

Les sources de lumière pour l'éclairage

Éric Roaux

Résumé	Cet article présente les principales sources lumineuses utilisées aujourd'hui : lampes à incandescence, lampes à décharge et diodes électroluminescentes. L'historique nous montre tout d'abord que la majorité des grandes innovations est due à l'utilisation de nouveaux matériaux et des technologies qui leur sont associées. Puis, les caractéristiques électriques et photométriques des lampes sont analysées pour des domaines d'application spécifiques. Enfin, les perspectives d'avenir, qui tiennent compte entre autres des phénomènes environnementaux actuels, sont mentionnées.
Mots-clés	Lampes, incandescence, luminescence, halogène, mercure, sodium, halogénures métalliques.
Abstract	This article presents the principal sources of light used today: incandescent lamps, discharge lamps, and electroluminescent diodes. The history shows us first of all that the great innovations are mainly due to the use of new materials and technologies which are associated for them. Then, the electric and photometric characteristics of the lamps are analyzed for specific applications. Lastly, the future prospects are mentioned, taking current environmental phenomena into account.
Keywords	Lamps, incandescence, luminescence, halogen, mercury, sodium, metal halides.

L'éclairage électrique a mis longtemps à supplanter l'éclairage au gaz : les lampes à manchon à gaz Carl Auer von Welsbach (manchon aux oxydes de thorium et de cérium avec brûleur bunsen) ont fonctionné dans de nombreux pays après la guerre 1939-1945, notamment pour l'éclairage urbain. La mise sur le marché d'une innovation correspond souvent à des avancées technologiques importantes, même si la découverte des principes physiques utilisés est bien antérieure.

L'histoire des sources lumineuses et leur date de commercialisation sont importantes à connaître si l'on veut comprendre la technologie parfois dépassée de certaines lampes encore présentes sur le marché. En effet, peut-on imaginer un produit de grande consommation, comme la lampe à incandescence standard, n'ayant subi aucune modification depuis plus de 70 ans et fabriquée encore aujourd'hui à plus de dix milliards d'exemplaires dans le monde ?

De nombreuses sources ont été proposées pour la remplacer : lampes mixtes, tubes fluorescents dits lampes à économie d'énergie, diodes électroluminescentes... Certes, elles ont toutes conquis des secteurs d'application non négligeables, mais sans jamais effacer la célèbre lampe. La raison principale est que ces sources de remplacement présentent des caractéristiques intéressantes, mais également des inconvénients limitant leur diffusion : prix et qualité de la lumière émise.

Cet article décrit tout d'abord les différents types de sources lumineuses couramment utilisés aujourd'hui, en précisant leurs principales caractéristiques électriques et photométriques ainsi que leurs domaines d'application. Les perspectives d'avenir dans l'éclairage sont abordées ensuite, avec comme toile de fond les impératifs de réduction de la pollution (RT 2000 selon les accords de Kyoto) tout en éclairant mieux...

Deux principes physiques régissent le fonctionnement des sources lumineuses : l'incandescence et la luminescence. La présentation tiendra compte de ces éléments : tout d'abord les lampes à incandescence, standard et halogènes, puis les lampes à décharge, basse et haute pression, et enfin les diodes électroluminescentes.

Lampes à incandescence

Lampes standard

Les premiers balbutiements d'éclairage électrique obtenu en portant un filament à l'incandescence remonte au début du XIX^e siècle (Louis Jacques de Thenard en 1801, puis Sir Humphrey Davy vers 1805 et Auguste Arthur de la Rive en 1820). Le long développement de la lampe à incandescence (plus d'un siècle !) s'est focalisé tout d'abord sur la recherche du bon matériau pour le filament et sur son élaboration.

En 1903, Alexander Just et Franz Hanamann produisent la première réalisation exploitable d'une lampe utilisant un filament de tungstène. C'est en 1910 que William D. Coolidge trouve une technologie pour rendre le tungstène ductile et en faire un filament de grande longueur, nécessaire pour obtenir une résistance électrique suffisante, et aussi augmenter au maximum sa surface d'émission.

