

# De la lampe à huile aux LED : histoire physico-chimique de l'éclairage artificiel

*Lionel Simonot est maître de conférences à l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs (ENSI) de Poitiers<sup>1</sup>, où il enseigne l'« éclairagisme » : la photométrie, la technologie des sources de lumière, les interactions lumière-matière. Ses activités de recherche portent sur les propriétés optiques de matériaux à différentes échelles : films minces nano-composites, peintures en glaci, vernis, objets obtenus par impression 3D, etc.*

## 1 L'éclairage avant l'électricité

### 1.1. L'éclairage à travers les âges

Avant l'électricité, l'éclairage était obtenu depuis la plus ancienne antiquité avec

les feux de bois, les lampes à huile, puis les bougies, si répandues jusqu'au XVIII<sup>e</sup> siècle (**Figure 1**).

Le XIX<sup>e</sup> siècle connaît une grande diversification : nouvelles lampes à huile, lampes à pétrole, éclairage au gaz, et finalement... l'électricité. Le dictionnaire Larousse de 1898

1. <https://ensip.univ-poitiers.fr/>

Figure 1

Quelques exemples d'éclairage avant l'électricité : feu de bois, lampe à huile, bougie, lampe à pétrole.



donne, au chapitre éclairage, un aperçu sur les différentes techniques de sources de lumière à travers des âges (Figure 2).

### 1.2. Incandescence et combustion

Avant l'électricité, l'éclairage n'est qu'une histoire de

combustion, symbolisée par le triangle du feu (Figure 3A). Le combustible peut être soit solide (le feu de bois), soit liquide avec l'huile, soit gazeux avec le gaz.

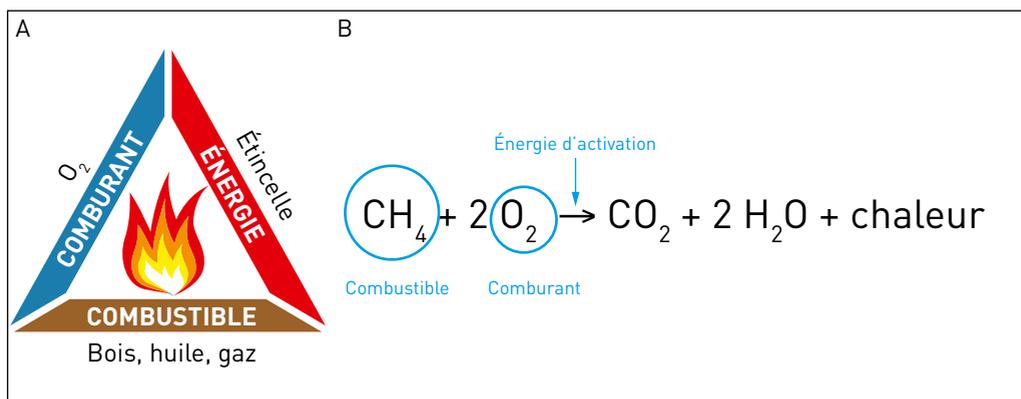
Dans la réaction présentée sur la Figure 3B, le combustible est le méthane, le comburant est le dioxygène de l'air ( $O_2$ ), et l'énergie d'activation est l'étincelle d'une allumette ou



Figure 2

Une vision du XIX<sup>e</sup> siècle de l'histoire de l'éclairage.

Source : Larousse 1898, chapitre « éclairage », illustration Maurice Dessertenne).



la flamme d'un briquet. Les produits sont le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O). La combustion dégage également de la chaleur. L'émission de lumière provient du phénomène d'incandescence mais aussi de ce que la combustion reste incomplète : il manque de l'oxygène dans la flamme et on observe des particules de carbone non brûlées et portées à haute température. Elles rayonnent une lumière qui donne la couleur de la flamme. La combustion incomplète est montrée par une petite expérience réalisable dès l'école primaire :

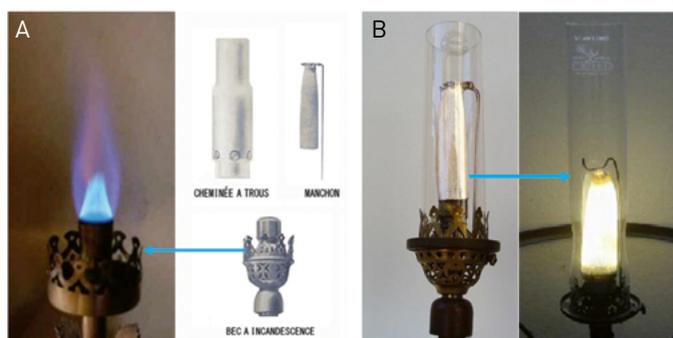
on place une petite coupelle au-dessus de la flamme, et on observe le dépôt noir des particules de carbone non consommées par la combustion.

Il faut attendre la fin du XIX<sup>e</sup> siècle pour voir dissociées incandescence et combustion avec le bec Auer (Figure 4A). Ce n'est autre qu'un bec Bunsen (Figure 4B), qu'on a entouré d'un « manchon » où se produit l'incandescence comme conséquence du chauffage.

C'est aussi à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle qu'a été fabriquée la première lampe électrique à incandescence (Figure 5), appelée à un

**Figure 3**

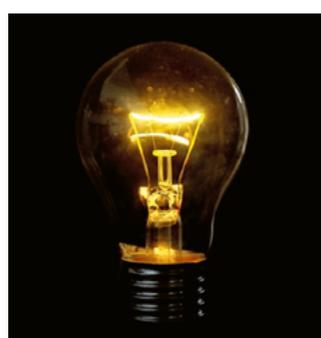
A) triangle du feu ;  
B) un exemple de réaction de combustion : la combustion du méthane.



