

LE MAGAZINE
D'ASPROM

(www.asprom.com <<http://www.asprom.com>>)

TRIMESTRIEL - 45 €

n°38
Août 2010
Septembre 2010

NUMÉRO SPÉCIAL SUR "LES LEDs L'ÉCLAIRAGE DU FUTUR"

Roland DUBOIS
Publications de ASPROM
7, rue Lamennais - 75008 PARIS
Tél. 06 07 02 83 93 - Fax. 01 42 89 82 50
Rédacteurs : Jean-Claude BASSET, Pierre COTTIN,
Jean-Claude FRAVAL, Guy GIRARDETTI, Maurice
MORDANT, Patrice ROUSSO
Prix du numéro : 45 € - Abonnement : 152 €.
Reproduction autorisée avec mention d'origine après
accord de la publication et de l'auteur.
Maquette : Patrick Perrault.
Mise en page, composition, impression : Imprimerie
DÉJAGLMC. 01 34 45 22 22

Les communiqués de presse
et les invitations aux conférences de
presse sont à envoyer à :
Roland DUBOIS
Veille Technologique
3, rue de la Pléiade
94240 L'Hay les Roses

VEILLE TECHNOLOGIQUE

LES LEDs : L'ÉCLAIRAGE DU FUTUR ?

Les LEDs ont quitté le simple domaine de la signalisation pour aborder celui de l'éclairage. Cette technologie présente des atouts considérables en termes d'efficacité énergétique, de fiabilité, de « gradabilité », de dimensions et de couleurs avec, encore devant elle, un fort potentiel de développement. Ces caractéristiques que l'on ne trouve ainsi réunies dans aucune autre source de lumière sont à l'origine de leur succès.

La prochaine étape importante sera celle où les performances technico-économiques des LEDs leur permettront de pénétrer le marché de l'éclairage général, ouverture dont on sent actuellement les prémices, phénomène qui devrait s'amplifier dans les années à venir.

Dans les années 2020, les LEDs devraient être les sources de lumière les plus efficaces et fiables du marché. Ces LEDs ouvrent ainsi un champ d'innovations potentielles exceptionnel. En revanche, sources d'éclairage électronique, leur maîtrise requiert plusieurs savoir-faire allant de l'optique à l'électronique en passant par la thermique.

Avec l'arrivée des LEDs dans le marché de l'éclairage, la qualité de la lumière est une issue cruciale pour leur valorisation. La nature du spectre de la lumière émise par les LEDs est suffisamment différente de la lumière naturelle et des différentes générations de sources artificielles connues jusqu'à présent pour que plusieurs laboratoires français et étrangers se soient engagés dans des études sur la qualité et la perception de la lumière issue de LEDs. Plusieurs aspects méritent en effet d'être pris en considération : la couleur de la lumière blanche, le rendu des couleurs des matériaux sous cette lumière, la performance dans l'exécution des tâches visuelles, la sécurité, le confort et l'appréciation de l'utilisateur.

Pour faire connaître les standards, les technologies, les usages, les applications, mais aussi les défis et les enjeux autour des LEDs, ASPROM a organisé deux journées sur le thème « les LEDs : l'éclairage du futur ». Les conférenciers étaient parmi les meilleurs experts français des grandes organisations, mais aussi de jeunes entreprises innovantes. Veille Technologique a demandé à ces experts de vous faire partager leur expérience dans ce domaine.

SOMMAIRE DES ACTUALITÉS

LEDs L'ÉCLAIRAGE DU FUTUR

Les avis de l'ADEME.

L'éclairage à diode électroluminescentes (LED) 3 et 4

Définition des termes techniques de lumière 5

LED ou lampes en éclairage public

De quoi s'agit-il ? 6 à 8

Les LEDs de haute brillance

*Par Patrick MOTTIER, Responsable du Programme "Nouvelles Technologies pour l'Eclairage"
CEA-LETI-MINATEC - Département Optronique* 9 à 13

Les LEDs organiques, source de lumière du futur ?

*Marc TERNISIEN, David BUSO et Georges ZISSIS
Laboratoire Plasmas et Conversion d'Energie (LaPLaCE), Université Paul SABATIER, Toulouse* 14 à 17

La gestion thermique des LEDs de haute brillance

Paul MESSAOUDI, CEA-Léti Département Optronique 18 à 27

L'optique des éclairages à LEDs

Laurent MAYOLLET, O++ 28 à 30

Perception de la lumière issue de LEDs

*Françoise VIÉNOT
Muséum national d'histoire naturelle. Centre de recherche sur la conservation des collections* 31 à 34

Méthode de caractérisation des sources lumineuses

Par Thierry PUPPATO, Directeur marketing et ventes chez MAJANTYS 35 à 38

Utilisation des LED dans les éclairages chirurgicaux de salle d'opération : les contraintes, les performances

Par Jean-Pierre BREYSSE, Directeur de la recherche chez MAQUET 39 à 44

Solutions lumière Lightex® en fibres optiques tissées

Par Emmanuel DEFLIN, Directeur chez BROCHIER TECHNOLOGIE SA 45 à 47

Les LEDs : L'éclairage du futur ?

Point de vue de l'éclairagiste
Par Christophe MARTY, Consultant Associé, Ingénieur ITPE / Architecte DPLG 48 à 51

Les LEDs à nanofils

Alexandre LAGRANGE - Responsable Thématique Eclairage CEA-LETI-MINATEC 52 à 55

Carte de visite association

Le Cluster Lumière - Optimiser l'éclairage pour répondre aux enjeux du développement durable 56 et 57
Afè - Une association au service de la lumière 58

Energie solaire photovoltaïque et son stockage. Technologies, enjeux et applications

à Paris, Mercredi 24 et jeudi 25 novembre 2010 59

Imagerie infrarouge thermique jusqu'au millimétrique. Techniques, enjeux et applications

à Paris, 7 et 8 décembre 2010 60

BULLETIN D'ABONNEMENT 30



Les Avis de l'ADEME

L'éclairage à diodes électroluminescentes (LED)

ENJEUX

L'éclairage représente, en France, 10 % des consommations totales d'électricité. Dans le cadre du plan climat-énergie, l'Union Européenne a arrêté un calendrier de retrait progressif des ampoules traditionnelles de 25 à 100 watts qui cesseront d'être mises sur le marché au plus tard le 1er septembre 2012. En France, une convention sur le retrait progressif des ampoules à incandescence a été signée, dans le cadre du Grenelle Environnement, entre le Ministère du développement durable, les fédérations du commerce, l'éco-organisme Récyclum, EDF et l'ADEME¹. Le calendrier fixé comprend des étapes intermédiaires plus volontaristes que celles proposées par l'Union Européenne avec l'objectif d'interdire les ampoules à incandescence à l'horizon 2012. L'éclairage à diodes électroluminescentes (LED) est souvent présenté comme une alternative aux lampes traditionnelles, aux côtés des lampes à basse consommation (voir Avis « Les lampes basse consommation ») et des halogènes nouvelle génération, ces derniers représentant l'alternative la moins efficace en termes d'efficacité énergétique.

DESCRIPTION

Une diode électroluminescente (LED²) est un composant électronique permettant la transformation de l'électricité en lumière. Ses principales applications sont par ordre d'importance en termes de marché : les appareils mobiles, les écrans, le secteur de l'automobile, l'éclairage et la signalisation.

Il est possible de classer les LED :

- par leur spectre lumineux :
 - les **LED de couleur** : leur spectre est quasiment monochromatique ;
 - les **LED blanches** : leur spectre est constitué de plusieurs longueurs d'ondes ; la technologie la plus utilisée actuellement pour produire de la lumière blanche avec des LED consiste à ajouter une fine couche de phosphore dans une LED bleue.
- par leur puissance : le principe de fonctionnement est identique, mais le champ d'application varie :
 - les LED de faible puissance c'est-à-dire inférieure à 1 Watt sont utilisées comme voyants lumineux sur les appareils électroménagers par exemple ;
 - les LED de forte puissance c'est-à-dire supérieure à 1 Watt supportent des courants plus importants (jusqu'à 1500 mA) et fournissent davantage de lumière (jusqu'à 135 lm/W).

Pour l'éclairage, on utilise des lampes constituées de plusieurs LED de forte puissance accolées.

DEVELOPPEMENTS

Le marché

Les propriétés de l'électroluminescence dans les semi-conducteurs ont été découvertes en 1922 puis industrialisées à partir de 1960 sous la forme de diodes de couleur. C'est seulement en 2000 que les LED de forte puissance et les LED blanches sont apparues, grâce à d'importants efforts de R&D, avec l'ambition de concurrencer les technologies existantes pour l'éclairage courant des particuliers, sur les lieux de travail ou en éclairage extérieur.

Selon une étude de la société de semi-conducteurs NXP³, le marché des LED pourrait connaître un taux de croissance annuel de près de 15 % entre 2008 et 2012 pour atteindre 12,3 milliards de dollars. Alors qu'en 2005, le marché des LED n'avait grimpé que de 2,1 %, les industriels font état d'une hausse de 13,7 % en 2007. Si la part de marché des LED pour l'éclairage reste faible en comparaison de celle des LED dans les appareils mobiles, elle devrait connaître la plus forte croissance en part de marchés en 2010 (+ 117 %).

Les industriels de l'éclairage sont aujourd'hui en phase d'apprentissage face à cette technologie d'origine électronique, tandis que les milieux de l'électronique cherchent à appréhender les besoins de l'éclairage pour y adapter la technologie LED. Quatre grands fabricants se répartissent le marché mondial des LED : Philips Lumileds (USA), Osram (USA et Allemagne) et Nichia (Japon) et Seoul Semiconductor.

Performances techniques

La technologie des diodes électroluminescentes ouvre des perspectives intéressantes en matière d'éclairage économique : bon rendement énergétique des diodes (jusqu'à 135 lm/W en laboratoire pour les LED dites super lumineuses), durée de vie importante (jusqu'à 50 000 heures pour les lampes à LED contre 1 000 h pour les ampoules à incandescence et 8 000 h pour les lampes basse consommation), fonctionnement en très basse tension, insensibilité aux chocs, possibilité de couleurs sans filtres, facilité de montage et absence de mercure. Elles admettent des cycles d'allumage et d'extinction fréquents et sont recyclables⁴. En matière d'éclairage public, les LED ont l'avantage d'admettre une alimentation en courant continu (ce qui rend possible l'utilisation de sources d'énergies renouvelables) et un allumage très rapide ; elles bénéficient d'une bonne étanchéité.

Toutefois, les lampes à LED actuellement disponibles sur le marché de l'éclairage domestique offrent un flux lumineux encore limité (équivalent à celui d'une lampe à incandescence de 40 W) et concentré (elles n'éclairent pas un

¹ http://www.developpement-durable.gouv.fr/article.php?id_article=3816

² LED est le sigle anglais pour Light Emitting Diode, traduit en français par le sigle DEL pour Diode Electroluminescente (mais peu usité).

³ www.nxp.com

⁴ www.recyclum.com

LEDs ECLAIRAGE DU FUTUR

large champ). En outre, ces produits sont de qualité et d'efficacité inégales et il n'existe pas de méthode harmonisée pour mesurer leurs performances énergétiques et visuelles, ni d'étiquette énergie permettant d'informer le consommateur sur ces performances.

Il est donc difficile pour le consommateur de choisir les meilleurs produits.

Enfin, les performances des lampes à LED doivent encore être améliorées. Ainsi, si une diode seule affiche un rendement énergétique très bon (environ 100 lm/W et jusqu'à 135 lm/W pour les plus performantes), une lampe à LED offre un rendement compris entre 40 et 50 lumens/watt. Cette baisse de rendement est notamment liée à la chaleur produite par les diodes accolées dans la lampe. Les lampes à LED mises sur le marché ont donc en moyenne une efficacité énergétique moins bonne que celle des lampes fluocompactes (65 lm/W) mais meilleure que celles des lampes à incandescence traditionnelles à filament (14 lm/W).

Toutefois, les évolutions technologiques attendues laissent entrevoir, à l'horizon 2015, un rendement de 150 lm/W.

L'indice de rendu de couleur est encore mauvais pour la majorité des lampes à LED blanches mises sur le marché.

Par ailleurs, des études doivent être menées sur les impacts sanitaires des LED, certaines diodes contenant un spectre bleu de forte intensité qui pourrait s'avérer dangereux pour la rétine. L'Afsset évalue actuellement l'impact des LED sur la santé.

Dans le domaine de l'éclairage public où les contraintes sont plus fortes en raison des conditions extérieures (température, pluie...), les travaux de recherche visent une bonne efficacité lumineuse et une bonne stabilité de lumière.

COÛTS

Une lampe à LED de qualité reste encore très coûteuse à l'achat. Les progrès techniques et le développement rapide des ventes devraient faire baisser les prix.

AVIS DE L'ADEME

Compte tenu d'une durée de vie très longue et d'une consommation électrique faible, **les LED constituent une technologie prometteuse** en matière d'éclairage économe.

Les performances des lampes utilisant des LED doivent toutefois encore progresser, en particulier en matière d'efficacité énergétique. L'absence d'un référentiel qualité et de normes photométriques appliqués aux lampes à LED ne permet pas aujourd'hui de vérifier les performances réelles des lampes mises sur le marché. De plus, face à l'offre disparate de produits, le consommateur ne dispose pas d'outils, telle l'étiquette énergie, pour faire son choix. **Enfin, des études complémentaires sur les impacts sanitaires sont attendues. L'ADEME n'est donc pas en mesure de faire la promotion des produits actuellement sur le marché.**

L'ADEME accompagne les travaux de recherche et de développement menés sur les LED depuis le début des années 2000. **L'Agence s'attache, à travers sa participation à des projets de recherche français⁵ et internationaux, à favoriser le développement de produits à LED performants et de référentiels permettant d'assurer la qualité des produits mis sur le marché.** Partie prenante du programme « 4 E » mené par l'AIE⁶, l'ADEME appuie la mise en place d'une plate forme de discussion internationale pour définir des critères de qualité et d'efficacité des LED, ainsi qu'un protocole de mesures.

En matière d'éclairage public, l'Agence soutient, sous certaines conditions⁷, des opérations permettant un retour d'expérience pour l'application de cette technologie dans les politiques locales d'économie d'énergie.

Pour en savoir plus

Publications

- guide ADEME sur l'éclairage performant
- guide AFE sur l'éclairage

Sites Internet

- www.ecocitoyens.ademe.fr
- www.afe-eclairage.com

⁵ et notamment financement du programme Citadel (Caractérisation de l'intégration et de la durabilité des dispositifs d'éclairage à LED dans le bâtiment) coordonnée par le CSTB et participation au Programme d'Actions Concertées en Technologies de l'Energie LED (développement d'une offre de LED se substituant aux halogènes TBT avec une puissance électrique inférieure et une durée de vie plus longue)

⁶ Agence Internationale de l'Energie.

⁷ Étude préalable incluant un volet conception de l'éclairage et un volet énergétique (comparaison de consommation par rapport aux lampes fluorescentes ou sodium).



Définition des termes techniques de lumière

Sources primaires : Les sources émettrices de lumières sont des sources primaires. Le soleil, la flamme d'une bougie, une ampoule électrique sont des sources primaires. Elles émettent de la lumière dans toutes les directions. Leur intensité se mesure en candelas (cd).

Sources secondaires : Les sources secondaires sont des sources de lumières qui réfléchissent la lumière en direction de l'observateur ou de l'appareil photographique. Ce flux lumineux secondaire, la luminance, s'exprime en candelas par mètre carré (cd/m²).

Le Flux (F ,en lumen) : Énergie lumineuse émise dans une direction donnée. Ce flux est égal à 1 lumen si la source présente à la base du cône est de 1 candela.

La luminance (cd) : Grandeur mesurée à proximité immédiate de la source lumineuse. Elle s'exprime en candela.

L'éclairement (en lux) : C'est le flux lumineux reçu. Une surface reçoit un lux si sa surface est de 1m² et si elle est situé perpendiculairement à 1m d'une source d'un candela.

Les unités de mesure de la lumière

Candela : unité de l'intensité lumineuse. 1 candela vaut 1 lm/1 sr (lumen/stéradian).

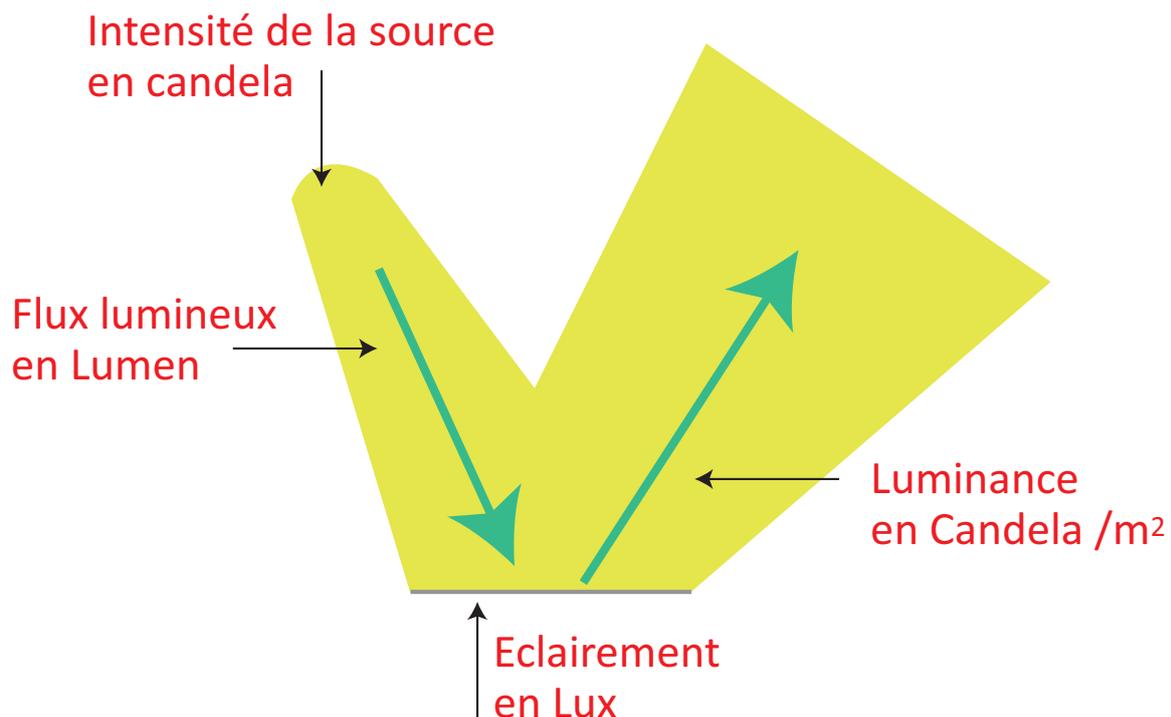
Stéradian ou Angle Solide Unité : C'est un cône dont la base est le centre d'une sphère d'un mètre de rayon et dont l'extrémité est un cercle de 1m² de surface situé sur la sphère. (symbole sr).

Lumen : unité de la quantité de lumière rayonnée par une source dans le spectre visible (symbole lm)

Luminance : quotient de l'intensité lumineuse par la surface apparente de la surface émissive. La luminance se note L et s'exprime en candela par mètre carré, valeur comprise entre 0,05 et 5000 cd/m².

Lux : Unité de l'éclairement, c'est la quantité de lumière, ou flux lumineux exprimé en lumen émise par une source, interceptant une surface exprimée en m². (1 lux = 1 lm /1 m²).

Source : *b-schmerber (b.schmerber.9online.fr/ecran/lumiere.htm)*



LED ou lampes en éclairage public. *De quoi s'agit-il ?*

Le marché de l'éclairage public subit depuis quelques années un véritable choc avec l'arrivée de plus en plus pressante de matériel équipé de diodes électrolumi-nescentes. Les annonces et actions marketing de nouveaux venus sur ce secteur promettent toutes des résultats inespérés, tant des points de vue économique et énergétique que du retour d'images positives pour la ville et ses élus. Souvent, ce sont les performances en laboratoire de la LED¹ seule qui sont citées, sans s'étendre sur les performances du luminaire dans son ensemble, en conditions réelles.

Quel est aujourd'hui l'apport des LED à l'éclairage public ?

L'AFE donne son point de vue

1 - Avant propos

Les performances d'un luminaire, qu'elles soient photométriques, électromécaniques, électroniques, énergétiques et économiques, résultent :

- de la somme des performances de ses composants (la source de lumière, le système optique, les auxiliaires électriques),
- des matériaux utilisés et du savoir faire pour les mettre en œuvre,
- de leur compatibilité à la fois entre elles et à la fois avec les caractéristiques d'installation définies par le cahier des charges et l'étude.

L'arrivée d'un nouveau composant électronique, la LED, ne peut à elle seule révolutionner l'éclairage, le respect des normes devant rester la règle de base.

En revanche, elle va imposer aux éclairagistes de créer de nouveaux produits, de nouvelles installations, de nouveaux principes de relamping et de maintenance, de nouvelles photométries, pour répondre au même titre que les luminaires avec lampes à décharge, aux exigences normatives, qu'elles soient de

sécurité ou de performances (norme EN 13201) ainsi qu'aux quatre grandes applications d'éclairage qui composent l'éclairage extérieur (fonctionnel de type routier - ambiance - grands espaces - illuminations).



En éclairage public fonctionnel, la technologie des LED offre aujourd'hui des performances moins satisfaisantes, tant sur les plans énergétiques qu'économiques, que les meilleures installations à lampes. Promouvoir maintenant sans réserve cette application risquerait de compromettre le développement futur des LED.

Des réalisations expérimentales sont conduites aujourd'hui par les plus importants constructeurs européens, spécialistes en éclairage public, ceux-là même qui consacrent un investissement lourd aux développements des techniques LED. Leurs résultats sont très prometteurs et sans comparaison

avec les essais menés ici et là, émanant de nouveaux venus dans le monde de l'éclairage, qui n'ont peut-être pas pris le temps de se convaincre que l'éclairagisme est un métier à part entière dans lequel l'expérience acquise, prenant en

compte les contraintes urbaines, les critères de visibilité, de sécurité et de confort, joue un rôle majeur dans la qualité des résultats.

2 - Que choisir ?

De même que les lampes se distinguent entre elles par des performances différentes (efficacité - couleurs - durée de vie), les LED apportent leurs performances particulières (allumage - durée de vie - couleurs - variations de puissance - températures - encombrements - systèmes optiques - efficacités lumineuses et énergétiques - alimentation).

Il serait dangereux aujourd'hui de vouloir faire un classement de ces sources

¹ Diode électroluminescente, souvent appelée LED pour Light Emitting Diode en anglais.

de lumière en fonction d'un seul de ces critères de performances. Ce qui est indispensable, c'est de savoir déterminer quelles sont les meilleures performances spécifiques à affecter au service de chacune des applications d'éclairage extérieur : efficacité lumineuse - efficacité énergétique - photométrie - maintenance - économie.

2.1 - Sur le plan « Efficacité lumineuse »

Pour les lampes les plus couramment utilisées en France, l'efficacité lumineuse des ensembles « lampes plus appareillages » est aujourd'hui environ la suivante :

- 120 lm/W pour le sodium haute pression 250 et 450 W ;
- 100 lm/W pour le sodium haute pression 100 et 150 W ;
- 80 lm/W pour le sodium haute pression 70 W ;
- 105 lm/W pour les cosmowhites 60 à 140 W ;
- 80 lm/W pour les iodures métalliques 70 à 250 W.

En l'état actuel de la technologie (1^{er} semestre 2009), il y a lieu de distinguer les LED teintes neutres et froides 4 500 K à 6500 K et les LED teintes chaudes 3 000 K dont les flux émis sont très différents pour une même puissance consommée LED + alimentation.

En fabrication on trouve sur le marché des LED qui, après tri sélectif, peuvent émettre 120 lumens, dans des conditions thermiques très précises à respecter, après intégration dans le luminaire. Leur consommation sous 350 mA, alimentation comprise, est de 1,2 W à 1,3 W. Si l'on tient compte d'un facteur de dépréciation thermique de 0,9, on peut espérer une efficacité lumineuse, source comprise, entre 65 et 90 lumens/watt selon :

- la température de couleur,
- la qualité du tri sélectif des LED,
- la qualité de la conception du luminaire (thermique - nombre et distribution des LED).

L'efficacité lumineuse LED est dépendante des caractéristiques thermiques du luminaire, tout comme l'est celle

des tubes fluorescents et ne permet pas, à elle seule, de faire des comparaisons d'efficacité énergétique avec les autres sources de lumière à décharge, dont l'efficacité lumineuse est considérée comme une constante par type et puissance de lampe.

A noter : la teinte 3 000 K correspond en général à la meilleure appréciation en France des usagers.

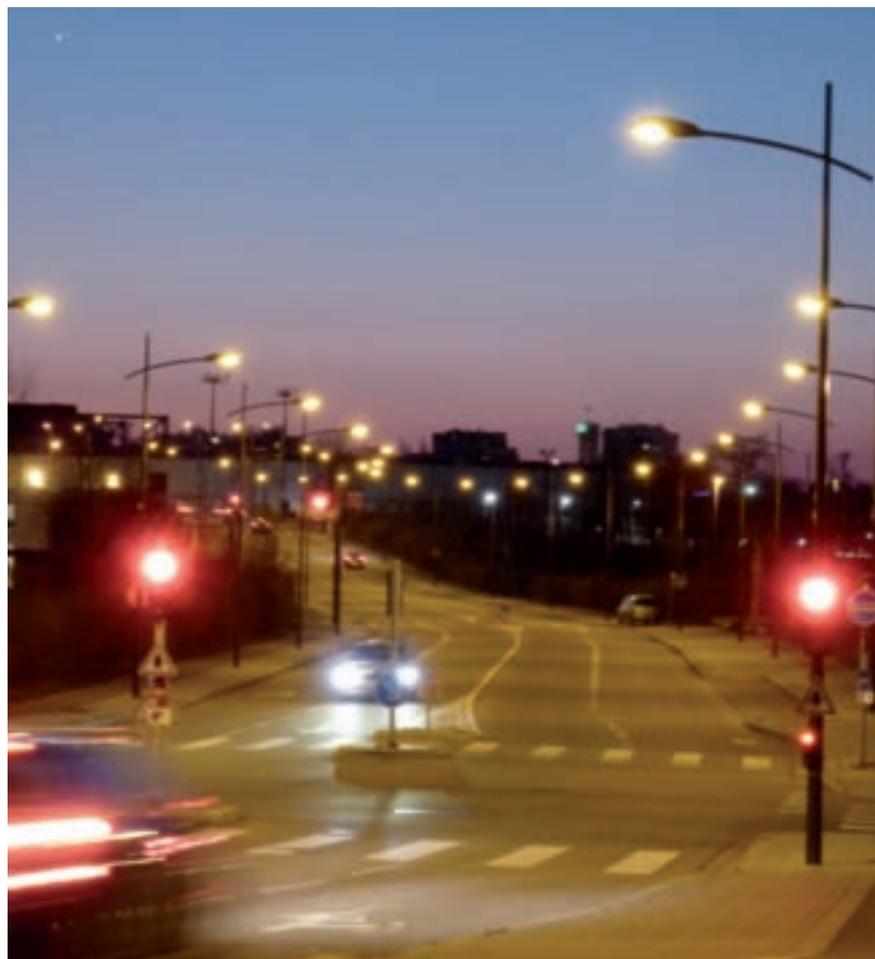
2.2 - Sur le plan « Efficacité énergétique »

En se référant au dossier de l'AFE de mai 2009, intitulé « *Efficience énergétique en éclairage public* », on constate que l'efficacité énergétique, qui s'exprime en watts par lux et par mètre carré², dépend exclusivement du produit du facteur d'utilisation par le facteur de maintenance et par l'efficacité (lampe plus auxiliaires). A titre d'exemples, le dossier AFE présente cinq calculs exprimant les efficacités énergétiques résultant de cinq projets différents d'éclairage fonctionnel caractérisés chacun par le type et la puissance des lampes utilisées, le degré de protection I.P des luminaires, la nature de la vasque de fermeture et ayant en commun un même facteur d'utilisation de 0,4.

A l'efficacité énergétique de chaque projet est comparée l'efficacité énergétique que l'on obtiendrait avec des LED dans chaque cas considéré. Même en supposant (ce qui n'a rien d'évident) que la répartition photométrique particulière des systèmes à LED permettrait d'obtenir un facteur d'utilisation de l'ordre de 25 % supérieur à celui obtenu avec les lampes, on constate que les watts par lux et par mètre carré en LED sont supérieurs de 18 à 67 % à ceux obtenus avec les lampes sodium haute pression et cosmowhite ; en revanche, le calcul montre que sur le plan énergétique, les LED donnent des résultats identiques à ceux obtenus avec des lampes iodures céramiques de 35 à 100 W de puissance nominale.

2.3 - Sur le plan photométrique

Pour des éclairages publics à faible niveau d'éclairement, les lampes couramment utilisées génèrent un flux de l'ordre de 6 500 lumens par lampe. Avec des LED de 1,25 watt (les plus efficaces aujourd'hui) qui produisent de l'ordre de 82 lumens utiles, il faut de l'ordre de 90 LED pour prétendre à un



² Ou en watts par candela mètre carré par mètre carré.

LEDs ECLAIRAGE DU FUTUR

même niveau d'éclairage moyen pour une même surface éclairée. C'est dire que l'orientation de chaque

LED dans le luminaire a une grande importance sur la qualité du résultat photométrique (uniformité et éblouissement).

Pour les installations routières justifiant des lampes de 10 500 à 32 000 lumens, les LED proposées aujourd'hui ne sont pas encore suffisamment puissantes en flux unitaire.

En revanche, l'angle d'ouverture du faisceau, associé à une orientation précise de la source, doit permettre avec les LED un plus faible rapport lux par candela mètre carré en éclairage public fonctionnel, ce qui doit se traduire par un gain énergétique supplémentaire. Encore faut-il se trouver dans le cas où les calculs en luminance sont pertinents (ce qui est rarement le cas des éclairages d'ambiance des pistes piétons et cyclables et des voies urbaines en général).

Les LED permettent de maîtriser avec précision la direction de la lumière émise et l'angle d'ouverture du faisceau. En cela, elles doivent permettre de supprimer tout ou partie des lumières perdues en dehors des surfaces à éclairer et d'améliorer le facteur d'utilisation sur les surfaces utiles, **à condition de respecter en milieu urbain, le niveau d'éclairage indispensable sur les trottoirs ou abords de la voie circulée et de respecter, lorsqu'il est imposé, le rapport de contiguïté SR³.**

2.4 - Sur le plan maintenance

Qu'il s'agisse de LED ou de lampes, l'application de la norme européenne EN 13201 exige que les règles et habitudes de maintenance soient repensées.

La maintenance ne consistait, dans la très grande majorité des cas, qu'à éviter les pannes ou à les réparer, sans souci de l'état des performances photométriques de l'installation.

Les cycles de maintenance étaient calés sur la durée de vie économique estimée des lampes utilisées (2 ans pour les Iodures, 3 ans pour les Sodium Haute Pression).

L'erreur qui commençait à se répandre était que, certaines lampes (SHP) ayant une durée de vie utile de 4 ans, il suffisait de régler la maintenance sur un cycle de 4 ans. C'est ne pas comprendre la finalité de la norme EN 13201 que de raisonner ainsi : la norme impose des valeurs moyennes minimales à maintenir tout au long de la durée de vie de l'installation, ce qui impose, dès la conception ou la rénovation des installations, de définir le facteur de maintenance global et de faire en sorte qu'il soit le plus élevé possible.

Ce facteur est essentiellement variable en fonction du cycle de maintenance de la dépréciation des sources de lumière et de la dépréciation du luminaire. Plus le facteur de dépréciation est faible, plus l'installation est économe. Il y a maintenant obligation d'optimiser le cycle de maintenance, non plus sur la seule durée de vie utile des sources, mais sur le facteur de maintenance le plus élevé possible.

C'est ainsi que la durée de vie utile annoncée de 30 à 50 000 heures pour les LED (soit 7 à 12 ans) en éclairage extérieur, ne permet pas de rallonger le cycle de maintenance, car ce serait au détriment de l'efficacité énergétique globale et, pollution aidant, la maintenance électromécanique et l'encrassement exigent, pour la sécurité et la meilleure efficacité énergétique, des cycles de 3 ans voire 4 ans maximum.

2.5 - Sur le plan économique

Le bilan d'exploitation global, comprenant la consommation et la maintenance (y compris le remplacement des LED en fin de vie), fait ressortir, pour les solutions utilisant des LED en éclairage fonctionnel, des dépenses de l'ordre de 150 à 450 % plus onéreuses que les solutions classiques à lampes sodium haute pression, cosmowhites et iodures métalliques. Le développement du marché LED devrait conduire, à terme, à une réduction des différences de prix, mais nous n'en sommes pas là.

3 - Domaine actuel d'application des LED en éclairage public

Les LED laissent présager d'un avenir remarquable dans beaucoup d'applications de l'éclairage. Mais aujourd'hui leurs domaines d'applications privilégiés doivent se concentrer sur les réalisations suivantes, à savoir lorsque :

- un allumage instantané s'impose (éclairage de sécurité ou de dissuasion - éclairage de voies privées très peu fréquentées) ;
- une modulation multiple et importante du niveau de lumière est nécessaire (parkings privés - éclairages de secours) ;
- l'on veut réaliser un fonctionnement commandé par détecteur de présence (abribus - zones privatives - voies résidentielles) ;
- l'on désire réaliser des effets lumineux par variations de couleurs de la lumière ;
- l'on réalise des éclairages de mise en valeur statiques ou dynamiques des façades, monuments et fontaines ;
- l'on réalise un balisage de certains parcours piétonniers et pistes cyclables ;
- l'on réalise des éclairages d'ambiance urbaine en lumière blanche pour lesquels les niveaux d'éclairage peuvent être faibles et conformes à la norme EN 13201 (lotissements, parkings privés, pistes cyclables, etc.) ;
- un balisage complémentaire doit s'ajouter à un éclairage traditionnel pour une meilleure lisibilité du parcours ;
- en illuminations, des projecteurs très directionnels, colorés ou non, sont nécessaires ;
- en éclairage d'ambiance, l'utilisation de sources multiples miniaturisées voire diversement colorées, apporte des effets lumineux supplémentaires générateurs de nouvelles ambiances nocturnes.

4 - Conclusion

Les luminaires équipés de LED sont encore aujourd'hui souvent moins performants et toujours plus onéreux, particulièrement en éclairage public fonctionnel, que les luminaires les plus performants à lampes. Compte tenu des progrès technologiques rapides constatés sur les LED, il est intéressant d'envisager de les tester dès à présent sur des espaces adaptés pour observer, sur ces nouveaux produits, leur fiabilité, leur potentiel énergétique, leurs exigences de maintenance électromécaniques et photométriques. Cela ne peut se faire qu'en totale collaboration avec des constructeurs éclairagistes responsables, seuls capables d'assurer les garanties de performances que le maître d'ouvrage est en droit d'attendre de ces expérimentations.

³ Cf. « Recommandations relatives à l'éclairage des voies publiques » de l'AFE, chapitres 6.5.5 et 8.4.7 et dossier « Efficacité énergétique en éclairage public », page 27 et 28.

Les LEDs de haute brillance

Patrick MOTTIER,
Responsable du Programme "Nouvelles Technologies pour l'Eclairage"
CEA-LETI-MINATEC - Département Optronique
17, rue des Martyrs - 38054 Grenoble Cedex 9
Tél. : 04 38 78 48 69 - patrick.mottier@cea.fr

1 - Introduction

L'arrivée de diodes électroluminescentes (LEDs) de haute brillance et de haute efficacité énergétique conquièrent des niches marketing de plus en plus nombreuses au fur et à mesure que croissent leurs performances et diminuent leur prix. La feuille de route de l'Optoelectronics Industry Development Association (OIDA) prévoit, qu'à terme, elles deviennent les sources de lumière les plus performantes du marché en terme d'efficacité lumineuse (Figure 1)¹.

