

Données sur l'émission de la lumière et les lampes*

par J.-L. VIGNES et F. PERROT
École Normale Supérieure de Cachan, 94235 Cachan Cedex

L'ÉMISSION LUMINEUSE

Une émission de lumière peut être produite par incandescence ou par luminescence.

Incandescence : l'énergie nécessaire à la production de lumière est apportée par agitation thermique. Par exemple, le soleil est une source naturelle de lumière par incandescence : la température de sa surface est entretenue par les réactions nucléaires internes.

Luminescence : correspond à tous les processus d'émission de lumière autres que l'incandescence. La luminescence se produit toujours en deux phases. Dans un premier temps, le cortège électronique des atomes du corps qui émettra la lumière est excité, dans un deuxième temps, sa désexcitation produit l'émission lumineuse. Selon la durée de persistance de la lumière on distingue :

– *La fluorescence* : de brève durée, de l'ordre de 10^{-8} secondes. Elle s'observe dans tous les états physiques et elle dépend peu de la température.

– *La phosphorescence* : de durée plus longue, de quelques fractions de seconde à plusieurs jours. Elle s'observe surtout dans les solides où elle est généralement due à la présence de défauts, à l'échelle atomique.

* La partie de l'article décrivant les lampes et leur aspect économique provient du chapitre gaz rares - lampes de la 5^{ème} édition (1993) de l'ouvrage de J.-L. VIGNES, «Données industrielles, économiques, géographiques sur des produits inorganiques et métaux», édité conjointement par le Centre de Ressources Pédagogiques en Chimie : Économie - Industrie - EXC-1 et l'Union des Physiciens, avec le soutien du SEDIC. Cette édition, entièrement mise à jour et complétée par rapport à la précédente, est actuellement disponible auprès de l'Union des Physiciens (voir annonce et commande dans ce numéro).

En fonction du type d'excitation on a :

- *La photoluminescence* : par absorption de photons.
- *L'électroluminescence* : par l'effet d'un champ électrique. Les éclairs présents dans un ciel orageux en sont une manifestation naturelle.
- *La catholuminescence* : par l'effet des rayons cathodiques qui sont formés d'électrons, de quelques keV d'énergie, accélérés dans le vide. Ces électrons excitent les atomes des particules luminogènes déposées sur la paroi intérieure d'un tube qui constitue l'écran d'un téléviseur, d'un oscilloscope...
- *La triboluminescence* : par l'effet d'un frottement, d'une déformation mécanique ou de la rupture de matériaux solides.
- *La chimiluminescence* : par réaction chimique in vitro, en général d'oxydo-réduction.
- *La bioluminescence* : par réaction biochimique in vivo. Les lucioles et les vers luisants en sont des exemples.

Dans le cas des lampes utilisées pour l'éclairage, seuls les processus suivants sont, actuellement, mis en jeu :

- l'incandescence pour les lampes à incandescence,
- l'électroluminescence pour les lampes à décharge,
- la photoluminescence pour les lampes fluorescentes.

QUELQUES PROPRIÉTÉS

L'efficacité lumineuse : c'est le rapport entre le flux lumineux émis (sur tout le spectre, visible, ultraviolet et infrarouge) et la puissance électrique fournie. Elle s'exprime en lumen par watt (lm/W).

Le corps noir : c'est un corps idéal dont le facteur d'absorption est égal à 1 pour toutes les radiations qu'il reçoit. L'intensité de son émission lumineuse, par incandescence, est fonction, d'après la loi de Planck, de la longueur d'onde et de sa température T , en Kelvin. L'intensité de l'émission augmente avec la température : elle devient visible (dans le rouge) vers 700 K et il faut atteindre 5 200 K pour que le maximum d'émission se produise à 555 nm. Pour des températures comprises entre 6 000 et 7 000 K, l'efficacité lumineuse passe par un maximum de 90 lm/W, 44 % de l'énergie étant rayonnée dans le visible. Un métal chauffé, par exemple le tungstène utilisé dans les lampes à incandescence, a un comportement proche de celui du corps noir.

Composition spectrale : chaque source lumineuse a un spectre spécifique ce qui lui confère, en particulier, sa couleur. Les lampes à incandescence ont un spectre continu alors que les lampes à décharge ont un spectre discontinu de raies. La caractérisation de la couleur peut se faire de différentes façons, en utilisant :

– *Les coordonnées trichromatiques.* On utilise le principe de la trivariance dû à Maxwell. Pour reproduire une couleur, il suffit de disposer de trois couleurs de base (lumières monochromatiques, de longueur d'onde fixe). La synthèse peut être additive (couleurs de référence : rouge, vert et bleu) ou négative (couleurs de référence : pourpre, cyan et jaune). Les niveaux d'intensité X , Y et Z des trois sources de référence définissent la couleur de la source. A partir de ces valeurs X , Y et Z , on définit les coordonnées trichromatiques $x = X / (X + Y + Z)$, $y = Y / (X + Y + Z)$ et $z = Z / (X + Y + Z)$, avec $x + y + z = 1$. Deux coordonnées seulement étant indépendantes, on peut représenter les couleurs dans un plan xy où toutes les couleurs réalisables se trouvent à l'intérieur d'un triangle (voir le diagramme de chromaticité adopté en 1931 par la Commission Internationale de l'Éclairage).