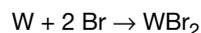
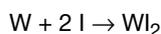
Le tungstène s'affirme comme étant le meilleur métal pour réaliser le filament non seulement parce qu'il possède le point de fusion le plus élevé (3 400 °C), mais surtout parce qu'il présente une très faible tension de vapeur, ce qui minimise son évaporation. Un autre avantage du tungstène est que son émissivité n'est pas constante en fonction des longueurs d'ondes : dans l'infrarouge au-delà de 0,8 µm son émissivité chute rapidement, ce qui minimise les pertes

rayonnées et le rend plus compétitif – pour ce qui concerne l'efficacité lumineuse⁽¹⁾ – que le corps noir ! La dernière amélioration importante est apportée par Irving Langmuir en 1912 qui trouve que l'évaporation du filament peut être considérablement réduite en remplissant l'ampoule d'un gaz neutre. On utilise tout d'abord l'azote, puis l'argon, et aujourd'hui le krypton.

On démontre que plus la masse de l'atome ou de la molécule est importante et la pression élevée, meilleure est la protection du filament.

Lampes aux halogènes

Malgré le gaz de remplissage à l'intérieur d'une lampe standard, on ne peut éviter l'évaporation du tungstène et sa condensation sur la surface interne de l'ampoule. Le flux lumineux d'une telle lampe chute d'environ 40 % à la fin de sa durée de vie normalisée à 1 000 h. L'introduction d'un halogène (iode ou brome) dans la lampe déclenche une réaction chimique entre les atomes de tungstène et l'halogène :



Cette réaction s'effectue aux températures de 1 000 °C pour l'iode et 1 500 °C pour le brome. L'halogénure de tungstène ne se dépose pas sur l'ampoule qui doit être à plus de 260 °C, et se dissocie dans la zone de température la plus élevée, c'est-à-dire près du filament. Le tungstène retourne alors sur celui-ci et l'halogène se trouve disponible pour entrer à nouveau en réaction. Il ne faut pas croire que le filament devient « inusable » car malheureusement, les atomes de tungstène ne reviennent pas nécessairement à la place qu'ils ont quittée.

Pour réaliser ce « cycle halogène », il est nécessaire de changer complètement la technologie de la lampe. La

figure 1 montre une lampe classique à côté d'une lampe halogène. L'ampoule de cette dernière est comparativement de petite taille pour assurer les conditions de température aux parois. Naturellement, le verre sodocalcique⁽²⁾ (point de ramollissement : 400 °C) de la lampe conventionnelle est remplacé par un verre aluminosilicate⁽³⁾ (verre dur ; point de ramollissement : 1 020 °C) ou par du quartz⁽⁴⁾ (1 580 °C), entraînant le double avantage suivant :

- augmentation de la pression du gaz de remplissage (plusieurs bars au lieu de 0,6 à 0,8 bar) ;
- utilisation du xénon, plus efficace que le krypton ; le prix élevé du xénon est compensé par une quantité réduite. En effet, le rapport des volumes entre les deux types de lampes est compris entre 100 et 1 000 selon les puissances.

L'halogène, qui n'apporte au départ qu'une maintenance de flux quasi parfaite (pas de noircissement), offre finalement des conséquences très importantes sur les caractéristiques des lampes, reportées dans le *tableau I*.

Tableau I - Caractéristiques des lampes à incandescence « standard » et halogène.

Type de lampe	Efficacité lumineuse (lm/W)	Durée de vie (h)	Température de couleur ⁽⁵⁾ (K)
Standard	12 - 14	1 000	2 700
Halogène	17 - 27	3 000 - 5 000	2 900 - 3 100

Lampes à décharge

L'origine des premières observations de décharges électriques dans des gaz raréfiés remonte à 1675, quelques années après l'invention du baromètre par Torricelli (1644). Jean Picard note des phénomènes lumineux dans le « vide » au-dessus du mercure. C'est seulement en 1846 que Julius Plücker, assisté du verrier Heinrich Geissler, réalise des décharges électriques dans des « tubes à vide » à l'aide des bobines d'induction de Ruhmkorff. De nombreux chercheurs comme Hittorff, Crookes et Goldstein constatent que les phénomènes lumineux obtenus varient avec la pression et aussi avec la nature des gaz ou des vapeurs en présence. Le premier essai d'éclairage est expérimenté en 1894 par D. McFarlan Moore, avec l'azote puis le dioxyde de carbone.

Lampes basse pression

Tubes fluorescents

Les premières expériences en laboratoire relatives aux poudres fluorescentes et phosphorescentes datent de 1857 (A.E. Becquerel). Dès 1860, J.T. Way réalise les premières manipulations de décharge électrique dans la vapeur de mercure, et il faut attendre 1901 pour que Cooper Hewitt construise une lampe à décharge de mercure basse pression stabilisée à l'aide de lampes à incandescence. En 1935, au congrès de l'IES (Illuminating Engineering Society) à Cincinnati, André Claude présente le premier tube fluorescent à « cathode chaude ». Les premiers tubes apparaissent sur le marché américain en 1938.