L'efficacité énergétique de ces LEDs s'avère bien supérieure à celle des lampes à incandescence et dépasse désormais celle des lampes fluocompactes pour les meilleures d'entre elles.

Leur temps de réponse très court et leur totale « gradabilité », deux autres caractéristiques propres aux LEDs, rendent possible l'utilisation de systèmes de gestion énergétique qui optimisent en permanence le flux de lumière en fonction du besoin. Les LEDs se prêtent donc à une gestion spatiale et temporelle de l'éclairage qui induit à son tour une amélioration des performances énergétiques du système.

Les LEDs sont également fiables et insensibles aux chocs. L'accès à des couleurs saturées, l'absence de risque électrique, le bon fonctionnement à basse température, l'absence d'UV ou d'infrarouge rayonnés sont autant d'avantages qui peuvent se révéler déterminants pour certains marchés.

Leurs dimensions réduites permettent d'imaginer des luminaires aux facteurs de forme totalement nouveaux.

L'étape ultime sera toutefois celle où les performances technico-économiques des LEDs leur permettront de pénétrer le marché de l'éclairage gén-

ral, ouverture qui devrait vraisemblablement se produire dans les 5 années à venir. Avec cet objectif en ligne de mire, on assiste actuellement à une course effrénée aux performances de la part des fabricants et à une multiplication des « nouveaux entrants ».

2 - Un peu d'histoire

« Messieurs, pendant l'investigation du passage asymétrique du courant au travers d'un contact de carborundum² ou d'autres substances, un phénomène bizarre a été observé. En appliquant une différence de potentiel de 10 V entre deux points du cristal de carborundum, ce dernier a émis une lumière jaunâtre [...] ». C'est en ces termes qu'Henry Joseph Round (Marconi Co, UK) rapporta en 1907, la première émission de lumière par un semi-conducteur.

Le premier brevet de LED a été déposé dès 1929 par un radio-technicien russe Oleg Vladimirovitch Losev. Sans explication évidente, cette découverte fut rapidement oubliée. Il fallut attendre 1962 pour que Nick Holonyak³ et S.F. Bevacqua, consultants à General Electric, signent « l'acte officiel » de naissance de la diode électroluminescente rouge.

Ce n'est qu'à la toute fin des années 80 qu'a été mise au point par S.Nakamura⁴, un ingénieur travaillant chez Nichia Corp., une technologie de LED bleue viable⁵.

L'apparition de cette longueur d'onde ouvrit la porte à la lumière blanche qui, à son tour, rendait le marché de l'éclairage accessible. Cette perspective était suffisamment attrayante pour motiver de très importants efforts de R&D qui aboutissent aux performances d'aujourd'hui et préparent les prochaines générations de produits.

En 1968, la première diode électroluminescente commercialisée produisait une lumière rouge d'à peine 0,001 lm. Aujourd'hui, les LEDs blanches de haute brillance disponibles sur le marché produisent plusieurs centaines de lumens.

3 - Les LEDs de haute efficacité énergétique

Quelle qu'en soit sa couleur, une LED est avant tout une diode. Alors que les diodes bien connues des électroniciens sont fabriquées sur du silicium, les LEDs sont à base de semi-conducteurs plus exotiques, à savoir des nitrures d'alliages gallium - indium pour les LEDs vertes et bleues ou des phosphures des mêmes alliages pour les LEDs ambre ou rouges. Plus encore, il ne s'agit pas de semi-conducteurs monocristallins, mais sous forme de couches semi-conductrices épitaxiées sur un substrat cristallin différent. Pour les nitrures, il s'agit généralement de saphir, ce qui a comme conséquence essentielle, une qualité cristalline du matériau actif moindre, cause de nombreuses difficultés rencontrées par les fabricants⁶.

Les LEDs auxquelles on s'intéresse ici sont celles qui présentent une efficacité énergétique élevée, c'est-à-dire où le rapport entre l'énergie rayonnée sous forme de lumière et l'énergie électrique consommée est de l'ordre de quelques dizaines de %. L'énergie manquante est dissipée sous forme de chaleur et évacuée par conduction, puis convection dans l'atmosphère.

Les LEDs émettent un flux sur une bande étroite de longueur d'onde, ce qui correspond à une couleur saturée. On verra dans la suite comment on en fait de la lumière blanche, mais il s'agit là de l'une des différences fondamentales entre LEDs et lampes à incandescence. En effet, le flux émit par ces

LEDs ECLAIRAGE DU FUTUR

dernières présente un spectre très large. Il déborde largement le spectre visible et se situe principalement dans l'infrarouge.

Ainsi les lampes à incandescence évacuent le gros de l'énergie électrique qu'on leur fournit sous forme de rayonnement infrarouge, et seulement quelques % sous forme de lumière visible.

Par rapport à ces dernières, les LEDs présentent d'emblée un intérêt évident du point de vue énergétique, puisque certaines s'approchent d'un rendement⁷ de 60 %. C'est l'une des conséquences de la physique mise en œuvre. Dans un processus idéal, on pourrait imaginer un rendement de 100 % pour les LEDs, alors que le rendement théorique du Corps Noir thermodynamique, modèle physique de la lampe à incandescence, se situe aux alentours des 10 à 15% pour des températures typiques de filament de 2800 à 3200K.

Il existe des différences suivant la couleur des LEDs. Les LEDs nitrures sont très efficaces dans la partie bleue du spectre et leur efficacité diminue lorsqu'on se déplace vers les verts. A contrario, les LEDs à base de phosphures ou arséniures sont efficaces dans les rouges et l'ambre, mais sont incapables de produire du bleu. Finalement, on constate que les LEDs vertes, entre ces deux zones extrêmes sont d'une efficacité médiocre et, ce, quelque soit le matériau de base. C'est le « green gap » (Tableau 1 et Figure 2).

En mélangeant de la lumière bleue, verte et rouge on arrive, tout comme en télévision à procurer une sensation de lumière blanche. Bien qu'intéressante par la souplesse qu'elle procure en terme d'ajustement de teinte ou de température de couleur, cette technique est en revanche assez onéreuse par l'électronique de contrôle qu'elle requiert, et plus important encore, la qualité colorimétrique, traduit par l'indice de rendu des couleurs (IRC) de ce type d'éclairage est médiocre.

Une meilleure façon de produire de la lumière blanche est d'assembler une LED bleue et des luminophores. Les photons bleus produits par les LEDs sont assez énergétiques pour exciter des luminophores tels que le YAG-Ce qui, en se dé-excitant, produisent de la lumière jaune. L'épaisseur de luminophores à traverser est calculée pour obtenir en sortie un « pseudo-blanc », mélange de bleu et de jaune. Depuis les premiers produits à la qualité de blanc et à l'homogénéité de faisceau toute relative, la qualité des LEDs blanches s'est régulièrement améliorée grâce à l'élargissement de la gamme des luminophores utilisés et à des techniques de mise en œuvre plus sophistiquées. Initialement d'un blanc bleuté particulièrement « froid », des LEDs utilisant plusieurs luminophores produisent désormais également des blancs chauds. Les LEDs produisant un blanc chaud font état cependant d'un rendement environ 20 % à 30 % plus faible que celui des LEDs blanc froid.

4 - Principales spécificités à prendre en compte dans l'utilisation de LEDs

La tension de seuil de la diode, le V_f des électroniciens, diminue lorsque la température de la jonction s'élève, or c'est effectivement ce qu'il advient à la jonction d'une LED en fonctionnement. Comme on l'a vu ci-dessus, elle dégage de la chaleur qui élève sa température. Il faut donc réguler le courant pour éviter l'emballement thermique et évacuer la chaleur produite en assurant une bonne conduction et dissipation thermique entre la jonction et l'atmosphère. Une LED s'alimente donc par un générateur de courant (qui peut n'être qu'une simple résistance en série) De même, vues les dispersions de fabrication, la tension de seuil peut varier d'une LED à l'autre, pour éviter de suralimenter une diode par rapport à ses voisines, il est préférable de les monter en série plutôt qu'en parallèle.

Pas un mois ne s'écoule sans une nouvelle annonce de record exprimé en général en lumen par Watt électrique (lm/W). Pour les utilisateurs de lampes plus classiques comme les lampes à

incandescence, cette valeur représente implicitement une constante, indépendante des conditions de fonctionnement. La situation est totalement différente avec les LEDs et leur efficacité varie avec la température de la jonction semiconductrice (T_j) et avec le courant qui y circule. Désormais la majorité des fabricants de LEDs annoncent des performances à courant nominal (350 mA, 1A...).

En revanche, côté température et faute de connaître les conditions d'utilisation qui dépendent bien sûr du montage et des échanges thermiques autour de la LED, les fabricants se sont mis d'accord pour donner les efficacités lumineuses des LEDs à une température de jonction de 25 °C. Cette situation ne se rencontre qu'en laboratoire dans des conditions de mesure dites « en impulsionnel », quand les durées de mesure sont suffisamment courtes pour ne pas échauffer la LED. L'utilisateur doit intégrer dans sa conception de luminaire la chute de l'efficacité que provoquera l'augmentation de la température de la LED, et bien sûr tenter de minimiser celle-ci.

La vigilance s'impose dans les annonces d'efficacité lumineuse lorsque le seul chiffre des lm/W est annoncé pour des LEDs blanches sans indication de l'IRC. Pour illustrer le propos, on considérera 2 cas extrêmes (et fictifs) : une LED verte émettant à 555 nm qui aurait une efficacité énergétique de 100 % produirait 683 lm/W, à l'opposé, une diode blanche produisant le spectre visible d'un corps noir à 3000 K avec le même rendement de 100 % produirait 150 lm/W. En revanche, l'IRC de la première serait négatif signifiant qu'il n'y a alors aucun rendu de couleur, alors que celui de la seconde atteindrait 100 ! Une efficacité lumineuse élevée oblige à sacrifier l'IRC et réciproquement⁸.

5 - Quelles sont les marges de progrès

La R&D autour des LEDs est extrêmement active. Elle vise essentiellement à améliorer l'efficacité énergétique des systèmes à LEDs tout en en baissant

les coûts. Dans ce cadre, combler le « green gap » évoqué plus haut est un objectif important, mais pas seulement. La R&D concerne toutes les étapes qui conduisent du substrat au luminaire. Cela inclut donc la puce semi-conductrice elle-même, mais également les aspects relatifs à son packaging notamment son aspect thermique et optique, ainsi que les luminophores de conversion de longueur d'onde. Les aspects périphériques suscitent également beaucoup d'attention. Il s'agit par exemple de l'électronique de pilotage qui pose encore de nombreux problèmes à résoudre : conversion AC-DC à haut rendement indépendamment du niveau de sortie, durée de vie compatible avec celle des LEDs, absence de rayonnement ou de signaux hautes fréquences ré-injectés sur le réseau, mise en œuvre dans les bâtiments... Ou bien le luminaire lui-même, qui confronté à des caractéristiques de sources totalement nouvelles doit inventer de nouvelles solutions de mise en œuvre.

On peut considérer que la lumière issue d'un luminaire à LEDs est le fruit de 8 rendements qui se multiplient les uns aux autres pour donner le rendement final. On peut écrire ce rendement ou efficacité énergétique sous la forme :

$$\eta = \eta_{\text{drivers}} \cdot \eta_{\text{injection}} \cdot \eta_{\text{interne}} \cdot \eta_{\text{extraction}} \cdot \eta_{\text{conversion}} \cdot \eta_{\text{diffusion}} \cdot \eta_{\text{thermique}} \cdot \eta_{\text{luminaire}}$$

avec les définitions suivantes :

- η_{drivers} est le rendement du circuit d'alimentation et de contrôle de la LED, c'est-à-dire le rapport entre la puissance électrique délivrée à la diode et la puissance électrique consommée « à la prise ».
- $\eta_{\text{injection}}$ est le rendement de l'injection des porteurs dans le semi-conducteur. Il traduit la qualité électrique des contacts. Une partie de l'énergie est dissipée par effet Joule. Plus le gap des semi-conducteurs est élevé, plus il est difficile d'obtenir des contacts de bonne qualité.
- η_{interne} est le rendement quantique interne. Il traduit la qualité du matériau et de la conception et réalisation de la LED elle-même

- $\eta_{\text{extraction}}$ est le rapport entre le nombre de photons sortant de la diode et le nombre de photons créés dans la jonction. Une partie de ces derniers reste piégée par les indices de réfraction élevés des semi-conducteurs et finit par être réabsorbée.
- $\eta_{\text{conversion}}$ est le rendement de transformation en lumière blanche et traduit l'efficacité des luminophores.
- $\eta_{\text{diffusion}}$ traduit les pertes subies par diffusion optique
- $\eta_{\text{thermique}}$ traduit la perte d'efficacité liée à la température de la jonction évoquée plus haut. Cette approche permet de dé-corréler les pertes liées aux performances des LEDs (prises à une température de jonction de 25°C) des aspects thermiques qui sont généralement traités au niveau du luminaire.
- $\eta_{\text{luminaire}}$ décrit le rendement du luminaire, c'est-à-dire l'efficacité avec laquelle il conduit les photons sur la zone à éclairer. Une partie de ces derniers peut en effet soit se perdre dans le luminaire, soit partir dans une mauvaise direction et être ainsi « gaspillée ».

Le *Tableau 2* donne des valeurs typiques pour chacun d'eux en 2005 et 2008 montrant ainsi les progrès réalisés. Il précise également les rendements objectifs 2015 tels que visés par le Département de l'Energie (DoE) américain. Si on prend en compte les 5 rendements qui concernent directement la LED, on obtient un rendement du composant d'environ 30% pour les meilleurs produits fin 2008 à comparer aux chiffres mesurés récemment au CEA sur une série de LEDs blanc froid CREE-XRE (*Tableau 3*).

En raisonnant sur les rendements moyens (moyennes géométriques car ces derniers se multiplient) on obtient un rendement élémentaire moyen de 73 % en 2005, 80 % en 2008 et 89 % en 2015. Ces « petites améliorations » ont cependant permis de doubler le rendement global entre 2005 et 2008, et permettront de le doubler encore d'ici à 2015. Ce calcul, certes simpliste, montre que pour progresser sur

l'efficacité des LEDs, il faudra améliorer « un peu » chacun des rendements. Chaque spécialiste, de l'électronicien à l'opticien en passant par le spécialiste de la physique du solide ou des luminophores est donc à même de contribuer aux progrès planifiés sur la feuille de route de cette technologie.

L'autre aspect omniprésent dans les développements industriels notamment, consiste à diminuer les coûts de fabrication, point que nous n'aborderons cependant pas dans le cadre de cet article.

6 - Les LEDs ultra-brillantes ont donné lieu à profusion d'innovations

Bien que rapide, le développement des systèmes à LEDs ne fait que commencer et il est fort à parier que « le gisement d'innovations » mis à jour n'a encore été que partiellement exploité. L'amélioration prévue des performances incite à penser aujourd'hui les innovations que permettront les LEDs de demain. Des pistes sont déjà défrichées où les points d'éclairage s'adapteraient automatiquement aux besoins dans leur zone d'influence, communicants si besoin avec leurs voisins, exemple parmi bien d'autres plus futuristes encore. Intuitivement, on décèle aussi des liens étroits entre les générateurs photovoltaïques et les diodes électroluminescentes, au moins au niveau de la physique mise en œuvre, mais également dans la démarche engagée vers l'économie d'énergie et de ressources où ces deux technologies trouvent leur place.

Composant fondamentalement électronique, les LEDs ont fait entrer l'éclairage à son tour dans l'ère du numérique et on constate tous les jours l'impact que le numérique a eu sur le monde qui nous entoure. Les LEDs à leur tour s'y emploient, 2009 n'aura été que l'année charnière d'un processus irréversible.

LEDs ECLAIRAGE DU FUTUR

• Figures et tableaux

Couleur	royal	bleu	cyan	green	amber	red
Longueur d'onde pic (nm)	448	457	506	518	592	637
Tension (V)	3,3	3,5	3,5	3,3	2,2	2,1
Puissance (Watt)	0,27	0,15	0,11	0,05	0,04	0,14
Efficacité énergétique	23 %	12 %	9 %	5 %	6 %	18 %
Flux (lumen)	8,6	9,8	35,4	25,5	22,5	21,9
Efficacité lumineuse (lm/W)	7,6	7,9	29,0	22,2	29,6	29,2

Tableau 1 : Principales caractéristiques mesurées sur une série de LEDs émettant à différentes longueurs d'onde - Courant de mesures 350 mA - Ces résultats sont donnés à titre d'exemples uniquement. Mesures CEA-LETI (Ph. Grosse)

Rendements		2005	2008	Objectif 2015
Alimentation	Driver	85 %	85 %	92 %
LED T _j : 25°C Température de couleur : 4100K CRI : 80	Injection électrique	80 %	90 %	95 %
	Quantique Interne	60 %	80 %	90 %
	Extraction	50 %	80 %	90 %
	Conversion longueur d'onde	70 %	65 %	73 %
	Diffusion	80 %	80 %	90 %
Luminaire	Thermique	?	85 %	95 %
	Optique	70 %	80 %	92 %
Global		8 %	17 %	41 %

Tableau 2 : Valeurs typiques des rendements intervenants dans le rendement global en 2005, 2008 et l'objectif visé en 2015 pour un luminaire à LED (Blanc à 4100K - CRI 80).

	Min	Moyenne	Max
Courant (A)	0,35	0,35	0,35
Tension (V)	3,08	3,15	3,21
Puissance (lumen)	96	99	102
Puissance (W)	0,30	0,31	0,33
Indice de rendu de couleurs	69	71	73
Température de couleurs (K)	5 851	6 074	6 228
Rendement énergétique	27 %	29 %	30 %

Tableau 3 : Résultats des mesures réalisées sur une série de LEDs blanches CREE-XRE - Mesures CEA-LETI (Ph. Grosse).

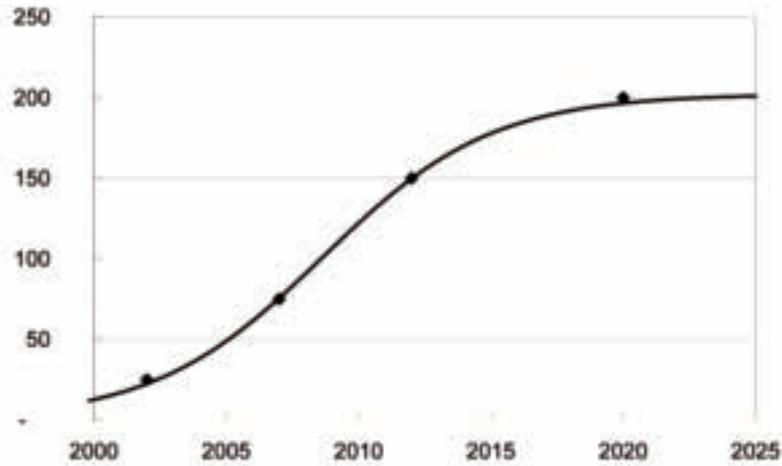


Figure 1. L'efficacité lumineuse des LEDs blanches vue par l'OIDA en 2002. En 2009, cette dernière atteint environ 100lm/W (produit commercial) pour une température de jonction de 25°C et un spectre blanc froid.

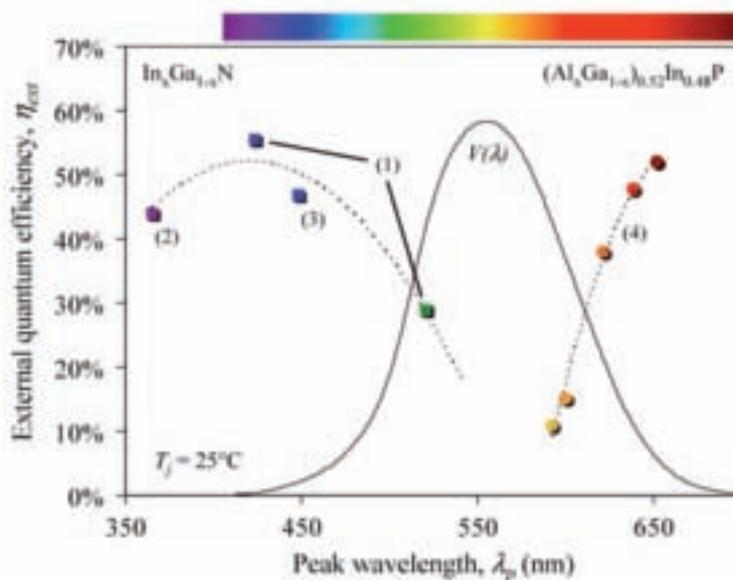


Figure 2. Rendement quantique externe en fonction de la longueur d'onde d'émission pour les nitrures et phosphures. Au centre la réponse de l'œil. (d'après Krames et al. JOURNAL OF DISPLAY TECHNOLOGY, VOL. 3, NO. 2, JUNE 2007).

• Références

- Light Emitting Diodes (LEDs) for General Illumination – An OIDA Technology Roadmap Update 2002 - http://lighting.sandia.gov/lightingdocs/OIDA_SSL_LED_Roadmap_Full.pdf
- Carborundum : cristal de carbure de silicium (SiC)
- N. Holonyak a reçu en 2002 le National Medal of Technology pour son invention
- S. Nakamura a reçu en 2006 le Millenium Technology Prize pour son invention
- High-power GaN p-n junction blue light emitting diodes ; Nakamura S, Mukai T., Senoh M. ; Japanese Journal of Applied Physics Part 2 Letters - Vol. 30 - n°12A - pp 1998-2001 - 1991
- Pour plus d'informations sur la physique et la fabrication des LEDs de haute brillance, on pourra consulter l'ouvrage : « Les diodes électroluminescentes pour l'éclairage » – EGEM - Edition Lavoisier 2008
- Rapport de la puissance rayonnée en lumière visible à la puissance électrique fournie. On parle également d'efficacité énergétique
- Revue LUX N°253 Page 52-58 – Mai/juin 2009
- Multi-Year Program Plan FY'09-FY'15 - Solid-State Lighting Research and Development - U.S. Department of Energy - http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2009_web.pdf

Les LED organiques, source de lumière du futur ?

Marc TERNISIEN, David BUSO et Georges ZISSIS
 Laboratoire Plasmas et Conversion d'Énergie (LaPLaCE),
 Université Paul SABATIER, Toulouse
 marc.ternisien@laplace.univ-tlse.fr

Les découvertes de la conduction des films de polyacétylène en 1977 par A. Hegger, A. McDiarmid et H. Shirakawa (Prix nobel 2000) et la réalisation de la première diode électroluminescente organique (OLED = Organic Light-Emitting Diode) par Tang et Van Slyke pour la société Kodak, une décennie plus tard, ont rendu possible l'émergence de l'utilisation des matériaux organiques à des fins commerciales dans des objets de la vie quotidienne. De par l'amélioration de leur durée de vie, les OLEDs sont désormais intégrées dans certaines applications comme les lecteurs MP3 ou les téléphones portables. Elles sont dorénavant des valeurs sûres au niveau de l'affichage comme l'a montré le téléviseur XEL-1 développé par Sony en 2007 (11 pouces de diagonale réalisé avec une matrice OLED). Pour toutes ces raisons, l'avenir est fortement orienté vers les matériaux organiques. Mais « Quid » de la possibilité d'utiliser ces sources pour l'éclairage du futur ? Comment fonctionnent-elles ? Quelles sont encore les limites pour ce type d'applications ? Qu'est ce qui existe à l'heure actuelle ? Voici un aperçu non exhaustif des réponses possibles dans ce domaine.

Le plastique : un isolant ou un conducteur ?

Tout comme le plastique, l'OLED est fabriquée à base de matériaux moléculaires π -conjugués (présents dans des cycles aromatiques comme le benzène), c'est-à-dire comportant une alternance de simples et doubles liaisons. Dans le cas de la molécule de polyacétylène la conductivité électrique à l'état neutre (c'est-à-dire isolante) est inférieure à 10^{-5} S/cm. Lorsqu'on lui retire ou rajoute des électrons par dopage chimique, on peut alors augmenter de huit ordres de grandeur cette valeur de conductivité. Cet électron supplémentaire ou manquant (trou) se « greffe » sur une orbitale π (liante) ou π^* (anti-liante) spécifique à

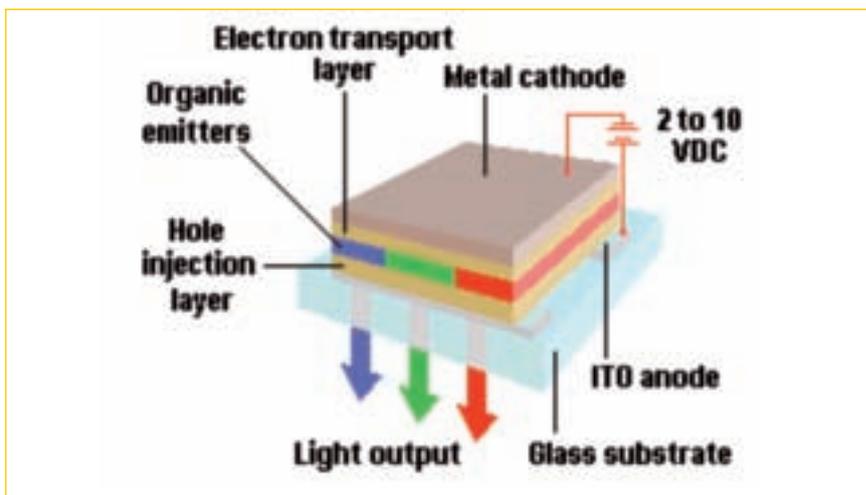


Figure 1. Structure d'une OLED multicouche avec polarisation. (Source : www.pctechguide.com).

la molécule et peut alors se délocaliser très facilement le long de la molécule. Celle-ci se déforme alors localement et l'entourage de la molécule se polarise et se réarrange alors au niveau vibrationnel. L'association d'une charge et de cette déformation locale donne naissance à une quasi-particule appelée polaron qui n'est autre qu'un porteur de charges. Cette particule est à la base de la conduction dans les matériaux organiques. La conduction s'effectue par saut entre molécules et est d'autant plus efficace qu'elle est limitée à la faible longueur moléculaire. Dans les OLEDs, les charges devront donc être injectées depuis des électrodes afin de pouvoir donner naissance à une conduction.

La structure d'une OLED

Une OLED présente une structure relativement simple à savoir des matériaux organiques qui sont pris en « sandwich » entre une anode généralement transparente (ITO Indium Tin Oxide) déposé sur du verre et une cathode métallique soumis à une différence de potentiels. Chaque matériau va avoir un rôle bien précis. Certains d'entre eux auront la charge d'améliorer l'interface entre la molécule et le métal dans le but d'optimiser l'injection de charges. C'est le cas de l'EIL (Electron Injection Layer) par exemple pour l'injection des électrons provenant de la cathode métallique. Pour l'injection de trous depuis l'anode, une HIL (Hole Injection Layer) est généralement utili-

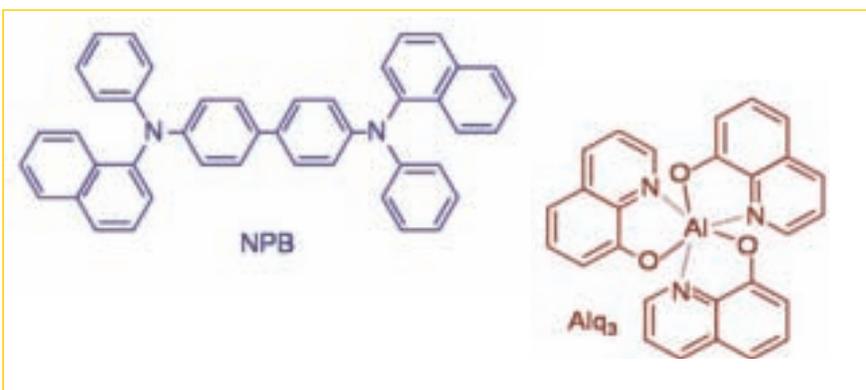


Figure 2 : Exemple de molécules évaporées sous ultra vide.

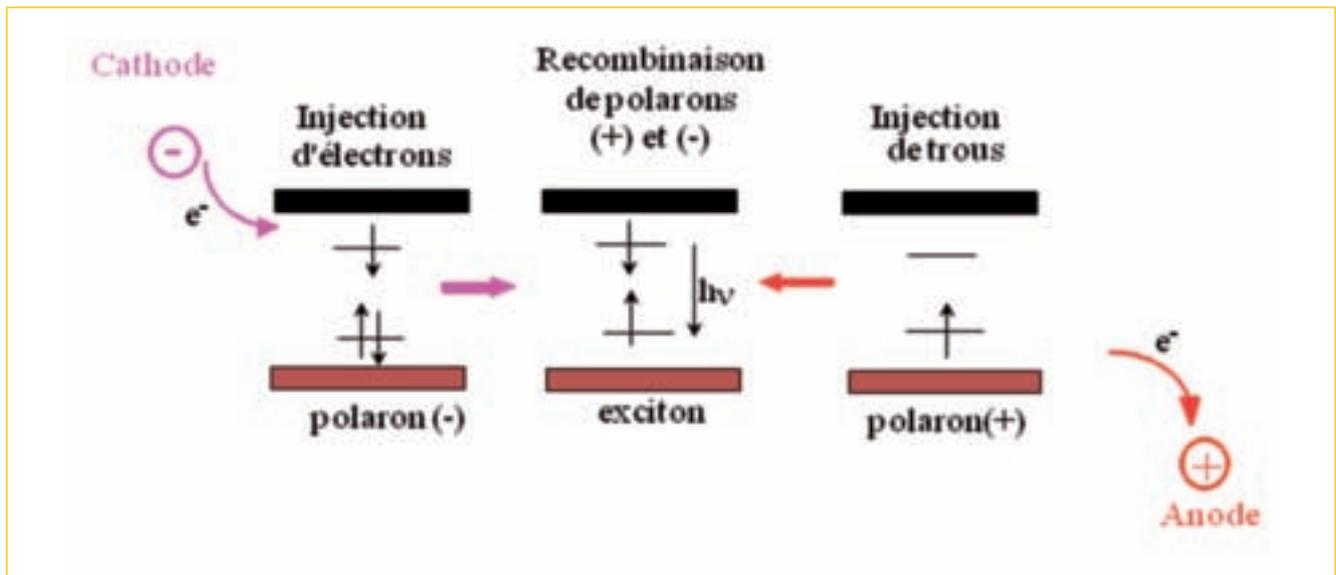


Figure 3 : Principe de fonctionnement de l'OLED

sée. Afin de faciliter le transport de ces deux types de porteurs de charges il est également possible d'employer des couches de matériaux spécifiques qui auront pour mission de faciliter leur déplacement.

C'est le cas de la HTL (Hole Transport Layer) pour le transport de trous et de l'ETL (Electron Transport Layer) pour le transport des électrons. Enfin, généralement au centre du composant se trouve une couche de matériau EL (Emission Layer) qui va servir pour l'émission de lumière (Emission Layer). La figure 1 résume sous forme de schéma la structure de l'OLED.

De manière générale, les matériaux qui sont utilisés sont déposés sur du substrat en verre de faible épaisseur (quelques mm). Selon le matériau à

déposer, la technique est différente. Ainsi pour l'anode, l'ITO est déposé par pulvérisation d'Etain et d'Indium. Les molécules organiques sont déposées par évaporation sous vide pour les petites molécules (du fait de leur faible poids moléculaire) Figure 2. Le vide varie de 10^{-6} à 10^{-8} Torr selon le matériau à évaporer. Il est bien sûr possible de réaliser des OLEDs à base de polymères qui seront déposés à la tournette. Enfin, la cathode peut être déposée selon diverses méthodes comme par exemple le dépôt par canon à électrons.

Mode de fonctionnement

Lorsqu'une différence de potentiels est appliquée entre l'anode et la cathode, un courant va circuler permettant ainsi à la cathode de fournir des charges

negatives (électrons) et à l'anode des charges positives (trous). Un polaron négatif va ainsi être créé et va se déplacer vers l'anode sous l'action du champ électrique imposé par la différence de potentiel appliquée. En effet l'électron est injecté dans la "bande de conduction", appelée LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital), correspondant à la plus basse orbitale π^* inoccupée de la molécule. Parallèlement, un électron est arraché d'une molécule proche de l'anode, laissant derrière lui un trou dans la "bande de valence" appelée HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital), la plus haute orbitale π occupée par une paire d'électrons donnant ainsi naissance à un polaron positif. Ces deux porteurs de charges vont se déplacer par Hopping (saut) de molécule en

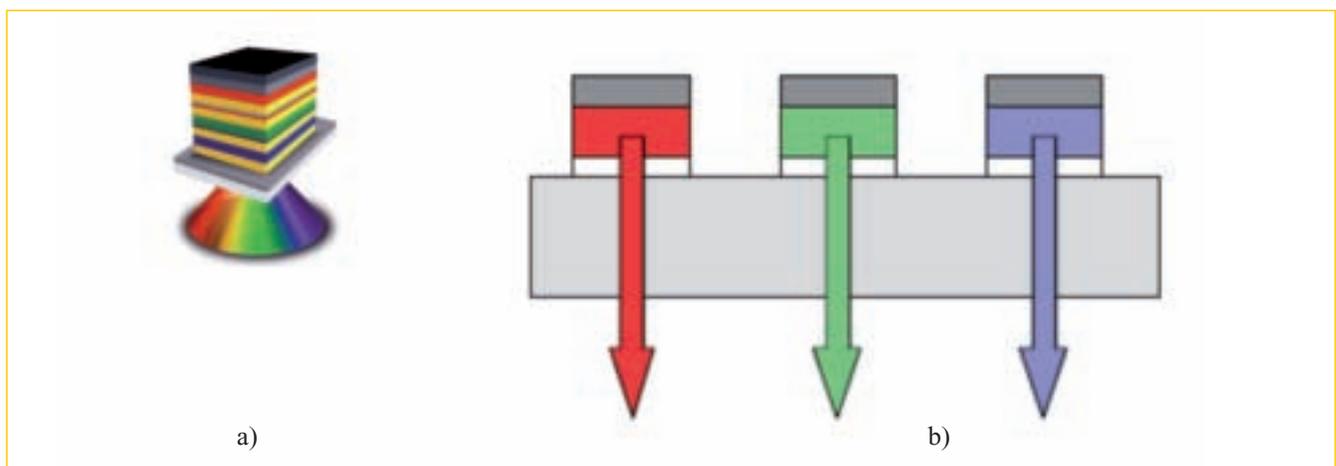


Figure 4 : a) Stacked OLED. b) Dépôt d'OLEDs sous forme planaires

LEDs ECLAIRAGE DU FUTUR

molécule dans tout le matériau jusqu'à leur rencontre. Par conséquent tout le travail va consister à « optimiser » le moment où les

Ce mécanisme de fluorescence est le mécanisme de base d'émission de lumière dans les OLEDs. En effet, le photon ainsi créé aura une énergie égale à la différence énergétique (appelé gap comme pour les semi-conducteurs classiques) entre les niveaux HOMO et LUMO du matériau

tron est beaucoup plus faible que celle d'un trou. C'est une des raisons pour lesquelles la couche de transport de trous (HTL) doit être plus épaisse afin que les électrons arrivent à la couche d'émission EL au même moment. Il est donc très utile d'utiliser l'ingénierie des matériaux pour optimiser cette zone de recombinaison d'excitons et donner naissance à des photons de longueur d'onde d'émission ajustable. De plus d'autres solutions existent comme l'utilisation des mécanismes de phosphorescence liés à la récupération des 75 % d'excitons non radiatifs. Par ailleurs, beaucoup d'études concernent également l'extraction de la lumière qui n'est pas un problème trivial du fait des différentes interfaces existant au sein d'une OLED.

