

Le nouvel indice de rendu de couleur (CQS)

Nous venons de le voir, non seulement l'indice de rendu des couleurs qui avait été défini en grande partie lors du développement des sources fluorescentes n'est pas adapté aux LED mais il peut parfois être à l'origine de comparatifs « faux » en termes de qualité colorimétrique. En effet, une source émettant un spectre relativement continu peut obtenir un IRC légèrement inférieur à une autre qui aurait un spectre avec des « manques » importants, mais qui compenserait ces manques par d'excellents résultats pour les autres échantillons de test.

Au milieu des années 2000, le professeur Yoshi Ohno (NIST) a travaillé sur une nouvelle approche de la colorimétrie et le résultat de ses recherches a été présenté à la CIE fin 2009. Un nouvel indice a été proposé : le CQS = *Color Quality Scale*.

Cet indice intègre d'autres paramètres et une autre approche de l'évaluation du rendu de couleur, et tient compte par exemple de la saturation des couleurs ou du niveau d'éclairage de la scène, deux points techniques qui jouent un rôle non négligeable sur l'appréhension de la qualité de la lumière.

Un exemple donné par Yoshi Ohno pour illustrer cette incapacité de l'indice de rendu des couleurs standard à évaluer correctement la qualité colorimétrique d'une source est celui des lampes à incandescence traitées au néodyme (Nd) qui absorbent les longueurs d'onde dans le jaune et le jaune orangé uniquement. Ce modèle de lampe est le modèle préféré de beaucoup d'américains, or c'est l'objectif pour un rendu de couleur : être apprécié et choisi par les consommateurs. Pour ce modèle en particulier l'IRC est de 77 (plutôt moyen) tandis que le CQS est égal à 88 (très bon) avec un spectre très caractéristique dû à l'absorption du verre traité au néodyme.

Ainsi, pour une même source lumineuse, suivant le système de mesure et les références utilisées, le résultat peut être très différent, raison pour laquelle les différents organismes normatifs et la CIE en particulier travaillent sur la mise en place de nouveaux systèmes et référentiels de mesures mieux adaptés aux nouvelles sources lumineuses comme les LED.

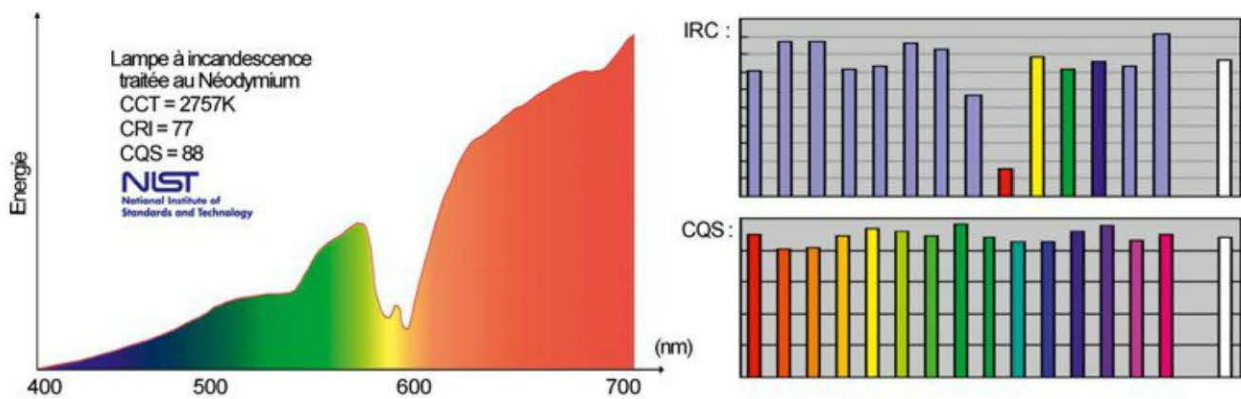


Figure 9.15 – Spectre, IRC et CQS d'une lampe à incandescence traitée au néodyme – NIST (Yoshi Ohno).

9.1.3 Le cas particulier des LED multipuces

Le développement ces dix dernières années de composants ou de modules intégrant des puces directement sur un support dissipatif (COB = *Chip On Board*) pour produire des flux lumineux de plus en plus importants s'est accompagné d'améliorations colorimétriques obtenues de manières différentes. D'abord la qualité des luminophores a été le premier défi auquel se sont attaqués les fabricants. Ensuite l'intégration de puces semi-conductrices supplémentaires (rouges) a permis d'atteindre des spectres de meilleure qualité (pour le marché de l'éclairage intérieur).

Plus récemment, dans un souci de simplification de l'intégration de la technologie LED auprès des fabricants de luminaires, les LED ou les modules LED fonctionnant directement en 230 VAC ont fait leur apparition. Seoul Semiconductor a été un précurseur en Europe avec son modèle Acrich fonctionnant directement en 230 VAC (avec un rendement de 65 lm/W en blanc froid). À partir de 2009-2010, le développement de LED dites HV (pour haut voltage) connaît un essor important. Nous ne parlons pas là de LED possédant 2, 3 ou 4 puces en série (comme le modèle NS9 de Nichia au début des années 2009), mais de modèles dépassant 40 à 50 V en mode continu.

Les LED multipuces en mode continu bas voltage

Nous mettons de côté les matrices COB qui ont été traitées au chapitre 4 et nous décrivons les LED multipuces (qui nécessitent donc un montage sur un support). C'est en partie les processus industriels de fabrication et leur amélioration qui ont permis de réaliser de telles intégrations dans un confinement important. Les différences majeures entre des LED multipuces et des LED monopuces résident d'une part dans la gestion thermique (présence de pad thermique ou de boîtier avec 4 ou 6 pattes) et d'autre part dans l'extraction lumineuse du semi-conducteur notamment lorsque la LED possède un dôme. De façon générale, la taille des LED multipuces est

9.1 Technologies disponibles pour l'émission de blanc

supérieure à celle des LED monopuces mais ce n'est pas toujours vrai notamment lorsqu'un pad de dissipation a été prévu pour permettre au composant d'être plus ramassé tout en restant efficace en termes de dissipation thermique.

Jusqu'en 2009-2010, il y avait principalement deux catégories de LED multipuces : des LED de basse puissance (0,1 W maximum) hébergeant 2 à 3 puces en parallèle (tension de fonctionnement autour de 3 à 3,3 V pour les versions blanches), et des LED de plus forte puissance (3 à 4 W de consommation électrique) employant des semi-conducteurs de 700 à 1000 μm de côté et mis soit en parallèle soit en série, ou pilotables indépendamment les uns des autres (figure 9.16).



Figure 9.16 – LED multi puce (de gauche à droite : LED de basse puissance Liteon, et deux modèles de LED de puissance Hongliopto (RGB) et Seoul Semiconductor).

En termes de performances, le fait d'intégrer plusieurs puces semi-conductrices permet d'atteindre des flux plus importants et de proposer des variantes : RGB ou RGB accompagné de blanc. L'évolution des boîtiers des LED a donc permis de dissiper de plus en plus de chaleur.

Si l'on considère les performances « moyennes » constatées sur ces types de boîtiers, les basses puissances (0,1 W maximum) atteignent des flux de 8 à 10 lumens, et pour les LED de puissance possédant 3 à 4 puces (en général de 700 à 900 μm de côté), les flux peuvent aller jusqu'à 350 à 400 lumens. Pour les applications qui requièrent des flux lumineux importants par composant on s'oriente vers les LED multipuces. Mais ces applications imposent souvent des surfaces d'émission très petites afin de mettre le faisceau en forme de façon efficace (au moyen de réflecteurs par exemple). Par conséquent, les fabricants de ce type de LED sont contraints de fabriquer des LED avec des boîtiers de petite taille par rapport à la chaleur dégagée. C'est l'une des raisons pour lesquelles les efficacités constatées sont de l'ordre de 10 à 20 % inférieures à celles de leurs homologues monopuces.

Par ailleurs, d'autres LED multipuces ont été développées entre 2008 et 2012 et ces développements se sont déployés depuis. Les fabricants historiquement spécialisés sur des technologies de puces de petites tailles, comme Nichia par exemple, ont

réalisé des LED qui comportaient jusqu'à 9 puces (figure 9.17) pilotées à 110-120 mA chacune, mises en série et en parallèle (3 groupes de 3 puces en série dans le modèle NS9 de Nichia, pour un courant nominal de 350 mA environ et 9 à 9,5 V de tension de fonctionnement). Les rendements de ces modèles de LED (petites puces) restent inférieurs à ceux de leurs homologues intégrant des puces de tailles plus grandes.

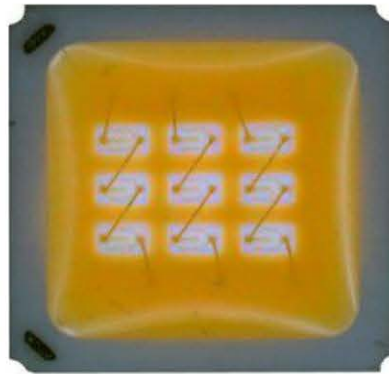


Figure 9.17 – LED multi-puces (modèle NS9 de Nichia).

D'autres fabricants se sont lancés dans le développement et la fabrication de ce type de LED, à mi-chemin entre les LED de puissance « traditionnelles » monopuces employant des semi-conducteurs de taille supérieure ou égale à 700 μm de côté, et les LED de basse puissance dont les puces n'excèdent pas 100 μm de côté en général. Nous pouvons citer en plus de Nichia, les fabricants CREE et Stanley (figure 9.18).



Figure 9.18 – LED multi-puces (a = Nichia ; b = CREE ; c = Stanley).

Enfin sur des boîtiers plus petits que ceux des LED de puissance (qui elles ont des consommations supérieures à 1 W), les années 2010-2012 ont vu émerger des LED intégrant souvent deux puces semi-conductrices, mais de taille intermédiaire. Ces boîtiers de LED souvent de type 5630, rectangulaires et possédant un pad thermique central, atteignent des flux de 15 à 35 lumens suivant les fabricants (par exemple Seoul Semiconductor). Ces évolutions sur des boîtiers de LED de puissance intermédiaire

se sont développées auprès de nombreux fabricants. Le fabricant LG Innotek a mis en œuvre courant 2013-2014 des LED de type 5630 ou 7030 (un peu plus allongées), équipée de 2 puces de grande taille. On peut trouver également des boîtiers de forme carrée (Samsung ou Nichia) intégrant plusieurs puces semi-conductrices.

Les LED multipuces en mode continu haut voltage

C'est en fait la suite logique des capacités d'intégration des fabricants de LED. La mise en œuvre de 3 ou 4 puces semi-conductrices nécessite une précision similaire à celle attendue pour le dépôt et la brasure de 8 à 15 puces. La technologie de câblage des puces est la même, tout comme le dépôt des luminophores qui se fait ensuite.

Les développements de ces types de LED sont relativement récents. Le fabricant Nichia avait présenté fin 2009 un modèle de LED fonctionnant sous une tension de l'ordre de 21 V (modèle NS6). Les fabricants américains et européens (Philips Lumileds, CREE et Osram en particulier) sont restés sur une stratégie monopuce (tension nécessaire autour de 3 V) jusqu'en 2011 et ont focalisé leurs actions sur le développement de LED ayant des tailles de semi-conducteur de plus en plus importantes ($> 2 \text{ mm}^2$). À partir de 2011, en partie sous l'impulsion des acteurs taiwanais (comme le fondeur Epistar, les fabricants Liteon et Everlight), tous les acteurs majeurs ont commencé à proposer des modèles de LED fonctionnant sous des tensions comprises entre 25 et 50 VDC, avec des courants compris entre 10 et 60 mA (figure 9.19).

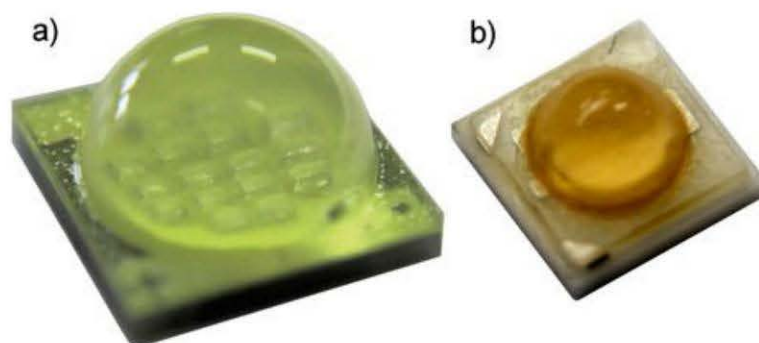


Figure 9.19 – LED multipuce haut voltage (a = CREE ; b = Everlight).

En 2015, une grande partie des fabricants propose des composants pouvant fonctionner autour de 6 VDC et bon nombre d'entre eux déclinent leur référence avec des tensions supérieures jusqu'à plus de 20 VDC.

Les LED multipuces en mode AC

Les fabricants de ce type de LED (fonctionnant directement en 110 ou 230 VAC, avec souvent une petite capacité de filtrage à ajouter sur la carte) sont peu nombreux, et l'un des précurseurs dans le domaine est Seoul Semiconductor avec son modèle

Acrich (figure 9.20.a) présenté la première fois début 2005, et lancé en production de masse 18 mois plus tard. Ce modèle protégé par de nombreux brevets est constitué d'un grand nombre de puces semi-conductrices mises en série. La particularité de cette LED est que la mise en série se fait de deux manières différentes : au niveau du semi-conducteur lui-même (contact entre puces par dépôt), puis de façon identique aux multipuces standard par fil d'or.

Les modèles plus récents de ce fabricant (A7, A5 et A4 : figure 9.20 b, c et d) ont été développés en mode HV (*high voltage*) et sont destinés à être montés sur une carte comportant un pont de diodes (qui assure la fonction de redressement de la tension).

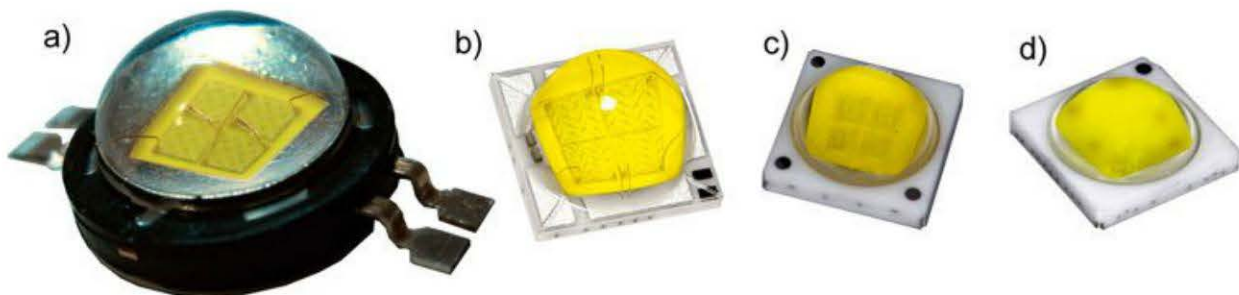


Figure 9.20 – LED Acrich – Seoul Semiconductor (a = Ax32x0 ; b = A7 ; c = A5 ; d = A4).

Entre 2009 et 2011, des acteurs taïwanais ont développé des LED de ce type qui étaient souvent peu disponibles en tant que composants mais intégrés directement dans les solutions finales d'éclairage comme des lampes à LED par exemple (figure 9.21).

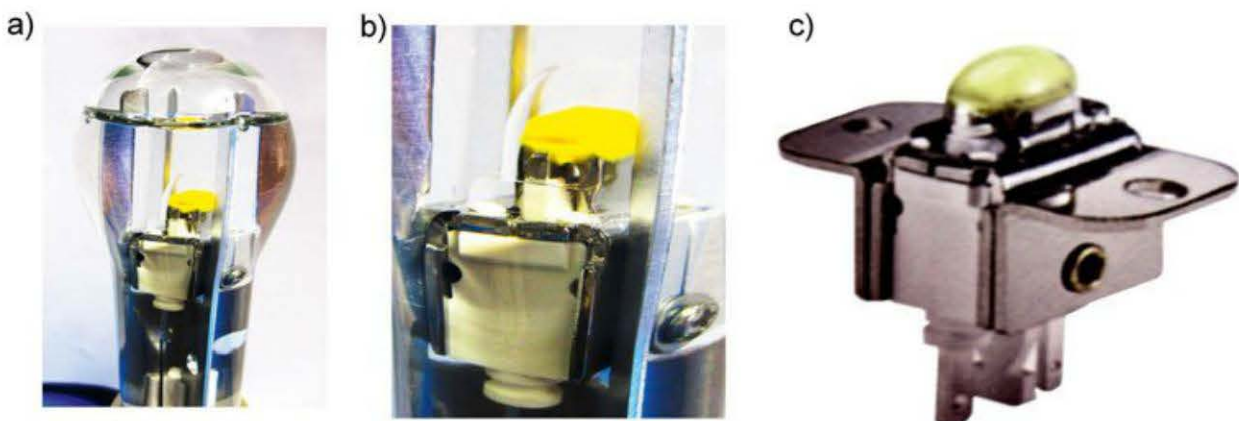


Figure 9.21 – Lampe à LED (b = zoom sur la LED mode AC ; c = LED mode AC seule).

Il existe toujours très peu de fabricants qui proposent cette technologie de fonctionnement direct en tension alternative 110 ou 230 VDC, et en 2012 Seoul Semiconductor reste le principal fournisseur aux côtés de Samsung avec son modèle en 110 VAC et 230 VAC.

9.2 La technologie RGB

Mais, les efficacités des LED en mode AC restent inférieures à celles atteintes par les LED blanches plus conventionnelles fonctionnant en basse tension (autour de 3 V). Les rendements constatés courant 2014 se situent autour de 80 à 100 lm/W, et même si leur fonctionnement direct sur le secteur évite l'étage de conversion électronique qui est nécessaire pour les LED basse tension, ces dernières gardent une longueur d'avance en termes de rendement (100 à 120 lm/W : LED + électronique en 2014).

Pour ce qui est des durées de vie, les modèles en mode AC sont plus proches de 30 à 40 000 h que de 50 000 h pour les composants en basse tension, mais leur avantage est de ne pas posséder d'électronique. Il n'y a donc pas de risque de défaillance de ce côté-là.

En termes de colorimétrie, des progrès importants ont été réalisés depuis 2010 et permettent d'atteindre des IRC supérieur à 85 avec des spectres très intéressants (LED Acrich de Seoul notamment).

Seul le prix peut constituer un avantage, puisqu'il évite l'étage de conversion entre le secteur et la basse tension nécessaire pour les composants traditionnels. C'est le cas pour les systèmes nécessitant des flux faibles, de l'ordre de 150 à 250 lumens et pour lesquels une seule LED suffit. Dès que les flux attendus sont importants, le coût des convertisseurs devient faible comparé à celui des LED et du système (figure 9.22).

Tableau 9.1 – Coût des convertisseurs (prix constatés en 2014) pour un cours de l'euro/dollar = 1 €/1,25 \$ (secteur 220VAC en basse tension 12 ou 24VDC)

Puissance	1-3 W	4-6 W	7-12 W	13-20 W	21-40 W
Prix des convertisseurs par 1000 pièces	3 €	4 €	6 €	7,5 €	12 €
Prix des convertisseurs par 1000 pièces : €/W	1 à 3	0,7 à 1	0,5 à 0,9	0,4 à 0,6	0,3 à 0,6

9.2 La technologie RGB

C'est la plus ancienne méthode de reconstitution de lumière blanche par mélange des trois couleurs primaires. Dans le cas des LED, de par leur faible largeur spectrale, cette recombinaison aboutit à des résultats plutôt moyens. Les LED RGB (Red, Green, Blue) restent aujourd'hui le meilleur outil pour la création de couleurs et la mise en œuvre d'animations colorées, mais sont peu souvent employées pour fabriquer du blanc.

De plus, les technologies des semi-conducteurs mises en œuvre dans les LED RGB sont différentes, de telle sorte qu'elles ne réagissent pas de la même manière aux paramètres extérieurs et notamment à la chaleur, paramètre pour lequel les puces semi-conductrices rouges dérivent plus que les vertes et les bleues d'un point de

vue spectral et baissent plus rapidement en flux également. Ainsi, des mélanges colorés réglés en maîtrisant le courant dans les LED à une certaine température ambiante seront différents pour les mêmes courants si cette température ambiante augmente.

9.2.1 Les LED RGB de basse puissance

Les applications d'éclairage qui requièrent des animations colorées, emploient depuis très longtemps des LED RGB. Au départ, les modèles 5 mm parvenaient rarement à héberger dans un même boîtier les trois puces (rouge, verte et bleue), mais dès le développement des modèles de LED CMS (PLCC4 et PLCC6 pour respectivement 4 et 6 pattes d'alimentation), de nombreux fabricants ont mis sur le marché des LED RGB (figure 9.22).

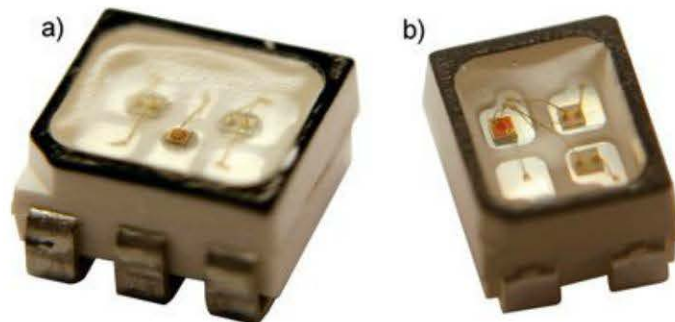


Figure 9.22 – LED RGB (a = type PLCC6 de Dominant ; b = type PLCC4 de Everlight).

Les capacités de dissipation thermique de ces types de boîtiers limitent les performances des composants. Non seulement les courants admissibles des puces sont peu élevés (entre 20 et 60 mA), mais de plus, la plupart des modèles doivent être alimentés en dessous des valeurs nominales de chaque puce prise individuellement, lorsque les trois puces sont allumées en même temps. Ainsi, une LED RGB qui accepterait que la puce rouge seule puisse être alimentée à 40 mA à une température donnée, doit être alimentée à 30 mA maximum si elle fonctionne en même temps que les puces bleues et vertes (elles-mêmes limitées à 30 mA).

Les performances optiques sont très moyennes, avec des rendements qui se situent de façon générale entre 30 et 40 lm/W en 2014, et des qualités spectrales variables en raison du manque d'homogénéité en longueur d'onde de chaque puce semi-conductrice. D'un point de vue thermique, il est difficile d'avoir un pad de dissipation de la chaleur pour ce type de boîtier (LED basse puissance) et donc les résistances thermiques sont importantes (entre 150 et 400°/W) ce qui peut amplifier le phénomène de dérive chromatique dû à la baisse de flux et à la dérive spectrale plus importante pour la puce-semi conductrice émettant du rouge.

9.2.2 LED RGB de puissance intermédiaire

Ces LED n'ont pas connu beaucoup de développements au départ, laissant la place aux LED basse puissance et aux LED de puissance, essentiellement pour des raisons d'application (les LED RGB étaient en grande partie destinées à servir de voyant lumineux). Lorsque les boîtiers de LED ont permis de dissiper autour de 0,5 W en maintenant des conditions thermiques raisonnables au niveau du semi-conducteur, les fabricants ont naturellement réutilisé ces boîtiers pour des modèles de LED RGB (figure 9.23).

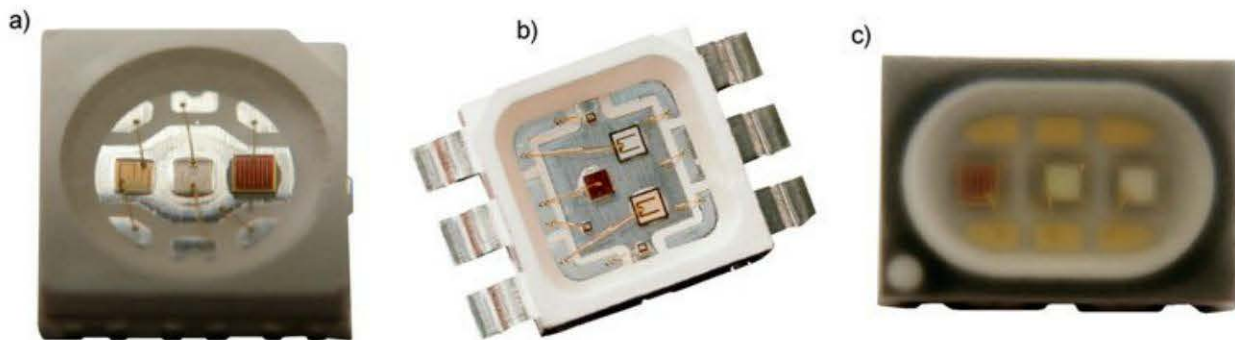


Figure 9.23 – LED RGB 0,5 W (a = Lite-On ; b = Kingbright ; c = Osram).

Leurs performances sont bien meilleures que celles des modèles basse puissance, en partie en raison de leur capacité à dissiper de la chaleur (résistances thermiques comprises entre 40 et 100°/W), et leurs rendements peuvent atteindre 75 lm/W dans certains cas.

Les flux émis par ces LED sont de quelques lumens pour le bleu, de 20 à 40 lumens en vert et autant pour les puces rouges.

9.2.3 Les LED RGB de forte puissance

Les récentes applications d'éclairage architectural (projecteurs extérieurs, projecteurs de façade dits *wall washer*) ont permis aux LED RGB de puissance de se développer. Au départ, elles intégraient uniquement les trois couleurs primaires (rouge, vert et bleu), puis sont apparues des modèles à quatre puces semi-conductrices, comportant ces trois couleurs plus une quatrième constituée d'ambre, de blanc ou éventuellement d'une couleur complémentaire spécifique, du cyan par exemple (figure 9.24).

Ces LED bénéficient de boîtiers (en résines ou en céramiques) très performants d'un point de vue thermique (avec des résistances thermiques de l'ordre de 5 à 15 °/W) qui permettent d'alimenter les puces de type 1 W de 350 jusqu'à 700 mA. Les flux générés dans ces conditions dépassent les 20 à 25 lumens en bleu, les 130 lumens en vert et près de 50 à 60 lumens en rouge.

Les puces complémentaires qui sont ajoutées ont les mêmes performances que celles intégrées dans des LED monopuces, que ce soit celles de couleur ambre (30 à

40 lumens à courant nominal), celles en blanc neutre (100 lumens à 3 500-4 000 K) ou encore celles en blanc froid (110 lumens à 5 500-6 500 K).

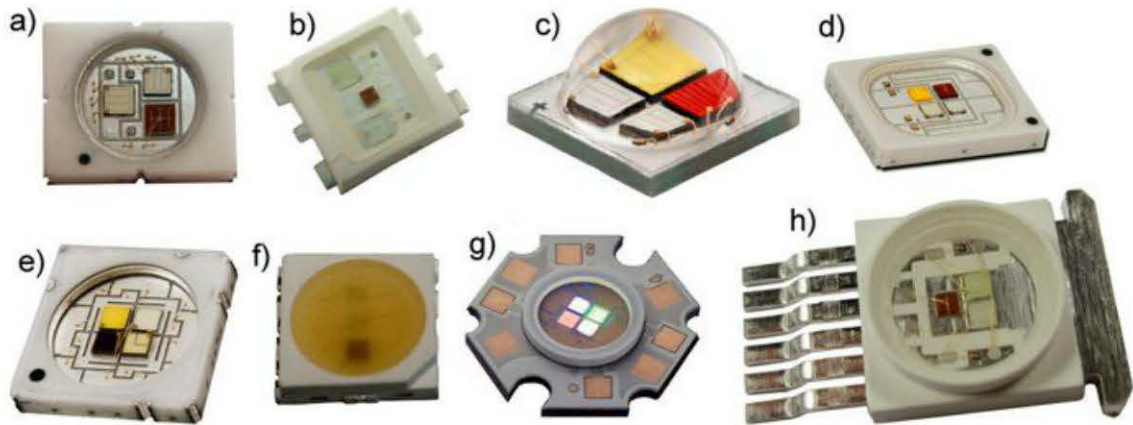


Figure 9.24 – LED RGB 3-4 W (a, d = Seoul ; b = Dominant ; c = CREE ; e = LedEngin ; f = LiteOn ; g = Excelitas ; h = Avago).

Les optiques primaires des LED RGB de puissance sont différentes les unes des autres, certaines plus adaptées à l'utilisation de réflecteurs directifs, d'autres permettant un éclairage le plus large possible.

Pour le choix du modèle de LED, il est important de bien déterminer le besoin de l'application dans la mesure où les boîtiers sont tous très différents et ne sont donc pas compatibles entre eux comme peuvent l'être les LED RGB de type basse puissance ou de puissance intermédiaire, en boîtier PLCC4 ou PLCC6.

9.3 Maturité de la technologie LED

Suivant le positionnement que l'on adopte, l'évaluation de la maturité de cette technologie peut être légèrement différente, mais la réalité des ventes de composants (LED) et des systèmes d'éclairages, donne néanmoins une vision claire des capacités actuelles des LED. La progression des ventes pour les différentes applications ces dernières années donne quelques éléments de réponse sur la maturité des LED actuelles et à venir (figure 9.25).

Du point de vue performance, les 120 lm/W sont atteints pour des composants fournissant un peu plus de 130 lumens (pour des consommations proches de 1 W en 2014) à des prix compris entre 0,4 \$ et 0,6 \$ suivant les volumes (nous parlons ici de plusieurs centaines de milliers de pièces commandées). À ces niveaux de flux, les performances colorimétriques sont excellentes (température de couleur entre 3 000 et 4 000 K, avec des indices de rendu de couleur compris entre 75 et 90). En ce qui concerne les applications d'éclairage, suivant les cas, nous observons des systèmes dépassant parfois les 100 à 110 lm/W (voire 120 lm/W dans certains cas mesurés fin 2014).

9.3 Maturité de la technologie LED

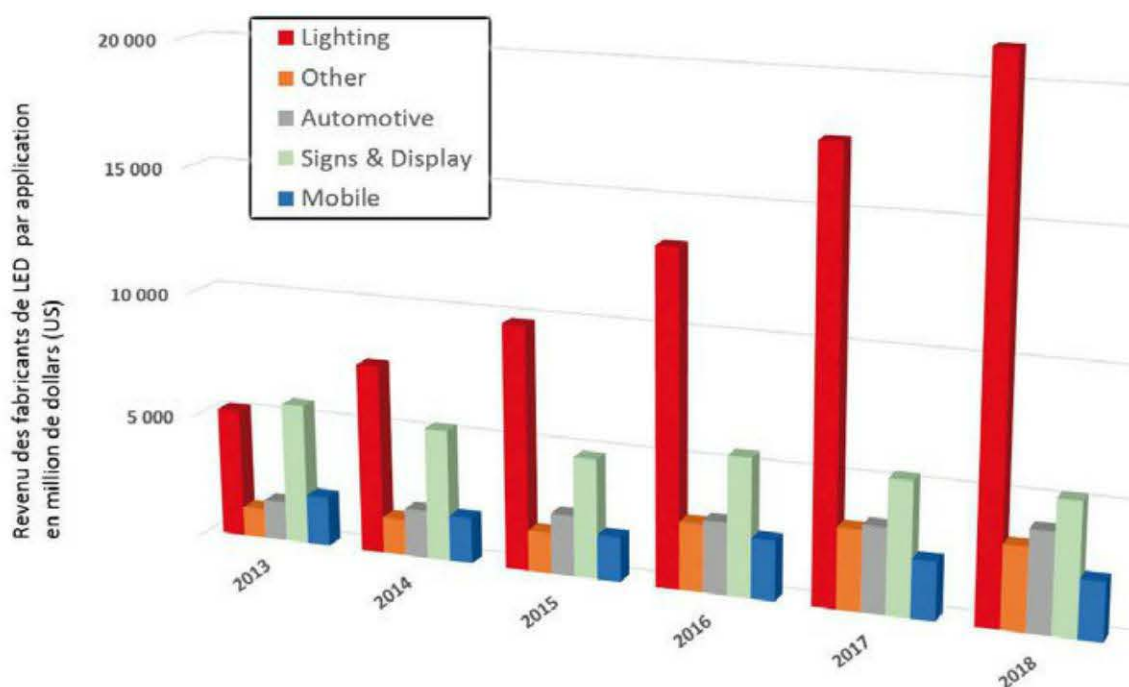


Figure 9.25 – Marché des LED 2013-2018 (informations issues de différentes sources : cabinets d'étude et d'expertise, fabricants).

La barre « mythique » des 100 lm/W pour un système d'éclairage a été atteinte et si nous prenons l'exemple des tubes à LED qui se sont fortement développés entre 2011 et 2015, des rendements de plus de 130 lm/W ont été mesurés sur des tubes de 120 cm et 150 cm, pour des températures de couleur autour de 4 000 K. Certains modèles hébergeant l'alimentation à l'extérieur du tube ont même présentés des rendements supérieurs à 140 lm/W. Cette valeur de 100 lm/W était un peu la condition *sine qua none* que bon nombre d'industriels avaient placée comme limite en dessous de laquelle les investissements importants d'intégration de cette technologie ne se feraient pas. En 2013, nous avons constaté que cette limite a été atteinte pour certains produits d'éclairage intérieur, et cela a certes accéléré le déploiement de la technologie LED, mais elle reste encore peu déployée (moins de 10 à 20 % des nouvelles installations suivant les domaines). D'autres raisons freinent ce déploiement, comme les aspects sociaux (difficulté des fabricants de faire évoluer leurs outils pour migrer vers la technologie LED, qui entraînerait des pertes d'emplois).

C'est la raison pour laquelle cela reste difficile de réaliser des prévisions fiables car l'évolution qui s'est faite entre 2012 et 2014 reste encore un peu frileuse vis-à-vis des LED, le positionnement des « anciens » fabricants n'étant pas aussi franc que les nouveaux entrants qui eux misent beaucoup et quasiment à 100 % sur cette technologie. Toutefois, et cela n'est pas coutume, certaines prévisions s'avèrent plutôt bonnes. Le département de l'énergie aux États-Unis (DOE) qui procède

9. La maturité des différentes technologies de LED

à une analyse précise tous les ans sur les performances de la technologie LED, proposait des prévisions courant 2011 qui s'avèrent proches de la réalité à 10-20 % près (figure 9.26).

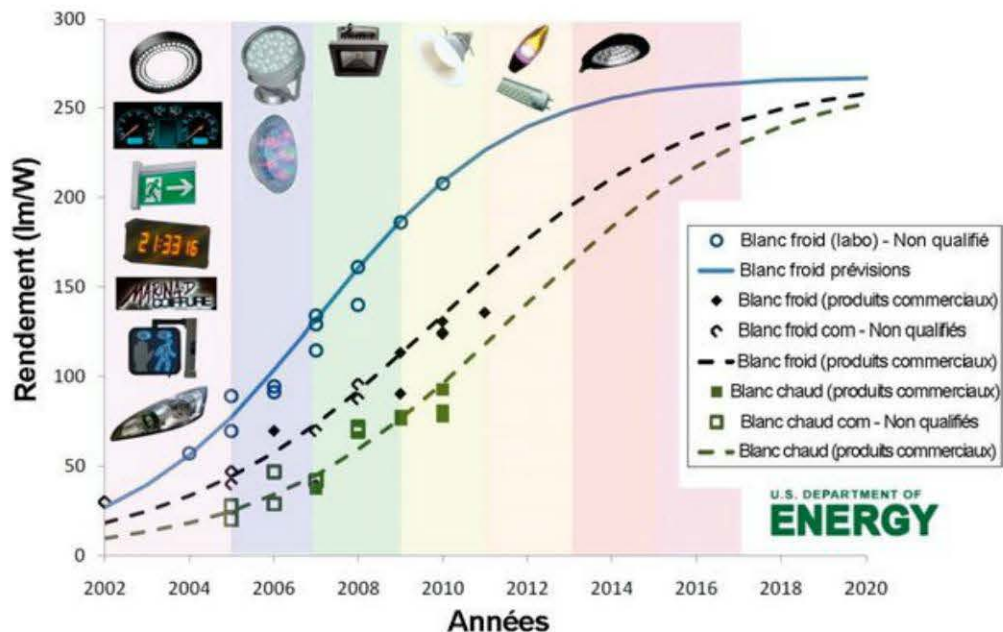


Figure 9.26 – Rendement des LED 2002-2020 –
U.S. Department of Energy (DoE) – mai 2011.

10

Une grande variété d'applications

Aujourd'hui les LED sont utilisées dans une très large variété d'utilisations. Ce chapitre dresse l'inventaire de ces domaines qu'il s'agisse d'utilisations en extérieur (éclairage public, feux de signalisation...) ou en intérieur (résidentiel, bureaux, véhicules...). Pour chaque domaine, les contraintes de conception et les perspectives de développement sont détaillées.

10.1 Balisage lumineux et « voyants lumineux »

Les LED sont souvent utilisées comme voyants pour leur brillance (sensation d'éblouissement) et c'est justement là qu'elles excellent. Non seulement elles sont brillantes (plusieurs millions de cd/m^2) mais en plus elles peuvent avoir un angle d'émission très large et ainsi être aperçues de loin et sous un angle important. Les LED sont présentes dans ce type d'application depuis plus de dix ans maintenant.

Le cas du balisage aérien est un peu à part car il met en jeu des niveaux d'intensité lumineuse extrêmement importants (plusieurs dizaines voire centaines de milliers de candelas sous des angles faibles horizontalement entre 10 et 20° et sur 360°). Jusqu'à présent, ce sont des lampes à éclats qui assurent de telles intensités, mais dans certains cas des systèmes à LED sont proposés bien que leurs performances, aux alentours de 15 000 à 25 000 candelas, soient plus faibles. Ces dispositifs sont composés de 100 à 300 LED de puissance.

10.2 Éclairage publicitaire et enseignes lumineuses

Beaucoup d'enseignes lumineuses sont constituées de boîtiers réalisés en tôle d'aluminium, avec une face avant en polycarbonate gravé et/ou coloré. L'éclairage de ces caissons se faisait jusqu'à la fin des années 1990 essentiellement avec des tubes haute tension (figure 10.1) ou avec de tubes fluorescents. Cette technologie très répandue souffrait pourtant (et souffre toujours) de contraintes techniques importantes pour ce type d'application que sont les lettres caisson. Ainsi, la gestion d'un système à haute tension, la fabrication artisanale des tubes soufflés sur mesure pour chaque enseigne, la fragilité des

systèmes (tubes de verre) difficilement transportables sur de longues distances, un rendement plutôt moyen (autour de 30 à 70 lm/W), une forte dépendance (efficacité et durée de vie) à la température de fonctionnement, et enfin une problématique d'uniformité pas évidente à gérer sont autant de points pénalisants pour cette technologie.



Figure 10.1 – Enseigne lumineuse à tube haute tension.

Au début des années 2000, avec l'amélioration de l'efficacité des LED et avec leur principal atout qui est d'émettre la lumière dans une direction privilégiée, les enseignes lumineuses de type « lettre boîtier » ont commencé à être équipées de LED. Non seulement les LED apportaient une réponse à bon nombre des problèmes posés par les tubes haute tension, mais en plus elles bénéficiaient d'un environnement propice à leur développement : un milieu souvent humide, en extérieur, avec des variations de températures importantes. Les mêmes LED qui avaient été introduites quelques années auparavant dans des applications aéronautiques étaient intégrées sur des modules pour enseignes lumineuses. L'offre en modules à LED au début des années 2000 n'était pas très variée et quelques grands groupes comme Osram, GE (General Electric) ou Philips se partageaient une grosse partie du marché. D'autres acteurs comme Tridonic avec de nouvelles solutions techniques proposaient des alternatives.

