

# Sources de lumière du XXI<sup>e</sup> siècle

par Georges ZISSIS et Jean-Jacques DAMELINCOURT

La gestion de l'éclairage représente aujourd'hui un enjeu majeur pour le développement durable. Plusieurs défis technologiques doivent être relevés ; citons l'augmentation de la durée de vie des lampes, l'amélioration du rendu des couleurs, la miniaturisation de la source et du système, ou encore la réduction des nuisances environnementales.

**Georges ZISSIS** est maître de conférences.  
zissis@cpat.ups-tlse.fr

**Jean-Jacques DAMELINCOURT** est professeur des universités. Ils sont chercheurs au centre de physique des plasmas et de leurs applications (CPAT, UMR CNRS 5002) de l'université Paul-Sabatier (Toulouse-III).

## 1. La lampe, source de lumière

L'environnement visuel résulte de l'interaction de trois éléments (figure 1) : la source, l'objet et le système visuel (récepteur). En pratique, l'objectif est de détecter, de définir et de situer à l'aide du système

visuel, l'objet-événement rendu visible par la source. Toutefois, « voir » résulte d'une suite de processus complexes, dont seuls quelques éléments fondamentaux peuvent être retenus pour caractériser une source de lumière par rapport au système visuel. Les plus importants sont certainement la sensibilité chromatique du système visuel et ses propriétés de perception des sensations colorées. À ces éléments correspondent deux impératifs et deux critères de qualité pour les sources : l'efficacité lumineuse, qui caractérise la quantité de lumière produite par watt électrique consommé ; le rendu des couleurs, c'est-à-dire la capacité de produire une lumière qui puisse être considérée comme capable de restituer aux objets un aspect coloré identique à celui qu'ils ont dans leurs conditions habituelles d'environnement lumineux.

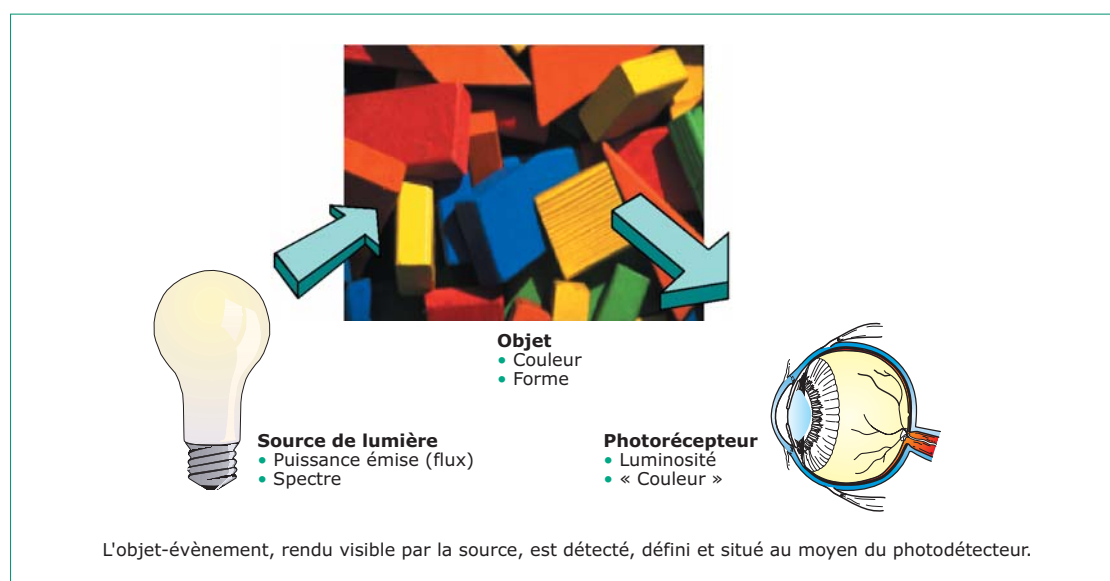


Figure 1 – L'environnement visuel

**Sur l'éclairage :**  
*Sources de lumière de l'éclairage électrique. Généralités* [D 5 800] de M. La Toison  
*Éclairage électrique. Documentation* [D 5 815] de M. La Toison  
*Éclairage. Données de base* [C 3 340] de M. La Toison  
*Commission internationale de l'éclairage (CIE)* [R 86] de B. Duval

## Incandescence et luminescence

L'**incandescence** se manifeste par une production de lumière lorsqu'un corps est porté à une température supérieure à 500 °C environ. La lumière rouge émise par un morceau de fer que l'on retire du feu en est un exemple typique. Quand on fait brûler une substance organique, elle se décompose en dégageant de la chaleur. Les produits de la décomposition, gaz ou particules de carbone agglomérées, sont portés à l'incandescence et émettent généralement cette lumière orangée qui caractérise les flammes.

Cependant, des phénomènes comme la **phosphorescence** et la **fluorescence** montrent que la matière est capable d'émettre de la lumière sans qu'il soit besoin d'élever beaucoup la température. Le savant allemand Wiedemann proposa, en 1888, d'appeler **luminescence** cette émission de lumière à froid et de préciser éventuellement, au moyen d'un préfixe, son mode de production. Par exemple, l'électricité peut provoquer l'électroluminescence, qui fut sans doute la première luminescence observée par l'homme. La lueur des éclairs, en effet, n'a rien de commun avec celle des corps incandescents. Le Dr Wall, au XVIII<sup>e</sup> siècle, soupçonnait déjà sa nature électrique et comparait à un orage en miniature les étincelles qu'il tirait du pommeau de sa canne en le frottant. On a réalisé, depuis, de nombreux « éclairs artificiels » de formes et de couleurs variées. En outre, si l'on entretient une décharge électrique dans un gaz sous faible pression, on peut provoquer une émission stable de lumière dont la couleur dépend du gaz employé.

Pour les utiliser de façon plus commode, on a peu à peu donné à ces sources de lumière, incandescentes ou luminescentes, une forme plus compacte connue sous le nom de lampe.

En fonction de l'application envisagée, ces deux critères ne sont pas d'égale importance.

**Exemple :** pour l'éclairage des routes, une grande efficacité est requise, mais le rendu de couleur est généralement secondaire. À l'opposé, l'éclairage domestique nécessite un excellent rendu des couleurs, mais on se contente trop souvent d'une efficacité médiocre.

## 2. Aspects économiques, énergétiques et environnementaux

De plus en plus présents dans nos activités, les lampes et l'éclairage représentent un marché considérable. Aujourd'hui, on estime à 30 milliards le nombre de lampes électriques qui fonctionnent sur Terre (tableau 1).

L'industrie des lampes est en plein développement. Ainsi, le Japon qui représente aujourd'hui 20 % du marché mondial a enregistré entre 2000 et 2004 une hausse de sa production de 3 % à 8 % par an ; depuis 1995, les ventes ont augmenté annuellement (en moyenne) de 9,7 %.

Les principaux constructeurs de lampes sont actuellement des grandes compagnies multinationales : Philips (l'éclairage représentait au 1<sup>er</sup> trimestre 2004, 15,7 % de son chiffre d'affaires), General Electric, Siemens-Osram. Il reste que plusieurs entreprises nationales (de petite ou moyenne taille) conservent un marché et un savoir-faire, soit dans le domaine des sources, soit surtout dans celui des équipements. Par ailleurs, le marché de l'éclairage (première installation et maintenance) reste toujours entre les mains de « concepteurs lumière » (ingénieurs, architectes, etc.) souvent liés aux donneurs d'ordre que sont l'État ou les collectivités.

Du point de vue énergétique, l'éclairage consomme plus de 2 000 TWh d'énergie électrique par an. Cette quantité représente plus du dixième de la production globale d'électricité de notre planète. Si dans un pays industrialisé, on utilise en moyenne 8 à 15 % de la production électrique annuelle pour l'éclairage (11,9 % pour la France, 9 % pour l'Allemagne, plus de 19 % pour les États-unis...). Dans un pays en voie de développement, cette proportion augmente rapidement (37 % pour la Tunisie, 89 % pour la Tanzanie...).

**Nota :** ces valeurs sont des moyennes sur la période 2000-2004.

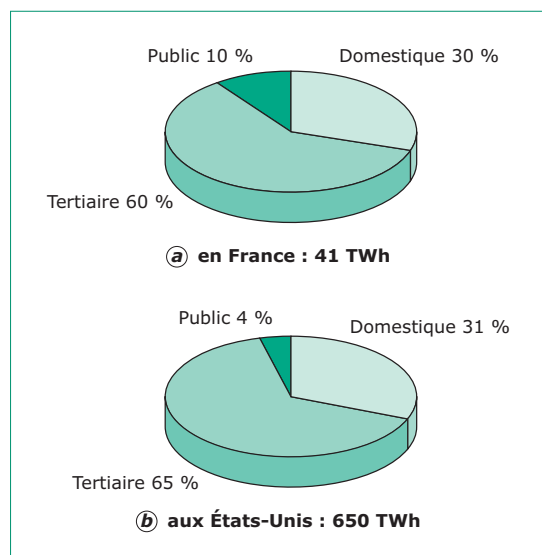
Cet important écart est essentiellement lié au fait que, dans un pays en voie de développement, l'éclairage est une nécessité première. Mais il est également lié à l'utilisation de lampes bon marché (lampes à incandescence de qualité médiocre) ayant une moindre efficacité.

**Tableau 1 – Marché mondial des lampes** (en milliards d'unités)

Type de lampe	Besoins annuels (1)	Durée de vie (ans)	Existant (2)
Incandescence	11,5	1	11,5
Halogène	0,8	2	1,6
Fluorescente	3,2	5	16,0
Fluo compacte	0,6	5	3,0
Haute pression	0,2	3	0,6
<b>Total</b>	<b>16,3</b>		<b>32,7</b>

(1) Les **besoins** représentent le nombre de lampes à remplacer dans l'année.

(2) L'**existant** représente le nombre de lampes en fonctionnement.