A l'intérieur du triangle, le lieu des points correspondant au corps noir est tracé.

Le point E représente la lumière blanche naturelle.

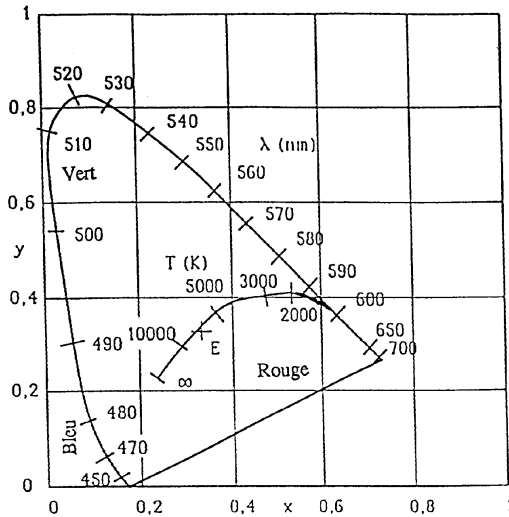


Diagramme de chromaticité adopté en 1931 par la CIE.

– *La température de couleur* : elle est définie par comparaison à celle du corps noir. Des corps quelconques, donc a priori non noirs, peuvent, d'après le diagramme de chromaticité, donner un point représentatif de leur couleur situé sur la courbe du corps noir. Leur couleur est alors donnée par la température du corps noir, en ce point. Si le point de couleur n'est pas situé sur la courbe mais à proximité, on utilise la notion de température de couleur proximale. Le soleil au zénith, par temps clair (point E du diagramme), correspond à une température de couleur de 5 800 K, c'est la référence dite lumière naturelle.

Les fabricants de lampes destinées à l'éclairage domestique cherchent à obtenir une couleur aussi voisine que possible de la lumière blanche naturelle.

LAMPES À INCANDESCENCE

À vide :

Les premières lampes à incandescence ont été mises au point simultanément, en 1879, par Th. Edison aux États-Unis et par J. Swan en Angleterre. Elles étaient constituées d'un filament de carbone chauffé par effet Joule, dans le vide afin d'éviter l'oxydation du carbone. Le carbone a été remplacé par le tungstène dont le point de fusion est plus élevé, ce qui permet d'obtenir une plus haute température et donc une couleur plus blanche. Pour augmenter la durée de vie du filament, dès 1900, il a été spiralé. Les lampes à vide ne sont plus guère utilisées actuellement, excepté pour les lampes de 25 W, utilisées en extérieur dans des guirlandes pour la décoration des rues et des arbres, par exemple lors des fêtes de Noël, et qui doivent supporter la pluie. L'absence relative de gaz limite la transmission de la chaleur du filament à l'ampoule et donc les chocs thermiques en présence de pluie.

À atmosphère inerte :

La présence de gaz rare permet, par rapport au vide, de réduire la sublimation du tungstène. La pression gazeuse à l'intérieur de la lampe, 80 kPa à 20°C, est telle qu'en fonctionnement elle équilibre la pression atmosphérique. L'argon, en présence d'environ 10 % d'azote qui permet d'éviter les arcs électriques, est généralement employé. Le krypton, plus cher, qui a une conductibilité thermique inférieure à celle de l'argon permet d'élever la température du filament et ainsi d'augmenter l'efficacité lumineuse de plus de 10 % tout en évitant un trop fort échauffement de l'ampoule en verre.

Les lampes à incandescence actuelles sont constituées par un filament de tungstène spiralé ou doublement spiralé chauffé par effet Joule jusqu'à 2 400-2 800°C. Il faut 1 m de fil de tungstène (2 fois plus fin qu'un cheveu) pour réaliser le filament de 3 cm d'une lampe de 60 W pour 220 V. La durée de vie d'une lampe (1 000 h) est limitée par la sublimation du tungstène. Lorsque celle-ci atteint 2 à 3 % (poids mortel), le filament se brise. Le tungstène qui quitte le filament noircit le verre de la lampe et diminue au cours du temps son efficacité lumineuse.

Les lampes opalisées sont obtenues par dépôt de dioxyde de titane, à l'intérieur de l'ampoule.