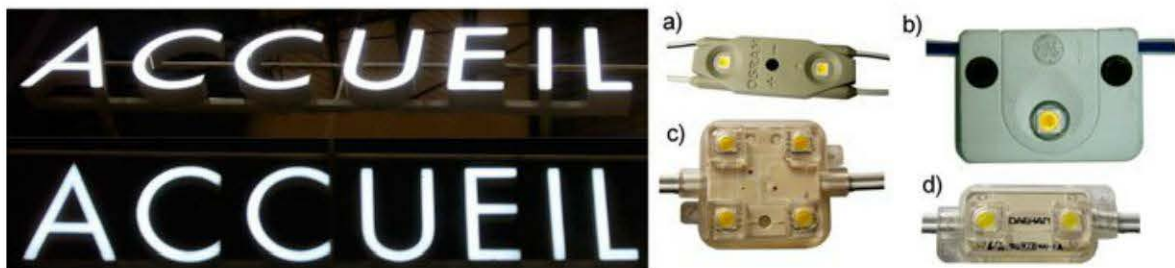


Figure 10.2 – Enseigne lumineuse à LED – Modules à LED
(a = Osram, b = GE, c et d = Daehan).

Pour ce type d'applications, le rendement des sources mises en œuvre est moins important que l'efficacité du faisceau produit. En effet, ce qui importe c'est bien le niveau de luminance sur la partie plastique en face avant, et ce sont donc des modules capables d'émettre des faisceaux efficaces et uniformes qui sont recherchés.

10.3 Rétro-éclairage d'écrans

Bien entendu, un excellent rendement couplé à une mise en forme de faisceau efficace constitue un module à LED idéal.

10.3 Rétro-éclairage d'écrans

En termes de volume, c'est l'application (figure 10.3) qui consomme aujourd'hui encore le plus de LED alimentées entre 10 et 35 mA. Les fabricants de dalles et les utilisateurs de LED de type *side emitting* (éclairage par la tranche), ou *top emitting* (pour éclairage de face) que sont AUO, LG ou encore Sharp, constituent les principaux clients des grands fabricants de LED et de puces semi-conductrices toutes applications confondues.

Les technologies associées (guide de lumière, motifs permettant une bonne uniformité de l'éclairage) ainsi que les performances des LED ont contribué à diminuer fortement le nombre de LED pour réaliser un éclairage de bonne uniformité. Au départ, l'éclairage devait se faire sur les quatre côtés avec un nombre de LED total entre 120 et 200. Les récents écrans d'ordinateur portable intègrent désormais une seule ligne de LED (entre 15 et 35 composants suivant les cas), dans la plupart des cas en émission par la tranche (figure 10.3.d).

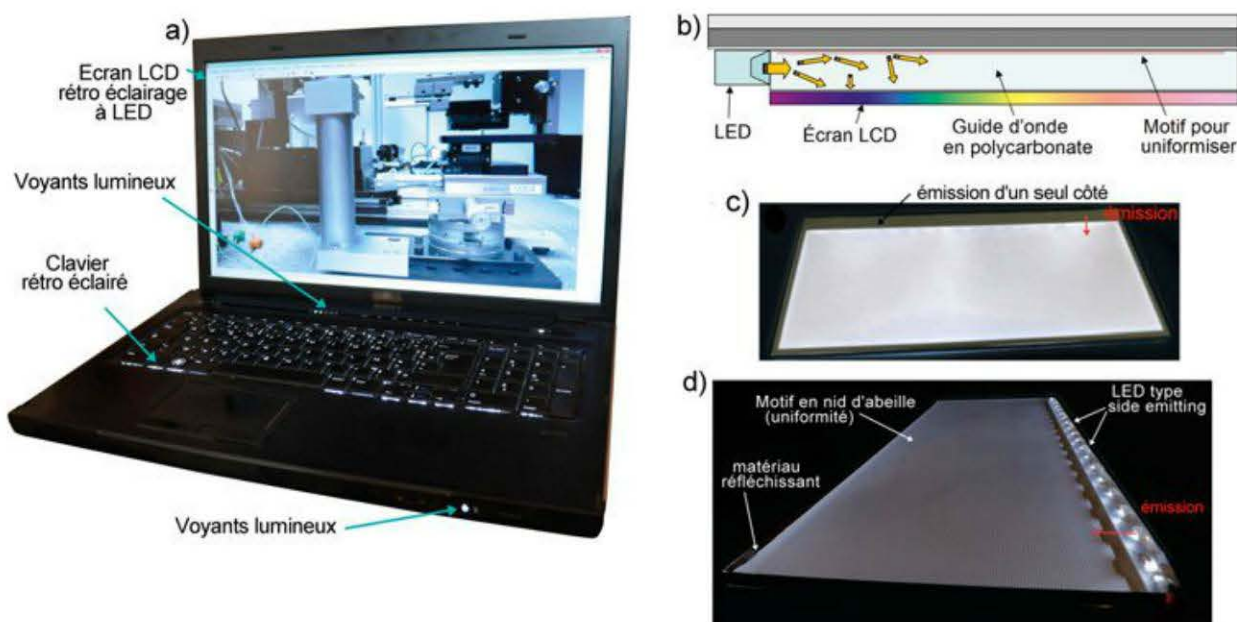


Figure 10.3 – Rétro-éclairage d'écran LCD pour ordinateur portable.

10.4 Panneaux d'information et horloges

Aujourd'hui encore, de nombreux panneaux d'information sont réalisés à l'aide de pastilles basculantes, qui nécessitent une seule impulsion électrique (donc peu d'énergie) pour tourner d'un quart de tour et présenter soit une face soit une autre, et

constituer ainsi un pixel. Petit à petit, ces panneaux ont été remplacés par des LED, qui apportent un contraste plus important et une meilleure visibilité sous différents angles quand cela est nécessaire.

Les horloges publiques et de grandes dimensions sont également équipées de LED, que ce soit en rétro éclairage (figure 10.4.b), en éclairage direct (comme les panneaux d'affichage de la figure 10.4.c) ou enfin qu'il s'agisse d'éclairage rasant pour mettre en valeur et accentuer un mécanisme par exemple (figure 10.4.d).

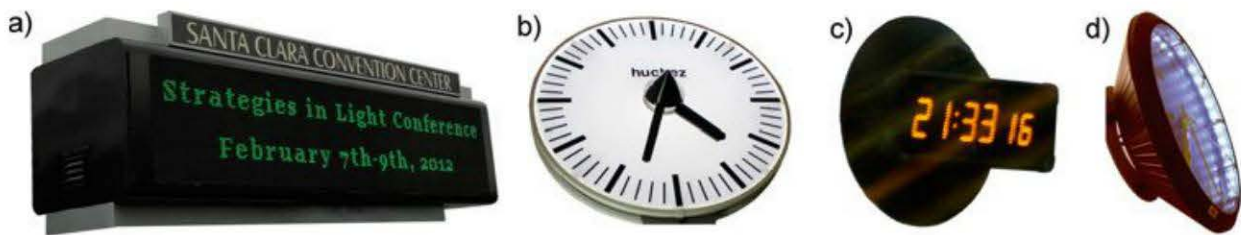


Figure 10.4 – Panneau d'affichage (a = Santa-Clara) et horloges (b = Huchez ; c et d = SNCF).

10.5 Éclairage et signalisation routière

10.5.1 Signalisation routière

Pour ce type d'application, nous restons dans un domaine qui nécessite une forte intensité suivant un axe déterminé, et pas forcément un flux important. Les LED 5 mm étaient toutes destinées à répondre aux exigences de ce type de produit et elles y ont été intégrées très tôt dès lors que des LED vertes étaient suffisamment lumineuses pour remplacer les lampes à incandescence initiales. Aujourd'hui, la quasi-totalité des feux tricolores sont fabriqués à base de LED, en général des LED CMS avec un dôme de focalisation (Osram et Avago sont très bien placés pour ces applications), même s'il reste encore beaucoup de feux tricolores utilisant des LED de type 5 mm (figure 10.5.b et c).

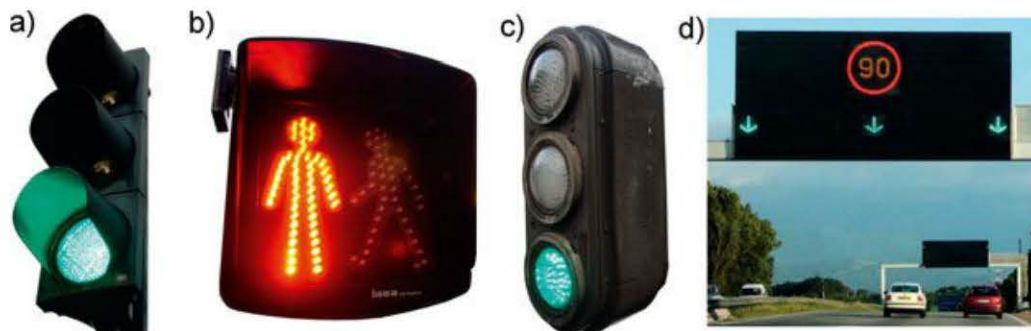


Figure 10.5 – Éclairage pour la signalisation routière.

10.5.2 Éclairages routiers (voies principales)

C'est l'une des applications pour lesquelles l'intégration de la technologie LED est la plus délicate, non seulement du fait du niveau élevé des performances techniques attendues, mais aussi parce que les technologies employées jusqu'à présent (lampes à décharges) ont une qualité colorimétrique très inégale, même si dans l'ensemble elles sont très performantes ($IRC < 20$ pour les plus médiocres ; IRC de 70 à 80 pour les meilleures d'entre elles). Elles offrent notamment des durées de vie proches de 15 000 à 20 000 heures et des rendements compris entre 90 et 110 lm/W.

Jusqu'en 2012, la plupart des installations étaient considérées comme des installations pilote, réalisées en général à petite échelle et permettant de réaliser des essais et des validations. En 2013 et 2014, le déploiement de la technologie LED s'est accentué dans ce domaine et les niveaux de performance atteints permettent aujourd'hui de dire qu'il est tout à fait possible d'éclairer dans le domaine public (y compris pour les applications d'éclairage routier) avec des LED. Toutefois, de nouvelles problématiques sont apparues, notamment en termes de protection contre la foudre et les surtensions du réseau, et elles sont en partie résolues. Le prix des produits reste important, mais le service rendu (en particulier la durée de vie des sources lumineuses permettant de limiter les interventions onéreuses à l'aide de nacelles) permet d'obtenir de bons retours sur investissement.



Figure 10.6 – Candélabres à LED (voies principales et secondaires).

10.5.3 Éclairages routiers (voies secondaires)

Commençons par définir ce que nous entendons par voies secondaires. Il s'agit de voies publiques où les véhicules roulent à allure modérée. Dans ces cas, les hauteurs d'éclairage sont plus faibles (4 à 6 mètres contre plus de 8 mètres en éclairage routier

pour voies principales). Les flux lumineux attendus sont donc plus faibles. De plus, les normes d'éclairages moins contraignantes laissent un peu plus de possibilités aux fabricants de candélabres. Cela permettrait par exemple (et des expérimentations sont en cours notamment en zones piétonnes) de réaliser des systèmes ne focalisant leur flux lumineux que sur une partie de la voie, avec une détection assurant 100 % de l'éclairage dès la présence d'un individu. Dans les années 2008-2012, des expérimentations ont été menées aboutissant à des résultats intéressants et ont parfois montré les limites de certains systèmes associés comme des détecteurs de présence, ayant un temps de réponse trop faible.



Figure 10.7 – Candélabres à LED (voies secondaires et résidentielles).

Courant 2013 et 2014, l'amélioration des performances des LED (+20 à +30 % de rendement suivant les cas), et le développement des solutions d'optiques secondaire, ont permis d'aboutir à des produits d'éclairage performants, en mesure de rivaliser en termes de résultats photométriques avec les produits d'éclairage intégrant des sources lumineuse plus traditionnelles.

10.5.4 Éclairages public autonome

C'est vraiment l'application toute dédiée pour que la technologie LED puisse démontrer sa pertinence. L'énergie disponible pour éclairer provient de batteries (en général de 24VDC) rechargées la journée par un système de panneaux photovoltaïques couplés à un régulateur « intelligent » qui recharge ces batteries de façon optimale (comme il régule également leur décharge). Cette énergie est fournie en mode continu et basse tension, idéale pour des LED qui ont des tensions de fonctionnement de l'ordre de 3VDC et qui mises en série, peuvent être alors alimentée par ces

10.5 Éclairage et signalisation routière

batteries via des systèmes de régulation de courant très efficaces (parfois supérieur à 95 % de rendement pour ces régulateurs appelé parfois « DC/DC »).

La demande globale en candélabres solaires autonomes somme toute faible, ainsi que le nombre de candélabre par projet souvent inférieur à 10 pièces, ont permis à des petites structures (parfois de moins de 10 personnes), de proposer des produits sur le marché. La part des LED dans le prix de revient du produit (souvent moins de 4 à 5 %) étant très faible, et le gain que celles-ci peuvent présenter par la diminution de la surface de panneaux solaires nécessaire d'une part, et d'autre part la diminution des packs batterie, permet d'intégrer des composants (LED) d'excellente qualité, avec des rendements pour des colorimétries de 4 000 K à 4 500 K de l'ordre de 130 à 140 lm/W, voire 150 à 170 lm/W dans certains cas).

Les candélabres autonomes sont très souvent structurés de la manière suivante : un mât supporte un panneau solaire et un bras sur lequel est positionnée la tête lumineuse (figure 10.8). La tête lumineuse est souvent constituée d'une vitre (verre) en face avant et de lentilles positionnées sur les LED pour répartir le faisceau lumineux. Toutefois, les vitres standard en face avant même traitées, dès lors qu'elles sont planes, limitent fortement les émissions de lumière de façon rasante qui peuvent permettre d'écarter un peu plus les luminaires tout en préservant l'homogénéité de l'éclairage au sol. Ainsi, certains fabricants utilisent des lentilles sous forme de plaque en polycarbonate ou PMMA (figure 10.8 c et d), permettant de rendre étanche le luminaire tout en proposant des faisceaux lumineux plus rasants que ceux utilisant des vitres en verre plane.

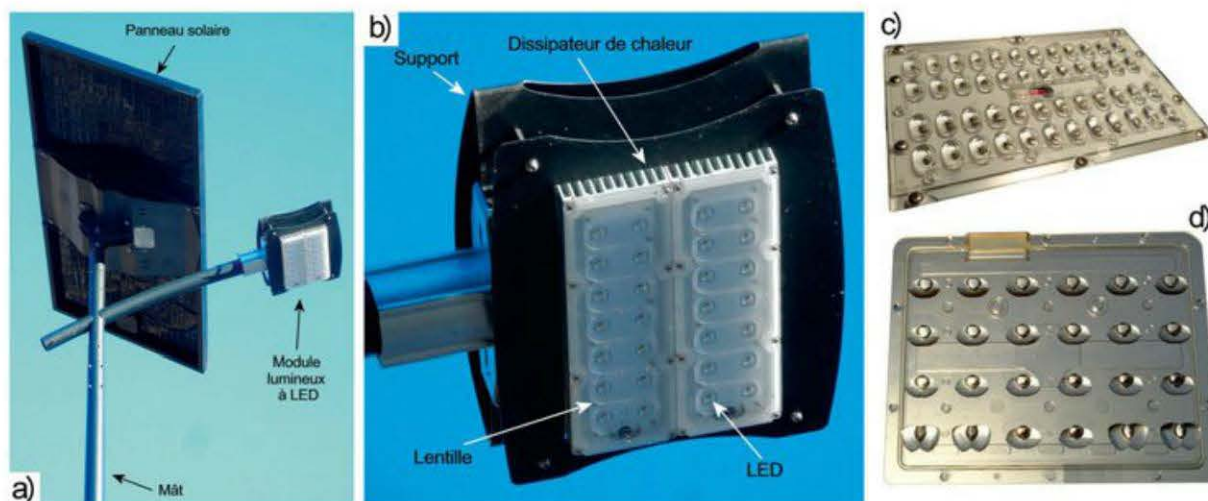


Figure 10.8 – Candélabres à LED (voies secondaires et résidentielles).

Le pack batterie est hébergé soit dans un coffret étanche et robuste (antivandalisme) en pied de mât, soit dans le mât lui-même si la compacité des batteries le permet.

10.6 Éclairages extérieurs

Il s'agit d'éclairages de bâtiments (et d'environs de bâtiment), d'éclairages de type abribus, d'éclairages d'escaliers extérieurs ou encore d'éclairage de parking (couverts ou non). Ces luminaires doivent répondre à des normes d'éclairage mais également des normes plus spécifiques comme des tenues au feu. Leurs interactions avec d'autres technologies (réserve d'énergie par batteries et recharge par panneaux solaires par exemple) les contraignent à s'adapter et à fonctionner sous différents types de tensions.

Les LED sont tout à fait préconisées pour ce type d'éclairage puisqu'elles peuvent être mises en œuvre de façon adaptée aux différentes situations (puissances inférieures à 10 W) envisageables, (focalisation du flux lumineux, compacité importante des systèmes d'éclairage).



Figure 10.9 – Éclairages extérieurs.

10.7 Éclairages architecturaux et éclairages scéniques

Ces deux types d'éclairage sont assez similaires car ils mettent en jeu des faisceaux lumineux qui ont été travaillés spécifiquement (focalisation circulaire, elliptique, etc.).

L'avantage de la LED pour ces applications c'est justement leur prédisposition à émettre dans une direction privilégiée et à pouvoir fournir des formes de faisceaux très particulières (symétrique et non symétrique, circulaire, de type « lèche mur ») avec des rendements qui restent très raisonnables ($> 40 \text{ lm/W}$). Les LED permettent de réaliser des animations colorimétriques sans faire appel à des systèmes mécaniques ou à des filtres colorés, peu efficaces et limités dans les rendus. Les types de LED utilisées sont très variés suivant les puissances lumineuses requises, les distances entre le luminaire et l'objet à éclairer, le temps de fonctionnement journalier...

10.7 Éclairages architecturaux et éclairages scéniques



Figure 10.10 – Éclairage architecturaux et scéniques.

En 2015, de nombreux fabricants d'optiques secondaires proposent des optiques complémentaires qui s'intègrent sur les LED de façon standard (soit maintenues de façon mécanique, soit par un double face) et qui contribuent au développement de ce type de luminaire pour lequel un bon rendement est important mais pas indispensable. De petits intégrateurs pour lesquels le développement d'un produit d'éclairage devient possible à des coûts raisonnables ont trouvé leur place sur ce marché. Les LED de puissance RGB, RGBW et RGBA (RGBW = Red Green Blue White - RGBA = Red Green Blue Amber), ainsi que les optiques adaptées (fournissant un bon rendu dans le mélange des couleurs), sont apparues au milieu des années 2000 et ont participé aussi à cette accélération de mise en lumière de bâtiments ou de monuments. Durant les années 2010-2014, le développement des applications d'éclairage extérieur dédiées au bâtiment s'est fait de telle sorte que la limite entre éclairage décoratif de façade et éclairage fonctionnel proprement dit n'était plus aussi franche. Dès lors, la qualité colorimétrique proposée et la possibilité de moduler la lumière suivant le temps ou les événements, a permis de donner à des bâtiments un rendu bien différent de ce qui existait avant l'arrivée de cette technologie (figure 10.11).



Figure 10.11 – Façade de bâtiment (Paris – La Défense).

10.8 Éclairages résidentiels

Lorsqu'il s'agit de lieux privés pour lesquels les enjeux peuvent être différents de ceux des zones publiques qui doivent répondre à des normes et à des contraintes prédéfinies et parfois contraignantes, les possibilités d'implantation de produits d'éclairage à LED sont plus grandes.

Prenons l'exemple d'une résidence où l'on souhaite un éclairage de l'ensemble des allées extérieures avec un niveau d'éclairement de l'ordre de 5 lux et avec la possibilité de monter à 10 lux lors d'une détection de présence. Le but dans ce cas étant d'économiser de l'énergie tout en assurant un éclairage de sécurité plus que « réellement » fonctionnel. Les LED sont alors tout à fait adaptées, car des luminaires peuvent être mis en place en proposant des flux lumineux de l'ordre de 400 à 1 000 lumens, tout en optimisant la consommation entre 7 à 15 W.

L'offre de solutions d'éclairage pour cette application s'est considérablement développée, en grande partie du fait de l'augmentation des performances des LED, mais aussi grâce au changement du ressenti des utilisateurs pour cette technologie, qui la considèrent en 2015 globalement mature.

10.9 Éclairages de bureaux et de zones de passage

10.9.1 La pièce « bureau » et les zones communes

Aujourd'hui encore et très certainement pour de nombreuses années, les tubes fluorescents sont incontournables pour éclairer les zones de bureau. Prenons l'exemple d'une dalle de 600 x 600 mm équipée de quatre tubes fluorescents de 18 W. Chacun génère entre 1300 et 1500 lumens, qui sont répartis sur la zone de travail par un réflecteur basique dont le rendement peut être évalué de 70 à 80 %. Nous obtenons un luminaire avec un flux utile de près de 4000 à 5000 lumens pour un coût total inférieur à 40 €.

Courant 2013-2014, les fabricants de luminaires d'une part, et ceux s'étant spécialisés dans les produits de remplacement d'autre part (tubes et lampes à LED), ont amélioré considérablement leurs techniques de mise en œuvre de la technologie LED. Cela a eu pour conséquence une baisse des prix des produits par rapport à 2011-2012. En 2015, un tube à LED de qualité de 60 cm de long se négocie autour de 10 à 25 € HT pour des quantités inférieures à cent pièces et fournit un flux utile autour de 1 000 lumens pour des consommations qui se situent autour de 10 à 12 W. La stratégie des fournisseurs de solutions d'éclairage de type 600x600, a été de proposer des luminaires consommant moins d'énergie que les dalles standard en tube fluorescent. Ainsi, les dalles à LED fournissent souvent des flux autour de

10.9 Éclairages de bureaux et de zones de passage

4 000 lumens, mais pour des consommations totales de l'ordre de 35-40 W, contre plus de 70 W pour les dalles fluorescentes. En termes de coût courant en 2014, la différence de coût entre la technologie traditionnelle fluorescente et la technologie LED est encore importante, même si nous intégrons un calcul de gain énergétique ainsi que le fait d'avoir des durées de vie pour les tubes à LED supérieures. Toutefois, on parle d'un côté pour les dalles fluorescentes d'un prix proche de 25 à 35 €HT tout compris, contre le double ou le triple pour le même rendu lumineux en technologie LED, ce qui présage que la technologie fluorescente va rester encore quelques années la plus employée pour les éclairages des bureaux, des parties communes et des zones de passage.

Si l'on parle de durée de vie, les tubes fluorescents ont été considérablement améliorés, y compris dans des ambiances thermiques variables et ils atteignent sans trop de problème (pour les moins onéreux) des durées de vie de 8 000 à 12 000 heures. Des versions spéciales ont été développées depuis plusieurs années qui atteignent des durées de vie de 40 000 heures.

Néanmoins, cette technologie fluorescente souffre d'un problème majeur : elle est sensible aux allumages et extinctions répétés. D'ailleurs, les fabricants donnent souvent leur durée de vie estimée en précisant un nombre d'allumages (ou de cycles d'allumage) par jour. C'est de ce point vue-là que les LED peuvent jouer leur atout, sans oublier néanmoins que les luminaires à LED possèdent des alimentations qui sont elles aussi sensibles aux allumages et extinctions répétés, même si elles le sont moins que la technologie fluorescente. Des détecteurs peuvent d'ailleurs être mis en place permettant de laisser l'alimentation en mode « stand by » tout en ne consommant que quelques centaines de milliwatts (figure 10.12) au lieu de la couper complètement. Cette solution est beaucoup plus difficile à mettre en place avec les tubes fluorescents.



Figure 10.12 – Luminaire de couloir à LED avec détection de présence.

10.9.2 Le meuble « bureau » et de plans de travail

C'est encore une fois l'une des propriétés d'émission des LED qui est mise à contribution pour cette application : la directivité relative de ces composants. La distance entre la source et la surface à éclairer est relativement courte (entre 30 cm et 1 m) et la position (niveau des yeux) des utilisateurs de ce type de luminaire est souvent à la même hauteur que la source ou légèrement plus basse. De ce fait, les éblouissements sont très réduits. Les normes d'éclairement, y compris dans bon nombre de professions, imposent souvent un minimum de 500 lux sur le plan de travail avec suivant les cas des uniformités qui peuvent être différentes. Ce sont des performances que peuvent atteindre sans trop de difficultés les systèmes à LED, et cette technologie propose en plus des particularités intéressantes, notamment la compacité qui permet de réaliser des produits très fins (figure 10.13) ou encore la qualité colorimétrique.



Figure 10.13 – Lampe de bureau à LED (blanc chaud à gauche – haut IRC à droite).

10.10 Éclairages intérieurs, professionnels et grand public

Suivant les zones à éclairer à l'intérieur d'une habitation, suivant les origines géographiques des populations qui s'éclairent (Afrique, Asie, Europe, Amérique ou Océanie) et suivant le moment de la journée, le type d'éclairage à produire est différent. C'est ce qui fait toute la difficulté pour les fabricants d'éclairage à LED de trouver le meilleur compromis en termes de flux, de directivité et de type de colorimétrie.

Jusqu'en 2002-2003, les applications d'éclairage à LED en intérieur étaient essentiellement des applications décoratives, d'éclairage d'ambiance souvent indirect (figure 10.14) ou éventuellement d'accentuation (faisceaux lumineux focalisés).



Figure 10.14 – Éclairage d'ambiance (indirect)
à projeter sur un mur ou une corniche.

Jusqu'en 2010-2011, les améliorations tant d'un point de vue du rendement que sur la qualité du blanc émis n'avaient pas permis d'entrevoir des applications d'éclairage général et les coûts de telles lampes ne permettaient pas au marché de se développer. Entre 2012 et 2013, les fabricants ont réussi à atteindre des performances de flux lumineux (entre 400 et 700 lumens), de colorimétrie (CCT autour de 3 000 K avec des IRC compris entre 80 et 90) tels que les lampes à LED « équivalent 60 W » (figure 10.15) ont connu un développement important, notamment chez les professionnels.



Figure 10.15 – Lampes à LED (Tests L.E.D).

De même, les lampes de type dichroïque (faisceau directif compris entre 30 et 50°) se sont développées ces récentes années et, entre 2008 et 2011, la majeure partie des produits étaient constitués de systèmes mettant en œuvre des LED de basse qualité, avec des qualités de fabrication mauvaise voire médiocre. Courant des années 2012-2014, les fabricants ont lancé de nouvelles gammes pour le marché des professionnels (figure 10.16), présentant des produits d'excellente qualité tant du point de vue du flux lumineux (ici nous parlerions plutôt d'intensité dans l'axe) que de la qualité spectrale de la lumière émise. L'objectif étant de mettre en valeur des produits destinés à la vente, ces systèmes d'éclairage se devaient d'émettre une lumière la plus « naturelle » possible et le plus longtemps.



Figure 10.16 – Lampes à LED avec faisceau lumineux focalisé.

Courant 2014 et début 2015, le déploiement des produits destinés aux professionnels a permis de développer l'offre grand public, permettant d'atteindre des niveaux de prix acceptables pour les consommateurs et la barre des 10 €TTC suivant les modèles, pour des produits unitaires.

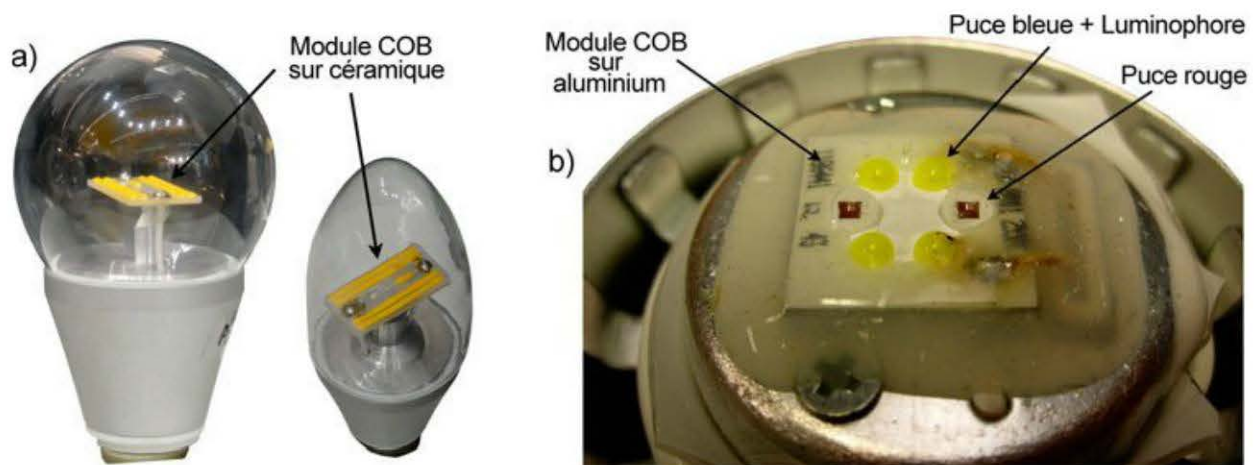


Figure 10.17 – Lampes à LED utilisant la technologie COB (*chip on board*).

La technologie COB (figure 10.17) a permis de simplifier certaines architectures et la méthode de luminophore déportée (*remote phosphore* – figure 10.18) a, quant à elle, abaissé les niveaux de luminance (moins d'éblouissement) et permis d'atteindre des flux plus importants tout en rappelant l'aspect ponctuel des sources à incandescence qui sont utilisées depuis des dizaines d'années.

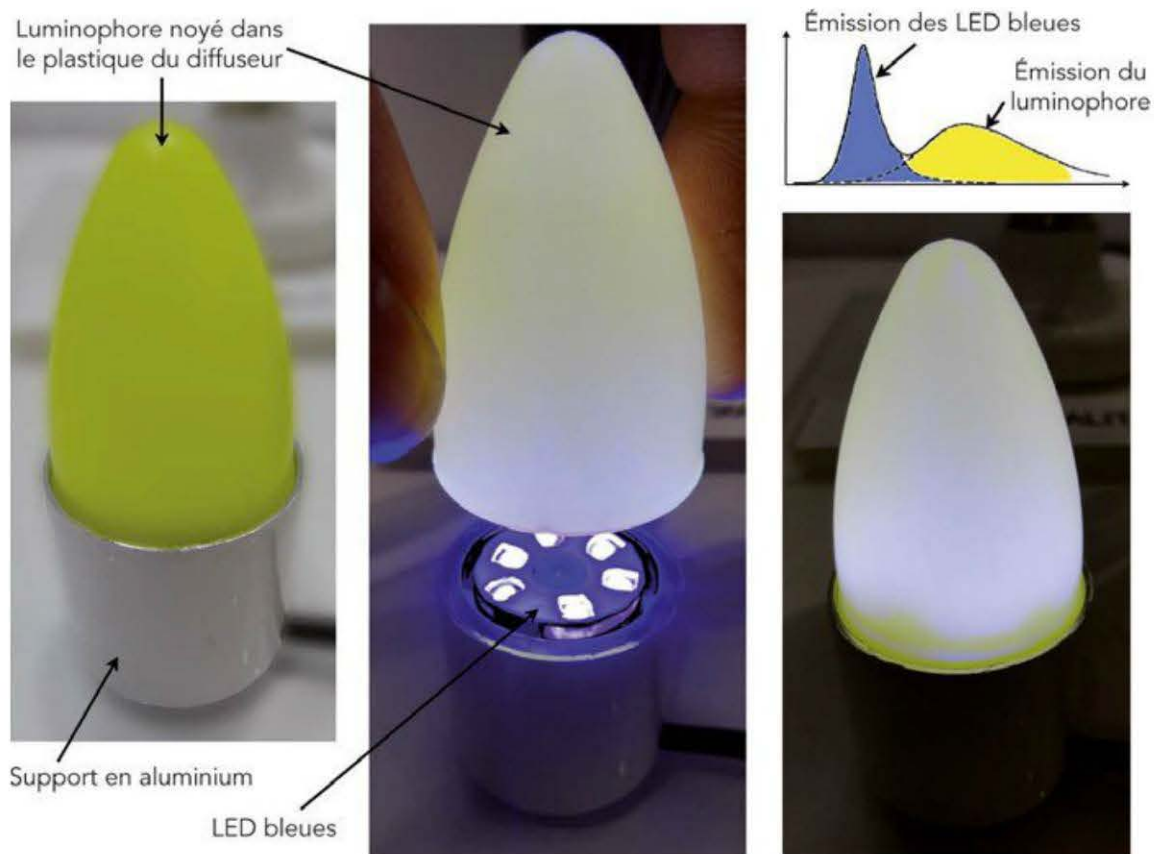


Figure 10.18 – Lampe à LED (*remote phosphore*).

Cette technologie (COB) mise en œuvre avec de nouvelles méthodes et de nouveaux moyens (notamment des puces semi-conductrices ayant de bien meilleur rendement), a abouti à des produits imitant les lampes à incandescence traditionnelles. En Europe et particulièrement en France, les lampes à incandescence (à filament) non seulement font partie d'une certaine histoire et habitude depuis des dizaines d'années, mais c'est aussi un produit fabriqué sur place, avec des problématiques sociales dès lors que leur interdiction est actée. Ainsi, sont apparues sur le marché des lampes à LED à filament (figure 10.19 b) intégrant des puces semi-conductrices les unes à la suite des autres sur de fins supports (de 1 à 2 mm de large sur 30 à 40 mm de long). Ce type de lampe tout récent présente une problématique évidente : la dissipation thermique. En effet, la chaleur dégagée par les puces semi-conductrices positionnées sur les supports étroits se dissipe essentiellement par l'intermédiaire de ces mêmes supports, et une faible partie s'évacue par convection libre. Néanmoins, non seulement nous trouvons des produits atteignant et dépassant des rendements de 80 à 90 lm/W pour des blanc chauds (2700-3000 K), mais en plus, les flux proposés sont suffisants pour « commencer » à proposer ces produits en tant que lampes d'éclairage. Ces performances atteintes, malgré une contrainte dimensionnelle importante, impactant la dissipation thermique, sont possibles grâce aux énormes

progrès de l'efficacité des semi-conducteurs d'une part, et, d'autre part, de l'absence de convertisseurs de la tension secteur en basse tension (entre 15 et 25 % de pertes supplémentaires en général).



Figure 10.19 – Lampe à incandescence (a) et lampe à LED à filament (b).

Le cas particulier des luminaires de type « down light » est à noter car cette application a été mise de côté dans un premier temps, même si des acteurs comme Permlight (en 2004-2005) développèrent des solutions mettant en œuvre les premières LED de puissance d'Osram (« Golden Dragon »). Puis courant 2012-2013, des premières versions ont permis de rivaliser avec la technologie utilisant les lampes fluo-compactes de 18 W, elles-mêmes de qualité peu satisfaisante, parfois avec des durées de vie de moins de 6000-8000 h. Ces down-light ont d'abord été trop chers pour se développer avec des prix autour de 40 à 50 € (pour des produits de qualité), puis ils ont pu être fabriqués et mis en vente aux professionnels d'abord, à moins de 20 €HT courant 2014 suivant les modèles. La RATP a contribué de façon importante à promouvoir la technologie LED à travers ses programmes de remplacement de sources lumineuses traditionnelles par la technologie LED courant 2012-2013, et nous avons vu apparaître des éclairages à LED de type down-light dans les stations de métro (figure 10.20).

Puis, grâce aux modules LED complets et au développement de la technologie de luminophore déporté, ce type de luminaire s'est développé.

Ces modules LED (figure 10.21) ont ouvert la porte à des intégrateurs issus du monde de la mécanique/tôlerie, capables de réaliser un ensemble mécanique de bonne qualité sans connaissances électroniques approfondies, et capables d'intégrer ces modules avec des alimentations le plus souvent déportées.

La technologie de luminophore déportée (figure 10.22) a permis de limiter les problématiques d'éblouissement car la surface émettrice passe d'un point lumineux (ou de plusieurs points lumineux) à une surface de plusieurs cm².



Figure 10.20 – Éclairage de type down light (encastré de plafond – métro parisien).



Figure 10.21 – Down light utilisant un module LED (a = Thorn, b = CREE).



Figure 10.22 – Down light utilisant un module LED à luminophore déporté (Philips).

À partir de 2011 pour les éclairages intérieurs, la demande en tube à LED de 60 cm, 120 cm et même 150 cm s'est accentuée, et cela a permis l'accélération du développement de ces produits, destinés à remplacer en lieu et place, les tubes fluorescents traditionnels (figure 10.23).

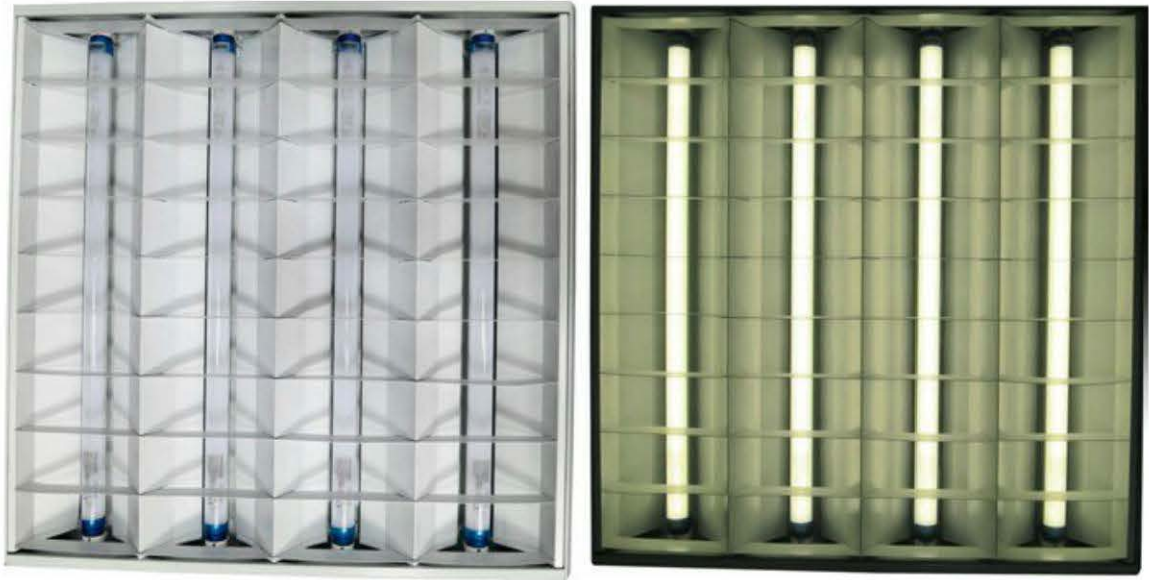


Figure 10.23 – Tubes à LED 60 cm intégrés dans une dalle de type 600x600 (campagne de test ADEME 2013-2014).

Une des raisons du déploiement des tubes à LED, c'est la durée de vie proposée par les fabricants qui est 2 à 3 fois supérieure à celle de la technologie fluorescente. Toutefois, les performances courant 2011-2012 ne sont pas tout le temps au rendez-vous, et ne rivalisent pas toujours avec un tube fluorescent de 120 cm de type T8, qui consomme 36 W pour près de 2800-3000 lumens en blanc chaud 3000 K, et qui coûte à l'unité entre 4 € et 8 €.

Fin des années 2014, les rendements ont été considérablement augmentés (tableau 10.1), et les tubes à LED présentent non seulement des performances lumineuses intéressantes avec des qualités spectrales d'un bon niveau, mais la géométrie des tubes a également été améliorée. En effet, la directivité trop importante qui leur était reprochée (éclairage trop focalisé) a été corrigée par de nombreux fabricants, en proposant des diffuseurs capables d'émettre de la lumière au-delà de 180°, avec une forme de faisceau très intéressante. Ainsi, l'intégration des tubes à LED dans des luminaires initialement prévus pour des tubes fluorescents (avec une émission sur 360°) a été possible dans certains cas de figure.