**Figure 2 – Comparaison des consommations énergétiques liées à l'éclairage en 1999**

Plus précisément, la France a consommé, en 1999, 41 TWh pour l'éclairage. Un peu moins des deux tiers de cette énergie (60 % du total) est utilisé par le secteur tertiaire. L'éclairage public et routier consomme 10 % du total tandis que 30 % de l'énergie est absorbée par l'éclairage domestique. Il faut toutefois noter que ce dernier secteur a vu sa consommation multipliée par trois en deux décennies (5 TWh en 1979, 14 TWh en 1999). Aux États-Unis, la consommation d'énergie électrique pour l'éclairage atteint, en 2000, 659 TWh, ce qui représente 19 % de l'énergie électrique produite dans le pays (cette énergie équivalait à la production d'électricité cumulée de la France et de l'Italie). Ici aussi, l'éclairage tertiaire domine cette consommation. Il faut toutefois noter que la majeure partie de cette énergie est consommée par des lampes à incandescence (46 %). La figure 2 compare les situations française et américaine.

La production de l'énergie électrique pour satisfaire les besoins en éclairage de l'Homme entraîne inévitablement une pollution de l'environnement. Ainsi, on estime que chaque année, quelque mille millions de tonnes de CO<sub>2</sub> accompagnent cette production d'énergie en contribuant à l'effet de serre. Par la même occasion, d'autres substances toxiques sont également produites ; le tableau 2 donne quelques estimations pour deux types de lampes produisant la même quantité de lumière.

Par ailleurs, les lampes contiennent des matériaux rares et souvent toxiques (Hg, Cd, terres rares...), radioactifs (Th, <sup>90</sup>Kr) et, enfin, leurs ballasts ferromagnétiques contiennent du plomb. Ainsi, à la fin de la vie de la lampe, ces matériaux peuvent se déverser dans la nature. Par exemple, la plupart des lampes, à l'exception des ampoules à incandescence, contiennent du mercure. C'est ainsi qu'aux États-Unis, pour produire chaque année quelque 750 millions de nouveaux tubes fluorescents, on utilise 2,5 t

**Tableau 2 – Émission des substances toxiques accompagnant la production d'énergie nécessaire pour générer 1 lm pendant une heure**

Polluant	Rejets atmosphériques (ng · lm-1 · h-1)	
	Lampe fluorescente (36 W)	Lampe à incandescence (60 W)
Hg	0,64	4,45
Pb	19	136
Cu	26	185
NO <sub>x</sub>	21 700	152 000
SO <sub>2</sub>	16 300	114 000

de mercure et dans d'autres pays comme la France, on collecte approximativement 80 t/an de déchets contaminés au mercure. La réglementation française (décret n° 97-517) entrée en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 1998 impose que les lampes à décharge en fin de vie soient ramenées à des déchets « ultimes » et elles doivent être retraitées avant stockage dans des décharges spéciales (dites de classe « terminale »).

Depuis quelques années, les lampes sont de plus en plus alimentées par des ballasts électroniques qui fonctionnent à fréquence élevée. Des lampes sans électrode alimentées aux hautes fréquences, radiofréquences ou même aux micro-ondes, ont également fait leur apparition sur le marché. Ces techniques ont contribué à l'amélioration du rendement et de la durée de vie des lampes, à la diminution de la masse et de l'encombrement des luminaires, tout en offrant la possibilité d'une gestion centralisée de l'éclairage. Cette meilleure maîtrise des techniques de l'éclairage conduit en particulier à diminuer l'impact de l'éclairage sur l'environnement.

Une des difficultés encore mal résolues est que ces systèmes engendrent des perturbations électromagnétiques qui peuvent se propager soit par le réseau électrique, soit par rayonnement, et interférer avec d'autres systèmes électriques ou électroniques.

Pour toutes ces raisons, la gestion de l'éclairage représente aujourd'hui un enjeu majeur pour le développement durable d'une nation. C'est ainsi que le Department of Energy (DOE) aux États-Unis investit chaque année plus de 6 millions de dollars pour la recherche et le développement dans le secteur de l'éclairage. Aujourd'hui, leurs projections du marché vont jusqu'à 2020. L'objectif ultime du DOE est de diminuer de 50 % d'ici 2010 le pourcentage de l'énergie utilisée pour l'éclairage.

Selon les prévisions de l'OCDE, les besoins en éclairage au niveau mondial seront multipliés par trois dans la décennie à venir. Notons au passage que la réglementation actuelle dans le pays le plus peuplé du monde, la Chine, impose des niveaux d'éclairement presque deux fois inférieurs à ceux du reste des pays occidentaux. Une uniformisation des réglementations, qui semble inévitable, entraînera donc la multiplication de la consommation énergétique chinoise par un facteur non négligeable...

**OCDE** : Organisation de coopération et de développement économiques

**CFL** : compact fluorescent lamp  
**SON** : sodium high pressure lamp with niobium heat reflectors  
**HID** : high intensity discharge lamp  
**MHL** : metal halide lamp  
**LPS** : low pressure sodium lamp  
**HP** : high pressure

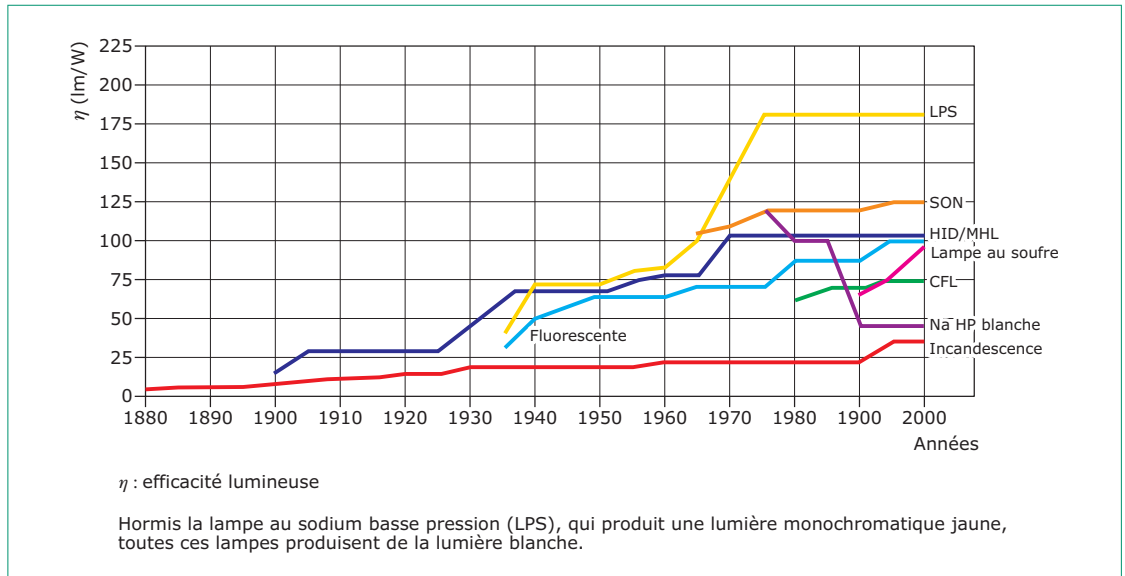


Figure 3 – Évolution de l'efficacité lumineuse de plusieurs types de lampe

### 3. Prospective

S'il est assez aisé de situer des objectifs et de décrire l'existant, faire des prévisions sur le devenir de la production de lumière est beaucoup plus aléatoire. Nous essaierons cependant de présenter quelques pistes qui ont été ou sont explorées. Elles nous aideront aussi à situer les « blocages techniques » particuliers dont il faut s'affranchir dans le domaine des sources de lumière.

Un objectif primordial est l'**augmentation de l'efficacité lumineuse des sources**. Cela n'a cependant de sens que pour une qualité donnée de lumière et pour une durée de vie acceptable de la source. L'enjeu est énergétique, mais aussi environnemental puisque l'augmentation de l'efficacité entraînerait une diminution de la production d'énergie nécessaire à l'éclairage et donc de la pollution. Actuellement, une augmentation de 2 % de l'efficacité énergétique entraînerait une diminution de la production du  $\text{CO}_2$  de 6 à 7 millions de tonnes, ce qui correspond à 1 % de la diminution prévue par le protocole de Kyoto sur l'environnement.

Remarquons tout d'abord que des estimations diverses, tenant compte de l'augmentation de la demande en éclairage, montrent qu'en utilisant simplement de façon plus raisonnée les sources existantes, nous pourrions économiser entre 10 et 15 % de l'énergie consommée pour l'éclairage dans les dix années à venir.

Actuellement, malgré tous les progrès de la science et de la technologie dans le domaine des lampes, leur efficacité maximale stagne (figure 3) depuis les années 1970, autour de 100 à 110 lm/W (pour la lumière « blanche »).

La question qui se pose est alors la suivante : l'industrie des lampes a-t-elle atteint une sorte de « limite thermodynamique » ?

Pour répondre à cette question, essayons de déterminer ce que pourrait être une limite supérieure raisonnable pour l'efficacité d'une lampe produisant de la lumière blanche avec une **température de couleur**  $T_{CP}$  (entre 3 000 K et 6 500 K) et d'une **qualité chromatique** (indice de rendu de couleur  $IRC \geq 80$ ) acceptables. Nous en profiterons pour examiner les principales familles de sources et leurs limitations propres.

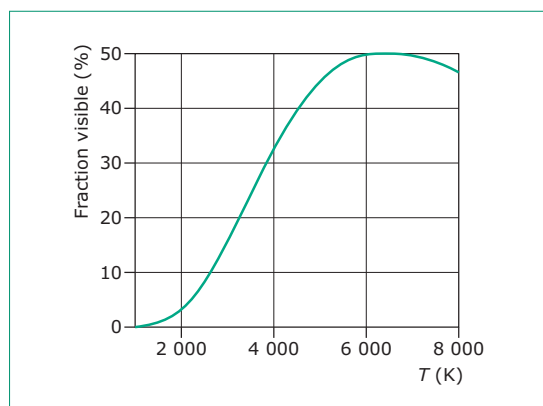
Pour obtenir de la lumière perçue comme « blanche », il faut disposer au minimum d'un émetteur qui permette une excitation équilibrée des trois familles de cônes présentes dans la fovea de l'œil humain. Cela est généralement obtenu soit par un rayonnement continu dans le visible, entre 380 et 780 nm (c'est le cas du Soleil ou d'un corps incandescent), soit par un mélange de bleu, de vert et de rouge (c'est le cas de la télévision couleur), soit encore par un mélange de bleu et de jaune.