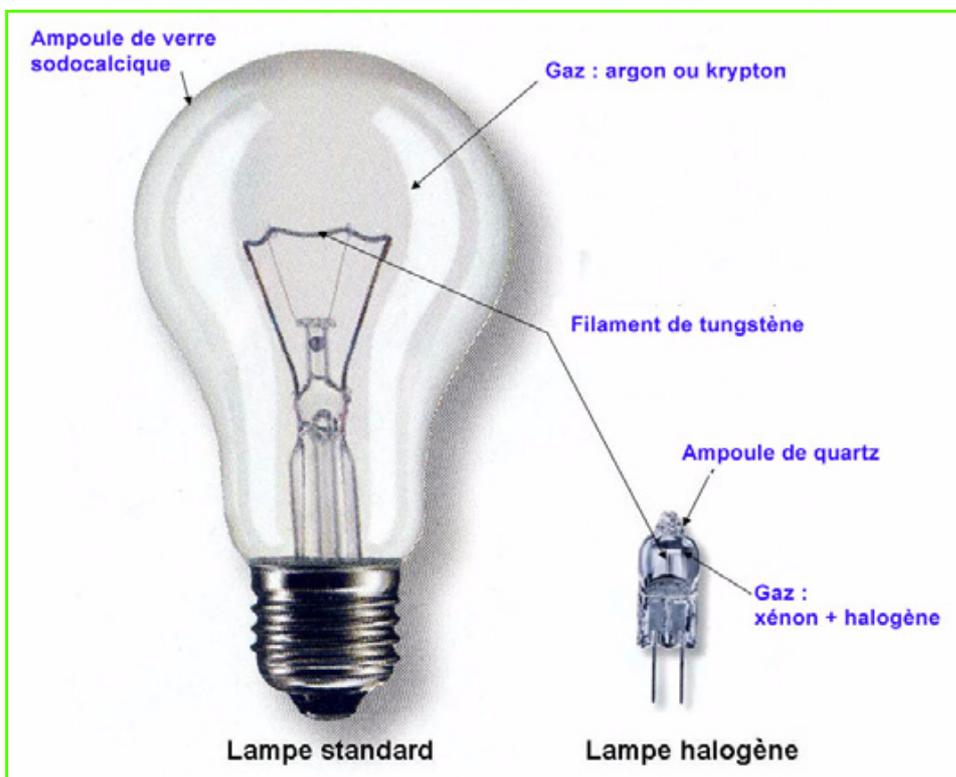


Figure 1 - Les lampes à incandescence.

La *figure 2* montre le fonctionnement du tube fluorescent : les électrons issus de la cathode en tungstène (chargée d'oxydes de barium, strontium et calcium) ou produits par le plasma (ionisation) entrent en collision avec des atomes de mercure qu'ils excitent ; ces derniers émettent un spectre riche en rayonnement ultraviolet qui excite à son tour un luminophore correctement choisi (voir l'article de B. Moine page 101). Les tubes fluorescents sont aujourd'hui

des lampes de grande diffusion – on en fabrique plus de quatre milliards/an –, d'une grande diversité de formes, de luminophores et de puissances, avec ou sans alimentation incorporée... Les applications sont multiples :

- domestique : lampes à économie d'énergie,
- bureaux, industries, commerces... : tubes linéaires, lampes compactes,
- gymnases, piscines, tunnels : tubes linéaires, lampes à induction.

La lampe à induction est une lampe fluorescente sans électrode, dont l'excitation de la vapeur de mercure est produite par un champ magnétique de haute fréquence. Elle a la particularité d'avoir une très grande durée de vie (> 50 000 h), les électrodes étant effectivement les principaux éléments limitant la durée de vie des lampes à décharge. La première lampe (Everlight 23 W), fabriquée et commercialisée par Matsushita, est apparue en 1989. En 1991, Philips a mis sur le marché une lampe à induction (QL) de 85 W ayant une durée de vie de 60 000 h.