**Figure 4**

Une première dissociation de la combustion et de l'incandescence : le bec Auer (B) issu du bec Bunsen (A).

Source : [www.lumieredeloil.com/lumiara/fr/gasfr.htm](http://www.lumieredeloil.com/lumiara/fr/gasfr.htm)



**Figure 5**

Le premier système d'incandescence sans combustion : la lampe électrique à incandescence.



**Figure 6**

Une émission de lumière sans incandescence : la luminescence.

- A) bioluminescence ;  
 B) chimiluminescence ;  
 C) électroluminescence ;  
 D) photoluminescence.

Sources : B) Glowee ; D) Olikrom.

grand destin : c'est aussi une source de lumière incandescente mais sans combustion. On utilise un filament qui est chauffé par le courant électrique qui le traverse, et émet la lumière par incandescence.

### 1.3. La luminescence : une autre façon d'émettre la lumière

La lumière peut être émise par incandescence, elle peut aussi

venir du phénomène de luminescence. Quand on excite un matériau, il se désexcite pour revenir à son état fondamental et émet l'énergie correspondante vers l'extérieur. Si cette énergie est sous forme d'un rayonnement lumineux, on dit qu'il y a luminescence.

La **Figure 6** illustre différents types de luminescence : Glowee, une startup française, cultive des algues qui produisent de la lumière par *bioluminescence* (**Figure 6A** à droite). Voir aussi le chapitre de S. Rey dans l'ouvrage *La chimie et les grandes villes*, EDP Sciences, 2016), les feux d'artifice produisent leur lumière initiée par une réaction chimique dite de *chimiluminescence*, tout comme les bracelets lumineux des boîtes de nuit (**Figure 6B**). L'*électroluminescence* (**Figure 6C**) intervient lorsque ce sont des particules chargées qui provoquent l'excitation de la matière, qui produit *in fine* l'émission lumineuse – c'est le cas des aurores boréales ou des éclairs des orages. Enfin, citons la *photoluminescence* (**Figure 6D**), illustrée par ces bandes de peinture pour la signalisation routière : elles se rechargent en journée, puis réémettent pendant la nuit (voir le **Chapitre de J.-F. Letard** dans *Chimie et lumière*, EDP Sciences, 2021).

Ces différents phénomènes peuvent être utilisés pour créer de l'éclairage.

Cependant, sans apport électrique, les émissions de lumière par luminescence sont trop faibles pour être envisagées pour de l'éclairage général.

## 2 L'éclairage électrique

### 2.1. La luminescence en éclairage électrique

Les tubes fluorescents et les LED<sup>2</sup> blanches, sont deux sources de lumière très différentes mais elles mettent en jeu deux phénomènes de luminescence à la fois : l'électroluminescence et la photoluminescence. Dans les deux cas, un courant électrique circule dans un matériau initialement isolant.

Dans un tube fluorescent (**Figure 7**), on excite un gaz (en l'occurrence de la vapeur de mercure) par une décharge électrique. Les atomes de mercure se dés excitent par *électroluminescence*. L'émission se trouve surtout dans les longueurs d'onde de l'ultra-violet... Mais on veut de la lumière blanche. On utilise alors le deuxième phénomène de luminescence, la *photoluminescence*. Les tubes sont tapissés à l'intérieur par une poudre fluorescente qui va transformer l'ultra-violet en lumière visible. Ces deux phénomènes en série donnent les tubes fluorescents.

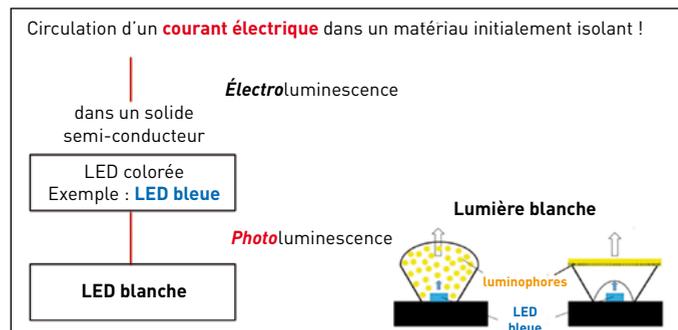
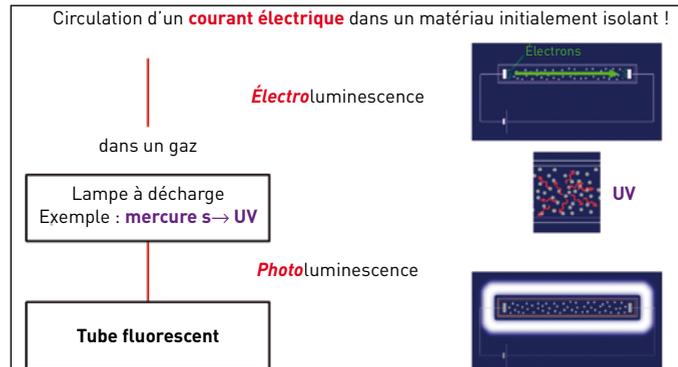
Le fonctionnement des LED blanches consiste à faire passer un courant électrique dans un matériau solide semi-conducteur. Initialement isolant, l'injection d'électrons permet de le rendre conducteur. Des électrons sont dans un état excité et leur

dés excitation produit de l'électroluminescence. La longueur d'onde de la lumière émise (sa couleur) dépend du matériau semi-conducteur. Pour produire de la lumière blanche, on utilise une LED émettant dans le bleu et recouverte d'un matériau fluorescent. Une partie du rayonnement bleu est transmise et une autre partie va exciter les luminophores et être transformée en lumière jaune (**Figure 8**). Par synthèse additive<sup>3</sup>, le bleu et le jaune produisent la lumière blanche.