On peut lier le rayonnement du soleil ou celui de l'incandescence au rayonnement du corps noir. Ils jouissent de propriétés voisines, en particulier dans leur dépendance vis-à-vis de la température du corps émissif, et c'est pourquoi nous prendrons le corps noir comme référence.

À la température  $T_{CN}$ , le spectre du rayonnement du corps noir présente, à la longueur d'onde  $\lambda$ , une luminance  $L_{CN}(T_{CN}, \lambda)$  donnée par la formule de Planck. On peut facilement en déduire la fraction du rayonnement correspondant à la partie visible du spectre. Ainsi, la figure 4 montre le « poids » du spectre visible dans l'émission totale du corps noir en fonction de la température de sa surface. Nous constatons que cette fraction ne peut en aucun cas dépasser la moitié de la puissance rayonnée totale. Cela est obtenu pour une température de 5 000 K environ.

Cependant, le corps noir n'est qu'un concept théorique. En réalité, la luminance  $L_C(T_C, \lambda)$  d'un corps

**Protocole de Kyoto :**  
<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpfrench.pdf>



**Figure 4 – Fraction visible dans l'émission totale du corps noir en fonction de sa température de surface**

réel, lorsqu'elle peut être caractérisée par une température unique, est liée à l'émission du corps noir par une grandeur, l'émissivité  $\varepsilon$ , toujours plus petite que l'unité, qui est en particulier une fonction de la température  $T_C$  caractéristique du corps et de la longueur d'onde  $\lambda$  considérée, soit  $\varepsilon(T_C, \lambda)$  ; nous parlerons des « corps gris » et nous écrirons :

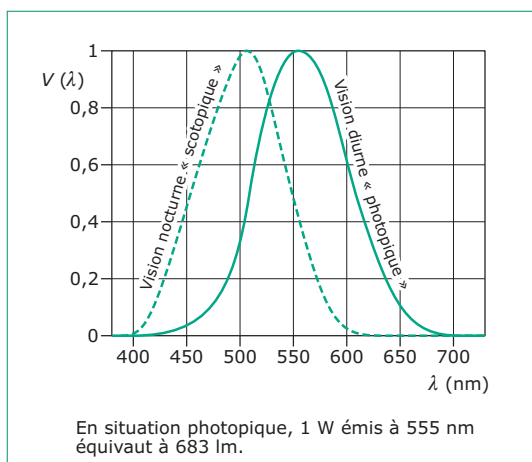
$$L_C(T_C, \lambda) = \varepsilon(T_C, \lambda) L_{CN}(T_{CN}, \lambda) \quad (1)$$

Tout d'abord, la quantité de lumière émise dans l'étroite bande spectrale visible dépend de la température du radiateur. S'il s'agit d'un métal, le tungstène est le métal qui présente le point de fusion le plus élevé ( $\sim 3\,400^\circ\text{C}$ ). En pratique, les impératifs mécaniques et thermodynamiques limitent la température entre  $2\,700$  et  $3\,000^\circ\text{C}$ . La majeure partie du rayonnement émis par le tungstène incandescent se situe alors dans la partie infrarouge du spectre ( $\lambda > 780\text{ nm}$ ) et moins de 25 % du rayonnement total est émis dans la région visible et donc utilisable par notre œil. Pour prendre en compte le fait que notre récepteur visuel ne répond que dans la partie visible du spectre, nous allons définir l'efficacité lumineuse d'une source  $\eta$ , exprimée en lumens par watt :

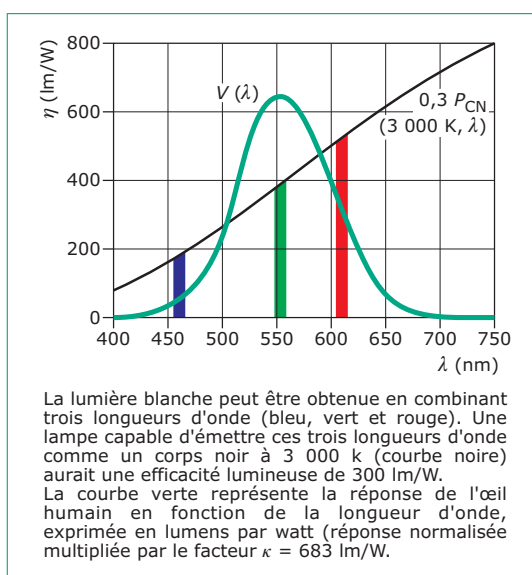
$$\eta = \frac{\kappa \int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} P_r(T_C, \lambda) V(\lambda) d\lambda}{P_{el}} \quad (2)$$

Dans cette relation,  $\kappa$  est une constante qui vaut  $683\text{ lm/W}$  et permet de transformer les unités énergétiques en unités visuelles.  $P_r(T_C, \lambda) d\lambda$  représente la puissance émise dans un intervalle de longueur d'onde  $\lambda \pm \Delta\lambda$  et  $P_{el}$  correspond à la puissance électrique consommée par la lampe (exprimées toutes les deux en watts). Enfin,  $V(\lambda)$  est la réponse « normalisée » de l'œil humain (figure 5) ; il faut noter que cette « réponse » dépend fortement de la quantité de lumière disponible (nous voyons différemment le jour et la nuit !).

Dans ce contexte, on obtient par exemple, pour des lampes d'éclairage général, des efficacités lumineuses comprises entre  $13\text{ lm/W}$  (lampes de  $100\text{ W}$



**Figure 5 – Réponse normalisée de l'œil humain en fonction de la longueur d'onde**



**Figure 6 – Spectre d'une source de lumière blanche à partir de trois sources de bleu, vert et rouge**

ordinaires) et  $20\text{ lm/W}$  (lampe à halogène d'éclairage général). Il nous semble bien difficile de faire mieux avec un corps incandescent, sauf peut-être en remplaçant le filament métallique par un semi-conducteur (quelques essais ont été réalisés, mais le résultat est loin d'être exploitable...). Mais, comme nous l'avons déjà dit, l'émission d'un spectre continu n'est pas la seule solution pour obtenir de la lumière blanche.

Il semble que le meilleur compromis entre efficacité et qualité consiste à utiliser trois émissions, du bleu, du vert et du rouge, situées au maximum de sensibilité respectif des trois familles de cônes qui tapissent la fovea de l'œil. La figure 6 illustre le principe d'une source qui émettrait à ces trois longueurs

**LED** : light emitting diode  
**OLED** : organic light emitting diode

d'onde comme un corps noir à 3 000 K. Il est maintenant possible de calculer l'efficacité du rayonnement en transformant la relation (2) comme suit :

$$\eta_{\max} = \frac{\kappa \sum_{i=1}^3 P_{CN,i}(T_{CN}, \lambda_i) V(\lambda_i)}{P_{el}} \quad (3)$$

avec  $i = 1$  pour le bleu,  
 $i = 2$  pour le vert,  
 $i = 3$  pour le rouge.

$P_{CN,i}(T_{CN}, \lambda_i)$  représente la puissance de chacun des trois photons. Une application numérique conduit à 300 lm/W. Cette valeur est pratiquement trois fois supérieure à la meilleure efficacité que l'on sache réaliser aujourd'hui. Il nous semble donc raisonnable d'affirmer qu'il serait possible, en tenant compte d'un rendement de conversion énergétique compris entre 50 % et 65 %, de viser des efficacités lumineuses comprises entre 150 et 200 lm/W.

## 4. Familles des sources de lumière, tendances actuelles et perspectives

Toutes les sources produisant de la lumière artificielle à partir de l'électricité utilisent les deux procédés de base, l'incandescence et la luminescence. La figure 7 présente les différentes familles de sources susceptibles d'être utilisées pour produire de la lumière ou pour assurer des fonctions de signalétique.

Nous allons maintenant voir quels sont les progrès réalisés ces dernières années. Nous parlerons en particulier des lampes à incandescence et des lampes à décharge. En réalité, la diversité des sources de lumière ne se réduit pas à ces deux familles, des variantes existent et il faut ajouter les diodes électroluminescentes (LED et OLED) qui font l'objet de [IN 18].

### 4.1 Lampes à incandescence

Dans les lampes à incandescence actuelles, le radiateur (filament) en tungstène est chauffé par effet Joule. C'est un milieu très dense, la densité de puissance y est élevée et l'émission (de surface) présente une forte luminance. Son rayonnement est continu et suit approximativement (dans le visible) la loi des « corps gris » à la température du filament. Cependant, il n'est pas possible d'augmenter beaucoup la température car l'évaporation ponctuelle du filament et sa recristallisation réduisent très vite la durée de vie de la lampe par rupture du filament. Celle-ci dépend essentiellement, à travers ces deux phénomènes, de la tension, des allumages, des vibrations, du champ des températures autour de la lampe... L'autre conséquence de l'évaporation est le noircissement de l'ampoule. On restreint cette évaporation par la présence d'un gaz rare qui en diminue la vitesse. Toutefois, la grande dimension des ampoules limite la pression du gaz rare à une valeur proche de la pression atmosphérique. Le cycle tungstène-halogène permet, dans les **lampes à halogène**, de supprimer le dépôt de tungstène sur la paroi. On peut alors réduire la dimension des ampoules et augmenter considérablement la pression du gaz rare, ce qui restreint encore l'évaporation. Ce gain peut être utilisé directement, en terme

