

Cahier TECHNIQUE

Les LED

Dans les applications de l'électronique à l'éclairage, les LED, semi-conducteurs lumineux, sont amenées à un très grand développement dans les prochaines années. Dans le long et difficile parcours qui les mènera de l'état de simples générateurs de lumière qu'elles sont, vers de véritables sources d'éclairage qu'elles deviendront, les dernières Journées nationales de la lumière de Lille, en septembre, ont permis de faire le point sur l'avancement de leurs technologies et de leurs performances, les nouveaux concepts de luminaires qu'elles peuvent engendrer et les perspectives économiques que l'on peut attendre de leur utilisation.

UN ATELIER ANIMÉ PAR MICHEL COMBE, DE L'AGENCE DE COMMUNICATION CORIS, A RÉUNI AUTOUR DE L'ÉLECTRONIQUE, ET SUR LES THÈMES DES LED ET DES SYSTÈMES DE GESTION DE L'ÉCLAIRAGE INTÉRIEUR ET EXTÉRIEUR, LES SPÉCIALISTES DE CES QUESTIONS QUE SONT STEVE DENNI (OSRAM), DAVID MADEORE (ERCO), JEAN-MICHEL MIQUEL (PHILIPS), PIERRE TARROUX (THORN), MARC VILLEZ (SOGEXI) ET JEAN-PIERRE VITRAC (DESIGNER).

Quels sont les avantages des LED ?

Les avancées technologiques des semi-conducteurs ont permis de faire progresser les performances des LED. Jean-Michel Miquel, responsable de la recherche et du développement sur la technologie des luminaires chez Philips Eclairage, signale que, depuis quatre ans, celles-ci ont vu un doublement de leur efficacité lumineuse tous les deux ans. L'obtention de flux lumineux élevé par émetteur dans les couleurs primaires et en lumière blanche permet maintenant de réaliser la mise en lumière d'éléments architecturaux, la signalisation et l'éclairage fonctionnel des lieux publics. De nouveaux systèmes d'éclairage vont donc pouvoir être réalisés et des opportunités nouvelles apparaissent en particulier en terme d'application d'éclairage, de maintenance et d'impact sur l'environnement.

Les LED de haute puissance permettent de concevoir des luminaires compacts aux performances élevées ; elles présentent des flux 20 à 30 fois plus élevés que les LED traditionnelles utilisées en signalisation ; pour des surfaces émettrices de 1 mm², des flux lumineux proches de 50 lumens sont atteints pour une puissance électrique de 1 W. Il faut ajouter à ces caractéristiques, comme autres avantages des LED de forte puissance, l'absence d'émission IR et UV et une efficacité lumineuse maintenant proche de celle des lampes halogènes.

Elles sont maintenant équipées de systèmes optiques internes qui fournissent une grande variété de distribution lumineuse (du type lambertienne, "batwing" ou "side emitting") ; un choix d'optiques additionnelles judicieux pour les applications recherchées permet d'optimiser le rendement des systèmes à base de LED. Ces systèmes optiques sont formés par injection sous pression de polymères plastiques permettant de réaliser avec précision des collimateurs ou des concentrateurs de lumière d'une grande efficacité grâce à un rendement optique très élevé (90 %) et un mélange homogène des couleurs primaires. Ces techniques d'injection sous pression sont aussi utilisées pour la fabrication d'optiques secondaires pour la conception de faisceaux lumineux homogènes et de dimensions variées. L'efficacité de ces systèmes permet d'éliminer la lumière parasite et d'augmenter les facteurs d'utilisation (ce gain se caractérise par un doublement du facteur d'utilisation dans certaines applications d'éclairage public, voire par une multiplication par 3 ou par 4 du rendement de faisceau de certaines distributions lumineuses du type projecteur). Les dispositifs ainsi constitués se révèlent plus compacts, plus légers et d'une meilleure fiabilité que les systèmes conventionnels d'éclairage. Fiabilité qui est obtenue grâce à une plus faible température de fonctionnement des composants et une plus grande stabilité mécanique liée à l'absence de pièces mécaniques mobiles si l'on compare avec les lampes à décharge.

L'emploi des LED, dont la durée de vie est de trois à cinq fois supérieure à celle des sources traditionnelles, est un avantage déterminant en terme de réduction des coûts de maintenance. Avec des LED classiques dites T5 ou "haute brillance", la durée de vie annoncée est proche de 100 000 heures avec une dépréciation du flux lumineux de 50 %. Les LED haute puissance présentent une conservation de 70 à 80 % de leur flux lumineux initial après 50 000 heures de fonctionnement.

La contribution des LED à l'éclairage dynamique n'est pas un des moindres de leurs avantages : les LED à couleurs saturées monochro-

matiques permettent de réaliser un grand nombre de palettes de couleurs, et les LED blanches une variété d'ambiances lumineuses obtenues par un jeu approprié de températures de couleur. Il faut y ajouter la qualité dynamique que leur assure l'allumage instantané, et la possibilité de gradation de 0 à 100 % du flux lumineux de ces sources de lumière suivant des caractéristiques colorimétriques constantes.