3. Synthèse additive : procédé qui consiste à combiner plusieurs couleurs de lumière en vue d'obtenir une certaine couleur.

**Figure 7**

Une application des phénomènes d'électroluminescence et de photoluminescence : le tube fluorescent.



**Figure 8**

Une application des phénomènes d'électroluminescence et de photoluminescence : la LED blanche.

2. Diode électroluminescente (« Light-Emitting Diode ») : dispositif qui peut émettre de la lumière lorsqu'il est traversé par un courant électrique.



Figure 9

Des éclairages différents pour différents usages : A) éclairage domestique ; B) éclairage tertiaire ; C) éclairage public.



Figure 10

Un brevet qui révolutionne l'éclairage : la lampe à incandescence de T. Edison (1847-1931).

Retour sur l'histoire de l'éclairage électrique. Au  $xx^e$  siècle, on utilisait pour l'éclairage domestique pratiquement uniquement des lampes à incandescence (Figure 9A), et pour l'éclairage tertiaire (l'éclairage de bureau, des salles de classe...) des tubes fluorescents (Figure 9B). Pour l'éclairage public enfin (l'éclairage des routes par exemple), c'était le domaine des lampes à décharge<sup>4</sup> à haute pression (Figure 9C).

## 2.2. Edison et la lampe à incandescence

La lampe à incandescence est l'invention de Thomas Edison (Figure 10) – brevet déposé en 1879 –, mais il n'a pas été le premier à en faire un prototype, et, tout le long du  $xix^e$  siècle, de nombreux essais de ce type de lampe ont été conduits. C'est Edison qui a réussi une version commercialisable et qui s'est répandue rapidement dans le monde entier. La lampe à incandescence a permis à

4. Lampe à décharge : lampe composée d'une ampoule contenant un gaz et dans laquelle on fait passer un courant électrique.

Edison de promouvoir l'usage de l'électricité pour chaque foyer, et par ce biais le système de fabrication (à l'époque génératrice en courant continu) et de distribution de l'électricité.

La Figure 11 compare une lampe à incandescence du temps d'Edison avec une lampe plus contemporaine. La lampe d'Edison est une lampe « à vide » qui évite la présence d'oxygène indispensable pour obtenir une durée de vie du filament acceptable. Cette lampe fait usage de fibres de bambou en fils droits.

La Figure 12 est une présentation du tableau périodique des éléments qui met en relief leur température de fusion : plus la couleur est blanche, plus la température de fusion est élevée. L'intérêt, pour faire un filament, est d'avoir la fibre la plus lumineuse donc à température la plus élevée. Edison avait sélectionné cette fibre de bambou, qui est très riche en carbone et donc permettait de monter haut en température.

Au début du  $xx^e$  siècle, on se tourne vers les éléments métalliques pour finalement se stabiliser autour du tungstène (W).

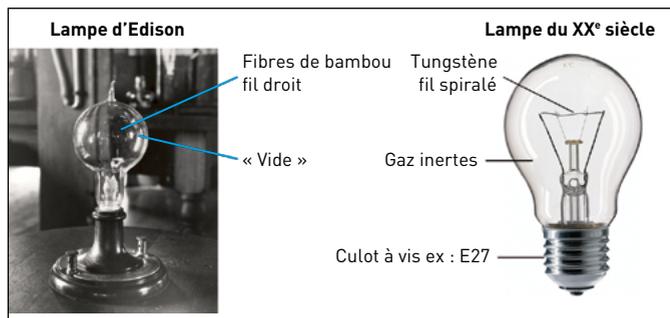
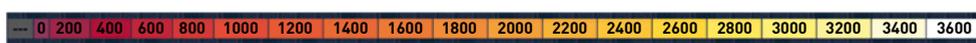


Figure 11

De la lampe d'Edison à la lampe du  $xx^e$  siècle : quelques changements notables.

	IA																VIII A																															
1 K	1 H																2 He																															
2 L	3 Li		4 Be																5 B		6 C		7 N		8 O		9 F		10 Ne																			
3 M	11 Na		12 Mg		IIIB		IVB		VB		VIB		VIIB		VIIIB		IB		IIB		13 Al		14 Si		15 P		16 S		17 Cl		18 Ar																	
4 N	19 K		20 Ca		21 Sc		22 Ti		23 V		24 Cr		25 Mn		26 Fe		27 Co		28 Ni		29 Cu		30 Zn		31 Ga		32 Ge		33 As		34 Se		35 Br		36 Kr													
5 O	37 Rb		38 Sr		39 Y		40 Zr		41 Nb		42 Mo		43 Tc		44 Ru		45 Rh		46 Pd		47 Ag		48 Cd		49 In		50 Sn		51 Sb		52 Te		53 I		54 Xe													
6 P	55 Cs		56 Ba		57 La		72 Hf		73 Ta		74 W		75 Re		76 Os		77 Ir		78 Pt		79 Au		80 Hg		81 Tl		82 Pb		83 Bi		84 Po		85 At		86 Rn													
7 Q	87 Fr		88 Ra		89 Ac																58 Ce		59 Pr		60 Nd		61 Pm		62 Sm		63 Eu		64 Gd		65 Tb		66 Dy		67 Ho		68 Er		69 Tm		70 Yb		71 Lu	
															90 Th		91 Pa		92 U		93 Np		94 Pu		95 Am		96 Cm		97 Bk		98 Cf		99 Es		100 Fm		101 Md		102 No		103 Lr							

Température de fusion des éléments (K)



On a alors trois grands fabricants de lampes : General Electric aux États-Unis, qui a succédé à la compagnie d'Edison, Philips au Pays-Bas, et Osram en Allemagne qui utilisait pour ses filaments soit l'osmium (Os), soit le tungstène (W) (tungstène se dit *Wolfram* en allemand, d'où le nom Osram par contraction). La température de fusion du tungstène est proche de 3 500 K, et les lampes l'utilisent à 3 000 K environ.