La *figure 3* montre l'ensemble du système, qui comprend trois parties distinctes :

- la lampe contenant :
 - un amalgame de mercure (Bi/Hg) permettant d'augmenter la température optimale de fonctionnement de la lampe,
 - un gaz neutre (argon ou krypton) servant, comme dans le tube fluorescent standard, à l'amorçage (loi de Paschen⁽⁶⁾) et à l'optimisation de l'excitation des atomes de mercure en « réglant » le libre parcours moyen des électrons libres,
 - un luminophore.
- « l'antenne » constituée d'un noyau de ferrite et d'un bobinage qui délivre le champ magnétique.
- l'alimentation haute fréquence (2,65 MHz).

Ce type de lampe relativement coûteux est réservé aux applications où le remplacement (« relamping ») est particulièrement difficile : bâtiments de grande hauteur, piscines, tunnels...

Lampes au sodium

Le sodium est utilisé dans les décharges car d'une part, c'est un métal qui présente une tension de vapeur élevée à température ambiante (point de fusion : 98 °C), comme le mercure, et d'autre part, son spectre d'émission à basse pression (1 Pa) lui confère la médaille d'or de l'efficacité lumineuse avec 200 lm/W. En effet, son spectre est réduit dans le visible à un doublet à 589 nm proche du maximum de la courbe de sensibilité de l'œil (555 nm) (voir *figure 4a* : excitation énergétique spectrique⁽⁷⁾). Malheureusement, cette performance se paie très cher car évidemment, la lumière émise est monochromatique et très peu exploitable. Les

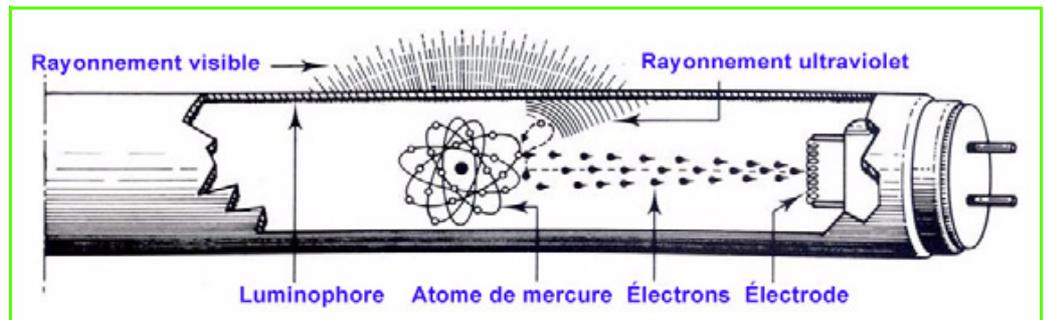


Figure 2 - Fonctionnement du tube fluorescent.

lampes sodium basse pression sont donc utilisées dans les applications où la reconnaissance des couleurs n'est pas importante : éclairage des routes, des tunnels, et éventuellement comme éclairage de sécurité. Historiquement, il est intéressant de noter que la première lampe a été développée en 1923 par A.H. Compton et C.C. van Voorhis aux États-Unis suite à la découverte par le même A.H. Compton en 1920 d'un verre riche en oxyde borique pouvant contenir le sodium. Les premières réalisations d'éclairage public en Hollande et Allemagne datent de 1931.

Lampes haute pression

Lampes à mercure

En 1906, Küch et Retschinsky observent que l'efficacité lumineuse d'une décharge de mercure croît avec la pression (donc avec la température). L'intensité des radiations visibles augmente au détriment des radiations UV. Mais de nombreux problèmes restent à résoudre concernant l'amorçage, la stabilisation de l'arc et surtout la technologie du quartz, les scellements, les électrodes... Ce n'est que vers 1935 que l'on commence à maîtriser ces technologies et que l'on commercialise les premières lampes à mercure haute pression avec des électrodes en tungstène, un brûleur en quartz ou en verre dur, un gaz de remplissage, et une électrode auxiliaire pour amorcer la décharge.

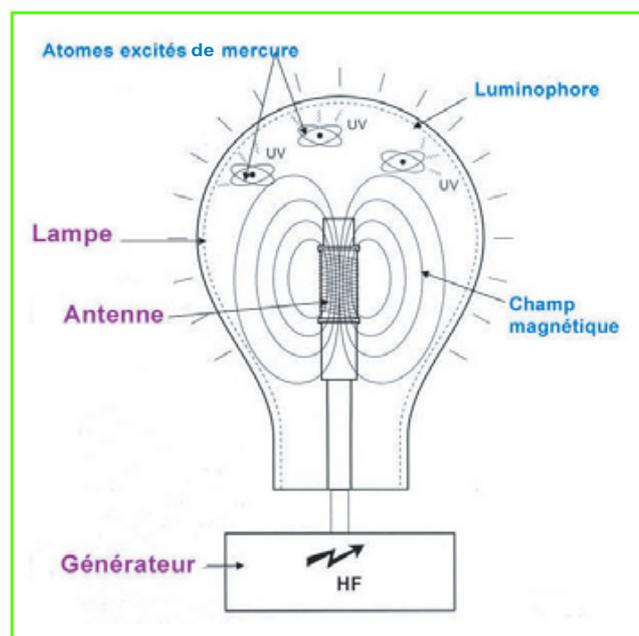


Figure 3 - La lampe à induction.