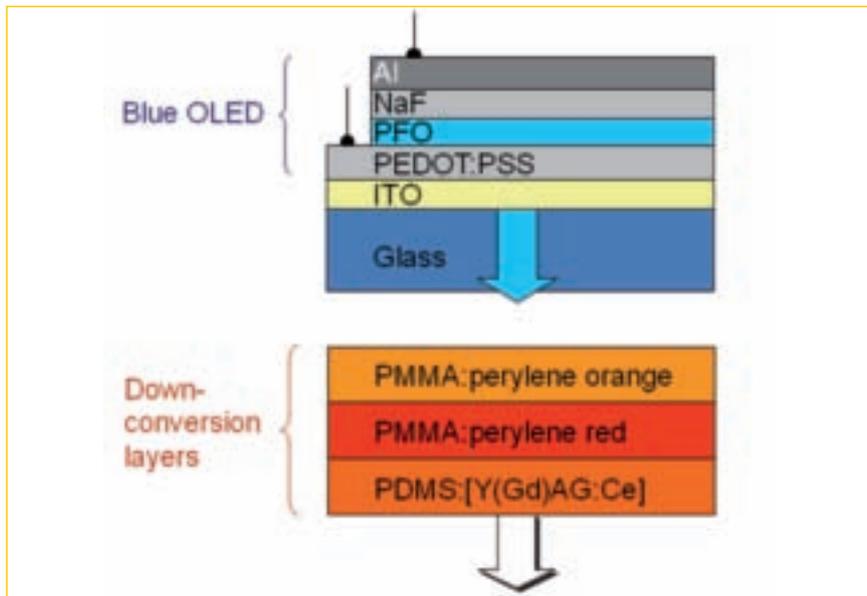


Figure 5 : Conversion de longueur d'ondes par phosphorescence

deux polarons de charges opposées vont se rencontrer au sein de la même molécule.

Lorsque cette rencontre a lieu, un "exciton" (ou une paire électron-trou) est formé. Le rayonnement est alors créé suite à la recombinaison de et de la désexcitation de l'exciton (Figure 3).

utilisé. La plupart des rayonnements émis par les OLEDs se trouve dans le domaine du visible spécialement pour les applications d'affichage ou d'éclairage. Néanmoins, le rendement de cette recombinaison n'est pas optimal, il est de l'ordre de 25 %. Cette valeur est liée au fait que, généralement dans les organiques, la mobilité d'un élec-

Et pour du blanc ?

Concernant les longueurs d'ondes d'émission pour les OLEDs blanches (WOLEDs), il existe différentes techniques afin d'obtenir un élargissement spectral permettant d'utiliser ces composants pour l'éclairage. La première est d'utiliser plusieurs émissions de lumière simultanément en un même composant en mélangeant les trois couleurs primaires RGB (rouge, vert et bleu). Cette technique a été proposée dès les années 2000 en superposant dans un premier temps différentes couches émissives en pyramide (Stacked Woled) (Figure 4a). Dans un second temps, des études ont été menées en les déposant de manière planaire (Figure 4b). Le résultat est que

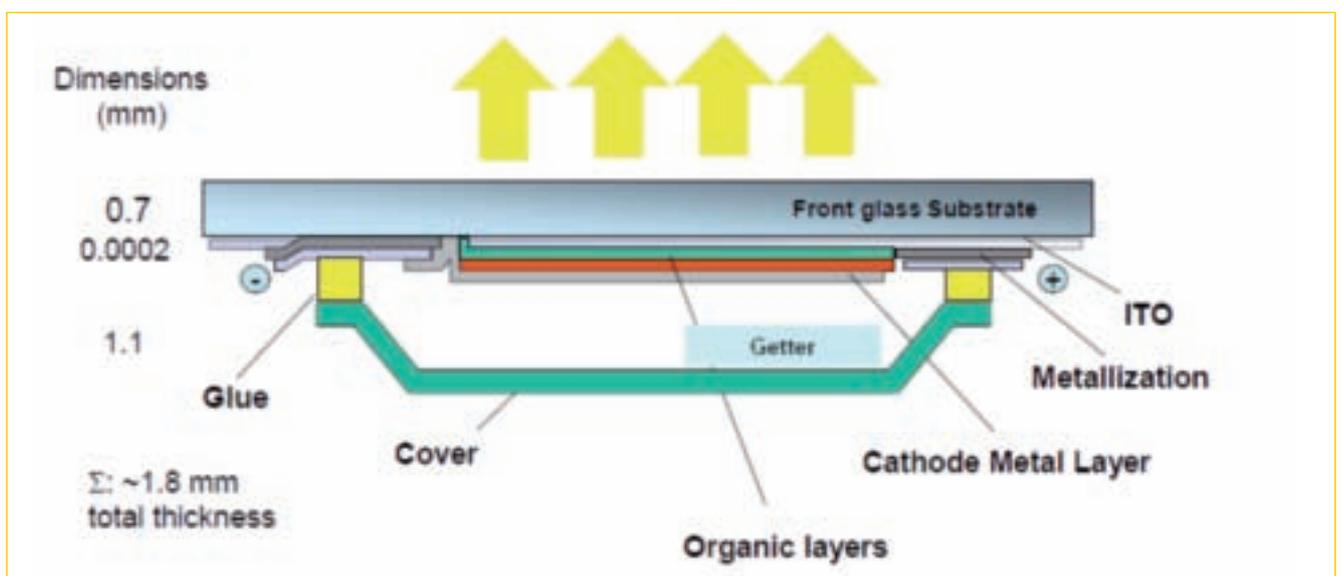


Figure 6 : Réalisation industrielle d'une OLED (LUMIBLADE). (Source : www.philips.com)

l'œil perçoit le mélange résultant de ces trois couleurs c'est-à-dire le blanc.

Cette technique présente l'avantage de pouvoir jouer sur chaque OLED primaires de telle sorte qu'on peut aussi bien faire un blanc chaud qu'un blanc plus atténué. Par ailleurs, il est aussi possible d'atténuer l'émission en jouant également sur chacune des trois polarisations étant donné que chaque OLED possède sa propre alimentation. Le principal inconvénient de cette méthode est la dérive du point de couleur en fonction du type d'utilisation ou d'alimentation. La méthode alternative à celle des émetteurs RGB (Rouge, Vert et Bleu) est la conversion de longueur d'onde. En effet, de nombreux travaux ont montré qu'il était possible de récupérer une émission issue d'une OLED bleue et de la convertir en jaune en utilisant des couches organiques supplémentaires à base de phosphore (Figure 5).

Le changement de couleur est alors possible en modifiant par exemple les épaisseurs ou la concentration de ces molécules lors du dépôt. Le principal avantage de cette technique est que la dérive du point de couleur est fortement réduite du fait de la présence d'une unique source d'alimentation.

Les principaux verrous actuels sont essentiellement liés à l'encapsulation et l'extraction de la lumière. En effet, même si la durée de vie des OLEDs est en hausse, ces composants sont toujours sensibles à la fois à l'oxygène et à l'humidité. Par conséquent, de nombreuses études ont été réalisées sur la manière d'encapsuler ces composants. De manière industrielle, la méthode la plus connue est l'utilisation de polymères déposés au dessus de l'OLED avec des « getters » qui servent à détecter la présence d'eau (Figure 6). L'encapsulation est primordiale car elle aura une part importante dans la durée de vie et dans le fonctionnement du composant dans les applications éclairagistes par exemple. L'autre verrou concerne l'extraction de la lumière. En effet, la génération de la lumière est régie par la recombinaison d'une paire électron trou qui donne naissance à un photon. Mais lors de son passage vers l'extérieur, le photon connaît de multiples pièges du aux différents modes guidés existant. Il faut donc aussi tenir compte de la qualité de l'extraction des 25% de photos radiatifs de telle façon à obtenir des caractéris-

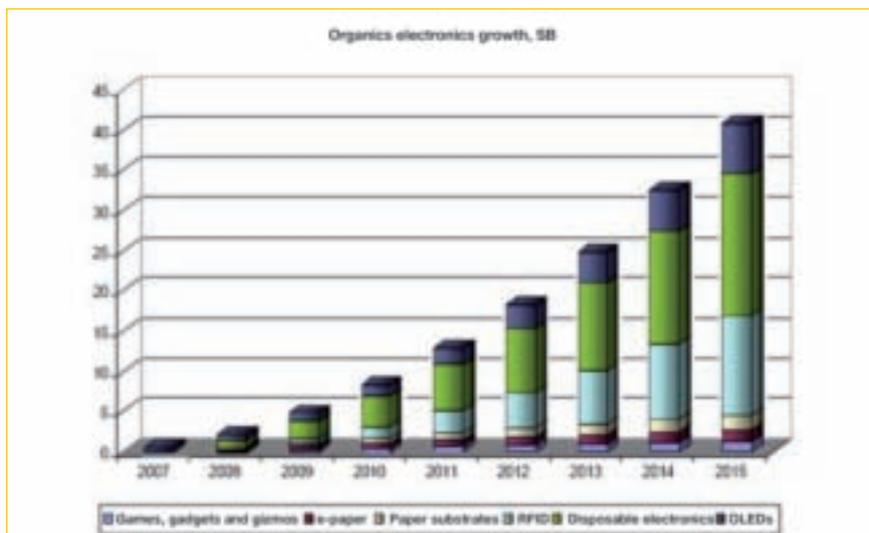


Figure 7 : Prévisions de l'investissement en Electronique organique (Source : Organic Electronics Growth Charts, Nanomarkets, 2009).

tiques exploitables. Ce sujet est toujours d'actualité aussi bien en recherche académiques qu'industrielles.

Les OLEDs actuelles :

La recherche dans le domaine des sources de lumière du futur est essentiellement menée par les grandes multinationales de l'éclairage que sont Philips (Pays Bas), Osram et Novalled (Allemagne), General Electric et Universal Display Corporation (Etats-Unis), et également par les industries du sud-est asiatique (Sony, Samsung,

LDT,...). Les performances désormais atteintes laissent percevoir des utilisations pour l'éclairage d'ambiance. Beaucoup de recherches sont encore réalisées même si des prototypes sont sortis comme c'est le cas de la Lumiblade de Philips. Néanmoins, l'avenir est tourné l'électronique organique et bien sûr vers les OLEDs beaucoup moins couteuses en énergie et en fabrication (Figure 7). Les grands domaines d'avenir pour les OLEDs sont donc le display (Livre, téléphonie) (Figure 8), l'éclairage uniforme liée à la domotique ou à l'automobile (Figure 9).



Figure 8 : Livre électronique



Figure 9 : Eclairage uniforme

En résumé les OLEDs sont et seront utiles en termes de diminution du besoin en énergie, de nouveautés architecturales (éclairage uniforme) etc... Elles présentent l'avantage d'être déposées sur n'importe quel substrat : verre, substrat flexible..., et donc elles peuvent être fabriquées sous n'importe quelle forme, pouvant ouvrir de nouvelles possibilités d'utilisation.

La gestion thermique des LEDs de haute brillance

Paul MESSAOUDI, CEA-Léti Département Optronique
17, rue des Martyrs - 38054 Grenoble Cedex 9
Tél. : 04 38 78 13 40 - paul.messaoudi@cea.fr



I - Introduction / Résumé / Problématique

Les Diodes Electro-Luminescentes (DEL) sont devenues en très peu de temps des produits incontournables. La puissance lumineuse émise par ces composants électroniques est telle que les LEDs peuvent aujourd'hui adresser le domaine de l'éclairage. De plus elles accumulent les avantages : robustes et fiables, elles sont très efficaces et consomment moins d'énergie que les sources lumineuses conventionnelles (voir Figure 1 et Figure 2). Environ 30 % de l'énergie fournie dans une LED actuelle est convertie en lumière, le reste est transformé en chaleur.

Pourtant les LEDs ont quand même certaines « faiblesses », elles craignent les décharges électrostatiques (ESD), n'émettent pas de blanc direct et sont très sensibles aux variations de température.

Cette sensibilité est sans doute le défaut le plus dommageable car de nombreuses caractéristiques des LEDs dépendent de la température.

Par ailleurs les fabricants tendent à augmenter continûment la puissance de leur LEDs dans un boîtier de taille constante. La puissance par m^2 à dissiper est de plus en plus importante, la température dans le composant LED peut donc être très élevée si la chaleur engendrée n'est pas correctement évacuée. Ceci nécessite alors une bonne utilisation des LEDs selon les principes du « thermal management » ou gestion/maîtrise thermique. Cette méthode est un outil puissant pour réduire les gradients thermiques et nous verrons par la suite comment elle peut être mise en œuvre afin d'utiliser au mieux les LEDs et ne pas dégrader leurs performances.

II - Effets thermiques sur les performances des LEDs

a. Gestion Optique (« Optical Management »)

i. Baisse d'intensité lumineuse avec la température

Avant tout, une LED est un composant électronique à base de matériaux semi-conducteurs. Ceux-ci sont définis par

leur énergie de gap E_g et par la transition ou recombinaison électron-trou radiative (émission d'un photon) ou non-radiative (émission d'un phonon) (voir la Figure 3). Dans une LED, les deux types de transitions coexistent d'où une efficacité globale de 30 % environ aujourd'hui.

La longueur d'onde des photons émis par la LED est inversement proportion-

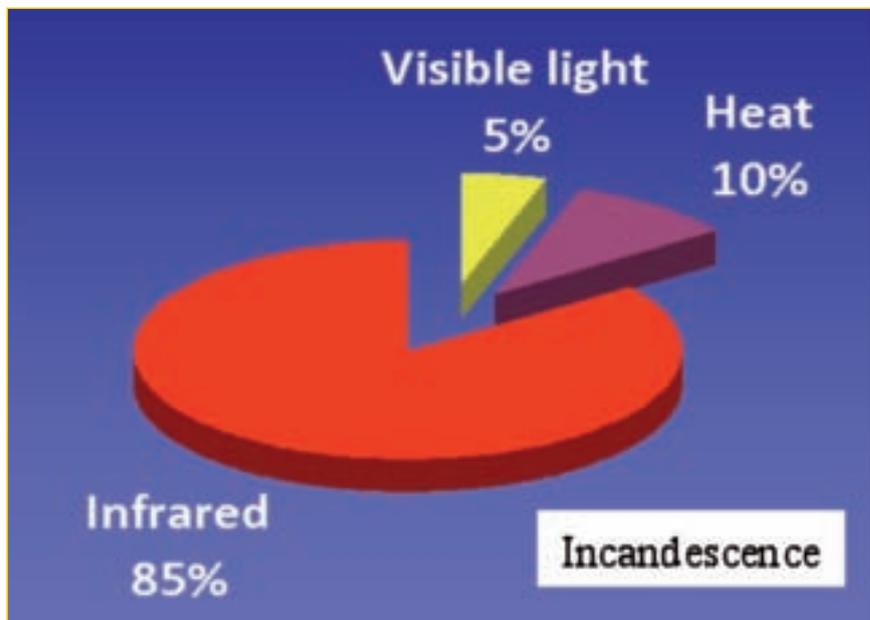


Figure 1 : Conversion de l'énergie électrique dans une lampe

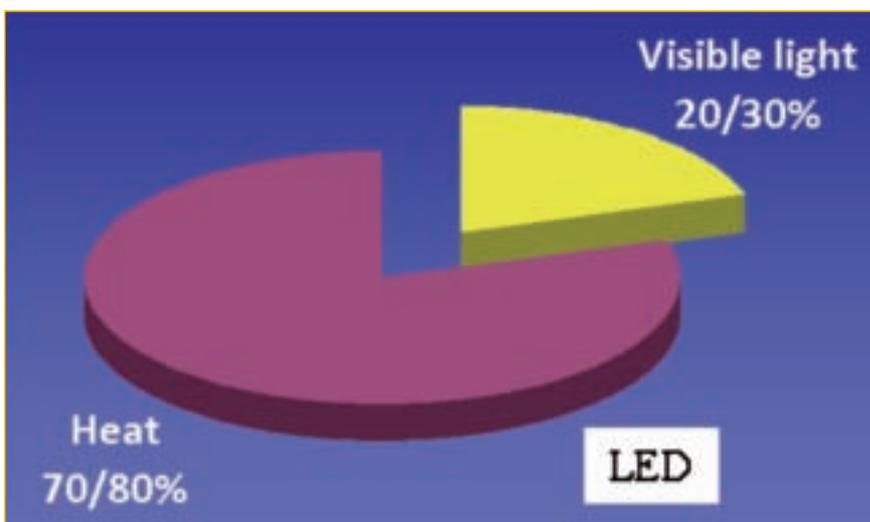


Figure 2 : Conversion de l'énergie électrique dans une lampe à LED

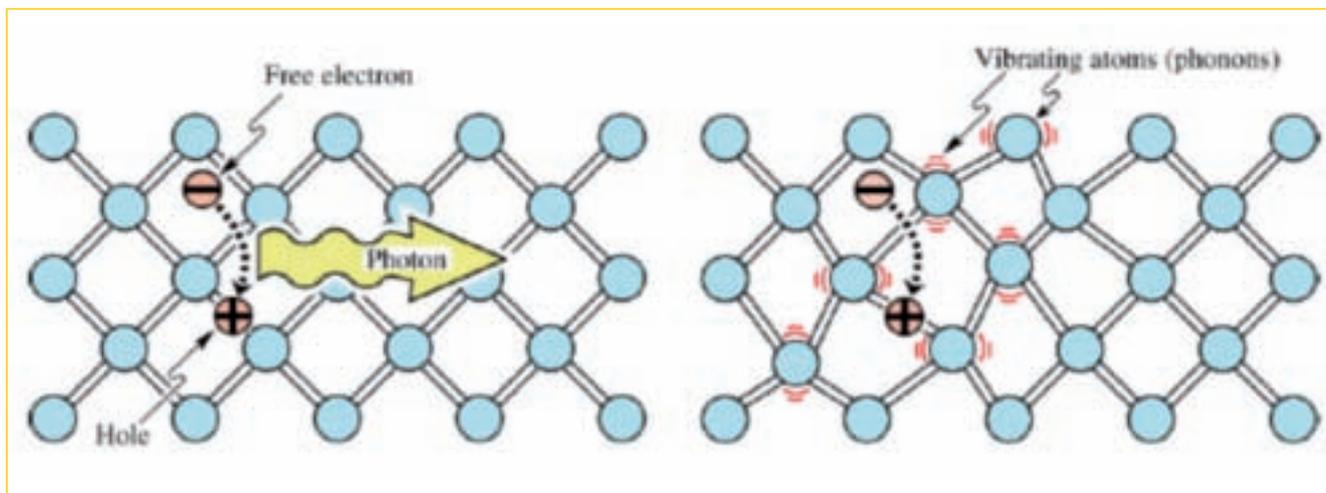


Figure 3 : Schéma des recombinaisons radiative et non-radiative dans un semiconducteur (Source : E.F. Schubert, Rensselaer Institute)

nelle à l'énergie de gap. Or chaque composant, formé d'un seul matériau, n'a qu'une seule valeur d' E_g , et n'émet que dans une seule couleur.

Pour recréer le spectre entier (« couleur blanche »), il faut associer toute une gamme de matériaux LED.

La Figure 4 nous montre les domaines de longueur d'onde que peuvent adresser les différents types de matériaux. Les nitrides de Gallium et d'Indium émettent dans le bleu-vert et les phosphures de Gallium et d'Indium dans l'orange. Les arséniures de Gallium permettent d'atteindre le rouge. On voit qu'il existe un « manque » dans le jaune-vert, précisément la longueur d'onde à laquelle l'œil est le plus sensible.

Les variations de température n'auront pas la même incidence pour chacun des types de matériaux. La Figure 5 présente l'effet de la température sur l'efficacité lumineuse de LEDs de différentes couleurs ($T=25^\circ\text{C}$ étant le point de référence).

On voit sur cette Figure 5 que les LEDs rouge et ambre sont plus impactées par les gradients thermiques que les LEDs bleues ou vertes.

Il existe plusieurs possibilités pour créer la couleur blanche avec des LEDs. L'une de ces possibilités consiste à mélanger des LEDs rouges, vertes et bleues dans le même module. La Figure 5 montre bien la difficulté d'utiliser un tel module RVB. Pour stabiliser le blanc, il faut ajouter un système complexe de correction basé sur un capteur thermique et un programme informatique.

ii. Dérive chromatique

Une autre caractéristique des semiconducteurs réside dans le fait que l'énergie de gap E_g dépend de la température du matériau (voir Figure 6). Cet effet va causer une dérive du point de couleur des LEDs.

La méthode la plus courante pour faire du blanc est d'associer une LED bleue à un convertisseur de lumière (appelé généralement « phosphore »). Cette technique a l'avantage d'utiliser une LED dont l'efficacité est plus stable en fonction de la température (voir Figure 5). Par contre, la dérive chromatique va engendrer un déplacement du point de couleur vers le vert et le convertisseur perdra en efficacité avec cette variation de longueur d'onde (voir Figure 7).

C'est pourquoi, la gestion thermique est primordiale dans la « fabrication » du blanc avec des LEDs que se soit dans le cas d'un module RVB ou dans le cas d'une LED blanche convertie.

b. Gestion de la puissance

Une diode est une jonction de semiconducteurs et a la propriété de voir sa tension de seuil baisser linéairement avec la température. On appelle cet

effet le « voltage drop » ou chute de tension d'une diode.

Prenons l'exemple d'une LED bleue que nous avons testée en température :

Une variation de température

$$\left. \frac{d(V_{LED\ Bleue})}{dT} \right|_{I=1mA} \approx -1,6\text{ mV} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

$\Delta T = 100^\circ\text{C}$ induira une variation de tension $\Delta V = -160\text{ mV}$. Pourtant même si cette valeur paraît assez faible, on voit sur la Figure 8 qu'un faible gradient de tension ΔV provoquera un fort gradient de courant ΔI dans la diode d'où une variation de puissance lumineuse également très forte.

C'est à cause de cet effet de Voltage Drop en fonction de la température que l'on recommande de contrôler les LEDs en courant et non pas en tension.

c. Fiabilité / Durée de vie

Le dernier effet très destructeur des gradients thermiques est la réduction de la durée de vie des LEDs. C'est un effet de seuil et irréversible : dès lors

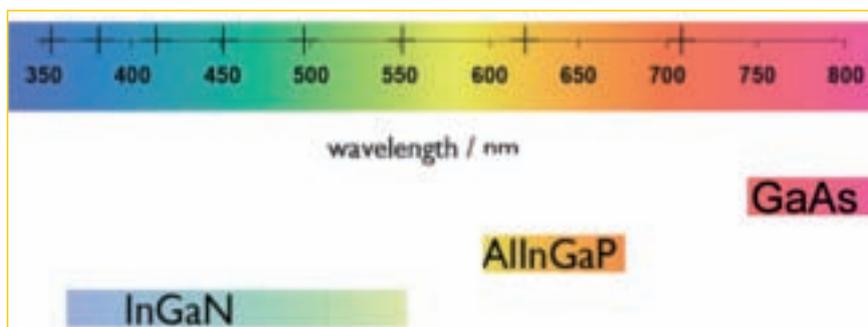


Figure 4 : Spectre émis par les différents matériaux semiconducteurs III-V (Source : E.F. Schubert, Rensselaer Institute)

LEDs ECLAIRAGE DU FUTUR

qu'un certain nombre de défauts s'accumulent dans les LEDs, elles commencent à montrer des signes de défaillance

(baisse du flux lumineux par exemple). De plus, l'apparition de ces défaillances s'accélère dès lors que la température des LEDs augmente.

La Figure 9 nous présente le cas de LEDs bleues vieillies à différentes températures. Les valeurs extrapolées de durée de vie montrent que pour une perte lumineuse de 20 % une LED à 100 °C durera quatre fois moins longtemps (10000 h) qu'une LED à 55 °C (40000 h). Malgré tout, même chaude, une LED « vit » plusieurs milliers d'heures, ce qui fait d'elle une source lumineuse bien plus robuste qu'une ampoule à incandescence.

III. Origine thermique des défaillances

a. Matériau d'Interface Thermique

Dans un composant électronique, les trois modes classiques de transfert de chaleur n'ont pas la même importance : au niveau du composant LED, l'échange de chaleur avec l'extérieur par convection et par radiation est très faible car la surface développée avec le milieu extérieur est limitée ; la conduc-

tion thermique est alors le mode de transfert thermique prédominant (~ 90 % de la puissance dissipée) et la majeure partie de la chaleur passe par le fond du composant LED, c'est-à-dire par ses pattes de connexion sur la carte imprimée et par son drain thermique lorsqu'il existe (voir Figure 11).

Afin d'améliorer et maîtriser le flux de chaleur par conduction, on utilise généralement un dissipateur ou un radiateur (« heatsink » ou puits de chaleur) que l'on place au plus près de la source chaude, c'est-à-dire sous la LED.

La partie la plus critique du système présenté en Figure 12 est le Matériau d'Interface Thermique (« Thermal Interface Material » TIM) qui assure la liaison entre la LED et le radiateur. Le choix de ce matériau peut s'avérer crucial pour un fonctionnement optimum et une longévité accrue de nos LEDs. Afin de bien choisir ces TIM, on fait appel à critère très pratique : la Résistance Thermique.

b. Notion de Résistance Thermique

Il existe un moyen simple pour modéliser la conduction thermique dans les systèmes électroniques : c'est le principe de Résistance Thermique R_{th} . Cette notion provient de l'analogie des équations de la chaleur décrite par Fourier avec la loi d'Ohm régissant la conduction électrique.

La Figure 13 présente cette analogie thermique-électrique où la puissance dissipée $P_{dissipée}$ (ou la quantité de chaleur Q) dans un matériau correspond à un courant et où le gradient de température ΔT équivaut à une différence de potentiels ΔV .

$$\Delta T_{A-B} = P_{dissipée} \cdot R_{Th}$$

La résistance thermique dans ces conditions peut s'écrire ainsi :

$$R_{th} = \frac{t}{A \times \kappa}$$

Avec

t , l'épaisseur du matériau traversée par $P_{dissipée}$
 A , la section du matériau,
 κ , la conductivité thermique du matériau

On exprime une R_{th} entre 2 points, principalement entre la jonction de la LED et l'extérieur du boîtier (« case » en anglais) ou de la carte imprimée. Elle s'exprime en °C/W (ou K/W).

Cette valeur apparaît dans les fiches de données des fabricants et est en général associée à la valeur maximale de température de jonction T_j .

Le premier travail du thermicien électronique est de minimiser la $R_{th \text{ Junction - Case}}$ en affinant l'épaisseur du matériau, en augmentant la section de passage de la chaleur et en favorisant l'emploi de matériaux à haute conductivité thermique.

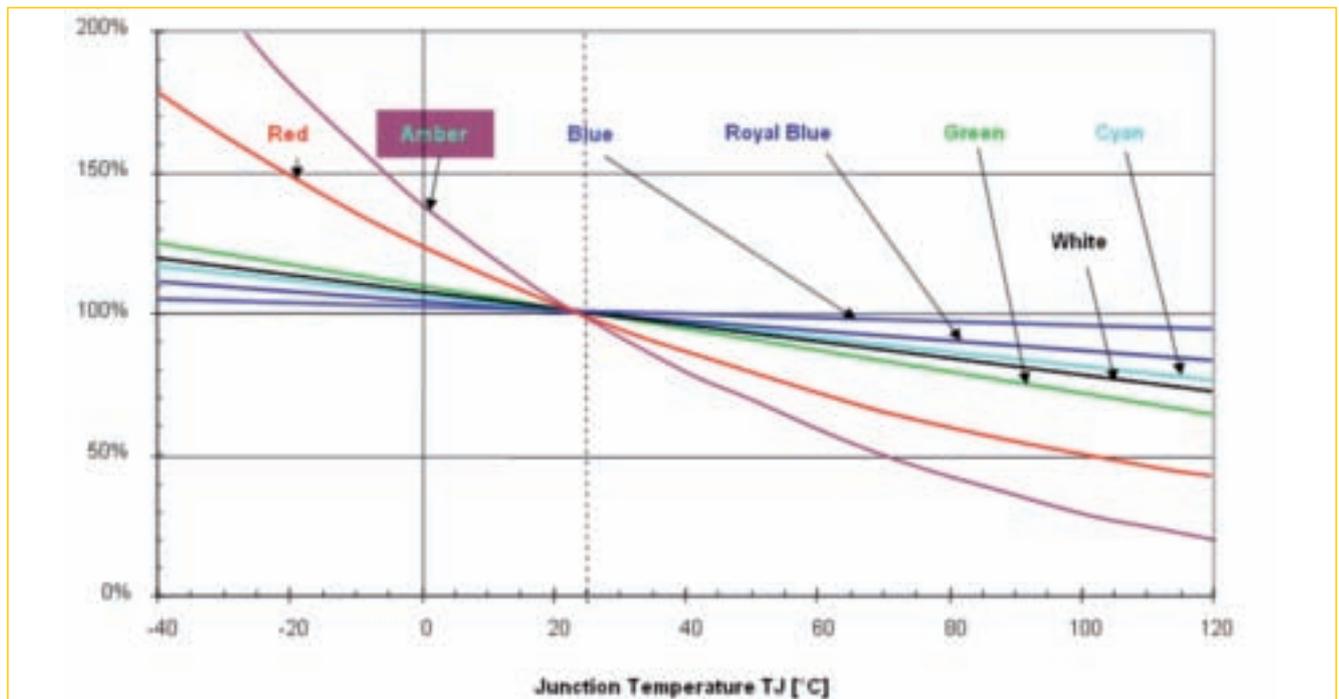


Figure 5 : Puissance lumineuse relative des LEDs en fonction de la température - Source : Philips Lighting

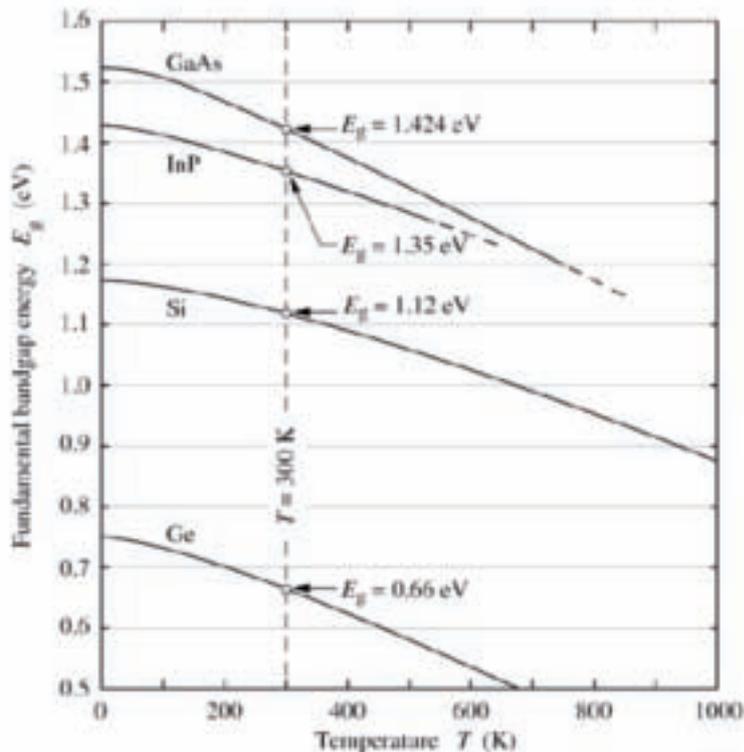


Figure 6 : Dérive en température de l'énergie de gap des semi-conducteurs usuels (Source : E.F. Schubert, Rensselaer Institute)

Prenons l'exemple d'une LED K2 de Lumileds. Les divers matériaux mis en jeu dans l'assemblage de ce composant sont décrits dans les Figure 14 et Figure 15.

La résistance thermique globale $R_{th\ tot}$ du composant est une mise en série de R_{th} et varie en général entre 5 et 10 °C/W. Cela correspond à un gradient thermique entre la jonction de la LED et le fond du composant de 5 à 10 °C pour 1W (soit $I_{LED} = 350\text{ mA}$) ou 15 à 30 °C pour 3W ($I_{LED} = 1\text{ A}$).

On sait que les R_{th} internes les plus élevées sont celles nommées $R_{th\ Solder\ connection}$ (faible surface de contact avec la LED) et $R_{th\ Glue}$ (faible conductivité thermique) même si ce sont les matériaux les plus fins du système. Ce sont des résistances thermiques dues aux matériaux d'interface thermique.

c. Aspects thermo-mécaniques

La Figure 15 nous montre qu'un boîtier de LED de haute brillance est un système complexe contenant des semi-conducteurs, des métaux et des polymères. Ces matériaux aux comportements mécaniques très différents risquent de créer de nombreuses défaillances par déformation thermique.

La dilatation thermique dans un régime de faibles déformations peut être décrite par la loi de Hooke :

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \alpha \times \Delta T$$

$$\Delta L = \alpha \times \Delta T \times L$$

Où ϵ est la déformation et ΔL est l'élongation du matériau.

Le paramètre important ici est le coefficient d'expansion thermique ou CTE. C'est une propriété du matériau

On voit par la Figure 17 que les matériaux métalliques se déforment beaucoup plus facilement que les semi-conducteurs. C'est pourquoi la principale cause de défaillance thermomécanique est due à l'incompatibilité des CTE ou « CTE mismatch ».

Des nouveaux matériaux sont développés pour améliorer les CTE mismatches (voir la Figure 18). Les alliages métaux - diamant ou fibres de carbone sont très prometteurs mais ce sont encore des matériaux exotiques et peu simples à mettre en œuvre.

A l'instar des problèmes thermiques, les principales défaillances en mécanique ont lieu au niveau des interfaces (délamination des contacts métalliques, fissures dans les billes d'interconnexion, ...). Un autre grand risque de détérioration réside dans les fils d'or de connexion. Ceux-ci sont particulièrement fragiles et sont assez souvent exposés aux déformations thermiques. Ce sont ces modes de défaillance qui réduisent considérablement la durée de vie des composants électroniques.

IV. Moyens de caractérisation thermique

a. Thermographie Infrarouge

Afin de mesurer effectivement les gradients thermiques et leur répartition dans les LED et les cartes imprimées,

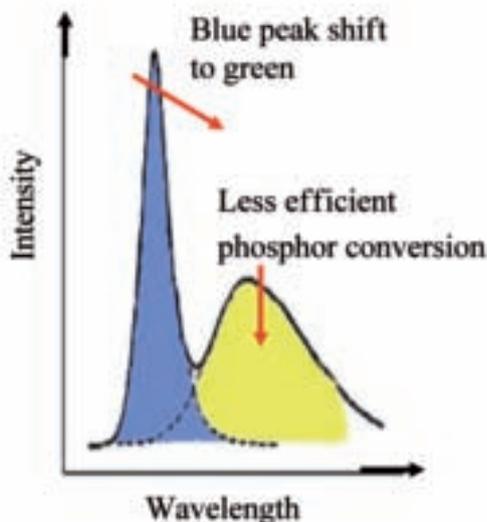


Figure 7 : Spectre d'une LED blanche convertie - (Source : L. Massol)

LEDs ECLAIRAGE DU FUTUR

de nombreux outils sont à notre disposition. Parmi eux, l'imagerie thermographique est la plus fréquemment utilisée car c'est une

méthode de contrôle non-destructif. L'exemple de la *Figure 20* montre le cas d'une puce LED soudée sur un PCB de forme « star ». Le but de la mesure est de comparer les performances thermiques des matériaux de soudure Indium (In) ou Or-Etain (AuSn).