10.11 Éclairage pour les voitures

FABRICANT de Tubes - Référence	Taille tube (cm)	Puissance (W)	PF	THD (%)	Flux (lm)	Efficacité (lm/W)	CCT (K)	IRC
K... / ...	60	11,3	0,52	79	715	63	3857	80
K... / ...	120	20,1	0,51	81,2	1405	70	3876	81
L... / ...	60	9,9	0,97	12,9	941	95	3848	85
L... / ...	120	19,575	0,96	14,2	1794	92	3831	86
L... / ...	150	28,7	0,98	12,6	2679	93	3853	86
L... / ...	60	9,8	0,95	10,9	915	93	4056	84
L... / ...	120	19,9	0,95	4,3	2115	88	4085	84
L... / ...	150	28,2	0,94	9,2	2960	87	4105	85
N... / ...	60	9,8	0,85	35,5	945	96	4122	84
N... / ...	120	19,3	0,9	35,6	1860	96	4145	84
N... / ...	120	23,2	0,88	41	2475	107	4068	82
N... / ...	150	26,4	0,88	40,3	2945	80	3954	83
N... / ...	150	25,4	0,89	35,4	2605	102	3986	83
O... / ...	60	9,88	0,9	15,4	1080	116	4065	85
O... / ...	120	18,1	0,96	16,6	1815	108	3866	83
O... / ...	150	23,3	0,95	15,7	2040	87	3853	83
P... / ...	60	13	0,93	16,7	1135	102	3942	83
P... / ...	120	23,4	0,95	13,8	2100	98	3877	82
P... / ...	150	23	0,96	13,6	2960	85	3902	80
S... / ...	60	8,49	0,89	22,2	885	104	3938	85
S... / ...	60	8,4	0,9	18,7	885	105	3938	85
S... / ...	120	17,7	0,91	23,9	2080	118	4005	86
S... / ...	120	17,9	0,91	23,5	2080	116	4005	86
S... / ...	150	20,5	0,93	22,9	2130	103	3963	84
S... / ...	150	20,4	0,9	18,7	2080	116	4000	86

Tableau.10.1 – Extrait de l'étude ADEME sur les performances des tubes à LED disponibles en France en 2013-2014 (tests réalisés par Led Engineering Development).

Il faut tout de même noter que ces luminaires, souvent équipés de réflecteurs, n'ayant pas été conçus pour recevoir des tubes d'émissions lumineuses, très différentes d'un modèle à l'autre, les photométries résultantes varient, alors qu'une utilisation de tubes fluorescents même de marques différentes, permettait de conserver indépendante la photométrie du luminaire dans tous les cas de figure.

10.11 Éclairage pour les voitures

Depuis la fin des années 1990, les LED envahissent des habitacles des véhicules. D'abord comme simples voyants lumineux, puis comme rétro-éclairage (compteur de la Volkswagen, modèle Passat en 1999), ou comme troisième feu stop. Les applications d'éclairage sont restées au niveau du concept jusqu'au milieu des années 2000 quand le fabricant de voiture Audi a développé un feu avant avec un design très particulier en forme de sourcil. Les feux arrière ainsi que les répétiteurs ont été rapidement fabriqués à partir de LED sur les modèles haut de gamme des principaux constructeurs (allemands notamment). Puis se sont enchaînés respectivement les

feux diurnes (figure 10.24), l'éclairage intérieur des habitacles (éclairage d'ambiance de type ambre, ou liseuses passagers) et les éclairages d'accentuation (au niveau des poignées de porte par exemple).



Figure 10.24 – Éclairages de véhicule (Peugeot Modèle 508 de 2012).

Les feux avant et arrière des voitures sont devenus de véritables signatures pour les différents constructeurs. Les normes automobiles n'ont pratiquement pas évoluées, laissant libre cours aux « designs lumineux ». Dans les années 2013-2014, les feux diurnes, de formes et de puissances différentes (figure 10.25) se sont ainsi développés. Il est incontestable que la visibilité de jour a été grandement améliorée grâce à ces feux diurnes, même si les constructeurs ont d'abord et avant tout mis en œuvre ces « artifices » pour apporter aux formes et aux couleurs des véhicules, un complément de lumineux.

Les feux arrière ont également mobilisés les designers des constructeurs automobiles, et les linéaires de LED comme troisième feu stop dans les années 1990 ont laissé la place à des formes géométriques étonnantes, parfois par l'intermédiaire de guides lumineux donnant une impression de surlignage des formes mécaniques elles-mêmes (figure 10.26).

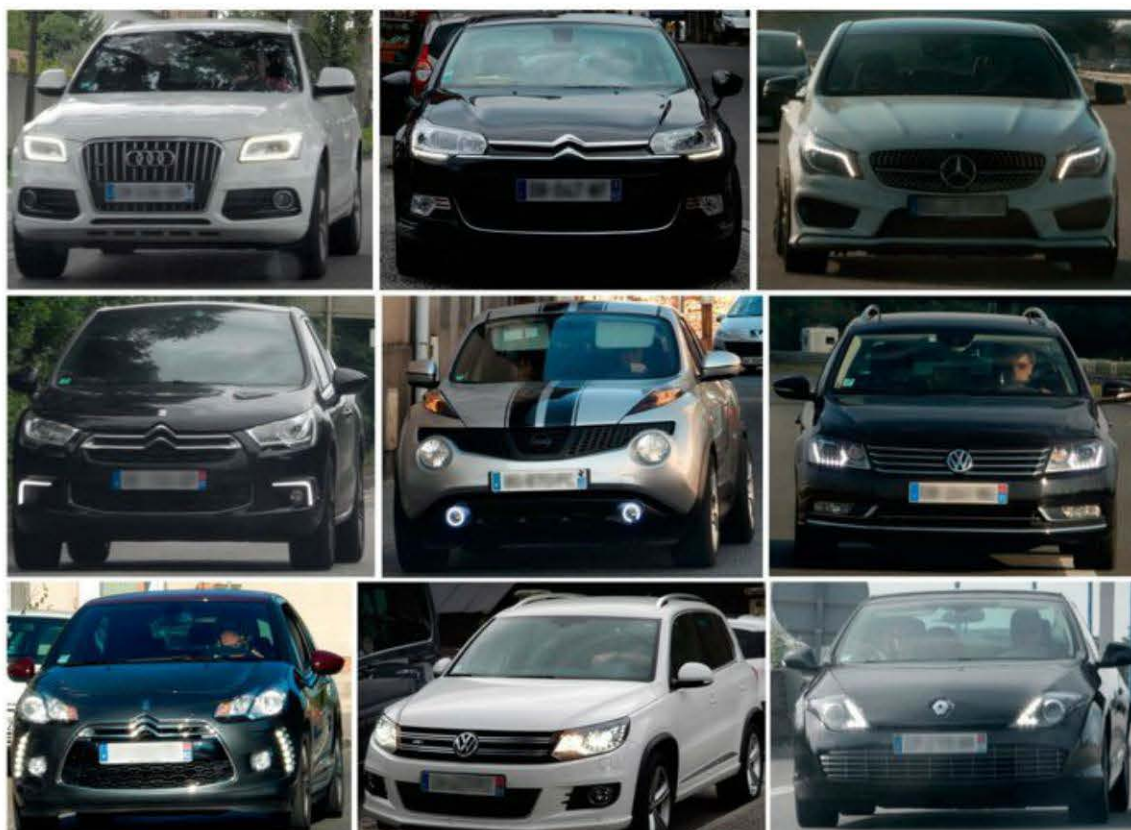


Figure 10.25 – Feux diurnes de véhicules (2013-2014).



Figure 10.26 – Feux arrière de véhicules (2013-2014).

10.12 Éclairage dans les transports en commun

Les transports en commun aussi ont bénéficié des éclairages à LED (figure 10.27), que ce soit au même titre que les véhicules individuels pour les feux de signalisation arrière (feux stop essentiellement) mais également pour les applications de panneaux d'affichage lumineux. Dans le premier cas, il s'agit de LED directives

(souvent traversantes de type piranha) et pour les applications d'affichage devant avoir une visibilité importante sous des angles très larges il s'agit plutôt de LED CMS avec des angles d'émission de 120 à 140°. Avant l'emploi de cette technologie CMS, les applications d'affichage mettaient en œuvre des LED traversantes (de type 5 mm) dont le faisceau lumineux avait une forme ovale, permettant de pallier leur faible angle d'émission.



Figure 10.27 – Éclairages de bus (Paris).

Trois des principales caractéristiques des LED sont très prisées lorsqu'il s'agit d'embarquer de l'éclairage au sein de moyens de transport aérien : le poids, le rendement et le fonctionnement en basse tension. De plus, si l'application est destinée à l'éclairage individuel des passagers (figures 10.28 a et b), le fait de pouvoir focaliser le faisceau lumineux des LED plus facilement que celui d'autres sources est un avantage conséquent. Les lampes initialement en halogène d'une puissance de 5 à 12 W ont été remplacées par des LED de puissance alimentées autour de 500 à 800 mA qui fournissent un éclairage équivalent voire meilleur en termes de flux, et légèrement plus froid en termes de colorimétrie. La fin des années 2000 a vu naître ce type d'éclairage et avec l'amélioration du rendu de couleur des LED, il a été possible d'utiliser des LED produisant un blanc de type neutre (entre 3 500 et 5 000 K).

Dans ces applications de transport, nous ne sommes pas soumis comme c'est le cas en éclairage intérieur de bâtiments, à des règles strictes de niveaux d'éclairement (par exemple 500 lux sur une table de travail). Cela laisse la possibilité de proposer une fonctionnalité sans pour autant qu'elle ne devienne trop coûteuse et cela ouvre de nombreuses perspectives aux LED, même utilisées en faible nombre (figure 10.28).

Enfin, la technologie LED ouvre de nouvelles perspectives en termes de « bien-être » dans les transports, en particulier en avion lors de long parcours (figure 10.29). Lorsqu'un long courrier démarre en début de soirée de l'Europe vers l'Asie (par exemple d'Amsterdam vers Taipei), il arrive en Asie au début d'après-midi (vers

10.12 Éclairage dans les transports en commun

14 h), et le décalage horaire est alors important. Pour le retour, il mettra plus ou moins le même temps de vol, mais s'il part en fin de soirée (vers 23 h), il arrivera tôt le matin en Europe (vers 7 h) et dans ce cas, il n'y a pratiquement pas de décalage horaire sous réserve que les passagers dorment tout au long du parcours. Ainsi, pour mieux lutter contre ce décalage horaire, les fabricants d'avions ont mis au point des éclairages adaptatifs, qui reconstituent quelque peu les caractéristiques d'une lumière naturelle en fonction de l'heure de la journée.

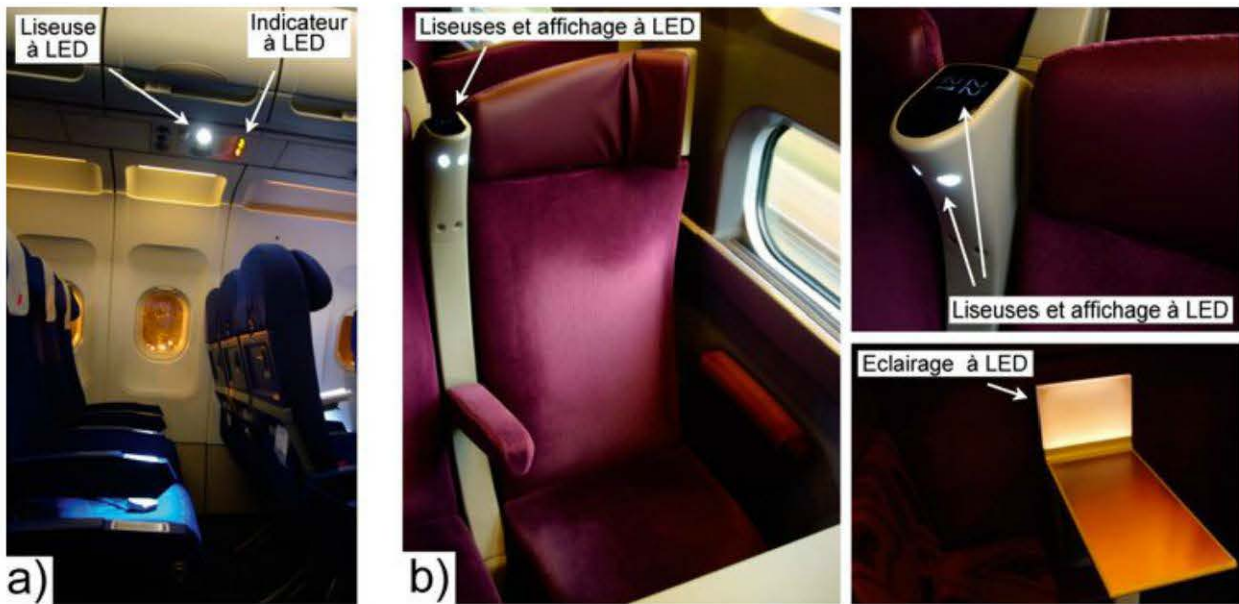


Figure 10.28 – Liseuse à LED Airbus – A320 (a), liseuse SNCF-TGV (b).

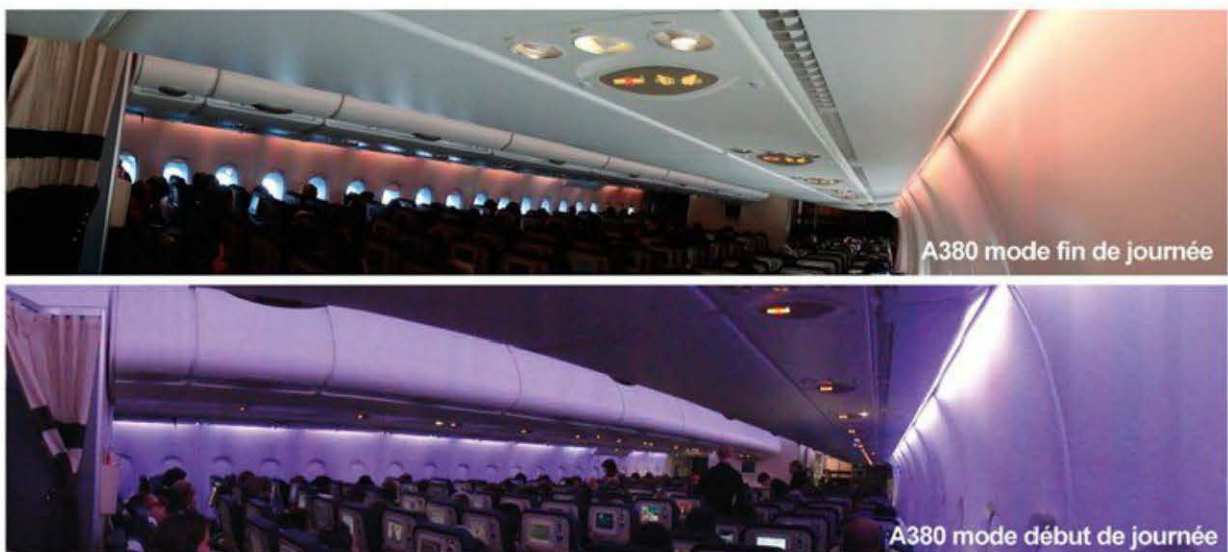


Figure 10.29 – Éclairage A380 pour différentes heures de la journée.

10.13 Éclairage de machines-outils

Il faut considérer dans ce domaine deux applications bien distinctes : l'éclairage machine (figure 10.30) et l'éclairage opérateur.

Dans le premier cas, le type de lumière peut être très différent suivant les situations car le capteur n'est pas l'œil mais une caméra. De ce fait, que se soit en termes de colorimétrie (spectre de la source), de flux lumineux (des éclairagements de 10 000 à plus de 150 000 lux peuvent être requis), de focalisation et de contraste (des barrières lumineuses nécessitent parfois des coupures franches du faisceau lumineux, avec un fort contraste entre la partie éclairée et la partie non éclairée) et enfin de fréquence d'allumage (les capteurs ont des temps de réponse tous différents), les LED offrent un large choix de solutions. De plus, l'environnement dans lequel se trouvent les systèmes de vision peut être sévère à cause de la chaleur ou de l'humidité, voire des deux. Enfin, les dispositifs de vision industrielle sont intégrés sur des machines fonctionnant souvent 24h/24, et auraient un impact important sur les coûts de production s'ils venaient à s'arrêter.

Depuis le début des années 2000, l'emploi de LED robustes, à des courants de pilotage « raisonnables », permet de satisfaire la plupart des critères (performances et fiabilité) requis dans ce domaine. Les récentes améliorations des performances des LED notamment en termes de rendement, ont permis de proposer des systèmes encore plus robustes et pouvant fonctionner à des températures plus élevées qu'auparavant (échauffement de la jonction moins important à flux identique).

Un éclairage dédié à la vision humaine fera appel à des LED blanches avec des éclairagements de quelques lux (LED de puissance intermédiaire), jusqu'à rarement plus de 1500 lux (où les LED de puissance interviennent alors). L'apport des LED a été de proposer des éclairages plus précis et plus fiables, mais elles ne se sont répandues de façon importante que vers la fin des années 2010.



Figure 10.30 – Éclairage linéaire en vision industrielle (advanced-Tech modèle LL3024).

10.14 Éclairages décoratifs

Très tôt (dans les années 1990), les éclairages à LED avaient investi le domaine de la décoration au travers des éclairages de Noël par exemple, remplaçant les guirlandes lumineuses à lampes à incandescence (dangereuses et à l'origine de démarrages de feux de maison) par des LED, et proposant des objets lumineux de grandes tailles en intérieur comme en extérieur (figure 10.31), puisque la mise en œuvre de la technologie LED dans ces cas-là peut se faire moyennant des structures mécaniques légères et peu coûteuses.



Figure 10.31 – Éclairage de décoration intérieur et extérieur.

Ce type d'éclairage a ensuite été utilisé sur les bâtiments, d'une part pour les mettre en valeur, et d'autre part pour réaliser de l'éclairage fonctionnel, soit pour afficher des publicités, soit pour matérialiser une entrée de commerce ou d'hôtel (figure 10.32). Ces éclairages permettent également de participer à l'éclairage de la chaussée et des trottoirs, assurant une certaine sécurité en ne laissant pas de zones dans l'obscurité.



Figure 10.32 – Éclairage de bâtiments.

Des candélabres habituellement en éclairage blanc sont mis en œuvre et servent à la fois d'éclairage fonctionnel et de décoration dans les zones avec des restaurants (figure 10.33.a). Des enseignes lumineuses initialement en tube haute tension, font office d'éclairage d'ambiance pour des halls d'entrée de bâtiment ou bien de salles intérieures de spectacles (figure 10.33.b).



Figure 10.33 – Éclairage de décoration intérieur et extérieur.

10.15 Éclairages intérieurs industriels – Entrepôts

Cette application a de suite été investie par les LED car elle offre des possibilités de réalisation de luminaires intéressantes pour la technologie LED. En effet, bien que ce type de luminaire soit en hauteur et donc nécessite non seulement des flux lumineux importants, mais aussi d'être en mesure de fonctionner dans des températures ambiantes qui peuvent atteindre dans certains cas 40 à 50 °C (entrepôts sans isolations), il n'est pas limité dans les dimensions permettant ainsi aux fabricants de

dimensionner le dissipateur de façon optimisée. Les limites sont alors le poids (si le luminaire à vocation à être exporté) ainsi que des dimensions trop encombrantes, pour les mêmes raisons que le poids.

Ces luminaires ont pour la plupart été développés au départ (2008-2009) à partir de COB de grosse puissance (figure 10.34), souvent entre 40 et 100 W, surmontés de lentilles elles-aussi de grande dimension. Ces produits développés sur des bases de luminaires hébergeant initialement des lampes à décharge de 100 à 250 W, ont gardé pendant 3 à 4 années des bases de développement identiques (COB dans une grande vasque, surmontée d'un dissipateur en aluminium extrudé à ailettes longitudinales).



Figure 10.34 – Éclairage industriel grandes hauteurs (High bay).

Ils ont ensuite évolué pour devenir des produits plus compacts dans le courant des années 2013-2014, utilisant des dissipateurs plus petits, et proposant des photométries intéressantes sur une base non plus uniquement de COB de forte puissance (figure 10.35.a), mais plutôt de carte hébergeant un grand nombre de LED de puissance, surmontées de lentilles monoblocs (figure 10.35.b,c).



Figure 10.35 – Éclairage industriel grandes hauteurs – projecteurs COB ou intégrant des LED de puissance surmontées de lentilles monoblocs.

Le développement des LED intégrant des puces semi-conductrices de grandes dimensions ($> 2 \text{ mm}^2$) a contribué de façon importante au développement de ces applications à forts flux, souvent dans des ambiances thermiques contraignantes, pour lesquelles ce type de LED est tout à fait adapté (possédant une résistance thermique faible, une grande efficacité, robuste, acceptant des courants importants jusqu'à 2 à 3 A par LED).

10.16 Autres types d'éclairage

De nombreux autres domaines emploient des LED comme source lumineuse. Des applications comme les lampes de poches, les petits systèmes d'éclairage d'appoint ou encore les objets publicitaires emploient des millions de LED par mois.

De nombreux autres domaines utilisent des LED comme source lumineuse. Des applications comme les lampes de poches, les petits systèmes d'éclairage d'appoint ou encore les objets publicitaires consomment des millions de LED par mois.

Les LED utilisées sont souvent des LED de puissance intermédiaire, et leur qualité qui a fortement augmenté ces dernières années permet de proposer des produits avec des performances intéressantes à un faible coût. Prenons par exemple le cas des torches portatives (figure 10.36) qui ont assez souvent recours à des LED de puissance et sont capables de fonctionner avec une simple pile type AA pendant plusieurs heures (1,5 V sous 2000 mAh, avec un besoin de 1 W, permet d'éclairer pendant trois heures).

Des produits destinés à des éclairages d'appoint à l'intérieur des mobiliers de maison (placards), intègrent même des détecteurs de présence et proposent des flux lumineux de 100 à 200 lumens, suffisants pour ce type d'applications (figure 10.36 – images en bas à droite).

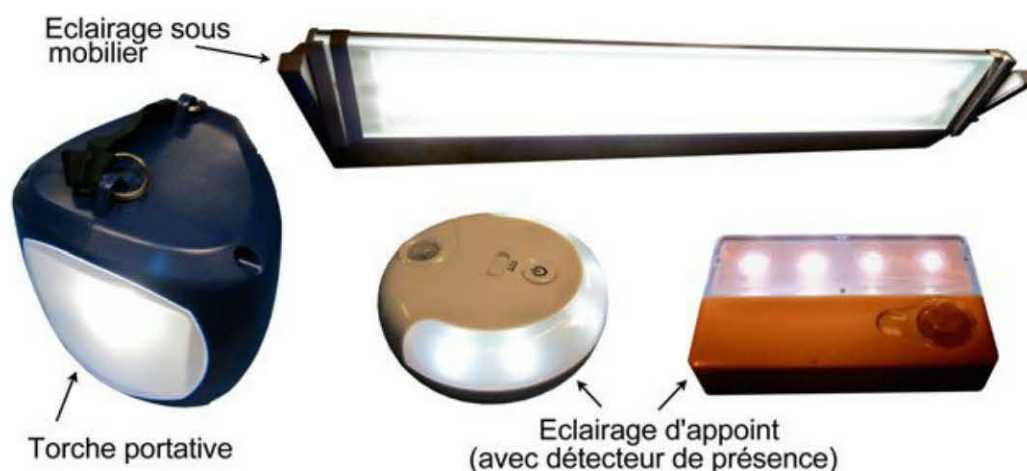


Figure 10.36 – Diverses applications d'éclairage à LED.

10.16 Autres types d'éclairage

D'autres applications, comme les feux de piscines, ont intégré depuis longtemps la technologie LED (figure 10.37-a), même si jusqu'au milieu des années 2000, les produits employant des lampes à incandescence de plusieurs centaines de watts et produisant jusqu'à 3500 lumens semblaient difficiles à concurrencer. À la fin des années 2000, les LED de puissance ont fait leur apparition de façon plus marquée dans ce domaine (figure 10.37-b), proposant des produits avec des flux lumineux dépassant pour certains d'entre eux les 2 500 lumens.

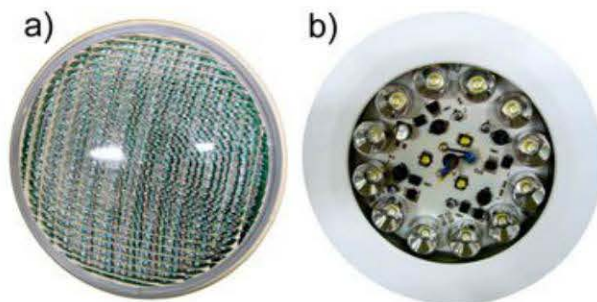


Figure 10.37 – Projecteur de piscine à LED.

L'emploi de réflecteurs complémentaires aux LED a permis de réaliser des projecteurs de piscine capables de fournir des faisceaux dont l'intensité est proche de celle des technologies plus conventionnelles de type halogène. Dès lors, avec la forte progression des performances des LED, ce domaine de l'éclairage de piscine a été envahi par les LED.

Les éclairages de sécurité que l'on peut considérer comme une application de signalisation et de balisage ont très tôt été développés à base de LED (dès le début des années 2000). Ces éclairages (figure 10.38) devant suivre des normes précises et touchant à la sécurité (évacuation lors de feu par exemple), ils impliquent des contraintes d'intégration des LED précises.



Figure 10.38 – Bloc autonome d'éclairage de sécurité (BAES).

Les distributeurs de boissons et de friandises en accès libre, ont été petit à petit équipés de systèmes d'éclairage à LED, proposant des éclairages plus homogènes de la vitrine, plus efficaces que les technologies fluorescentes car dans un environnement froid (autour de 5-7 °C), et plus compact pour les fabricants de ces distributeurs (figure 10.39). Les DAB (Distributeurs automatiques de billets) ont eux aussi intégré progressivement des éclairages à LED.



Figure 10.39 – Distributeurs de boissons, friandises et de billets.

Une autre application pour laquelle les LED ont apporté une contribution importante, ce sont les vitrines de bijouterie (figure 10.40). En effet, l'aspect compact des LED a permis une intégration de la lumière beaucoup plus discrète, le rendement jusqu'à 8 à 9 fois supérieur aux lampes à incandescence utilisées jusqu'à présent, a diminué fortement les problématiques de gestion thermique et de sécurité liées à cela. De plus, alors que dans de nombreux domaines l'aspect ponctuel et la forte brillance des LED est un véritable problème, là il se métamorphose en gros avantage, car l'éclairage à LED participe non seulement à la mise en valeur des bijoux et autres montres de luxe par des reflets et des scintillements, mais en plus la colorimétrie blanc froid donne des aspects « métalliques » à des surfaces brillantes ce qui attire l'œil un peu plus.

10.16 Autres types d'éclairage

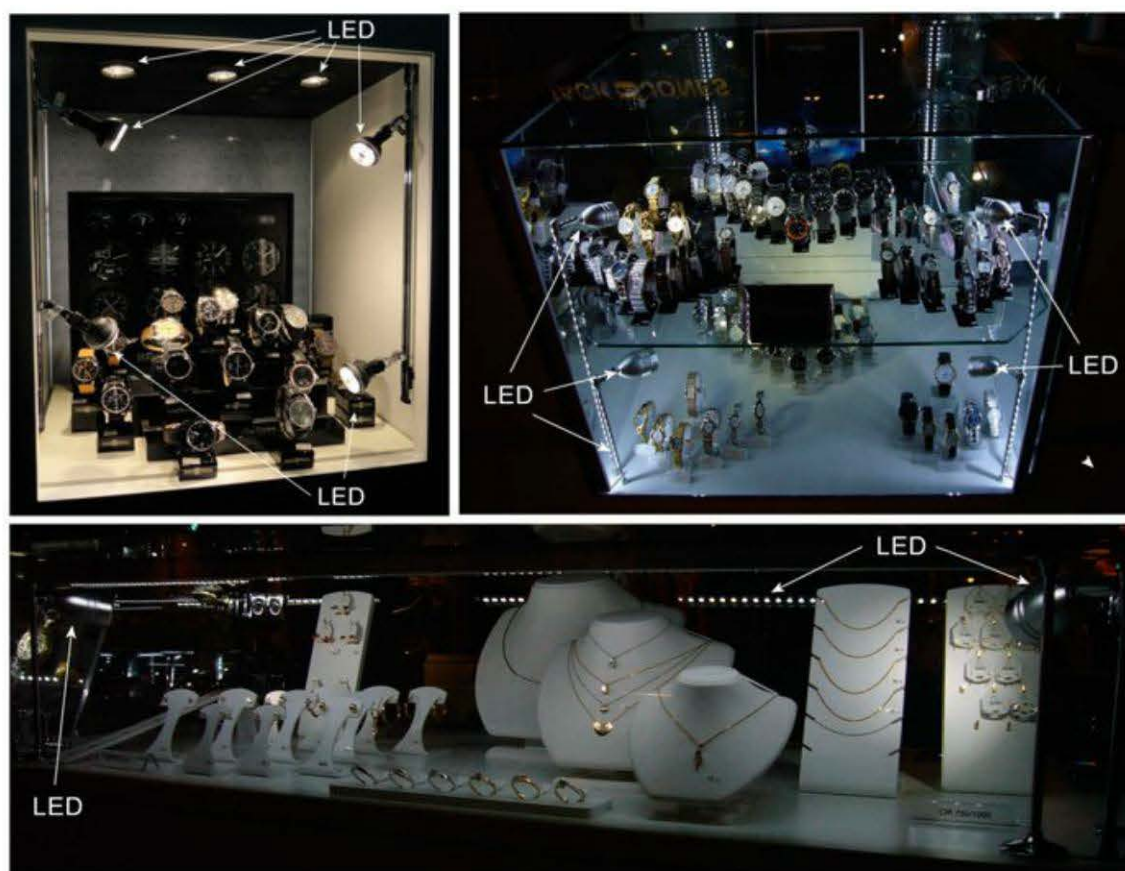


Figure 10.40 – Éclairage de vitrines de commerces.

Enfin, la capacité de la technologie LED à s'intégrer dans des endroits où toute autre technologie était proscrite, notamment du fait de leur fonctionnement à tension élevée avec peu de souplesse en termes de couleurs, de flux et de focalisation du faisceau lumineux, a ouvert le champ à des applications d'éclairage plus exotiques.



Figure 10.41 – Pommeau de douche à LED.

Ainsi, des cabines de douches se sont équipées de pommeaux à éclairage à LED basse tension, fonctionnant sur batterie (figure 10.41), ou encore des placards ou des tiroirs initialement non rétro-éclairés, peuvent recevoir de petits modules LED autonomes, fonctionnant sur piles ou batteries.

10.17 Maturité mais pas infaillibilité

La technologie LED est très efficace dans certains cas, moins dans d'autres, mais en aucune manière infaillible quel que soit le domaine. Il est important de rappeler ici qu'une LED est un composant complexe, sollicité de façon importante, supportant des températures toutes aussi importantes et qui dans bon nombre de cas est fiable. Néanmoins, utilisée dans de mauvaises conditions, sollicitée au-delà de ses limites raisonnables ou encore détournée de l'application initiale pour laquelle elle a été choisie, elle meurt prématurément et/ou ne fournit pas le service attendu.

L'objectif de ce paragraphe est de montrer que bien utilisées les LED permettent d'atteindre des performances très intéressantes, mais qu'il est possible également d'aboutir à un mauvais résultat si ses conditions d'intégration et/ou d'utilisation ne sont pas conformes aux préconisations.

Prenons comme premier exemple, celui d'une installation avec des luminaires encastrés de type dichroïque qui intègrent des LED de type 5 mm (figure 10.42) c'est-à-dire l'un des boîtiers qui permet le moins d'évacuer la chaleur. La nature du luminaire imposait qu'il soit encastré dans un faux plafond sans possibilité de refroidissement par convection naturelle. Cette application aurait requis des composants robustes, efficaces, capables de fonctionner à des températures comprises entre 35 et 45 °C, avec une durée de vie supérieure à 25 000 heures. Le choix du type de lampe à LED qui a été fait n'était donc pas adapté aux conditions dans lesquelles le luminaire à LED allait fonctionner. La figure 10.29 montre le résultat de l'installation au bout de moins de deux ans de fonctionnement (en moyenne 3 à 5 h/jour). Des dysfonctionnements ont été constatés sur plus de 95 % des luminaires installés.

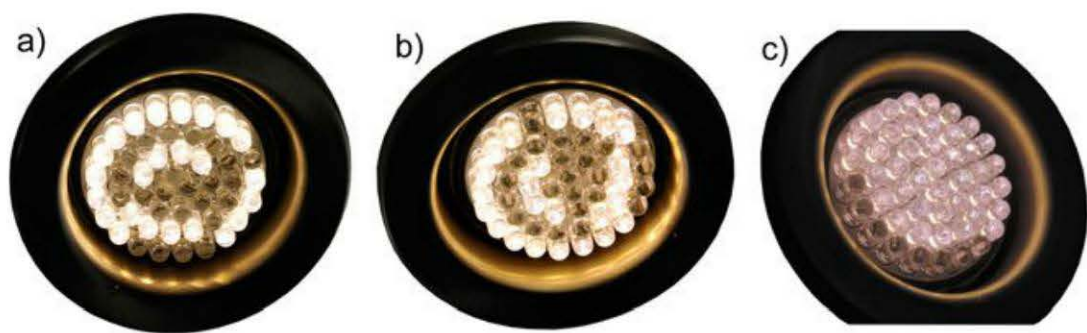


Figure 10.42 – Luminaires encastrés à LED type 5 mm.

Les luminaires encastrés a) et b) de la figure 10.42 possèdent près de 50 % de leur LED défectueuses. La méthode d'alimentation de ce type de lampe à LED se faisant par branches d'un certain nombre de LED en série, si l'une des LED meurt et « ouvre » le circuit de la branche dans laquelle elle est intégrée, toute la branche s'éteint (ici des branches de 8 LED en série). De plus, la qualité des LED n'est pas uniforme

10.17 Maturité mais pas infailibilité

notamment en termes de colorimétrie, ce que l'on constate entre les lampes à LED a) et b) de la figure 10.42 et la lampe à LED c) d'un blanc plus froid (plus bleuté).

Mais les problématiques de mortalité prématurées des composants ne concernent pas uniquement les produits d'éclairage de type spot directif, intégrant des LED de 5 mm. Effectivement, elles sont plus sensibles à la chaleur car (entre autres) n'ayant pas une grande capacité de dissipation de la chaleur qu'elles dégagent. Toutefois, si le système est bien dimensionné, nous pouvons compter sans trop de problème sur des spots à LED 5 mm ayant une durée de vie de 10 000 à 12 000h. Les récents développements de lampes directives (type « dichroïque ») intègrent des LED de puissance plus robustes que les LED 5 mm, mais connaissent aussi des défaillances (figure 10.43).

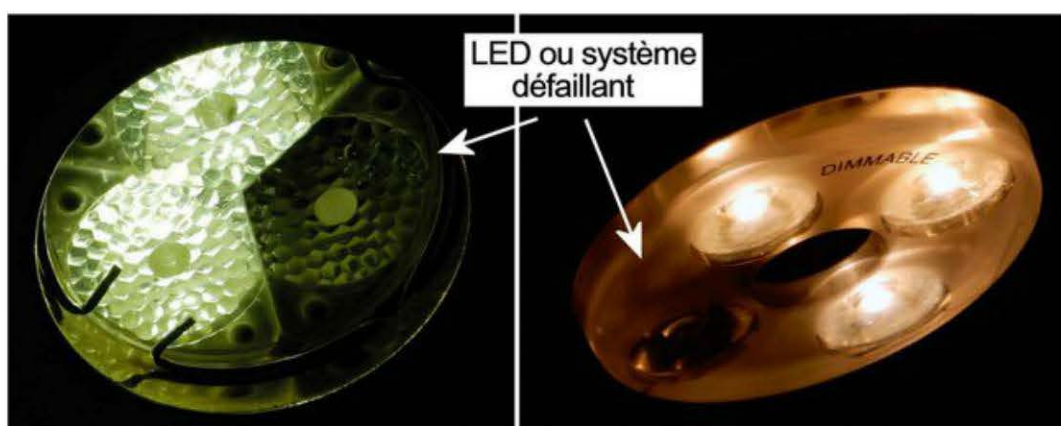


Figure 10.43 – Luminaires encastrés à LED de puissance.

Un second exemple, sur une application « plus sensible », concerne les feux de signalisation d'une locomotive (figure 10.44). Dans ce cas de figure les composants LED ont été sélectionnés sur des critères techniques très précis, avec des tris supplémentaires pour améliorer leur qualité et leur fiabilité. Le mode d'intégration ainsi que la qualité de l'alimentation ne peuvent pas être mis en cause en premier lieu car il s'agit normalement de développements électroniques de qualité, basé sur des systèmes robustes et fiables.



Figure 10.44 – Feux de signalisation de locomotive.

Toutefois, nous sommes en présence d'une défaillance prématurée d'une LED (*catastrophic failure*), qui peut avoir lieu y compris sur des composants d'excellente qualité. De façon générale, ces défaillances prématurées (pendant les premières 1000 à 2000 h) sont inférieures à 10 ppm (moins de 10 composants sur 1 million) sur les composants approvisionnés et il est très difficile de détecter ce mode de défaillance. L'origine de ce type de panne est variée et peut provenir d'un défaut de conception de la LED lors du processus de fabrication, d'une mauvaise qualité des matériaux de l'encapsulation de la LED ou encore d'un défaut de fabrication de la carte électronique.

Un autre exemple montre que la robustesse des LED n'est pas suffisante et que l'environnement proche des LED doit lui aussi être robuste pour en préserver le bon fonctionnement. Une alimentation mal dimensionnée (24 V au lieu de 12 V) crée une surchauffe importante de la carte électronique qui héberge les LED et fait fondre le boîtier plastique (figure 10.45). Sur un total de 100 modules détériorés, seule une dizaine de LED sont HS alors que toutes les régulations ont fini par lâcher.



Figure 10.45 – Modules LED avant (a) et après (b) sur tension.

Dans un premier temps, l'électronique de régulation a limité le courant injecté dans les LED en absorbant le surplus de puissance envoyé aux modules (ce qui a fait fondre les boîtiers). Ce fort échauffement est à l'origine de la défaillance de la dizaine de LED hors service sur un total de plus de 200 composants.

Les applications d'affichage extérieur (hors écran) et de signalétique ont été parmi les premières applications à intégrer des LED, pour une raison essentielle : les LED devaient être vues et n'avaient pas pour objectif d'éclairer, donc la brillance et la directivité des LED de type 5 mm constituaient un atout majeur que les autres technologies ne possédaient pas. Les premiers développements se sont faits avec les feux tricolores dans les années 1980-1990, puis dans les années 2000, les affichages ont évolué en intégrant des LED blanches. Mais malgré près de 20 ans d'utilisation de la

10.17 Maturité mais pas infailibilité

technologie LED dans ce type d'applications, on trouve encore des fabricants de ce type d'affichage qui ont mal dimensionné leurs systèmes, en particulier d'un point de vue thermique et de dimensionnement des composants utilisés (LED et autres composants électroniques), et l'on trouve trop souvent des affichages de qualité médiocre au bout de 2 à 3 années seulement, alors qu'ils devraient être fabriqués pour durer plus de 10 à 15 ans.



Figure 10.46 – Affichage des prix d'une station-service.

Non seulement certaines parties de l'affichage sont éteintes tandis que d'autres sont trop brillantes (figure 10.46.a), mais de plus, un œil averti s'apercevrait que les teintes de blanc qui ont été choisies pour l'application (figure 10.46.b) sont différentes et/ou présagent que les composants (LED) ne fonctionnent pas dans leur plage optimale et vont très certainement mourir prématurément.

Dans le même registre, dès lors que les applications sont soumises à de fortes contraintes thermiques comme en extérieur, les produits d'éclairage ou de signalétique doivent être particulièrement robustes. Cependant, pour des raisons économiques, par méconnaissance des performances des LED (modèles et gestion thermique), il arrive souvent que des composants connaissent des défaillances (figure 10.47), et cela impacte l'enseigne lumineuse ainsi que l'image de marque du commerce qu'elle représente.