**Sur les LED :**  
 Diodes électroluminescentes pour l'éclairage [IN 18] de G. Zissis

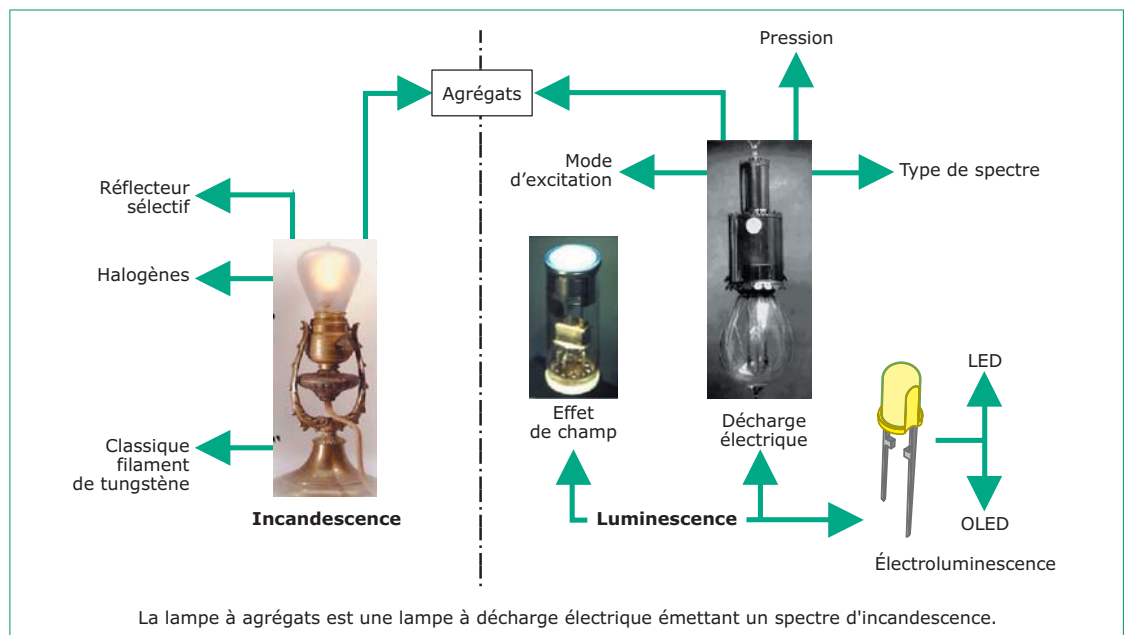


Figure 7 – Modes de production de la lumière artificielle à partir de l'électricité



de durée de vie, ou être converti, à durée de vie constante, en augmentation de température et donc d'efficacité lumineuse. Ces choix sont faits en fonction de l'utilisation.

Pour les lampes à halogène d'éclairage général, on a porté la température de couleur à 3 000 K pour une durée de vie de 2 000 h. Dans ces conditions, l'efficacité lumineuse est limitée entre 20 et 25 lm/W, ce qui est cependant bien supérieur aux 12 à 14 lm/W des lampes à incandescence ordinaires.

On a également cherché à modifier l'émissivité du radiateur, mais sans grand succès. Actuellement, quelques tentatives de remplacement du filament de tungstène par des matériaux semi-conducteurs à point de fusion élevé sont à l'étude, mais la technologie semble très complexe. On peut ainsi augmenter l'efficacité lumineuse en renvoyant une partie de l'infrarouge vers le filament. Cela peut se faire en déposant par CVD des couches minces (de l'ordre de 46 couches) sur la paroi de la lampe. Elles agiront comme filtre interférentiel. Les résultats sont prometteurs, mais cette méthode reste encore coûteuse.

Cependant, compte tenu de leur facilité d'emploi, de leur faible coût et de leur excellent indice de rendu des couleurs (on leur attribue par définition  $IRC \approx 100$ ), les lampes à incandescence ont sans doute encore un bel avenir.

## 4.2 Lampes basées sur la luminescence

Bien que la lampe à décharge électrique, réalisée pour la première fois en 1814 par Sir H. Davy et M. Faraday, fut la première application des plasmas, il a fallu attendre plus d'un demi-siècle avant d'en connaître une réalisation commercialisable.

Une lampe à décharge est constituée d'une enceinte étanche et transparente (ou translucide) qui confine le support gazeux de la décharge tout en laissant échapper le rayonnement que l'on veut utiliser. Cette enceinte, de forme et de dimensions très variables, contient un mélange de gaz et/ou de vapeurs métalliques, susceptibles de rayonner dans le domaine des longueurs d'onde désiré. La pression de l'élément actif peut être comprise entre quelques pascals et quelques  $10^6$  Pa.

On a l'habitude de parler de lampe basse ou haute pression (BP et HP respectivement). C'est sans doute un langage abusif, car la pression résulte de la température et de la densité, mais l'usage l'a confirmé. En pratique, la seule température (320 K à 5 000 K) ne peut guère faire varier la pression que d'un facteur inférieur à 20 alors que les densités varient d'un facteur 10 000. Il serait donc peut-être plus justifié de parler de lampes haute ou basse densité. Ce qui est certain, c'est qu'un gaz étant naturellement isolant, le « claquage » préalable de ce milieu est nécessaire pour assurer le passage du courant. Cela nécessite des pointes de tension de quelques centaines de volts à quelques dizaines de milliers de volts.

L'excitation du mélange est assurée soit par la circulation d'un courant électrique entre deux électrodes, soit par l'injection dans l'ampoule d'un rayonnement électromagnétique haute fréquence (radiofréquences, micro-ondes...). Enfin, la caracté-

ristique courant-tension d'une décharge étant négative ou très faiblement positive (cas des lampes haute pression en régime), une impédance est nécessaire pour stabiliser le courant de décharge.

### 4.2.1 Lampes haute pression

Les lampes haute pression fonctionnent à des pressions allant de  $10^5$  à plusieurs  $10^7$  Pa. Il faut remarquer que la plupart des lampes haute pression actuelles utilisent du mercure pour contrôler la mobilité électronique dans le plasma.

Pour ces lampes, on considère généralement que l'équilibre thermodynamique est approximativement réalisé de façon locale (ETL). Dans ces conditions, pour une décharge donnée, le milieu est assez bien caractérisé par sa température centrale  $T_C$ . Dans ces conditions, la luminance du rayonnement approche la luminance du corps noir à la température  $T_C$  dans les zones spectrales où l'épaisseur optique est supérieure à quelques unités. On se retrouve donc dans des situations qui répondent aux principes cités au paragraphe 3 mais avec des températures centrales comprises entre 4 000 K et 6 000 K et avec une certaine possibilité de jouer sur l'émissivité en sélectionnant les corps rayonnants. Les efficacités lumineuses atteintes sont actuellement comprises entre 50 et 110 lm/W. Par ailleurs, le milieu, bien que beaucoup moins dense qu'un solide, permet encore des émissions volumiques importantes ( $10^4$  lm/cm<sup>3</sup>).

Les lampes haute pression les plus connues sont les **lampes à mercure haute pression** ( $T_C \approx 3 000$  à 4 500 K,  $IRC \approx 50$ ,  $\eta \approx 50$  lm/W), utilisées pour l'éclairage de grandes surfaces ou de hangars et pour l'éclairage urbain :

- les **lampes à sodium haute pression** (LPS) ( $T_C \approx 2 100$  à 2 300 K,  $IRC \approx 15$  à 60,  $\eta \approx 50$  à 120 lm/W), destinées à l'éclairage urbain et routier ou à la mise en valeur des monuments ;

- les lampes à halogénures métalliques ( $T_C \approx 3 000$  à 6 000 K,  $IRC \approx 60$  à 95,  $\eta \approx 50$  à 110 lm/W) pour les stades, les esplanades ou l'éclairage urbain.

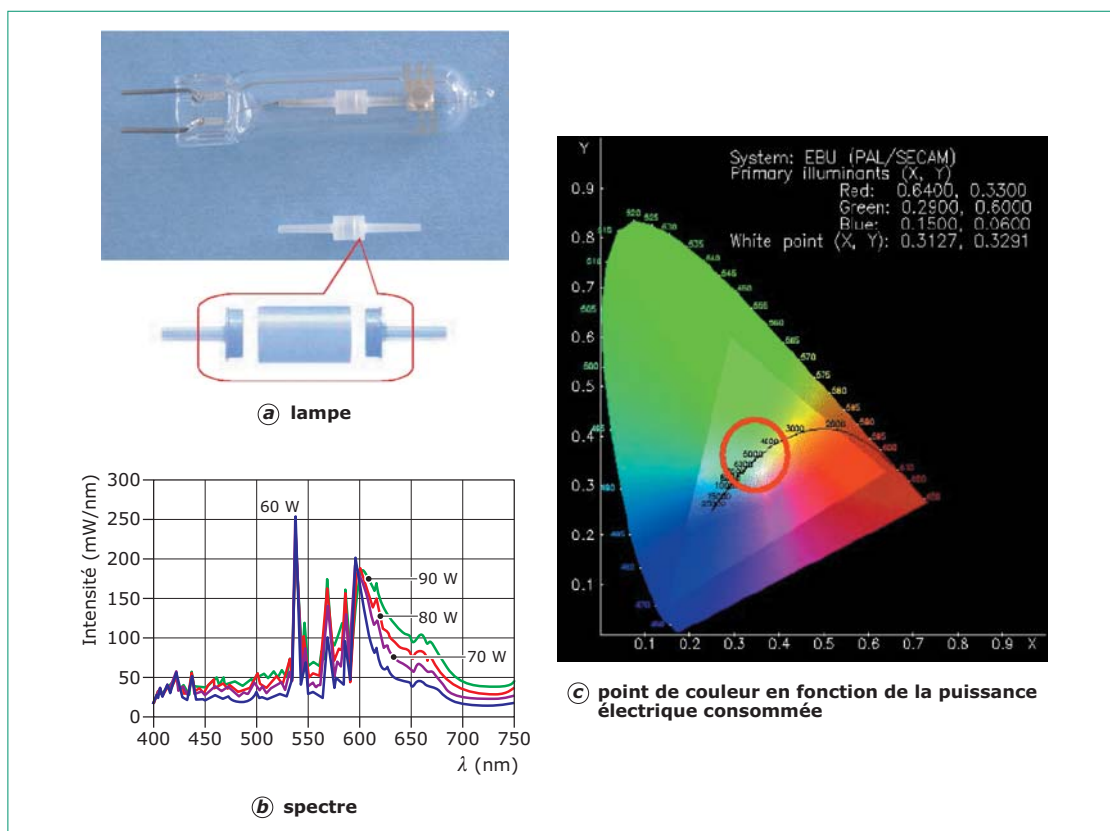
On peut, dans une certaine mesure, modifier le spectre en jouant, à travers le mode d'alimentation, sur le bilan de puissance. Ainsi, une lampe commerciale utilisant le sodium à « haute pression », fonctionnant sur ce principe, a été réalisée. Elle peut passer d'une température de couleur de 2 700 K (jaune), situation correspondant à une bonne efficacité mais à un mauvais indice de rendu de couleur, à une valeur de 3 100 K (blanc) avec un meilleur indice de rendu de couleur mais une efficacité inférieure.