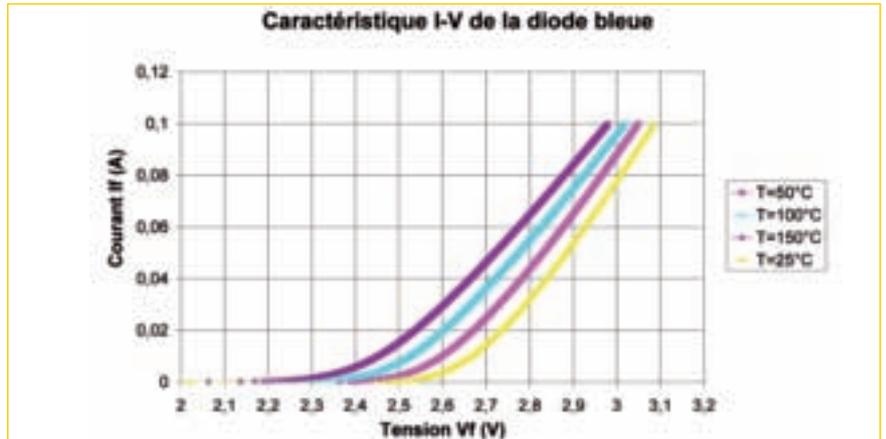


Figure 8 : Tension directe d'une LED en fonction de la température

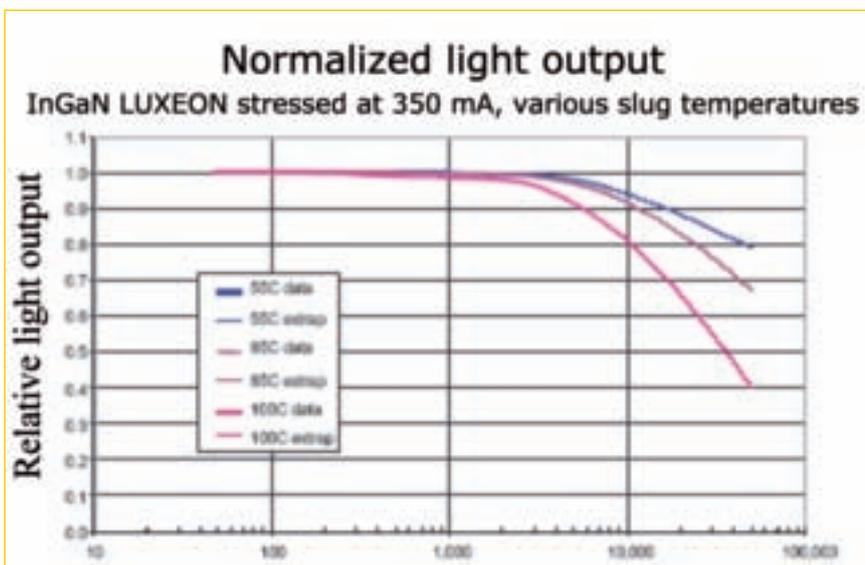


Figure 9 : Puissance lumineuse d'une LED en fonction du temps et de la température (Source : Philips Lighting)

La soudure AuSn montre une meilleure diffusion de la chaleur de la puce sur le PCB par rapport à la soudure In. La conductivité thermique supérieure de l'AuSn permet de réduire le gradient thermique jonction-PCB mais les alentours de la LED chauffent également

davantage, ce qui peut être contraignant si l'on veut intégrer d'autres composants à proximité.

Le problème de cette méthode de mesure est la difficulté d'interprétation des résultats. On ne voit que les phénomènes thermiques en surface des

pièces et chaque matériau a une émissivité différente : si l'on veut faire une cartographie par caméra thermique, il est fortement conseillé de « peindre » la surface d'étude avec un matériau à émissivité connue dans l'infrarouge. Sans cette précaution, les contrastes de couleurs sur les images ne peuvent pas être immédiatement interprétables et il faut utiliser un logiciel de traitement d'image.

b. Mesure électrothermique

Pour compléter les mesures par caméra thermique, on peut utiliser un autre type de test non-destructif. C'est un test électrique basé sur la propriété de Voltage Drop des LEDs décrite précédemment. La relation linéaire entre la tension de travail de la LED et sa température de jonction permet de faire des mesures thermiques précises et fiables (voir la *Figure 21*).

Toutes ces méthodes de mesures sont complémentaires pour comprendre et optimiser les performances des composants. Par contre, elles coûtent relativement chères et sont donc réservées aux

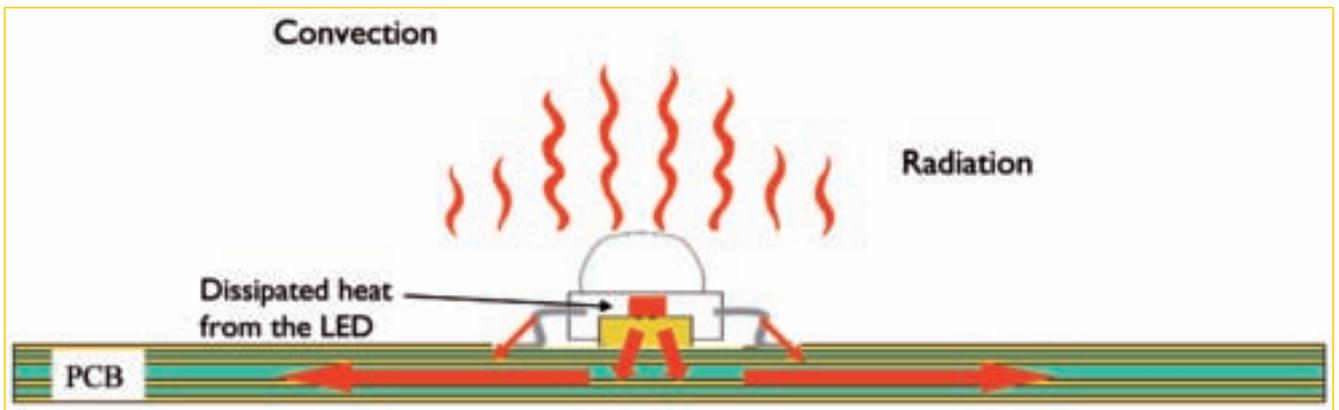


Figure 10 : Mode de Transfert de chaleur dans un module LED

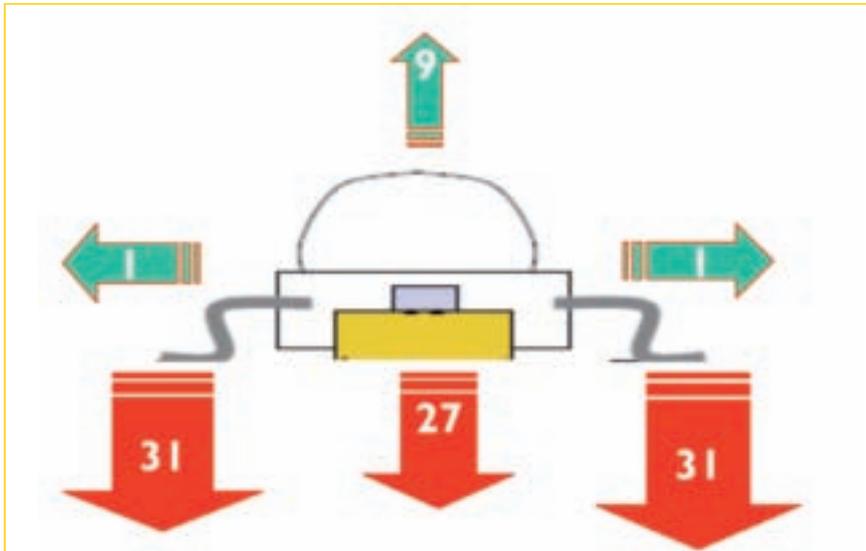


Figure 11 : Transfert de chaleur dans un composant LED

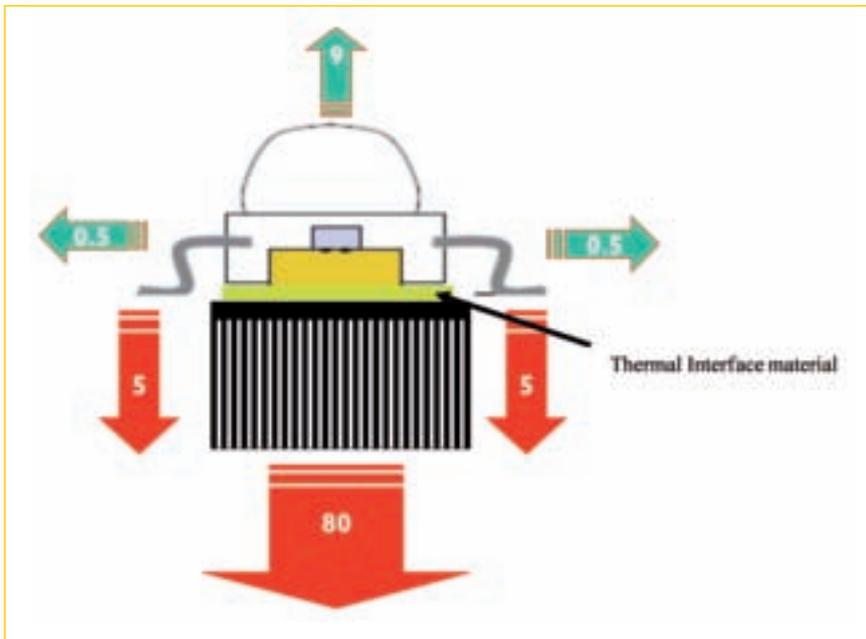


Figure 12 : Transfert de chaleur dans un composant LED au contact d'un radiateur

industriels. De plus il n'existe pas à l'heure actuelle de vrai standard de mesure pour les LED que ce soit du point de vue thermique, optique ou électrique. C'est pourquoi il est primordial d'orienter ses choix de LEDs vers celles de fabricants reconnus pour leur qualité.

V. Application du Thermal Management

a. Choix des composants

Appliquons à présent les principes du Thermal Management : commençons par le choix des composants.

Il existe sur le marché une grande quantité de types de LEDs fabriquées

de nombreux d'industriels. Chaque composant LED est défini du point de vue thermique, on l'a vu, par sa température maximale de fonctionnement et

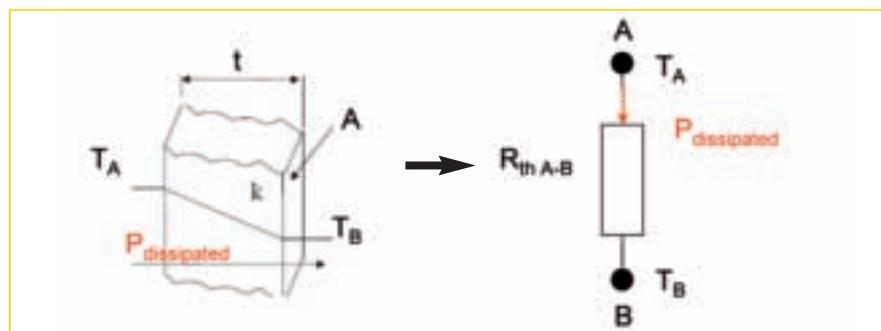


Figure 13 : Analogie des lois de diffusion thermique et électrique

par sa résistance thermique. Ces valeurs sont en général bien visibles sur les fiches de données (la Figure 22 présente les données des LEDs de Philips Lumileds). Ici les composants K2 semblent plus performants que les Rebel mais les K2 ont un packaging plus encombrant et sont donc moins flexible d'utilisation.

b. Choix des cartes imprimées

Le choix des PCB, lui aussi, est assez complexe. De nombreux types de cartes sont disponibles et chaque carte a ses avantages et inconvénients. Malgré tout, deux technologies de PCB sont principalement utilisées pour le montage des LEDs. Ce sont les PCB de type FR4 (époxy) avec vias thermiques remplis (« filled and capped vias ») et les PCB à cœur métallique (« Metal Core PCB ») en aluminium ou en cuivre.

La Figure 23 décrit les structures de ces PCB et leurs résistances thermiques. Les autres technologies de cartes type PCB FR4 simple ou Flex simple sont à éviter.

c. Choix du radiateur

Tout comme les choix des composants ou des PCB, le choix du radiateur est primordial. Le radiateur peut être également défini par sa résistance thermique :

$$R_{th \text{ heat sink}} = \frac{l}{HTC \times A}$$

Où A, est la surface disponible d'échange de chaleur par convection

HTC est le coefficient de transfert thermique par convection

Prenons l'exemple d'un radiateur pour une lampe à LED telle que présentée en Figure 24 :

Si $P_{dissipée} = 8W$ et que $A \sim 100 \text{ cm}^2$ et que nous voulons un $T \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$

LEDs ECLAIRAGE DU FUTUR

alors il faut un radiateur avec une $R_{th} \sim 6 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ ce qui correspond à un $HTC \sim 15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

On parle de convection naturelle non forcée quand HTC vaut de 5 à $15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Lorsque l'on est dans un milieu confiné, le HTC diminue fortement et passe sous les $5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

C'est pourquoi la lampe précédemment décrite doit être utilisée dans un espace ouvert et ventilé.

C'est là le grand défi du remplacement des lampes à incandescence par des solutions à LED car les lampes actuelles peuvent chauffer et travailler dans des espaces clos (voir la Figure 25). La seule façon d'évacuer la chaleur des lampes à LEDs est de créer des radiateurs développant un maximum de surface dans un volume très réduit.

VI. Voies d'évolution du Thermal Management

a. Nouveaux matériaux

Nous avons vu précédemment sur la Figure 18 que de nouveaux matériaux d'interface et de radiateur étaient en cours de développement. Cela peut ouvrir de nouvelles possibilités d'assemblage des LEDs.

La société CeramTec, entre autres, a proposé récemment un nouveau système LED où la plupart des interfaces entre la puce et le radiateur étaient supprimées (voir la Figure 26). Le radiateur devient de fait la carte imprimée, réduisant en partie les temps et les coûts de fabrication. Cela a aussi un impact positif sur les performances thermiques et sur la longévité des composants.

Par contre, avant de pouvoir mettre ces nouveaux matériaux sur le marché, il faut s'assurer de leur qualité et de leur robustesse. Cela réclame de nombreux moyens et du temps d'essais et de tests qui rendent la plupart de ces matériaux encore trop onéreux pour une utilisation généralisée.

b. Refroidissement actif

Lorsque l'on veut évacuer une grande quantité de chaleur, il est très tentant de chercher à intégrer une solution de refroidissement actif dans son système à LED. Le moyen le plus simple est

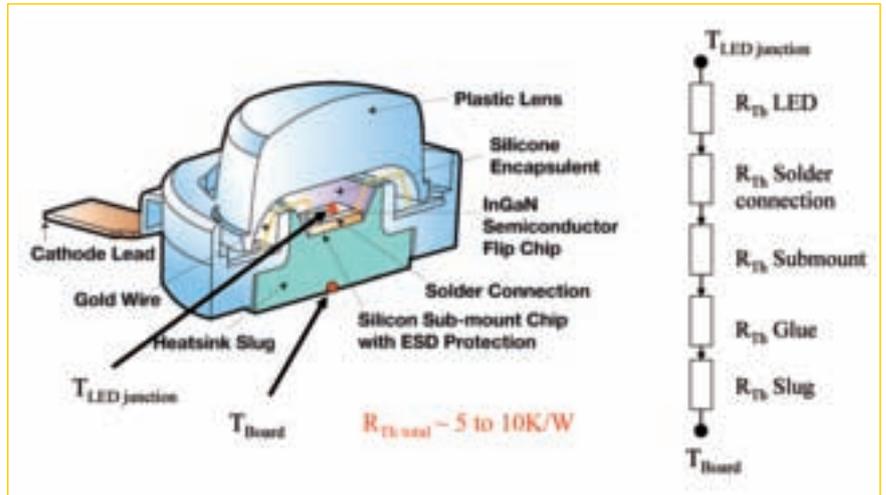
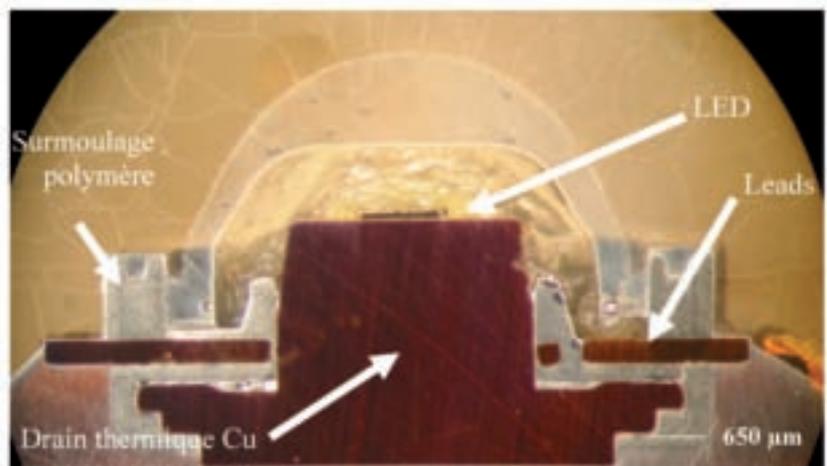


Figure 14 : Schéma d'une LED de type K2 - (Source : Philips Lighting)



Slice of Luxeon K2 from Lumileds

Source : CEA

Figure 15 : Cross-section d'une LED de K2

Principal causes of electronic system failures

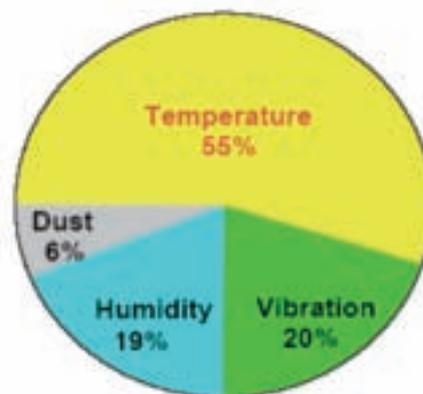
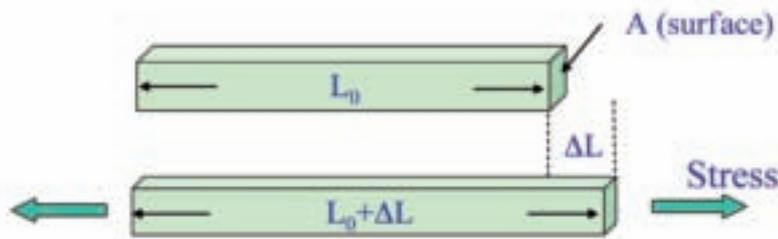


Figure 16 : Principales causes des défaillances dans les composants électroniques (Source : NXP)



Aluminum :
 $\alpha = 24\text{ppm}/^\circ\text{C}$
Copper :
 $\alpha = 17\text{ppm}/^\circ\text{C}$
Silicon :
 $\alpha = 4\text{ppm}/^\circ\text{C}$

Figure 17 : Déformation thermo-élastique et exemples de CTE de matériaux usuels

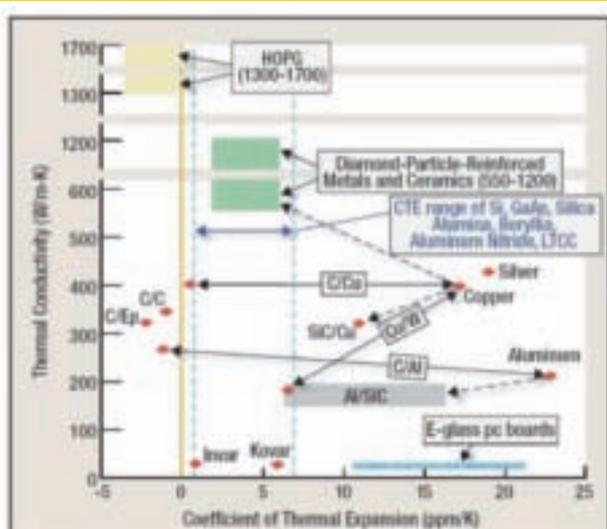
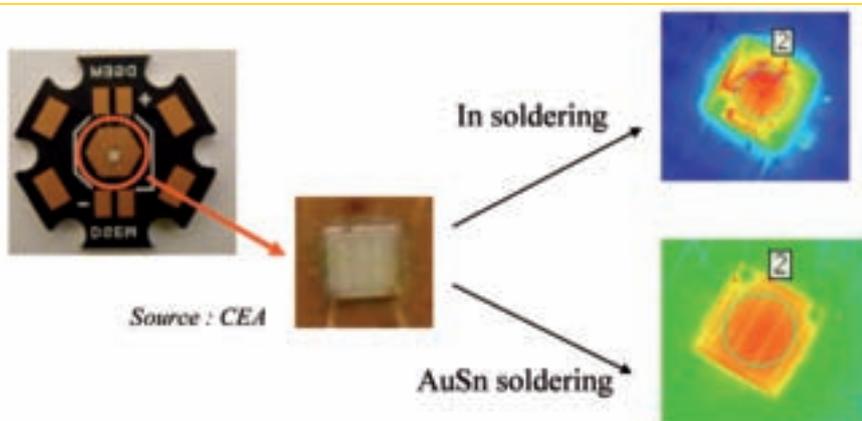


Fig. 1. When selecting thermal materials, the ideal solutions have high thermal conductivity and closely matched CTEs.

Figure 18 : Sélection de matériaux à CTE et conductivité contrôlés - (Source : Carl Zweben)



Figure 19 : Modes de défaillances électroniques (Source : NXP)



Source : CEA

Figure 20 : Modules LED à brasure Indium ou Or-Etain observés par caméra Infra-Rouge

LEDs ECLAIRAGE DU FUTUR

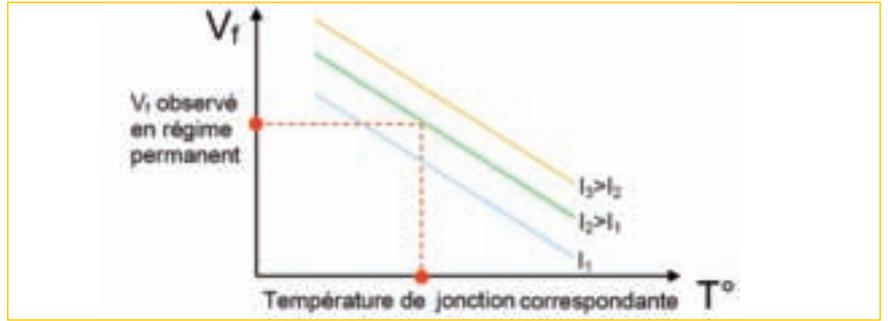


Figure 21 : Tension directe d'une LED en fonction de la température

	Temp. de jonction max	Temp. de boîtier max		Résistance thermique
LUXEON® I/III AlInGaP	120/135 °C	120 °C	Luxeon K2 InGaN	9 °C/W
LUXEON® I/III InGaN	135 °C	120 °C	Luxeon K2 AlInGaP	12 °C/W
LUXEON® K2 AlInGaP	150 °C	135 °C	Luxeon K2 TFCC	5,5 °C/W
LUXEON® K2 InGaN	185/150 °C	170/135 °C	Luxeon Rebel InGaN	10 °C/W
LUXEON® Rebel AlInGaP	135 °C	120 °C	Luxeon Rebel AlInGaP	12 °C/W
LUXEON® Rebel InGaN	150 °C	135 °C		

Figure 22 - Tableaux des températures max. et des résistances thermiques - Source : Future Lighting

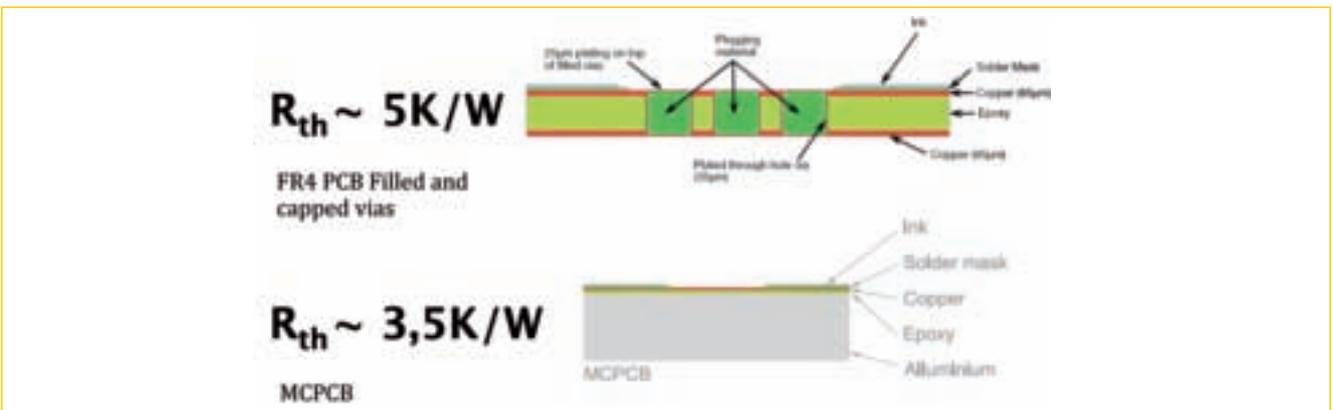


Figure 23 : Technologies de PCB pour LEDs - (Source : Philips Lumileds)

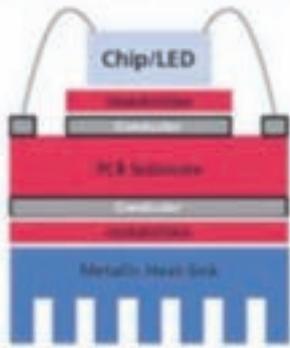


Figure 24 : Photos de radiateur pour LEDs - (Source : Lamina Sol)

	20W Halogen MR16	5W LED MR16
Luminous efficiency (lm/W)	12	50
Power Supply	DC or AC	DC
Light spectrum	continuous	discrete
Lifetime (h)	2000 to 5000	30000
Main heat transfer mode	radiation	conduction
Max temperature (°C)	400	-60°C

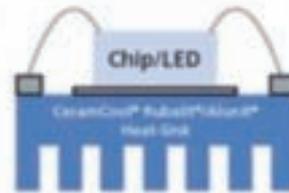
Figure 25 : Tableau comparatif des lampes halogène et à LED

Common LED System



- Complex assembly
- Many layers with different materials
- Poor thermal conductivity
- Short lifetime
- High costs
- Big sizes

New LED System with CeramCool®



- Simplified production
- Direct mounting on heat-sink
- Optimal thermal conductivity
- Long lifetime
- Cost savings in production and operation
- Miniaturisation

Heat Source Poor Thermal Conductivity Conductor Good Thermal Conductivity

Figure 26 : Nouveaux matériau et structure CeramCool proposés par CeramTec

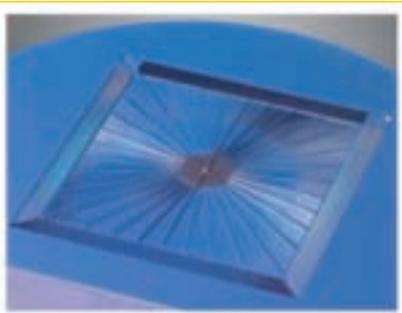


Figure 27 : Module à micro-canaux
Source : CEA

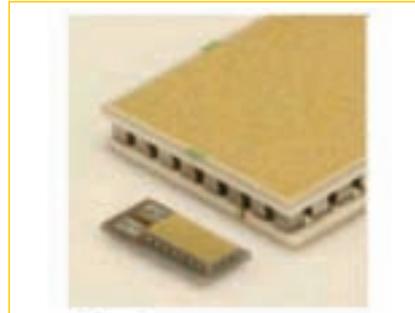


Figure 28 : Micro-module Peltier
Source : Nextreme



Figure 29 : Refroidisseur acoustique « Synjet » - Source : Nuventix

VII. Conclusion

Les effets de la température sur les LEDs sont importants et ont une forte influence sur leurs propriétés optiques et électriques.

En suivant les principes du Thermal Management, nous pouvons aisément choisir la carte imprimée et le radiateur adaptés à notre application LED. Ces principes nous apprennent également qu'il faut agir avec bon sens : le refroidissement actif peut être envisagé mais il faut toujours privilégier l'aspect passif car il faut dissiper la chaleur avant de l'évacuer.

Pour résumer, la gestion thermique doit être un travail très en amont dans la conception de nos applications LED. Alors n'hésitons pas à faire appel à un expert en thermique électronique !

• Références

- Light Emitting Diodes, E. Fred Schubert, Rensselaer Institute
- Application Brief AB17, Philips Lumileds
- Application Brief AB32, Philips Lumileds
- Thermique des LEDs, Laurent Massol, Led Engineering Development
- Introduction to Thermal Aspects, J.H.J Jansen, NXP Semiconductors
- Introduction to LED technology, Peter Deurenberg, NXP Semiconductors
- Rapport de synthèse du projet CITADEL, Adrien Gasse, CEA Léti
- Thermal Materials Solve Power Electronics Challenges, Carl Zweben, Advanced Thermal Materials Consultant
- Site internet de CeramTec : www.ceramtec.com



L'optique des éclairages à LEDs

Laurent MAYOLLET, O++

124 rue Pasteur - 59370 Mons en Baroeul - www.oplusplus.com

Tél : 03 20 19 05 15 - lmayollet@oplusplus.com

Introduction

Le développement des LEDs de haute puissance, capables de produire un flux lumineux supérieur à 50 lm, a engendré une importante activité de reconception des systèmes utilisant jusqu'à présent des sources traditionnelles comme des lampes à filament halogènes ou des lampes à arc.

Cependant, l'expérience montre que cette activité de conception s'est souvent concentrée sur les aspects électroniques, thermiques, mécanique, au détriment de l'optique elle-même, qui pose pourtant des problèmes spécifiques du fait que les LEDs ont des caractéristiques photométriques très différentes des sources traditionnelles, ce qui rend peu efficaces de simples adaptations comme le remplacement d'un tube fluorescent par une rangée de LEDs sans réoptimisation de l'optique, ou encore le remplacement d'une ampoule à filament par une LED dans un réflecteur. De telles configurations sont pourtant souvent rencontrées dans des produits à bas coûts, grand public, mais aussi parfois dans des équipements professionnels, avec pour conséquence une perception négative des éclairages à LEDs.

Le présent article a pour but de fournir quelques lignes directrices pour orienter les choix de conception d'un produit d'éclairage à LEDs.

Sources traditionnelles et LEDs

Les sources lumineuses traditionnelles telles que lampes à incandescence, tubes fluorescent, lampes à vapeur de sodium, sont utilisées couramment depuis plusieurs décennies pour les applications d'éclairage. Les caractéristiques de ces sources, avantages et inconvénients, sont bien connues des concepteurs d'éclairage, qui ont un retour d'expérience important.

La situation est très différente pour les éclairages à LEDs, dans lesquels on découvre, bien souvent assez tard dans le cycle de développement et au

moment de réaliser des essais, l'importance de certains paramètres photométriques, comme la luminance de la puce.

- les sources classiques utilisées en éclairage rayonnent généralement dans tout l'espace. Par conception même, les LEDs rayonnent dans un demi-espace, avec une intensité maximale suivant la normale à la puce,
- la luminance de sources courantes comme les tubes fluorescents, ou même les lampes à incandescence, est faible à modérée et ne présente généralement pas de danger en vision directe, contrairement aux LEDs de puissance.

La puce d'une LED de puissance est une source de luminance très élevée, qui peut être supérieure à 108 cd/m², bien que le flux total reste généralement inférieur aux sources classiques.

L'oeil étant sensible à la luminance, il en résulte une plus grande difficulté à éliminer les problèmes d'éblouissements dans certaines applications.

Ce problème est particulièrement sensible en éclairage intérieur par exemple, où sont définies des normes portant sur la luminance.

Ces caractéristiques expliquent que bien souvent, une adaptation naïve

consistant à remplacer une source classique par des LEDs tout en conservant l'optique, pour des raisons économiques, produit des résultats peu satisfaisants : problèmes d'éblouissement, distribution photométrique (intensité) non conforme, et même rendement médiocre (alors même qu'une des motivations pour passer aux LEDs était la réduction de consommation électrique).

On ne saurait donc trop insister sur la nécessité d'approches optiques nouvelles pour exploiter au mieux le potentiel des LEDs.

Composants optiques standards

L'identification de certaines fonctions d'usage courant, comme la collimation du faisceau issu d'une LED, d'une part, et l'uniformisation de certaines caractéristiques, comme la dimension de la puce, a permis le développement de quelques composants standards, qui peuvent permettre, dans certains cas, d'assembler des systèmes d'éclairage avec un minimum de conception optique.

Un composant couramment utilisé est le collimateur, dont le principe est représenté sur la figure 1.

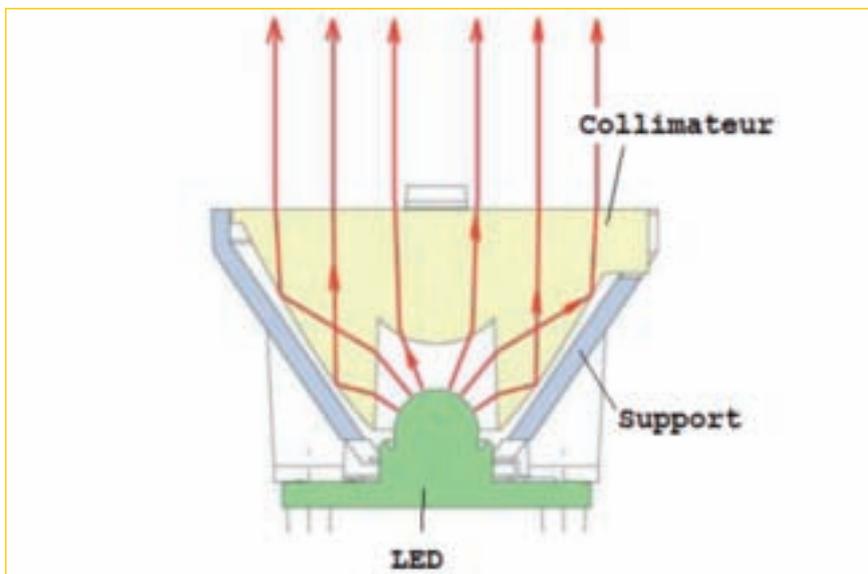


Figure 1 : Principe d'un collimateur

Un collimateur est un composant qui se positionne au dessus d'une LED, maintenu généralement par un support fixé sur la carte électronique portant la LED.

Les LEDs de puissance, hormis celles disposant déjà d'une optique intégrée, produisent un faisceau de grande divergence, typiquement avec une distribution lambertienne et un angle total à mi-hauteur de l'ordre de 120°.

Le collimateur permet de collecter le flux émis par la LED pour produire un faisceau de divergence différente, en général plus faible (d'où le nom de "collimateur").

Ce type de composant est décliné en de nombreuses variantes, pour produire des faisceaux de divergences différentes, ou réaliser des fonctions un peu plus spécialisées comme le mélange de couleurs pour des LEDs multipuces.

Grâce à sa géométrie permettant d'optimiser la collecte du flux, le rendement d'un collimateur standard peut typiquement atteindre 85 % (la limite physique étant de 92 %).

Il est généralement réalisé en moulage par injection plastique en grande série, ce qui permet d'atteindre des coûts compatibles avec des applications d'éclairages.

Quelques fabricants de collimateurs standards :

Gaggione (France), Fraen (Italie), Carclo Optics (GB), Polymer Optics (GB).

Une fois le flux collecté, les composants optiques traditionnels disponibles sur catalogue, tels que lentilles, miroirs, etc. sont également utilisables.

L'utilisation de collimateurs standards permet par exemple de construire un projecteur utilisant plusieurs LEDs de puissance, surmontées chacune d'un collimateur, et qui produira un faisceau dont le diagramme d'intensité est celui du collimateur.