Vers les années 1920, des améliorations ont été apportées en particulier grâce aux contributions de Langmuir, prix Nobel de chimie. Lorsque l'on porte le filament (solide) de tungstène à haute température, il se sublime (il devient vapeur de tungstène) et se dépose sur les parois de l'ampoule, qu'il opacifie. On évite ce phénomène en remplissant l'ampoule d'un gaz rare (en général l'argon), qui va éviter le dépôt d'atomes de tungstène sur l'ampoule en le soumettant à des « chocs élastiques<sup>5</sup> » en

phase gazeuse. Le gaz rare empêche bien l'opacification de l'ampoule, mais est à l'origine de pertes de chaleur par conduction<sup>6</sup>. Pour réduire celles-ci, on enroule le filament de tungstène en spirale, une géométrie plus compacte et plus performante du point de vue thermique que celle du filament droit. Gaz de remplissage et spiralisation du filament donnent de bons résultats sur la durée de vie du filament et sur son efficacité lumineuse (Figure 13).

Ces solutions techniques, mises au point dans les années 1920, ont été la référence pendant tout le xx<sup>e</sup> siècle (Figure 11). Pour l'éclairage

6. Conduction : transfert de chaleur par contact entre deux milieux sans déplacement de matière.

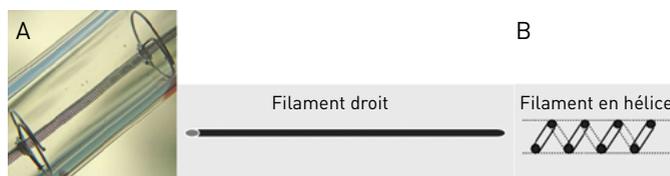


Figure 13

Des améliorations de l'ampoule à incandescence : le remplissage par le vide (A) et l'utilisation d'un filament en hélice (B).

5. Choc élastique : choc entre deux corps ne changeant pas l'énergie cinétique du système (pas de perte d'énergie cinétique).



Figure 14

Lampe halogène (à partir de 1959) : c'est fondamentalement une lampe à incandescence, avec filament de tungstène spiralé et atmosphère de gaz inerte. Simplement, on a ajouté du gaz halogène.

domestique, ces lampes à incandescence ont souvent un culot à vis E27 (27 mm de son diamètre) ; le E rappelle Edison, qui a donc marqué la normalisation dans l'éclairage jusqu'à nos jours.

### 2.3. La lampe halogène

En 1959, apparaît une nouvelle technologie : celle de la lampe halogène. Dans cette lampe, similaire à la lampe à incandescence, l'ampoule est remplie d'halogène gazeux. Dans l'ampoule (Figure 14), le filament est logé dans une petite capsule faite en quartz pour pouvoir monter en température.

Près de l'enveloppe de l'ampoule, où l'on se trouve à relativement basse température, l'halogène se combine avec le tungstène. Le composé gazeux se redéplace vers le filament de la lampe et le tungstène se dépose. L'halogène amorce donc un cycle, captant le tungstène sur les parois de l'ampoule, le redéposant sur le filament, etc. En évitant la sublimation du tungstène, on gagne à la fois en efficacité lumineuse et en durée de vie du filament.

Qu'il s'agisse de l'incandescence classique ou de l'incandescence halogène, il s'agit de lampes qui sont très (beaucoup trop) énergivores. Elles émettent surtout dans l'infrarouge – domaine de longueurs d'onde qui ne sert pas à l'éclairage – et seulement 10 % de leur énergie radiative dans le visible, domaine de longueurs d'onde qui nous fournit la lumière perceptible par l'œil humain. C'est la raison pour laquelle la Commission Européenne a interdit la vente des lampes à incandescences classiques dès 2009, il y a maintenant plus de dix ans, et plus récemment, depuis 2018, la vente de certaines lampes halogènes.

Y a-t-il un avenir pour l'incandescence après ces interdictions ? La Figure 16 montre une lampe halogène « haute-performance ». Sur la capsule contenant le filament, est déposé un revêtement interférentiel, dont le rôle est de transmettre les rayonnements visibles et réfléchir les rayonnements infrarouges sur le filament. Les performances du cycle halogène sont sensiblement améliorées. L'idée

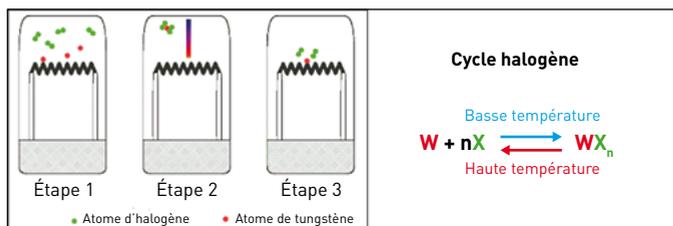


Figure 15

Le cycle halogène, explication du fonctionnement d'une ampoule halogène.



Figure 16

L'innovation existe encore sur les lampes halogènes (ici, lampe haute-performance de 2005).

a été reprise en 2016 par le Massachusetts Institute of Technology (MIT), qui a obtenu, sur ce principe, des efficacités lumineuses particulièrement élevées pour de l'incandescence. La bonne vieille lampe d'Edison n'a peut-être pas dit son dernier mot...