Comme on pouvait s'y attendre, du fait des hautes températures atteintes dans les lampes haute pression, leur bilan énergétique indique des pertes thermiques qui représentent 25 à 50 % de la puissance électrique injectée dans la lampe. La diminution des pertes thermiques est donc un objectif primordial dans la recherche d'une efficacité lumineuse améliorée. Les pertes thermiques étant proportionnelles au gradient de température et au coefficient de transfert thermique, ces deux pistes sont à explorer. Il faut cependant noter que les phénomènes de transport de matière jouent un rôle souvent important et que leur maîtrise est nécessaire. Ces lampes à halogénure métallique présentent la complexité supplémentaire de mettre en jeu un équilibre chimique conduisant à

**Sur les lampes à incandescence :**  
Éclairage électrique.  
Lampes à incandescence  
[D 5 805] de M. La Toison

**CVD :** chemical vapor deposition

**Sur les lampes à décharge :**  
Sources de lumière de l'éclairage électrique.  
Lampes à décharge  
[D 5 810]  
de M. La Toison  
L'Optique Fluide [IN 11]  
de J.-C. Amblard et  
A. Vide-Amblard



**Figure 8 – Lampe à halogénure métallique à enveloppe céramique (70 W, trois pièces)**

une zone centrale atomique chaude (4 000 à 6 000 K) et à une zone périphérique moléculaire plus froide (1 000 à 2 000 K).

La découverte d'enceintes thermiquement plus résistantes permettrait également de diminuer le gradient de température tout en facilitant l'évaporation de certains composés peu volatils. Les lampes à halogénure métallique céramiques (C-MHL) vont en partie dans ce sens (figure 8). Ces lampes produisent de la lumière blanche de bonne qualité (IRC de l'ordre de 95), elles ont une bonne efficacité (pouvant dépasser 100 lm/W). Elles ont une longue durée de vie (plus de 10 000 h) et une excellente stabilité chromatique. Elles sont compactes et disponibles en plusieurs puissances nominales, allant de 20 à 400 W. Si les versions de forte puissance (à partir de 150 W) sont en train de conquérir le marché de l'éclairage urbain, les faibles puissances s'attaqueront bientôt au marché de l'éclairage intérieur et décoratif en remplaçant les lampes à incandescence.

Dans les lampes haute pression, le mercure est omniprésent, il est utilisé surtout pour son rôle de gaz de régulation, même si le xénon tend à prendre une place plus importante. Du point de vue du rayonnement, de nombreux éléments, susceptibles d'être vaporisés, soit sous forme atomique, soit intégrés dans des molécules vaporisables, ont été tes-

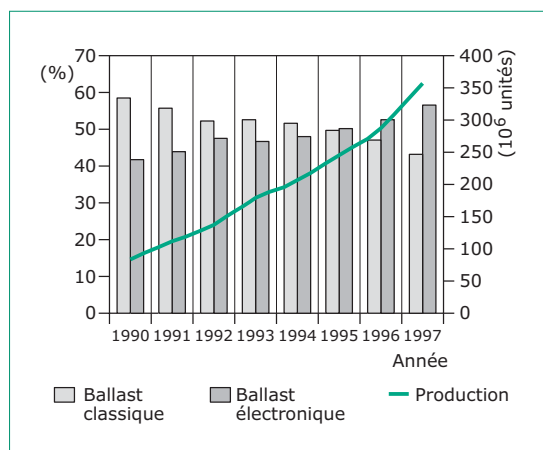
tés. Certains, comme le thallium, l'indium, le sodium, les terres rares, etc., sont déjà largement utilisés. D'autres ont récemment fait l'objet d'essais pas toujours concluants. Il faut noter ici la tentative de remplacer le mercure par le zinc proposé par Philips voici quelques années maintenant. Par ailleurs, le baryum, très utilisé comme activateur de cathode, peut produire une intense lumière verte tandis que l'ion  $Ba^{+}$  produit des photons rouges et bleus. Une lampe au baryum serait-elle donc capable d'atteindre 300 lm/W ? Malheureusement, ce corps est très difficilement vaporisable et surtout, il est très agressif vis-à-vis de la plupart des verres et céramiques connus. La décharge n'a pu fonctionner que dans un tube en inox...

Plus récemment, le Naval Research Laboratory a présenté des résultats obtenus avec  $MoO_3$ . Cependant, cette molécule, qui produit un rayonnement majoritairement dans le visible, est très difficilement vaporisable et son efficacité reste faible (37 lm/W). Toutefois, les émetteurs moléculaires n'ont sans doute pas dit leur dernier mot !

## 4.2.2 Lampes basse pression

Les lampes fluorescentes (appelées à tort « néons ») sont aujourd'hui des produits technologiquement matures. C'est par ailleurs le type de





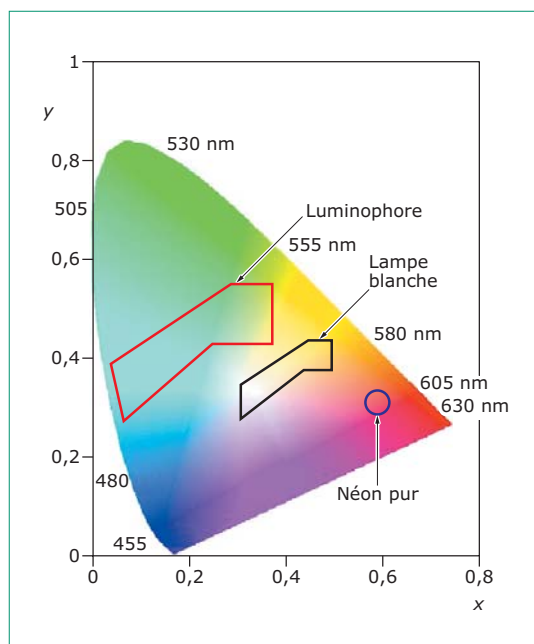
**Figure 9 – Évolution du marché des lampes CFL**

lampes à décharge le plus répandu. Actuellement, à lui seul, le Japon produit et commercialise quelque 350 millions de lampes fluorescentes par an tandis que l'Europe et les États-Unis ensemble produisent plus d'un milliard de tubes par an !

Il est vrai que, grâce à une meilleure compréhension des processus physiques qui régissent leur fonctionnement et aussi du fait de progrès importants réalisés dans le domaine des matériaux, les lampes fluorescentes ont été considérablement améliorées depuis leur apparition. C'est ainsi que la découverte de luminophores résistant au bombardement ultraviolet à 185 nm a permis de diminuer le diamètre des lampes fluorescentes de 38 à 24 mm puis à des diamètres encore plus petits. Ces diminutions successives du diamètre ont conduit à des lampes et surtout à des systèmes lampe-luminaire plus efficaces. Parallèlement sont apparues les lampes fluorescentes compactes (appelées aussi « lampes à économie d'énergie »).

Dans un contexte où les lampes « rétrécissaient », les dimensions et la masse du ballast ferromagnétique interdisaient toute tentative d'intégration. Par ailleurs, pour des raisons d'économie d'énergie, le nombre de lampes fluorescentes allait en augmentant pour remplacer les ampoules à incandescence ; les faux plafonds devaient supporter des masses croissantes. L'ère du ballast électronique, léger et compact, intégré dans le culot de la lampe, était arrivée. La prise en compte des phénomènes aux électrodes et des interactions entre le plasma et son alimentation ont permis le choix de fréquences et de formes d'onde visant à favoriser la production de lumière ou à en modifier les propriétés. Il semble que, pour les lampes fluorescentes, en augmentant la fréquence d'alimentation, les électrodes s'usent plus lentement et la durée de vie de la lampe augmente. Ainsi, depuis l'invention des CFL, le marché du ballast électronique pour lampes a connu une croissance exceptionnelle. Aujourd'hui, on produit plus de lampes avec ballast électronique intégré que de tubes à ballast ferromagnétique classique (figure 9).

Il reste cependant bien des **défis scientifiques** dans le domaine des lampes fluorescentes.



**Figure 10 – Lieu de couleurs de la lampe blanche au néon pur (brevet Osram-Sylvania)**

Le **lieu des couleurs** est l'emplacement d'une source dans le triangle de couleur de la Commission internationale de l'éclairage (CIE).

■ **Éviter 50 % de pertes dues aux luminophores** : la réponse réside sans doute dans l'utilisation de luminophores qui soient capables de produire deux photons visibles pour chaque photon UV incident. Cette solution est plausible mais encore très chère et peu efficace. Une autre solution consisterait à produire directement de la lumière visible en utilisant des molécules volatiles ou d'autres gaz. La recherche de nouveaux corps émissifs rejoint le second défi mentionné dans le cas des lampes haute pression.