Un tel système ne nécessite pas d'investissement en outillage de fabrication optique, et la conception optique elle-même est rudimentaire, ne nécessitant pas de compétences pointues en optique.

Cette approche présente toutefois aussi quelques inconvénients :

- le choix de fonctions est limité

On ne peut pas tout faire avec des collimateurs et composants standards. Certaines applications requièrent des distributions photométriques précises, définies par des normes, qui peuvent être difficiles, voire impossibles à produire avec des composants optiques standards

- les produits finaux sont peu différenciés.

Les projecteurs à LEDs constitués avec des composants standards finissent par tous se ressembler, on retrouve la même esthétique caractéristique, avec des points lumineux.

Il y a peu de barrière technologique et de nombreux acteurs présentent sur le marché des produits très proches.

- coûts de production plus élevés
- L'économie en outillage de fabrication peut être annulée par des coûts de production plus élevés lorsque les séries deviennent importantes.

Un projecteur utilisant vingt collimateurs standards est plus coûteux à fabriquer que l'équivalent avec une optique monobloc spécialement conçue.

Une "ampoule" à LEDs constituée à partir de collimateurs standards (*figure 2*) : un produit grand public, comme il en existe maintenant des centaines...

Optiques spécifiques

Une conception optique spécifique peut permettre de s'affranchir des inconvénients des solutions à base de composants standards.

Les avantages sont les suivants :

- performances optimisées,
- produit original, pouvant faire l'objet d'un dépôt de brevet,
- optimisation des coûts de production pour les grandes séries.

Inconvénients :

- étude optique complexe, nécessitant l'intervention de spécialistes en conception optique,
- coût de l'outillage de production,
- délais de mise sur le marché plus importants.

Exemple d'optique spécifique optimisée pour un gyrophare à LEDs (*figure 3*) : une optique monobloc, adaptée à une production industrielle, trois fois plus compacte qu'un gyrophare traditionnel, exploitant de façon optimale le haut rendement des LEDs.

Techniques de fabrication

En parallèle au développement des LEDs, les techniques de fabrication des optiques adaptées aux grandes séries progressent constamment.

Pendant plusieurs siècles, le matériau par excellence de l'optique a été le



Figure 2 : une "ampoule" à LEDs

LEDs ECLAIRAGE DU FUTUR

verre, et l'usinage et polissage du verre reste toujours la technique la plus performante pour les applications nécessitant des

hautes précisions, comme l'imagerie.

Les coûts correspondant sont toutefois incompatibles avec la plupart des applications d'éclairage.

Le moulage du verre peut permettre de produire des optiques à des coûts acceptables pour certaines applications d'éclairage, mais les contraintes de fabrication limitent les formes possibles.

Le moulage par injection plastique est par contre particulièrement bien adapté

à la fabrication des optiques pour systèmes à LEDs, pour différentes raisons :

- coûts de production bien plus bas que pour les optiques en verre, dans un rapport qui peut être supérieur à 10,
- le moulage par injection plastique permet de réaliser des formes complexes précises, irréalisables en verre, ce qui apporte bien plus de degrés de liberté pour le concepteur opticien.

Par ailleurs, certaines caractéristiques des plastiques pouvant interdire leur utilisation dans certaines applications avec des sources traditionnelles, comme la faible tenue en température comparée au verre, sont moins limitatives sur les systèmes à LEDs : le spectre des LEDs d'éclairage ne contient pas d'infrarouges qui risqueraient de

chauffer excessivement l'optique par absorption, le fait que les plastiques ne supportent guère des températures supérieures à 100°C est rarement rédhibitoire

Les plastiques les plus utilisés sont le PMMA (Polyméthyl Methacrylate), connu également sous différentes marques (Altuglas, Plexiglas, etc.) et le PC (Polycarbonate = Makrolon, Lexan, etc.).

Le développement de nouveaux polymères optimisés pour les applications optiques est un également un sujet actif, un polymère comme le Zeonex atteint maintenant d'excellentes performances, en terme de transparence et de stabilité, permettant une utilisation même en imagerie.



Figure 3 : une optique spécifique pour gyrophare - (Source: brochure Ecogyro, Aximum)

Conclusion et résumé

Les quelques exemples et arguments évoqués montrent que la stratégie de développement de l'optique d'un nouveau produit d'éclairage à LEDs dépend de nombreux paramètres techniques et économiques, et un même problème optique peut recevoir des solutions très différentes, suivant que l'objectif est de mettre sur le marché rapidement un produit avec un investissement minimal, ou au contraire de rechercher l'optimisation des coûts de production, les performances photométriques, l'originalité, dans une stratégie à plus long terme.

BULLETIN D'ABONNEMENT A VEILLE TECHNOLOGIQUE

Je souhaite recevoir "VEILLE TECHNOLOGIQUE" pendant 1 an, soit 4 numéros au prix de 152 € TTC.

Règlement établi à l'ordre de ASPROM : 7, rue Lamennais 75008 PARIS - FRANCE.

Chèque bancaire Virement bancaire Autre

Nom : _____ Prénom : _____

Fonction : _____

Société et adresse : _____

Téléphone : _____ Fax : _____ E-mail : _____

Signature :



Perception de la lumière issue de LEDs

Françoise VIÉNOT

Muséum national d'histoire naturelle

Centre de recherche sur la conservation des collections

L'éclairage est en plein renouveau, et les diodes électroluminescentes (LED) apportent leur lot de promesses : une efficacité lumineuse élevée et une faible consommation d'énergie, des sources de petite taille à intensité ajustable, l'évacuation de l'ultraviolet et de l'infrarouge.

Qu'en est-il de leur perception ? Nous attendons de la lumière blanche procurant une grande qualité visuelle.

1.1 Obtenir de la lumière blanche avec des LEDs

1.1.1 La lumière naturelle et la température de couleur

Qu'est-ce que la lumière blanche ? Pour les humains que nous sommes, la lumière est blanche en référence à la lumière du jour. Comme la lumière naturelle, la teinte peut varier, procurant une ambiance chaude lorsqu'elle est dorée, ou froide, lorsqu'elle est neutre ou bleuâtre.

Or, il ne faut pas perdre de vue que la lumière naturelle, si elle varie selon l'heure de la journée, le lieu géographique ou la météo, suit une loi de variation très régulière imposée par la physique de l'atmosphère. Son spectre et sa couleur ne s'éloignent pratiquement pas d'un schéma immuable, unidimensionnel (Figure 1).

Fort heureusement pour la métrologie de l'éclairage, le corps noir (radiateur de Planck) dont le spectre d'émission est bien maîtrisé par les physiciens, suit lui aussi une loi de variation régulière, unidimensionnelle, qui produirait une variation de couleur parallèle à celui de la lumière naturelle. D'où l'idée de caractériser la couleur d'une source par sa température de couleur proximale T_{cp} .

La température de couleur est une échelle de couleur pour les sources artificielles de lumière blanche. Elle est définie comme la température du corps noir (radiateur de Planck) dont le rayonnement possède la chromaticité la plus voisine de celle de la source considérée (Figure 2). Insistons sur le

fait qu'il s'agit bien d'une grandeur qui informe sur la couleur de la lumière, mais en rien sur le spectre de cette lumière.

La condition sur la couleur est nécessaire, parce que les individus sont très exigeants et repèrent rapidement un écart à la loi de variation de couleur de

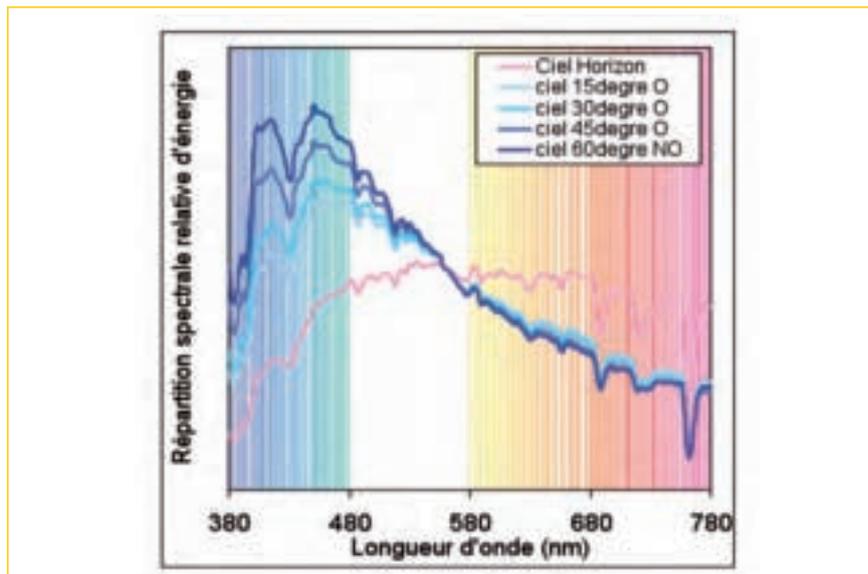


Figure 1 : Répartition spectrale d'énergie de la lumière du jour mesurée en divers points du ciel.

Ainsi, produire de la lumière blanche revient à produire de la lumière d'une couleur identique à celle de la lumière naturelle, sans qu'il soit nécessaire d'en reproduire le spectre.

la lumière naturelle. La maîtrise du spectre laisse pas mal de liberté à l'ingénieur, et nous allons voir par la suite qu'elle conditionne la qualité de la lumière.

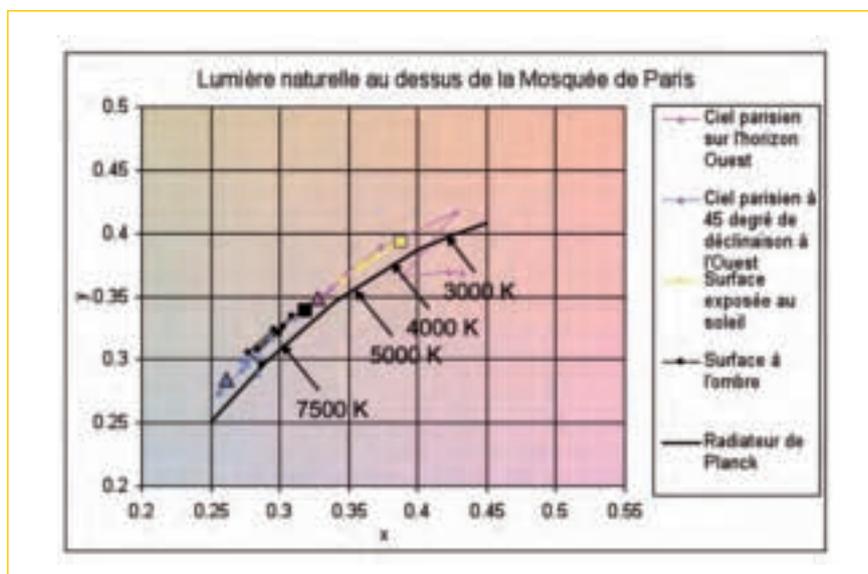


Figure 2 : Variation de couleur se la lumière naturelle mise en parallèle avec la variation de couleur du corps noir. Pointés de la température de couleur.

LEDs ECLAIRAGE DU FUTUR

1.1.2 Obtenir de la lumière blanche avec des LEDs

Plusieurs dispositions permettent d'obtenir de la lumière blanche à

l'aide de LEDs (Figure 3). Les diodes dites blanches sont constituées d'une diode émettant dans le bleu, recouverte d'un ou plusieurs phosphores qui absorbent une partie du rayonnement bleu pour restituer de l'énergie dans les plus grandes longueurs d'onde du spectre. La présence de phosphores en plus ou moins grande quantité permet de jouer sur l'équilibre bleu-jaune de la lumière, et donc de la température de couleur proximale. Le choix des phosphores permet d'élargir plus ou moins le l'étendue des rayonnements émis. Ces diodes blanches conviennent à l'éclairage domestique.

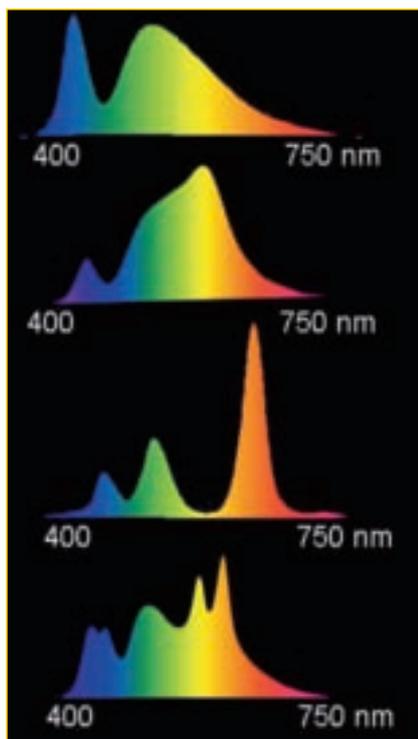


Figure 3 : Répartition spectrale d'énergie de deux LEDs blanches (en haut) et d'assemblages de trois ou quatre LEDs colorées (en bas).

Si l'on souhaite disposer d'une très large gamme de lumières colorées à l'envi, on procède à l'assemblage de trois ou quatre LEDs colorées : rouges, vertes et bleues, et éventuellement de l'ambre. Ce type d'assemblage permet une grande souplesse d'effets colorés mais, nous allons l'expliquer, ne convient absolument pas à l'éclairage domestique.

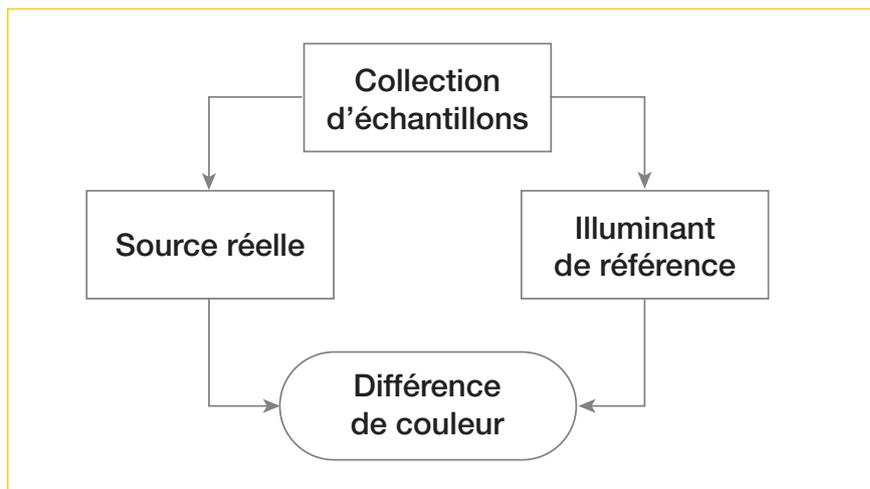


Figure 4 : Principe d'évaluation d'une source réelle par rapport à un illuminant de référence

1.2 La fidélité des couleurs : l'indice de rendu des couleurs de la Commission Internationale de l'Éclairage

Obtenir de la lumière blanche avec des LEDs est possible, dans des teintes proches de celles de la lumière naturelle. Quelle est alors la qualité de la lumière émise ?

Etant donné que la lumière n'est pas faite pour être vue, mais pour éclairer, la qualité de la lumière doit se juger par l'apparence qu'elle donne à la scène éclairée.

C'est le sens de l'indice de rendu des couleurs développé et recommandé par la Commission internationale de l'éclairage (CIE, 1995). L'idée est la suivante. Etant donné une collection d'échantillons colorés, on calcule, par des calculs colorimétriques, la couleur qu'ils revêtent sous la source en examen que l'on compare à la couleur qu'ils prendraient sous une source de référence de même température de couleur (Figure 4). La différence de spécification colorimétrique donne un indice de rendu des couleurs d'autant plus bas que la différence de couleur est élevée. Il s'agit bien dans cette démarche de comparer la spécification colorimétrique d'objets colorés dans une situation réelle et dans une situation de référence.

La collection d'échantillons sélectionnés par la CIE comprend huit couleurs de saturation modérée pour calculer l'IRC général R_a (indice a pour 'average') et six couleurs optionnelles rouge vif, jaune vif, vert vif, bleu vif, le spectre de la carnation et le spectre du feuillage pour calculer des IRC parti-

culiers R_i . Les 14 couleurs sont physiquement définies par leur facteur spectral de réflexion (Figure 5). L'illuminant de référence est choisi de la même couleur (même température de couleur). Il s'agit de la lumière du jour ou un équivalent (corps noir).

Un indice de rendu des couleurs supérieur ou égal à 90 est jugé excellent, de 80 à 89 de bonne qualité, de 60 à 79 médiocre. A l'heure actuelle, l'indice de rendu des couleurs des LEDs blanc chaud à deux phosphores se situe entre 85 et 90, celui des LEDs blanc froid à un phosphore entre 75 et 80, celui des associations de LEDs rouge-vert-bleu aux environs de 20.

1.3 D'autres indices de qualité

L'identité de la spécification colorée dans la situation réelle, en rapport avec une situation de référence, est-elle le seul critère à retenir pour juger de la qualité d'un éclairage ? Le jugement visuel humain est assez complexe pour que l'on puisse se poser la question, d'autant plus que, si par le passé, il était difficile de maîtriser le spectre de la lumière des sources artificielles traditionnelles telles que les tubes fluorescents, les technologies nouvelles apportent un grand choix. Sous l'impulsion de fabricants de LEDs surpris par l'apparence des objets sous l'éclairage par LEDs, la Commission internationale de l'éclairage a entrepris de réviser la notion de rendu des couleurs.

Faut-il en rester à une définition conservatoire ? Ou peut-on imaginer que l'utilisateur préférerait une autre lumière ?

Le débat est vif. J'y reviendrai plus loin.

Les études novatrices se sont heureusement multipliées ces dernières années, trois équipes travaillent en France (INM-CNAM, ENTPE, MNHN), six en Europe, les Etats-Unis assurent la coordination, le Japon envoie ses contributions.

De mon point de vue, on ne peut pas envisager de réduire le rendu des couleurs à un indice unique qui résulterait d'un compromis, mais l'évaluation du rendu des couleurs assurant la reproduction fidèle des couleurs des objets éclairés reste nécessaire et primordiale. On n'éclaire pas la cabine d'une esthéticienne comme la vitrine d'une confiserie. Comment se repèrerait un dermatologue si le local dans lequel il consulte fausse les couleurs. Le suivi d'une production textile peut-il être opéré dans une usine éclairée pour enjoliver les couleurs ?

Généralement, les chercheurs équipent des cabines à lumière et font passer des tests à des observateurs. Les éclairages incluent tant des technologies classiques que des prototypes à base de LEDs. Les observateurs peuvent être naïfs ou expérimentés. Hormis des études de performance visuelle, si l'on récapitule la liste des qualificatifs sur lesquels les individus sont invités à porter un jugement, on trouve *fresh, superficial, slow, soft, male, clean, heavy, classic, cold, clear, memory, natural, color harmony, quality, fidelity, preference*.

Finalement, il existe plusieurs critères sur lesquels fonder son jugement de la qualité d'un éclairage, et tous les résultats reposent sur le schéma adopté pour l'indice de rendu des couleurs : une collection d'échantillons colorés est examinée sous la source à étudier et sous une source de référence, et le jugement ressort de la comparaison des jugements.

1.4 Expériences dans un contexte réel

Dans notre laboratoire du Centre de recherche sur la conservation des collections, au Muséum national d'histoire naturelle, nous nous sommes attachés à deux critères :

- La discrimination fine des couleurs : il s'agissait de comparer l'aptitude à discriminer des échantillons de couleurs voisines éclairés par la source à

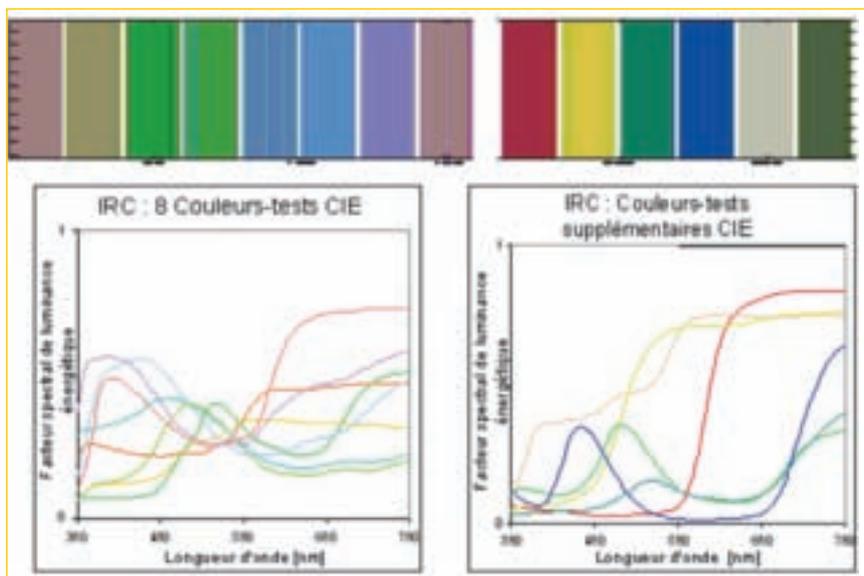
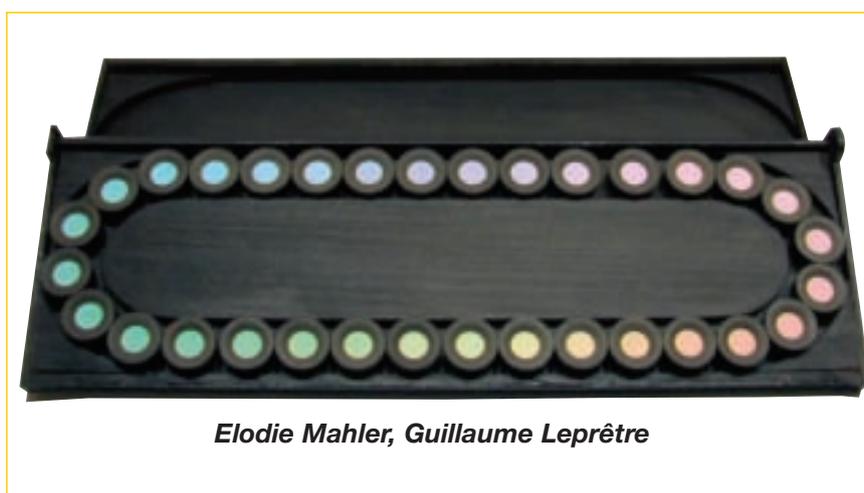


Figure 5 : Représentation et facteur de luminance des échantillons-tests recommandés par la CIE pour le calcul de l'indice de rendu des couleurs



Elodie Mahler, Guillaume Leprêtre

Figure 6 : Coffret d'échantillons colorés pour tester la discrimination fine des couleurs.

tester, et l'aptitude à les discriminer sous une source de référence.

- L'apparence colorée de la scène : il s'agissait de juger l'aspect et la coloration d'un nuancier sous la source à tester et sous la source de référence.

Des observateurs ont été invités à participer aux expériences, chaque test étant effectué sous différents éclairages équipant une cabine à lumière prototype.

1.4.1 L'aptitude à discriminer les couleurs

Pour tester cette aptitude, nous avons développé une collection spécifique d'échantillons colorés couvrant l'ensemble du cercle chromatique (Figure 6). Chaque échantillon présente une nuance à peine distincte de la suivante. Tous les échantillons sont présentés simultanément,

dans le désordre, à charge de l'observateur de les replacer dans l'ordre logique. L'hypothèse que nous formulons est que, si un grand nombre d'observateurs inversent des échantillons sous un éclairage, nous mettons en cause la qualité de l'éclairage. Sur 40 observateurs, il y en a toujours quelques-uns qui font des erreurs de classement. Mais il y a environ deux fois plus d'observateurs qui font des inversions sous les éclairages à base de mélanges de LEDs colorées - rouges, vertes, bleues et éventuellement ambre - que sous les éclairages incluant des diodes blanches et colorées. Ainsi, les spectres discontinus sont responsables d'une incapacité des observateurs à repérer les nuances fines de couleur. C'est pour cette raison que nous excluons l'idée d'utiliser des mélanges de diodes colorées en éclairage domestique.

1.4.2 L'exaltation de la coloration

A notre surprise, les observateurs nous ont fait remarquer que sous certains éclairages, les couleurs paraissaient plus vives, devenaient plus « flashy ». Nous avons donc voulu évaluer quantitativement leur perception. Nous leur avons proposé de noter, entre 0 et 10, le « degré de coloration » d'échantillons choisis dans l'atlas de couleur Natural Color System (NCS), collection reconnue dans le domaine d'activité des coloristes (Figure 7). L'exercice est un peu difficile, mais les observateurs prennent confiance et délivrent des notes exploitables statistiquement.

Les LEDs sont installées dans le plafond de la cabine à lumière prototype.

Effectivement, certains échantillons ont reçu une note surévaluée sous certains éclairages. Or c'est précisément sous les éclairages qui avaient pénalisé la discrimination des couleurs, c'est-à-dire les éclairages à base de LEDs colorées et à spectre discontinu, et pour les échantillons qui avaient été classés dans le désordre, que les notes de coloration ont été relevées.

Ainsi, paradoxalement, l'effet de la lumière est tel que le degré de coloration

augmente, alors que la discrimination fine des teintes se dégrade.

1.4.3 D'autres expériences sont en cours

Si le choix du spectre de la lumière a un effet visible immédiat, on a découvert ces dernières années un mécanisme susceptible d'expliquer certaines réponses non liées à la perception de l'image de la scène. Il s'agit d'un petit nombre de cellules présentes dans la rétine, qui contiennent un pigment photosensible et envoient des signaux au cerveau, sans participer au traitement des formes dans les images.



Figure 7 : Expérience visuelle du jugement du degré de coloration.

Ces signaux assurent le contrôle du rythme circadien ou de l'éveil jour-nuit, du réflexe pupillaire, la pupille ayant tendance à se fermer en ambiance très lumineuse, et de fonctions régulatrices telles que le rythme cardiaque ou la température. En jouant sur le spectre émis par des LEDs, nous avons obtenu quelques manifestations de l'effet de certaines lumières sur l'ouverture pupillaire. Ces études demandent à être approfondies pour en tirer des conséquences sur la lumière artificielle, que ce soit celle des LEDs ou d'autres sources artificielles.

1.5 Conclusion et messages

Toutes les lumières ne sont pas équivalentes.

A blancheur identique, la qualité perçue de la lumière se caractérise par le rendu des couleurs. Soit la lumière garantit la fidélité des couleurs de la scène éclairée, et la discrimination fine des nuances colorées, soit elle apporte un certain "embellissement" avec accentuation de la coloration. Mais attention, dans ce dernier cas, le gain apparent de coloration s'obtient aux dépens de la discrimination fine des couleurs.

Il convient de développer plusieurs indices de qualité pour la lumière, selon l'objectif que l'on se fixe : fidélité des couleurs, renforcement de l'apparence colorée, respect du confort et des rythmes biologiques. Pour la vie quotidienne, nous recommandons de donner la priorité à la fidélité des couleurs, la priorité à un spectre complet, proche du spectre de la lumière naturelle.

1.6 Références

- Commission Internationale de l'Éclairage. CIE Pub. 13.3-1995, Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources, Vienna, 1995.
- VIÉNOT F, MAHLER E., EZRATI J.-J., BOUST C., RAMBAUD A., BRICOUNE A., 2008, Color appearance under LED illumination: The visual judgment of observers. *Journal of Light and Visual Environment*, 32 :208-213.
- MAHLER E., EZRATI J.-J., VIÉNOT F., 2009, Testing LED Lighting for Colour Discrimination and Colour Rendering. *Color Research & Application*, 34 : 8-17.
- VIÉNOT F., DURAND M.-L., MAHLER E., 2009, Kruthof's rule revisited using LED illumination. *J. Mod. Optics*, 56 : 1433-1446.
- VIÉNOT F., DURAND M.-L., MAHLER E., 2009, The effect of LED lighting on performance, appearance and sensations, *Proceedings of the CIE Light and Lighting Conference*, Budapest, 27-29 May 2009.
- VIÉNOT F., 2008, L'éclairage à base de LEDs. In : P. Mottier (co-ordonnateur) *Les diodes électroluminescentes pour l'éclairage* (traité EGEM), Hermes. pp. 207-239 et IV-VI. Traduction anglaise : P. Mottier (éditeur) *LEDs for Lighting Applications*, ISTE Wiley, 2009, pp 197-232. ISBN: 9781848211452.

Méthode de caractérisation des sources lumineuses

Par Thierry PUPPATO, Directeur marketing et ventes chez MAJANTYS
Tél. : 04 79 62 48 66 - mail : t.puppato@majantys.com

Les enjeux des éclairages nouvelle génération

Le marché de l'éclairage est en pleine mutation, sous la pression de nouvelles réglementations. Souvent dans le collimateur des utilisateurs pour leurs fiabilités et leurs consommations, les dispositifs d'éclairages intérieurs ou extérieurs sont en train d'évoluer pour devenir plus « propre ».

Les mesures prises pour faire disparaître les ampoules à filaments classiques ont certainement été un « électrochoc » dans le domaine. La cible n'est pas une technologie (par exemple l'ampoule à filament) mais le rendement global de la source lumineuse (énergie primaire/lumineuse). On associe de plus en plus la qualité de l'éclairage, à son impact environnemental afin de donner un sens à cette démarche de migration vers de nouvelles technologies.

Le véritable enjeu devient clairement de remplacer les sources actuelles par de nouveaux produits alliant durée de vie, qualité d'éclairage, et économie d'énergie.

Cet objectif pousse les acteurs du marché à déployer des moyens importants en terme de recherche et développement, pour atteindre des performances optimales. Le produit idéal n'existe pas, aucune technologie ne semble vraiment prendre le pas sur les autres.

On classe souvent les sources lumineuses en deux catégories: les sources à spectres continus et les sources à spectres de raies. Auparavant représentées par les tubes fluorescents (spectre de raies) et les lampes à incandescence (spectre continu), les nouvelles technologies suivent toujours ce type de modèle. La LED est considérée comme un spectre « relativement continu » alors que les Fluocompacts sont définitivement des sources à spectres de raies (figure 1).

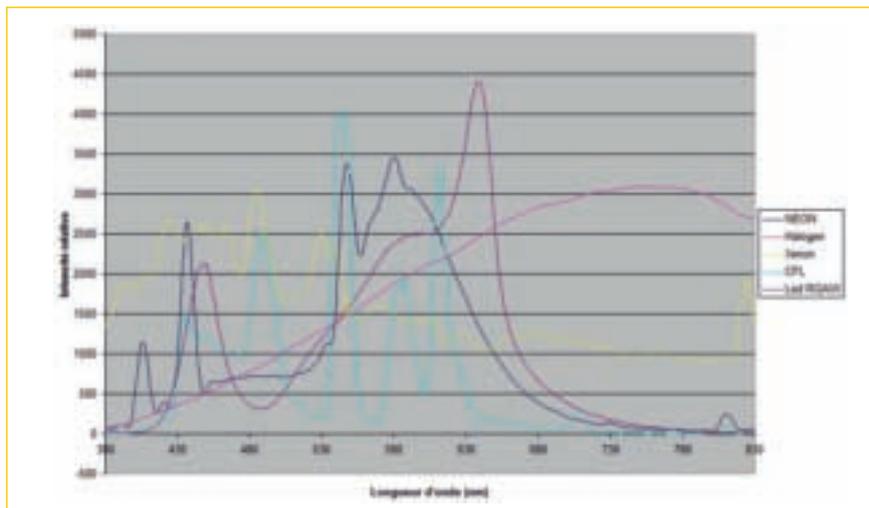


Figure 1. : Décomposition spectrale des sources lumineuses

La décomposition spectrale

Les solutions efficaces de caractérisation des sources lumineuses disposent d'un dispositif optique appelé « réseau de diffraction ». Cet élément représente le « cœur » d'un système de spectrophotométrie permettant d'aboutir à une qualification très précise des éclairages. En s'appuyant sur ce composant, les dispositifs proposés permettent d'acquérir une décomposition

spectrale « Longueur d'onde vs. Intensité » qui est la base de tous les critères de caractérisation.

Cette représentation permet d'apprécier la richesse du spectre sur l'ensemble du domaine visible (380-780 nm). La figure 2. met en évidence la répartition spectrale d'une source à LED blanche.

On distingue parfaitement la technologie employée qui consiste à utiliser une puce de LED bleue sur laquelle on

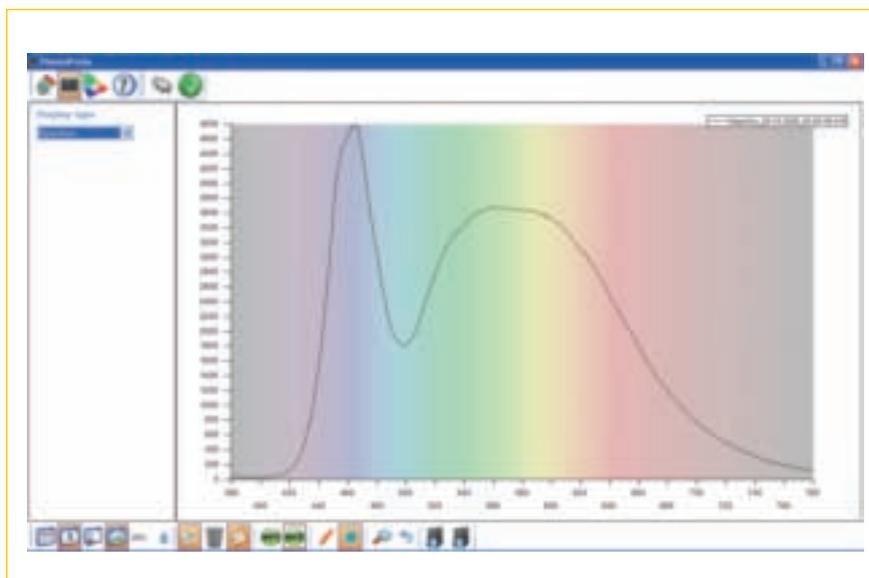


Figure 2 : Décomposition spectrale

LEDs ECLAIRAGE DU FUTUR

vient appliquer une ou plusieurs couches de phosphores qui permettent l'émission de photons autour de 560-620 nm. L'utilisation de différents phosphores amène à des décompositions différentes (figure 2).

Au-delà des seules sources d'éclairage « blanches », de nombreuses applications nécessitent une analyse précise des données spectrales.

Pour la signalisation routière ou automobile, les normes sont très strictes en matière de gamme spectrale. On notera par exemple que les indicateurs de changement de direction doivent respecter une couleur, synonyme de longueurs d'ondes pics ou dominantes très précises.

Les voyants de signalisation dans les cockpits d'avions sont également très encadrés au niveau des longueurs d'ondes émises.