Malgré son interdiction, la lampe à incandescence reste iconique. Les fabricants reprennent la forme des ampoules des lampes du début du  $xx^e$  siècle pour proposer une gamme de lampes à filament LED (Figure 17). On peut aussi rendre hommage à Ingo Maurer, un designer disparu en 2019, qui a mis sur un piédestal la lampe d'Edison avec humour et poésie, donnant même des ailes à la lampe à incandescence (Figure 18).

#### 2.4. Les tubes fluorescents

Surnommé à l'époque l'Edison français, Georges Claude (Figure 19) a été à la fin du  $xix^e$  siècle l'inventeur du procédé de liquéfaction de l'air qui porte son nom, et le créateur de la célèbre société Air Liquide. Son procédé permet la distillation de l'air et donc la séparation, puis l'étude, et ensuite la production des gaz rares (dont le néon) qu'il contient. En 1910, il a inventé les premiers tubes au néon, les précurseurs des tubes fluorescents (Encart : « Edmond Becquerel et les difficiles débuts des tubes fluorescents »).

Son travail a consisté à mettre au point et commercialiser un tube de Geissler rempli de néon. Ses tubes au néon aux fameuses lumières rouges ont eu un succès incroyable



Figure 17

Lampes à filament LED qui reprennent les formes des lampes à incandescence du début du  $xx^e$  siècle. Une gamme vintage proposée par Osram.

Source : [www.led.de/osram/](http://www.led.de/osram/)



Figure 18

La lampe à incandescence réinterprétée par le designer Ingo Maurer.  
Source : Wikipédia, licence cc-by-sa-3.0, VJOHSJENS.



Figure 19

L'inventeur du tube néon, Georges Claude (1870-1960).

## L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE AVANT EDISON

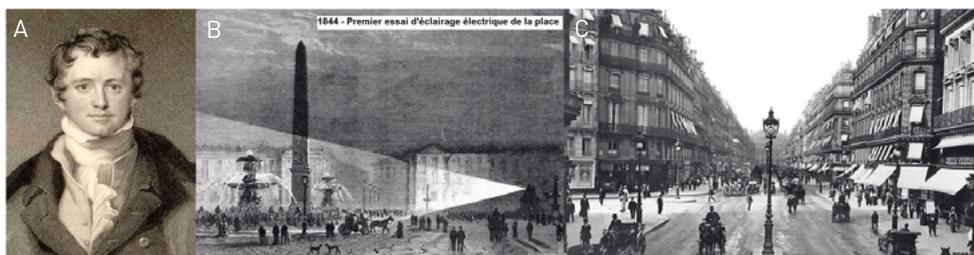


Figure 20

Des lampes électriques avant Edison : A) 1813 : production de lumière par une décharge électrique entre deux électrodes de charbon dans l'air (Humphry Davy) ; B) 1844 : éclairage de la place de la Concorde avec des lampes à arc conçues par Léon Foucault ; C) 1878 : éclairage pérenne de l'avenue de l'opéra de Paris.

En fait, il y avait des lampes électriques avant Edison !

Il y a eu toute une effervescence autour de l'électricité au début du XIX<sup>e</sup> siècle. Par exemple en 1813, Humphry Davy (**Figure 20A**) arrive à produire de la lumière par une décharge électrique créant un arc entre deux électrodes. Ce n'est pas encore une lampe mais on arrive tout de même à produire de la lumière ; on a même fabriqué ensuite des prototypes de lampes à décharge électrique.

En 1844, un éclairage de la place de la Concorde (**Figure 20B**) avec des lampes à arc a été réalisé. Cela n'a été qu'un essai de curiosité – mais ô combien spectaculaire ! – vite abandonné.

En 1878, c'est la première rue éclairée de manière pérenne à l'électricité en France, c'était devant l'Opéra Garnier à Paris (**Figure 20C**), et un an avant le brevet d'Edison !

Un peu auparavant, en 1856, avaient été mis au point les « tubes de Geissler » (**Figure 21**) comme objets de laboratoires. Des électrodes assez éloignées l'une de l'autre sont placées dans un tube en verre rempli d'un gaz à basse pression ; on crée des décharges électriques et en fonction du gaz utilisé, on obtient des lumières de différentes couleurs.

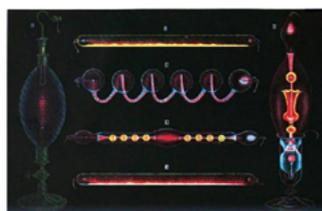


Figure 21

Objets de laboratoire, les tubes Geissler (1856) émettent de la lumière colorée.

en France comme aux États-Unis. D'autres gaz peuvent être utilisés, et d'autres couleurs sont ainsi obtenues (**Figure 22**). Ils ont fait la publicité lumineuse colorée pendant tout le XX<sup>e</sup> siècle et n'ont été concurrencés que par les LED relativement récemment. Le vocable « tube néon » s'est popularisé jusqu'à désigner les

tubes fluorescents, alors que ces derniers ne contiennent pas de néon !

Le tube fluorescent reprend la forme tubulaire du tube néon. Comme illustré sur la **Figure 7**, la décharge électrique se fait sur des vapeurs de mercure à basse pression qui émettent pour l'essentiel de l'UV. Un mélange de



### EDMOND BECQUEREL ET LES DIFFICILES DÉBUTS DES TUBES FLUORESCENTS

Un bref historique du tube fluorescent nous fait rencontrer Edmond Becquerel.