L'efficacité lumineuse d'une lampe à incandescence classique est de 10 à 15 lm/W. Le bilan énergétique d'une lampe de 100 W est le suivant : pertes de 34 W par convection dans le gaz et conduction par le culot, le verre... 65 W sont rayonnés dont seulement 5 W dans le spectre visible, le reste dans l'infrarouge.

À atmosphère active : aux halogènes (également appelées : tungstène halogène).

L'atmosphère est active dans le sens où elle permet la régénération du filament de tungstène. Ces lampes ont été développées vers 1960.

La présence d'iode ou surtout de brome (sous forme de bromure de méthyle ou de méthylène), introduit en faible quantité avec le gaz rare permet, dans les lampes aux halogènes, de former, à relativement basse température (300 à 700°C), des halogénures de tungstène gazeux (WBr_2 avec le brome) à partir du tungstène sublimé et de redéposer, par décomposition de ces halogénures, à haute température (celle du filament), le tungstène sur le filament. Ce même principe est utilisé dans la purification des métaux, par exemple pour le titane, selon le procédé Van Arckel. Le filament peut ainsi être porté à plus haute température, ce qui favorise la décomposition de l'halogénure de tungstène, tout en évitant le noircissement de l'ampoule. La pression gazeuse est, en fonctionnement, de 200 à 300 kPa (2 à 3 fois la pression atmosphérique). Celle-ci est obtenue en plongeant, lors de leur remplissage, les ampoules dans de l'azote liquide.

La réaction chimique entre les ions halogénures et la vapeur de tungstène ayant lieu à une température qui peut atteindre 650°C, il est nécessaire d'éviter des points froids inférieurs à cette température et, en particulier, il faut que l'ampoule atteigne au moins cette température. Pour cela, celle-ci doit être proche du filament pour être chauffée par ce dernier et doit être en silice vitreuse ou en verre «dur» aluminosili-

caté (température de ramollissement vers 1 020°C). La silice vitreuse présente l'inconvénient de cristalliser, puis de se briser au refroidissement, lorsqu'elle est en contact prolongé, à chaud, avec de la graisse, d'où la nécessité d'éviter le contact avec les doigts.

L'efficacité lumineuse d'une lampe aux halogènes est de 15 à 25 lm/W et la durée de vie atteint 2 000 h.

LAMPES LUMINESCENTES

Lampes à décharge :

Le premier tube à décharge a été développé à la fin du XIX^{ème} siècle par G. CLAUDE : c'était un tube à décharge au néon donnant une lumière rouge.

En pratique, pour l'éclairage, bien que les gaz rares soumis à une décharge sous haute tension entre deux électrodes donnent lieu au phénomène de luminescence, on utilise la luminescence produite par la vapeur de sodium ou de mercure. Lors de la fabrication du tube, du sodium ou une goutte de mercure sont introduits dans le tube. A la mise sous tension, la décharge s'établit dans le gaz rare, le tube s'échauffe, ce qui permet la vaporisation du métal (qui doit atteindre pour le sodium 270°C pour donner la tension de vapeur désirée : 0,4 Pa), puis la décharge passe progressivement à la vapeur métallique. En général, le tube à décharge est protégé par une enveloppe de verre. Les principaux types de lampes à décharge sont les suivants :

- Lampes à vapeur de sodium à basse pression : donnent une lumière jaune caractéristique ($\lambda = 589$ nm). Leur durée de vie est de 10 000 h et leur efficacité lumineuse de 100 à 200 lm/W. Elles sont utilisées principalement pour l'éclairage routier ;

- Lampes à vapeur de sodium à haute pression : la présence de plusieurs raies d'émission dans le spectre visible (569 nm et 617 nm) donne une lumière plus naturelle et un spectre plus continu pour les lampes à très haute pression. La température du tube atteint 1 200°C, il doit être en alumine frittée transparente. Ces lampes ont des performances lumineuses supérieures de 70 % aux lampes à vapeur de mercure haute pression. La durée de vie est de 9 000 h à 12 000 h, l'efficacité lumineuse de 80 à 140 lm/W. Elles sont utilisées pour des éclairages extérieurs, des halls d'usines... ;

– Lampes à vapeur de mercure à haute pression : elles émettent à 405, 436, 546 et 577 nm, mais pas dans le rouge. Un revêtement fluorescent de vanadate d'yttrium activé à l'euporium permet de pallier cet inconvénient. Le tube est en silice vitreuse. La durée de vie est de 9 000 h à 15 000 h, l'efficacité lumineuse de 35 à 60 lm/W. Elles sont utilisées pour l'éclairage public.