Pour les sources Fluocompactes, la décomposition spectrale représente une « signature » qui est caractéris-

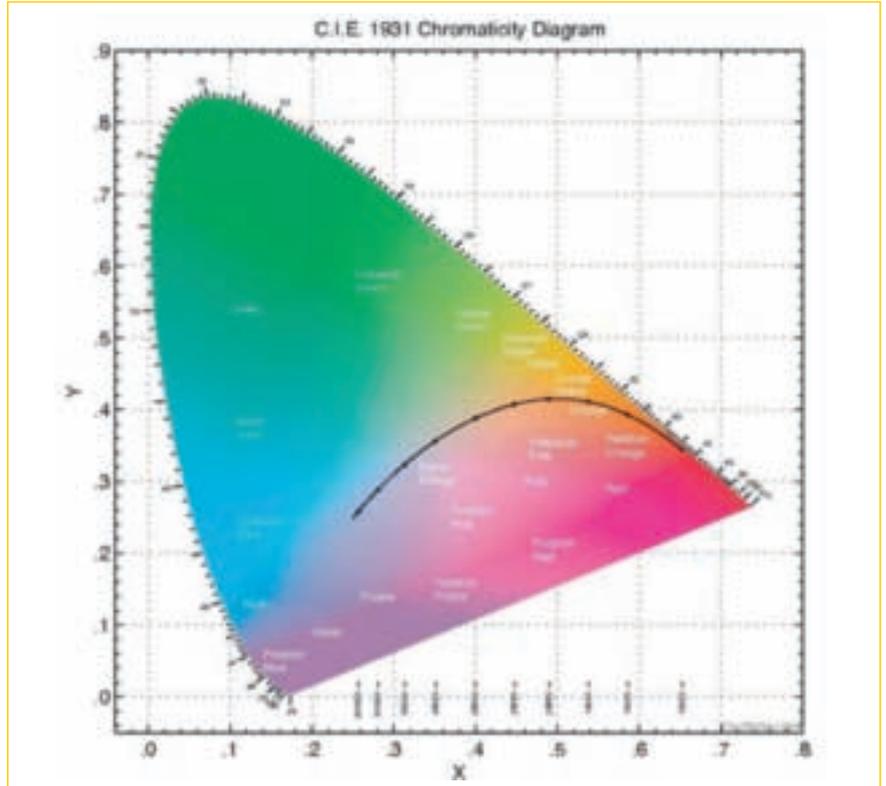


Figure 3 : Diagramme CIE 1931

tique des différentes composantes utilisées dans la fabrication. Les procédés industriels, leurs parfaites maîtrises

sont, sans aucun doute, la meilleure garantie en terme de fiabilité et de durée de vie. Une qualité médiocre

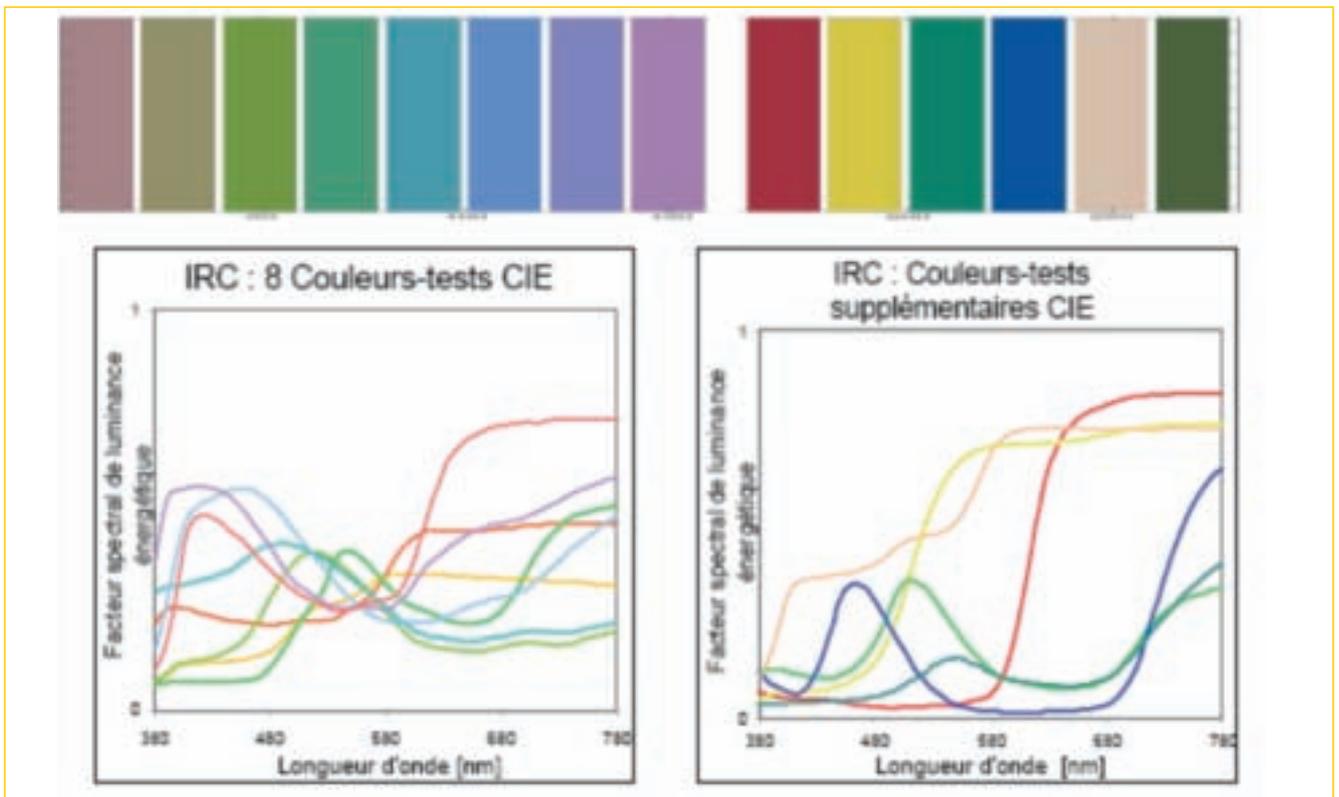


Figure 4 : 8 échantillons standards et 6 échantillons complémentaires. (Viénot F., 2008, L'éclairage à base de LEDs . In : P. Mottier, Les diodes électroluminescentes pour l'éclairage, Hermes).

entraînera une répartition non-homogène sur l'ensemble de la production, synonyme, bien souvent, de problèmes qualités importants.

Sans compter que ces dérives ont un impact direct sur la qualité de la lumière diffusée, aussi bien en colorimétrie que pour le rendu des couleurs.

Les données chromatiques

Toutes issues de matrices de calculs alimentées par la décomposition spectrale, les données chromatiques sont à ce jour les seules données permettant de classer les sources lumineuses. Le modèle de représentation (*figure 3*) graphique le plus populaire est le CIE1931 [x;y].

L'utilisation de ces modèles est très répandue dans le domaine des sources à LEDs. Les fabricants s'appuient sur ce type de représentation pour classer leur production. Ils proposent alors des lots « homogènes » qui respectent les critères demandés par leurs clients.

Il est cependant fréquent d'observer des différences visibles à l'œil entre les LEDs d'un même lot. La difficulté pour observer ces dérives est principalement due à l'intensité lumineuse qui est tellement importante qu'on ne peut regarder ces sources directement.

La combinaison des LEDs au sein d'un même module d'éclairage, par exemple dans un luminaire, fait apparaître des zones non-homogènes qui sont synonymes de qualité « médiocres » pour le client final.

La spectrophotométrie amène des solutions pour le tri des sources destinées à être assemblées dans un même luminaire, ou bien dans un même espace. Grâce à ces dispositifs, une classification de la production est possible, proposant ainsi une qualité irréprochable sur le marché. En établissant une enveloppe autour d'un point de référence dont les coordonnées (xref ; yref) seront connues, cet « étalon » permettra de comparer les autres produits et vérifier qu'ils sont compris dans cette zone d'acceptation.

L'Indice de Rendu des Couleurs : IRC

Aussi connu sous le nom de CRI (Color Rendering Index), ce critère est sans doute le plus utilisé dans le domaine de l'éclairage de nouvelles générations. Tout d'abord, essayons d'établir une définition simple de l'IRC afin de comprendre quelle est son implication dans la caractérisation des différentes sources lumineuses.

Il existe deux valeurs d'Indice de Rendu des Couleurs, Ra8 et Ra14 qui sont issues d'une moyenne des différents indices R1 à R8 ou R14 (*figure 4*) suivant la valeur souhaitée.

Si la couleur (mesurée en réflexion) de l'échantillon sous l'éclairage testé s'écarte de la couleur de l'échantillon sous l'éclairage de référence (lumière du jour), chacun des indices varie en fonction de ces différents écarts.

Ces écarts vont être ensuite moyennés pour obtenir les Ra8 et Ra14, qui seront matérialisés sur une échelle de 1 à 100.

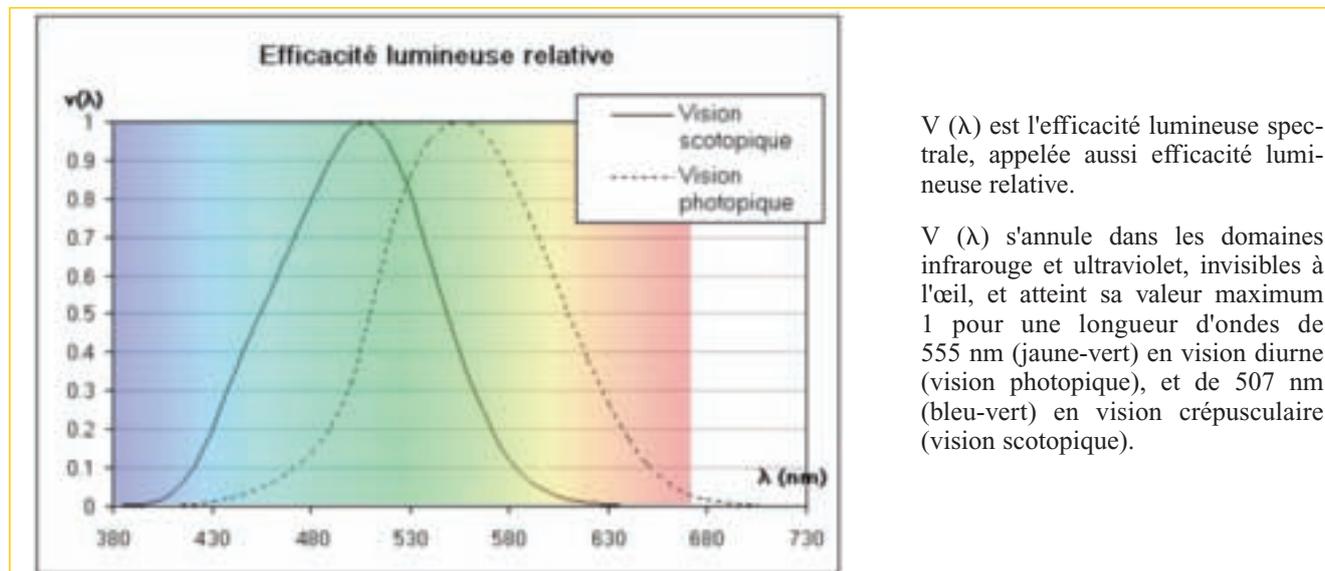
$$R_i = 100 - 4.6DE_{uv,i}$$

On constate donc que l'ensemble du spectre visible est touché par cette mesure en réflexion. La lumière du jour ayant un spectre très large (dit spectre continu), elle permet de mettre en évidence la totalité des signaux sur l'ensemble du domaine spectral.

La première conclusion à tirer est instantanée: l'IRC a été déterminé à l'aide d'une source lumineuse « parfaite », la lumière du jour, ce qui place ces valeurs à un niveau de référence très élevé. Les lampes à incandescence bien que beaucoup décriées ces derniers temps, ont un IRC proche de 100 car elles possèdent un spectre continu dans l'espace visible. En d'autres termes, elles émettent des longueurs d'onde sur l'ensemble de la plage 380 - 780 nm.

L'efficacité lumineuse spectrale

Il est indispensable d'expliquer que l'ensemble des puissances énergétiques exprimées devra être corrigée par la « réponse de l'œil ». Cette correction se décompose en deux applications: vision diurne et nocturne. En pratique, on s'aperçoit que seule la correction « diurne » est prise en compte dans les différentes réglementations,



V (λ) est l'efficacité lumineuse spectrale, appelée aussi efficacité lumineuse relative.

V (λ) s'annule dans les domaines infrarouge et ultraviolet, invisibles à l'œil, et atteint sa valeur maximum 1 pour une longueur d'ondes de 555 nm (jaune-vert) en vision diurne (vision photopique), et de 507 nm (bleu-vert) en vision crépusculaire (vision scotopique).

Figure 5. : Courbe V(λ) défini par la CIE

LEDs ECLAIRAGE DU FUTUR

même dans le cadre de l'éclairage public.

L'efficacité lumineuse spectrale est une fonction de normalisation qui exprime la

relation entre le flux lumineux perçu par l'œil humain et la puissance du rayonnement électromagnétique reçue. Concrètement, la puissance exprimée en watts (W) est une quantité intrinsèque du rayonnement, tandis que le flux exprimé en lumens (l m) dépend de la sensibilité de l'œil d'un observateur moyen, défini par la Commission Internationale de l'Éclairage (*figure 5*).

Un moyen ambitieux de tester les sources lumineuses

Probe4Light est un concentré de technologies opto-électroniques permettant d'acquérir en quelques millisecondes la décom-

position spectrale d'une source lumineuse.

Simplement connecté au bus USB d'un PC, Probe4Light mettra à votre disposition l'ensemble des données spectrales, en partant du spectre « Longueurs d'ondes vs. Intensités », pour aller jusqu'à l'ensemble des données chromatiques (x;y;CCT;CRI; Longueur d'onde pic et dominante; intensité radiométrique et photométrique, etc...).

Muni de ces différents accessoires, Probe4Light adresse un grand nombre d'applications. La sphère d'intégration de 30 mm proposée en option peut se substituer à l'option diffuseur (20 mm), ou bien laisser place à une fibre optique disposant d'une connectique SMA905.

Le cœur du système, le spectrophotomètre, conserve ces performances en reproductibilité et répétabilité, conditions indispensables dans la mesure industrielle. La décomposition spectrale donne une appréciation

des variations d'intensités sur les différentes longueurs d'ondes. On peut rapidement visualiser des pics qui auront une influence sur la température dans le cas de source à LED blanche. Le logiciel PhotonProbe qui accompagne Probe4Light offre la possibilité de configurer le matériel (résolution, temps d'intégration, soustraction ou non du bruit électronique, etc). Après cette phase essentielle, les acquisitions pourront être déclenchées à l'aide du logiciel, ou bien par une commande externe dans une version plus industrielle (VI LabView).

Toutes ces fonctionnalités donnent la possibilité d'employer ce produit dans un environnement de recherche et développement, mais surtout dans le cycle de production afin d'amener un contrôle systématique des produits.

L'ensemble des informations est disponible sur notre site web « www.majantys.com ».



Figure 6 : Probe4Light et le logiciel PhotonProbe

Utilisation des LED dans les éclairages Chirurgicaux de salle d'opération : les contraintes, les performances

Par Jean-Pierre BREYSSE, Directeur de la Recherche chez MAQUET
Tél. : 02 38 25 88 88, mail : JeanPierre.Breysse@maquet-sa.fr



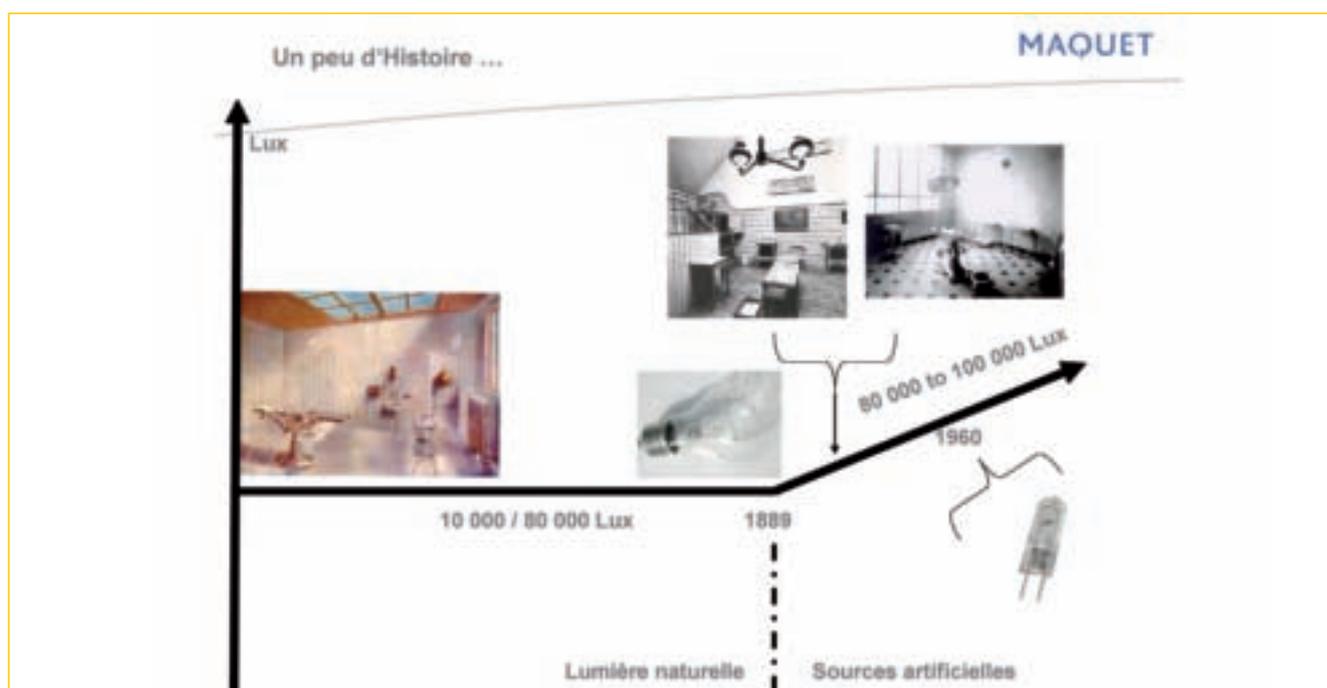
1. Présentation du contexte.

L'éclairage opératoire chirurgical est un des éléments clés du bloc opératoire. Par ses caractéristiques techniques il doit permettre d'obtenir un éclairage élevé et variable, un rayonnement minimum, un bon rendu des couleurs ainsi qu'une absence d'ombres portées.

Il assure ainsi le bon déroulement des interventions chirurgicales en contribuant au confort du chirurgien et à la sécurité du patient.

2. Un peu d'Histoire.

Avant l'invention des appareils d'éclairage opératoire actuels, le problème causé par l'éclairage de la salle d'opération relevait presque exclusivement de l'architecture de la salle. Les salles d'opération comportaient en effet un ensemble de verrières verticales et zénithales, orientées généralement plein sud afin de recueillir le maximum de lumière du jour et d'en béné-



LEDs ECLAIRAGE DU FUTUR

ficier le plus longtemps possible. L'utilisation était donc limitée puisqu'elle dépendait en premier lieu des conditions

météorologiques.

On chercha donc à compléter cette lumière naturelle par des sources lumineuses artificielles. On installa donc au plafond des projecteurs fixes dirigés

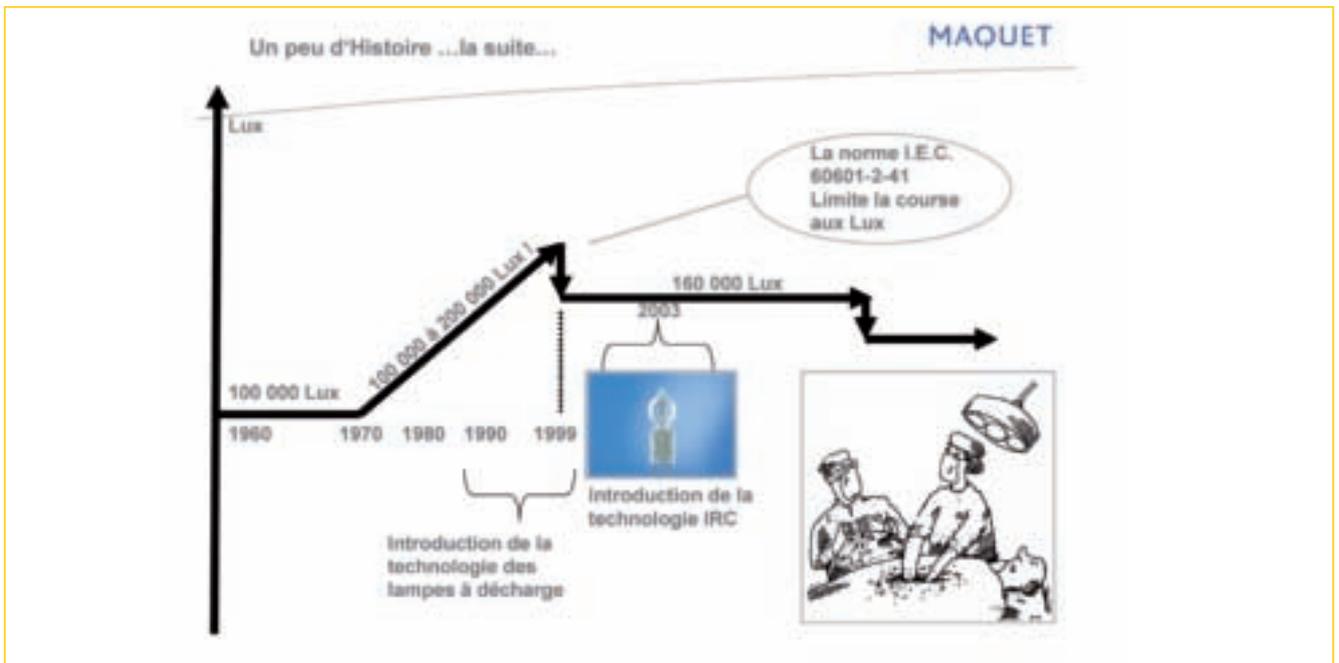
vers le centre de la table d'opération. Cette plage lumineuse était cependant imprécise, car fixe et le système produisait une augmentation de température rapidement insupportable.

C'est au environ de 1920 que fut mis au point le premier éclairage opératoire rationnel suspendu et offrant une plage lumineuse concentrée, orientable et sans ombres portées.

Vers 1960, les éclairages opératoires étaient à même de fournir entre 40 000

et 60 000 lux. Cette progression fut principalement due au perfectionnement des dispositifs optiques, à une meilleure définition de réflecteurs, au traitement des surfaces réfléchissantes et à l'étude et la fabrication de sources mieux adaptées au principe optique de l'appareil.

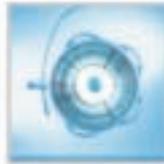
De 1965 à 1970, la tension d'alimentation de 24 Volts (V) fut généralisée et pratiquement normalisée, entraînant ainsi l'utilisation des lampes à incandescence et de sources Halogènes.



Aperçu des techniques et formes variées des éclairages opératoires :



Eclairage Majeur Annulaire à LED



Eclairage Mono Hublot à prismes et ampoules Halogène



Eclairage Multihublots à source halogène



Eclairage opératoire mineur Multihublots à source Halogène



Multihublots avec source Halogène IRC



Eclairage Majeur Annulaire ampoule à décharge



Monohublot avec source Halogène IRC



Eclairage d'examen Monohublot

POUR TRAVAILLER DANS DES CONDITIONS IDEALES : Diluer les Ombres

Optimiser le contrôle des ombres portées

- Augmenter la surface éclairante
 - Grands projecteurs : environ 2,500 cm²
 - Taille moyenne : environ 2000 cm²
- Emission de la lumière de la périphérie du projecteur
- Faisceaux divergents pour minimiser l'impact de la tête des opérateurs.



De nos jours, et grâce à ces sources, on propose désormais des éclairages de bloc opératoire pouvant atteindre plus de 100 000 lux.

3. Pour qu'un chirurgien travaille dans des conditions idéales...

Il convient d'expliquer dans un premier temps que de multiples formes existent dans le domaine de l'éclairage opératoire permettant à de nombreuses technologies de sources de lumière de

cohabiter. Mais la forme du produit (donc son esthétique) ne doit pas masquer ses vraies qualités (ni ses défauts).

• Homogénéité de la distribution de l'éclairage

L'objectif des éclairages opératoires est d'obtenir une lumière concentrée et homogène sur une surface adaptée et un profond volume.

L'étendue de la plage éclairée et la profondeur de ce champ varient suivant le diamètre de la coupole et le réglage de la focalisation.

Les tissus et les organes ayant un faible pouvoir de réflexion, il est considéré comme nécessaire, en milieu opératoire, que l'éclairage varie entre 20 000 et 100 000 lux sur une surface de 20 cm de diamètre située à une distance de un mètre du projecteur mais afin d'éviter l'éblouissement du chirurgien ainsi qu'une sensation de fatigue au niveau des yeux, l'intensité lumineuse doit être réglable (en privilégiant la qualité plutôt que la quantité d'éclairage) sachant qu'au-delà de

LEDs ECLAIRAGE DU FUTUR

120 000 lux se produit souvent un effet d'éblouissement pour l'équipe opératoire. Cet éblouissement est généralement dû à une

mauvaise répartition de la lumière sur l'ensemble de la surface du champ opératoire. Les LED par superposition de multiples faisceaux individuels améliorent cette distribution de lumière en surface et en profondeur.

• Réduction des ombres

Les rayons étant désormais multipliés, ils se dirigent vers le champ opératoire par diverses incidences. Si un obstacle (mains et/ou épaules) s'intercale entre le projecteur et le champ opératoire, l'ombre alors introduite dans la zone de travail sera diluée par les rayons provenant d'incidences différentes, qui « compensent » ainsi l'absence des rayons interrompus.

La surface éclairante jouant un rôle important dans la dilution des ombres,

force est de constater que les LED permettent désormais une plus grande souplesse dans la conception géométrique des projecteurs.

• Température dans la plaie minimum

L'intérêt d'utiliser des éclairages spécifiques en bloc opératoire réside aussi dans le fait de ne pas dessécher les tissus du patient à cause d'un dégagement calorifique excessif.

En effet, toute lumière obtenue à partir d'ampoules halogène est accompagnée

MAQUET

POUR TRAVAILLER DANS DES CONDITIONS IDEALES :
Diluer les Ombres

Optimiser le contrôle des ombres portées

- Un projecteur Symétrique (Plus besoin de réfléchir à la position de la tête en dessous de la surface éclairante)
- Grand nombre de sources individuelles
- Asservissement de la surface éclairante à la position du chirurgien.

Boosted LEDs
+10%



Reduced Lighting

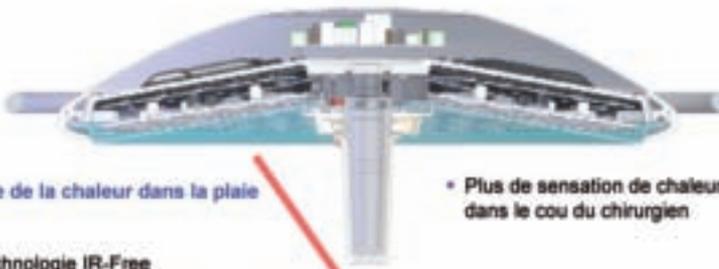


MAQUET

POUR TRAVAILLER DANS DES CONDITIONS IDEALES :
Diminuer la température dans la plaie

Contrôle de la chaleur dans la plaie

- LED : Technologie IR-Free
- Faible Radiant énergétique: $\leq 4 \text{ mW/m}^2/\text{lx}$
20% plus bas que la technologie Halogène traditionnelle



- Plus de sensation de chaleur dans le cou du chirurgien.



POUR TRAVAILLER DANS DES CONDITIONS IDEALES :
Diminuer la température de contact

- Distribuer la chaleur par convection et conduction
- Augmenter le volume interne pour améliorer la convection

Contrôle de la chaleur dans le projecteur



POUR TRAVAILLER DANS DES CONDITIONS IDEALES :
Contrôler l'IRC et choisir la bonne température de couleur sans la faire changer

3500 K



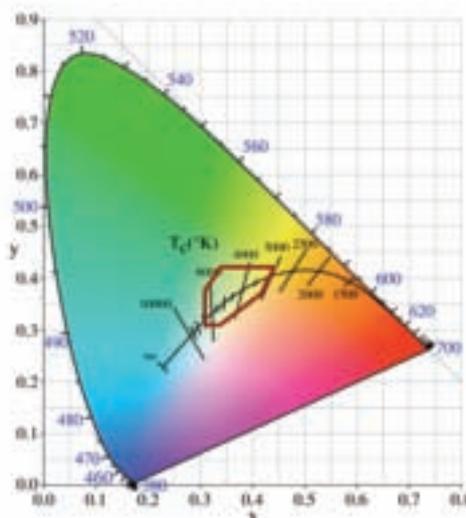
4500 K



POUR TRAVAILLER DANS DES CONDITIONS IDEALES :
Contrôler l'IRC et les coordonnées chromatiques

Les contraintes sont données par les normes et le bon sens

- IRC >85 normativement
- Le chirurgien veut IRC = 93
- Les coordonnées Chromatiques sont imposées par la norme IEC



LEDs ECLAIRAGE DU FUTUR

d'un rayonnement Infra Rouge (IR) important. On utilise souvent des filtres ou miroir « dichroïques » pour limiter cet échauffement dans la plaie opératoire.

• *Température de contact réduite*

Les rayonnements IR piégés dans la coupole et l'efficacité lumineuse (Lum/Watt) encore limité des sources de lumière provoquent un échauffement de la coupole.

Les LED résolvent en partie ces difficultés car elles émettent peu d'Infrarouge mais sont toujours consommatrices d'énergie contraire-

ment à ce que beaucoup d'utilisateurs chirurgiens pourraient penser.

• *Température de couleur adaptée*

Il est tout aussi primordial pour le chirurgien de bien distinguer les couleurs des tissus opérés. Les chirurgiens, suivant leurs origines et leurs « écoles », préfèrent opérer avec des températures de couleur hautes (4500 K) ou basses (3500 K).

Pour ce qui est de l'IRC celui-ci doit se situer autour de 93, voire de 95 pour les plus performants. Même si son minimum doit être normativement simplement supérieur à 85 .

• *Manipulation et Durée de vie des sources de lumière*

Pour assurer le bon déroulement des interventions, l'éclairage doit être

manipulé sans effort et de façon précise mais il doit aussi rester en permanence opérationnel.

En effet la stabilité en position doit être absolue, car un appareil qui dérive en raison d'un mauvais équilibrage compensateur rend impossible le travail du chirurgien. La position des coupoles est stabilisée grâce à un système de frein situé dans les articulations des suspensions. Les LED, en la matière, permettent de réduire le poids des projecteurs et contribuent à cette augmentation du confort de l'équipe.

En outre, les LED, grâce à leur durée de vie plus importante, représentent un avantage utilisateur certain quand on les compare aux générations précédentes d'éclairages opératoires à sources Halogènes.

MAQUET

EVITER LES INTERRUPTIONS DE SERVICE

Augmenter la durée de vie des Sources

- Les LEDs durent plus longtemps: 20 000 heures, si l'on limite leur température
 - 20 Fois plus que les ampoules Halogènes
 - 15 ans d'utilisation sans consommables



Halogen bulb technology	1,000 h
Discharge bulb technology	5,000 h
Traditional LED technology	20,000 h

4. Conclusion

Depuis les voutes éclairantes, l'éclairage opératoire a connu des révolutions technologique importantes rythmées par l'évolution des sources de lumière.

Le marché actuel propose des dispositifs dont l'éclairage est élevé et variable, ayant un rayonnement calorifique moindre, un bon rendu des couleurs et une réduction notable des ombres portées.

Mais les progrès en ce qui concerne ces éclairages sont loin d'être terminés.

En effet, les sources halogènes sont peu à peu détrônées par les LED qui percent le marché avec des avantages certains mais aussi des contraintes qu'il ne faut pas ignorer sous peine d'affecter non seulement la performance mais aussi la sécurité des dispositifs proposés.

Solutions lumière Lightex® en fibres optiques tissées

Par Emmanuel DEFLIN,

Directeur Développement chez BROCHIER TECHNOLOGIES SA

Tél. : 04 37 56 85 62, mail : emmanuel.deflin@brochiertechnologies.com

Le Groupe Brochier Soieries a été créé en 1890 à Lyon, et travaille notamment pour la Haute Couture, domaine dans lequel il a développé des tissus très innovants grâce à ses compétences dans le domaine du tissage Jacquard. En 1999, il réalise pour **Olivier Lapidus** le premier tissu lumineux pour une robe de mariée. Le Groupe crée alors l'entité **Brochier Technologies** pour développer les **tissus techniques lumineux en fibres optiques**.

Brochier Technologies dispose d'un outil de production basé dans la région Rhône Alpes. La mise au point de nouvelles solutions techniques se fait au sein de son laboratoire R&D et en collaboration avec différents partenaires, grâce à une équipe technique pluridisciplinaire ayant des compétences fortes dans les domaines textiles, électroniques, optiques, mécaniques et chimiques.

Aujourd'hui détenteur de plusieurs brevets, **Brochier Technologies** poursuit une politique active de propriété industrielle.

Technologie LIGHTEX(R) : solutions de tissus de fibres optiques pour une diffusion optimisée et inédite de la lumière LEDs.

Brochier Technologies développe des solutions de tissage de fibres optiques pour des applications lumière dans les domaines de l'éclairage, de la communication, de la sécurité, de la dépollution et du médical.

La technologie Lightex® est un principe de tissage de fibres optiques à éclairage latéral connectées à des diodes électroluminescentes et permettant de réaliser des surfaces lumineuses souples ou rigides à très faibles encombrements, basse consommation et durée de vie élevée (*figure 1*).

Les solutions lumière **Lightex®** sont protégées par plusieurs brevets internationaux.

La réalisation d'un tissu éclairant implique 5 étapes :

- le tissage de fibres optiques,
- le traitement de surface des fibres optiques pour l'éclairage latéral,
- d'autres traitements de surface et assemblage de matériaux,
- la connexion des fibres aux sources de lumière (LED),
- le couplage de l'électronique de commande et de l'alimentation électrique.

Lightex® fournit des solutions lumières inédites et performantes :

- répartition / diffusion de la lumière sur des surfaces variées (largeur 3m),
- guide à très faible encombrement et poids (ép. < 1mm ; Poids < 500 g/m²),
- matériau souple: réalisation de sur-

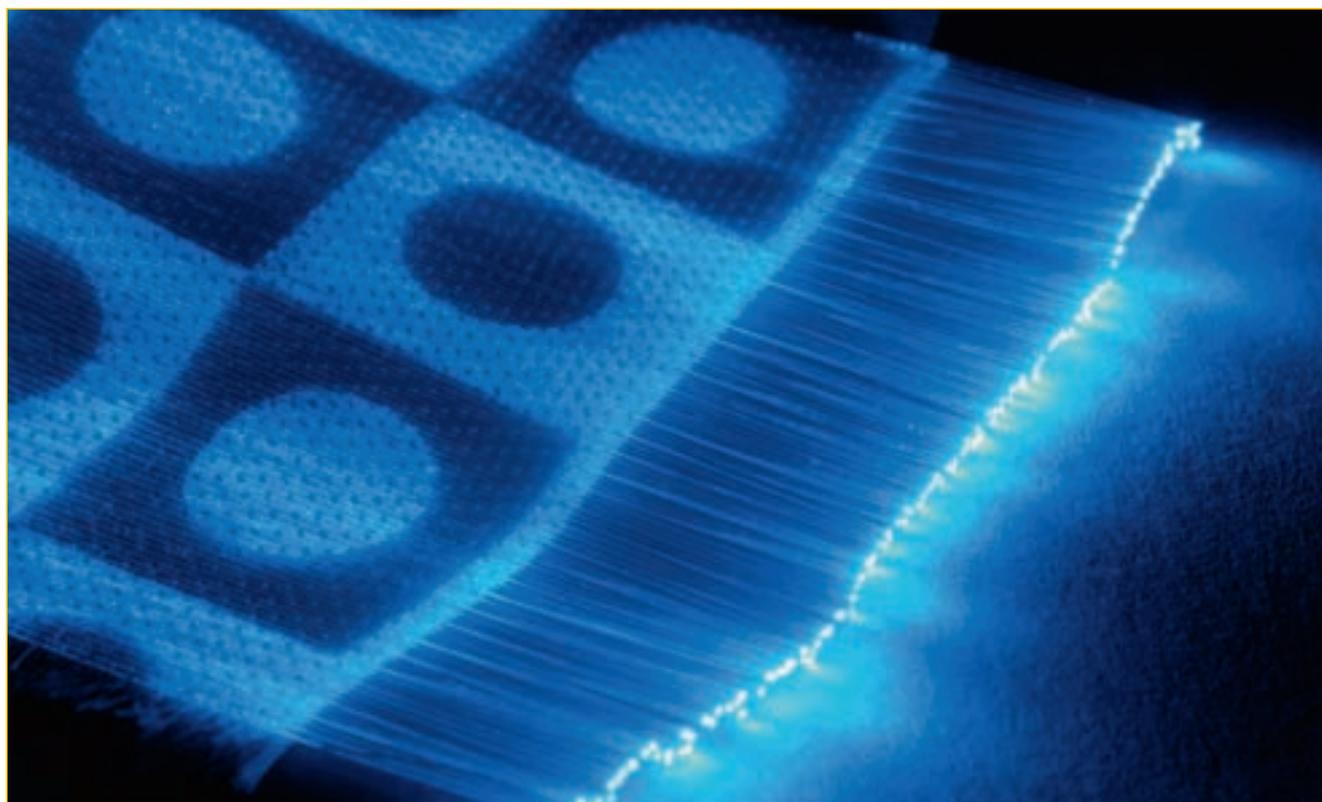


Figure 1 : Tissu Lightex à motifs (crédits Aurélie Foussard)

LEDs ECLAIRAGE DU FUTUR

faces flexible ou courbes,

- source de lumière déportée,
- complexage possible avec d'autres matériaux (tôles, verre, résines),

- aspect textile: motifs, aspect sensoriel inédit.