L'absence de substances toxiques comme le mercure constitue pour les LED un gain environnemental par rapport aux lampes à décharge ; en effet, la mise en œuvre des technologies des semi-conducteurs et des procédés de fabrication de la micro-électronique se révèle moins polluante.

A terme, les LED de haute efficacité, équipées de systèmes optiques performants, contribuent, par les économies d'énergie qu'elles réalisent, à un meilleur développement durable pour des applications d'éclairage bien ciblées.

LED blanches : encore des progrès à réaliser !

Si les LED de couleurs sont présentes sur le marché depuis quelques années, les LED blanches sont en évolution constante pour Steve Denni, chef de produits lampes et appareils chez Osram ; il y a deux ans, des différences de températures de couleur de 3 000 K à plus de 10 000 K ont été mesurées sur des lots considérés comme identiques, ce qui rendait celles-ci inutilisables pour l'éclairage. Actuellement, un tri est nécessaire pour obtenir ces LED dans une température de couleur donnée, et les constructeurs travaillent à améliorer et à automatiser le contrôle de la colorimétrie des diodes. Régis Calmes, de LumiLEDs, mentionne que ce tri de blanc réalisé par les constructeurs, ou "binning", a fait de grands progrès depuis trois ans.

La gestion thermique est le problème le plus critique rencontré par les diodes dans leur intégration à des systèmes

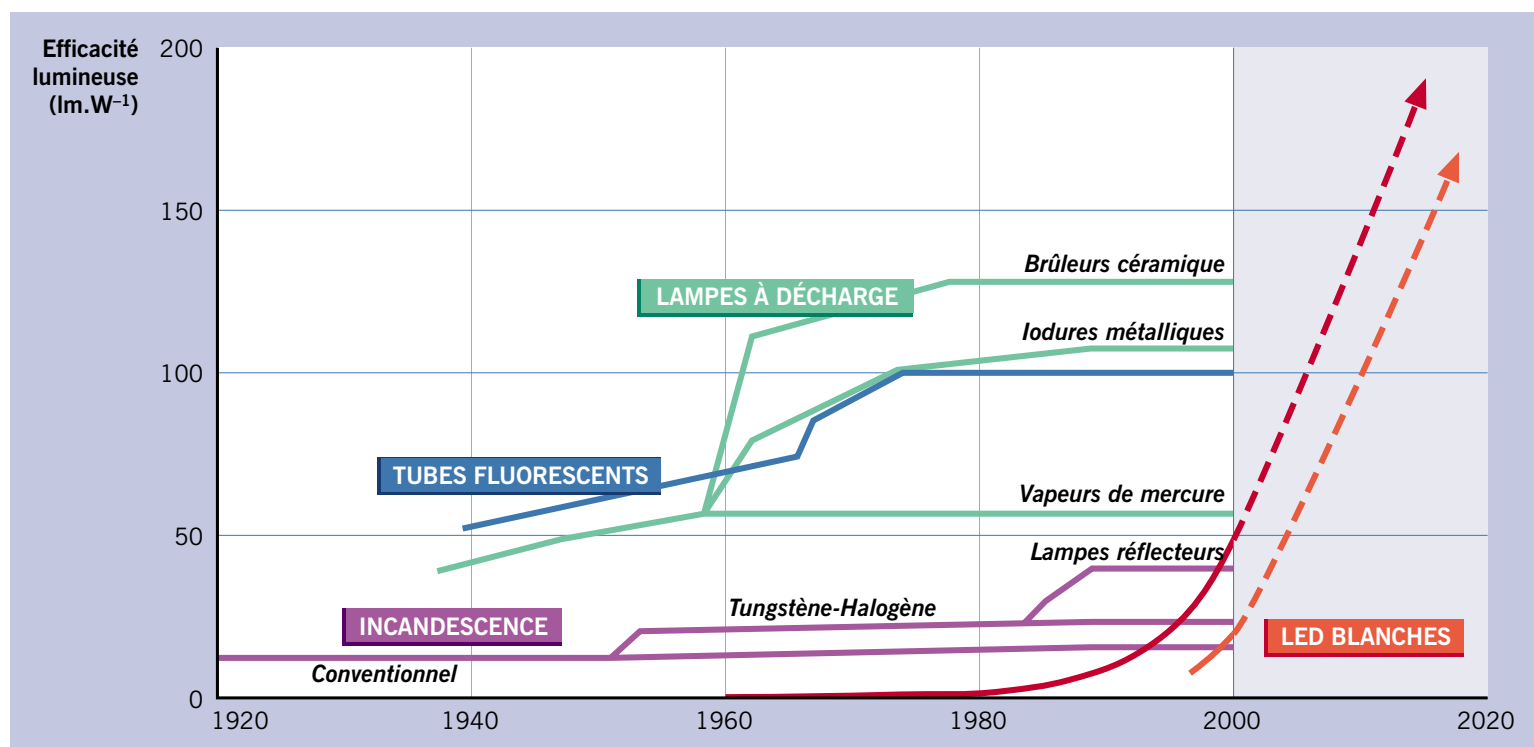
d'éclairage. Si, comme il a été mentionné, la LED est une source de lumière froide comparativement aux lampes à décharge, ce composant électronique ne fonctionne pas dans de bonnes conditions sous des températures ambiantes trop élevées ; un contrôle de sa température de fonctionnement est nécessaire pour optimiser ses caractéristiques nominales (flux lumineux, durée de vie...). D'ailleurs, la durée de vie d'une LED ne peut pas être exprimée sans faire une corrélation avec sa température de fonctionnement T_c , relevée sur le circuit électronique sur lequel la LED est montée (cette donnée est incluse dans le projet de normalisation relatif à la durée de vie des LED).