Ces applications d'affichages extérieurs n'ont aucune répercussion en termes de sécurité, ce qui n'est pas le cas pour les feux de signalisation routière, qui sont soumis à des règles strictes (suivant les pays), non seulement avec des niveaux d'intensité à respecter, mais également des homogénéités de la surface lumineuse. Si un feu tricolore décroît en termes d'intensité, et qui plus est, si cette décroissance est due à la baisse du flux des LED au fil du temps, couplées à une avarie sur une ou plusieurs LED, non seulement la perception du feu par l'automobiliste est réduite, mais en plus elle est déformée (figure 10.48).



Figure 10.47 – Enseigne lumineuse utilisant des LED de type 5 mm.

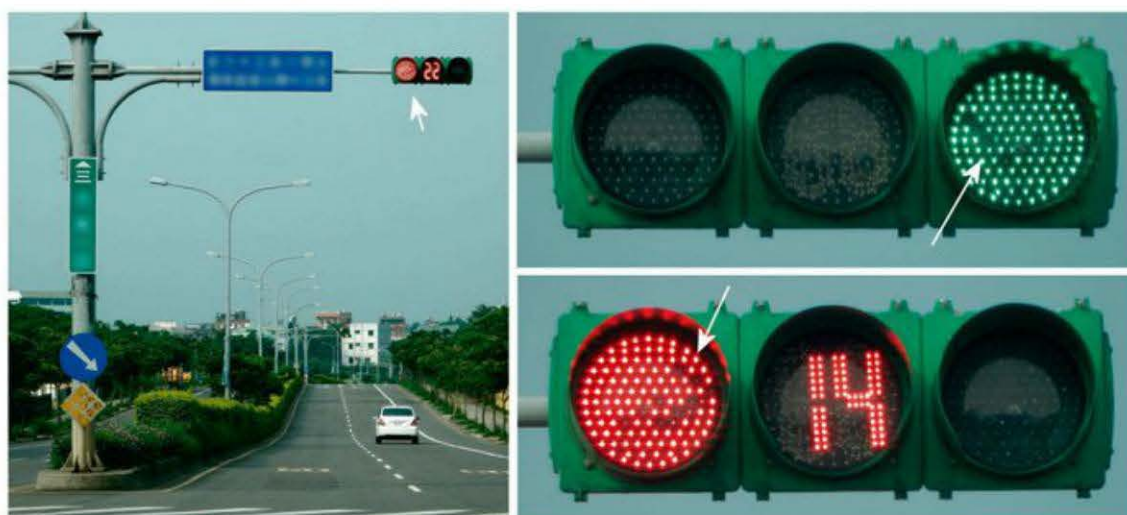


Figure 10.48 – Feux de signalisation routière ayant des LED défaillantes.

11

Évolutions récentes des technologies LED

En à peine une vingtaine d'années les LED blanches sont passées du stade du prototype à celui de la production de masse pour une large gamme d'applications. Et demain ? Ce chapitre trace les perspectives ouvertes par les recherches en cours à la fois sur les substrats, les luminophores, les géométries des puces ou les méthodes d'alimentation.

Les premières LED blanches à 15 lm/W dans des blancs froids (supérieurs à 7 000 K) annoncées au début des années 2000 semblent bien loin maintenant. Dix ans plus tard, des valeurs sept à huit fois supérieures ont été atteintes, avec des colorimétries acceptables y compris pour des applications d'éclairage extérieur. Les récents développements validés sur des produits en laboratoires ont permis d'atteindre en 2015 des rendements de LED supérieurs à 150 lm/W, fournissant de 130 à 170 lm par composant (pour des LED de puissance pilotée entre 350 et 400 mA), dans des colorimétries avec d'excellents rendus de couleur.

Les améliorations ne se sont pas faites les unes après les autres, mais très souvent de front et provenant parfois de plusieurs fabricants à la fois. Il est donc difficile de les relier chronologiquement. Dans ce chapitre nous rappellerons brièvement les technologies passées pour décrire celles récemment mises en œuvre ou sur le point de l'être.

11.1 Amélioration de la puce semi-conductrice et du substrat

11.1.1 Taille des puces semi-conductrices

Les processus de fabrication des *wafers* (« galette » composée de silicium et de couches de matériaux dopés) se sont améliorés et permettent de réaliser des LED avec des puces semi-conductrices de plus en plus grandes, acceptant des courants de plus en plus élevés tout en maintenant un bon rendement. Les modèles de basse

et moyenne puissance ont eux aussi bénéficié de ces améliorations (courant 2013-2014). Il a été possible à surface identique (entre 250 et 500 μm de côté), de baisser considérablement les prix pour proposer des LED fournissant 25 à 50 lumens avec des rendements proches de 130 lm/W, à moins de 10 centimes de dollar l'unité pour des commandes de plusieurs centaines de milliers de pièces.

Courant 2009, on entrevoit les « limites » des générations de LED blanches de type « 1 mm^2 » (qui ont en réalité 900 μm de côté). De nouveaux composants intègrent des puces de plus grosse taille (autour de 2 mm^2) qui permettent d'atteindre des courants d'alimentation jusqu'à 1,5 A par LED (figure 11.1).

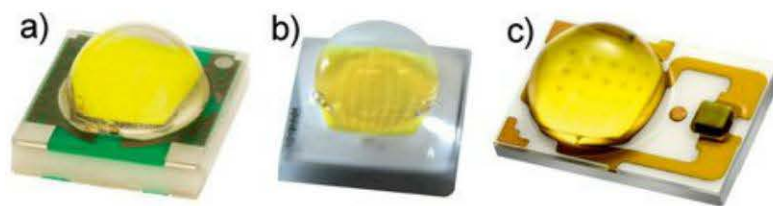


Figure 11.1 – LED intégrant une puce semi-conductrice de 2 mm^2
(a = CREE ; b = Osram ; c = Philips Lumileds).

Parmi les premiers à lancer ce type de LED, on retrouve Philips Lumileds et CREE (respectivement avec les modèles Rebel ES et XP-G), puis deux ans plus tard Osram qui propose à son tour le modèle Oslon Square. En 2015, des rendements supérieurs à 120-140 lm/W, y compris en blancs chauds (autour de 3 000 K), sont désormais possibles, à moins de 1 \$ l'unité. Les angles d'émission de ces LED sont relativement importants (supérieurs à 110 °).

11.1.2 Géométrie des puces semi-conductrices

Les formes parallélépipédiques des semi-conducteurs avaient laissé place à des pyramides de forme tronconique inversée dans certains cas (figure 11.2), mais pour la grande majorité des LED, la forme de la puce est restée de section carrée (ou rectangulaire pour les LED de basse et moyenne puissance), essentiellement en raison des processus de fabrication.

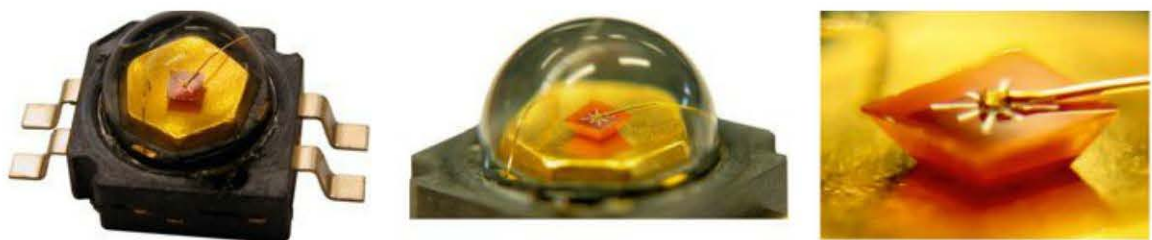


Figure 11.2 – Forme de pyramide inversée du semi-conducteur (Philips Lumileds).

11.1 Amélioration de la puce semi-conductrice et du substrat

Une autre amélioration apparue dès 2008 dans le domaine de la géométrie consiste à réaliser une découpe des arrêtes de la structure cubique du saphir surmontant la puce de type *flip chip*. Le gain est important en termes d'extraction lumineuse et la forme de l'émission de la LED est modifiée.

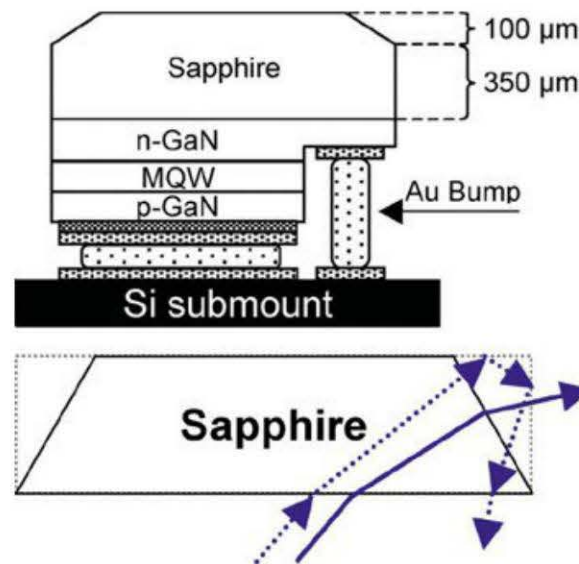


Figure 11.3 – Découpe des arrêtes d'une puce semi-conductrice de type *flip chip* (IEEE, vol. 20 n° 3).

Le fabricant Nichia a annoncé en 2010 avoir atteint des rendements proches de 250 lm/W [44], en mettant en œuvre une nouvelle méthode de fabrication du substrat saphir qu'il utilise pour la fabrication de ses LED (figure 11.4).

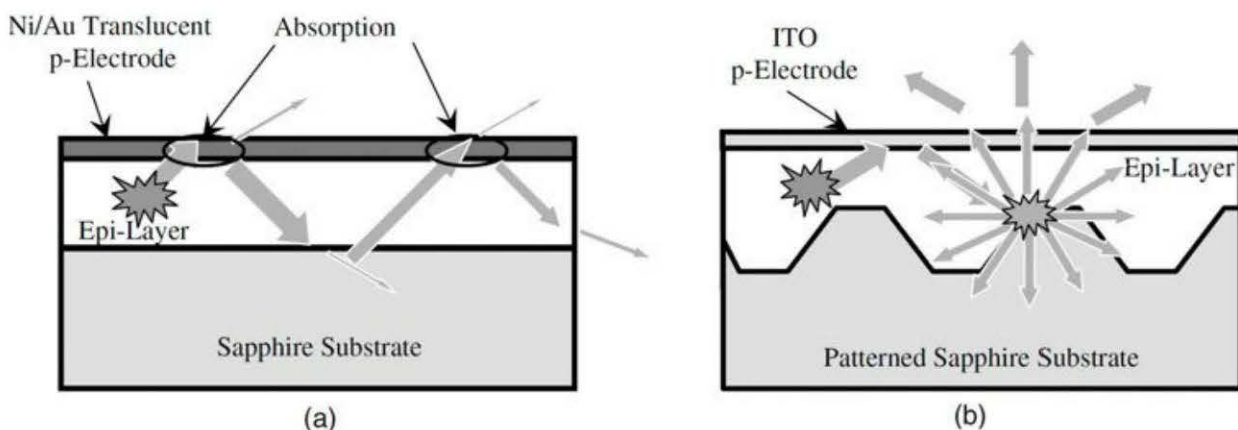


Figure 11.4 – Substrat saphir en forme conique (Nichia).

D'autres développements sont en cours ou encore au stade d'expérimentation en laboratoire, comme des formes de semi-conducteur triangulaires ou hexagonales

(figure 11.5), ce qui nous porte à anticiper une amélioration supplémentaire de ce côté-là dans les années à venir.

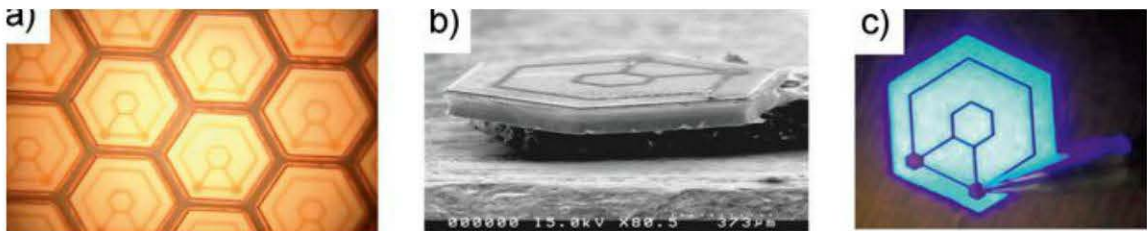


Figure 11.5 – Puce de forme hexagonale (Verticale Inc – Led Professional).

11.1.3 Nouveaux matériaux pour les puces semi-conductrices

Les grandes tendances dans ce domaine sont mises en œuvre et validées sur des composants depuis plusieurs années maintenant. Les types de dopants et le choix des matériaux hôtes n'ont pas beaucoup changé mis à part quelques particularités qui n'ont pas apporté de réelles ruptures technologiques.

Des recherches sont toutefois à noter dans le domaine de l'amélioration des électrodes transparentes, nécessaires au passage du courant tout en assurant une bonne extraction de la lumière. Cette fonction est assurée en grande partie par de l'ITO (*indium tin oxide*) qui contient de l'indium, que l'on cherche à utiliser dans les quantités les plus basses possibles en raison de sa rareté. Le professeur Bo Hyunkong [28] de l'université de Sungkyunkwan en Corée a démontré en décembre 2010 que l'utilisation de ZnO pour la mise en œuvre de ces électrodes pouvait améliorer l'extraction de lumière et éviter l'utilisation d'ITO.

Dans un autre domaine, depuis début 2007, la problématique du *green gap* du cristal GaN que l'on fait croître suivant un plan cristallographique de type C de façon générale, semble pouvoir être résolue en développant des nouveaux cristaux dits « non polaires » (figure 11.6).

La société Sora, fondée par le professeur Shuji Nakamura, Steven DenBaars et James Speck de l'université de Santa Barbara, travaille depuis 2008 à la mise en œuvre de semi-conducteurs GaN de type « non polaire » ou « semi polaire », utilisant du GaN comme substrat plutôt que le saphir ou le carbure de silicium habituellement employés. Des produits (lampe de type dichroïque) démontrent la qualité de cette technologie qui se développe de plus en plus.

11.1 Amélioration de la puce semi-conductrice et du substrat

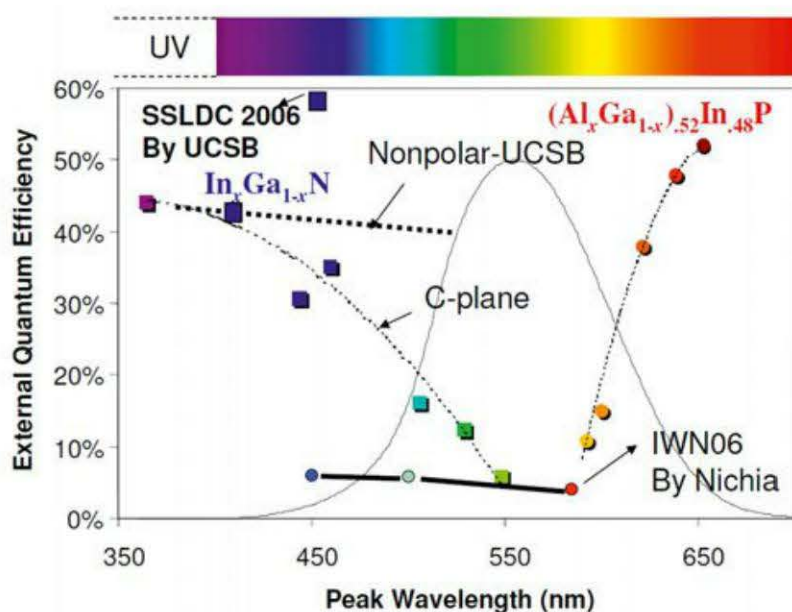


Figure 11.6 – Efficacité quantique de différentes technologies de cristaux de semi-conducteurs – Nakamura (2007).

11.1.4 Nouveaux substrats

Les substrats largement utilisés par les fabricants sont essentiellement en saphir et carbure de silicium. De plus en plus de sociétés s'orientent vers les substrats de silicium, comme le fabricant taïwanais Epistar, précédé de TSMC (toujours à Taïwan).

Début 2012, Osram développe sa technologie UX:3 (figure 11.7), à base également de silicium, et obtient des rendements supérieurs à 110 lm/W en diminuant considérablement la résistance thermique (qui passe de 7-10°/W en boîtier résine, à 4°/W en boîtier céramique).

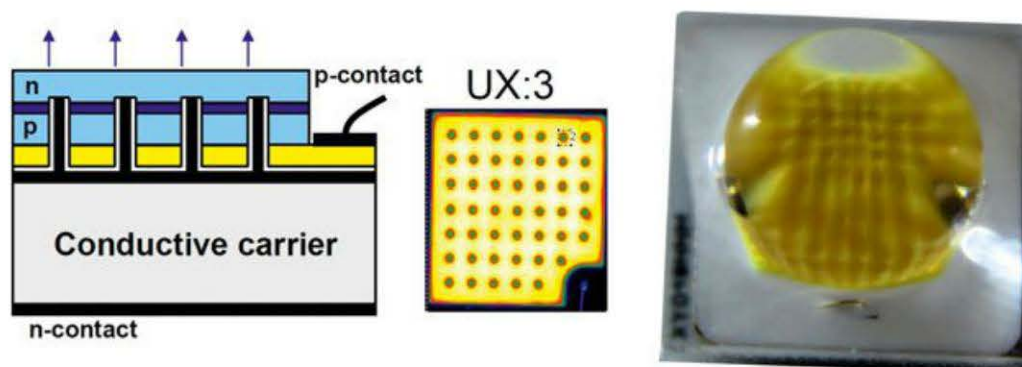


Figure 11.7 – Technologie UX:3 d'Osram, utilisant un substrat de silicium, pour une surface de puce d'environ 2 mm² (Modèle Osolon square – OSRAM Opto Semiconductors).

Début 2010, le fabricant Semileads met au point des composants avec un substrat en cuivre plutôt qu'en saphir ou en carbure de silicium. La structure verticale couplée à la qualité de dissipation thermique du matériau permet d'atteindre des performances intéressantes (rendement $> 100 \text{ lm/W}$) et une stabilité de ces performances.

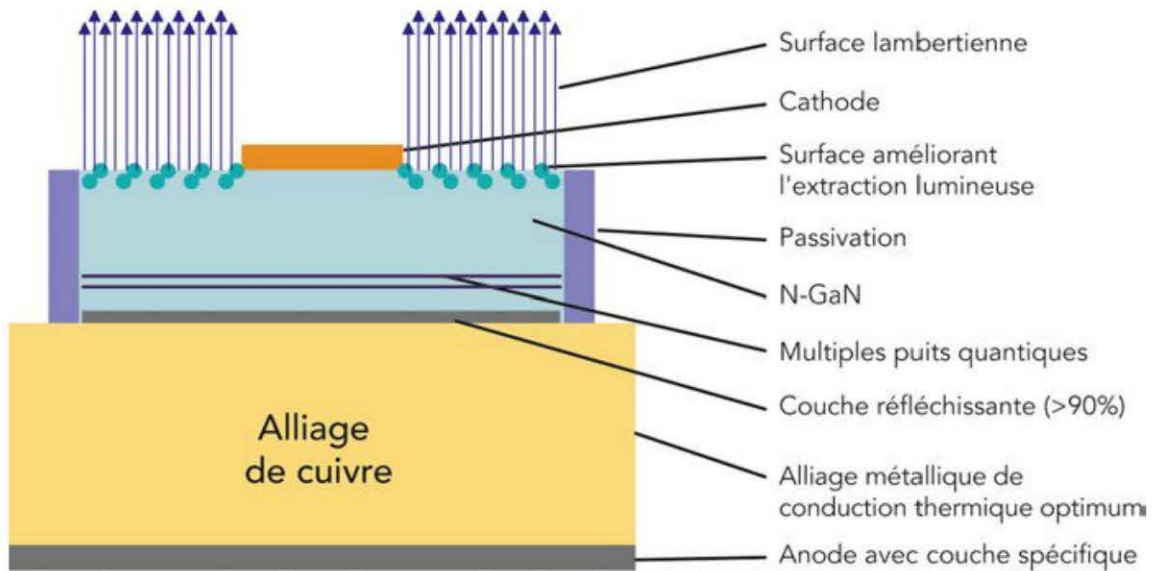


Figure 11.8 – Puce de type vertical montée sur un substrat en cuivre (Semileads).

11.2 Performances des luminophores

Jusqu'au milieu des années 2000, les efforts des constructeurs se portaient essentiellement sur la qualité des luminophores employés, le type de matériaux entrant dans leur composition et les différents mélanges possibles entre luminophores. À partir de 2004-2005, les développements ont davantage porté sur l'encapsulation de ce luminophore et son dépôt, à la suite des nouvelles possibilités offertes par les puces semi-conductrices de nouvelle génération de type *flip chip* entre autres (qui permettent de déposer plus facilement des couches uniformes, ou encore des fines plaques de matériaux de type céramique).

11.2.1 Qualité des luminophores utilisés

L'un des luminophores les plus répandus est le YAG (*Yttrium Aluminium Garnet*), notamment sur les premières versions de LED blanches, mais également sur les modèles à très bas coût ne nécessitant pas une très bonne qualité colorimétrique. Très tôt, dès que la disponibilité de LED de puissance émettant dans le bleu autour de 450 nm fut réelle, les problématiques de choix, de concentration et de dépôt de

11.2 Performances des luminophores

luminophores se sont posées [35], tout comme la qualité du mélange chromatique obtenu (bleu non converti + jaune/rouge convertis par le luminophore). Elles ont été résolues en partie par des mises en œuvre de particules complémentaires aux particules de luminophore, noyées avec elles dans un matériau diffusant [88].

Par la suite, d'autres types de luminophores que le YAG ont été développés à base de phosphates ou/et de nitrures, et on a pu ainsi réaliser des mélanges aboutissant à des lumières blanches d'excellente qualité. Parmi les plus actifs dans ce domaine de l'amélioration de la qualité de lumière émise figurent Osram, Nichia et Philips Lumileds, suivis par CREE. En associant différents luminophores, les fabricants de LED ont pu atteindre des colorimétries de blancs chauds avec des indices de rendu de couleur parfois supérieurs à 90.

11.2.2 Améliorations du dépôt des luminophores

L'intégration des luminophores se faisait par remplissage (*potting*) d'une cavité contenant la puce semi-conductrice prévue à cet effet (figure 11.9.a).

Deux méthodes complémentaires ont ensuite vu le jour successivement, la première consistant à réaliser un dépôt de luminophore d'épaisseur maîtrisée sur la LED (*conformal coating*, mise au point notamment par le fabricant Philips Lumileds en 2005 – figure 11.9.b), la seconde, concentrant ce dépôt uniquement sur la surface de la puce semi-conductrice (*chip coating* – figure 11.9.c).



Figure 11.9 – Méthodes de dépôt de luminophore (a et c = Osram ; b = CREE).

La maîtrise de l'épaisseur a grandement amélioré la qualité colorimétrique du faisceau de lumière émise suivant les différents axes d'émission, permettant notamment d'obtenir des surfaces uniformément éclairées après traitement par des optiques complémentaires.

Ce contrôle de l'épaisseur s'est accru avec la mise en œuvre de la technique de *chip coating* qui peut se réaliser directement au niveau du *wafer* lors de la fabrication des LED, permettant ainsi d'accroître encore la maîtrise du dépôt. Cette dernière méthode a non seulement permis de réduire les quantités de matériaux déposés (d'où des gains de coûts) mais également d'éviter dans certains cas que des réflexions parasites se fassent absorber avec réémission d'une lumière différente.

Les prix des matériaux entrant dans la composition des luminophores ayant fortement augmenté au début des années 2010, ces nouvelles méthodes de dépôt plus précises et plus économes en matériaux rendent les LED qui en bénéficient d'autant plus compétitives.

De nouvelles méthodes de dépôt de luminophores au niveau du *wafer* sont développées par la société Toshiba afin de permettre de réaliser des dépôts d'excellente qualité y compris sur des LED de petite dimension (boîtier 0603).

11.2.3 Déport et encapsulation des luminophores

La dégradation des performances des LED blanches est en rapport direct avec celle des luminophores, qui sont sensibles à la chaleur. Déposer ces luminophores sur la surface des puces semi-conductrices des LED est la méthode couramment employée bien qu'elle représente un désavantage comparé à celle qui consisterait à déporter légèrement ce luminophore.

LedEngin a misé très tôt sur cette méthode de déport du luminophore pour assurer la stabilité de la qualité colorimétrique de ses LED.

Parallèlement à cela, des premiers modèles de LED ont été développés avec une encapsulation du luminophore dans des matériaux plus durs (céramique) et pouvant également être légèrement déporté de la surface de la puce semi-conductrice. Il s'agit de la technologie Lumiramic® de Philips Lumileds en 2008 (figure 11.10).

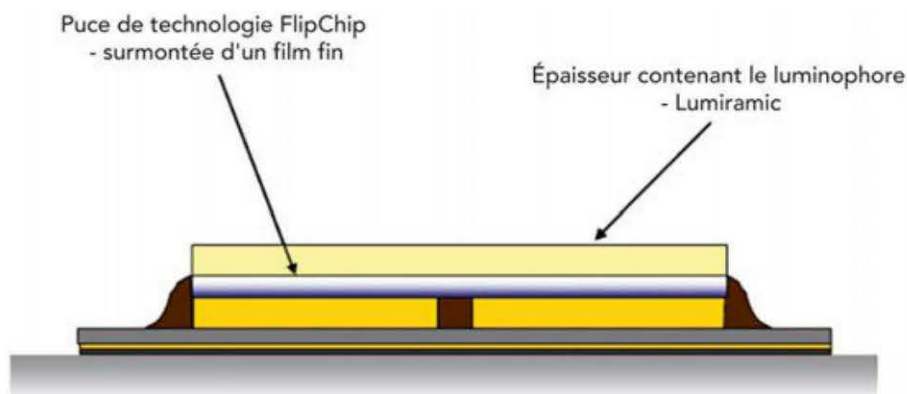


Figure 11.10 – Luminophore encapsulé dans une céramique (Philips Lumileds – Lumiramic®).

Les développements de ces méthodes d'intégration de luminophore dans des couches céramiques sont en cours d'amélioration et Osram a récemment démontré que le comportement du luminophore face à une grande variation de température est bien plus stable encapsulé dans des céramiques que dans de la silicone (conférence LS du 13 juin 2012).

11.3 Méthodes d'alimentation

La plupart des méthodes qui ont été mises en œuvre pour alimenter les semi-conducteurs intégrés aux LED avaient été développées dans d'autres contextes électroniques. En effet, les soudures de fil d'or (*bonding*) ou encore l'alimentation par microbille par le dessous de la puce semi-conductrice (technologie *flip chip*), sont des procédés d'alimentation des composants électroniques qui ont respectivement plus de 50 ans et 30 ans.

Les développements marquants en 2010 et 2011 sont la mise en œuvre de deux nouvelles méthodes d'alimentation des puces semi-conductrices : d'abord le procédé « UX:3 » d'Osram et ensuite la méthode *direct attach* de CREE. Dans le premier cas, des via électriques¹ alimentent la puce par le dessous et il ne faut alors plus qu'un seul fil d'or pour assurer l'alimentation. Dans le second cas (CREE), l'alimentation de la puce semi-conductrice se fait entièrement par le dessous et améliore considérablement la robustesse et les performances thermiques de la LED (figure 11.11).

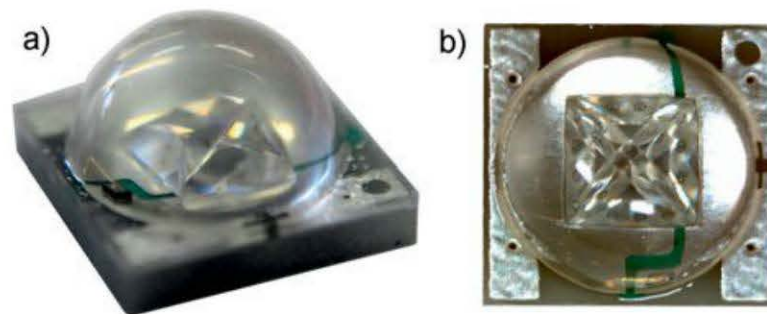


Figure 11.11 – Technologie *direct attach*, CREE (a = vue de profil ; b = vue de la puce).

Enfin, une dernière méthode qui a permis de rendre plus compacts les composants et qui a été développée dans les années 2008-2009, mais qui s'est accélérée, en 2013-2014, consiste à réaliser un contact électrique par dépôt entre puces semi-conductrices mises les unes à côté des autres (figure 11.12). Nous ne sommes pas en présence de contact par fil d'or, ce qui simplifie et fiabilise le processus de fabrication. Cette méthode est développée par la société Séoul Semiconductor, et cela a également permis des développements de systèmes HV (haut voltage) permettant de s'affranchir des alimentations électroniques standard qui transforment la tension alternative du secteur (230VAC) en une tension continue de valeur plus faible (souvent entre 12 et 40VDC).

1. Tubes de petite taille.

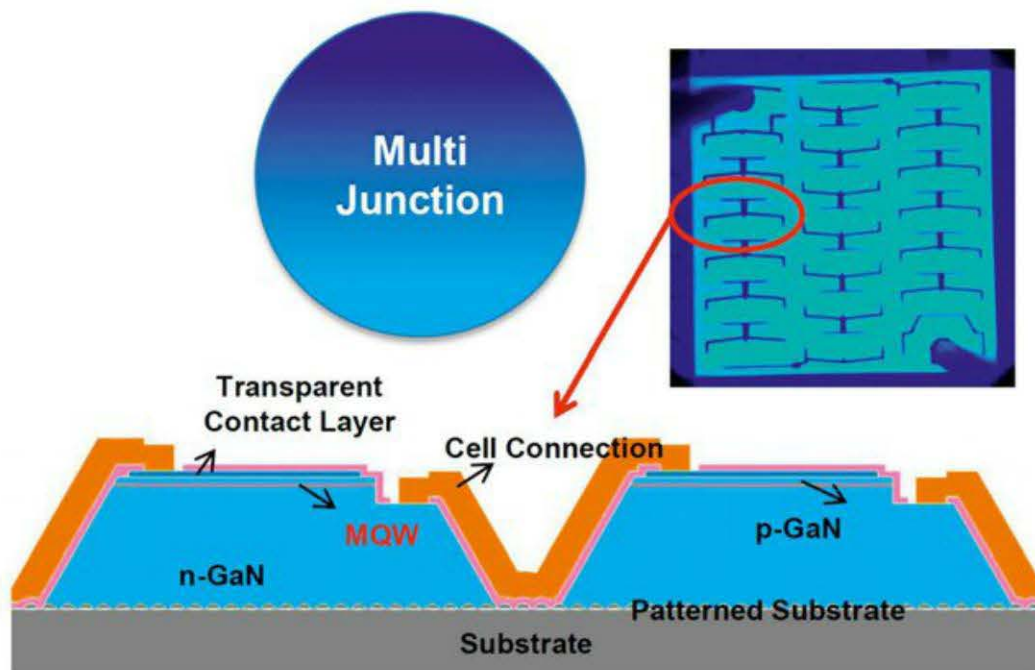


Figure 11.12 – Technologie MJT de Séoul Semiconductor.

11.4 Méthodes d'extraction lumineuse

Une fois la lumière créée par le semi-conducteur, l'objectif est de l'extraire du boîtier de la LED de la façon la plus efficace possible, tout en mettant en forme le faisceau lumineux afin qu'il puisse être exploité dans un second temps. La principale problématique rencontrée est le fait que les indices optiques des semi-conducteurs sont en général élevés (supérieurs à 1,7). Il faut donc que l'interface intermédiaire (lentille primaire) réalise la meilleure adaptation avec l'air (d'indice 1).

Pour cela dès le milieu des années 2000, des texturations de surface, des matériaux semi-conducteurs [25, 30, 40], mais aussi des lentilles primaires en matériaux transparents à gradient d'indice ont été mis au point.

Des études récentes ont évalué la pertinence des formes de texturation possibles complétées par un film complémentaire déposé sur le haut du semi-conducteur. Le gain de l'extraction lumineuse réalisé de cette manière peut dépasser les 50 % par rapport à une méthode de texturation conventionnelle [21]. Parallèlement à ces technologies de texturation, les semi-conducteurs ont eux aussi évolué et ont été réalisés avec des couches supplémentaires fonctionnant comme un miroir pour rediriger la lumière émise vers le devant de la LED. C'est également le cas pour certains boîtiers de LED recouverts d'une couche réfléchissante.

11.4 Méthodes d'extraction lumineuse

L'utilisation de cristaux photoniques qui jouent le rôle de guide d'ondes du semi-conducteur vers l'extérieur de la LED est une autre piste d'amélioration pour l'extraction lumineuse.

Les nanotechnologies comme les nanofils utilisés depuis plusieurs années par la société GLO, pourraient non seulement permettre d'améliorer l'extraction lumineuse au niveau du semi-conducteur, mais aussi éviter l'utilisation des luminophores dans certains cas, limitant de ce fait les pertes importantes (20 à 50 %) à ce niveau-là.

La forme de l'optique primaire des LED (dômes de silicone qui ont été légèrement modifiés) a également participé courant 2013-2014 à l'amélioration de l'extraction lumineuse des LED. Cela a parfois entraîné une baisse des performances colorimétriques, les fabricants ayant misé sur le rendement lumineux global plutôt que sur une homogénéité spectrale suivant les différents angles d'émission de la LED.

Toutefois, la forme du faisceau lumineux de la LED reste primordiale pour l'utilisation d'optiques secondaires, excepté dans des cas particuliers comme la technologie à luminophore déportée, ou bien pour des applications d'éclairage diffus pour lesquels seule la quantité de lumière produite est importante, sans réelle photométrie particulière. De plus, si l'application intègre un nombre important de LED, mis à part l'absorption des composants eux-mêmes du flux de leurs proches voisins, une moyenne colorimétrique s'opère derrière le diffusant. Cela permet l'utilisation de LED ayant ce type d'inhomogénéités colorimétriques angulaires, fournissant toutefois un résultat convenable pour le produit d'éclairage.

La géométrie du semi-conducteur avait très tôt fait l'objet d'investigations et de développements, notamment au travers des produits du fabricant Philips Lumileds avec un semi-conducteur en pyramide tronquée inversée (figure 11.13). Cette géométrie avait permis d'augmenter l'extraction de lumière de manière très significative (+20 % à +60 %).

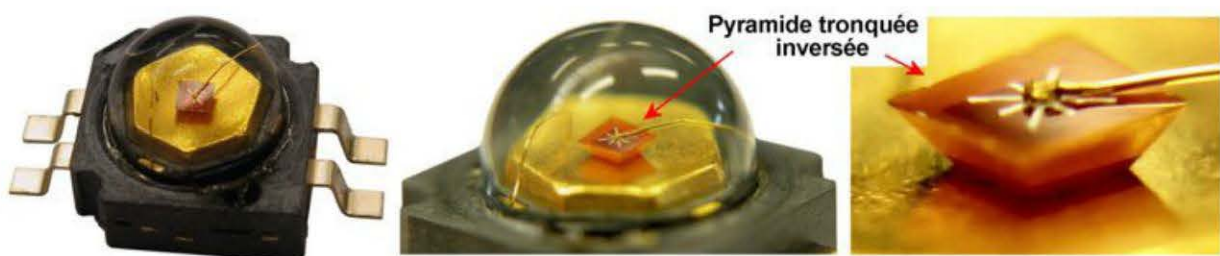


Figure 11.13 – LED utilisant un semi-conducteur en forme de pyramide tronquée et inversée (modèle K1 de Lumileds permettant d'améliorer l'extraction lumineuse).

Le fabricant CREE a choisi de son côté, pour améliorer l'extraction lumineuse, de réaliser des LED à l'aide d'un semi-conducteur rainuré (modèle XT-E, puis par la suite XB-D – Figure 11.14) qui peut être utilisé avec certaines lentilles secondaires mais qui dans certains cas, présente des inhomogénéités colorimétriques importantes dues en grande partie au dépôt du luminophore qui n'est pas constant en épaisseur.

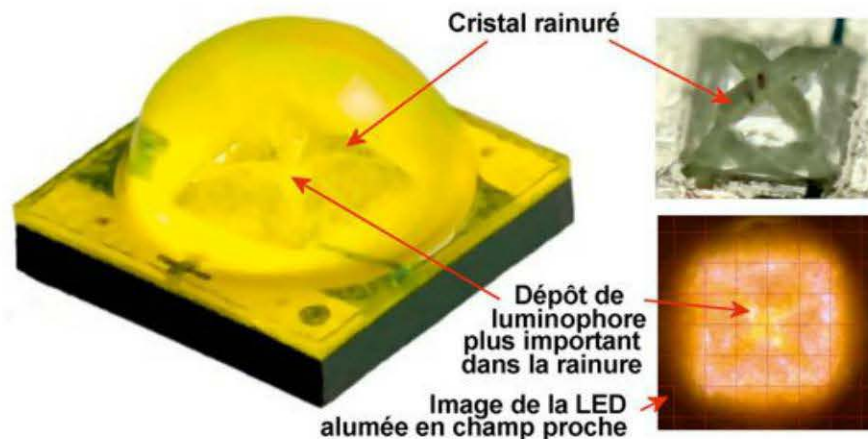


Figure 11.14 – LED intégrant un semi-conducteur rainuré améliorant l'extraction lumineuse (Modèle XT-E et XB-D du fabricant CREE).

11.5 Densité lumineuse : évolution des boîtiers des LED

La principale raison pour laquelle les créateurs de produits d'éclairage choisissent des sources lumineuses ponctuelles, est le fait que le traitement optique qui en découle est plus simple pour atteindre des performances d'homogénéité et d'uniformité, que ce soit en termes de flux lumineux (ou de luminance) ou en termes de colorimétrie. Dans le même temps, des applications telles que les rétro-éclairages d'écrans (télévision ou ordinateur) ou l'éclairage général (nécessitant de faibles luminances sur de grandes surfaces afin de limiter les éblouissements), requièrent des sources lumineuses étendues.

C'est dans ce contexte que se sont développées les LED, avec un paramètre important, la capacité des industriels à fabriquer des puces semi-conductrices ayant un rapport performances/coûts le plus grand possible.

La luminance d'une source lumineuse (en cd/m^2) représente entre autre sa capacité à émettre un flux lumineux par unité de surface qui la compose. Si l'on met de côté les technologies à décharge telles que les tubes fluorescents ou tubes haute tension, toutes les autres technologies utilisées à grande échelle pour l'éclairage mettent en œuvre des sources de petites dimensions, avec des luminances très importantes.

11.5 Densité lumineuse : évolution des boîtiers des LED

Fin de l'année 2010, une étude française menée par l'ANSES pointait du doigt (entre autres) la problématique de ponctualité des sources lumineuses à LED (et donc de leur forte luminance), sans mentionner que la plupart des autres technologies avaient des luminances similaires voire supérieures. Toutefois, des organisations telles que CELMA [88] ont réagi et ont apporté cette précision (première page du rapport mis en ligne sur Internet) : « *As far as glare due to luminance of LED is concerned, CELMA reminds that other lamp types used since several years present comparable luminance. In day to day lighting applications there is no more risk in using LED than other conventional light source (reaction of people to glare is to avoid viewing the light source as all people are used to it as it happens with the sun outside which emits much more radiation)* ».

Dès les années 2005, M. R. Krames (Lumileds) présentait un papier dans la revue IEEE [66] donnant les niveaux de luminance des trois types de sources ponctuelles de cette époque à savoir : les LED, les filaments à incandescence et les électrodes de lampes à décharges (à arcs courts). Respectivement, les luminances mesurées par Krames étaient de 12 Mcd/m², 25 Mcd/m² et 80 Mcd/m².