■ **Éviter l'utilisation de mercure** : le mercure, liquide à la température ambiante et facilement vaporisable, qui présente aussi des propriétés atomiques intéressantes, semble être incontournable. Mais, ce métal produit, particulièrement à basse pression, un rayonnement ultraviolet dur et il est considéré comme un élément hautement toxique. Plusieurs possibilités peuvent être envisagées pour son remplacement :

- le xénon produit un rayonnement UV - C à 147 nm qui détruit les luminophores actuels et l'efficacité de production reste faible (presque 2,5 fois inférieure à celle du mercure). Toutefois, la décharge basse pression au xénon produit de la lumière instantanément ;

- le néon, l'un des premiers gaz utilisés dans le domaine des décharges, produit à basse pression (100 Pa) de la lumière rouge. En augmentant la pression à plus de 10<sup>4</sup> Pa et en utilisant des luminophores adaptés, on arrive à produire de la lumière blanche, mais avec une faible efficacité (20 lm/W). La figure 10 indique les coordonnées colorimétriques de cette lampe ;

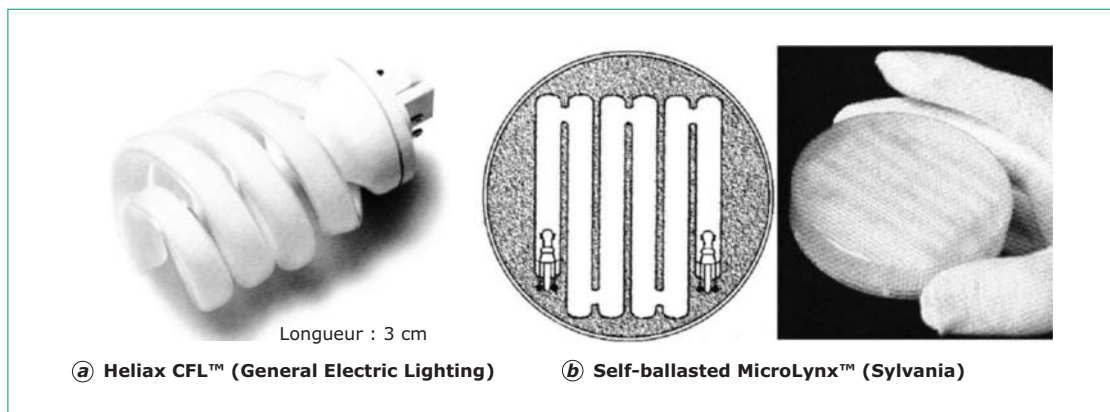


Figure 11 – Essais de miniaturisation de lampes fluorescentes

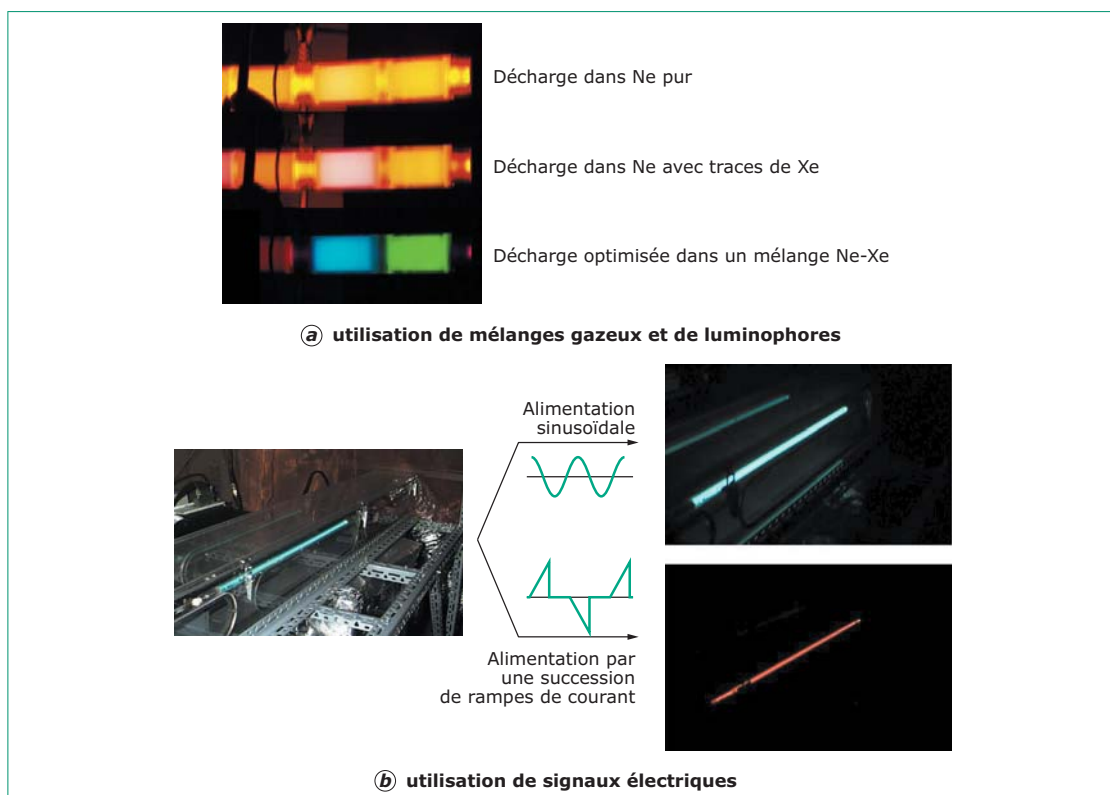


Figure 12 – Contrôle de la couleur des lampes basse pression

— les émetteurs moléculaires sont également une possibilité. Malheureusement, la présence des électrodes métalliques restreint dramatiquement le choix des gaz utilisables.

■ **Miniaturiser les lampes fluorescentes** : bien que les CFL soient plus « compactes » que les lampes fluorescentes linéiques, les efforts de miniaturisation de la source continuent sans relâche. La

figure 11 illustre deux nouveaux systèmes qui vont dans cette direction.

■ **Contrôler la couleur** : le contrôle de la couleur des tubes basse pression est d'une importance capitale pour des applications comme la signalisation et l'affichage publicitaire. Il est possible de contrôler la couleur de la décharge en choisissant convenablement le mélange gazeux (avec ou sans mercure) et

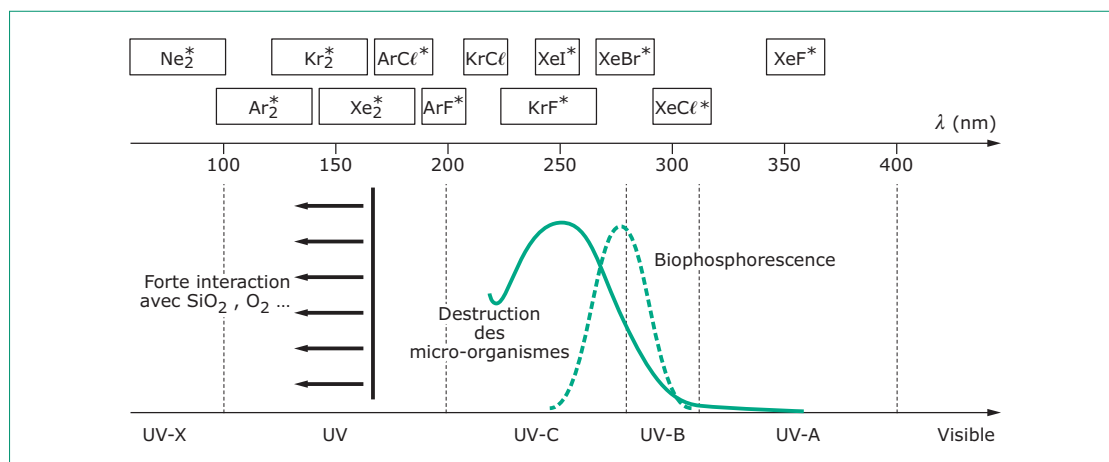


Figure 13 – Spectre d'émission d'excimères et courbes de sensibilité pour la destruction des micro-organismes et de la biophosphorescence

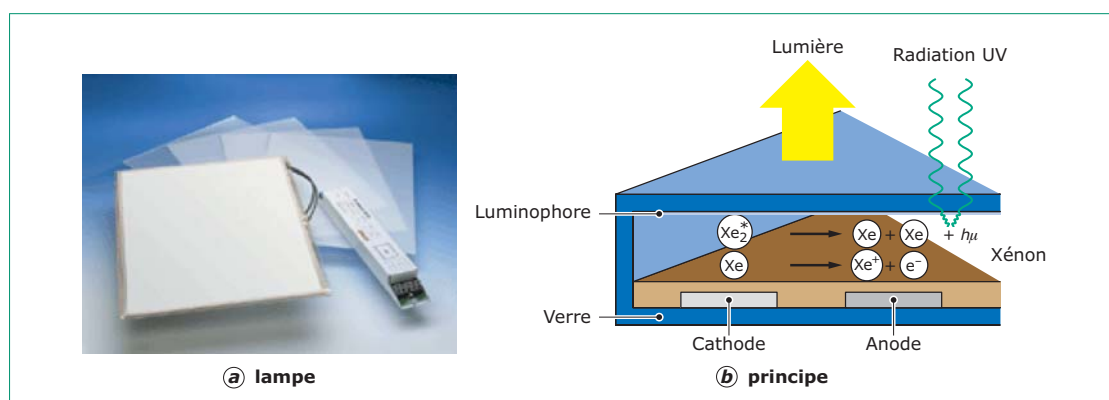


Figure 14 – Lampe Planon™ (d'après Osram)

les luminophores associés. La figure 12a montre cet effet. Une autre méthode, plus souple, consiste à contrôler l'excitation sélective des corps émissifs en changeant les caractéristiques de l'alimentation électrique de la décharge (forme d'onde, rapport cyclique, fréquence). Comme le montre la figure 12b, une lampe Hg-Ne peut basculer du bleu (Hg) au rouge (Ne) instantanément.