Il ne faut pas considérer la LED comme une source de substitution à des lampes existantes, mais l'utiliser grâce à ses qualités propres dans de nouvelles solutions d'éclairage plus innovantes. A la question posée dans la salle par Pierre Bideau qui s'étonne que, dans les catalogues, le flux lumineux des diodes ne soit pas renseigné, Steve Denni répond que beaucoup de facteurs ont une incidence sur le flux lumineux de ces lampes dont la valeur est très variable suivant les conditions d'utilisation ; les constructeurs travaillent pour définir cette caractéristique dans des conditions précises avec des méthodes d'intégration.

Où en est-on de l'amélioration des flux lumineux, de l'efficacité lumineuse et de la durée de vie des LED blanches ? Jean-Michel Miquel considère que pour les lampes à décharge du type sodium haute pression et iodures métalliques, la limite de l'efficacité lumineuse est de 120 à 130 lm.W^{-1} avec une diminution de la taille des brûleurs et une amélioration de leur durée de vie qui est à attendre. Steve Denni signale que le taux de mortalité des LED est très faible ; pour l'éclairage avec LED, il est plus important de considérer le maintien du flux lumineux sur des temps de 50 000 à 100 000 heures ; pour en optimiser la maintenance, il faudra assurer le remplacement des systèmes optiques et des composants tels que les systèmes de refroidissement.

On constate, depuis 1998, une très forte augmentation de l'efficacité lumineuse des LED, des valeurs de 50 lm.W^{-1} sont attendues en 2005 (voir figure 1).

Figure 1.
Efficacité lumineuse des LED



Il faut considérer les performances des LED et des luminaires relativement à des applications différentes de celles des lampes à décharge. On peut classer en deux catégories les LED d'éclairage disponibles sur le marché (voir figure 2) :

- **les LED dites à "haute brillance"** de faible puissance électrique et efficacité lumineuse que l'on utilise en signalisation ;
- **les LED dites à "haute puissance"** comprise entre 1 et 5 W pour l'éclairage ; elles présentent une efficacité lumineuse comprise entre 25 et 120 lm.W⁻¹ par émetteur ; pour ces dernières, leur durée de vie plus limitée ne leur permet pas d'être utilisées pour les mêmes applications.

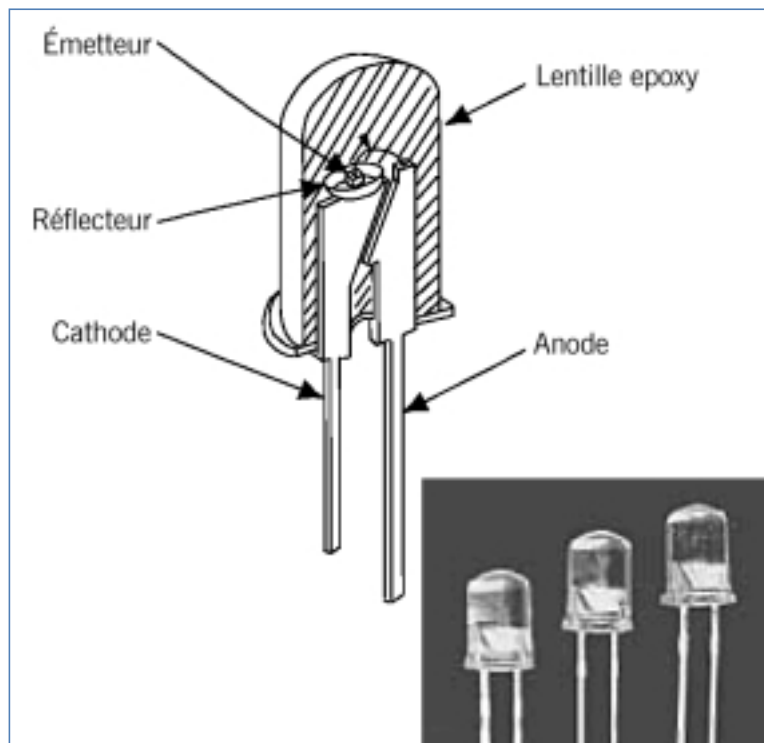
Le flux lumineux de la diode va dépendre de la capacité de la diode à accepter une puissance électrique suffisante ; en effet, l'architecture d'une diode est déterminante pour l'optimisation de son flux, en particulier l'efficacité de l'émetteur, le rendement du système optique qui équipe la diode (le réflecteur interne et la lentille qui vient encapsuler le semi-conducteur) et enfin le contrôle de la dissipation thermique qui permet d'augmenter la puissance électrique et par là même le flux lumineux de la diode. Dans les trois couleurs primaires et la couleur ambre, en quatre ans, l'augmentation de l'efficacité lumineuse des diodes a été considérable, et ceci malgré des disparités entre les différentes couleurs.