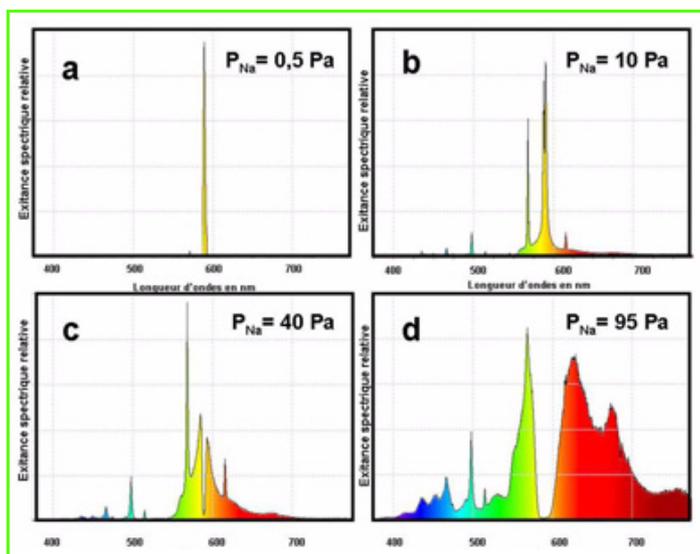


Figure 4 - Courbes spectrales de différentes lampes au sodium.

Afin de compléter le spectre d'émission relativement pauvre du mercure, limité dans le visible à deux raies bleues (404 et 434 nm), un raie verte (546 nm) et un doublet jaune (579 nm), la lampe est très vite équipée d'un luminophore émettant une lumière rouge excitée par le rayonnement UV résiduel. Malgré des caractéristiques aujourd'hui dépassées ($\eta = 60$ lm/W, indice de rendu des couleurs IRC⁽⁸⁾ = 52), ces lampes sont encore utilisées dans l'éclairage industriel et public.

Lampes au sodium

Comme pour le mercure, des recherches furent entreprises dès la réalisation des premières lampes sodium basse pression afin d'augmenter la pression. Malheureusement, aucun verre, y compris le quartz, ne pouvait contenir la vapeur de sodium à haute température. Ce n'est qu'en 1964 que Bill Loudon et Kurt Schmidt développèrent aux États-Unis un brûleur en alumine polycrystalline qui aboutit en 1965 à la commercialisation des premières lampes sodium haute pression.

L'accroissement de la pression ($P = 10$ kPa) apporte un changement radical du spectre d'émission (voir figure 4b-d), qui se poursuit ($P = 95$ kPa) jusqu'à l'auto-absorption de la raie fondamentale du sodium. Une telle lampe, appelée « sodium blanc », existe depuis 1985. Le tableau II résume les caractéristiques des principaux types de lampes sodium haute pression.

Tableau II - Caractéristiques des lampes au sodium haute pression.

Type de lampe	Efficacité lumineuse (lm/W)	Température de couleur proximale (K)	Indice de rendu des couleurs
Standard, $P = 10$ kPa	140	1 950	23
« Confort », $P = 40$ kPa	95	2 200	60
Sodium blanc, $P = 95$ kPa	48	2 500	85

Tableau III - Caractéristiques des lampes « triodures ».

Type de lampes « triodures » 400 W	Efficacité lumineuse (lm/W)	Température de couleur proximale (K)	Indice de rendu des couleurs
Sans luminophore	85	4 000	65
Avec luminophore	94	3 800	69

On constate que l'augmentation de la pression de sodium entraîne une indéniable amélioration de la qualité de la lumière (l'étalement du spectre d'émission implique un meilleur indice de rendu des couleurs) qui s'accompagne malheureusement d'une forte dégradation de l'efficacité lumineuse. Ceci explique une fois encore la raison principale de la multiplicité des types de lampes... Aujourd'hui, les lampes sodium haute pression jouent un rôle important dans l'éclairage public et industriel. Le « sodium blanc » semble incontournable dans l'éclairage des magasins grâce à sa température de couleur proche des lampes à incandescence, mais surtout grâce au métamérisme⁽⁹⁾ engendré par l'absence de radiations jaunes dans le spectre. Ceci a pour conséquence d'accentuer les stimuli verts et rouges ; ce phénomène visuel est particulièrement recherché dans l'éclairage des commerces de fruits et légumes...