Exemples d'applications

Transport ferroviaire

La qualité de l'éclairage à bord des trains est un élément fondamental du confort des passagers. Pour créer des ambiances intérieures suscitant bien-être et sérénité, Alstom Transport et Brochier Technologies développent en partenariat exclusif de nouvelles formes de sources de lumière (figure 2). Plusieurs combinaisons techniques intégrant la technologie Lightex® ont été mises au point pour Alstom Transport dans le domaine ferroviaire. Ces innovations offrent de nombreuses perspectives d'applications en permettant de rendre lumineux la quasi-totalité des aménagements intérieurs et de mettre en relief certaines zones comme les plafonds, les cloisons, les portebagages, les sièges, ainsi que les zones d'intercirculation.

Transport aérien

Les problématiques « lumière » dans le domaine aéronautique sont en grande partie liées à l'ambiance et à la qualité de la lumière ainsi qu'à des notions d'encombrement, de poids, de consommation et de maintenance. Brochier Technologies développe actuellement avec ses partenaires des panneaux éclairants utilisant la technologie Lightex®, permettant de répondre à ces différentes problématiques.

Une maquette d'intérieur d'avion à l'échelle 1 présente déjà les fonctionnalités suivantes :

- éclairage d'ambiance sur éléments de cloisons pour le confort de passagers,
- numérotation dynamique des places intégrées aux sièges,
- gestion électronique centralisée et lumière adaptative des différents ensembles.

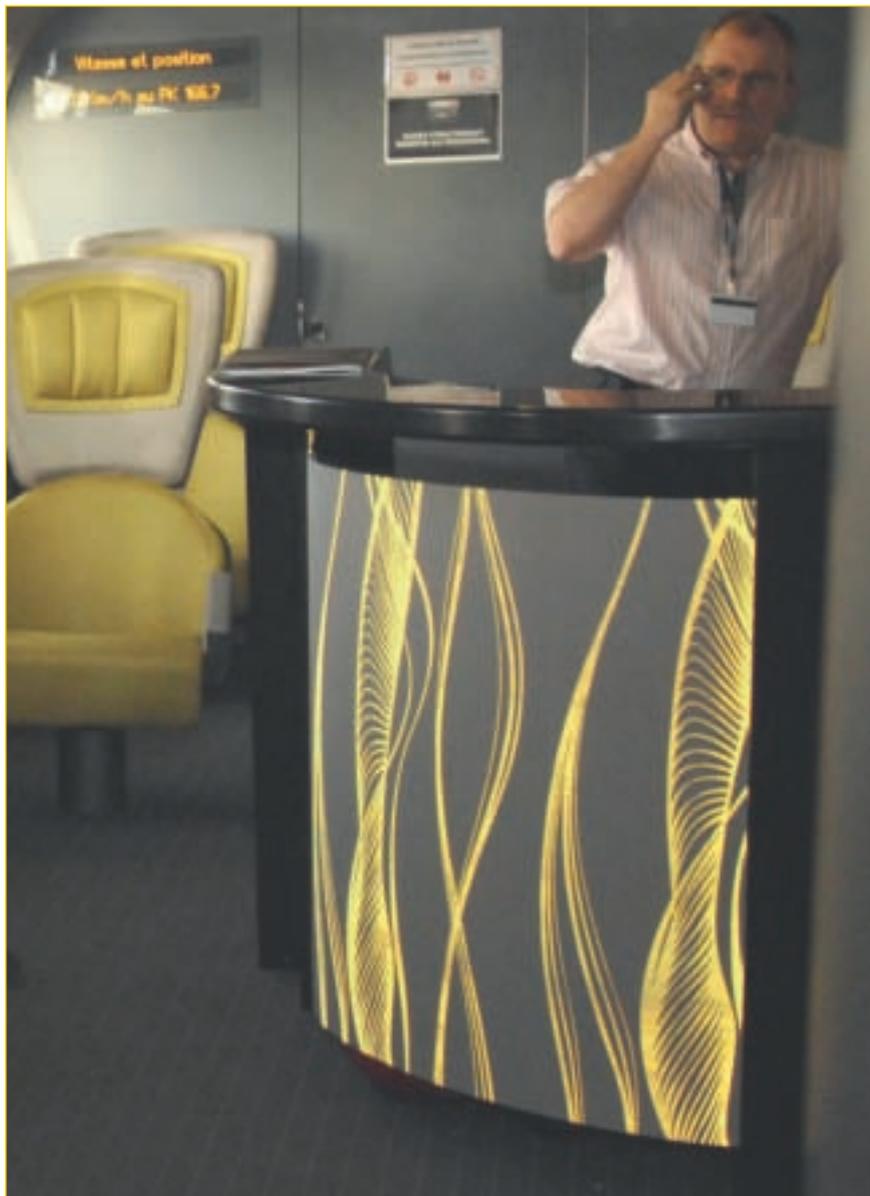


Figure 2 : Panneau d'ambiance dans le bar d'un TGV

Automobile

Brochier Technologies a développé en 2003 le premier tissu lumineux intégré dans l'automobile pour améliorer le confort des passagers. Aujourd'hui plusieurs grandes marques automobiles ont fait appel à la technologie Lightex® pour développer des solutions d'ambiance, de décor et de sécurité.

Pour les accompagner dans leur voyage, les passagers ont la possibilité d'opter entre différentes mises en scène qui métamorphosent l'habitacle depuis le sol jusqu'au pavillon. Le mobilier sert ainsi de support à des jeux de lumières transmis grâce aux fibres optiques et vidéo-projecteurs insérés dans la moquette et les garnisages des accoudoirs.

Bâtiment

L'intégration de la technologie Lightex® dans l'architecture ouvre la voie à de nombreuses applications, telles que l'éclairage plat de grande surface, la création de parois en verre lumineux pour l'intérieur ou l'extérieur (technologie brevetée), et pour des applications au sol, au plafond et sur des cloisons. La technologie Lightex® répond aux normes feu / fumée et permet d'envisager la réalisation de structures lumineuses textiles tendues ou de complexes rigides plans ou courbes (figure 3).

Plusieurs réalisations ont mis en valeur le potentiel « grandes surfaces » qu'offre la technologie Lightex® :

- surfaces avec éclairage uniforme jusqu'à plusieurs dizaines de m²,

- structures très légères et extra-plates.
- sources de lumières intégrées et faible consommation électrique.

Publicité

Brochier Technologies développe depuis 2004 en partenariat exclusif avec la société PRISMAFLEX INTERNATIONAL des solutions de rétro-éclairage de grandes surfaces pour des applications publicitaires.

La technologie des tissus éclairants Lightex® permet de remplacer les solutions de rétro-éclairage existantes à base de tubes fluorescents, en améliorant radicalement l'homogénéité de la lumière, ainsi que les problèmes d'encombrements, de maintenance, de consommation et durée de vie.

De nouvelles perspectives se présentent par ailleurs sur les possibilités design et gestion dynamique et intelligente de l'affichage.

Communication

En collaboration avec France Télécom R&D, Brochier Technologies a réalisé le premier « écran textile » (technologie brevetée). Cet écran a reçu le prix

de l'innovation lors du salon AVAN-TEX à Francfort en 2002.

Un des principes de la technologie Lightex® est de pouvoir réaliser des surfaces à éclairage dynamique « par zones » grâce à la combinaison du tissage Jacquard, permettant de créer des réseaux de fibres optiques, avec plusieurs sources de lumières connectées de façon indépendantes.

Une gestion électronique des LED et un dispositif de contrôle par PC ou mobile permet d'aboutir à des surfaces lumineuses actives pouvant afficher du contenu graphique dynamique et renouvelable.

Sécurité

La technologie Lightex® permet d'intégrer des dispositifs éclairants sur des produits spéciaux, comme des accessoires vestimentaires ou tout type de support nécessitant des formes courbes, un poids et des encombrements très réduits ou encore des contraintes mécaniques importantes.

Les systèmes de lumière Lightex® sont particulièrement adaptés pour des vêtements de sécurité, dans des

contextes d'obscurité où la visibilité et la communication sont deux enjeux majeurs.

Santé

L'utilisation du tissu Lightex® dans le domaine de la santé ouvre de nombreuses perspectives d'applications, dont la photothérapie.

En modulant les différents paramètres lumière - intensité, longueur d'onde, mélange des couleurs et répartition de l'éclairage -, les tissus lumineux peuvent contribuer à résoudre les problèmes liés au sommeil et à la dépression saisonnière.

Environnement

La technologie UVtex® est une solution de dépollution par photocatalyse utilisant les tissus en fibres optiques et la lumière UV (technologie brevetée).

En combinant le rayonnement UV distribué par le tissu en fibres optiques avec du TiO₂, la technologie UVtex® agit sur la dépollution de l'air, de l'eau et la destruction des odeurs, répondant ainsi à de nombreuses problématiques environnementales actuelles.

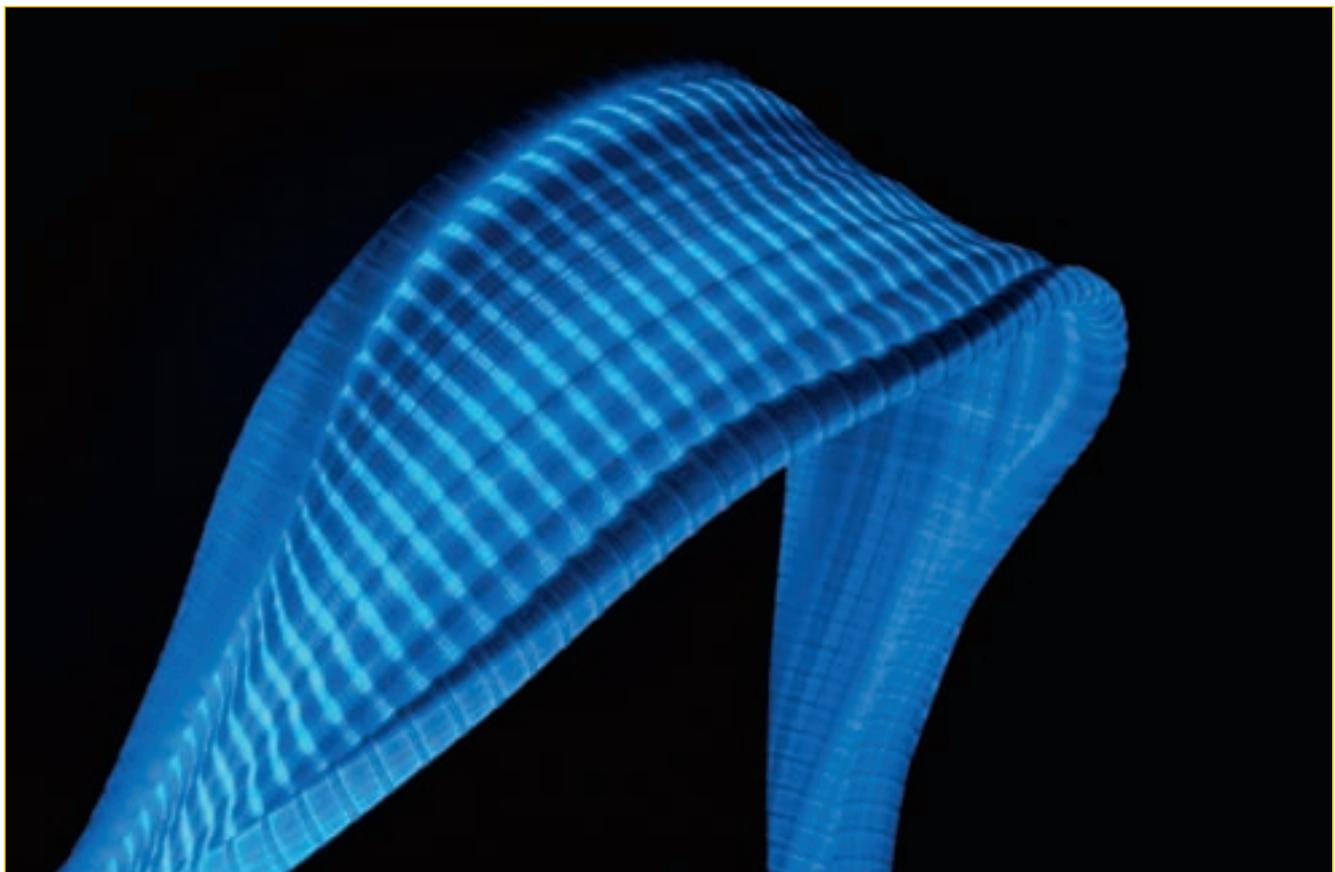


Figure 3 : Eclairage courbe Lightex (crédits Aurélie Foussard)

Les LEDs : L'éclairage du futur ? Point de vue de l'éclairagiste

Par *Christophe MARTY, Consultant Associé, Ingénieur ITPE / Architecte DPLG - Espace Carco, 1 rue Francis Carco - 69120 Vaulx en velin*
Tél. : 04 37 45 29 29, - marty.ingelux@espace-carco.com

Rares sont les projets d'éclairage où le maître d'ouvrage ne pose pas la question « y aura-t-il des LEDs dans mon projet ? » ou « et pourquoi pas des LEDs à la place ? ». La LED a désormais dépassé le monde du signal lumineux pour entrer de plain-pied dans celui de l'éclairage. La médiatisation de l'objet technologique qui doit révolutionner l'éclairage est telle que la plupart des acteurs des projets de construction en ont entendu parler et poussent à son utilisation.

Qu'en est-il vraiment ? Quelles sont les « bonnes » raisons pour remplacer un éclairage fluorescent par un éclairage à LEDs ? Si de nouvelles applications sont désormais permises par les LEDs, d'autres restent hors de portée des luminaires à LEDs présents sur le marché, et ce pour de multiples raisons qui ramènent en général le maître d'ouvrage à un avis plus éclairé sur la source, en attendant les prochains progrès annoncés par les constructeurs.

Les acteurs de la construction et la LED

Les maîtres d'ouvrage en bâtiment ont entendu dire que la LED était l'éclairage du futur et que « ça ne consomme rien ». Ils demandent (souvent) s'il y aura des LEDs dans leur projet. Certains d'entre eux testent actuellement des solutions de substitution par LEDs. Certaines réalisations ont été des succès comme dans les sanitaires, d'autres ont abouti à des solutions négatives comme l'éclairage de couloirs.

C'est dans la mise en valeur de bâtiments que l'éclairage à LED s'est imposé.

Les architectes sont souvent mieux informés sur les avantages et inconvénients des LEDs. Ils sont attirés par le peu d'encombrement des LEDs (design) et les possibilités de la gestion de la lumière.

Les bureaux d'études accompagnent le plus souvent les demandes des autres acteurs sur la LED. Par défaut, ils utili-

sent les solutions « habituelles » (carrés fluos, spots, etc.). Ils savent utiliser la LED, mais en général ne sont pas moteurs. Néanmoins certains bureaux d'études plus en pointe, cherchent l'innovation en proposant des solutions à base de LEDs.

La communication autour de la LED

Les points forts généralement mis en avant autour de la LED sont :

- la durée de vie de 100 000 heures,
- la très faible consommation.

Les faiblesses souvent reprochées (à tort ou à raison) à cette technologie portent sur :

- la mauvaise qualité de lumière,
- la teinte très froide,

- la mauvaise qualité des LEDs chinoises,

- la difficulté à retrouver une LED équivalente en cas de casse ou en cas de remplacement dans quelques années.

L'éclairagiste face aux demandes d'utilisation de la LED

Si on suit la demande générale, la LED risque d'être utilisée dans des cas dans lesquels son avantage reste certain comparé à d'autres solutions éprouvées, par exemple, le remplacement de tubes fluorescents dans les parkings.

Dans le cas de l'éclairage de bureau, la tendance actuelle est de remplacer les tubes fluorescents par des LEDs (*photo 1*). Les avantages avancés sont la réduction de la consommation et de

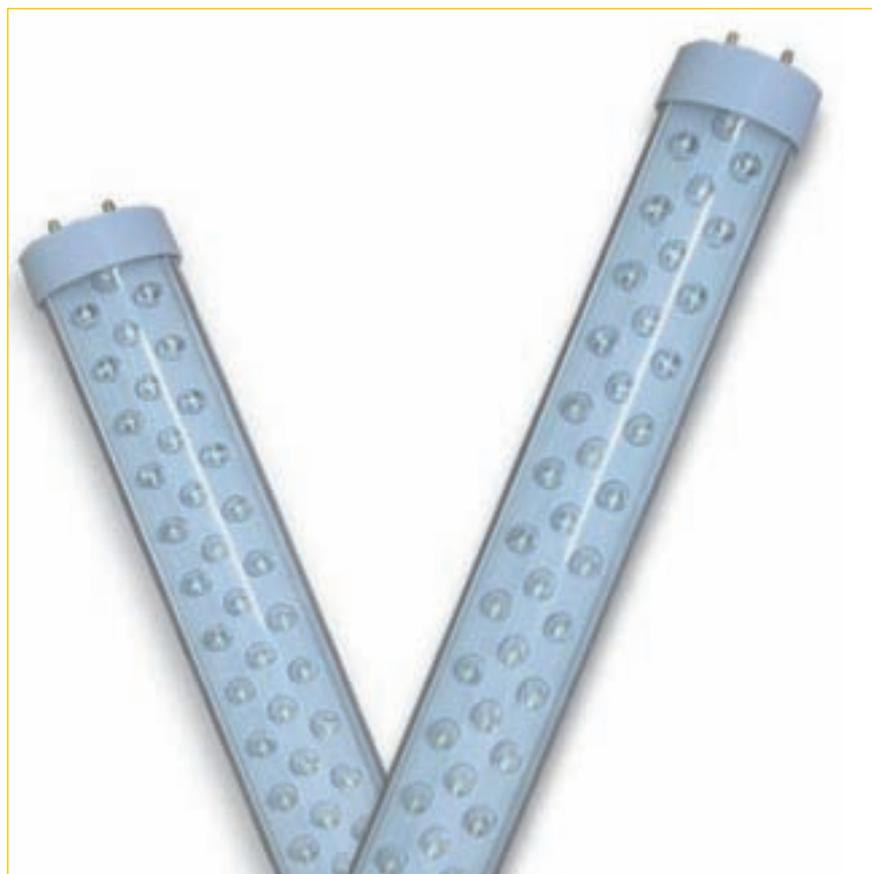


Photo 1 : Exemple de tubes à LED en remplacement de tubes fluorescents (source : site Internet : www.joliet-europe.com)

la maintenance. Aujourd'hui on sait éclairer à 7 watts/m² avec des tubes fluorescents 55 watts, en direct-indirect avec gradation... La durée de vie des tubes fluorescents est de 20 000 heures, ce qui conduit à une maintenance de tous les cinq ans seulement. La LED n'offre pas encore de telles caractéristiques mais n'en n'est pas très loin. A ce jour les sources existantes gardent encore un avantage dans de nombreuses configurations. L'argumentaire portant sur la réduction de consommation et la durée de vie est ainsi souvent galvaudé.

L'éclairagiste est garant d'un résultat. De nombreux critères entrent en jeu pour faire une installation de qualité. Parmi les critères techniques, citons : l'efficacité énergétique (la consommation y compris ballast //le flux), la durée de vie, l'angle d'ouverture, la gradation possible / la gestion centralisée. Des critères de qualité de lumière interviennent aussi : la température de couleur proximale (teinte), l'indice de rendu de couleur, la luminance (dans un luminaire), la cohérence de couleur selon l'angle (cercles colorés). Ce sont ces critères qui sont intuitivement jugés par les utilisateurs, sans connaître leurs noms techniques.

Le projet PACTE LED

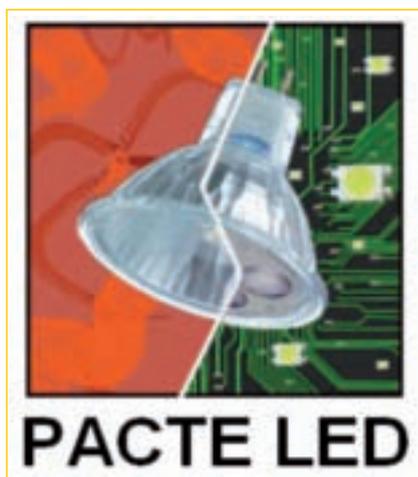


Photo 2 : le logo PACTE LED + Logo ADEME

Ce programme (*photo 2*) vise à développer des solutions d'éclairage à base de diodes électroluminescentes (LED) pouvant se substituer aux spots halogènes et ainsi diviser par 4 la consommation électrique pour un flux lumineux identique. Quelque 59 millions de lampes sont concernées, dont le remplacement économiserait 1,4 TWh d'électricité annuellement, soit



Photo 3 : Eclairage à LEDs bleues, en substitution d'un halogène dichroïque

167 000 tonnes de CO₂. Le projet doit permettre d'améliorer les performances des produits de substitution à LED dans tous les domaines (efficacité énergétique, qualité d'éclairage, compatibilité avec les équipements existants, durée de vie, prix...) et de s'assurer de la satisfaction des utilisateurs avant la mise sur le marché. Le Pacte LED est porté par un consortium de scientifiques et d'experts à même de relever les nombreux défis technologiques, regroupant Philips France, l'ENTPE-CNRS, le CEA, le LNE et le

CSTB, coordonnés par le bureau d'étude Ingelux.

Le PACTE LED est le résultat des constats suivants : Les utilisateurs sont mal informés et souvent victimes de la communication. Le remplacement des sources existantes par les LEDs est parfois catastrophique. Par exemple, les expériences vécues de remplacement de lampes TBT halogènes par des LEDs se sont révélées peu convaincantes : LED bleue voire à changement de couleur (*photo 3*), flux 10 fois infé-



Photo 4 : catalogue Philips, luminaire Ledline

LEDs ECLAIRAGE DU FUTUR

rieur (Lampe LED 70 lm contre plus de 400 lm pour une 35 W halogène), lampe non gradable sur une installation réglable,

etc.

On ne veut pas rejouer l'histoire de la fluocompacte, dont beaucoup d'utilisateurs pensent encore qu'elle est blafarde, qu'elle est éblouissante et qu'elle met du temps à s'allumer alors que ces questions sont aujourd'hui résolues.

Les objectifs du pacte LED est de développer une LED de remplacement de dichroïque 20 et 35W de qualité, avec consommation divisée par 4, de la tester de façon poussée en laboratoire et sur sites avec utilisateurs et de délivrer 10 000 lampes répondant aux critères de substitution.

L'ADEME ne soutiendra officiellement les lampes de substitution qu'à ces conditions de qualité, pour que les utilisateurs n'aient pas de mauvaises expériences et pour ne pas ralentir l'utilisation de ces sources dans le futur.

Le point de vue de l'éclairagiste

La LED présente de multiples avantages sur d'autres sources : dimension réduite, intensité, puissance du luminaire adaptable au projet, gestion (gradation/ couleurs...).

Ces avantages rendent l'utilisation de la LED « évidente » dans certains cas (*Photo 4*).

Dans le cas d'une bibliothèque (*photos 5*), on a besoin de peu de lumière, proche des livres, avec un éclairage linéaire. Les rubans de LEDs est la seule solution, les tubes fluorescents étant trop puissants.

Dans le métro (*photo 6*), la RATP souhaite réaliser l'éclairage architectural de surfaces, ce qui implique l'utilisation de luminaires extra plats. La solution est d'utiliser des éclairages par tranches de LEDs, d'épaisseur d'environ 2,5 cm. La partie source sera remplaçable indépendamment du reste du luminaire. La puissance sera ajustée en conception suivant les besoins. Lors de la maintenance et le recyclage des sources lumineuses, si le rendement des LEDs a été amélioré, on pourra remplacer les anciennes LEDs par des nouvelles moins puissantes.

Dans la salle du conseil de l'Hôtel de région de Rhône Alpes (*photo 7*), il avait été exprimé le souhait de mettre en scène des points lumineux avec possibilité d'ajustement de l'éclairage selon l'activité. Des éclairages par spots LEDs gradables permettent de créer le point lumineux sans utiliser de lampe halogène. Le downlight par lampe halogène aurait été trop volumineux.

L'exposition universelle de Shanghai est l'occasion de mettre en valeur les meilleures utilisations des LEDs en zone urbaine : éclairage urbain grada-

ble pour piétons, besoin de gradation rapide pour lancer un show lumière, éclairage de veille, éclairage d'un bandeau lumineux au sol pour malvoyants, personnes âgées, sans fuite de lumière sur les zones de projections d'images

Aujourd'hui on se penche sur l'utilisation des LEDs dans l'habitat, notamment dans les cuisines et les salles de bain. On tente de déterminer l'adéquation entre économie d'énergie et confort. D'autres pistes prospectives visent à alimenter les LEDs à partir de cellules photovoltaïques.

Le futur de l'éclairage : Les LEDs, les OLEDs

Les LEDs doivent surtout être utilisées différemment des autres sources, car dans de nombreux cas elles ne sont pas forcément compétitives à ce jour. L'automobile l'a vite compris, avec les feux de position et le signal de freinage : on fait des lignes, on utilise des points.

Pour faire des surfaces, les OLEDs vont compléter les LEDs, ce qui ouvrira de nouvelles perspectives. On peut envisager des voitures sans phares avec des surfaces éclairantes ou de signalisation par exemple..

Les caractéristiques des LEDs ouvrent un champ d'applications nouvelles : luminosité des clignotants proportionnelle à la lumière ambiante par exemple, éclairage dynamique pour attirer l'attention ou expliciter une intention, possibilités d'éclairages chromatiques.



Photos 5 : Simulation numérique d'une bibliothèque



Photo 6 : Eclairage station RER à l'étude, Berger & Anziutti architectes



Photo 7 : salle de délibération de l'Hôtel de région Rhône Alpes (en chantier), C.de Portzamparc

Conclusion

La LED est encore en concurrence avec les sources traditionnelles, mais il va y avoir un passage vers cette source lorsque l'efficacité lumineuse et la qualité de lumière sera concluante. Les LEDs et OLEDs ouvrent de nouvelles voies pour l'éclairage : nouvelles façons d'éclairer, nouvelle façon de penser l'éclairage qui démarre. Les éclairagistes ont un rôle important à jouer dans ces nouvelles utilisations, avec des interventions dans de multiples domaines, même surprenants (tunnels de passage de faunes sous les autoroutes..). La qualité de lumière est le point à surveiller pour ne pas gréver la pénétration de ces nouvelles technologies dans le futur.

Les LEDs à nanofils

Alexandre Lagrange - Responsable Thématique Eclairage CEA-LETI-MINATEC - 17 avenue des Martyrs, 38054 Grenoble Cedex 9
Tél. : 04 38 78 91 35 - Alexandre.lagrange@cea.fr

L'arrivée des LED dans le domaine de l'éclairage datent de l'apparition des technologies de LED bleues de forte puissance. En effet, ces LEDs ont permis de générer de la lumière blanche par l'utilisation de luminophores. Les luminophores sont des cristaux capables d'absorber de la lumière de courte longueur d'onde et de réémettre de la lumière à une longueur d'onde plus grande (décale vers le rouge). Ce processus n'est pas possible dans l'autre sens (décale vers le bleu) pour des raisons énergétiques.

La technologie des LEDs bleues repose sur un matériau semi-conducteur, le nitrure de gallium (GaN) et ses alliages avec de l'Aluminium ou de l'Indium. Ce sont les propriétés optoélectroniques et cristallines de ce matériau qui permettent de réaliser des composants de puissance, à même de fournir assez de flux pour une fonction d'éclairage.

Analysons les pistes d'amélioration possibles des LEDs pour l'éclairage. Elles sont guidées par quatre paramètres :

1. l'efficacité lumineuse,
2. la colorimétrie,
3. le coût,
4. la gestion thermique.

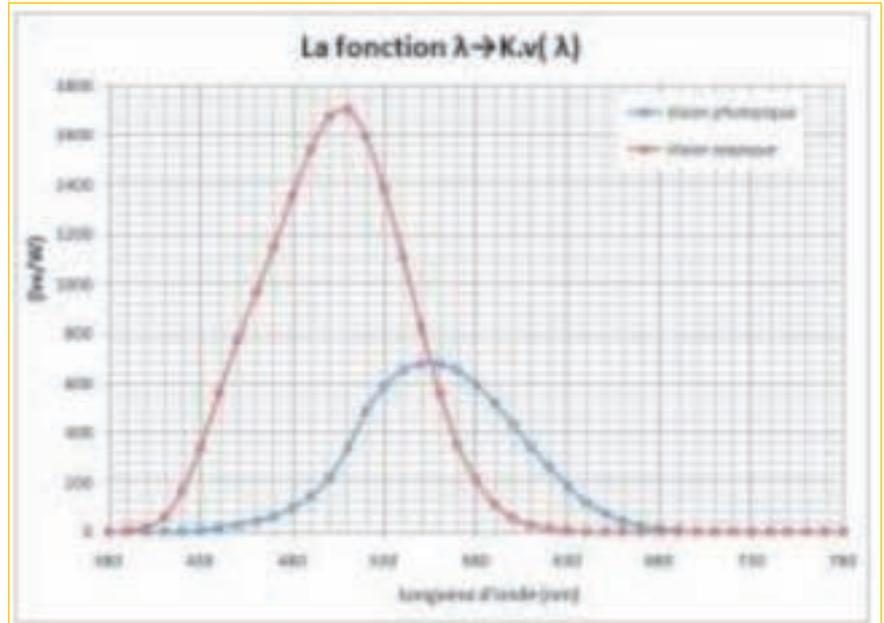


Figure 1: courbe de sensibilité de l'oeil en visions photopique (de jour) et scotopique (de nuit). Les pics de sensibilité sont de 684 lm/W pour la vision photopique et de 1700 lm/W en vision scotopique. Source Wikipédia.

Mais ces axes sont corrélés. L'efficacité lumineuse dépendant de la couleur, un blanc chaud est moins efficace qu'un blanc froid. De même l'efficacité dépend de la température, et sa gestion a un impact sur le coût du composant.

1. Efficacité lumineuse et couleur.

Ces deux notions ne peuvent pas être distinguées. L'efficacité se chiffre en lumens (lm) qui est la puissance lumineuse visible. Or la réponse de l'œil

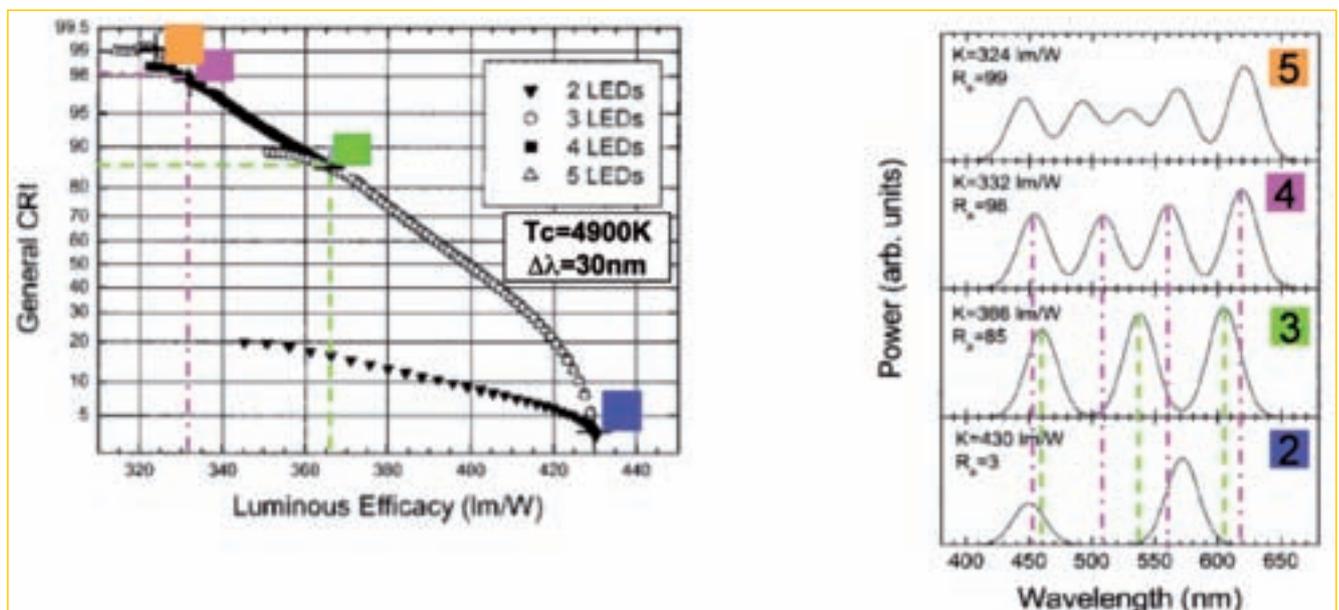


Figure 2 : Corrélation entre l'efficacité lumineuse et l'indice de rendu des couleurs (Zakauska 2002).