L'évolution des performances des LED a entraîné une augmentation de ce niveau de luminance d'un facteur 5 à 7 aujourd'hui, mais il reste d'un ordre de grandeur similaire (avec plusieurs dizaines de millions de cd/m²) à celui des lampes à décharge toujours utilisées aujourd'hui.

11.5.1 Évolution des systèmes à LED

Si la tendance des développements des systèmes d'éclairage (de type down-light par exemple) ont permis (et poussé) le développement des COB (cf. chapitre 4), cette tendance s'est accentuée entre 2010 et 2014 permettant à des fabricants d'éclairage de réaliser des produits à LED sans les obliger à développer des solutions complexes (carte électronique, LED, régulation). Les fabricants de composants se sont tous mis à proposer ce type de produit, historiquement mis en œuvre au départ par les acteurs japonais et Taïwanais (figure 11.15).

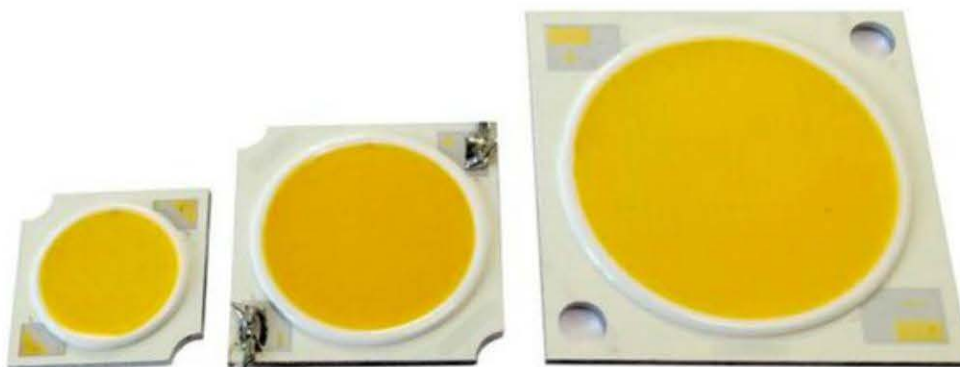


Figure 11.15 – COB Citizen – Connecteur mécanique/électrique.

Au départ, les modules étaient prévus pour être soudés en face avant, mais très rapidement les fabricants de connectiques ont développé des systèmes permettant d'assurer à la fois le contact électrique, mais aussi la fixation du COB sur le luminaire (figure 11.16). Cela a facilité le développement des produits d'éclairage avec en complément la possibilité d'adapter des réflecteurs sur ces mêmes connecteurs rapides, fixés par simples clips.



Figure 11.16 – Connecteur pour COB (Tyco-Electronics).

Il est intéressant de noter que certains modules COB ne sont pas accessibles en tant que composants, mais sont intégrés en mode OEM (*Original Equipment Manufacturer*), notamment dans les cas où la technologie est innovante avec des méthodes de fabrication propriétaire. Nous pouvons citer par exemple la technologie «GaN sur GaN» du fabricant SORAA qui est basé sur le développement de petit module COB.

11.5.2 Évolution des boîtiers de LED

La tendance des années 2000 a été le développement de LED intégrant des puces de tailles de plus en plus grosses, d'abord de 2 mm² puis de près de 4 mm².

Puis, des boîtiers de type 5630 ou 3014, développés initialement pour les marchés du rétro-éclairage d'écran (TV, ordinateur) se sont développés. Pour des raisons de disponibilités de ces composants dû à la stagnation des besoins dans ces domaines d'une part, et à l'augmentation de leurs performances d'autre part, ils ont envahi les domaines de l'éclairage, d'abord pour des applications ne nécessitant pas beaucoup de flux lumineux par composants (de 10 à 30 lumens). Cet appel de l'industrie et des utilisateurs a poussé des fabricants de LED à développer ces types de boîtiers, les rendant plus robustes, plus efficaces, en hébergeant même des puces semi-conductrices utilisées jusqu'alors pour des LED de puissance. Puis sont apparus des modèles

11.5 Densité lumineuse : évolution des boîtiers des LED

légèrement plus gros (de type 7030). Le fabricant LG-Innotek qui commença à proposer des LED de ce type avec des performances inégalées jusque-là :

- ▶ Rendement >140 lm/W en blanc chaud 3000 K,
- ▶ Résistance thermique $< 15^{\circ}/\text{W}$,
- ▶ Courant de pilotage maximum près de 300 mA,
- ▶ Flux lumineux entre 50 et 100 lumens.

La limite entre les modèles de LED de type moyenne puissance et forte puissance (typiquement en boîtier de type 3535 hébergeant une puce semi-conductrice de $900\text{ }\mu\text{m}$ de côté) qui était franche jusqu'au début des années 2012 ne l'est plus vraiment en 2015. La compacité (nécessaire pour développer des applications intégrant des optiques secondaires), l'amélioration des résistances thermiques et l'augmentation des rendements des semi-conducteurs, ont permis de développer des LED pouvant être pilotées à des courants compris entre 80 mA et 200 mA, dans des boîtiers en résine ou en céramique suivant les applications.

Dans certains cas, des LED voient leur embase réduite au maximum, de dimension légèrement supérieure à la surface de la puce semi-conductrice elle-même (figure 11.17), permettant d'accroître l'extraction lumineuse d'une part, et d'autre part de diminuer les coûts de fabrication, utilisant moins de matière première. Ces boîtiers de LED sont nommés CSP (*Chip Scale Package*) et se développent de plus en plus, poussés par de nombreux fabricants de LED, mais aussi fabricants de semi-conducteurs comme Epistar, qui voient dans le développement de ce type de boîtiers, des performances « lumens/euro » dépassant les 2000 à l'horizon 2016-2018.

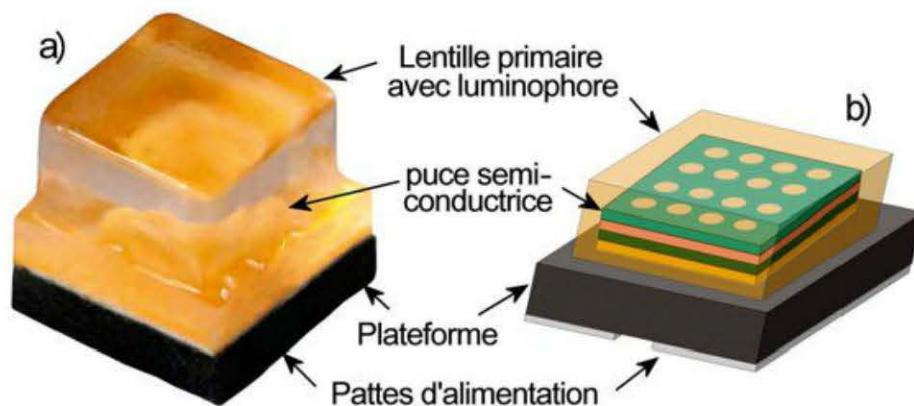


Figure 11.17 – LED de type CSP (*Chip Scale Package*) – (CREE).

La compacité de ces nouveaux types de LED permet de réaliser des modules LED très compacts (figure 11.18), permettant de s'approcher des performances de certains COB, tout en gardant la flexibilité des modules LED. Ainsi, le nombre de LED, la manière de les positionner, leur densité mais aussi le type de LED mis en œuvre peut

permettre de réaliser des fonctionnalités nouvelles comme des modules lumineux ayant des températures de couleur (CCT) réglables.

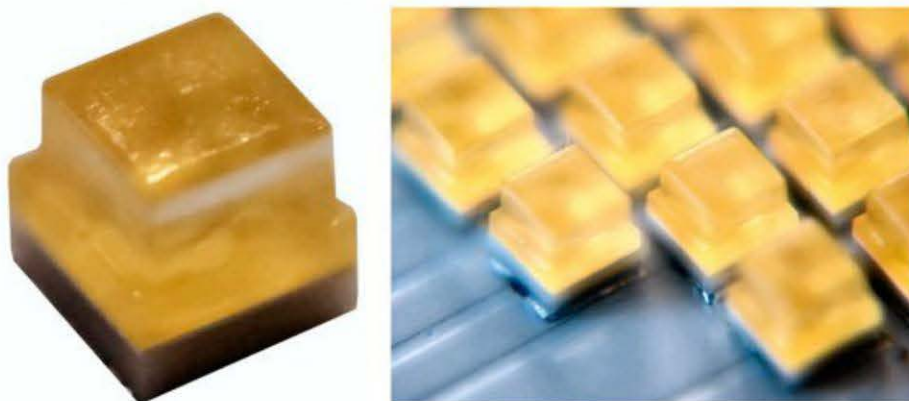


Figure 11.18 – LED compacte pilotable jusqu'à 300 mA (CREE).

En parallèle de cette évolution des boîtiers de LED de puissances électriques supérieures à 0,5 W, le développement des LED de petite dimension s'est aussi accentué pour permettre aux designers de réaliser des applications d'éclairage dans lesquelles le besoin d'une certaine « continuité lumineuse » est attendu. C'est le cas des tubes à LED pour lesquels, pendant des années, les utilisateurs de tubes fluorescents ont été habitués à une forme lumineuse linéaire et homogène. Ainsi, les modèles présentant une surface lumineuse homogène sont préférés et choisis, au détriment des tubes à LED présentant des points lumineux trop visibles (figure 11.19).



Figure 11.19 – Tubes à LED – Campagne de tests ADEME 2013-2014 (tests réalisés par Led Engineering Development).

12

Du composant à l'application d'éclairage

Lors de sa conception, chaque application d'éclairage doit répondre à un cahier des charges bien précis en termes de performances, de contraintes d'utilisation, de consommation et de prix de revient.

Ce chapitre est un guide qui permet de mener une réflexion approfondie sur le choix des composants, leur agencement, leur mode d'alimentation, leur coût unitaire, etc., afin d'aboutir au meilleur résultat possible.

12.1 Identification des grands domaines d'application des LED

Il est primordial de bien connaître les performances des LED ainsi que leur coût et leur disponibilité pour être en mesure d'évaluer leurs capacités à répondre à tel ou tel besoin. Les rendements des composants n'ont donc d'importance que s'ils sont accompagnés d'un coût de développement, de fabrication et de pérennisation des solutions, en adéquation avec les applications visées. Deux autres données primordiales doivent figurer dans l'analyse et l'identification des sources pour les différents systèmes d'éclairage : le coût réel de fabrication de ces composants (filière électronique) et leur traitement en fin de vie. Les composants légers, efficaces, employant peu de matière première, mettant en œuvre des méthodes moins gourmandes en énergie et polluant moins leur environnement, peuvent bien sûr être choisis de préférence.

Contrairement à certaines idées reçues, les LED n'ont pas vocation à remplacer la plupart des sources lumineuses. Elles apportent parfois une amélioration (liseuse d'avion économisant de l'énergie, feux stop arrière de voiture pour un allumage instantané ou encore rétro-éclairage d'ordinateur pour l'efficacité et la robustesse), mais le plus souvent elles permettent de créer des applications d'éclairages qui étaient difficiles à mettre en œuvre auparavant pour diverses raisons (compacité des sources traditionnelles : éclairage de verre par la tranche, basse tension disponible pour le système : éclairages et rétro-éclairages autonomes).

Il est vrai que l'industrie des LED pousse l'utilisation de ces nouveaux composants même dans des domaines pour lesquels les sources de lumières traditionnelles ont encore leur place et ce pour de longues années encore, mais il faut considérer ces intrusions ponctuelles non seulement comme des tentatives de diversification nécessaires au maintien de la qualité des sources de lumière plus anciennes, mais aussi comme des challenges lancés en permanence à la technologie à semi-conducteur, afin qu'elle s'améliore et tire le meilleur d'elle-même. Ainsi, les récentes évolutions techniques des LED entre-ouvrent la porte à des applications d'éclairage qui semblaient inaccessibles en 2010-2011 (figure 12.1). Les années 2013-2014 nous ont montré une croissance intéressante de la technologie LED dans de nombreux domaines, mais globalement, cette technologie a encore une grosse marge de progression. Si nous nous focalisons sur l'Europe, nous sommes un peu en retard par rapport à des pays comme le Japon, mais ce retard est en train d'être comblé.

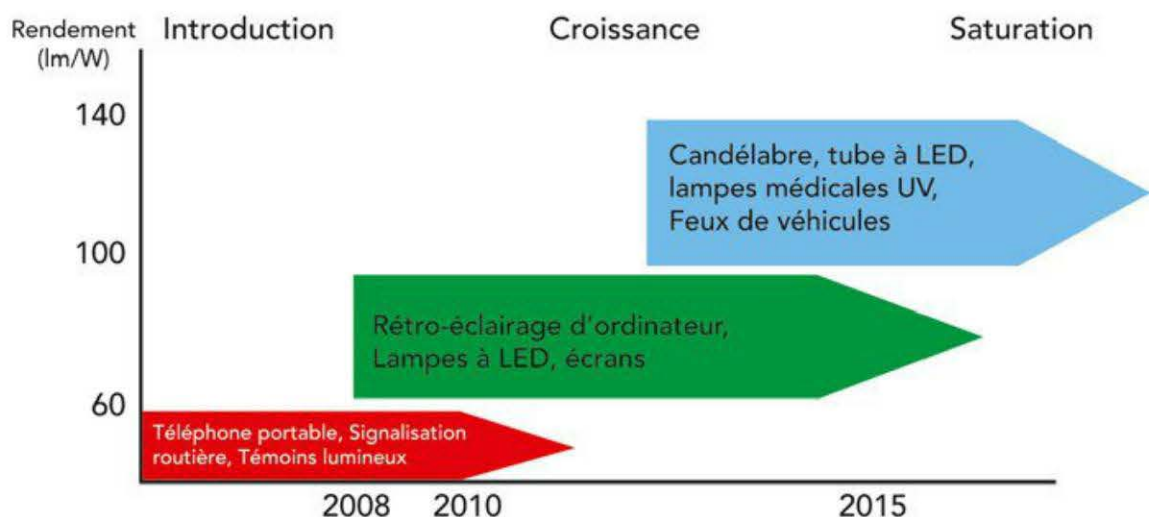


Figure 12.1 – Évolution des applications de LED
(Paul Semenza – Display Search – Santa Clara 2012).

Au-delà des prévisions, nous verrons plus en détail au chapitre 13 la maturité de la technologie LED pour les différentes applications d'éclairage. Néanmoins, une première approche dans le tableau récapitulatif ci-dessous (tableau 12.1) donne un aperçu des principaux domaines dans lesquels les LED peuvent être intégrées.

12.1 Identification des grands domaines d'application des LED

Tableau 12.1 – Maturité de la technologie LED pour différentes applications d'éclairage

Applications	Sous-familles	Performance 2014	2014	2015-2017
Éclairage public	Routier	120 lm/W	😊	😊😊😊
	Voies intra muros	110 lm/W	😊	😊😊😊
	Résidentiel	90 lm/W	😊😊	😊😊😊
Signalétique	Enseignes lumineuses	30 Kh	😊😊😊	
	Balisage	40-50 Kh	😊😊😊	
	Extérieur déco	40-50 Kh	😊😊😊	
	Intérieur déco	4 000 K – 70 lm/W	😊😊😊	
	Projecteur extérieur	100 lm/W	😊😊	😊😊😊
Éclairage général	Bureaux	4 000 K – 90 lm/W	😊	😊😊😊
	Zones de passage	100 lx	😊😊	😊😊😊
	Intérieur habitation	3 000 K – 90 lm/W	😊	😊😊
	Zones industrielles	6 000 K – 110 lm/W	😊	😊😊😊
Éclairage industriel	Vision industrielle	100 000 lx	😊😊😊	
Médical	Détection – curatif	5-10 mW	😊😊😊	

(😊 = mature ; 😊😊 = produit existant ; 😊😊😊 = existant et standard).

12.1.1 Rappels des performances et des contraintes

L'une des principales difficultés rencontrées par les nouvelles technologies, c'est de parvenir à présenter leurs performances avec les normes et les outils de mesure des technologies antérieures. Depuis les habitudes d'évaluation jusqu'au vocabulaire, tout peut faire la différence, comme le montre l'exemple suivant du tube fluorescent 36 W.

Ce tube est bien connu des installateurs ou des électriciens. Il fournit un flux autour de 3 200 lumens en blanc neutre (4 000 K) et il est encore utilisé aujourd'hui avec des ballasts ferromagnétiques et électroniques. Sa consommation totale est d'environ 40 W. Le flux utile (restitué sur la zone à éclairer) doit être évalué en fonction du rendement du luminaire. Cependant, les professionnels ont à l'esprit une consommation de 36 W et un flux de 3 200 lumens (pour un rendement de 89 lm/W) alors que la consommation réelle est plutôt de 40 W et le flux utile autour de 2 400 lumens (pour un rendement global de seulement 60 lm/W). Dans le même temps, il est demandé aux technologies LED d'atteindre des rendements système de 70 à 80 lm/W, voire de 100 lm/W, alors que ces mêmes tubes fluorescents ne les atteignent pas (mis à part la technologie de ballast électronique et tube de type T8).

Courant 2012, les tubes à LED du marché dépassaient des valeurs de 80 lm/W, avec des indices de rendu de couleur supérieur à 80-85 et des durées de vie dépassant les 25 000 heures pour certains modèles. Les lampes à LED de puissance comprise entre 4 et 8 W atteignent elles aussi des rendements similaires à ceux des tubes à LED et proposent des blancs de couleur relativement chaude (2 800-3 200 K). Plus tard en 2013-2014, ces performances ont nettement été améliorées, avec des rendements dépassant 100 lm/W pour des tubes à LED de 120 cm, et 90 lm/W pour des lampes à LED omnidirectionnelles de près de 7 W.

Même avec ces améliorations du côté des LED, la compacité des systèmes impose aux alimentations électroniques des espaces réduits et des températures de fonctionnement souvent supérieures à 45-50 °C ce qui impacte beaucoup la durée de vie des systèmes. Dans certaines applications comme les lampes à LED, les températures de fonctionnement des alimentations sont même supérieures à 60 °C. Malgré cela, les défaillances des alimentations ne sont pas si fréquentes et la dégradation des produits provient en grande partie de la baisse de flux progressive des LED [18].

La qualité du design thermique est primordiale pour maîtriser la température de la jonction des LED intégrées dans l'application. De plus, il faut être en mesure suivant les types d'applications d'évaluer les pertes qui seront occasionnées par le système à chaque niveau. De façon générale, il y a trois points à identifier pour arriver à évaluer le rendement de la solution finale (figure 12.2). Ce sont : les pertes dues à la chaleur de la LED, le rendement des alimentations et les pertes optiques (aussi bien inhérentes à la mise en œuvre dans le système qu'aux propriétés du matériau et à sa forme).

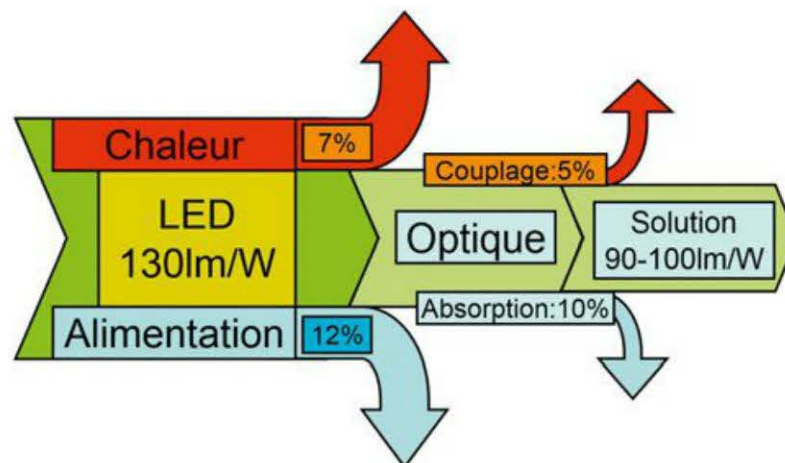


Figure 12.2 – Pertes habituellement rencontrées dans des systèmes à LED.

Parfois, il est possible de s'affranchir ou de limiter l'une des trois principales origines de perte d'efficacité, mais dans la grande majorité des cas, nous les retrouvons toutes avec des proportions différentes suivant les systèmes. Les améliorations des années

12.1 Identification des grands domaines d'application des LED

2013-2014 se sont faites au niveau de la LED, pour laquelle les fabricants de systèmes d'éclairage peuvent trouver de façon relativement aisée des composants avec des rendements de 120 à 130 lm/W. Néanmoins, les pertes au niveau des alimentations électroniques n'ont pas été radicalement diminuées en partie parce que la marge de manœuvre est réduite, et en ce qui concerne les optiques secondaires, les fabricants ont atteint des limites au-delà desquelles il sera difficile d'aller.

12.1.2 Enjeux et prévisions

Nous parlons très souvent de rendement puisque nous attendons des systèmes d'éclairage non seulement qu'ils soient efficaces, mais que leur efficacité soit accrue par l'arrivée de nouvelles technologies vendues comme prometteuses.

C'est ainsi que beaucoup ont attendu que les composants aient atteint des niveaux d'efficacité de 100 lm/W avant d'imaginer développer des premières applications d'éclairage à LED et notamment en éclairage public (barre quelque peu « mythique » puisqu'égalant le rendement de certaines technologies comme celle des tubes fluorescents par exemple). Cette tendance s'est encore accentuée courant 2014-2015, et la valeur de 150 lm/W est devenue le nouvel objectif des LED, cela leur permettra de « convaincre » de façon définitive. Certains modèles en 2015 affichent cette performance au travers de leur documentation (et de leur présentation commerciale), et l'atteignent réellement, mais ils sont encore trop peu nombreux pour que ce soit considéré comme une généralité.

Parallèlement à cela, les systèmes d'éclairage étant relativement complexes et les outils de mesures et d'évaluation des performances onéreux, il n'est pas simple de réaliser des mesures concrètes et précises des efficacités de luminaires (toutes technologies confondues). C'est d'autant plus vrai sur des technologies récentes pour lesquelles il est nécessaire de connaître les conditions de mesure à mettre en place lors des essais. Certaines incertitudes planent par conséquent lorsque des comparaisons sont réalisées et que des contre-vérités apparaissent.

De plus, les modes de calcul de retour sur investissement ne prennent pas en compte l'ensemble des paramètres (comme par exemple les notions de risques lors d'éclairage réduit ou inexistant suite à une défaillance du système), alors que les LED ont pour principal avantage de posséder une durée de vie longue comparée à beaucoup d'autres sources traditionnelles, et ceci ne contribue pas à leur développement rapide. Pire, face aux difficultés que rencontrent les fabricants historiques de luminaires pour proposer des produits à LED peu coûteux, d'autres fabricants peu scrupuleux ou non soumis aux mêmes réglementations s'empressent de mettre au point des systèmes qui pour le coup sont inefficaces. Ces fabricants vantent les mérites de cette technologie intéressante et prometteuse que sont les LED sans mettre les moyens

nécessaires pour atteindre les objectifs qu'elles sont en mesure d'atteindre, et bon nombre d'utilisateurs imputent à tort leur déception, non pas à la piètre qualité des produits qu'ils ont achetés mais à la technologie dans son ensemble.

Enfin, même si la technologie LED est sur le marché européen depuis 2009-2010 de façon suffisamment représentative pour qu'elle influence les donneurs d'ordre, les années 2015-2017 vont constituer encore une période où les acteurs se mettent en place et où les stratégies de positionnement de marchés sont difficiles à déterminer. Les preuves des performances sont rares et les annonces nombreuses et en grande partie faites par les fabricants de composants eux-mêmes, ce qui plonge d'autant plus les utilisateurs finaux dans le doute.

Pour pallier la rareté des informations disponibles sur la technologie des LED et pour rectifier les contrevérités relayées souvent par simple méconnaissance technique, des organismes indépendants s'entourent de spécialistes du domaine et publient des études pour informer les futurs intégrateurs ainsi que les utilisateurs. L'ADEME publie des brochures et des documentations tout comme l'AFE (Association française de l'éclairage) ou encore le Syndicat de l'éclairage. La Société française d'optique (SFO) rassemble tous les acteurs de la photonique au sens large, du laser jusqu'aux industries télécoms ou médicales, et intègre les acteurs en technologie LED.

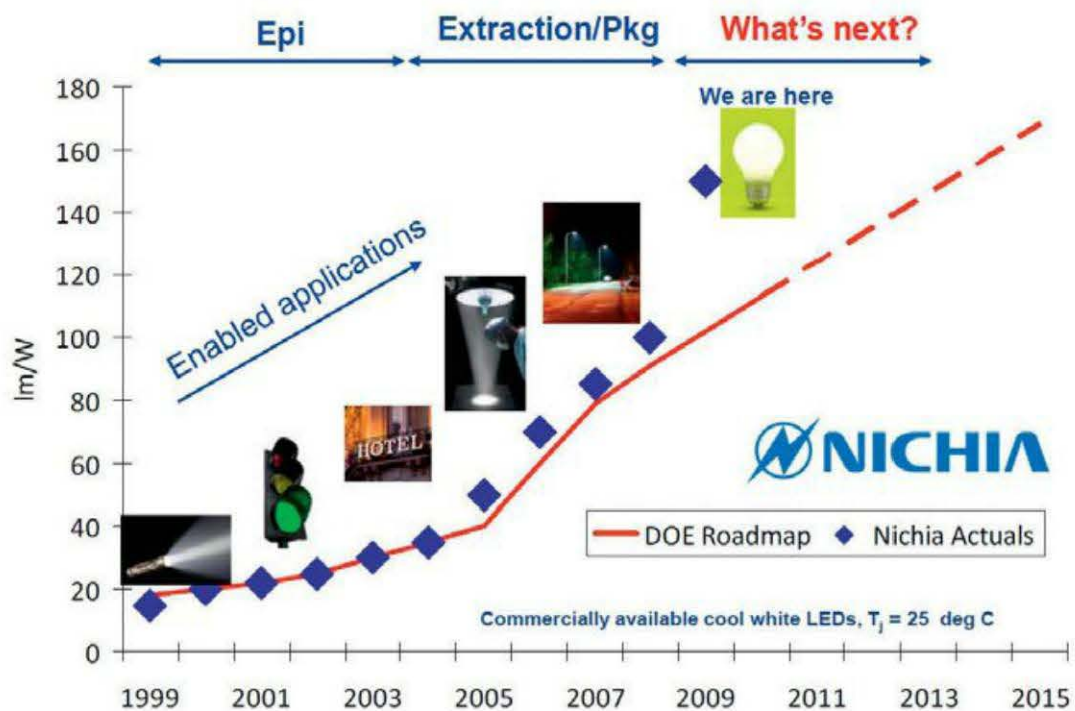


Figure 12.3 – Applications intégrant des LED avec les prévisions du DoE (Department of Energy) – présentation Nichia / Dan Doxsee – Santa Clara (États Unis), février 2012.

12.2 Choix de la technologie LED appropriée

À l'international, la CIE (Commission internationale de l'éclairage), l'OIDA (*Optoelectronics Industry Development Association*), l'ISA (*International Solid State Lighting Alliance*) ou encore le DoE (*Department of Energy*), rédigent des normes ou des projets de normes et proposent des rapports techniques et économiques.

Les récentes prévisions en termes de rendement faites par le DoE d'une part et relayées par les fabricants de LED (figure 12.3) laissent envisager des perspectives intéressantes.

12.2 Choix de la technologie LED appropriée

Les critères de choix sont nombreux pour définir le modèle de LED à employer, et souvent même, plusieurs solutions sont possibles. Nous n'allons donc pas dans ce paragraphe réaliser une liste exhaustive des questions à se poser pour aboutir au choix d'un modèle de LED en particulier, mais donner des pistes de recherche permettant de faire une première sélection et dégager quelques tendances.

La première étape consiste à bien analyser l'application dans laquelle les LED seront intégrées, et en particulier le(s) objectif(s) de cette application en termes de fonctionnalité (type d'éclairage : source de lumière étendue, ponctuelle, diffusante, ou encore flux important, directif), de temps d'utilisation, de rendement, de criticité de panne, de coût de revient, de qualification technique spécifique (normes automobiles par exemple auxquelles doivent répondre les composants) ou encore de quantité de produits qui seront fabriqués. Ces premiers constats permettront d'orienter le développement vers des grandes familles de modèles de LED.

Les contraintes de l'application finale (chaleur, vibration, dimension, problématique d'éblouissement, etc.) doivent être prises en compte dans un second temps car elles vont constituer les règles du jeu des compromis à faire au sein de ces objectifs, à part si une contrainte majeure est clairement identifiée dès le départ.

Par exemple, un produit de bon rendement avec un faible coût, peut être réalisé relativement facilement si les contraintes thermiques le permettent. Si au contraire il faut être en mesure de fonctionner à une température élevée, le choix des LED sera différent et impactera le coût du produit final. Si toutefois le choix est fait de mettre la priorité sur le coût du produit, un compromis sur la durée de vie (par exemple) de l'application peut alors être fait et il n'est pas du tout impossible d'utiliser des composants de faible coût. Si le problème avait été posé d'entrée sur le plan de la thermique, et qu'une première sélection de composants résistant à la chaleur ait été faite, nous aurions pu mettre de côté des composants de technologie plus simple (coût relativement bas) alors qu'il aurait été possible en les sous-alimentant, de les utiliser à forte température. C'est d'ailleurs l'une des forces de certains fabricants de modules LED

(cartes électroniques + régulation basique + LED) qui optent pour des LED très bas coût (< 0,03 €/pc – prix relevé en 2014) mises en grande quantité et sous-alimentées, et qui obtiennent d'excellents résultats même à des températures élevées.

12.2.1 Applications compactes

Le manque de place impose en général des composants à flux lumineux élevés. Seules les LED de puissance supérieure à 0,5 W peuvent apporter suffisamment d'énergie lumineuse par mm^2 de surface de composant. De plus, la compacité des systèmes implique la concentration de la chaleur dégagée en un seul point, ce qui aboutit à des températures relativement élevées autour des LED lorsque le système d'éclairage est mis dans une ambiance « standard » autour de 20-25 °C.

Si nous sommes dans le cas d'un système d'éclairage d'accentuation de type lampe dichroïque, la mise en forme du faisceau lumineux « impose » une certaine ponctualité de la source de lumière. Dans ce cas, les LED de puissance possédant une seule puce semi-conductrice (puissance : 1 à 5 W), plusieurs puces semi-conductrices (puissance autour de 5 à 10W – figure 12.4) ou certaines matrices de LED (de puissance autour de 5 à 10 W) sont tout à fait préconisées.



Figure 12.4 – Lampe à LED de type PAR38 (note d'application de CREE) intégrant des LED de puissance multipuce – 6 modèles de LED multipuce.

12.2.2 Systèmes d'éclairage général

Le coût de l'enveloppe d'un luminaire peut radicalement changer si les matériaux employés sont métalliques ou plastiques. Cela a une conséquence directe sur la capacité du luminaire à dissiper la chaleur dégagée par les LED et par l'alimentation électronique.

Si la dimension des luminaires n'est pas un réel problème, et bien que le plastique ne soit pas bon conducteur de chaleur, il est possible de dissiper une puissance thermique de 8 à 12 W sans trop de difficulté avec un volume suffisamment grand (20-25 litres).

12.2 Choix de la technologie LED appropriée

Prenons un exemple (figure 12.5) en faisant les hypothèses suivantes : nous allons utiliser des LED de puissance moyenne (autour de 0,25 W) ayant un bon rendement (110 lm/W minimum en régime légèrement sous-alimenté à température nominale, pour des LED de qualité correcte sans recherche d'excellence) pour une colorimétrie autour de 3 500 K, couplées à un système d'alimentation d'efficacité moyenne (88 %). En considérant la perte environ 10 % de rendement des LED due à leur température de fonctionnement, un système (figure 12.5) capable de dissiper 10 W de chaleur, utilisant ce type d'alimentation et ce type de LED, peut générer autour de 1 900 à 2 000 lumens (avant les pertes induites par le système transparent en face avant). Si on fait une dernière hypothèse en termes d'efficacité du matériau transparent jouant le rôle de diffuseur de la lumière et fixant l'absorption à 10 %, nous obtenons finalement un flux utile possible de 700 lumens, pour un rendement lumineux total de 77 lm/W.

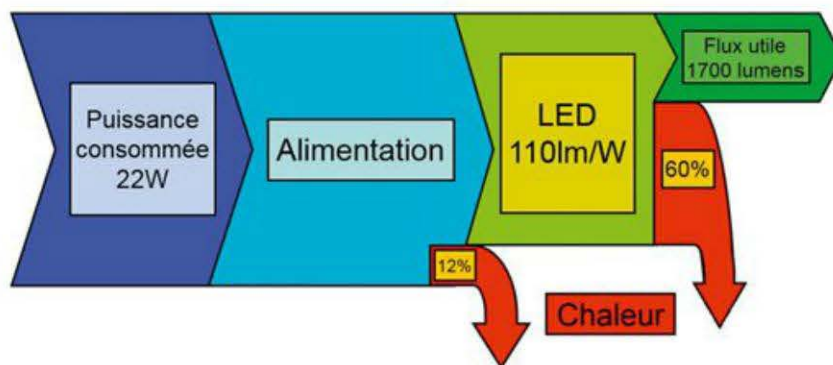


Figure 12.5 – Évaluation du flux qu'il est possible de générer à partir d'un luminaire capable de dissiper convenablement 12 W de puissance par effet joule.

Bien sûr les hypothèses qui ont été faites et le calcul aboutissant à ces performances (1 700 lumens utiles pour un rendement global de 77 lm/W minimum), sont à prendre avec précaution, le but étant de donner avant tout des ordres de grandeurs de ce qui est possible de réaliser en utilisant des composants de qualité convenables. Ainsi, il est important de noter que les LED qui ont servi pour cette évaluation peuvent être remplacées par des modèles plus ou moins performants (en tenue en température notamment et en technologie de dissipation de leur chaleur émise). La dissipation thermique est une chose délicate à évaluer, la température autour des LED doit être réellement validée dans le produit final et enfin, la température ambiante du luminaire doit permettre le fonctionnement correct de l'alimentation (souvent la température ambiante maximale de fonctionnement pour des alimentations est de l'ordre de 50 à 60 °C).

Pour ce type de luminaire, l'utilisation de LED de puissance moyenne peut être tout à fait judicieuse. Les développements de boîtier de LED de type « 5630 » (figure 12.6)

ont particulièrement aidé au déploiement de solutions d'éclairage de par la simplicité (et donc le coût) des LED et par la présence d'un pad de dissipation thermique en dessous, permettant d'alimenter la (ou les) puce(s) entre 50 et 120 mA (jusqu'à 0,5 W) tout en maintenant une température de jonction raisonnable.

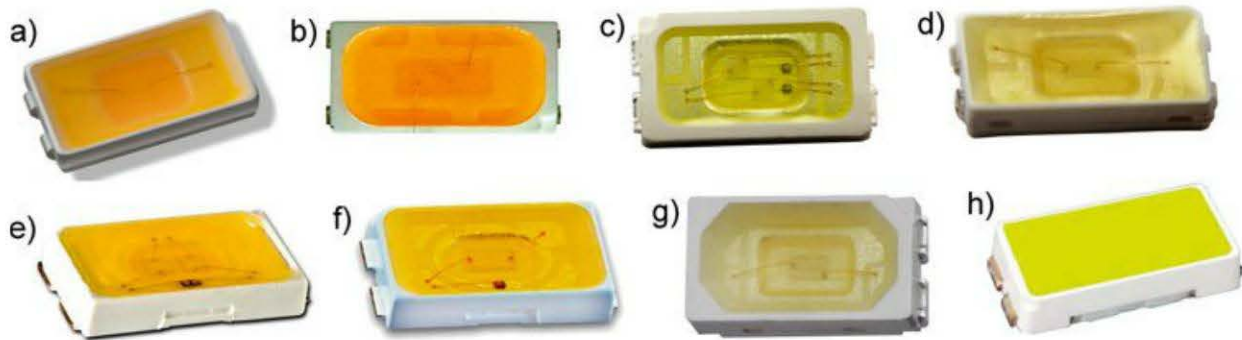


Figure 12.6 – LED de type « 5630 » (a = Philips Lumileds ; b, c = Everlight ; d = Liteon ; e, f = Seoul ; g = Harvatek ; h = Osram).

Une autre raison peut pousser le fabricant du luminaire à opter pour des LED de type « 5630 » : c'est la luminance. En effet, afin de limiter l'éblouissement (un tube fluorescent standard se situant autour de 10 000 à 20 000 cd/m²), on peut multiplier le nombre des points source de plus faible luminance unitaire ce qui permet d'augmenter la surface apparente de la source de lumière, de diminuer la luminance moyenne et de maintenir le flux émis (notamment lorsqu'un diffusant translucide de faible absorption est utilisé).

Dès que la puissance lumineuse nécessaire doit être plus importante ou que le luminaire possède des propriétés thermiques moins bonnes, il est préférable de choisir des LED de puissance, capables de supporter des températures avec lesquels les boîtiers de type « 5630 » ne sont pas en mesure de fonctionner correctement tout en maintenant les performances, notamment la durée de vie.

12.2.3 Éclairage avec problématique d'isolation électrique

Il est impératif de mettre en œuvre une dissipation thermique efficace dans tous les cas de figure et lorsque le système ne permet pas de monter les LED sur un circuit imprimé de type aluminium, il faut réaliser des via thermiques (sorte de conduits de chaleur) constitués de trous métallisés qui traversent le circuit imprimé en FR4 (type d'époxy), et qui conduisent la chaleur dissipée de l'une des faces du circuit imprimé vers l'autre face (figure 12.7).

12.2 Choix de la technologie LED appropriée

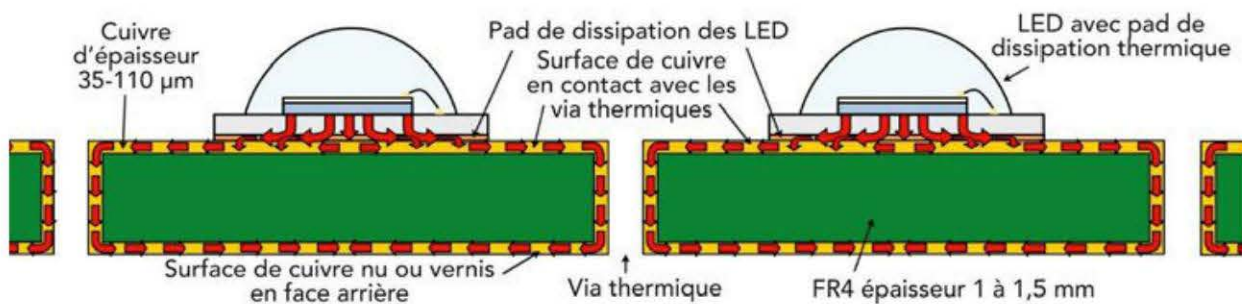


Figure 12.7 – Méthode de dissipation de la chaleur dégagée par les LED à l'aide de vias thermiques.

Cette technique déporte le dégagement de chaleur de la face avant vers la face arrière pour permettre d'extraire cette chaleur dans un second temps grâce à un dispositif conçu à cet effet (dissipateur thermique) ou par l'intermédiaire du boîtier du luminaire directement s'il est conducteur de chaleur.

En fonction de la méthode de contact thermique entre la face arrière du circuit et le dispositif de dissipation, le type de LED va être différent. Le contact se fera par l'intermédiaire d'une interface thermique complémentaire, prise en sandwich entre la face arrière du circuit et le dispositif de dissipation, et isolante électriquement. Tous les types de LED peuvent convenir, y compris les LED qui n'ont pas de pad de dissipation thermique (figure 12.8) et dont la cathode et/ou l'anode fait office de patte de dissipation de la chaleur.