Halogénures métalliques

L'idée d'ajouter d'autres vapeurs métalliques au mercure, afin d'augmenter à la fois l'efficacité lumineuse et surtout le rendu des couleurs, n'est pas nouvelle. En 1912, M. Wolke essaya de réaliser une lampe mercure avec du cadmium et du zinc. Hélas, d'une part la température de l'arc n'était pas suffisante pour que les additifs soient efficaces et d'autre part, ces vapeurs métalliques attaquaient le quartz. Ces deux obstacles (faible tension de vapeur et attaque du quartz) ont été levés grâce à l'utilisation des halogénures métalliques. Sans doute influencé par le développement des lampes aux halogènes (1959), G.H. Reilling dépose en 1961 le brevet d'une lampe mercure haute pression avec des composés halogénés (InI_3 , TlI , NaI , SnI_3 ...).

Rappelons que le cycle de l'halogène consiste en la formation de l'halogénure dans les parties froides et en la libération du métal et de l'halogène dans les zones de température élevée (filament pour les lampes à incandescence, et centre de l'arc électrique pour les lampes à décharge). Ainsi fonctionne la lampe aux halogénures métalliques, chaque halogénure ayant son propre cycle. Une première génération de lampes (lampe aux triodures : In , Na , Tl) est commercialisée à partir de 1965 pour l'éclairage sportif et pour remplacer avantageusement les lampes mercure et sodium dans l'industrie et les grandes surfaces commerciales. Pour cette dernière application, la deuxième enveloppe de la lampe est recouverte intérieurement d'un luminophore qui améliore les caractéristiques photométriques, comme l'indique le tableau III.

Une seconde génération, les lampes aux lanthanides (dysprosium, holmium, thulium...), offre des performances encore améliorées ($\eta = 100$ lm/W, avec un indice de rendu

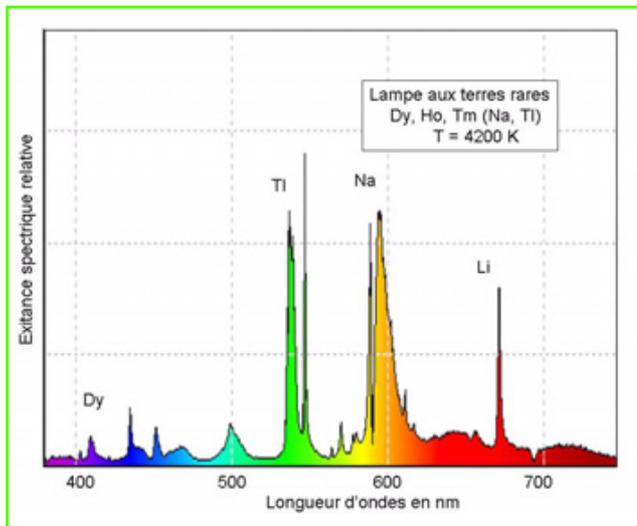


Figure 5 - Spectre d'émission d'une lampe aux halogénures métalliques.

des couleurs IRC > 90) et permet l'éclairage des stades de compétition ($P_{\text{lampe}} = 2 \text{ kW}$) et même des commerces ($P_{\text{lampe}} = 150 \text{ W}$). La figure 5 montre le spectre d'une telle lampe. Cependant, il reste encore quelques progrès à accomplir pour une utilisation massive, notamment dans l'application en boutiques et magasins : obtenir une température de couleur de 3 000 K, limiter la dérive de la température de couleur en fin de vie des lampes, et diminuer la puissance des lampes.

Depuis 1995, ce programme d'amélioration est pleinement réalisé grâce notamment au remplacement du brûleur quartz par un brûleur céramique (alumine polycristalline) identique à celui de la lampe sodium haute pression. Les puissances disponibles sont 70, 35 et même 20 W ; le choix de la température de couleur est de 3 000 ou 4 200 K. L'indice de rendu des couleurs peut atteindre 96 ! Ces lampes peuvent être alimentées électroniquement avec possibilité de régulation de la puissance (pour l'éclairage public).