Il existe deux techniques principales permettant de réaliser des diodes en lumière blanche (voir figure 3) :

- la première est obtenue par le mélange de trois couleurs fondamentales produites par trois diodes, rouge, verte et bleue, pour restituer une répartition spectrale à lumière blanche ;
- la seconde consiste à convertir en lumière blanche la radiation bleue émise par une diode avec des phosphores.

Figure 2. Différents types de LED.

- *a gauche : LED HB (high Brightness) ; 0,1 W, 1 lm ;*
- *à droite : LED HP (High Power) ; 1 à 5 W, 25 à 120 lm.*



Ici aussi, l'évolution de l'efficacité lumineuse des diodes blanches est significative. Ces diodes sont maintenant disponibles pour des températures de couleur de 3 200 K avec une efficacité lumineuse comparable et un indice de rendu des couleurs proche de 90.

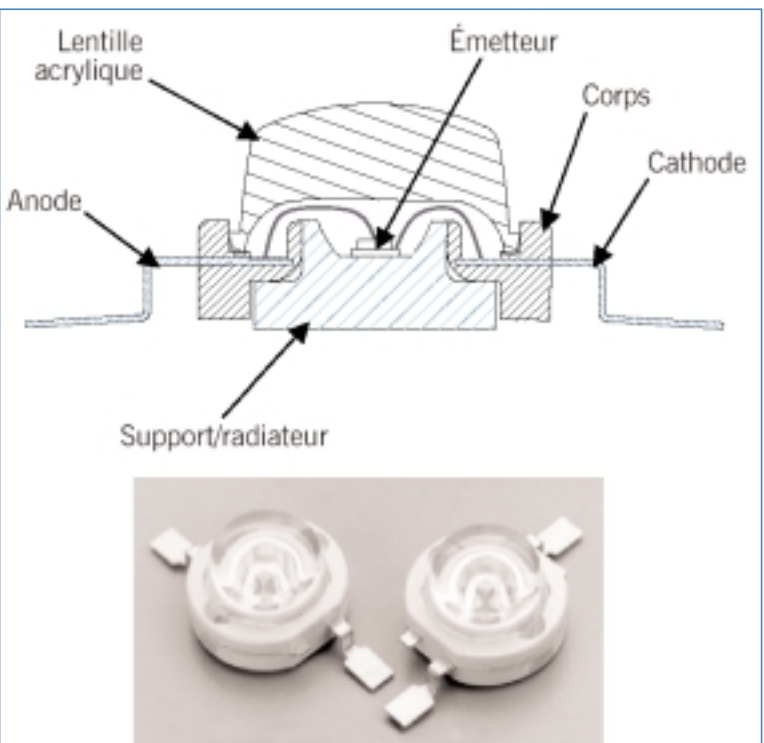
Si on augmente la température de la jonction, on observe un décalage du spectre d'émission et une diminution de 10 % du flux lumineux par augmentation de 10 °C au-delà de la température de 25 °C (voir figure 4). C'est la raison pour laquelle il est nécessaire de concevoir des systèmes de diodes avec des dissipateurs thermiques pour en améliorer l'efficacité.

De grandes disparités sont constatées entre différents lots de fabrication, en terme de flux lumineux, efficacité et température de couleur (voir figure 5) ; un tri peut être réalisé entre différentes températures de couleur de manière à les regrouper suivant des gammes présentant des dispersions plus réduites pour en améliorer la qualité colorimétrique. On mesure ainsi toute la difficulté à maîtriser la conception de luminaires à base de LED en raison du très grand nombre de paramètres électriques, thermiques, mécaniques, optiques et colorimétriques à maîtriser.

Systèmes d'éclairage à LED : quelques réalisations

Quelques applications, regroupées sous forme thématique, sont présentées par Jean-Michel Miquel :

- Applications dites de **"luminance" en régime statique** du type feux de signalisation, balisage encastré sol.
- Applications dites de **"luminance" en régime dynamique**, pour réaliser des effets décoratifs par panneaux lumineux encastrés ou muraux, de la signalisation routière dynamique pour la gestion du trafic, des accessoires décoratifs qui complètent des luminaires traditionnels.
- Pour l'illumination et l'éclairage architectural, les diodes sont utilisées pour concevoir des projecteurs équipés de systèmes optiques permettant de modifier la distribution des faisceaux.