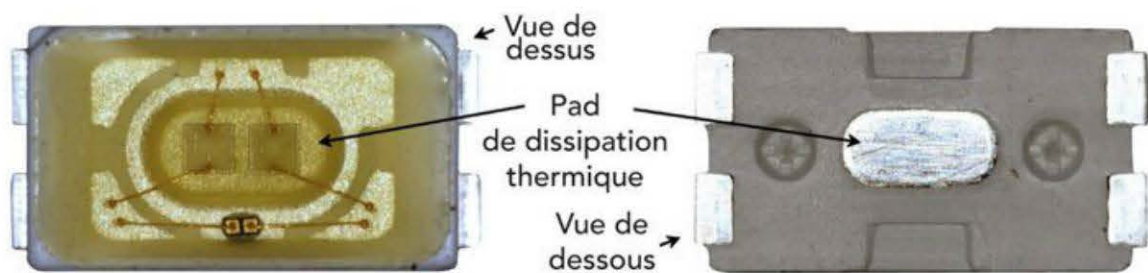


Figure 12.8 – Boîtier de LED type 5630 avec pad de dissipation thermique (Seoul Semiconductor).

Si au contraire, la carte contenant les LED a vocation à être en contact directement avec une platine en métal (pour des raisons économiques par exemple), le vernis déposé sur la face arrière de la carte à LED, même s'il est de bonne qualité, peut ne pas suffire à assurer une isolation électrique suffisante, et des courts-circuits sont possibles. De plus, l'épaisseur de vernis (quelques microns) peut être le lieu de micro-arcs électriques, dans des zones où le vernis aurait été mis de façon non uniforme. Dans ce cas-là, l'idéal est de monter sur la carte des LED qui possèdent

un pad de dissipation thermique isolé électriquement, qui permet non seulement de mettre en œuvre cette méthode de circuit FR4 double couche avec vias thermiques, mais qui permet également de réunir l'ensemble des surfaces dédiées à la dissipation (que ce soit dessus au niveau des composants ou en dessous) et d'augmenter ainsi la surface globale totale de dissipation avec une meilleure uniformité de la chaleur sur la carte.

12.3 Modes d'intégration et technologies associées

Les LED sont loin d'être de « simples » ampoules à incandescence capables d'être intégrées dans un système même très simple, sans aucune précaution particulière. Avec la technologie LED, c'est tout l'inverse qui se passe. Il faut réfléchir à l'impact qu'aura l'environnement sur les performances des LED, et donc comprendre leur comportement face aux agressions extérieures pour choisir des solutions techniques adaptées.

En demandant de meilleures performances et de nouvelles fonctionnalités aux LED, nous avons monté d'un cran le niveau technique de création de luminaire au sens large, tant du point de vue de la qualité de la lumière émise (qualité colorimétrique, photométrie et répartition lumineuses, maintien des performances sur le long terme), que du point de vue de la complexité du design de l'alimentation électrique (qui devient électronique). L'arrivée des LED a obligé certains fabricants de luminaires classiques qui maîtrisaient les outils de pliage et de moule mécanique et étaient capables de réaliser des luminaires remplissant des fonctionnalités simples en termes de photométrie, à revoir leurs méthodes d'intégration et de design électrique et thermique.

12.3.1 Mise en œuvre mécanique

La grande différence mécanique qu'il y a entre les sources de lumière traditionnelles et les LED, c'est que les LED ne possèdent pas de culot et elles sont obligatoirement mises sur un support, généralement plat, qui doit assurer la fonction de fixation mais aussi d'alimentation et de dissipation thermique. Seuls les tubes fluorescents ont aussi des problèmes thermiques à gérer (leur rendement peut varier de plus de 20 à 30 % si les températures sont trop hautes ou trop basses), les autres types de sources (à décharge ou à incandescence) sont moins sensibles à la température ambiante et ont souvent été intégrés avec des précautions pour atteindre les normes de sécurité pour les utilisateurs.

Les LED ont donc ce désavantage de ne pas posséder de culot, même si cela laisse libre cours au design et à la création.

Lors des intégrations mécaniques, différents systèmes de fixation peuvent être utilisés (vis auto perforante, vis pop, vis avec écrou, collage par des résines conductrices, collage par double face thermique). Ils impliquent des mises en œuvre des cartes à LED différentes, notamment au niveau du design électronique. Ainsi, il faut éviter de faire passer des pistes de courant à proximité des trous de fixation. De même, si la carte est mise en contact avec le fond du luminaire (lui-même bon contact électrique) il faut mettre en œuvre une stratégie d'isolement électrique. Cela peut se faire par l'utilisation de circuits imprimés en aluminium, ou bien par un design de la carte électronique de type FR4 double face (figure 12.7) intégrant des LED dont le pad de dissipation thermique sera neutre puisqu'en contact avec l'arrière de la carte.

Des circuits en aluminium détournés et pliables peuvent simplifier l'intégration mécanique. Développés au milieu des années 2000, ils sont mis en forme une fois les LED et les composants électroniques montés et soudés dessus.

12.3.2 Contraintes thermiques : méthodes de dissipation et de régulation

En première approche, il est difficilement concevable dans des applications d'éclairage, d'intégrer des systèmes actifs de dissipation de la chaleur dans la mesure où les coûts des systèmes sont appelés à être relativement bas. De plus, la durée de vie des LED doit être en adéquation avec celle du système qui assure cette fonction de dissipation. Le rendement peut être diminué de façon importante à cause d'une dissipation thermique active. Il est toutefois possible d'utiliser de tels systèmes et de nouveaux types d'extraction d'air chaud ont vu le jour (ventilateurs à membranes par exemple).

Systemes passifs

Par définition, ce sont des systèmes qui ne consomment pas d'énergie.

Les phénomènes physiques auxquels ils font appel sont connus depuis longtemps (convection libre ou forcée, systèmes à changement de phase), et l'industrie de l'électronique et des ordinateurs en particulier a développé ces solutions depuis plus de 15 ans maintenant. L'objectif est d'extraire de la puce semi-conductrice la chaleur qu'elle dégage.

Pour cela, le boîtier externe de l'application d'éclairage peut être mis à contribution. Il peut être constitué de matériaux conventionnels dissipant la chaleur (aluminium, fonte, acier) ou éventuellement d'autres matériaux comme des plastiques ayant des propriétés de dissipation intéressantes (conductivité thermique de 1 à 2 W/m.K et parfois même jusqu'à 5 W/m.K). Ces plastiques bien que 50 à 150 fois moins conducteurs que l'aluminium sont 5 à 20 fois meilleurs conducteurs que des plastiques standard.

L'utilisation de dissipateurs complémentaires, la plupart du temps en aluminium, est le moyen le plus simple et le plus répandu. L'aluminium n'est pas l'unique matériau avec lequel sont réalisés les dissipateurs, et l'on peut également avoir des dissipateurs en plastiques (figure 12.9.a), ou en céramique dans lesquels le circuit imprimé, au lieu d'être collé au dissipateur, est directement dessiné et gravé sur le dissipateur lui-même (figure 12.9.b).

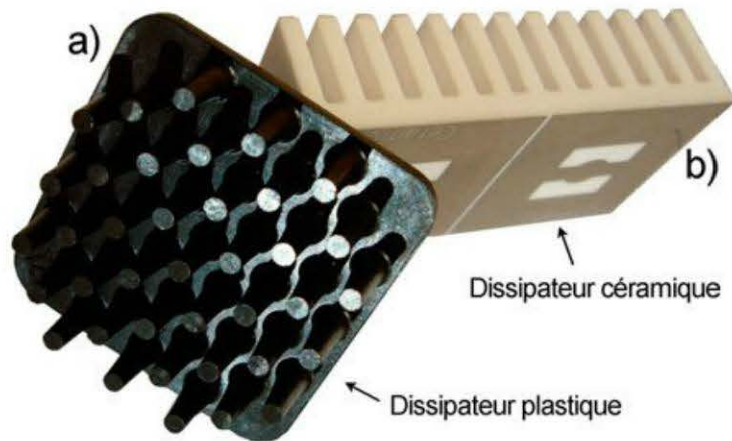


Figure 12.9 – Dissipateurs en plastique (a) et en céramique (b).

Le principe de fluide caloporteur est une des solutions employées depuis plusieurs années dans les ordinateurs portables, avec d'un côté le microprocesseur collé contre le système caloporteur (dont le corps est souvent constitué d'un ou de plusieurs tubes en cuivre), et de l'autre un dissipateur équipé d'un ventilateur qui évacue vers l'extérieur les calories qui ont été apportées par le fluide. C'est le même principe qui est mis à contribution : la chaleur dégagée par la matrice de LED ou par la LED multipuce (respectivement figures 12.10.b et 12.10.c) transite vers l'arrière du module (partie plus froide), puis elle est évacuée par convection libre dans l'atmosphère avec laquelle le dissipateur est en contact.

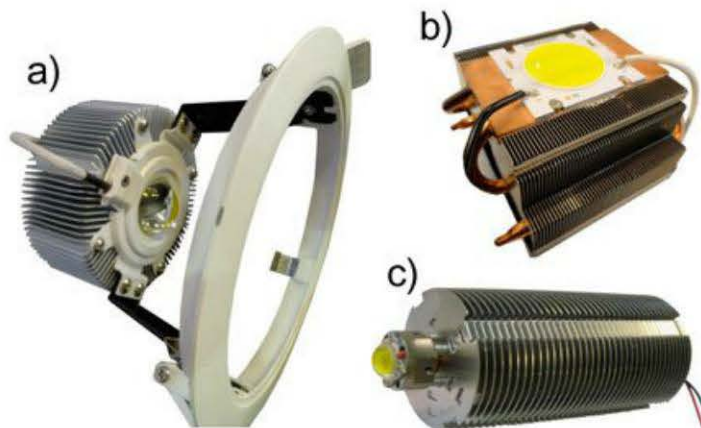


Figure 12.10 – Modules LED avec dissipateur seul (a) ou dissipateur couplé à un système à fluide caloporteur (b et c).

Systèmes actifs

Il faut dissocier les systèmes électroniques qui détectent une variation de température des systèmes qui agissent activement ou passivement sur l'application d'éclairage. Un système qui détecte un accroissement de température et qui diminue le courant envoyé dans les LED, ne peut pas être considéré comme actif puisqu'il ne dépense quasiment pas d'énergie (quelques milliwatts pour la détection et quelques milliwatts supplémentaires pour le pilotage du courant à une valeur différente).

Il existe des systèmes qui fonctionnent en mode continu sans contrôle de la température, et des systèmes qui intègrent une régulation thermique (même sommaire).

Les ventilateurs se sont améliorés au fil des années, tant du point de vue de la consommation et de leur rendement, que du point de vue du bruit. Couplé à un dissipateur à ailettes, c'est le moyen de dissipation qui est le plus employé (faible coût, rendement correct, durée de vie acceptable).

Au milieu des années 2000, de nouveaux types de ventilateurs à base de membranes vibrantes ont été développés (Nuventix), permettant de créer un flux d'air continu autour du dissipateur avec lequel ils sont couplés.

Régulation thermique

C'est un système, électronique la plupart du temps, qui détecte un niveau de température non conforme et qui agit en conséquence, soit en activant un autre système (ventilateur ou autre dissipateur à effet Peltier), soit en agissant sur le courant d'alimentation du système à LED. Certains drivers (petits composants dédiés au contrôle du courant dans les LED) ont intégré à leurs fonctionnalités un contrôle du courant en fonction d'une température qu'ils sont en mesure de détecter par le biais d'une résistance thermique variable (dont la valeur change avec la température dans laquelle elle est plongée).

Il existe également des systèmes plus simples qui se contentent de couper l'alimentation. Ce sont des fusibles thermiques, constitués d'un matériau qui lorsque la chaleur devient critique (il existe différents niveaux), coupent le circuit. Certains systèmes peuvent être réarmables.

12.3.3 Gestion électronique : comment alimenter un système ?

Le chapitre 8 a déjà abordé le sujet du mode idéal de pilotage des LED à savoir un contrôle en courant de l'alimentation. Cela ne signifie pas que dans des cas particuliers, un pilotage en tension n'est pas possible, mais il reste (et doit rester) anecdotique. Toutefois, le contrôle en tension étant très peu cher, il est présent sur certains systèmes d'éclairage ou de rétro-éclairage, lorsque le prix du produit final (le plus bas possible) est le seul objectif du fabricant. Il se compose parfois d'une

simple résistance en série avec les LED à alimenter, avec un rendement moyen voire médiocre et ne réalisant qu'une limitation du courant envoyé dans les LED, limitation dépendante de la tension appliquée au système donc très aléatoire en termes de valeur. À titre d'exemple, nous pouvons citer un système à trois LED blanches dans lequel ce type de régulation a été réalisé (une simple résistance en série avec les trois LED), qui ne fait qu'appliquer un décalage à la courbe de fonctionnement du système s'il n'avait pas cette résistance en série (le comportement électrique d'une résistance étant linéaire, quasi indépendamment de sa température). Pour donner quelques ordres de grandeurs, de tels systèmes peuvent être à l'origine d'augmentation de courant de 200 à 500 % entre le démarrage du système à froid et le courant constaté après que la température se soit stabilisée.

Modes de pilotage en tension

Son principal intérêt est son coût.

Son principal défaut est son absence de régulation du courant face à une augmentation de température ou à une augmentation de la tension d'alimentation du système.

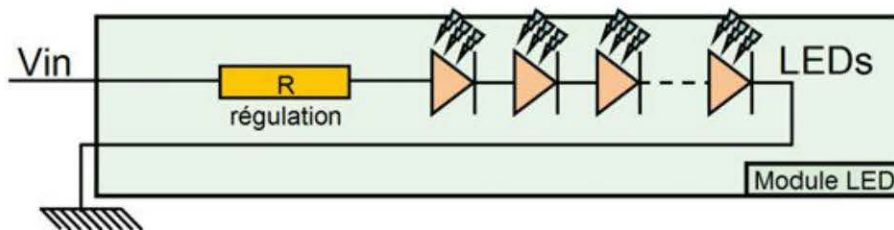


Figure 12.11 – Pilotage en tension (simple résistance en série avec les LED).

Même s'il est à utiliser avec précaution (et souvent à éviter), ce mode de fonctionnement est utilisé par de nombreux produits. Pour les systèmes de voyants lumineux, utilisant les LED à très faible courant et très largement en dessous de leur courant nominal, il convient parfaitement. Mais il est malencontreusement utilisé aussi dans le domaine de l'éclairage et/ou du « surlignage », comme par exemple les bandeaux de LED, mettant en œuvre des LED en série sur une bande souple et la plupart du temps noyées dans une silicone souple elle aussi. Ces systèmes dissipent très mal la chaleur qu'ils dégagent, surtout les LED noyées dans la silicone, qui ont tendance à chauffer beaucoup plus.

Modes de pilotage en courant

La régulation en courant peut se faire de plusieurs manières différentes, la première consiste à monter un régulateur de tension en source de courant (figure 12.12) avec une boucle de contrôle qui s'efforce de maintenir une tension d'environ 1,25 VDC.

12.3 Modes d'intégration et technologies associées

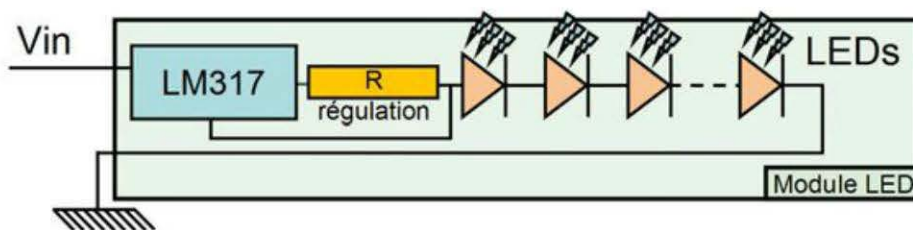


Figure 12.12 – Pilotage en courant par un régulateur de type LM317.

Pour cela, il régule le courant qu'il débite en sortie pour obtenir cette tension de régulation interne. Il suffit de mettre dans cette boucle de régulation la résistance adéquate pour que le courant qui traverse cette résistance et les LED soit régulé et égal à :

$$i = 1,25 / R_{régulation}$$

Les avantages de cette méthode sont nombreux : elle est très robuste, d'un coût relativement faible (quelques dizaines de centimes d'euros pour quelques watts de contrôle), simple (nécessite un régulateur et une résistance de régulation, avec parfois un condensateur supplémentaire), précise (à quelques % près du courant souhaité), et stable (stabilité du courant régulé même avec des variations de la température et de la tension d'entrée).

Son principal inconvénient reste le fait que la puissance qui n'est pas injectée dans les LED est absorbée. En effet, en envoyant un courant constant dans les LED (qui ont une tension relativement stable à leurs bornes) si la tension d'entrée devient trop importante pour le courant fixé, son fonctionnement interne fait qu'il consomme par effet Joule ce surplus de puissance.

Autre défaut, ce régulateur a besoin d'une tension de fonctionnement qui parfois dépasse 1,5 à 2 V, et si l'on fait la somme entre cette tension et celle aux bornes de la résistance de régulation (qui elle est fixe et égale à 2,25 V environ), le système hors LED a besoin d'une tension souvent supérieure à 3 V pour fonctionner (et donc réguler). Pour des tensions d'alimentation système à 12 V, il est donc parfois difficile voire impossible d'alimenter trois LED blanches à leur courant nominal car la tension de la régulation plus celle des LED dépasse alors 12 V. Il faut noter toutefois qu'il existe des régulateurs dits *low drop*, qui possèdent une tension de fonctionnement plus proche de 0,5 à 0,7 V (voir en dessous), et qui permettent ainsi de réguler le courant d'une branche de 3 LED en série. La tension totale du système de régulation et des 3 LED blanches est alors proche de 11 V (0,7 V pour le régulateur, 1,25 V pour la résistance de régulation et $3 \times 3,1$ V pour les LED) ce qui permet un fonctionnement sous 12 V d'alimentation.

En ce qui concerne le rendement, il peut atteindre 75 à 80 % si la tension d'entrée n'est que de quelques dixièmes de volt au-dessus de celle nécessaire au système.

Un dernier point à noter sur ce type de système de façon générale est celui de sa stabilité, y compris en dessous de la tension nécessaire au régulateur pour fonctionner convenablement. Si la tension d'entrée ne permet pas de réaliser la régulation en courant, le régulateur joue le rôle d'une simple résistance en série avec les LED.

La seconde méthode consiste à mettre en œuvre un système un peu plus complexe souvent appelée « driver de LED » (figure 12.13), pour lequel le plus souvent 5 à 8 composants (condensateurs, inductances, transistors) sont nécessaires en plus du composant (driver) lui-même.

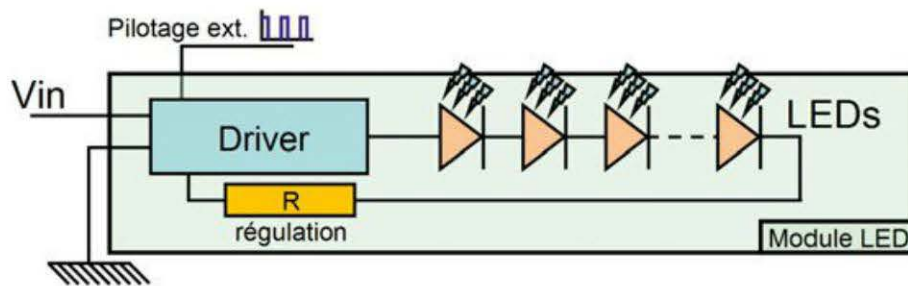


Figure 12.13 – Pilotage en courant par un « driver de LED ».

Différents types de drivers existent, mais ils ont globalement tous un mode de fonctionnement commun : ils réalisent le découpage de la puissance d'entrée pour envoyer vers les LED « une moyenne » de ce découpage adaptée au besoin défini par la résistance de régulation. Autrement dit, il s'agit d'une adaptation de puissance : d'un côté (en entrée), il y a une tension fixée et un courant disponible (et variable) fournis par l'alimentation, et de l'autre, en sortie, c'est le courant qui est fixé et le driver s'arrange pour s'adapter à la bonne tension des LED.

Par exemple, nous pourrions avoir dans certains cas du 12 V en entrée pour n'alimenter qu'une seule LED. Si la carte a été définie pour alimenter la LED à 400 mA, cela signifie que la puissance moyenne consommée par la LED sera d'environ 1,3 à 1,4 W. Le driver va alors convertir le 12 V en entrée sous un courant probablement de 100 à 130 mA, en tension adéquate pour assurer la régulation en courant à 400 mA.

Son mode de fonctionnement lui permet d'atteindre des rendements proches de 95 % (voire plus), ce qui lui confère un avantage conséquent lorsque le rendement global du système est important.

Il est toutefois peu avantageux en termes de coût car pour plusieurs milliers de cartes, la fonction peut atteindre 1,5 à 2 €, achats et pose des composants compris. Dans certains cas toutefois il permet de réduire les coûts des autres parties du luminaire (utilisation de batteries plus petites, gain sur la consommation énergétique).

12.4 Développements récents de modules LED

Les LED sont des composants électroniques à intégrer dans les solutions d'éclairage et le niveau d'intégration nécessaire requiert parfois la maîtrise de techniques et de savoir-faire qui implique des investissements importants. D'un autre côté, la standardisation permet à de grands groupes de prendre la main sur des technologies en fabriquant des produits semi-finis en grandes quantités atteignant ainsi des prix très bas tout en maintenant un niveau de qualité acceptable. Ce processus de standardisation a démarré notamment par le biais de consortiums comme le consortium Zhaga qui réunit plus de 200 entreprises importantes du marché de l'éclairage ainsi que des fabricants de LED.

12.4.1 Principe, description et avantages d'un module à LED

Il s'agit d'une carte électronique (circuit imprimé) sur laquelle sont montées un certain nombre de LED, avec ou sans régulation de courant (figure 12.14.c). Cette carte peut comporter des composants supplémentaires qui servent à réaliser une régulation en température (comme une résistance thermique variable), ou encore un connecteur pour faciliter la connectique. Enfin, des lentilles peuvent être fixées à la carte soit par le biais de double face (figures 12.14 a et b), ou bien grâce à des picots plastiques à insérer en force dans des trous prévus à cet effet dans la carte. La carte ainsi réalisée possède en général des trous de fixation autour desquels aucun composant n'est soudé afin de faciliter le montage à l'aide de vis ou de rivets.

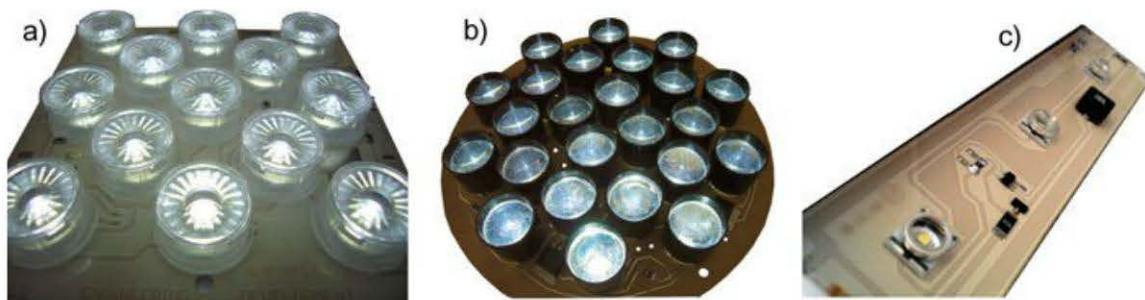


Figure 12.14 – Modules LED sans boîtier plastique.

Un niveau d'intégration peut être réalisé en mettant en œuvre un boîtier plastique dans lequel est intégré le module LED. Les modules LED de type Zhaga par exemple, possèdent une finition complémentaire en plastique, sur laquelle peuvent venir se fixer des lentilles complémentaires. Cette intégration supplémentaire permet aux utilisateurs finaux de monter ce type de module de façon beaucoup plus simple dans leur luminaire.

12.4.2 Cas particulier des systèmes à luminophores déportés

Ces modules (figure 12.15) sont en général constitués d'une matrice de LED bleues, d'un boîtier mécanique qui crée une distance suffisante entre les LED et le luminophore pour assurer une homogénéité correcte sur la surface du luminophore (et obtenir un bon rendement), et d'un dissipateur en face arrière.

Les avantages de ces systèmes sont intéressants, mais des contraintes limitent les développements spécifiques et mettent les utilisateurs dans une relative position de dépendance et de rigidité technique.

Pour commencer par les points positifs, nous pouvons dire que ces types de modules sont simples d'utilisation et permettent des designs basiques, rapides et efficaces lorsque les contraintes de l'application ne sont pas importantes (notamment en termes de photométrie, car la source étant étendue, sa mise en forme précise peut être délicate).

La qualité colorimétrique peut être plus facilement maîtrisée en raison d'une part, du déport du luminophore qui chauffe beaucoup moins que lorsqu'il est proche de la puce semi-conductrice, et d'autre part parce que le volume en dessous du disque de luminophore mixe les faisceaux unitaires des LED excitant ainsi ce luminophore de façon uniforme.

En termes d'éblouissement, c'est une source relativement étendue, ce qui lui confère un avantage par rapport aux sources traditionnelles. Néanmoins, utilisé sans autre forme de diffusion ce type de module présente une luminance importante ($> 150\,000\text{ cd/m}^2$). De plus, puisque le luminophore est noyé dans un plastique qui fait également office de diffusant, la quantité de luminophore nécessaire est importante comparée à celle qu'il aurait fallu déposer uniquement sur les LED.

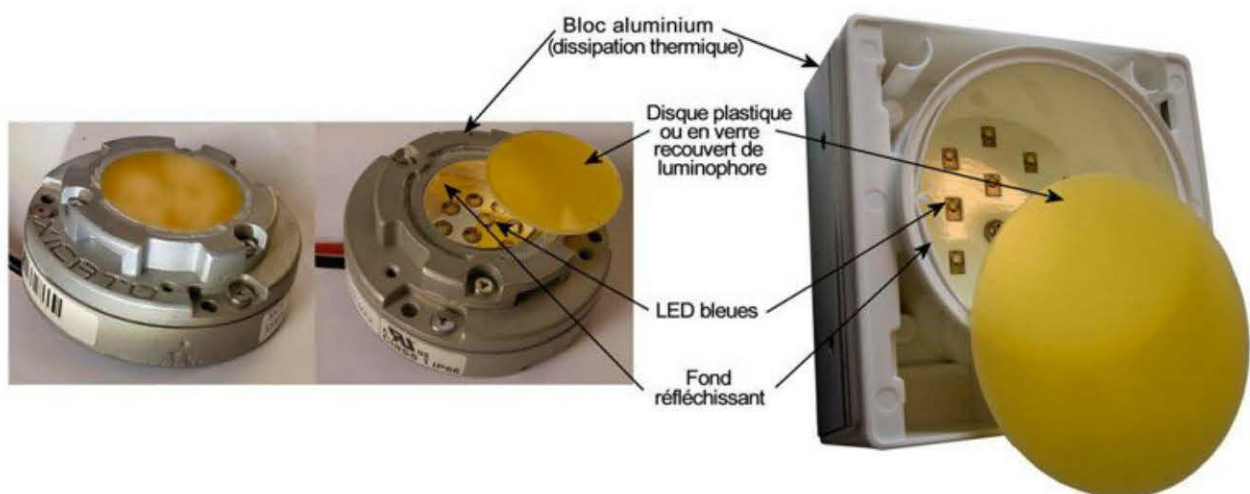


Figure 12.15 – Modules LED à luminophore déporté (Xicato-Philips).

12.4 Développements récents de modules LED

Enfin, comme tout produit semi-fini, ses évolutions ultérieures ne sont que difficilement prévisibles et sont soumises aux aléas du marché et des décisions des fabricants. Il faut donc être conscient qu'intégrer ce type de produit dans une solution d'éclairage, pendant une période où les standards et les normes sont en cours de réalisation, comporte certes des avantages, mais aussi une part de risque pour les évolutions futures des produits.

13

Marché, acteurs et perspectives

Après avoir détaillé au cours des chapitres précédents tous les aspects « technologiques » des LED, il est utile d'avoir aussi une vision « économique » de ce marché.

Ce chapitre présente les principales sociétés asiatiques, américaines et européennes qui conçoivent et commercialisent des LED. Il donne des tendances sur les coûts de production et prend le risque d'avancer quelques prévisions pour ce marché dans les années à venir (2015-2018).

Le taux de croissance du marché des LED (vente de composants) toutes applications confondues était d'environ 10 % par an entre 2009 et 2012 d'après *Strategies Unlimited* (groupe PennWell), l'un des cabinets spécialisés en veille stratégique dans le domaine des LED. Cette croissance s'est amplifiée entre 2013 et 2014, et toujours d'après de même cabinet, elle serait de 13 % environ entre 2015 et 2018.

Un récent rapport réalisé par la société Navigant Consulting Inc. [13] en 2011 pour le gouvernement américain, prévoit une économie d'énergie potentielle grâce à l'apport des LED dans certains marchés de niche de l'ordre de 400 TWh.

En 2013 et 2014, les applications d'éclairage ont représenté entre 40 et 50 % des revenus pour les fabricants de LED, information partagée par les cabinets *LEDinside* et *Strategies Unlimited*. Ces mêmes acteurs estiment que la croissance uniquement pour la partie éclairage sera de plus de 30 % par an entre 2015 et 2018.

C'est dans ce contexte d'évolution et de croissance que nous allons présenter les acteurs principaux (fabricants de LED) et les perspectives de développements de nouveaux produits et de nouvelles applications. Les notions de coût des composants seront abordées afin de permettre de valider la maturité technico-économique de ces différentes applications.

13.1 Avantages et inconvénients des LED comparées aux autres technologies d'éclairage

L'un des sujets rarement abordés par les utilisateurs et les concepteurs est celui du dimensionnement très fin que permettent les LED. En effet, certaines intégrations de sources de lumière dans des luminaires sont parfois faites sans tenir compte réellement du besoin en flux lumineux (le concepteur s'assurant toutefois que le minimum imposé était respecté), mais plutôt en évaluant la disponibilité (et le prix) de ces sources. Les développements à LED, avec une unité de base qui consomme entre 0,1 et 1 W par composant sont faits en tenant beaucoup plus compte du besoin réel de l'application. Le prix des composants a joué un rôle essentiel dans cette démarche, et aujourd'hui encore, il constitue un facteur déterminant lors du design du produit. Lorsqu'il s'agissait de réaliser l'intégration dans un luminaire d'une lampe à incandescence coûtant quelques dizaines de centimes, dans la mesure où la puissance de la lampe n'influencait que très peu le prix de revient du produit final, de nombreux systèmes ont été surdimensionnés et fournissaient beaucoup plus de lumière que nécessaire (et consommaient en proportion). Les LED présentent l'avantage d'optimiser la solution en fonction du besoin et elles sont suffisamment flexibles (et stables en performances) pour assurer à partir d'un même design des fonctionnalités différentes (une augmentation de la puissance de 10 à 20 % et donc une augmentation de flux est souvent possible, avec quelques précautions ou quelques compromis).

La compacité est un autre atout majeur des LED, permettant la réalisation de systèmes d'éclairages très fins (certaines LED émettant par le côté ont des épaisseurs inférieures au millimètre) ou encore peu profonds.

Le spectre d'émission des LED est relativement monochromatique (largeur spectrale étroite de l'ordre de quelques nanomètres, quelques dizaines tout au plus). De ce fait, leurs couleurs sont saturées comparées à de nombreuses autres sources de lumières de spectre plus large. Cela peut constituer un avantage dans certains cas de figure, mais c'est assez souvent un souci dans la mesure où le but premier en éclairage est de réaliser des mises en lumière d'objets lumineux qui nécessitent des plages en longueurs d'onde relativement larges. Néanmoins, lorsqu'il s'agit de réaliser des effets lumineux (et colorés) et notamment pour des applications de décoration, les qualités spectrales des LED sont alors intéressantes.

En termes de rendement au sens large (rendement lumineux corrélé au coût de revient), s'il fallait donner un classement et y positionner la technologie LED, nous pourrions dire qu'en 2015, elle se situe aujourd'hui parmi les sources de lumière les plus efficaces, voire la plus efficace dans de nombreux domaines. Dans certains cas de figure, elles sont devenues quasi indispensables et un retour aux technologies précédentes serait très difficile (rétro-éclairage d'écrans ou de claviers, par exemple), dans d'autres cas,

13.1 Avantages et inconvénients des LED...

elles restent une solution alternative présentant des avantages et des inconvénients, mais néanmoins en forte concurrence avec les sources traditionnelles, surtout si les calculs de retour sur investissement se font sur plusieurs années, en intégrant les problématiques de coût de remplacement (entretien) et de « continuité de service » (certains bâtiments ayant depuis des mois des tubes fluorescents non remplacés, donc avec des éclairages non conformes à la réglementation). Enfin, dans de nombreuses applications, en particulier pour l'éclairage général et l'éclairage public, dans la mesure où la notion de qualité colorimétrique est aussi liée à des habitudes sociales, leur pertinence était plus que discutable jusqu'en 2011-2012. Mais les développements des deux dernières années 2013-2014 ont montré la capacité de cette technologie, réduisant l'écart consenti avec des technologies plus traditionnelles. Si l'on prend par exemple le cas de l'éclairage des rues réalisé à l'aide de lampes à décharge de type sodium, les LED ont su s'adapter en proposant des spectres d'émission de blanc très chaud (autour de 2000-2500 K), basé sur le principe de conversion avec luminophore (donc de durée de vie intéressante par rapport aux technologies de type ambre).

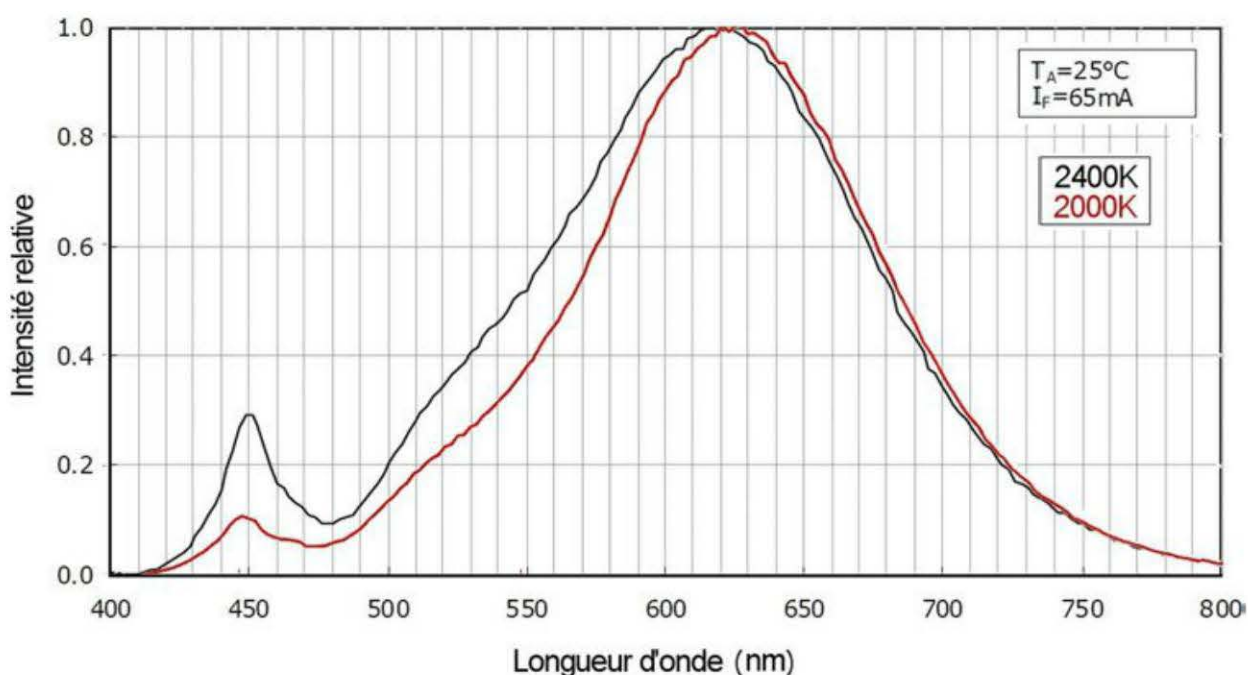


Figure 13.1 – Spectre de LED réalisés à partir de luminophores particuliers pour atteindre des températures de couleur (CCT) de 2000 K et 2400 K (Nichia).

Des modèles de LED ont même été développés proposant des spectres large bande centrés autour de 600 nm, venant se superposer de façon quasi parfaite avec des spectres de lampes sodium haute pression (HPS). Ces modèles utilisent eux-aussi le principe de conversion de lumière bleue à partir d'une luminophore (appelés « pc-Amber » pour la couleur ambre prépondérante dans leur spectre), et ont

ainsi des durées de vie bien supérieures aux technologies de LED ambre plus traditionnelles, générant le flux lumineux à partir d'un semi-conducteur de type GaAsP/GaP.

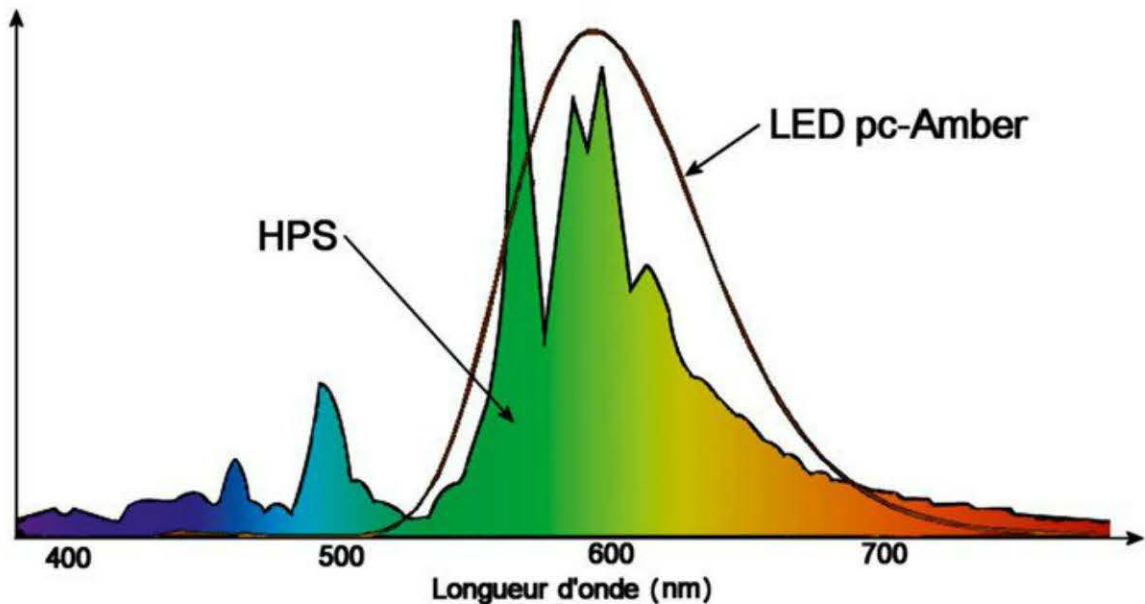


Figure 13.2 – Spectres superposés de lampes de type HPS (éclairage public traditionnel) et de LED de type pc-Amber disponibles chez différents fabricants.

L'aspect basse tension de fonctionnement en mode continu constitue un avantage conséquent pour les applications d'éclairages autonomes fonctionnant sur batterie, mais c'est la plupart du temps un inconvénient en éclairage standard puisque les tensions disponibles aujourd'hui sont comprises entre 110 et 220 V et qui plus est alternatives. Toutefois, ce fonctionnement en basse tension pourrait présenter des intérêts pour la sécurité dans le bâtiment. Des convertisseurs électroniques existent également pour les technologies d'éclairage à décharge, ce qui rééquilibre un peu la difficulté imposée aux différentes technologies, mais celle-ci reste néanmoins plus importante pour les LED.