L'application principale est le commerce, aussi bien pour l'éclairage général que pour l'éclairage d'accentuation (mise en valeur d'objets particuliers). Ces nouvelles lampes permettent également de développer de nouveaux concepts d'illumination des bâtiments.

Diodes électroluminescentes

Avant 2002, les diodes électroluminescentes étaient principalement utilisées pour la signalisation, mais depuis qu'il est possible d'obtenir une lumière blanche, elles sont vraiment entrées dans le monde de l'éclairage. Leurs caractéristiques physiques, qui sont continuellement en voie d'amélioration, en font de redoutables concurrentes des lampes classiques :

- durée de vie : 50 000 h avec une maintenance de flux de 70 %,
- petite taille permettant l'intégration de l'optique, d'où un rendement du « luminaire » associé proche de 100 % (au lieu de 60 à 70 % pour les luminaires équipés de lampes à incandescence ou à décharge),
- allumage instantané : < 100 ns (au lieu 200 ms pour les lampes à incandescence et de 3 s à 10 mn pour les lampes à décharge).

L'utilisation d'hétérojonctions III-V⁽¹⁰⁾ offre de nombreuses possibilités : les couleurs froides (vert, bleu, cyan) sont obtenues à partir de InGaN et les couleurs chaudes (rouge, ambre, rouge-orange) avec AlInGaP. La lumière blanche est obtenue par synthèse additive soit des trois diodes rouge, verte et bleue, soit de la diode bleue ($\lambda = 470 \text{ nm}$) avec un luminophore jaune. On peut ainsi faire varier la température de couleur de 3 000 à 8 000 K, avec un IRC > 90 pour des températures variant de 3 200 à 3 500 K.

Les améliorations concernent principalement le rendement de sortie de la lumière émise par la jonction et la puissance électrique de la diode. Dans les années 1990, la puissance était de 0,1 W ; aujourd'hui, elle peut atteindre 5 W. Évidemment, ceci nécessite l'utilisation d'un radiateur pour dissiper la chaleur. Bien que l'efficacité lumineuse ne soit pas le bon paramètre pour comparer les diodes aux lampes car les diodes émettent dans une direction donnée (il faudrait mieux parler d'intensité lumineuse), les valeurs publiées sont de 30 lm/W et l'on espère atteindre 100 lm/W d'ici dix ans, soit autant que les meilleurs tubes fluorescents actuels. Les domaines d'application des diodes s'étendent à l'automobile, les flashes pour caméra, les écrans plats, les illuminations, l'éclairage résidentiel, l'éclairage d'accentuation statique et dynamique (qui peut changer de couleur en fonction d'un scénario)...

Prospectives d'avenir

Comme nous venons de le voir, les innovations sont nombreuses, mais elles n'arrivent jamais à supprimer totalement les anciens types de lampes. Actuellement, les grands axes de recherche portent sur :

- **Le système global pour une application donnée** : on développe des sources, des appareillages et des luminaires associés pour une application bien précise. Citons par exemple l'éclairage des feux avant de voiture à l'aide de la lampe microdécharge au scandium D1 de 35 W, les projecteurs de stade avec des lampes aux halogénures métalliques de 2 kW...

- **L'utilisation de l'électronique** : depuis 1982, les tubes fluorescents peuvent être alimentés par des ballasts électroniques⁽¹¹⁾ haute fréquence. C'est un réel progrès en ce qui concerne le fonctionnement des tubes : meilleure durée de vie, pas de papillotement, pas d'effet stroboscopique, meilleure efficacité lumineuse, possibilité de régulation du niveau lumineux... Aujourd'hui, l'électronique s'applique au ballast pour les lampes haute pression de basse puissance ($P < 150 \text{ W}$). Elle pourra s'étendre dans l'avenir aux lampes de forte puissance.

- **La miniaturisation** : l'intérêt de développer des sources de plus en plus compactes est évident si l'on se réfère à l'association lampe/luminaire. Plus la source est petite, meilleur est le rendement du luminaire. C'est une des raisons pour lesquelles les tubes fluorescents n'ont cessé de voir leur diamètre diminuer : 38 mm en 1942, 26 mm en 1978, 16 mm en 1995... Soulignons que dans ce domaine, les diodes électroluminescentes ont pris une longueur d'avance.