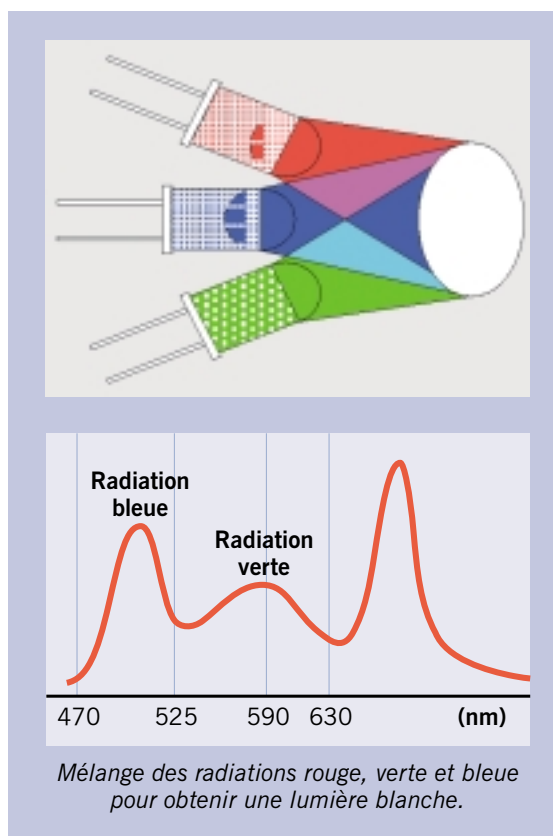
- Des exemples d'éclairage architectural avec des projecteurs linéaires très compacts scellés à vie sont montrés.
- Les LED sont aussi employées pour des systèmes d'éclairage urbain comme l'éclairage de zones piétonnes avec concept et design nouveaux permettant une variation de la température de couleur de 2 700 K à 4 000 K.

Quelles sont les perspectives d'avenir des LED ?

Pour Steve Denni, nous ne sommes qu'aux prémices de l'emploi des LED comme source d'éclairage ; longtemps réservées à l'éclairage de balisage et de signalisation, des applications en éclairage général commencent à apparaître ; des développements importants sont à attendre dans les cinq à dix années à venir dans ces domaines. En particulier des études de recherche et de développement sur les diodes de haute puissance (1 à 5 W) sont en cours chez les fabricants pour maîtriser l'émission thermique, améliorer la maintenance et normaliser l'ensemble de la connectique – Yves Bost signale que la normalisation des connecteurs à Led est en cours.

D'autres technologies sont développées comme les LED organiques utilisées dans les nouvelles technologies des écrans de téléphone portable ou d'auto-radio, technologies qui, une fois éprouvées dans ces domaines, permettront de faire des éclairages dynamiques très rapides. De grands espoirs sont fondés sur le développement des LED dont les performances doublent et quadruplent en quelques années et pour lesquelles les fabricants mondiaux réalisent d'énormes investissements. Ces applications électroniques vers des systèmes plus performants, moins consommateurs d'énergie et de longue durée de vie, représentent les plus importants progrès à réaliser sur les éclairages utilisant les LED, les alimentations et les systèmes de gestion électroniques qui généreront de nouvelles applications.

Figure 3.
Les LED blanches

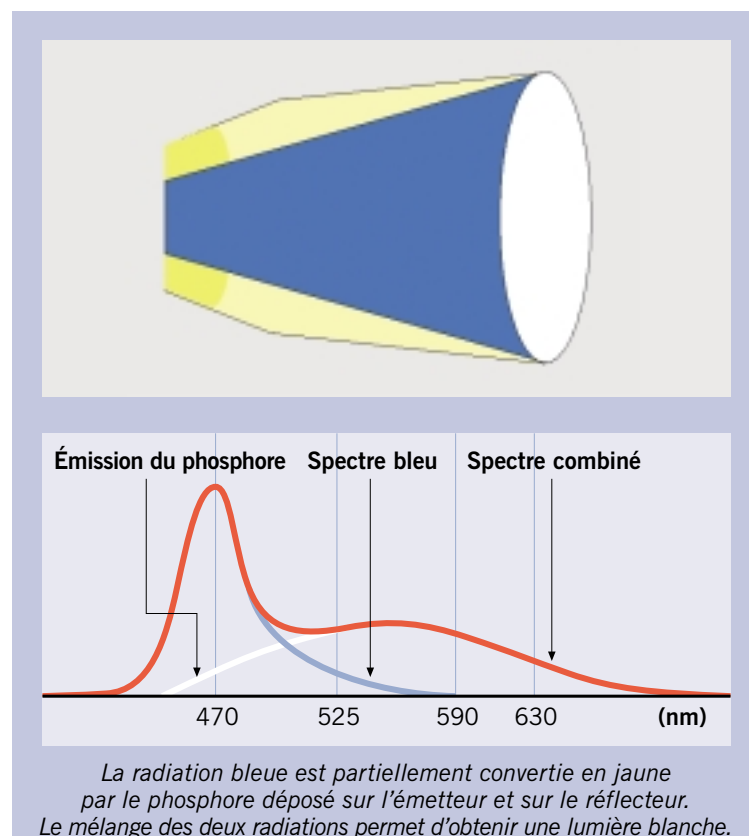


Luminaire à LED : problèmes techniques à résoudre et perspectives de développement pour les fabricants et concepteurs