La surface très ponctuelle de la zone d'émission lumineuse des LED pour des applications nécessitant un flux lumineux faible mais très focalisé (éclairage pour applications d'endoscopie médicale, liseuses en transport en commun, lampes frontales, feux diurnes des voitures), permet de réaliser un système optique très performant. Les surfaces lumineuses étendues étant bien plus difficiles à mettre en forme (en termes de faisceau). Mais ces applications d'éclairage représentent un très faible pourcentage (en volume et en chiffre d'affaire). Puisque les objectifs principaux de la technologie LED sont non seulement de proposer de nouvelles applications d'éclairages impossibles ou difficilement réalisables auparavant avec

13.1 Avantages et inconvénients des LED...

les sources plus conventionnelles, mais aussi de croître et d'atteindre des domaines comme l'éclairage général où les quantités de lumière sont importantes et les luminances (ce qui définit en quelque sorte l'éblouissement des sources lumineuses elles-mêmes) d'un niveau faible (maximum 7 000 à 8 000 cd/m²), cette ponctualité de la source est une vraie problématique dont il faut tenir compte.

La qualité d'un éclairage général, et particulièrement en intérieur des bâtiments et des maisons individuelles, se mesure certes par son rendement, mais aussi et avant tout par la qualité de la mise en lumière de l'environnement. La notion d'éblouissement, en particulier de la source lumineuse, est primordiale dans la prise en compte des critères de qualité d'un éclairage. Elle fait partie intégrante des recommandations et des règles à respecter (normes) pour la réalisation des luminaires. C'est la raison pour laquelle depuis plusieurs années, les fabricants de LED et de modules LED tentent de réduire cette brillance due à la ponctualité de la source de différentes manières (matrice de LED, technologie de luminophore déporté ou encore diffuseur à haut rendement), afin de pénétrer le marché de l'éclairage général, ce qui est en passe d'être réalisé en 2015.

Enfin, la qualité colorimétrique des blancs émis par les LED s'étant considérablement améliorée ces dernières années (figure 13.3), nous pouvons dire qu'elles rivalisent largement voire surpassent aujourd'hui les sources d'éclairage de type fluorescence (tubes ou lampes compactes).

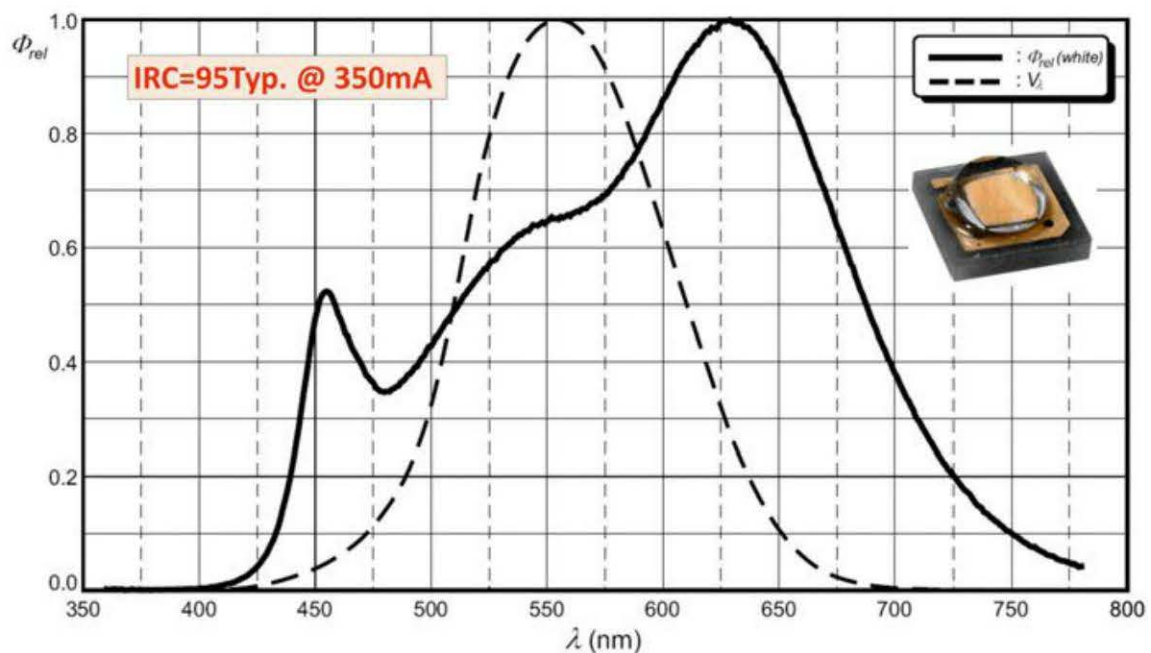


Figure 13.3 – Spectre d'une LED d'IRC = 95 (Osram).

En 2015, comparer la technologie LED aux technologies à incandescence, même si ce type de source est en train d'être banni de notre environnement, permet de se rendre compte de la progression de cette technologie. De plus, les normes actuelles (et qui vont certainement perdurer pour 5 ou 10 ans encore sous leur forme originale, ou quasi originale) s'appuient sur des référentiels impliquant fortement les sources à incandescence. Courant 2013-2014, de nouveaux types de lampes à LED ont vu leur apparition, les lampes à filament (figure 13.4.b), notamment développées par EPISTAR pour démontrer la faisabilité (prototypes présentés durant Stratégie in Light, Santa-Clara, en février 2013). Au chapitre 10 (figure 10.19), nous avons présenté ces nouveaux types de lampe dans une certaine continuité des développements récents de COB. C'est effectivement en partie grâce aux COB, mais surtout à la capacité des fabricants de réaliser des puces semi-conductrices de bonne qualité et à des prix très bas. Ainsi, en les intégrant en grand nombre sur ces tiges relativement étroites (2 mm tout au plus), puis en les sous-alimentant fortement, il est possible de créer quelques centaines de lumens avec un rendement proche de 100 lm/W. Mais la grande majorité des lampes à LED dans les prochaines années, ne seront pas de ce type là, dès lors que ce qui prime est le rendement à tout prix, au plus bas prix. C'est en tous les cas le sentiment de l'un des responsables de la R&D au sein de la société Epistar, l'un des leaders mondiaux pour la fabrication de puces semi-conductrices et qui ont mis au point dès 2012 ce type de lampe à filament.

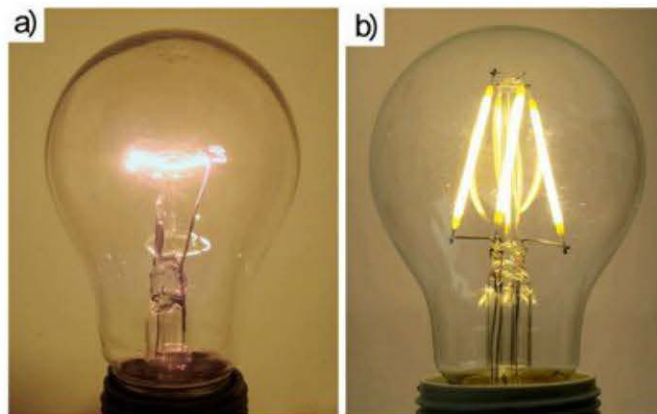


Figure 13.4 – Lampe à incandescence (a) et lampe à filament (b).

13.2 Le marché des LED

Plusieurs phases se sont déroulées pour l'intégration des LED dans des applications d'éclairage (figure 13.5), et la difficulté supplémentaire qu'ont rencontrée les fabricants de LED ainsi que les fabricants de moyens de production face à ces phases différentes, est qu'elles se sont chevauchées en partie dans le temps, rendant plus complexes les prévisions. Le début des années 2000 a été la période des éclairages de

13.2 Le marché des LED

décoration, de balisage ou encore dédiés aux enseignes lumineuses. Dans le domaine de l'aéronautique et des transports, ces années ont également été intéressantes pour réaliser les premières applications à LED et solliciter cette technologie face aux technologies plus traditionnelles (en particulier pour les rétro-éclairages de tableau de bord). À partir de 2003-2004, les LED ont fait leur apparition dans les téléphones portables et ont bénéficié de leur croissance jusqu'en 2007-2008.

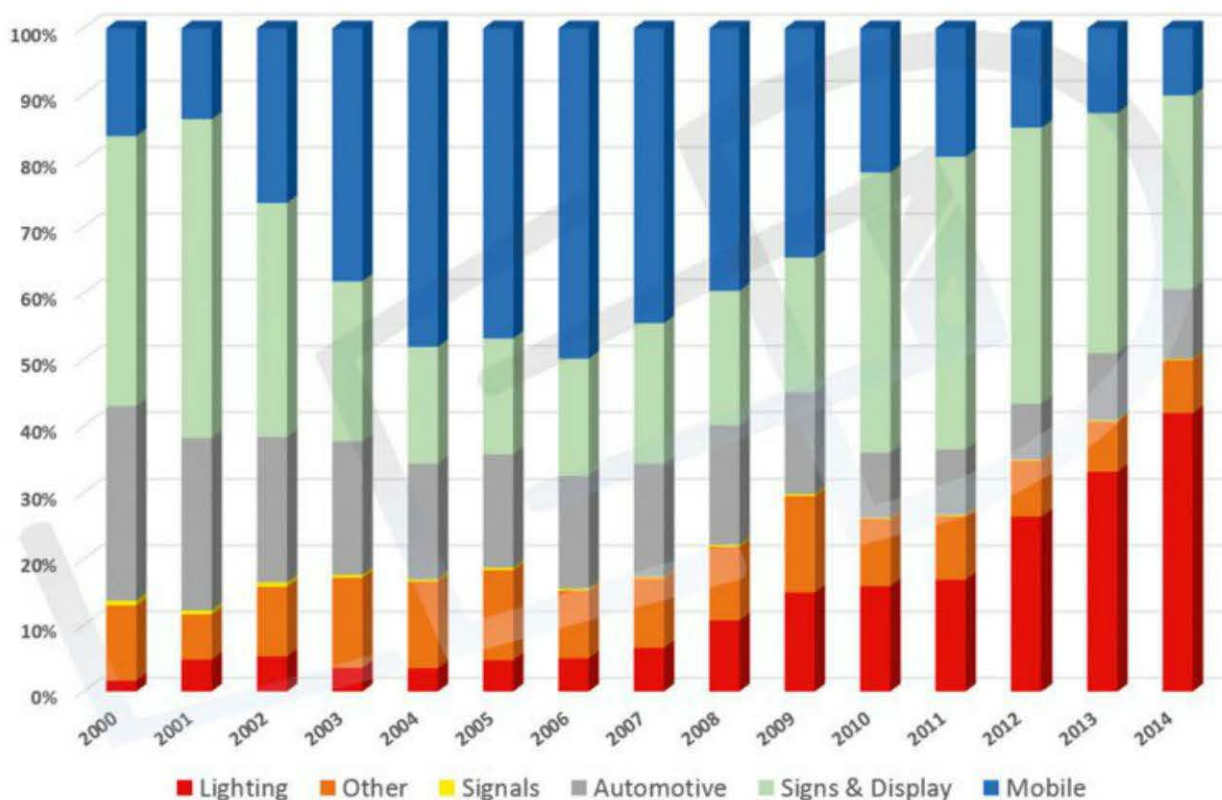


Figure 13.5 – Marché des LED entre 2000 et 2014 en pourcentage (L.E.D.).

Au même moment, les applications de rétro-éclairage pour les ordinateurs se sont fortement développées, entraînant avec elles une forte demande de composants et le marché des LED pour ce type d'éclairage (« notebooks ») s'est accéléré ($\times 10$ entre 2007 et 2010). À partir de 2009, la quantité de LED pour les applications de mobiles a commencé à décroître légèrement mais les ventes de LED se sont en partie équilibrées grâce à la croissance des applications de types « Notebooks ». Moins d'un an plus tard, le marché du rétro-éclairage à LED pour téléviseurs démarrait pour se développer rapidement et connaître un niveau qu'il ne quittera pas jusque dans les années 2012-2013. Toutefois, c'est également à cette période (autour de 2010-2011) que l'augmentation des performances des LED couplée aux améliorations de guides de lumière, ont abouti à une diminution du nombre de composants par dalle rétro-éclairée pour les applications « Notebooks ». Nous sommes passés successivement d'un éclairage sur les 4 côtés de la dalle, à 2 côtés pour enfin aboutir à un éclairage uniquement d'un

seul côté. La tendance a été identique pour les rétro-éclairages de téléviseurs mais l'augmentation des ventes a maintenu les besoins en LED pour cette application-là. Face aux nouvelles applications d'éclairage, les fabricants de LED avaient pour nombre d'entre eux, beaucoup investi dans des moyens de fabrication. Certains fabricants de LED et/ou de COB ne fabriquent pas leurs semi-conducteurs et s'approvisionnent chez de grands groupes appelés « fondeurs » qui fournissent des wafer et qui dans certains cas, louent leurs réacteurs. Ces nouveaux modèles industriels ont accentués quelque peu la difficulté des fabricants de LED à prévoir les besoins. Les investissements sont lourds et se font sur plusieurs semestres alors que l'évolution des performances des LED (et par voie de conséquence, le niveau demandé par les utilisateurs finaux), surtout dans la période 2009-2013, est plus rapide.

En 2011, la demande de LED pour le marché de l'éclairage général a crû de façon importante. Mais cette demande ne représentait que 15 à 20 % du besoin global, les 80 à 85 % autres étant en grande partie absorbés par les applications de rétro-éclairage employant des puces de 300 à 500 μm de côté (LED de moyenne puissance). Néanmoins, cette nouvelle phase (LED dédiées pour le « Lighting ») démarrant rapidement, n'a pas consommé plus de 20 à 30 % des composants fabriqués courant 2011-2013, et les premiers industriels à pâtir de cette croissance globalement plus faible que prévue ont été les fournisseurs de réacteurs d'épitaixie. Les livraisons (et la fabrication) de ces réacteurs (qui réalisent les wafer pour la fabrication des semi-conducteurs) ont fortement diminué entre 2010 et 2012 (baisse supérieure à 60 %). Il faut dire que les prévisions courant 2006-2007 avaient été surévaluées, et le nombre de réacteurs (type GaN) entre 2006 et 2011 a dépassé les 2 000 unités tous diamètres confondus. À partir de 2012, la baisse du besoin pour les applications de rétro-éclairage s'est accompagnée d'une augmentation des applications d'éclairage général, d'abord avec les lampes à LED utilisant dans un premier temps des LED de puissance, puis des LED de puissances intermédiaires (celle-là même employées, à quelques différences près de une à deux années plus tôt pour les rétro-éclairages). Les systèmes comme les tubes à LED ont pris le relai de la croissance entre 2011 et 2013, suivis des dalles lumineuses courant 2012-2014.

Que ce soit pour le grand public ou pour des applications d'éclairage professionnel, des structures de petites et moyennes taille se sont créées et/ou ont orienté leur stratégie vers le développement de produits d'éclairage, ce qui a contribué à la croissance des années 2013-2014. Ces entreprises, qu'elles soient de simples entités commerciales, dimensionnées pour réaliser un certain nombre d'opérations d'intégrations de modules LED dans le produit fini ou enfin, capables de créer et fabriquer des produits d'éclairage, ont développé une expérience dans le domaine de l'éclairage à LED. Toutefois, leur développement notamment en Europe et plus particulièrement en France, s'est fait tardivement. Quelques entreprises ont vu le jour au début des

13.3 Les principaux fabricants de LED

années 2000 en France, alors que déjà aux États-Unis (en particulier), de nombreuses sociétés exploitaient les premières LED de puissance ainsi que les LED de puissance intermédiaires pour des applications d'enseigne lumineuse, de balisage et parfois d'éclairage dans des domaines particuliers. Ce retard s'est accentué avec le développement de sociétés en Asie, beaucoup plus flexibles tant d'un point de vue de la création elle-même que d'un point de vue du fonctionnement au quotidien, avec en plus, une volonté de ces gouvernements d'investir dans des nouvelles technologies, et a fortiori à l'international.

13.3 Les principaux fabricants de LED

On peut différencier plusieurs niveaux d'intégration de la technologie LED (matériaux, semi-conducteurs, encapsulation et méthode de packaging, module LED) et suivant le besoin d'information du fabricant de l'appareil d'éclairage, il est utile (parfois impératif) de pouvoir remonter à cette information, pour évaluer la qualité d'un composant ou d'un module. Nous allons présenter deux groupes de fabricants : les premiers sont spécialisés dans la fabrication de puces semi-conductrices et les seconds produisent des LED (et pour certains d'entre eux fabriquent aussi les puces semi-conductrices qu'ils intègrent dans leur LED).

Il est très difficile d'avoir une connaissance exacte et précise de l'activité des sociétés du semi-conducteur car elles maintiennent une dose de secret autour de leur stratégie. D'une manière générale, les grands fabricants ont souvent (pour ne pas dire toujours) des contrats de collaboration avec des partenaires voire avec certains de leurs concurrents, pour que leur activité ne dépende pas d'une seule source.

Les substrats (saphir ou carbure de silicium en général) sont fabriqués par des sociétés spécialisées telles que Silian Sapphire Corporation par exemple. Les réacteurs (de type MOCVD) qui réalisent la croissance du semi-conducteur sur le substrat sont produits essentiellement par l'Allemand Aixtron, l'Américain Veeco et le Japonais Taiyo Nippon Sanso.

13.3.1 Les fabricants de puces semi-conductrices

Certains fabricants de puces fabriquent également le substrat (comme l'Américain CREE pour le SiC, carbure de silicium), mais la plupart achète ces substrats à des fabricants spécialisés dans le domaine, notamment pour les substrats de saphir.

Les fabricants les plus actifs pour la fabrication des substrats avec les capacités de production les plus importantes sont :

- ▶ Samsung,
- ▶ LG Electronics,

- ▶ Epistar,
- ▶ Seoul Semiconductor,
- ▶ Forepi (Formosa Epitaxy),
- ▶ Lextar,
- ▶ Nichia,
- ▶ Huga Optoelectronics,
- ▶ Sanan Optoelectronics,
- ▶ CREE,
- ▶ Chimei,
- ▶ Sharp,
- ▶ Tekcore.

Ces fabricants, également appelés fondeurs, créent les semi-conducteurs mais ne les découpent pas forcément et vendent leur *wafers* aux fabricants de LED.

Toutefois, certains d'entre eux sont à la fois fabricants de puces semi-conductrices et fabricants de LED, et des relations commerciales croisées peuvent exister entre ces acteurs.

13.3.2 Les fabricants de LED

Bon nombre des usines de fabrication de groupes américains ou européens sont situées en Chine ou en Malaisie pour des raisons de coûts de production.

Les fabricants chinois de LED sont peu nombreux et représentaient moins de 10 % du marché total jusqu'en 2011-2012. Mais plusieurs événements ont fait évoluer les choses. Tout d'abord la croissance de ces fabricants en termes de capacité de production et de performances a permis à plusieurs acteurs chinois de se hisser dans les 25 premières place en termes de revenus courant 2012. De plus, un fait marquant début 2015 est la vente d'une majorité des parts de Philips Lumileds à un fond d'investissement Chinois. Ce fabricant occupait jusqu'en 2013 le 5^e rang mondial en termes de revenus dégagés.

En 2015, le marché des LED de qualité est en grande partie dominé par :

- ▶ les Japonais Nichia, Toyoda Gosei, Sharp, Stanley et Citizen,
- ▶ les Coréens Samsung LED, LG Innotek et Seoul Semiconductor,
- ▶ les Taïwanais Everlight et Lite-On,
- ▶ les Américains CREE, Philips Lumileds et Avago,
- ▶ les nouveaux entrant Chinois (par l'intermédiaire de la vente de Lumileds à hauteur de 80 % des parts environ) mais aussi MLS,
- ▶ et enfin en Europe, Osram.

Copyright © 2015 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

Néanmoins, le nombre d'acteurs et leurs diverses relations à différents niveaux, restent encore autant de point qui rendent difficile la compréhension du microcosme que représente la technologie LED.

Copyright © 2015 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.



Copyright © 2015 Dunod.
© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

13.4 Le coût total de la technologie LED

13.4.1 Le coût des composants

Les designers de moteurs lumineux ont bien intégré maintenant la notion de « coût des 1000 lumens », permettant de choisir un modèle de LED adéquat pour les différentes applications d'éclairage. Ce coût a fortement baissé ces 10 dernières années, d'abord et avant tout en ce qui concerne les LED de puissance intermédiaire (0,1 W à 0,3 W), mais aussi pour les LED de puissance (figure 13.7).

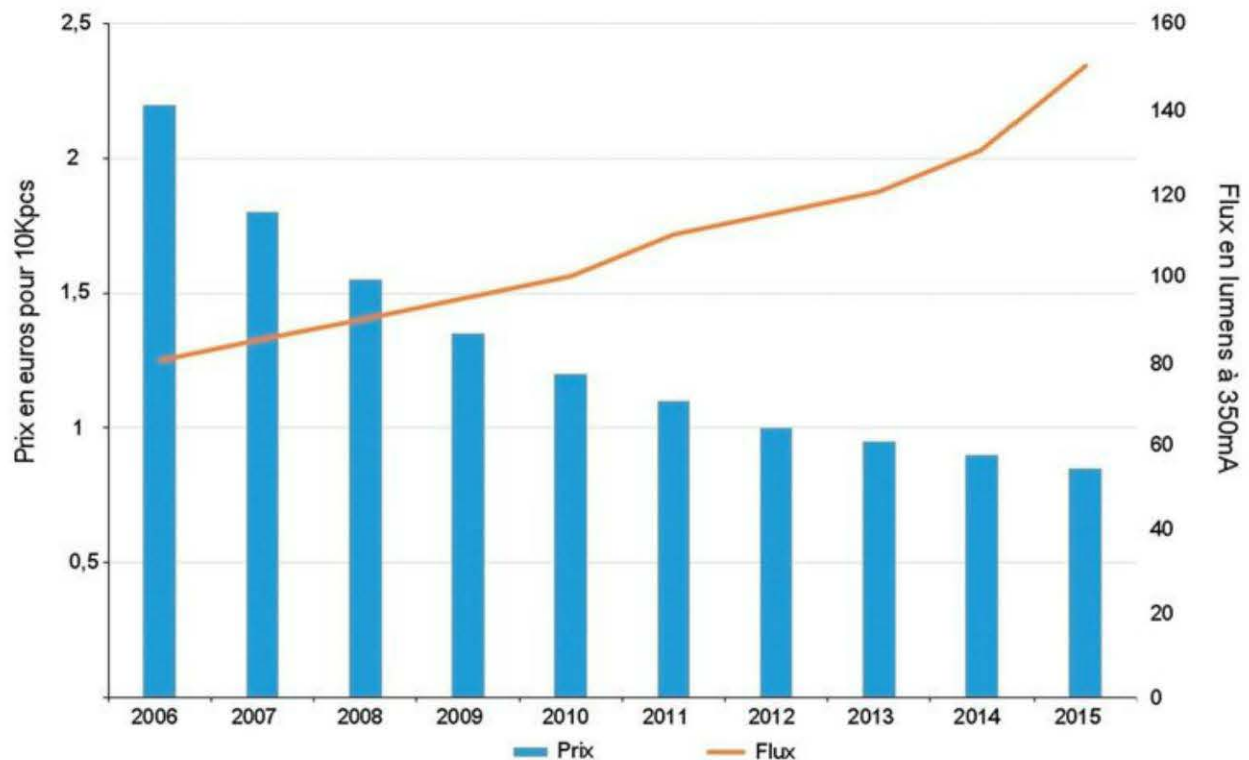


Figure 13.7 – Coût des LED de puissance (Courant nominal = 350 mA ; 4 000 K).

Les années 2013-2014 ont vu une évolution dans le fonctionnement de ces LED de puissance, capables (en nominal) de fonctionner autour de 700 mA à des températures de jonction de 85 °C. Certains modèles sont d'ailleurs triés en usine pour ces 2 valeurs, pour permettre aux utilisateurs de réaliser des évaluations pour des designs préliminaires relativement proches de la réalité. Il est vrai que pendant longtemps, les fabricants s'étaient accordés pour fournir dans leurs documentations des flux pour des températures de jonction de 25 °C, température rarement atteinte lorsque les LED fonctionnaient. Leur température de jonction en fonctionnement était souvent comprise entre 50 °C et 100 °C, ce qui obligeait les intégrateurs à réaliser des hypothèses sur le flux réellement obtenu pour ces niveaux de température, grâce aux courbes fournies par les fabricants de LED appelées « courbes de

13.4 Le coût total de la technologie LED

derating ». Plus difficile encore, beaucoup de fabricants testent leurs LED en mode impulsif, c'est-à-dire qu'en production, ils alimentent les composants par un courant très bref (quelques dizaines de millisecondes), permettant de s'affranchir de la gestion thermique lors de ces essais. Les utilisateurs ont alors l'obligation de vérifier les performances concrètes des LED en mode continu (LED alimentée en permanence).

Ainsi, la possibilité d'alimenter les composants à des courants plus importants (700 mA), sans pour autant dégrader de façon trop importante leurs performances (flux, qualité colorimétrique, durée de vie), a permis de faire baisser le prix des 1000 lumens. Dès 2011-2012, certains fabricants vantaient la capacité de leurs LED à pouvoir être pilotées à des courants importants, comme la société CREE [88] entre autre au travers de sa technologie « direct' attach ».

Les récents boîtiers de types CSP (*Chip Scale Package* = boîtier de LED à peine plus grand que la puce semi-conductrice utilisée : la puce occupe en général 80 % de la surface totale de la LED), ont permis de diminuer encore le prix des 1000 lumens, en intégrant le luminophore directement sur le wafer par exemple. La société Toshiba a été l'une des premières à mettre en œuvre de telles LED courant 2013-2014, avec des modèles ne dépassant pas 0,7 mm de côté. Ces modèles de LED ont non seulement fait baisser le coût des 1000 lumens, mais ils ont également réduits les écarts entre les LED de puissance (puces semi-conductrices de dimension 900×900 µm et plus) et les LED de puissance intermédiaire. C'est sans doute ces composants de puissance intermédiaire, pour des applications d'éclairage général (lampes à LED, tubes à LED, dalle de type 600×600 mm à LED), qui ont participé le plus à cette baisse du rapport €/1000 lm. En effet, les LED de type 5630, puis 3014 ou encore 3030 (définissant la taille du boîtier), équipées de puces semi-conductrices efficaces, avec des structure de boîtier permettant une très bonne dissipation thermique (résistance thermique inférieure à 20°/W parfois), ont des efficacités proches de 120 lm/W, avec des flux émis de 20 à 40 lumens suivant les cas.

Toutefois, les évolutions de prix qui ont été constatées entre 2013 et 2014, n'ont pas été aussi importantes que cela si on les compare aux baisses impressionnantes des coûts qui ont été constatées entre 2010 et 2012. Cela est d'autant plus vrai que cette baisse de prix est due en grande partie aux développements de boîtiers de LED très compacts (figure 6.1) employant moins de matière première et ayant fortement amélioré le taux d'extraction de la lumière. Mais attention à un point : ces modèles de LED ont certes une émission lumineuse très importante pour des coûts réduits, mais leur angle d'émission n'est pas tout le temps compatible avec l'application d'éclairage. En effet, l'angle d'émission pour ce genre de LED est assez important (>140° voire parfois jusqu'à 160°), car l'objectif des fabricants était d'extraire le maximum de lumière pour une efficacité optimale et un coût minimal, et lors des

design de moteurs lumineux, il faut se prémunir de toutes les absorptions du flux, y compris des LED entre elles pour garantir la bonne efficacité.

Dans certains cas de figure, sur des applications faisant intervenir des composants de puissance intermédiaire (entre 0,1 et 0,3 W), comme des modèles de type 5630 fournissant entre 30 et 40 lumens en blanc neutre (autour de 4 000 K), avec une qualité spectrale acceptable pour des applications d'éclairage intérieur de bâtiment, sont vendus aux alentours de 0,07 \$ à 0,12 \$, pour quelques centaines de milliers de pièces, le prix des 1000 lumens est inférieur à 3,5-4 \$, prix constatés courant 2014.

Ces niveaux de prix sont atteints par des grands fabricants et les durées de vie associées à ces composants se situent entre 30 000 et 45 000 h, lorsque les composants sont utilisés dans des conditions de température et de courant raisonnables. Dans certains cas, notamment si l'on accepte de recevoir des composants avec des tris de LED (réalisés en usine) relativement large et que ces tris se font par les fabricants de luminaires eux-mêmes, les performances peuvent être légèrement supérieures, pour des prix de 2 à 3 centimes de dollar inférieurs.

13.4.2 Le coût des solutions à LED

Suivant les objectifs de performances, de durée de vie, de coût ou de fiabilité, les développements se font différemment. Pour un système sans contrainte particulière pour lequel l'intégration de la technologie LED peut se faire simplement avec des possibilités de dissipation de la chaleur dégagée aisées, la carte LED qui sera intégrée contiendra le strict minimum en termes d'électronique de pilotage et de régulation thermique.

Le coût d'un tel système, alimenté avec un convertisseur AC/DC (transformant le 230 VAC en basse tension continue), peut être évalué à partir des composants qu'il comporte :

- ▶ Des LED ;
- ▶ Un connecteur (à plusieurs entrées permettant non seulement d'alimenter la carte mais aussi de piloter le courant des LED *in situ* en fonction de différents paramètres, voire de remonter des informations si une électronique « intelligente » est embarquée) ;
- ▶ Des composants de régulation du courant des LED ;
- ▶ Un composant de régulation thermique simple (NTC ou PTC : résistance à coefficient thermique négatif ou positif) ;
- ▶ Une électronique basique de protection en cas d'erreur de câblage (optionnel) ;
- ▶ Un circuit imprimé de technologie simple (FR4 double couche).

13.4 Le coût total de la technologie LED

Le coût d'une telle carte fabriquée à 50 000 unités, hors prix des LED (de puissance maximale de 20 W) doit se situer entre 4 et 7 \$ en prix de revient, pose des composants non comprise (dans la mesure où le nombre de LED n'est pas défini).

Alors qu'en 2012-2013, il fallait un nombre de LED de type 5630 de l'ordre de 50 pcs environ pour générer un flux de 2000 lumens, nous sommes en 2015 à des quantités qui s'approchent plus de 35 à 40 pcs pour atteindre un flux identique. Le coût global d'une telle carte montée se situerait entre 7 et 12 \$ suivant les choix faits par le concepteur. Cela nous donne un nombre de lumens par dollar qui varie de 170 à 300.

De tels coûts sont valables pour des commandes relativement importantes (en général de plusieurs centaines de milliers de LED). Les coûts de stockage (des composants avant soudure), d'approvisionnement tampon, de livraison (emballage adapté) ou encore de tests (réalisé unitairement ou par échantillonnage) n'apparaissent pas dans le calcul.

Ensuite, il faut réaliser astucieusement l'intégration de cette carte dans le luminaire, et le coût final sera fortement dépendant du choix du convertisseur ainsi que du design et des éventuelles contraintes complémentaires de l'application du luminaire.

13.4.3 Maturité des solutions à LED et tendances de développement

Qu'entend-on par maturité ? S'agit-il d'une maturité technique, c'est-à-dire une aptitude à proposer des solutions fiables, ou d'une maturité économique définie par le marché ? Ne doit-on pas intégrer pour chaque pays des notions de situation économique, d'acceptabilité sociale ou même de culture pour statuer sur la maturité d'une technologie ?

Suivant la zone géographique où l'on se situe, la maturité des LED peut-être très différente. Un simple exemple permet d'illustrer ce propos : comment expliquer simplement les ventes importantes de produits de remplacement à LED observées en 2011 au Japon (lampes à LED et tubes confondus) ? Cela ne provient pas du coût de l'énergie qui est sensiblement identique voire inférieur à celui de la France (y compris en tenant compte du coût engendré par la catastrophe de Fukushima Daiichi) et qui se situe autour de 0,1 \$ par kWh. Est-ce justement la baisse de disponibilité d'électricité suite à cette catastrophe qui a accéléré les ventes de lampes à LED de remplacement ? En partie peut-être, il serait prudent de statuer de façon catégorique.

Cela nous amène à rester très prudents dans l'évaluation de la maturité des applications à LED, car cette maturité est multicritère et ne s'appuie pas uniquement sur le paramètre de l'efficacité énergétique mais aussi sur d'autres plus difficilement

quantifiables. Par exemple, des actions marketing importantes lancées par de gros fabricants pour promouvoir la technologie LED et dont les dates de démarrage et les conséquences sont difficilement prévisibles.

Si l'on en croit l'un des co-responsables de la R&D de la société Epistar, l'un des leaders dans le domaine de la production de puces semi-conductrices, lors d'une conférence à Taiwan sur les récentes avancées de la technologie LED en 2015, les valeurs de rendement atteintes en ce début d'année 2015 sont certainement celles de l'optimum entre lm/W et lm/€.

Courant 2007, la barre des 100 lm/W qui annonçait une certaine rupture, n'en était pas vraiment une. Sept ans plus tard, même si nous avons atteint des niveaux au-delà de 140 à 150 lm/W, certains restent encore méfiants et septiques sur la maturité de la technologie LED. Cela confirme que cette maturité est multicritère, et que le seul rendement des LED ne peut pas constituer à lui seul « la validation ou non » de cette maturité. Des critères comme la qualité colorimétrique et sa stabilité dans le temps sont à prendre en considération, ou encore la capacité des fabricants de LED à proposer des produits sur plusieurs années (voire sur 10 à 15 ans dans certains cas notamment pour les applications automobiles).

Nous allons toutefois faire un point sur l'ensemble des applications à LED actuellement sur le marché en 2015 et donner des « pistes de potentielles maturités », en commençant par les applications qui ont très tôt adopté la technologie LED.

Fin des années 1980, les développements des feux de signalisation routière ainsi que les feux tricolores ouvrent la voie aux LED et sortent de leur « éternel rôle » de voyant lumineux.

Quelques années plus tard, les applications de balisage lumineux démarrent et se déploient rapidement, pour atteindre leur maturité en moins de 10 ans. Seuls les balisages réalisés à partir de diffusants pour créer des effets lumineux, ou encore des surfaces éclairées de grandes dimensions, ont dû attendre que les LED atteignent des niveaux d'efficacité de l'ordre de 50 à 60 lm/W. Les éclairages du nez des marches d'escalier par exemple, qui ont été rapidement développés (dans les salles de cinéma) présentaient des rendus lumineux proches des guirlandes lumineuses, un peu trop ponctuels. Il faudra attendre la fin des années 2000 pour que les LED puissent permettre de créer des lignes lumineuses continues, fines et homogènes, grâce à la compacité et à l'efficacité des LED à ce moment-là.

L'éclairage nécessaire pour les machines (vision industrielle) a très vite et très largement adopté la technologie LED au début des années 2000, pour les avantages suivants : compacité, robustesse en choc et vibration, durée de vie, directivité, flexibilité des designs pour intégration directement sur machine et aucune émission d'infrarouge. Par la suite, ces types d'application d'éclairage ont bénéficié de

13.4 Le coût total de la technologie LED

l'évolution des LED notamment en ce qui concerne la disponibilité des longueurs d'onde, ainsi que des flux importants dans le visible. Récemment (2013-2014), la disponibilité de LED UV (de 360 nm à 405 nm) avec des puissances radiatives inégalées jusqu'alors (plusieurs centaines de milliwatt par composant).

L'éclairage intérieur des maisons individuelles intègre des LED pour des applications décoratives (dans la majeure partie des applications), ainsi que pour des systèmes avec focalisation (lampes de type dichroïque 30 et 50 W). Si les lampes à LED pour l'éclairage général à flux non directif étaient trop peu efficaces, trop chères et ne fournissaient pas suffisamment de flux pour permettre l'éclairage d'une pièce à vivre en 2012, elles permettent actuellement en 2015 de remplir complètement leur fonction de lampe non directive, atteignant des flux de 500 à 700 lumens. Dans les années 2013-2014, les lampes à filament à LED (figure 13.4) se développent, d'abord avec des rendements médiocres (difficile de dissiper la chaleur dégagée sur un barreau étroit de moins de 2 mm), puis ce rendement s'est grandement amélioré atteignant même des valeurs de 100 lm/W pour les systèmes complets, présentant toutefois d'autres problématiques comme des scintillements en fonction du 50 Hz du secteur qui les alimente (électronique de régulation très sommaire de certains modèles de lampe à filament). Néanmoins, il est possible en 2015 de trouver des modèles émettant des flux de plus de 300-400 lumens, avec des rendements de plus de 90 lm/W, et des durées de vie certainement autour de 10 000 à 15 000 heures. Ces lampes seront certainement cantonnées au rang de lampes de décoration, rappelant le filament à incandescence pour les nostalgiques.

Dans les **bâtiments publics ou privés**, dès lors qu'il s'agit de zones de circulation, les LED ont tout leur sens pour être intégrées, notamment avec des systèmes de détection de présence, qui agissent en réduisant le flux lumineux (et de ce fait la puissance consommée) sans couper complètement l'alimentation, la préservant ainsi des problématiques d'allumage et d'extinction répétées. Nous trouvons aussi des éclairages à LED dans les bâtiments publics ou privés dès lors que les hauteurs des luminaires impliquent un coût important pour la maintenance (changement avec nacelle par exemple). Ces types d'éclairage ont donc trois modes de fonctionnement, un mode « 100 % du flux » lors de la détection d'une personne, un mode « flux réduit » après la détection, et un mode « extinction complète » si personne ne déclenche le détecteur pendant un long moment. La fréquence de passage des personnes est telle, que le mode « extinction complète » se présente rarement, les alimentations ne s'éteignent alors pas complètement la plupart du temps, limitant ainsi leur probabilité de défaillances qui sont souvent dues aux allumages et extinctions répétées.

Les éclairages décoratifs **intérieurs** et extérieurs (utilisant des LED blanches ou RGB) ont incontestablement atteint un degré de maturité leur permettant de répondre à

bon nombre d'applications (accentuation de monument, éclairage de façade). L'amélioration des performances des LED et la baisse de leur coût permettront à ce type d'applications de se développer encore.

Un luminaire qui est en soit une application, c'est le *down light*. De par sa compacité, il a souvent été équipé de sources de faible efficacité (lampe à incandescence autour de 15 lm/W et lampe fluo-compacte proche de 40 à 50 lm/W). Il représente « un intermédiaire » entre le spot dichroïque (très directif et peu efficace) et les éclairages à tube fluo compact (de grosse dimension, de design relativement pauvre, et d'efficacité n'excédant pas les 85 lm/W dans la plupart des cas). La technologie LED de type *Remote Phosphore* (à luminophore déporté), développée notamment par Philips (MasterLED) est tombée à point nommé pour répondre à un besoin de bon rendement, d'éblouissement réduit et de compacité. Que ce soit en technologie à luminophore déporté ou bien avec des matrices de LED, cette application est bien implantée maintenant et va gagner de plus en plus de parts de marché, face à leur concurrent principal et unique : les *down-lights* équipés de lampes fluo-compactes.

Les applications de balisage ont atteint leur maturité rapidement, dès lors qu'il s'agissait aux LED de démontrer leur brillance (qui peut s'apparenter à de l'éblouissement). Le balisage peut être réalisé en éclairage direct ou en éclairage légèrement diffus. Il a aussi été développé en mode indirect (éclairage du nez de marches d'escalier) ce qui a contraint les LED à atteindre un certain rendement.

Pour les **applications d'éclairage dans les transports**, qu'il s'agisse d'éclairage de cockpit ou de tableau de bord, ou encore d'éclairage d'accentuation (focalisation des liseuses dans les trains, avions et voitures), les LED jouent pleinement leur rôle et donnent entière satisfaction par la ponctualité de leur surface d'émission (mise en forme du faisceau plus simple), et par leur basse tension de fonctionnement (en adéquation avec les tensions disponibles dans les transports). Les feux de signalisation comme le troisième feu stop des voitures, ont dès la fin des années 1990 été développés à base de LED. Les premiers *concept cars* avec des feux avant diurnes datent de 2002-2003, et les réalisations concrètes en série ont été mises au point par Audi en 2005-2006. En 2012, même des modèles d'entrée de gamme chez des constructeurs comme Citroën intègrent des feux diurnes à LED et de plus en plus de modèles en sont équipés. En 2015, un grand nombre de modèles intègrent cette fonctionnalité à LED (figure 10.26) avec dans certains cas de figure, des mises en œuvre très simples (coût réduit de la fonctionnalité), et dans d'autre une véritable signature du modèle de véhicule.