Edmond Becquerel a beaucoup travaillé sur la photoluminescence au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle où les premières idées de lampe fluorescente sont apparues, peut-être d'ailleurs lancées par Becquerel lui-même. Il a fallu beaucoup de décennies avant que le premier tube fluorescent ne soit commercialisé. Citons, pour anecdote, la proposition d'une lampe à incandescence excitée par rayons X proposée par Thomas Edison en 1896, soit un an seulement après la découverte des rayons X par Röntgen. La mort consécutive d'un de ses collaborateurs lui a vite fait abandonner l'idée.

C'est en 1902 déjà que Lewis Cooper Hewitt a découvert les propriétés du mercure pour l'éclairage. Le mercure, à basse pression, émet un blanc-bleu et beaucoup d'UV, un rayonnement *a priori* gaspillé. Il faudra attendre 1937 pour voir la commercialisation des premiers tubes fluorescents, lampes tubulaires à décharge remplies de mercure à basse pression et avec un revêtement fluorescent sur les parois internes. Les tubes fluorescents ont été très utilisés dans les usines aux États-Unis pendant la seconde Guerre mondiale et ont conquis l'Europe à la libération. Ils ont été accueillis comme « une nouvelle lumière » avec une effervescence qu'on retrouvera pour les LED au début du XXI<sup>e</sup> siècle.

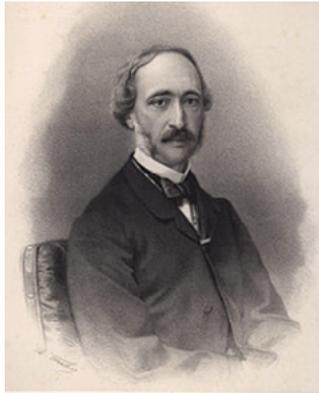


Figure 23

*Edmond Becquerel (1820-1891), un pionnier de la recherche sur les tubes fluorescents : vers 1855 : premières études par Edmond Becquerel ; 1896 : lampe fluorescente excitée par rayon X, par Thomas Edison ; 1902 : premières lampes aux vapeurs de mercure basse pression de Lewis Cooper Hewitt à couleur blanc/bleu... et de l'UV ; 1937 : commercialisation des premiers tubes fluorescents.*

Figure 22

*Des gaz rares différents donnent des couleurs différentes !*

Source : Wikipédia, licence cc-by-sa-2.0-2.5, Pslawinski.



Figure 24

Une lampe reprenant le principe du tube fluorescent : la lampe fluocompacte. C'est une lampe de substitution, beaucoup plus efficace que les lampes à incandescence mais moins que les tubes fluorescents.

luminophores<sup>7</sup> déposé sur la paroi interne du tube permet de convertir l'UV dans le visible et de créer des blancs de différentes ambiances, plus ou moins chaudes ou plus ou moins froides.

Les tubes fluorescents sont des lampes très efficaces presque autant que les LED d'aujourd'hui. Très utilisés dans les bureaux, les salles de classes et lieux publics, ils présentent cependant un inconvénient, celui de nécessiter des installations annexes pour fonctionner : pour faire circuler un courant dans un gaz, qui est isolant, il faut un système d'amorçage (un « starter »), ainsi qu'un système de stabilisation du courant qu'on appelle « ballast », par analogie aux ballasts qui servent à stabiliser les voiliers. Les ballasts électroniques actuels permettent de gradier le flux mais cette opération est plus simple et moins

consommatrice de puissance électrique avec les LED.

## 2.5. Les lampes fluocompactes

Les lampes fluocompactes (Figure 24) arrivent dans les années 1980, donc tardivement. Comme les tubes fluorescents, elles contiennent du mercure basse pression, associé à un revêtement fluorescent.

La lampe fluocompacte a une efficacité lumineuse quatre à cinq fois meilleure que les lampes à incandescence, mais moindre que celle des tubes fluorescents parce que le dispositif d'alimentation électrique est miniaturisé dans le culot, donc de performance moins grande. L'allumage est moins instantané, la gradation est impossible pour la plupart des lampes. En Europe du Nord, elles ont été utilisées très précocement, contrairement aux États-Unis qui n'ont jamais vraiment adopté cette source de lumière. Comme pour les tubes fluorescents, la présence de mercure, un métal lourd et donc nocif, constitue un handicap important. En France, l'organisme Ecosystem se charge de la collecte et du recyclage des lampes à décharge, et en particulier les lampes fluorescentes (Figure 25).

Les tubes et les lampes fluorescentes ne contiennent en fait que très peu de mercure, autour de cinq milligrammes par tube, mais le grand nombre de tubes et de lampes rend bien le recyclage nécessaire, en particulier afin de neutraliser le mercure. Les lampes à incandescence, quant à elles, ne sont

7. Luminophore : mélange qui émet de la lumière lorsqu'il est excité.

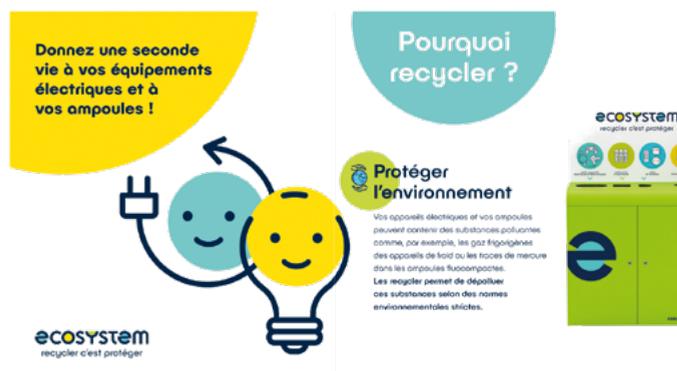


Figure 25

Une différence entre lampes à incandescence et fluocompactes : le recyclage.