Pierre Tarroux, ingénieur Recherche et Développement chez Thorn, explique que le flux lumineux varie de manière considérable avec la température ; cette variation dépend du type de semi-conducteur et de la couleur de la LED (voir figure 4) ; en particulier, dans le bleu, il y a peu de dégradation du flux avec la température alors que cette dégradation est importante dans le rouge très utilisé en balisage aéronautique, cette variation pouvant atteindre 70 % de la valeur initiale à 25 °C.

Comment assurer la gestion des LED sur le plan thermique ?

Les constructeurs ont beaucoup évolué ; l'obstacle est la résistance thermique qui s'exprime en K/W entre la puce et l'extérieur. Pour le surmonter, les LED sont montées sur un radiateur qui a pour fonction de transmettre la chaleur dissipée dans la puce pour la ramener vers l'extérieur. A l'origine, on utilisait des résines époxy classiques pour l'encapsulation des LED, mais ces résines n'avaient pas une tenue en température suffisante pour supporter la puissance que l'on peut dissiper actuellement ; les constructeurs ont remplacé ces matériaux par du gel silicone transparent plus performant aux hautes températures, encapsulé dans une enveloppe en méthacrylate de méthyle afin de constituer un émetteur satisfaisant. Le problème de résistance aux échauffements du boîtier de la LED étant résolu, il restait à traiter le problème de la transmission de la chaleur dégagée au niveau de la puce vers l'extérieur. A cette fin, les constructeurs ont intégré dans le boîtier un élément métallique en contact thermique d'un côté avec la puce et de l'autre côté avec l'extérieur. C'est cette partie de l'élément métallique qui doit être couplée thermiquement à ce que l'on appelle communément un radiateur. Les conditions de fonctionnement électrique des LED imposent quelques contraintes concernant le couplage électrique entre le boîtier et le radiateur, précisément dans le cas de



LED montées sur un support commun, une isolation supplémentaire, obstacle à l'écoulement thermique, est nécessaire. Une conception correcte du dispositif d'isolation électrique ne dégrade pas sensiblement la qualité de la transmission de la chaleur vers le milieu ambiant.

Pour représenter de manière amusante ce qui représente, sur le plan de l'électronique, une puissance thermique d'un watt, l'électronicien amateur ou professionnel sait bien qu'il n'est pas possible de toucher avec ses doigts une résistance pure dissipant une telle puissance ; ce qui laisse à imaginer l'énorme quantité de chaleur qui va se trouver sur le demi-millimètre cube que constitue l'émetteur d'une LED et ce qui montre toutes les difficultés que doivent résoudre les fabricants de luminaires utilisant des LED ! Ces problèmes d'évacuation thermique ont été surmontés par les fabricants puisque l'on a actuellement des composants ayant des résistances thermiques de 10 à 15 K par watt, alors qu'autrefois les diodes de 5 mm de diamètre présentaient des résistances thermiques voisines de 300 K par watt.

Pour les constructeurs de luminaires, il y a d'autres voies à explorer que celles proposées par les fabricants de LED pour constituer de nouvelles sources d'éclairage.

L'industrie de l'électronique fournit à des intégrateurs des lots de diodes qui peuvent être montées par ces derniers pour constituer des sources de lumière blanche. Il existe des méthodes de fabrication qui ajustent la composition des poudres fluorescentes suivant la nature de l'émission dans le bleu de la puce ; il devient alors possible d'ajuster la

composition des poudres fluorescentes lot par lot de façon à réduire la dispersion en lumière blanche des LED ; les constructeurs sont condamnés à trier les composants suivant une dispersion qui ira en se réduisant à l'avenir grâce aux efforts fournis par l'industrie électronique.

Figure 4.
Caractéristiques critiques des LED.

Influence de la température :

- sur les longueurs d'ondes (à gauche) ;
- sur les flux (à droite).