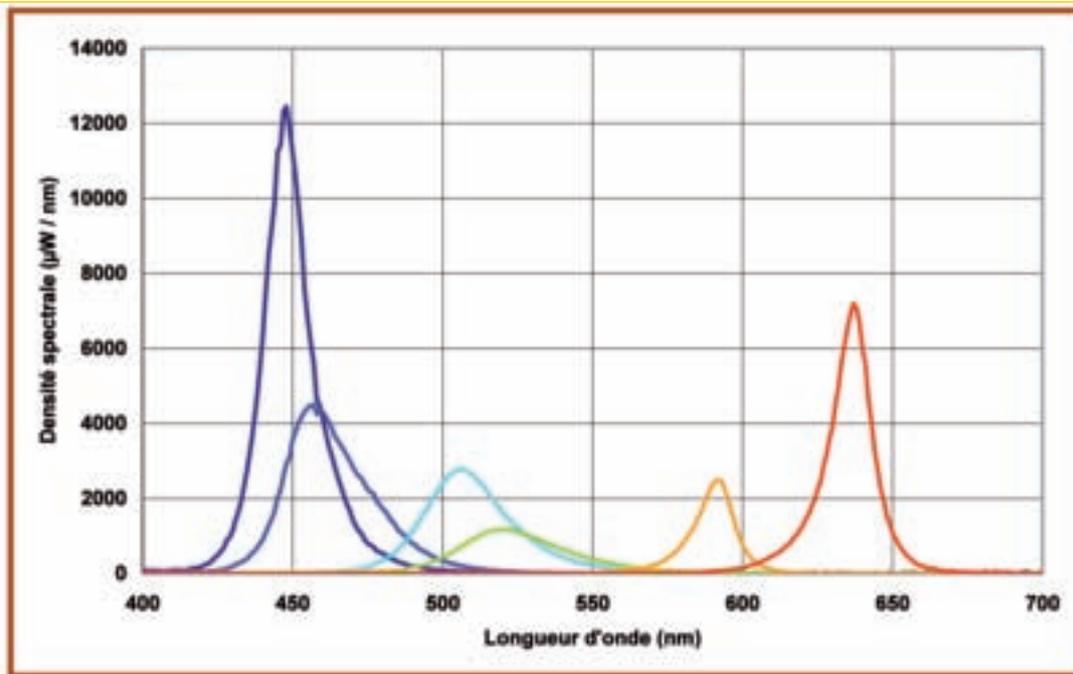


Figure 3 : Efficacités énergétiques mesurées sur un ensemble de LED de différentes couleurs à consommation électrique équivalentes. On voit bien un minimum autour de 550 nm. (Mesures Minatec-Cea-Leti, Patrick Mottier).

n'est pas uniforme sur le visible. Il est constitué de cônes et de bâtonnets. Les cônes permettent la vision de la couleur dans le domaine de 400 à 700 nm environ avec un pic à 555 nm pouvant atteindre 684 lm/W. Ce pic correspond au pic d'émission du soleil, corps noir dont la température de surface est de 6000 K (Figure 1).

Ici nous parlons de puissance optique transportée par les photons. On conçoit aisément que selon la distribution spectrale de puissance d'un flux lumineux, la puissance visible exprimée en lm peut varier.

Les cônes sont répartis en trois catégories selon leur domaine de sensibilité : rouge, verte ou bleue. Pour susciter une perception blanche, il suffit, en principe de stimuler les trois types de cônes de manière identique à une source de lumière blanche. C'est ainsi que fonctionnent les afficheurs et écrans qui sont formés de trois émetteurs rouge, vert et bleu. C'est suffisant car la lumière est émise directement vers les récepteurs de l'oeil. On définit d'ailleurs une température de couleur, en référence à la température du corps noir qui produit la même perception.

Cependant, dans une application d'éclairage, il faut tenir compte de la lumière qui nous est renvoyée par les objets éclairés. Or ceux-ci renvoient différemment la lumière selon la longueur d'onde considérée, et des

réponses caractéristiques de ces objets peuvent se situer « entre » les couleurs d'excitation. C'est pourquoi la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) a établi un indice de rendu des couleurs (IRC) sur la base de 8 puis 14 échantillons de référence. L'IRC de la lumière solaire est de 100, il est parfait par construction. Le spectre solaire est continu et s'étend au-delà du visible, dans l'UV et l'IR. La corrélation entre l'efficacité lumineuse et l'indice de rendu des couleurs est illustré dans la Figure 2.

On constate bien que l'augmentation de l'efficacité se fait au détriment de l'indice de rendu des couleurs, et vice-versa. On constate également que pour obtenir des forts IRC, on a intérêt à enrichir le nombre de LED ou de couleurs.

Or, si l'on regarde l'efficacité énergétique des LEDs GaN et GaAs ou GaP en fonction de leur couleur, on voit très bien une zone appelée « Green Gap » de faible performance (Figure 3).

A Minatec-CEA-LETI, nous avons choisis dès 2006 d'explorer une voie

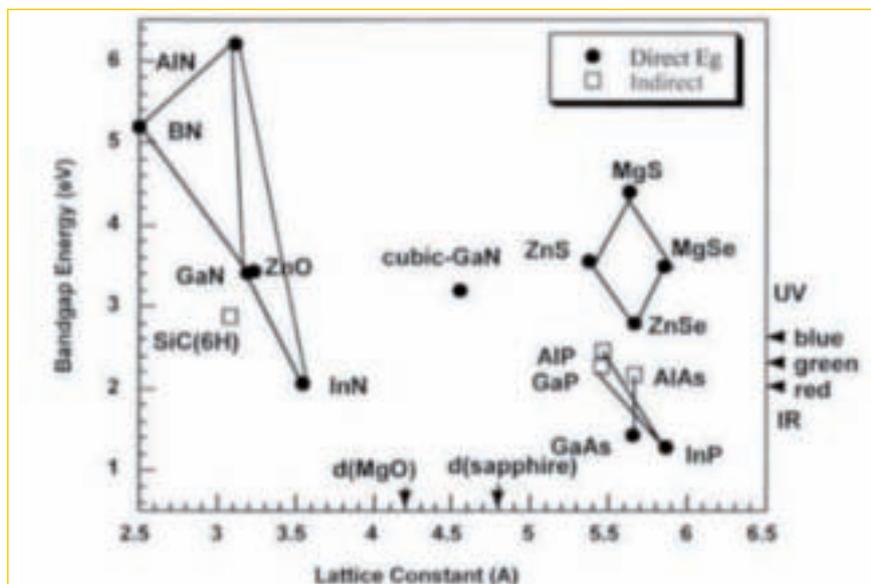


Figure 4: Energie de gap et maille cristalline de matériaux semiconducteur pour les applications optoélectroniques

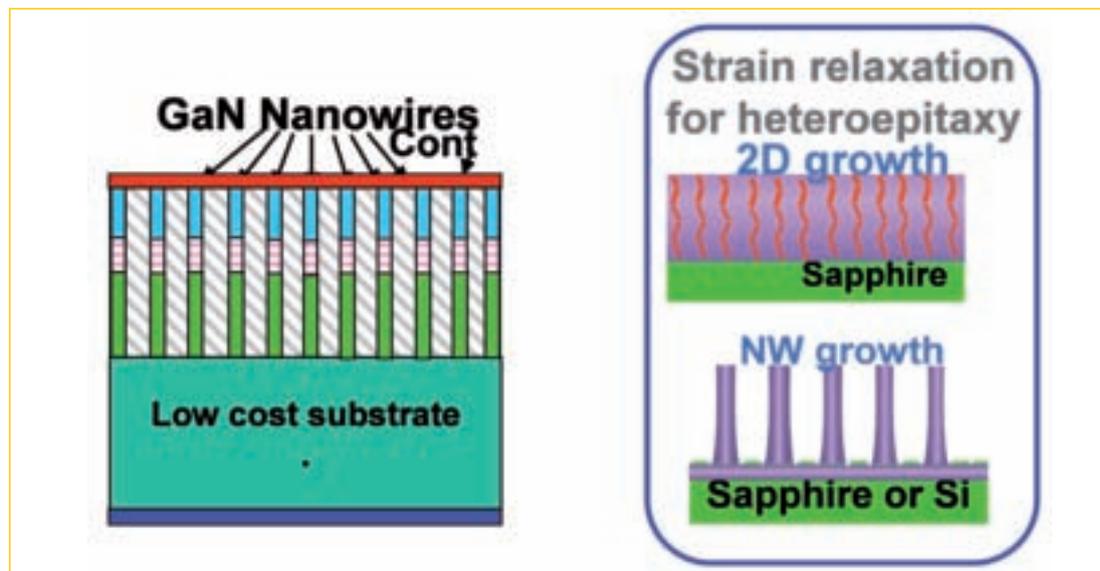


Figure 5 : Structure de LED à nanofils.

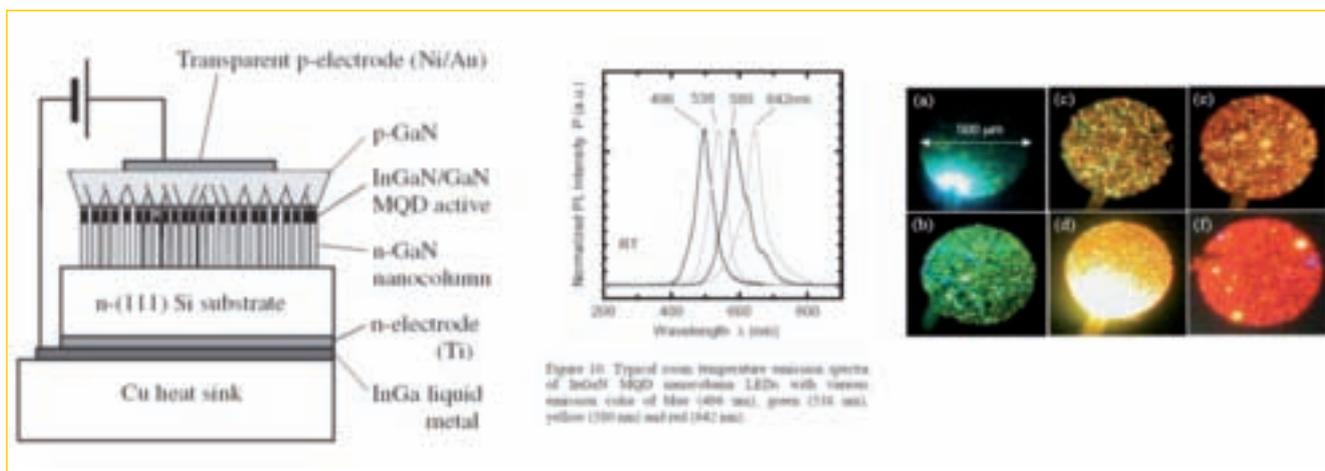


Figure 6 : électroluminescence de nanofils.

visant à combler ce trou par la réalisation de LED à base de nanofils.

2. Les LEDs à base de nanofils

Une explication possible pour expliquer la perte d'efficacité des LEDs à base de GaN lorsque la longueur d'onde d'émission augmente est la présence de contraintes fortes dans le cristal semi-conducteur. Cette contrainte augmente avec le taux d'incorporation d'Indium dans les puits quantiques pour baisser leur énergie de « gap ».

L'origine de ses contraintes vient du désaccord de maille cristalline entre le

GaN, l'InGaN et le substrat de croissance qui est en général le saphir (Al₂O₃) (Figure.4).

La croissance de structure de LED sous la forme de nanofil permet de s'affranchir de ce désaccord. En effet les nanofils ont une extension latérale très faible et les contraintes ne sont pas reportées d'un fil à l'autre. Il s'agit, en quelque sorte d'une épitaxie (croissance cristalline) asynchrone (Figure 5).

Cette option présente les avantages suivants :

- réduire la densité de défauts générant des processus non radiatifs,

- autoriser des désaccords de maille et de coefficients de dilatation thermique entre le substrat et la diode,
- plus de substrats possibles, dont le Silicium voire des métaux pour leur conductivité thermique importante,
- augmenter la concentration en Indium des puits quantiques pour des longueurs d'émission efficace dans le vert,
- faciliter l'extraction de la lumière par une structure guidante.
- envisager des structures cœur-coquille et exploiter des faces non polaires du cristal.

¹ Kishino, Proc. of SPIE Vol. 6473 64730T-1

² Kim, Nano Lett. 4, pp.1059-1062, 2004

³ Hersee, NANO LETTERS 2006 Vol. 6, No. 8 1808-1811

Un rapide état de l'art indique que les premiers résultats d'hétérostructures GaN/InGaN dans des nanofils ont été publiés dès 2004, mais depuis peu de réalisations ont été faites. On se référera aux croissances par EJM (Epitaxie par Jet Moléculaire) de Kishino et par MOCVD (Metallo Organic Chemical Vapor Deposition) de Kim². Ces résultats restent des résultats académiques, aucun composant fonctionnel n'a été réalisé (Figure 6).

Une équipe américaine de l'université de New Mexico, dirigée par Stephen Hersee³ a démontré la possibilité de croissance de manière organisée de nanofils de GaN par MOCVD, sans toutefois réaliser des puits quantiques (Figure 7). Kishino¹ a fait la même démonstration par EJM.

En collaboration avec le CNRS-INAC, nous avons développé des technologies de croissance par EJM sur substrats Si de nanofils de GaN, de puits quantiques GaN/InGaN, de dopage p et n pour former une diode, de contacts électriques sur ces nanofils. Nous

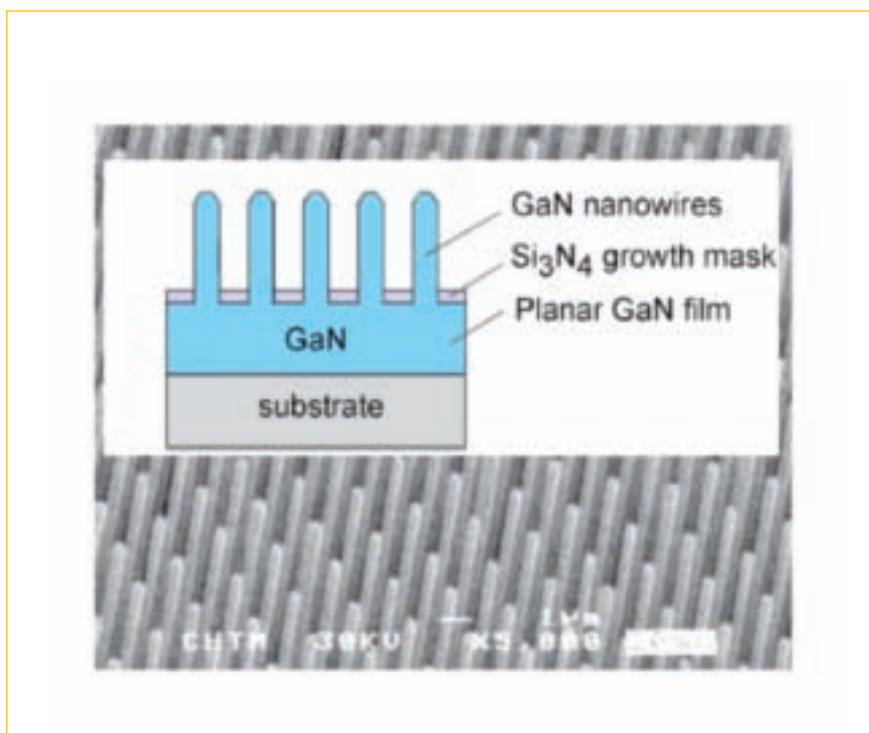


Figure 7 : croissance organisée de nanofils de GaN(3).

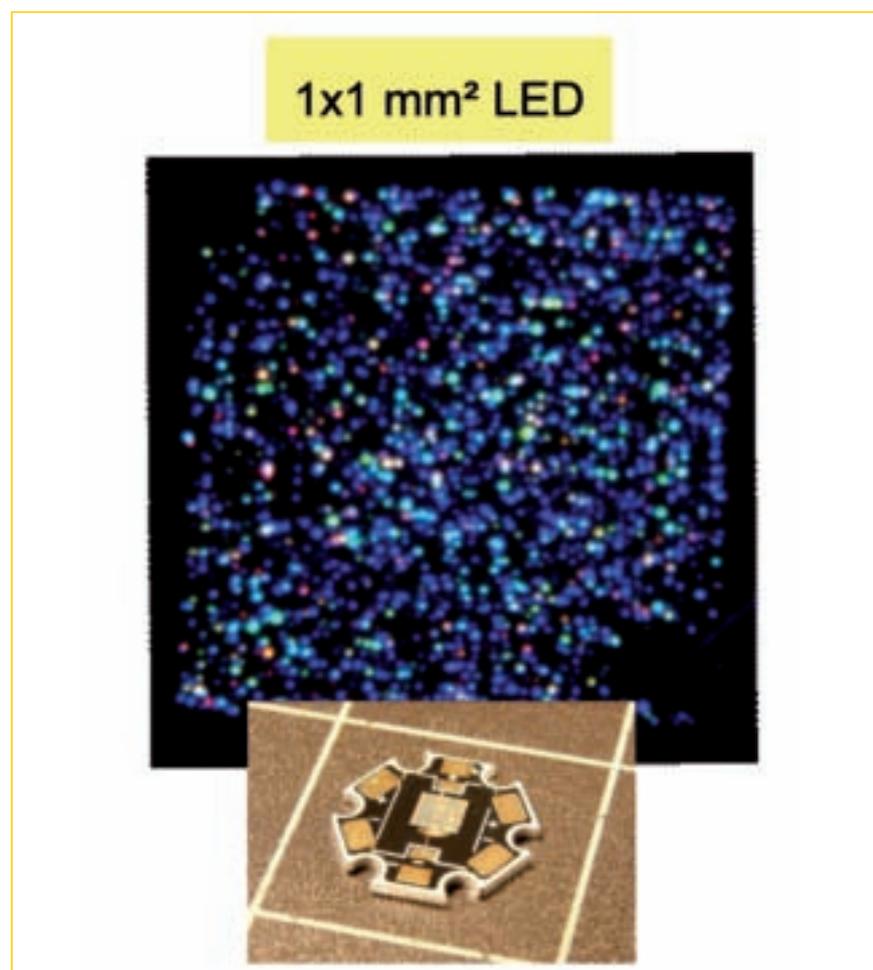


Figure 8 : résultats de composants LED à base de nanofils (Minatec-Cea-Leti).

avons également réalisé les premiers composants LED à base de nanofils, émettant dans le bleu et dans le vert (Figure 8).

Ces premiers résultats sont très encourageants car ils confirment la faisabilité de toutes les étapes technologiques nécessaires à l'intégration complète de telles diodes. Les travaux sont poursuivis pour augmenter le rendement des différentes étapes d'intégration. En effet, une problématique ici est de connecter, avec une méthode collective, 1 à 10 millions de diodes par mm² en parallèle. La qualité de hétérostructures réalisées doit aussi être améliorée, ainsi que les méthodes de croissance qui doivent être rendues compatibles avec une industrialisation.



Le Cluster Lumière - Optimiser l'éclairage pour répondre aux enjeux du développement durable

L'éclairage représente 19 % de la consommation électrique dans le monde, principalement pour le bâtiment (habitat et le tertiaire) mais aussi pour l'éclairage extérieur. C'est un véritable gisement d'économies, très vivement encouragées par les recommandations du Grenelle de l'Environnement.

Un tiers des rues en Europe, trois quarts des bureaux, ne satisfont pas aux recommandations en éclairage. En ville, améliorer la qualité de l'éclairage urbain, réduire la pollution lumineuse et gérer la modulation des flux permettrait d'économiser 45% de l'énergie sur l'usage. Dans le bâtiment, généraliser les nouvelles solutions d'éclairage se traduirait par un gain de 40 % sur la puissance et 25 % sur l'usage.

Les solutions existent, par exemple ces systèmes de contrôle-commande qui permettent d'adapter le mieux possible la fourniture de lumière aux besoins, ou les sources de lumière à haute efficacité énergétique. Elles sont applicables à l'éclairage extérieur, notamment public, et intérieur : commerce et activité tertiaire, industrie, résidentiel et habitat collectif.

« Nous voulons proposer des solutions d'éclairage innovantes, fonctionnelles, éco-énergétiques, conformément aux exigences de nos clients. Les membres du cluster mettent en œuvre des programmes de R&D, des expérimentations, des démonstrations pratiques et concrètes regroupant leurs savoir faire ».

Joël Karecki
Président du Cluster Lumière

Le réseau de compétences de la filière éclairage

C'est d'abord le rassemblement d'entreprises, de laboratoires et de centres techniques qui interviennent dans le même secteur d'activité, réunis pour développer ensemble des projets et concrétiser des opportunités d'affaires.

Créé en 2008, le Cluster Lumière est une association à but non lucratif. Sa raison d'être : proposer des solutions d'éclairage innovantes, pensées et abouties, en regroupant et fédérant l'ensemble des acteurs de la filière éclairage et lumière.

Toute la chaîne de valeur de la filière

Né à Lyon, en Rhône Alpes, le Cluster s'est rapidement ouvert à des entreprises de toute la France. Il compte ainsi plus de 100 adhérents. La plupart sont des entreprises (bureaux d'études, fabricants, installateurs, etc), les autres sont des établissements publics, laboratoires et centres de recherche parmi les plus innovants.

Améliorer l'environnement lumineux de l'homme

Pour appliquer les décisions du Grenelle de l'environnement comme les nouvelles normes réglementaires françaises et internationales, le Cluster Lumière mobilise l'ensemble des acteurs et stimule le travail collaboratif. Vouloir améliorer l'environnement lumineux de l'homme, chercher à développer des solutions d'éclairage innovantes et éco-performantes, promouvoir un usage optimal de la lumière naturelle et artificielle, comptent au premier rang des engagements pris par les adhérents à leur inscription.

Avec le Cluster Lumière, la promesse d'offre globale prend tout son sens. Face à des besoins extrêmement diversifiés, la filière est morcelée. Les différents membres du Cluster Lumière trouvent donc une parfaite complémentarité entre eux. Le Cluster Lumière a pu contribuer à répondre, dès son lancement, à des besoins qu'aucune des sociétés n'aurait été à même d'appréhender seule. Le Cluster Lumière apporte une réflexion globale et une vision d'ensemble de la chaîne de compétence Lumière.

Regroupant et fédérant l'ensemble des acteurs de la filière éclairage et lumière, le Cluster Lumière propose des solutions innovantes, pensées et abouties.

LES METIERS DU CLUSTER LUMIERE

Quatre grandes familles composent la filière et son environnement :

Recherche et formation

Centres d'études et techniques, laboratoires de recherches et d'essais, organismes de certification et de normalisation, centres de formation.

Fabricants

Sources d'éclairages, composants opto-électroniques, matériels d'éclairage, intégrateurs de solutions d'éclairage, alimentations, enseignes/ signalétique, logiciels de gestion et de télégestion, sous-traitants (électronique, optique, plastiques, travail des métaux).

Utilisateurs /prescripteurs

Concepteurs Lumière, designers, architectes, bureaux d'étude et maîtres d'œuvre, maîtres d'ouvrage, syndicats d'électrification, distributeurs de matériels d'éclairage installateurs, fournisseurs d'électricité.

Organismes d'intérêt général

Collectivités territoriales, organismes consulaires, syndicats, associations, salons professionnels et congrès...

LES CHAMPS D'INVESTIGATION DU CLUSTER LUMIERE

Intérieur

Bureaux, logements, hôpitaux, bâtiments d'enseignement, bâtiments commerciaux, salles de spectacle, musées, parkings, etc.

Extérieur

Routes, voiries, parcs, monuments, bâtiments, tunnel, sécurité routière...

Eclairages spéciaux

Enseignes, signalisation, balisage, matériel roulant, applications spécifiques, displays, mobilier, santé, communication, etc.

LES ACTEURS DU CLUSTER LUMIERE

Fondateurs :

CCI de Lyon, CDO, CLE, ENTPE, Philips

Avec le soutien de :

ADEME, DRIRE, Grand Lyon, Région Rhône-Alpes

Réseau et partenaires

Le Cluster Lumière est fort du dynamisme de la filière en Rhône-Alpes et en métropole lyonnaise, avec plus de 300 entreprises qui représentent environ 10 000 emplois et dix grands laboratoires et centres de recherche et formation. Son action prend appui sur des partenariats avec les acteurs de l'éclairage, avec les organismes techniques et institutionnels régionaux et nationaux, comme avec tous les acteurs du développement durable. Ainsi le Cluster Lumière recherche les synergies avec les Pôles de compétitivité, les Cluster nationaux et internationaux.

Cluster Lumière
CCI de Lyon
Place de la Bourse - F-69002 Lyon
Tél : +33(0)4 72 40 57 02 - Fax : +33(0)4 72 40 57 45
clusterlumiere@lyon.cci.fr • www.clusterlumiere.com



Une association au service de la lumière

L'Association française de l'éclairage a été fondée en 1930 en raison du développement considérable de la science de l'éclairage. Une collaboration entre les spécialistes de branches d'activités très diverses s'est avérée nécessaire pour le bien des usagers.

Ses objectifs, 80 années plus tard

L'Association ne s'adresse pas seulement aux spécialistes de l'éclairage. Elle est le point de rencontre de tous ceux qui, dans diverses disciplines, s'intéressent à l'éclairage. Elle leur permet d'échanger des idées, de confronter des expériences et de recevoir avis, conseils et informations.

Elle compte parmi ses adhérents - **près de 1000** - des architectes, urbanistes, décorateurs, médecins, chercheurs, ophtalmologistes, ingénieurs des villes, responsables de l'équipement routier, installateurs, distributeurs d'énergie électrique, fabricants de matériels, etc.

Cet aspect pluridisciplinaire est soutenu dans l'ensemble du pays par **14 centres régionaux**.

Afin d'assurer sa mission, clairement définie dans ses statuts, **l'Association française de l'éclairage** :



⇒ Organise **conférences, tables rondes, visites techniques et congrès**. En plus de réunions à l'initiative des centres régionaux, elle met en place les **Journées nationales de la lumière** qui rassemblent tous les deux ans les professionnels de l'éclairage. **Les prochaines auront lieu à Tours, les 27 et 28 septembre 2010.**

En liaison avec les sociétés similaires étrangères, l'AFE a pris l'initiative en 1969 d'organiser le premier congrès européen de la lumière à Strasbourg, qui se réunit depuis tous les quatre ans sous le nom de Lux Europa.

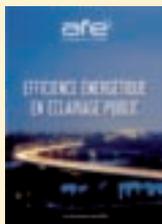
En outre, elle participe, par l'intermédiaire du Comité national français de l'éclairage, aux travaux de la Commission Internationale de l'Eclairage.



⇒ Elabore **des programmes de formation** de différents niveaux (initiation, entretien et perfectionnement des connaissances) dans le cadre de stages qui donnent lieu à l'établissement des pièces justificatives prévues par la loi sur la formation professionnelle continue.

Ces stages sont commercialisés par la société d'éditions et de formation LUX -

Tél. : 01 45 05 72 22



⇒ Rédige **des recommandations et des guides** qui font le point des connaissances et énoncent un certain nombre de règles dans différents domaines d'application de l'éclairage. Tous ces documents, élaborés par des experts de diverses sensibilités, sont en harmonie avec les textes internationaux.

Ces ouvrages sont publiés et vendus par la société d'éditions et de formation LUX -

Tél. : 01 45 05 72 22

L'AFE rédige également des Points de vue sur des sujets d'actualité. Ils sont téléchargeables **sur le site Internet de l'Association.**



⇒ Participe à la rédaction et soutient **la revue Lux**, seule revue scientifique et technique qui traite de l'éclairage, diffuse un panorama complet et un point permanent sur l'avancée des technologies et une présentation de réalisations exemplaires avec bilans économiques et témoignages.

Tél. : 01 44 92 50 50

Président Christian CORBE

Délégué général
Secrétaire générale
Communication

Bernard DUVAL
Marie-Pierre ALEXANDRE
Pierre-Yves MONLEAU

AFE - 17, rue de l'Amiral Hamelin - 75783 Paris Cedex 16 - Tél. : 01 45 05 72 00 - Télécopie : 01 45 05 72 70

afe@afe-eclairage.com.fr

www.afe-eclairage.com.fr

Energie solaire photovoltaïque et son stockage. *Technologies, enjeux et applications* à Paris, Mercredi 24 et jeudi 25 novembre 2010

La réduction des coûts de fabrication des systèmes photovoltaïques reste une priorité à court et moyen termes. Elle concerne en particulier la production de silicium de qualité « solaire », moins onéreux que celui de qualité « électronique ». À plus long terme, de nouveaux matériaux pourraient succéder au silicium cristallin : silicium amorphe, CIS (cuivre-indium-sélénium), CdTe (tellure de cadmium), matériaux organiques ..., en particulier sous forme de couches minces. Par ailleurs, l'amélioration de la partie conversion-gestion peut permettre de réduire les pertes et d'améliorer la fiabilité des systèmes photovoltaïques.

Toutefois, le solaire photovoltaïque reste, par nature, une source intermittente. Sa mise en œuvre implique donc, en parallèle, un complément d'approvisionnement en électricité (réseau d'alimentation ou production locale, avec un groupe électrogène, par exemple) et/ou le stockage de l'électricité photovoltaïque produite durant les périodes ensoleillées - périodes qui ne coïncident pas nécessairement avec les périodes de consommation. L'objectif est ici de disposer de systèmes autonomes avec stockage de l'électricité intégré. Il s'agira le plus souvent de stockage électrochimique, sous forme de batteries d'accumulateurs.

L'Energie photovoltaïque : état de l'art et perspectives

Par Daniel LINCOT, Directeur de l'Institut de Recherche et Développement sur l'Energie Photovoltaïque), Sebastien DELBOS, Ingénieur Chercheur EDF- IRDEP.

Les activités de recherches au CEA LITEN sur les technologies photovoltaïques en couches minces et nanostructures.

Par Emmanuelle ROUVIERE, Chef de Laboratoire des Composants pour la Récupération d'Energies (LCRE) du CEA/LITEN/DTNM (Département des Technologies des Nano Matériaux), Simon PERRAUD, Responsable filière PV Couches minces du CEA/LITEN/DTNM/LCRE

Cellules solaires organiques : du laboratoire au marché

Par Stéphane GUILLEREZ, CEA CEA-INES RDI

Nouveaux Matériaux pour batteries Li-ion

Par Mathieu MORCRETTE, Directeur du Laboratoire de Réactivité et Chimie des Solides.

Les batteries lithium sous le soleil

Par Florence FUSALBA, Program Manager, CEA Grenoble.

Microstockage de l'énergie : les dernières avancées

Par Raphaël SALOT, Chef du Laboratoire des Composants pour le Micro Stockage de l'énergie, CEA LITEN Grenoble.

Le soutien d'OSEO au profit des PME innovantes de la filière photovoltaïque

Par Thomas SENNELIER, responsable du secteur Energie chez OSEO.

MPO Energy, un challenge industriel dans le paysage photovoltaïque français

Solutions photovoltaïques autonomes : conception, choix technologiques, exemples.

Par Anne LABOURET, PhD, directrice commerciale de la société SOLEMS, auteur de «Energie Solaire Photovoltaïque», 4^e édition 2009, chez Dunod.

Systèmes d'énergie hybrides avec solaire photovoltaïque

Par Jacques DUVAL, responsable marketing pour le développement de l'activité photovoltaïque chez LEGRAND.

Les modules autonomes : approche système, bilan énergétique et application à l'optimisation d'un petit système photovoltaïque.

Par Julien Werly, ingénieur recherche et développement au CRT CRESITT.

La conversion d'énergie dans les systèmes photovoltaïque

Par Ambroise SCHELLMANN, Université de tours, laboratoire de micro électronique de puissance (LMP).

Conclusion

Par Jean-Claude BAL, Directeur productions et énergies durables, ADEME.

Lieu du séminaire :

UIMM, 56 avenue de Wagram, 75017 PARIS.

Programme détaillé et informations pratiques :
www.asprom.com/seminaire/photo.pdf.

Imagerie infrarouge thermique jusqu'au millimétrique. *Techniques, enjeux et applications* à Paris, 7 et 8 décembre 2010

Le rayonnement infrarouge (IR) est un rayonnement électromagnétique d'une longueur d'onde supérieure à celle de la lumière visible mais plus courte que celle des micro-ondes. Les systèmes d'imagerie thermique détectent l'énergie infrarouge (thermique) émise par les personnes, les objets et les équipements. Les caméras infrarouges permettent à leur utilisateur de voir dans l'obscurité la plus totale, lors de mauvaises conditions météorologiques et au travers de polluants atmosphériques tels que la fumée ou le brouillard. Il faut également ajouter comme utilisation, en plus de la vision dans l'obscurité la plus totale, tout le domaine de la thermographie infrarouge permettant de voir et de mesurer à distance et sans contact la température d'objets cibles. Les caméras infrarouges modernes permettent d'accéder à la mesure de champs thermiques et de leur évolution temporelle. Le traitement d'images obtenues permet d'analyser la signature thermique d'objets mobiles ou de fluides en écoulement.

Les ondes térahertz et millimétriques couvrent un domaine spectral à la frontière entre l'infrarouge et les micro-ondes. Ces rayonnements ont un fort pouvoir pénétrant dans les matériaux non polaires. Ils permettent potentiellement de voir à travers de nombreux matériaux non conducteurs tels que les vêtements, le papier, le bois, le carton, les plastiques... Ils sont peu énergétiques et non-ionisant (1 THz correspond à une énergie de photon de 4,1 meV, soit beaucoup moins que l'énergie typique d'une liaison chimique et sensiblement moins que l'énergie d'activation thermique à température ambiante) ce qui les rends à priori peu nocifs. Des « scanners corporels » à ondes millimétriques sont testés ou entrés en service dans plusieurs dizaines d'aéroports dans le monde. Ces appareils mettent virtuellement à nu les passagers inspectés et révèlent, à travers les vêtements et les chaussures, d'éventuels objets ou substances dangereux, par exemple un couteau ou un liquide explosif. Une autre grande application des rayons térahertz est la spectroscopie. Cela permet de distinguer plusieurs objets en fonction de l'absorption de chacun d'entre eux. Par exemple, on peut distinguer des acides aminés ou encore la chiralité de molécules.

Les grandes filières de détecteurs IR et au-delà

Par O. GRAVRAND, LETI-Minatec.

Les filières de photodétecteurs pour les prochaines applications de l'imagerie infrarouge

Par Philippe CHRISTOL, Institut d'Electronique du Sud (IES), Université Montpellier 2, UMR-CNRS 5214.

Défis et applications des détecteurs infrarouge refroidis

Par Philippe TRIBOLET, Directeur Technique, des technologies et des Produits, Société Sofradir.

La détection infrarouge avec les détecteurs non refroidis

Par Jean-Luc Tissot, Directeur Technique et Marketing, Société ULIS.

Caméras infrarouges et « thermoconvertisseurs »

Par C. PRADERE, Laboratoire TREFLE UMR 8508 CNRS, Bordeaux.

Nouvelles briques de conception pour la vision infrarouge

Par Guillaume DRUART, ONERA.

Fondamentaux des caméras thermiques et évolutions

Par Jacques LONNOY, Sagem Défense Sécurité.

La Spectro imagerie THz : bilan et perspectives

Par Patrick MOUNAIX, chercheur au Centre de Physique Moléculaire Optique et Hertzienne (CPMOH UMR 5798) à Talence.

Caméras infrarouges : applications industrielles et de R&D

Par José BRETES, Science Cameras Product Manager chez FLIR Systems.

Composants pour la génération optoélectronique et la détection d'ondes millimétriques et térahertz

Par Jean-François LAMPIN, Chercheur à l'Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN, UMR CNRS 8520) à Villeneuve d'Ascq.

Une source de radiation THz à semiconducteurs : le laser à cascade quantique.

Principes de fonctionnement et état de l'art actuel.

Par Raffaele COLOMBELLI, Chercheur à l'Institut d'Electronique Fondamentale, Université Paris-Sud et CNRS, 91405 Orsay, France.

L'onde Millimétrique appliquée au contrôle de sûreté sur la personne.

Principe de fonctionnement du PROVISION.

Par VISIOM - Jean-Philippe TEIXEIRA, Directeur Grands Comptes, Jean-Jacques METAYER - Chef de Projet.

Le scanner corporel à ondes « millimétriques » de type Provision 100 : Quels dangers potentiels pour la santé des utilisateurs ?

Par Johanna FITE, Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) (anc. Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset)).

Les technologies de détection au service de la sûreté du transport aérien.

Par Thierry MADIKA chef du département Sûreté Equipements du Service technique de l'Aviation Civile, Direction générale de l'Aviation Civile.

Droit de l'identité numérique

Par Catherine LATRY, CLN Avocats.

Lieu du séminaire :

UIMM, 56 avenue de Wagram, 75017 PARIS.

Programme détaillé et informations pratiques : www.asprom.com/seminaire/infrarouge.pdf.