– Lampes aux halogénures métalliques : ce sont des lampes à vapeur de mercure avec des ajouts de terres rares et d'halogénures métalliques. Le tube est en silice vitreuse, leur durée de vie est de plus de 6 000 h, et leur efficacité lumineuse atteint de 70 à 90 lm/W. Elles sont utilisées, en fortes puissances, pour l'éclairage de stades et, en faibles puissances, pour celui de magasins.

Ces lampes ne sont pas utilisées pour l'éclairage d'intérieur car leur couleur est trop éloignée de la lumière naturelle.

Lampes à décharge fluorescentes : improprement appelées «au néon».

Leur développement a eu lieu vers 1930. Elles utilisent deux principes : l'électroluminescence qui permet d'obtenir un rayonnement ultraviolet et la photoluminescence, le rayonnement ultraviolet excitant les centres luminogènes déposés à l'intérieur du tube.

Le tube contient de l'argon sous quelques centaines de Pa, en présence d'une goutte de mercure. Sous basse pression, la vapeur de mercure qui atteint à 45 °C la tension de vapeur de 0,4 Pa émet, principalement, un rayonnement UV ($\lambda = 254$ nm) qui ne traverse pas le tube de verre et qui excite la fluorescence d'un mélange de poudres recouvrant intérieurement le tube. La lumière donnée par les tubes fluorescents dépend de la nature du mélange de poudres utilisé. Les tubes dits «blanc industrie» utilisent un phosphate de calcium activé par des ions antimoine et manganèse. Les tubes utilisés par les particuliers utilisent un mélange de poudre à trois bandes dans le spectre visible (bleu : 450 nm à l'aide de terbium 3+ ou d'ions baryum et euporium sur aluminat de magnésium ; vert : 540 nm à l'aide d'euporium 2+ ou d'ions cérium et terbium sur aluminat de magnésium ; rouge : 600 nm à l'aide d'euporium 3+ sur vanadate d'yttrium).

L'efficacité lumineuse des tubes fluorescents est de 50 à 80 lm/W, leur durée de vie de 10 000 h. Ils sont utilisés pour l'éclairage intérieur (bureaux, magasins, ateliers...), mais pas, pour les tubes classiques, en extérieur, des températures de 10°C diminuant de moitié leur flux lumineux.

Les tubes à lumière noire émettent dans l'UV de grande longueur d'onde (UVA : 315 à 400 nm). Ils sont invisibles et sans danger. Ils traversent le verre ordinaire et stimulent la fluorescence d'objets, de vêtements... Ils sont utilisés pour des effets scéniques, publicitaires, la photochimie...

DONNÉES ÉCONOMIQUES

Producteurs : en % du marché mondial et () chiffre d'affaires, en milliards de Francs, en 1991.

Compagnie Philips Éclairage	: 26 % (22)	Osram	: 13 %
General Electric	: 17 %	GTE Sylvania	: 12 %

En 1992, achat par Osram des activités nord-américaines de GTE Sylvania. Les activités non nord-américaines (dont les françaises) ont été vendues à un consortium d'investisseurs internationaux conseillés par Citicorp Venture Capital. En France, GTE Sylvania produisait les lampes Claude et Sylvania, chiffre d'affaires : 1 milliard de F, 1 300 salariés, production de lampes à incandescence à Lyon et de lampes fluorescentes à Saint-Étienne.

Osram (groupe Siemens, Allemagne) : chiffre d'affaires 1990 : 2,971 milliards de F, dont 0,815 réalisés en France par l'usine de Molsheim (67), pour 16 200 employés dont 595 en France. Les lampes halogènes sont produites à Eichstett (Allemagne), les lampes fluorescentes à Augsburg (Allemagne), la capacité de cette usine étant de 80 millions de tubes/an, les lampes à incandescence classiques, à Molsheim (Alsace, France), la capacité de l'usine (la plus importante d'Europe) étant de plus de 1 million de lampes/jour sur 15 lignes de fabrication.

Consommations : en France, en 1991, en millions d'unités.

Incandescence classique	: 262	Halogène	: 13,3
Décharge fluorescente	: 44,7	dont très basse tension	: 7,7
Décharge	: 3,8	crayon	: 4,4

La consommation de lampes à incandescence classiques représente, en volume, 81 % du marché français de l'éclairage.

BIBLIOGRAPHIE

- Techniques de l'ingénieur, 1987.
- Documents et informations d'Osram, zone industrielle, 67120 MOLSHEIM.
- Documents et informations du SIERT, 52-54, boulevard Malesherbes, 75008 PARIS.
- Informations de la Compagnie Philips Éclairage, B.P. 319, 28006 CHARTRES Cedex.
- B.U.P., n° 740, janvier 1992.
- Les sources de lumière, Édition Lux, 1991.
- F. DESVIGNES, Rayonnements optiques, Éditions Masson, 1991.