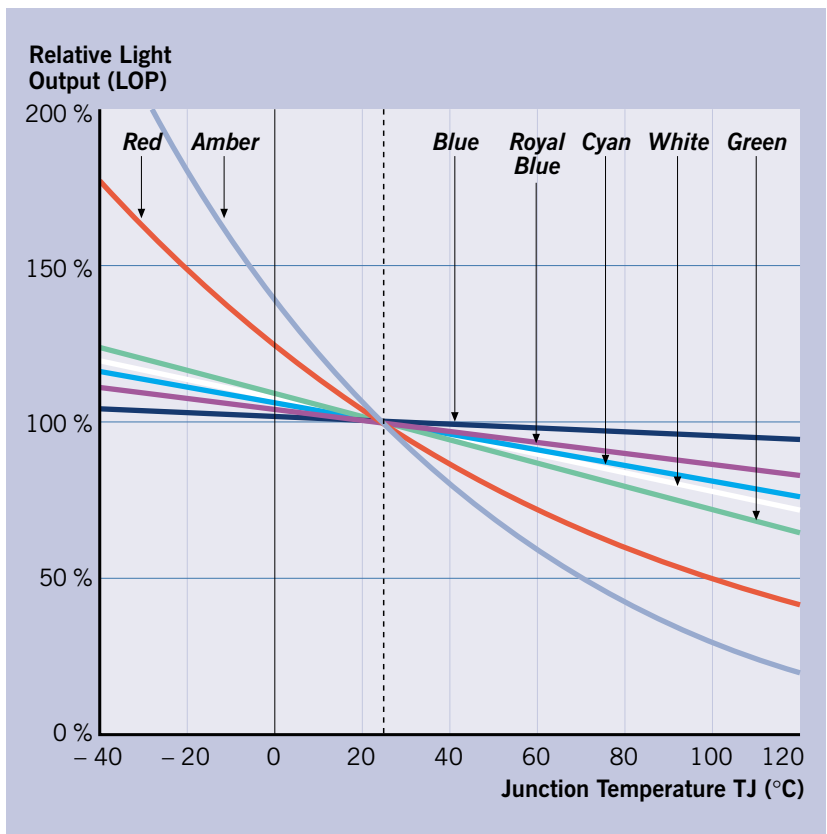
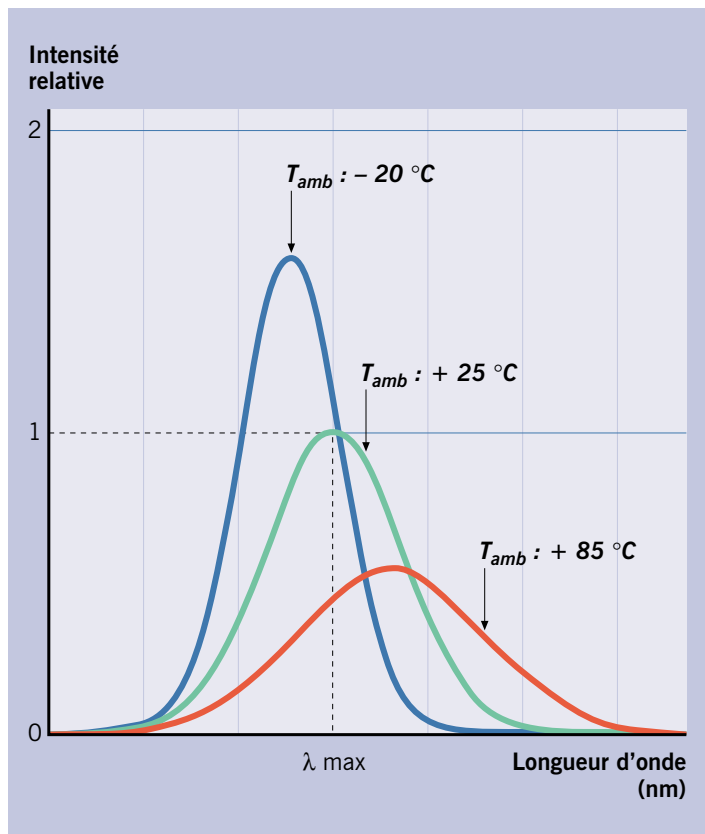
Nécessité de concevoir des systèmes avec un transfert thermique optimisé.

Pour essayer de résoudre les problèmes de maintenance entre des systèmes de LED d'ancienne et de nouvelle conceptions, on a construit, aux Etats-Unis, des alimentations à variations pour essayer d'égaliser les niveaux, sans parvenir à réaliser une bonne égalisation des couleurs, selon Pierre Tarroux. Mais cette question ne se posera plus à l'avenir en raison de la grande fiabilité des nouveaux systèmes mis sur le marché.

Pour optimiser l'écoulement de la chaleur émise dans les jonctions, des logiciels de calcul sont utilisés dans les études des luminaires pour qu'ils répondent aux critères définis dans les cahiers des charges.