Dans l'**industrie**, les éclairages de zones et/ou de surfaces spécifiques, notamment lorsque des éclairages pour de grandes hauteurs sont requis, se sont développés en restant marginaux jusqu'en 2012, pour se déployer de façon plus conséquente en 2014. Les produits d'éclairage de type « high bay », bénéficiant d'aucune limite

13.4 Le coût total de la technologie LED

de dimension en ce qui concerne l'enveloppe du luminaire, avaient intégré très tôt des COB, même d'efficacité toute relative ($<50 \text{ lm/W}$), mais fournissant plusieurs milliers de lumens en un seul point. Le début 2015 a vu des nouveaux types de luminaires dédiés pour les grandes hauteurs, plus compacts, mettant en œuvre les derniers modèles de puissance intégrant des puces de grandes tailles (proche de 4 mm^2) et des lentilles permettant de créer des photométries adaptées aux différentes applications.

Les **zones de stockage** (entrepôts) avaient jusqu'en 2011-2012 investi les applications de chambres froides où les LED sont mises à contribution à des températures négatives, ce qui améliore encore leur rendement, alors que les solutions à décharges ou en tube fluorescent fournissent de piètres résultats. Depuis que les composants (LED) sont capables de produire des flux de plusieurs centaines de lumens dans des conditions thermiques difficiles (autour de 60 à 70°C sur la carte LED), cela a permis de créer des matrices de LED de puissance compactes, intégrant jusqu'à parfois plus de 100 LED pilotées, chacune d'entre elles à plus de 1 A. Ces cartes génèrent pour certaines d'entre elles des flux de plus de 25 000 lumens.

Les **surfaces de grandes dimensions**, que ce soient des parkings de supermarché ou des terrains de sport, posent deux problèmes qui stoppaient jusqu'à fin 2014 un possible recours aux LED. Il s'agit d'une part de la hauteur d'éclairage (souvent plusieurs dizaines de mètres), et d'autre part de l'intervalle important entre les points lumineux (50 à 100 mètres) pour limiter les coûts d'infrastructure d'arrivée de l'alimentation (on met des éclairages plus hauts et plus puissants, pour limiter leur nombre). En 2015, la solution encore majoritairement employée pour les éclairages sportifs est la technologie à décharge (halogénures de métaux) de haute puissance (entre 1 000 et 2 000 W) développant jusqu'à plus 20 000 lumens par lampe, avec des durées de vie de l'ordre de 10 000 à 12 000 h pour les puissances de 1000 W, et autour de 5000 à 7000 h pour les puissances de 2000 W. C'est certainement sur ce dernier point que la technologie LED peut apporter une réponse, grâce aux récentes améliorations des composants qui hébergent des puces semi-conductrices de près de 4 mm^2 , fournissant près de 700 lumens par LED en blanc froid (6000 K), alimentées sous 2 A. Il est alors possible de développer des luminaires à LED constitués de 200 composants, pour atteindre des flux d'un niveau similaire aux lampes à décharges, avec un triplement des durées de vie.

Enfin, pour les **éclairages publics** (voies, places, carrefours), la technologie LED a atteint des performances en 2015 qui ne laissent plus aucun doute sur la capacité des LED à proposer des solutions fiables, efficaces et répondant aux exigences de ce type d'éclairage. Pour des colorimétries autour de 5000 K (entre blanc neutre et blanc froid), des systèmes (alimentation comprise) présentent des rendements de plus de 130 à 140 lm/W , supérieurs à toutes autres technologies disponibles.

Pour l'éclairage des routes à vitesses élevées mettant en œuvre des luminaires de 6 et 9 mètres, les LED peuvent aussi atteindre les niveaux requis par les normes en vigueur, mais le coût des solutions ainsi que la faible expérience des gestionnaires de parcs d'éclairage pour cette technologie limitent encore le déploiement d'envergure de la technologie LED. Pour les applications à plus faibles hauteurs (entre 3 et 5 mètres), dans les zones piétonnes et/ou résidentielles, des premiers projets qui ont vu le jour en donnant satisfaction courant 2010-2012, se sont déployés de façon importante les années suivantes. Ainsi, pour ces applications, 2013 et 2014 ont été deux années pendant lesquelles de nombreux projets ont été menés et des centaines de points lumineux ont été installés, donnant entière satisfaction.

13.5 Prévision des performances des LED : 2015-2018

Mises à part les possibles crises économiques ou catastrophes naturelles qui peuvent avoir un impact sur l'outil de production industriel (et dans une moindre mesure sur la R&D des entreprises), les évolutions potentielles des performances des LED s'amenuisent encore, du fait que nous sommes relativement proches des limites au-delà desquelles il sera difficile d'aller... sauf nouvelle rupture technologique qui pourrait ouvrir d'autres perspectives. De plus, les réglementations sur le bannissement de certaines technologies trop énergétivores ont un calendrier figé et connu, qui laisse du temps encore pour utiliser ces anciennes technologies, sans réellement pousser les intégrateurs vers les nouvelles technologies. Pire, ces calendriers ont été décalés pour certains d'entre eux de un à deux ans, comme le récent décalage à 2018 de l'Union européenne sur l'arrêt de la vente et de la fabrication des lampes à incandescence pour des raisons sociales, afin de permettre aux industriels européens de mieux se préparer à la migration vers la technologie LED et limiter les pertes d'emplois.

Il n'est toutefois jamais simple de réaliser des prévisions, et nous allons pour cela nous appuyer sur l'ensemble des acteurs du domaine (cabinets de veille technologique) mais aussi des performances réelles des produits (testés), qui pour certains n'existent encore qu'en version de pré-industrialisation.

13.5.1 Retour sur la qualité des prévisions antérieures

Il est toujours intéressant de revenir quelques années en arrière afin de voir si les prévisions faites à cette époque par les différents acteurs, se sont avérées exactes. Cela permet entre autres, de s'appuyer sur des sources relativement fiables pour les prochaines années, mais aussi de réaliser une sorte de « tendance d'évaluation », que l'on pourrait qualifier d'optimiste ou de pessimiste.

13.5 Prédiction des performances des LED : 2015-2018

La figure 13.8 présente la vision en 2009 du DoE (*Department Of Energy*), celle de Nichia et la tendance qui serait de suivre la loi de Moore qui est utilisée (un peu trop ?) pour évaluer les évolutions des systèmes électroniques.

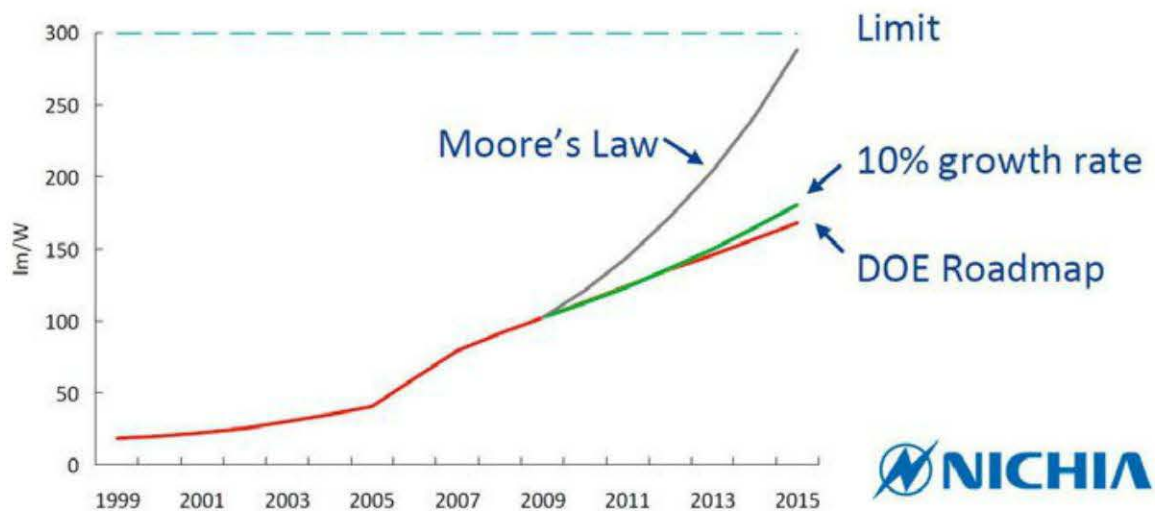


Figure 13.8 – Prévisions des rendements des LED
(Daniel Doxsee – Nichia – San Diego 2009).

Force est de constater qu'en appliquant la loi de Moore nous aurions été beaucoup trop optimistes sur le rendement atteint des LED pour 2012 (170 lm/W). Le DoE (qui a vocation à fixer des objectifs pour l'industrie) et Nichia (qui a vocation à remplir ces mêmes objectifs) ont tous deux été très proches de la réalité (entre 110 et 120 lm/W).

Autre exemple, l'OIDA (*Optoelectronics Industry Development Association*), dans une présentation de mars 2002 [17], estimait qu'il faudrait en 2013 autour de 13 W de puissance électrique pour générer 1 600 lumens à partir d'un luminaire à LED, ce qui représente une efficacité du luminaire proche de 120 lm/W. Cette estimation datant de plus de dix ans a pu être validée.

13.5.2 Acteurs influents sur les perspectives à venir

Nous pouvons considérer qu'il y a trois types de sources sur lesquelles il est envisageable de s'appuyer qui sont :

- ▶ les cabinets de consultants spécialisés (indépendance complète) ;
- ▶ les groupes de travail (et associations professionnelles) qui font intervenir des experts provenant de tous horizons, y compris de sociétés concurrentes ;
- ▶ et les grosses structures industrielles spécialisées et leader dans la fabrication, capables de dévoiler une ligne conductrice et des résultats en devenir (R&D) sans pour autant dévoiler leur stratégie.

Parmi les cabinets de consultants on retrouve :

- ▶ **Strategies Unlimited** spécialisé en photonique, LED et éclairage ;
- ▶ **Solid State Lighting Services, Inc.** orienté plus particulièrement vers la technologie d'éclairage à semi-conducteurs ;
- ▶ **DisplaySearch** plus spécialisé sur les technologies d'écran ;
- ▶ ou encore des cabinets plus généralistes comme **McKinsey & Company** et **Navigant consulting Inc.**

Les associations professionnelles que l'on peut citer sont :

- ▶ l'**OIDA** (*Optoelectronics Industry Development Association*),
- ▶ l'**ISA** (*International SSL Alliance*),
- ▶ ou encore l'**IES** (*Illuminating Engineering Society*).

13.5.3 Schémas et modèles à prévoir

La technologie des LED met aujourd'hui à notre disposition et à celle des concepteurs d'applications d'éclairage un large panel de choix en termes de puissances, de dimensions de boîtier de LED, de nombre de puces hébergées, de qualité colorimétrique ainsi que de modes d'alimentation. Les constructeurs de LED proposent ainsi de nombreuses possibilités et le marché (et ses différentes applications) ne s'oriente pas vers un modèle de LED en particulier.

Depuis 2008, le DoE propose une étude qui est publiée chaque année dans laquelle différents acteurs interviennent non seulement pour fixer des objectifs à la technologie LED en rapport avec les besoins d'économies énergétiques, mais également pour évaluer la maturité de la technologie et faire des prévisions de croissance et d'évolution de performances.

Les informations contenues dans la figure ci-dessous (figure 13.9) sont issues des différents résultats constatés concrètement sur des produits commerciaux, ainsi que d'évaluations de groupes d'experts travaillant pour le DoE.

Nous pouvons conclure de façon nette que les évaluations revues chaque année dérivent légèrement mais constituent toutefois une approximation relativement fiable de ce que sera la technologie d'ici cinq à huit ans en termes de rendement mais aussi de coût.

Ainsi, des rendements compris entre 200 et 220 lm/W pour les blancs chauds, et entre 220 et 250 lm/W pour les blancs froids sont des objectifs qui semblent réalisables au regard de l'évolution passée. Les récentes LED (début 2015) développées par Nichia en blanc froid (5000 K) atteignent les 200 lm/W, et pour les modèles en blanc chaud (3000 K) avec une qualité spectrale convenable, la barre des 170 lm/W

13.5 Prévision des performances des LED : 2015-2018

est atteinte. Si nous couplons cela aux annonces de fabricants comme CREE courant 2014, qui ont atteint des rendements légèrement supérieurs à 300 lm/W pour des composants émettant un blanc autour de 5000 K pour un courant de pilotage de 350 mA (  température ambiante), les prévisions annoncées par le DOE (figure 13.9) pour 2018-2020 semblent atteignables.

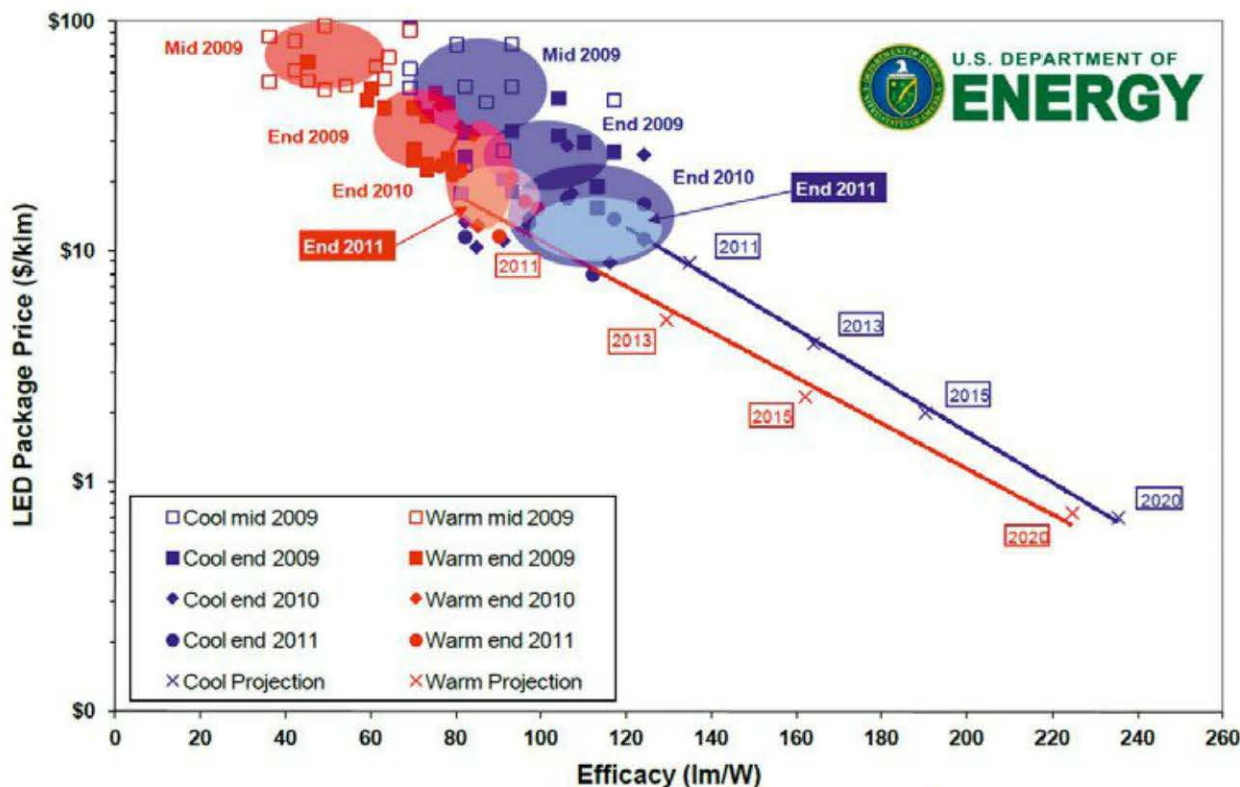


Figure 13.9 – Perspectives d'évolution des rendements et des coûts des LED de type blanc chaud et blanc froid (informations extraites des rapports du DoE : « SSL R&D manufacturing roadmap DoE »).

En termes de prix, le boîtier des LED est l'un des paramètres clé qui a permis de continuer à baisser les coûts de production des composants tout en augmentant les rendements. Ainsi, le rapport lm/\$ a continué sa progression pour atteindre des niveaux même supérieurs à ceux qui avaient été imaginés courant 2010-2012, grâce à l'évolution des LED vers des boîtiers de type CSP (*Chip Scale Package*). Ces boîtiers (figure 11.5) ont vocation à limiter de façon importante l'emploi de matériaux, d'améliorer l'extraction lumineuse sans toutefois être en mesure d'assurer une photométrie précise, le but étant d'atteindre coûte que coûte des niveaux de rendement très importants, notamment pour les applications d'éclairage général qui représenteront la plus grosse partie de l'utilisation des LED.

L'évolution des boîtiers des LED (courant 2013-2015) qui a eu lieu a donné naissance à de nombreux nouveaux modèles et à des familles bien délimitées initialement,

LED de basse puissance (<0,1 W), LED de puissance intermédiaire (ou moyenne puissance entre 0,1 W et 0,3 W) et LED de forte puissance (à partir de 0,5 W mais surtout au-delà de 1 W), cette évolution tend à atténuer ces limites franches, et nous nous dirigeons vers une sorte de continuum de puissance, avec beaucoup plus de possibilités. Certains modèles n'ont pas trop évolué en raison de leurs applications (par exemple les LED de type *side emitting* ont amélioré leurs performances, mais sont restées des LED pilotables autour de 20 mA en nominal avec un maximum souvent situé entre 35 et 40 mA). Pour la plupart des autres types de LED, la plage de courants de fonctionnement s'est étendue, présentant des chevauchements importants entre différents modèles, donnant de ce fait aux designers une souplesse lors de la réalisation des moteurs lumineux.

Pour prévoir les rendements lumineux dans les années à venir, si une rupture technologique survient, nous pourrions peut-être rattraper le retard que les LED disponibles sur le marché en volume et à des prix acceptables ont pris par rapport aux performances atteintes en laboratoire. La figure 13.10 illustre bien ce retard et montre les annonces des performances atteintes en laboratoire par l'un des leaders dans la fabrication des LED, et les performances réellement mesurées depuis plus de dix ans (courbe en rouge).

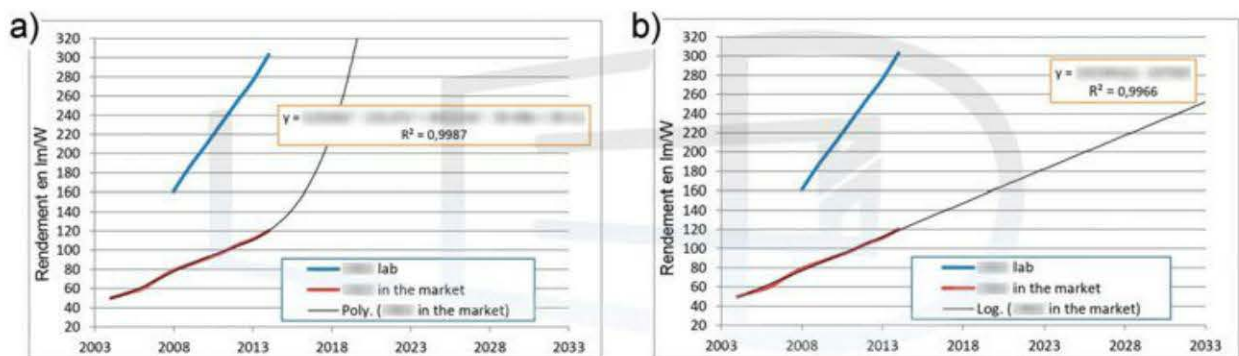


Figure 13.10 – Évolution des performances d'un des leaders dans la fabrication des LED (2 types de projection : avec rupture technologique en 2015-2016 à gauche et sans rupture technologique à droite).

L'objectif d'atteindre les 4 \$ pour 1000 lumens en 2015 a été atteint et il semble que celui de descendre à moins de 2 \$ en 2020 puisse être raisonnablement tenu pour des composants en blanc chaud ou froid. Grâce à quelles innovations cette évolution sera permise ? Est-ce que la technologie des nano-fils par exemple, proposée fin des années 2000 par la société GLO après cinq années de recherche, sera celle qui donnera un coup d'accélérateur à l'évolution des rendements ? Ou bien cette évolution viendra-t-elle des processus industriels qui intégreront des nouveaux types de wafer plus efficaces par exemple ? Difficile de se prononcer, tant les paramètres sont nombreux.

Bibliographie

- [1] Rapport d'expertise d'une LED – CREE XLAMP LED Lamp Teardown And technology Analysis, 2008
- [2] Elmar Baur – Design of Light Emitting Diodes (LED) – COMSOL Users Conference, 2007 Grenoble
- [3] Kensaku Motoki – Development of Gallium Nitride Substrates – Kensaku-MOTOKI – SEI TECHNICAL REVIEW NUMBER 70 – avril 2010
- [4] Joelle Arnold – When the Lights Go Out: LED Failure Modes and Mechanisms – DFR Solutions
- [5] ML Paget – Long-Term Testing of Solid-State Lighting, DOE CALiPER Program – 20, 2009
- [6] E. Fred Schubert – 2006 LED book pictures – Light-Emitting Diodes, 2nd Edition – Cambridge, 2006
- [7] Life Cycle Assessment of Ultra-Efficient Lamps – Navigant Consulting Europe, Ltd., 2009
- [8] Yuexiao Pan, Mingmei Wu, Qiang Su – Comparative Investigation on Synthesis and Photoluminescence of YAG Ce Phosphor – Materials Science and Engineering B 106 (2004) 251–256 – 2004
- [9] Bardsley Consulting – Solid-State Lighting Research and Development : Multi-Year Program Plan April 2014 – http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2014_web.pdf
- [10] AFE – Rencontre nationale des LED – 29 octobre 2009
- [11] Ed Hare (SEM Lab, Inc.) – Failure Analysis of Leds, 2004
- [12] Steven P. DenBaars – Gallium Nitride Material Technology, 1999
- [13] Navigant Consulting Inc. Energy – Savings Estimates of Light Emitting Diodes in Niche Lighting Applications, 2011
- [14] Shui-Jinn Wang – Vertical-Structured GaN-LEDs – Department of Electrical Engineering, National Cheng Kung University, R. O. C., 2009
- [15] Strategies Unlimited – LED Replacement Lamps – Market Analysis and Forecast, 2012
- [16] S. Chhajeda, Y. X – Junction Temperature in Light-Emitting-Diodes Assessed by Different Methods – SPIE Photonics West – Chhajeda, 2005
- [17] Arpad A. Berg, OIDA <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/bergh.pdf>
- [18] Laurent Massol – Performances de lampes à LED au cours du temps – Conférence Eclairage 2012 (Troyes), 2012
- [19] Richard Stevenson – LED Droop Phenomenon – *Compound Semiconductor* magazine http://www.eclipse-lightinginc.com/modules/download_gallery/dlc.php?file=303
- [20] Jeff Y. Tsao, Sandia National Laboratories – LED for General Illumination – An OIDA Technology RoadMap Update 2002 – oIDA, 2002
- [21] Wei-Chi Lee – Enhanced Light Output of Vertical-Structured GaN-Based Light-Emitting Diodes with TiO₂/SiO₂ Reflector and Roughened GaO_x Surface Film – *Japanese Journal of Applied Physics* 50 (2011) 04DG06
- [22] E. Fred Schubert – Light Emitting Diodes. 2nd edition – Cambridge, 2006
- [23] Hadis Morkoç – Light-Emitting Diodes and Lighting – Handbook of Nitride Semiconductors and Devices. Vol. 3 – Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

- [24] Herbert Paul Maruska – A Brief History of GaN Blue Light-Emitting Diodes – 2010 http://www.solidstatelighting.net/news/features/maruska_blue_led_history.pdf
- [25] J-Q. Xi – Enhanced Light Extraction in GaInN Light-Emitting Diode With Pyramid Reflector – IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 18, NO. 22, NOVEMBER 15, 2006
- [26] Réglementation Européenne – Substitution des Lampes – OSRAM, juin 2010 – <http://www.ale-montpellier.org/UserFiles/File/Particuliers/Cafe-Climat/Eclairage/Presentation%20OSRAM.pdf>
- [27] Bardsley Consulting – Solid-State Lighting Research and Development : Manufacturing-roadmap-DOE, 2009
- [28] Bo Hyun Kong – InGaN/GaN Blue Light Emitting Diodes Using Al-Doped ZnO Grown by Atomic Layer Deposition as a Current Spreading Layer – Elsevier – Journal of Crystal Growth 326 (2011) 147–151
- [29] Joel J. Jaimes – The Study and development of a light-Emitting Diode (LED), Microfilm Optics unit – Massachusetts Institute of Technology – 2003 – http://www.designthatmatters.org/k2/pubs/Joel_Jaimes_Kinkajou_Thesis_Final.pdf
- [30] Shao-Hua Huang – Improved Light Extraction of Nitride-Based Flip-Chip Light-Emitting Diodes Via Sapphire Shaping and Texturing – National Science Council of the Republic of China under contract No.NSC-93-2215-E-005-014
- [31] L. Houssiau – Du feu de bois à la LED – Séminaire de Physique – Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix, Namur, 2006
- [32] Michael R. Krames – Status and Future of High-Power Light Emitting Diodes for Solid-State Lighting – Journal of display technology, vol. 3, n° 2, june 2007
- [33] Lei Chen – Improvement of Emission Efficiency and Color Rendering of High-Power LED by Controlling Size of Phosphor Particules and Utilization of Different Phosphors – Microelectronics Reliability 52 (2012) 900–904 – 2012
- [34] Rare Earth Paper – GE Lighting – 2011 – http://www.gelighting.com/na/business_lighting/rare-earth-elements/
- [35] Jun-ho Yum – $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}_{0.05}$ Phosphor Coatings on Gallium Nitride for White Light Emitting Diodes – Journal of The Electrochemical Society, **150** (2) H47-H52 (2003)
- [36] Bardsley Consulting – Solid-State Lighting Research and Development : Manufacturing-roadmap-DOE – july 2010 – http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_manuf-roadmap_july2010.pdf
- [37] Bardsley Consulting – Solid-State Lighting Research and Development : Manufacturing-roadmap-DOE – july 2011 – http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_manuf-roadmap_july2011.pdf
- [38] Navigant Consulting, Inc. – Energy savings Potential of Solid-State Lighting in General Illumination Applications 2010 to 2030 – February 2010
- [39] Bardsley Consulting – Solid-State Lighting Research and Development : Multi-Year Program Plan March 2010 – http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2010_web.pdf
- [40] Dae-Seob Han – Improvement of Light Extraction Efficiency of Flip-Chip Light-Emitting Diode by Texturing the Bottom Side Surface of Sapphire Substrate – IEEE Photonics technology letters, vol. 18, n° 13, july 1, 2006
- [41] Bardsley Consulting – Solid-State Lighting Research and Development : Multi-Year Program Plan March 2011 – http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2011_web.pdf
- [42] History of Light – site Internet CREE – <http://www.creeledrevolution.com/learn/history>
- [43] Shuji Nakamura – Recent Performance of Nonpolar/Semipolar/Polar GaN-based Blue LEDs and LDs – 2007 – http://users.metropolia.fi/~karisv/Nanolaitekuvia/nanodokumentteja/Shuji_Nakamura.pdf

Bibliographie

- [44] Yukio Narukawa – White Light Emitting Diodes With Super-High Luminous Efficacy – Journal of Physics D: Applied Physics (Phys. D: Appl. Phys. **43** (2010) 354002 (6pp))
- [45] Giordano-Beretta – Understand Color – Photonics-West – 2000 – <http://www.hpl.hp.com/imaging/uc/>
- [46] François Desvignes – Radiométrie, Photométrie – Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle – R 6 410
- [47] Pierre Bonton – Histoire de la lumière et de la couleur – Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand 2)
- [48] Tristan Rondepierre – La lumière et les ondes électromagnétiques, aspects historiques
- [49] Paul Antoine Hervieux – Dualité onde-corpuscule – 2010 – http://www-physique.u-strasbg.fr/cours/l1/lpa/L1_decouverte_hervieux/cours_11.pdf
- [50] Georges Zissis – Quatrièmes Journées d'échanges du Réseau plasmas froids, Bonascre, 9-12 octobre 2005 – (ISBN:978-2-8627-2425-6)
- [51] Jean-Jacques Damelin court – Eclairage intérieur et ambiances visuelles (2010) – ISBN : 978-2-7430-1208-3
- [52] Brian Clark Howard – Green-Lighting (2010) – ISBN: 978-0-07-163016-0
- [53] Lampe incandescence : http://dspt.perso.sfr.fr/La_lampe.htm
- [54] Henry Woodward – brevet US181613
- [55] Recylum – convention sur le retrait de la vente des ampoules à incandescence et la promotion des lampes basse consommation, 2008 – <http://www.recylum.com/wp-content/uploads/LAMPES-convention-MEEDDAT-RECYLUM.pdf>
- [56] Bob-Johnstone – Brilliant, Shuji-Nakamura and the Revolution in Lighting Technology (ISBN : 978-1-59102-462-0)
- [57] Shuji Nakamura – GaN Growth Using GaN Buffer Layer – *Japanese Journal Of Applied Physics*, Vol. 30, No. 10A, octobre, 1991, pp. L 1705-L 1707
- [58] Chr. Schwanengel – Comparison of Techniques for Measuring Luminous Intensity Distribution Overall and Across Segment – TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH
- [59] Khairunisak-Abdul-Razak – EBB 323 Semiconductor Fabrication Technology – Universiti-Sains-Malaysia
- [60] Jean Camasselti – Matériaux Semi-conducteurs A Grand Gap : SiC – Techniques de l'ingénieur Doc. E 1 990
- [61] Philippe Leturcq – Physique des semi-conducteurs de puissance – Techniques de l'ingénieur D 3 102
- [62] Wen-Chih Ho – Light-mixing Layer and Method – Patent application publication US 2003/0038596 A1 (2003)
- [63] André Vapaille – Résistivité des semi-conducteurs – Techniques de l'ingénieur Doc. K 720
- [64] Cornelia Elizabeth – Carolina Dam – Experimental and Numerical Aspects of GaN Growth by HVPE (ISBN-10: 90-9020912-3)
- [65] Oleg Shchekin – Evolutionary New Chip Design Targets Lighting Systems – Compound-Semiconductor – mars 2007 – vol-13 Number 2
- [66] Shuji Nakamura – Introduction to Nitride Semiconductor Blue Lasers and Light Emitting Diodes – Taylor & Francis – (ISBN-10: 0748408363)
- [67] S.M.-Sze – Semiconductor Devices, Physics and Technology 2nd Edition – Wiley – 2001
- [68] Soohwan Jang – Anisotropies of Nonpolar a-Plane GaN LEDs in Electrical and Optical Properties – CS MANTECH Conference, May 16th-19th, 2011, Palm Springs, Caifornia, USA
- [69] C. E. Lee – Luminance Enhancement of Flip-Chip Light-Emitting-Diodes by Geometric Sapphire Shaping Structure – IEEE Photonics technology letters, vol. 20, n° 3, february 1, 2008
- [70] Tim Whitaker – LEDs magazine – dec 2005 – page 10

- [71] D-J.Miller – Gallium Nitride EPI by a Novel Hybrid VPE Technique – june 2011
- [72] Arturas-Zukauskas – Introduction to Solid-State Lighting – John Wiley and Sons Inc. 2002 (ISBN : 0 – 471 21574 – 0)
- [73] Gertrude F. Neumark – Wide Bandgap Light Emitting Materials And Devices – Wiley-VCH, 2007
- [74] Joo Sun Yun – Current Spreading Analysis in Vertical Electrode GaN-based Blue LEDs – SPIE Vol. 6841 68410L-1 – (2007)
- [75] Sheng LIU – LED Packaging for Lighting Applications – Wiley (2011) – ISBN: 978-0-470-82783-3
- [76] Joachim Piprek – Nitride Semiconductor Devices – Wiley-VCH – 2007
- [77] Lei Chen – Light Converting Inorganic Phosphors for White Light-Emitting Diodes – *Materials* 2010, 3, 2172-2195; doi:10.3390/ma3032172
- [78] S.YE – Phosphors in Phosphor-Converted White Light-Emitting Diodes: Recent Advances in Materials, Techniques and Properties – Elsevier – Materials Science and Engineering R 71 (2010) 1–34
- [79] Ruth M. Johnston and Max Saltzman – Industrial Color Technology – (1971)
- [80] Narci Chang – LED market update – JP Morgan Chase & Co. (2012)
- [81] James Stettler – The Future of Lighting: Who Will Win? – New street Research (march 2010)
- [82] Barry Chen – Overview of LED Market & Application – Delta Electronics Inc. – 2011
- [83] K. A. Bulashevich – Current Spreading and Thermal Effects in Blue LED Dice – phys. stat. solidi (c) 4, No. 1, 45–48 (2007) / DOI 10.1002/pssc.200673502
- [84] Michael R. Krames – Status and Future of Hight-Power Light-Emitting Diodes for Solid-State Lighting – Journal of Display Technology, vol. 3, n° 2, june 2007
- [85] Szymon Bęczkowski – LED Spectral and Power Characteristics Under Hybrid PWM/AM Dimming Strategy – 978-1-4244-5287-3/10-2010 IEEE
- [86] Avago – A Guide to Human Visual Perception and the Optical Characteristics of LED Displays – Application Brief D-004 – 2010
- [87] Marc Dyble – Impact of Dimming White LEDs : Chromaticity Shifts Due to Different Dimming Methods – SPIE (2005)
- [88] CELMA_LED(SM)121_CELMA_Statement_on_ANSES_LED_Report_17112010
- [89] Michael R. Krames (Lumileds 2005) – Luminance-Comparatif_LED-Halogen-HID.
- [90] Marc McClear (CREE) – Impact of Dimming White LEDs: Chromaticity Shifts Due to Different Dimming Methods – SPIE (2005).

A

ADEME 262
 AFE – Association française de l'éclairage 262
 alimentation
 par fil d'or 57, 121
 par microbille 58
 APCVD – *Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition* 105

B

ballast 9
ball bonding 49, 57, 121
 barrière d'électrons 63
 BGA – *Ball Grid Array* 100, 121
 bloc autonome d'éclairage de sécurité 233

C

carbure de silicium (SiC) 114
 CCT – *Correlated Colour Temperature* 190
 chip coating 247
 chromaticité 175
 CIE – Commission internationale de l'éclairage 191, 263
 COB – *Chip on board* 75, 78, 194
 colorimétrie 32
 compacité 264, 280
 conformal coating 130, 247
 consortium Zhaga 275
 corps noir 34
 correcteur de cosinus 42
 courant
 d'alimentation 173
 maximum admissible 169
 coût
 des composants 290
 des solutions à LED 292
 CQS – *Color Quality Scale* 193
 croissance épitaxiale par évaporation 105
 CVD – *Chemical Vapor Deposition* 104

D

décalage du spectre 172
 densité de courant 155
 dépôt en phase vapeur 104
 dérive chromatique 171, 175
 design thermique 260
 diagramme trichromatique 34
 direct attach 59, 102, 110
 direct-gaps 93
 dissipation de la chaleur 269
 dissipation thermique 67
 DoE – *Department of Energy* 263
 driver de LED 274
 durée de vie 169

E

éblouissement 283
 éclairage
 architecturaux 212
 dans les transports 296
 dans les zones de stockage 297
 dans l'industrie 296
 de bureaux 214
 décoratif 295
 de machines outils 228
 de sécurité 233
 extérieur 212
 intérieur 216, 295
 pour les voitures 223
 public 297
 publicitaire 205
 résidentiel 214
 scénique 212
 éclairage 37
edge bonding 57
 efficacité lumineuse 163
 émission (non) radiative 91, 96
 enseignes lumineuses 205
 épitaxie 114
 équations de Maxwell 8
 étalonnage 41

évaluation spectrale 189
extraction de la lumière 146, 250

F

fabricants
 de LED 287
 de puces semi-conductrices 287
 fabricants de LED 284
feux de piscines 233
flip chip 100, 110
fluide caloporteur 270
fluorescence 14
flux 44
 énergétique 28
 lumineux 184
 spectrique énergétique 29
 total 37
 visible 30
fusibles thermiques 271

G

GaN 118
garnets 178
goniomètre 44
green gap 164, 244

H

horloges 207
humidité 176
HV 194
HVPE – *Hybrid Vapor-Phase Epitaxy* 105

I

IES – *Illuminating Engineering Society* 300
incandescence 11
indicatrices 40
indice de rendu de couleur (CQS) 193
indirect-gaps 93
intensité 39, 43
IRC – indice de rendu des couleurs 191
ISA – *International Solid State Lighting Alliance* 263
ISA – *International SSL Alliance* 300
ITO – *Indium Tin Oxide* 244

J

jet moléculaire 104
jonction P-N 89, 151

L

lacunes spectrales 180
lampe
 à économie d'énergie 13
 à incandescence 8, 11
 de poche 232
 fluocompacte 14, 15
 fluorescente basse pression 13
 haute pression 18
 lampe de poche 232
 sodium basse pression 17
LED 19
 blanche 24
 CMS (Composant monté en surface) 138
 de faible puissance 133
 de forte puissance 134
 de basse puissance 185, 195
 de forte puissance 195
 de puissance 24, 184
 intermédiaire 185
 de type 5 mm 68, 132
 de type 5630 265, 267
 de type CMS 71
 de type piranha 69
 multipuces 75, 194
 RGB
 de basse puissance 200
 de forte puissance 201
 de puissance intermédiaire 201
lentilles primaires 66
longueur d'onde 28
low drop 157, 158
LPCVD – *Low Pressure Chemical Vapor Deposition* 105
lumen 31, 185
lumière 31
luminance 38, 43
luminancemètre 43
luminescence 11
luminophore 61, 124, 246
 déportée 218
 RGB 179
luxmètre 41

M

matrices
 chip-on-board 143
 de LED 75
MBE – *Molecular Beam Epitaxy* 104, 105, 115
méthodes d'alimentation 249
microbille 122
MOCVD – *Metal-Organic Chemical Vapour Deposition* 24, 115

mode
 continu 175
 de pilotage 174
 pulsé 175
module
 à LED 275
 COB 78, 80
 de LED 82
MQW – *Multiple Quantum Well* 92
multi-luminophores 128, 179

N

niveau de Fermi 92

O

œil humain 27
OIDA – *Optoelectronics Industry Development Association* 263, 299, 300
OLED 19
onde électromagnétique 6
optique
 primaire 137, 147
 secondaire 137

P

panneaux d'information 207
performances des semi-conducteurs 172
pertes 163
phonons 96
phosphores 124
photométrie 31
photon 7, 27
pilotage 151
 des LED 271
 en courant 272
 en tension 272
piranha 226
PMMA – *Poly Methyl Methacrylate* 149
point de couleur 34
poting 247
puissance 28
 optique 182
puits quantiques multiples 92

Q

qualité colorimétrique 188, 283

R

radiomètre 41

radiométrie 31
réflecteurs 66
régulation thermique 271
remote phosphore 218
rendement 162, 163, 166, 280
 lumineux 185
résine époxy 148
résistance thermique 181, 182
rétro-éclairage 207
RGB 199
RGBA 213
RGBW 213

S

saphir (Al_2O_3) 114, 117
Schockley 151
semi-conducteur 50
side emitting 207
signalisation routière 208
source
 étalon 41
 monochromatique 30
spectre 29, 189
 d'émission 280
sphère
 d'Ulbricht 44
 intégratrice 44, 45
substrat 55, 114, 245, 287
 en cuivre 246
systèmes à luminophores déportés 276

T

TCL – *Transparent Contact Layer* 107
technologie
 d'alimentation 120
 LED 20
 RGB 199
température de couleur 35, 190
tension
 AC 161
 d'alimentation 152
 DC 159
 de seuil 152
 HV 160
texturation 66
théorie ondulatoire 7
top emitting 207
tube
 fluorescent 9, 14, 214, 259
 néon 9, 13