#### 4.2.3 Lampes sans électrode

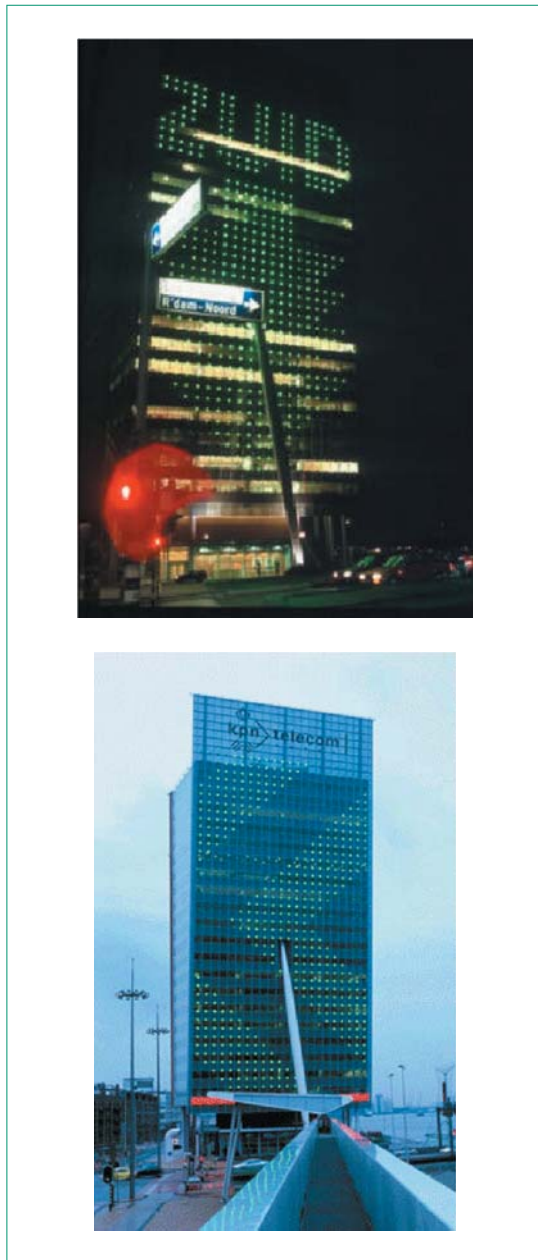
Presque toutes les lampes utilisées pour l'éclairage sont dotées d'électrodes pour injecter l'énergie électrique dans la décharge et assurer la transition de la conduction métallique à la conduction gazeuse. Bien qu'aujourd'hui, la technologie des électrodes soit mieux maîtrisée, la présence de ces parties métalliques dans le plasma limite sérieusement la durée de vie des lampes et restreint également le choix des gaz émetteurs. La suppression des électrodes résout plusieurs problèmes et simplifie par ailleurs la réalisation des lampes. Il est tout à fait possible d'injecter la puissance électrique dans une décharge en couplant, capacitivement ou inductivement, le plasma

avec le circuit d'alimentation. L'utilisation de micro-ondes est aussi une alternative.

Un avantage important des **lampes à excimère** réside dans l'absence d'électrodes, ce qui permet toute forme géométrique du tube. Par ailleurs, comme le montre la figure 13, il existe une très large gamme de longueurs d'onde car le choix du corps émissif n'est plus limité. Par exemple, Hereaus a proposé voici quelques années une lampe au Xe-SF<sub>6</sub> pour la production d'un rayonnement quasi monochromatique autour de 370 nm émis par XeF\*. Malgré ces avantages, cette technologie n'a pu être utilisée pendant les années 1990 que pour des applications industrielles (photopolymérisation, traitement de surface, dépollution...) en raison du caractère très agressif du fluor vis-à-vis du verre.

Toutefois, depuis quelques années, on a vu plusieurs tentatives d'utilisation des lampes à excimère pour l'éclairage général et la signalisation. Osram a ainsi commercialisé une lampe plate, la Planon™ (figure 14). Cette lampe utilise comme gaz actif le xénon (à une pression de quelques 10<sup>4</sup> Pa) pour

Le **rapport cyclique** est le quotient de la durée de l'état « haut » par la durée totale d'un cycle.



**Figure 15 – Panneau d’affichage de 900 Planon™ sur 3 000 m<sup>2</sup>** (Dutch Telecommunications Company KPN, Rotterdam)

produire un rayonnement à 147 nm provenant de la molécule excimère Xe<sub>2</sub><sup>+</sup>. Ce rayonnement est ensuite transformé en lumière visible par le biais de luminophores, comme dans une lampe fluorescente ordinaire. Cette lampe plate peut être utilisée pour l’éclairage général mais également pour la signalisation. En effet, il est possible de combiner plusieurs lampes Planon™ pour créer un très grand panneau

d’affichage visible à très grande distance. La figure 15 montre un exemple de réalisation : il s’agit du plus grand panneau d’affichage au monde, de 3 000 m<sup>2</sup> (toute la surface du bâtiment). Pour cette réalisation, 900 lampes Planon™ ont été utilisées. Dans cette application particulière, cette technologie peut devenir un sérieux concurrent des panneaux à plasma (très onéreux) et des matrices de diodes électroluminescentes (difficiles à contrôler) [IN 18].

La **lampe au soufre** est une autre tentative de réaliser une lampe sans électrode destinée à l’éclairage général. Elle a été développée par Fusion (États-Unis) pour l’éclairage public et l’illumination des monuments. Cette lampe est **alimentée par micro-ondes** et son efficacité est de l’ordre de 100 lm/W. Cependant, elle produit une lumière de relativement mauvaise qualité du point de vue du rendu des couleurs et son application reste, pour le moment, très limitée. Par ailleurs, le système nécessite un refroidissement permanent, ce qui oblige l’ampoule sphérique d’être en rotation rapide dans le système. La figure 16 montre cette lampe et ses caractéristiques principales.

#### 4.2.4 Sources à « effet de champ »

Il s’agit d’un nouveau type de source de lumière basé sur l’**émission par champ électrique**. Le principe de fonctionnement est similaire à celui d’un écran cathodique. Un ou plusieurs « canons » à électrons produisent des charges électriques par émission de champ ; ces charges sont accélérées dans le vide par une grille polarisée et enfin arrivent sur un écran couvert par de l’aluminium et un luminophore qui transforment l’énergie cinétique en lumière.

Récemment, NEC (Japon) a mis ce principe en application pour produire une lampe à effet de champ qui utilise comme canon à électrons une matrice de nanotubes creux. Il s’agit de la toute première application industrielle de ce nouveau matériau. La lampe (figure 17) produit 30 000 cd, elle est destinée à la fabrication de projecteurs de forte puissance.

#### 4.3 Lampe aux agrégats

Il s’agit d’une curiosité. Cette lampe est alimentée par micro-ondes mais fonctionne sur le même principe que la traditionnelle bougie de cire. En effet, comme le montre la figure 18, une petite ampoule en silice est placée dans une cavité résonante et elle est irradiée par micro-ondes. Dans l’ampoule se trouve un gaz rare (Ar ou Xe), des oxydes de métaux lourds (W ou Re) et un halogène (Br). Les micro-ondes ionisent le gaz rare et produisent un plasma dont la température centrale est de l’ordre de 6 000 K. À cette température, les oxydes se dissocient et les atomes du métal lourd diffusent vers la paroi de l’ampoule (ayant une température de l’ordre de 1 300 K), où ils vont de nouveau former des molécules à l’aide de l’halogène. Pendant ce parcours vers la paroi, les atomes du métal traversent une zone dont la température avoisine 4 000 K. À cette température, l’agrégation de plusieurs atomes et la formation de nanoparticules métalliques est favorisée. Dans ce contexte, ces nanoparticules deviennent incandescentes et produisent un spectre continu comme un corps noir à 4 000 K et dont le maximum

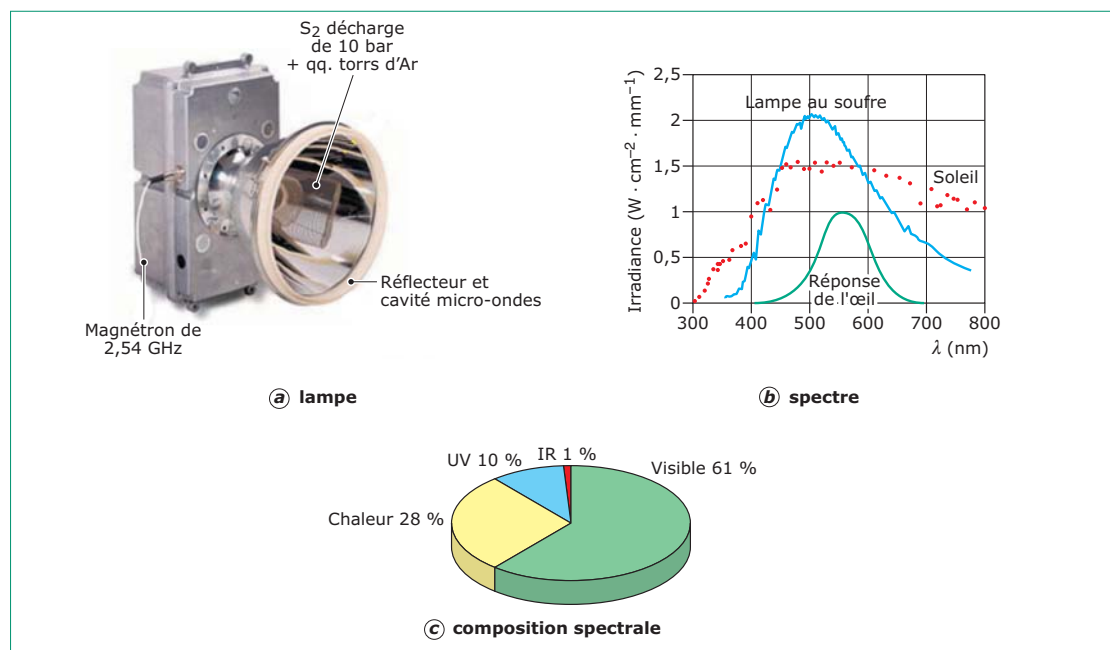


Figure 16 – Lampe au soufre moléculaire

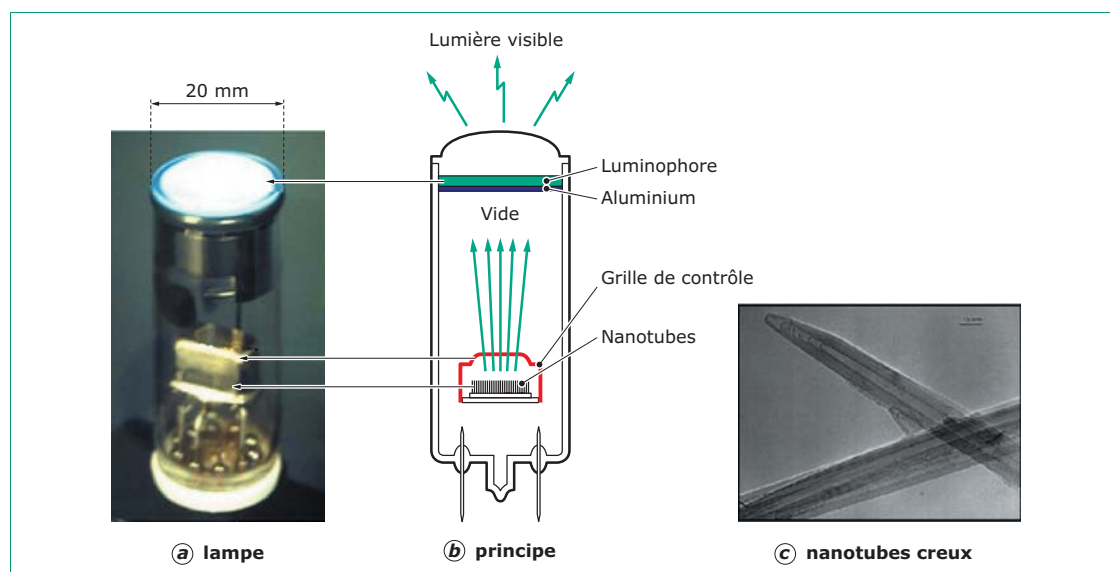


Figure 17 – Lampe à émission de champ

d'émission se situe dans le visible et non dans l'infrarouge comme dans une lampe à incandescence. Il s'agit bien d'une lampe à décharge produisant un spectre d'incandescence ! Son efficacité est de l'ordre de 60 lm/W et son indice de rendu de couleur égal à 100. La bougie utilise le même principe d'agglomération d'atomes de carbone mais elle ne nécessite pas d'électricité...