Sur le plan optique, les constructeurs viennent incorporer au niveau de la puce des systèmes optiques afin d'obtenir des distributions lumineuses à brillance constante ou du type "batwing" (en aile de papillon) que l'on utilise pour l'éclairage sur tranche en signalétique. En plus de systèmes dioptriques et catadioptriques, on peut aussi réaliser des éléments optiques à partir d'éléments réfléchissants ; dans cette technique de haute précision, il est possible de recueillir le flux lumineux émis sur 180° : à savoir dans la partie centrale de la diode et en émission latérale par récupération du flux lumineux sous la forme de système optique à réflexion totale ; cette technique améliore à la fois le rendement, mais aussi favorise un meilleur mélange des couleurs. C'est le cas des diodes blanches qui émettent dans le bleu et sont recouvertes de poudres fluorescentes ; celles-ci ne présentent pas en effet une couche homogène de poudres entre le centre plutôt jaunâtre et la périphérie de couleur bleuâtre. Ces techniques ont été utilisées avec succès sur des diodes en champ proche afin d'éliminer les traces de franges colorées sur des surfaces blanches. Maintenant, les constructeurs de diodes ont une meilleure maîtrise de l'épaisseur des poudres fluorescentes de manière à atténuer ces effets.

Pour parler de l'évolution technique des diodes blanches, les fabricants travaillent sur des diodes dont la technique d'émission lumineuse se rapproche de celle des tubes fluorescents ; ces diodes émettent dans le



visible à la limite de l'UV avec trois groupes de poudre, suivant trois longueurs d'ondes principales, afin de constituer un spectre de lumière blanche ; mais il y a des difficultés à surmonter pour éviter que ces poudres et les éléments du boîtier soient détruits par le rayonnement proche de l'UV émis par l'émetteur.

David Madéore, responsable des projets d'éclairage à la société Erco, utilise principalement les diodes comme émetteur de luminance pour réaliser des signaux ou du balisage ; un luminaire avec réflecteur asymétrique qui travaille en éclairage permet de réaliser avec 9 LED, pour une puissance totale de 1,7 W, un éclairage au sol de 30 lux à 3 m.

Quels sont les avantages liés à l'emploi des LED en éclairage architectural ?

La bonne maintenance du flux lumineux dans le temps et la durée de vie des LED permettent de les réserver à l'éclairage architectural extérieur dans le cas d'accès aux luminaires, difficiles ou précaires, et là où la demande en niveaux d'éclairage est peu élevée. Pour le futur, David Madéore croit plus au développement des LED en éclairage d'accentuation et asymétrique à effet mural qu'à celui de l'éclairage général. La difficulté actuelle est de réaliser avec une LED, un faisceau intensif (de l'ordre de 10°) : la partie centrale de la diode est souvent traitée mais la partie périphérique pose des problèmes de conception des systèmes optiques. A terme, les luminaires à LED ne devraient pas remplacer les luminaires d'éclairage général équipés de lampes à décharge conventionnelles, mais d'autres typologies de luminaires seront à créer qui intégreront la miniaturisation des LED, soit avec des LED en lumière blanche, soit avec des LED de couleurs mélangées R/G/B. Ces solutions pourront être préconisées en éclairage architectural intérieur une fois que l'efficacité de ces lampes

Figure 5.
Caractéristiques critiques des LED.
Performances variant d'un lot de fabrication à l'autre :

- flux,
- longueurs d'onde,
- température de couleur

aura progressé et que le coût des diodes deviendra compétitif par rapport aux solutions classiques.

Jean-Pierre Vitrac, designer, cherche à imaginer de nouveaux concepts pour une plus grande variété de produits industriels. Dans le développement de nouveaux produits, la valeur d'usage est déterminante. Jean-Pierre Vitrac s'étonne que, pour le luminaire, la démarche consiste davantage à réaliser une forme pour laquelle on s'arrange à trouver ensuite une source d'éclairage adéquate et non à entreprendre la démarche inverse en exploitant les potentialités de l'émetteur de lumière. Nous ne sommes pas encore arrivés à concevoir des luminaires LED pour l'éclairage ; on est très éloigné de la miniaturisation s'il faut multiplier le nombre de LED, celles-ci devant être réservées à certaines applications. Si beaucoup est fait en matière de consommation autour des développements de la technologie, on parle assez peu des recherches en matière d'usage des produits ; la technologie aura beaucoup de peine à évoluer s'il n'y a pas de demande. La véritable question est de savoir comment on va provoquer un développement du marché, là où la technologie des téléphones mobiles a créé une très grande demande avec des changements dans le mode de comportement social de la part des usagers ; le véritable challenge de la part des fabricants de LED est de savoir s'il sera possible de faire de même.

On manque de recherches prospectives sur les applications des diodes et il n'y a pas suffisamment d'incitation ; il faut dépasser les phénomènes de mode liés à l'apparition de certains produits, et Jean-Pierre Vitrac d'inciter les professionnels de l'éclairage à réfléchir aux modes d'utilisation des LED dans le futur en jouant sur les complémentarités et les potentialités de leur application avec des systèmes de gestion de l'éclairage – par exemple en éclairage extérieur où les LED peuvent être utilisées pour des éclairages dynamiques.

Le chemin est encore long avant de réaliser des systèmes d'éclairage à LED de grande diffusion, mais les réels avantages signalés et le potentiel de recherche sont tels aujourd'hui que tous les espoirs sont permis pour que les diodes lumineuses accèdent rapidement au statut de lampes, au même titre que les lampes à incandescence et à décharge.