Source : Ecosystem.

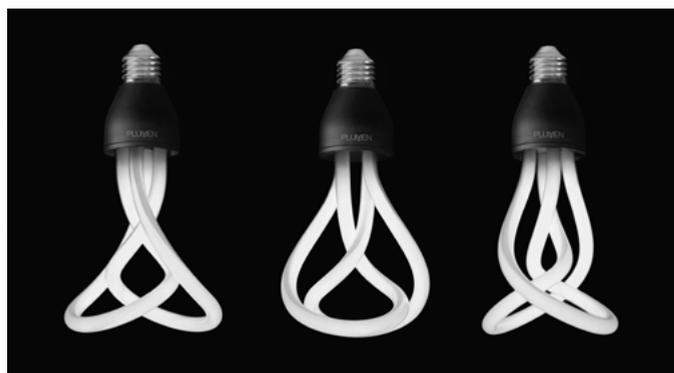


Figure 26

Lampe fluocompacte avec des formes originales (design de Samuel Wilkinson).

Source : © Samuel Wilkinson.

pas recyclées ; elles se jettent dans les poubelles classiques.

Autant la lampe à incandescence était iconique, autant les lampes fluocompactes semblaient tristes. Certains designers ont proposé des formes un peu plus originales, comme celles de la **Figure 26**.

### 2.6. Les lampes à décharge haute pression pour l'éclairage public

L'éclairage public électrique représente presque 50 % de la consommation pour une commune. Il doit donc être assuré par des lampes efficaces, plus puissantes qu'en éclairage intérieur, et ponctuelles pour être associées à un réflecteur qui répartisse le flux comme souhaité. Éclairage intérieur et éclairage extérieur, ce sont vraiment deux mondes différents. Ce dernier a nécessité l'invention de systèmes spécifiques : les lampes à décharge à haute pression, mises au point au  $xx^e$  siècle (**Encart : « Les sources électriques pour l'éclairage public au  $xx^e$  siècle »**).

Alors qu'à basse pression la lumière émise par une lampe à décharge est généralement

colorée, en opérant à haute pression, la densité du gaz en atomes est plus forte, on a plus d'interactions entre atomes et donc davantage de niveaux énergétiques sont sollicités. Le spectre d'émission est plus riche, ce qui induit une lumière plus blanche. En éclairage public, les lampes à décharge n'utilisent couramment que deux gaz sous haute pression, le mercure et le sodium. Dans certains cas, on utilise un mélange de vapeurs métalliques sous forme d'halogénures : ce sont les lampes aux halogénures métalliques.

### 2.7. La technologie LED

La technologie LED (« *Light Emitting Diode* ») a été une véritable révolution due notamment à Shuji Nakamura (**Figure 28**), prix Nobel de physique en 2014. Elle domine aujourd'hui le marché de l'éclairage, que ce soit l'éclairage domestique, l'éclairage intérieur ou l'éclairage public.

Les premières expériences d'émission de lumière par un semi-conducteur ont été réalisées au début du  $xx^e$  siècle. Les premières LED rouges ont été développées par Nick



Figure 28

Une invention révolutionnaire : la LED, inventée par Shuji Nakamura, prix Nobel de physique 2014.

Source : Wikipédia, licence cc-by-2.0-Glenn Beltz.

## LES SOURCES ÉLECTRIQUES POUR L'ÉCLAIRAGE PUBLIC AU XX SIÈCLE

La **Figure 27A** montre un « ballon fluorescent », une source aujourd'hui obsolète. Elle fonctionne avec du mercure haute pression, qui émet plus blanc que le mercure basse pression et émet aussi de l'UV, qui est transformé en rayonnement visible surtout dans les rouges par un revêtement fluorescent.

La **Figure 27B** montre la lampe sodium haute pression. Elle a été très largement utilisée dans toutes nos villes avec cette lumière typique blanc-jaune, presque orangée. Elles sont équipées d'un « brûleur » pour contenir le sodium à haute pression et qui est fabriqué en alumine pour supporter les très hautes températures et rester transparent pour le rayonnement.

Dernière de la famille des lampes à décharge haute pression : les halogénures métalliques (**Figure 27C**). Cette fois-ci, le milieu actif est un mélange de vapeurs métalliques sous forme d'halogénures. Le mélange permet d'émettre de la lumière blanche. On obtient du rouge, du vert et du bleu selon les vapeurs métalliques choisies permettant d'atteindre un spectre d'émission complet.

A



**Ballon fluorescent**  
(mercure haute pression)

B



**Lampe sodium**  
**haute pression**

C



**Lampe aux halogénures**  
**métalliques**

Figure 27

Les lampes d'éclairage public, des lampes efficaces et souvent puissantes : A) ballon fluorescent ; B) lampe sodium haute pression ; C) lampe aux halogénures métalliques.

L'éclairage public représente 47 % de la consommation (37 % de la facture) en énergie électrique.

Holonyack pour General Electric en 1962. Elles ont ensuite abondamment servi comme indicateur pour signaler l'état des appareils électriques (allumé ou éteint par exemple) ; les puissances étaient évidemment très faibles.