## 5. Conclusion

Dans le domaine de l'éclairage, les qualités demandées touchent de plus en plus à l'**aspect chromatique** des sources, à leur **durée de vie** et à leur **stabilité** (chromatique en particulier) ainsi qu'à des conditions d'emploi adaptées (allumage et rallumage instantanés, dimensions).



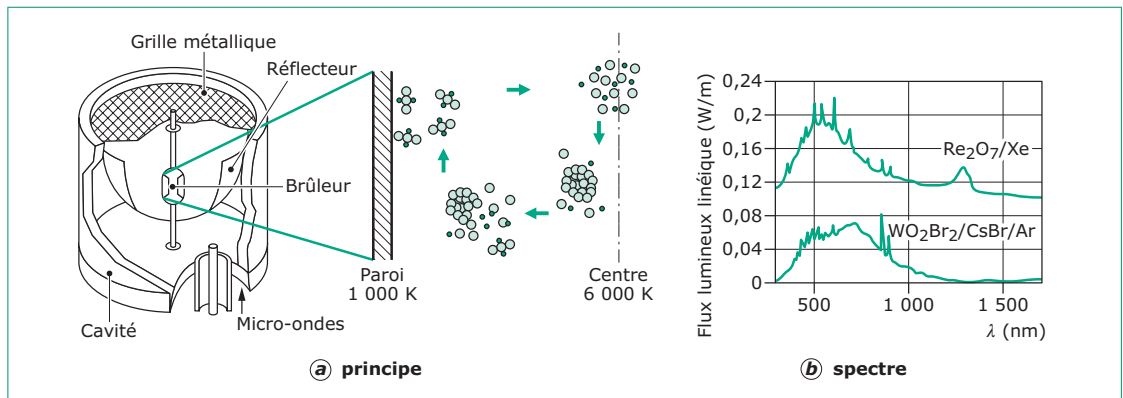


Figure 18 – Lampe à agrégats

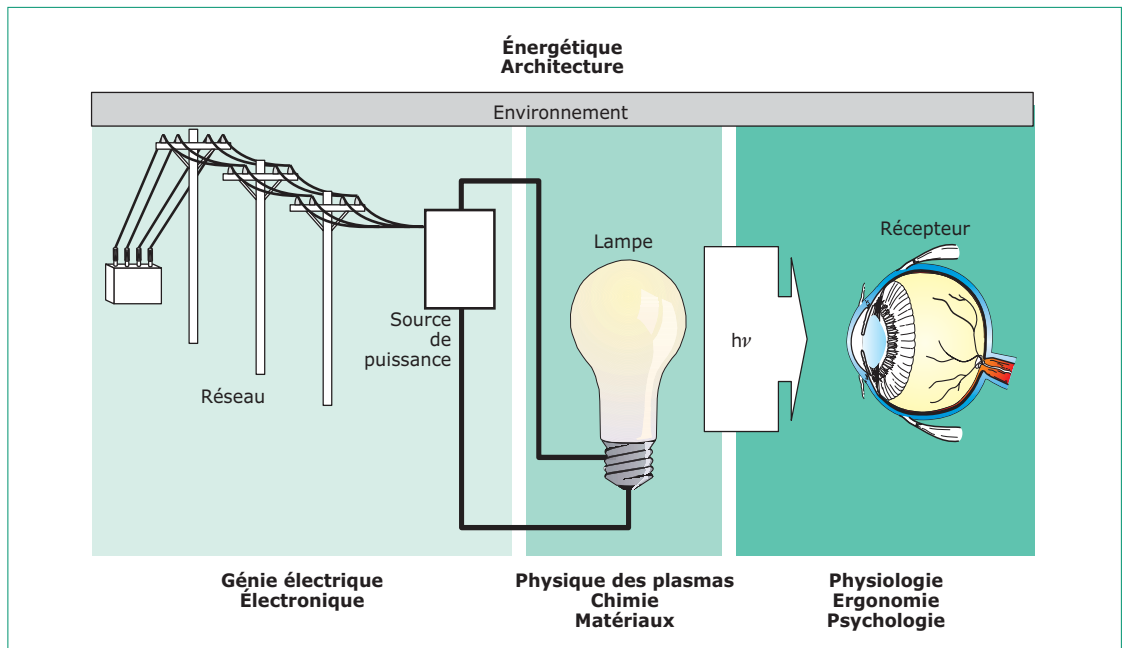


Figure 19 – L'optimisation d'une source de lumière doit prendre en compte l'intégralité du système, de la source de puissance au photorécepteur

Les réponses sont sans doute, d'une part, une meilleure connaissance de la chimie et des mouvements des fluides dans la source et, d'autre part, dans la maîtrise de l'électronique (mode d'alimentation) et de son adaptation à la lampe (électrodes ou couplage) et à la mise en régime. Enfin, une meilleure modélisation de l'interaction entre le réseau et la source et du vieillissement des lampes pourrait très vraisemblablement diminuer le coût de la gestion (maintenance en particulier) des réseaux urbains d'éclairage comme celle des bâtiments.

Augmenter la durée de vie de la lampe, améliorer son rendu de couleur, miniaturiser la source et le système, supprimer le mercure et autres éléments toxiques sans perte d'efficacité, obtenir une mise en régime instantanée..., voilà bien des objectifs intéressants pour le futur. Cependant, comme le montre la figure 19, si l'on veut remporter le pari d'une meilleure source de lumière, économe, qui respecte l'environnement et qui contribue à l'amélioration de la qualité et du confort de notre vie, il convient de traiter tous les aspects d'un système complexe et cela ne peut se faire que par le biais d'une approche réellement pluridisciplinaire.

## Bibliographie

### Ouvrages

- ZISSIS (G.) (éd.). – *Proceedings of the 10th International Symposium on the Science and Technology of Light Sources*. IoP Conference Series, 182, IoP Publishing, Bristol (2004).
- REA (M.) (éd.). – *Lighting Handbook*. 9<sup>e</sup> édition, IESNA Publishing, New York (2000).
- COATON (J.R.). – *Lamps and Lighting*. 4<sup>e</sup> édition, Edward Arnold Pub., Londres (1997).
- ELENBAAS (W.). – *The high pressure mercury vapor discharge*. North Holland Pub., Amsterdam (1951).
- CAYLESS (M.A.) et MARSDEN (A.M.). – *Lamps and Lighting*. Edward Arnold Pub., Londres (1983).
- WAYMOUTH (J.). – *Electric Discharge Lamps*. The M.I.T. Press, Cambridge (1971).

### Articles

- DAMELIN COURT (J.J.). – *L'arc électrique et ses applications*. 2, 217, CNRS, Paris (1985).
- VERWEIJ (W.). – Philips Res. Rep. Sup., 2, 1 (1961).
- WAIMOUTH (J.). – Invited Talk, 5th Symp. on Science and Technology of Light Sources, New York (1989).
- WHARMBY (D.O.). – IEE Proc., A, 140, 485 (1993).

### Dans les Techniques de l'Ingénieur

- AMBLARD (J.-C.) et VIDE-AMBLARD (A.). – *L'Optique Fluide*. [IN 11], Convertisseurs et machines électriques (2002).
- ZISSIS (G.). – *Diodes électroluminescentes pour l'éclairage*. [IN 18], Convertisseurs et machines électriques (2004).
- LA TOISON (M.). – *Sources de lumière de l'éclairage électrique. Généralités*. [D 5 800], Réseaux électriques et applications (1993).

- LA TOISON (M.). – *Éclairage électrique. Lampes à incandescence*. [D 5 805], Réseaux électriques et applications (1987).
- LA TOISON (M.). – *Sources de lumière de l'éclairage électrique. Lampes à décharge*. [D 5 810], Réseaux électriques et applications (1992).
- LA TOISON (M.). – *Éclairage électrique. Documentation*. [D 5 815], Réseaux électriques et applications (1987).
- LA TOISON (M.). – *Éclairage. Données de base*. [C 3 340], Bâtiment et travaux neufs (1986).
- LA TOISON (M.). – *Éclairage. Matériel et projets*. [C 3 341], Bâtiment et travaux neufs (1986).
- DUVAL (B.). – *Commission internationale de l'éclairage (CIE)*. [R 86], Mesures. Généralités (2001).

## Réglementation

- Décret n° 97-517 du 15 mai 1997 relatif à la classification des déchets dangereux.
- Directive 2002/95/CE du Parlement européen et du Conseil du 27 janvier 2003 relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques.

## Sites Internet

- COST Action n° 529 : Efficient lighting for the 21st century 2001-2006**  
<http://www.efficient-lighting.org>
- Efficient Lighting Initiative (ELI)**  
<http://www.efficientlighting.net>
- The European GreenLight Programme**  
<http://www.eu-greenlight.org>
- Lighting Research Office**  
<http://www.epri.com/LRO/index.html>