- **L'environnement** : c'est sans doute l'axe le plus important, auquel se rattache d'ailleurs les trois précédents. L'amélioration de l'efficacité lumineuse de l'ensemble lampe/ballast et du rendement du luminaire associé est une priorité. Il est également important de tenir compte de l'utilisation de produits dangereux dans la composition des sources.

Les produits utilisés classés comme dangereux sont le mercure, l'antimoine, le baryum, le plomb, le thallium, le

thorium et les lanthanides. Beaucoup d'efforts ont été faits, par exemple en 1994 : réduction à 3 mg de la quantité de mercure dans les tubes fluorescents au lieu de 30 à 40 mg, suppression du verre au plomb... Dans ce domaine, il faut considérer le cycle de vie global de la lampe, qui comprend non seulement son rejet en fin de vie mais aussi sa fabrication, son utilisation, son conditionnement, son transport, son recyclage... À elle seule, l'utilisation représente 90 % de la pollution globale, c'est pourquoi l'efficacité lumineuse est importante. Si dans chacun des 145 millions de foyers européens, on changeait trois lampes à incandescence de 60 W par des lampes à économie d'énergie de 11 W, on économiserait avec une utilisation moyenne de 4 h par jour l'équivalent de dix centrales de 600 MW ! Les accords de Kyoto (RT 2000 Règlement thermique pour la réduction de l'émission de CO₂) vont dans ce sens en limitant les puissances installées dans les installations du tertiaire et en préconisant des lampes à fort rendement pilotées par électronique (détection de présence, modulation de la lumière).

Notes

- (1) *Efficacité lumineuse d'une source* : quotient du flux lumineux émis en lumens (lm) par la puissance consommée en watts (W).
- (2) *Verre sodocalcique* : verre dont les composants principaux sont SiO₂, CaO et Na₂O.
- (3) *Verre aluminosilicate* : verre dont les composants principaux sont SiO₂, CaO et Al₂O₃.
- (4) *Quartz* ou silice SiO₂.
- (5) La *température de couleur* d'une source exprime la chromaticité de son rayonnement en référence au corps noir (température du radiateur de Planck). Elle s'exprime en Kelvin (K). On peut admettre en première approximation, qu'un filament de tungstène émet un rayonnement dont la température de couleur est identique à celle du corps noir à la même température effective. Pour les lampes à décharge dont le rayonnement (spectre de raies) est éloigné de celui du corps noir, on calcule une

- « température de couleur proximale » qui est la température du corps noir ayant une chromaticité la plus proche de celle de la source à définir.
- (6) La *loi de Paschen* permet de déterminer la tension disruptive d'un gaz donné ou d'un mélange de gaz en fonction de la pression et de la distance interélectrodes.
 - (7) *Exitance énergétique* : quotient du flux énergétique émis par un élément de surface, par l'aire de cet élément. *Exitance spectrique* : densité spectrale du rayonnement en W/m².μm.
 - (8) *Indice de rendu des couleurs IRC* : nombre compris entre 50 et 100 caractérisant la qualité de la lumière émise en ce qui concerne la reconnaissance des couleurs.
 - (9) *Métamérisme* : phénomène induisant une perception différente de la couleur d'un objet en fonction de la nature de l'éclairage.
 - (10) *Hétérojonctions III-IV* : jonctions semi-conductrices constituées de plusieurs matériaux différents dont la couche de valence comporte respectivement trois et cinq électrons.
 - (11) *Ballasts électroniques* : expression courante pour désigner les appareillages électroniques qui assurent non seulement la fonction de stabilisation de la décharge – limitation du courant –, mais aussi son amorçage tout en maintenant un facteur de puissance conforme à la norme. Il serait alors plus juste de parler de « platines électroniques ».

Bibliographie

- Stoer G.W., *History of light and lighting*, Philips Lighting, **1986**.
- Roaux E., Les lampes halogènes, *Lux*, sept. **1989**.
- Elenbaas W., *Light sources*, Mac Millan, **1972**.
- Waymouth J.F., *Electric discharge lamps*, MIT Press, **1971**.
- Cayless M.A., Marsden A.M., *Lamps and lighting*, E. Arnold, **1983**.
- Valeur B., *Lumière et luminescence*, Belin-Pour la science, **2005**.



Éric Roaux

est expert auprès de l'Association Française de l'Éclairage (AFE).

Courriel : Eric.roaux@wanadoo.fr



Quelques exemples de lampes utilisées couramment aujourd'hui, montrant l'immense diversité des sources de lumière.