Pendant des décennies, la technologie s'est améliorée : les LED sont devenues plus puissantes, les couleurs se sont diversifiées, et la barrière technologique de la production du bleu a été franchie (dans les années 1990). Le mérite de Shuji Nakamura est d'avoir

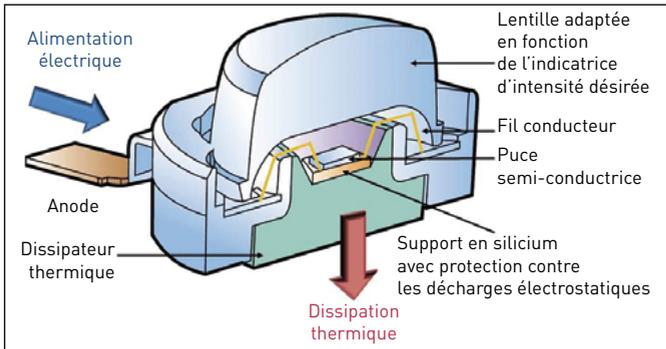


Figure 29

La LED : une technologie révolutionnaire.

persévéré dans l'étude du nitrure de gallium, le matériau qui va être utilisé pour les LED bleues, nécessaires pour réaliser le mélange de lumières qui donnera la « couleur » blanche, qui a connu son essor dans les années 2000 pour l'éclairage général (Figure 8).

Le bleu permet aussi la synthèse additive rouge/vert/bleu et de faire ainsi de l'éclairage architectural ou dynamique, permettant de changer de couleurs rapidement. Entre 2010 et 2015, la technologie LED s'est affirmée comme supérieure à toutes les autres pour l'éclairage général en termes d'efficacité lumineuse.

La constitution d'une LED est représentée en coupe sur la Figure 29. Le cœur en est une petite puce. La technologie qui l'entoure est conçue pour extraire la lumière avec une grande efficacité, pour répartir la lumière en sortie grâce à une lentille, pour assurer les contacts électriques, et, point important, pour gérer la dissipation thermique. Les LED actuelles, qu'on appelle les « LED de puissance »,

émettent à 1 Watt maximum. Il est plus simple de faire cinq LED à 1 Watt qu'une LED à 5 Watts pour la gestion de la dissipation thermique.

Quels sont les avantages des LED ? Aujourd'hui, l'émission standard des LED est à 130 lumens par Watt, une efficacité lumineuse supérieure à celles de toutes les autres sources (les tubes fluorescents sont à 100 lumens par Watt). Leur durée de vie est aussi nettement supérieure, ce qui constitue un gain indéniable en coût de maintenance. Par ailleurs, leur émission ne se faisant que d'un côté, les réflecteurs deviennent inutiles. Cela induit un rendement des luminaires LED sensiblement supérieur à celui de luminaires pour des sources traditionnelles. Enfin, elles sont très faciles à piloter à l'aide de *drivers* électroniques adaptés.

Nulle surprise, donc, que les fabricants aient mis fin à tout développement des anciennes technologies depuis dix ans. Tous les nouveaux développements sont sur les LED.

## Pour demain ? Suite de la *success story* de l'éclairage

Tous les récits qui précèdent le montrent à l'envi : l'histoire de l'éclairage électrique est une véritable « *success story* ». Et ce qui se passe aujourd'hui dans les laboratoires montre qu'elle n'est pas terminée. Voici quelques nouvelles fonctions qui vont changer la vie dans les prochaines années.

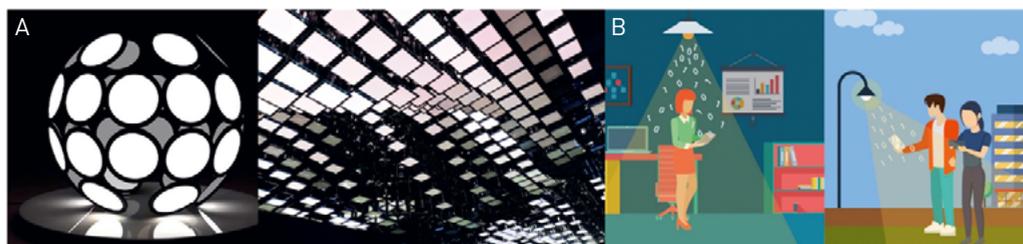
Nous sommes tous profondément dans la mentalité de « l'éclairage On-Off », une lampe ne peut être qu'allumée ou éteinte. On développe maintenant des réglages plus fins et le pilotage automatique de l'éclairage, d'un bâtiment, d'une ville entière, etc., à l'aide de capteurs de luminosité, de capteurs de présence, etc. Cela induit des économies d'énergie très importantes, ce qui est bien dans les exigences de l'époque. Bien sûr, la mise en œuvre des technologies correspondantes est coûteuse, elle ne se fera pas du jour au lendemain... Mais déjà l'objectif est pris.

La mise au point de la technologie des OLED<sup>8</sup> (les LED organiques) est déjà là et s'améliore constamment (**Figure 30A**). Sans concurrencer les LED sur l'éclairage général, elles vont être utilisées pour les écrans lumineux et écrans souples (voir aussi le Chapitre de J.-C. Bernier dans cet ouvrage *Chimie et lumière*, EDP Sciences, 2021).

### Figure 30

Deux perspectives possibles dans un futur très proche :  
A) le développement des OLED ;  
B) la communication Lifi.

8. OLED : Diode Électroluminescente Organique, utilisée dans certains écrans plats ou panneaux lumineux.



Dernier point, peut-être un peu plus futuriste mais déjà expérimenté : la communication Lifi (**Figure 30B**). Il s'agit d'utiliser les fréquences lumineuses au lieu des fréquences radio pour la communication (Lifi au lieu de Wifi). On peut moduler le rayonnement à très haute fréquence et transmettre ainsi des informations avec l'avantage de la sécurité puisque l'on transmet l'information uniquement sous le cône lumineux.

