

Enseignement de l'électricité en lien avec l'énergie selon le PER

Production de lumière à partir de l'électricité

Des premières lampes à incandescence à la technologie des lampes LED

Un peu d'histoire, de théorie et une idée pour comparer des éclairagements de manière expérimentale, facile à réaliser.

Avec en dernière page un tableau comparatif des quatre types de production de lumière à partir d'électricité.

Partie théorique

Le simple choix d'un type de lampe renvoie à de nombreux concepts de physique tel que puissance, rendement lumineux, nature de la lumière émise, température de couleur. Le document proposé ici présente un historique très succinct de l'évolution de la technique de l'éclairage électrique et donne quelques explications à propos des modes de production de la lumière et quant aux concepts d'intensité lumineuse, de flux, de rendement lumineux et de température de couleur.

Remarque

les sites Internet mentionnés comme sources peuvent avoir été modifiés depuis la création de certains éléments de ce document (2013)

Éléments théoriques à propos des modes de production de lumière à partir de l'électricité

La lampe à incandescence

Avec la maîtrise des phénomènes électriques, à la fin du 18^{ème} siècle, de nombreuses applications ont été imaginées. La première manière de produire de la lumière a été de créer des arcs électriques entre deux électrodes. C'était au tout début du 19^{ème} siècle. Ce moyen ne s'avérait guère efficace, nécessitant un courant élevé, produisant de l'ozone, et consommant trop rapidement les électrodes. On fit donc des recherches pour rendre incandescent des matériaux sous l'effet du courant électrique. Des essais se firent avec des filaments de bambou et divers autres végétaux ainsi qu'avec de métaux. Le problème était que la matière rendue incandescente se consumait très rapidement. Un pas décisif, fut accompli lorsqu'on parvint à placer ces filaments dans des enceintes vide d'air. Les premières ampoules apparurent au milieu du 19^{ème} siècle. Ces ampoules avaient encore une durée de vie très courte car dans le vide, s'il ne brûlait plus, le filament s'évaporait.



<http://www.vivreheureux.fr/wp-content/uploads/2013/09/thomas-edison-invention-ampoule-electrique-22-octobre-1879.jpg>

Thomas Edison (1847-1931)

En 1879, il dépose le brevet d'une lampe électrique composée d'un filament en bambou du Japon sous faible voltage dans une ampoule de verre sous vide.

L'année suivante, il fonde la Edison Electric Light Company, qui deviendra en 1889 la Edison General Electric Company, puis la General Electric en 1892.

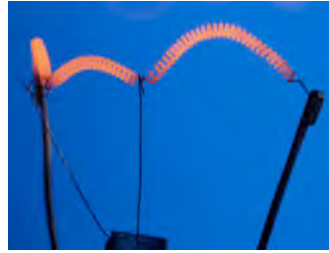
<http://www.gralon.net/articles/materiel-et-consommables/materiels-industriels/article-l-ampoule-electrique---histoire-d-une-invention-4031.htm>

Un progrès fut accompli en remplaçant le filament de bambou par un filament de carbone. Les ampoules à filament de tungstène apparurent au début du 20^{ème} siècle. Le tungstène a l'avantage de pouvoir être porté à plus de 3'000 °C sans fondre et donc de produire une lumière beaucoup plus blanche que le carbone.

Un autre grand progrès eu lieu lorsqu'on eut l'idée de placer le filament dans un gaz inerte tel que l'azote, l'argon ou de krypton. Cela diminua la vaporisation du filament et permis d'obtenir des ampoules ayant des durées de vies de l'ordre de 1'000 heures.

Dans les années 1950 fût mise au point une lampe contenant un gaz halogène dans laquelle les atomes de tungstène arrachés au filament se combinent au gaz pour se déposer sur le verre de quartz, puis par convection naturelle, à nouveau sur le filament. Ces ampoules fonctionnent à une température encore plus élevée et ont un meilleur rendement.

Les gaz halogènes sont les éléments chimiques de la 17^e colonne du tableau périodique, c'est à dire le fluor, le chlore, le brome, l'iode et l'astate. Dans les lampes, on utilise le brome ou le chlore.



http://www.afcinema.com/IMG/jpg/ampoule_filament.jpg

Lampe à incandescence classique

avec un gros plan sur le filament (ici seulement à environ 400 °C au lieu de 3'000 °C).

La photo montre une lampe dite "claire" dont on voit le filament. D'autres ampoules, dites "opales" ou "dépolies" ont un aspect laiteux.

On trouve encore de telles ampoules en service, mais elles ont progressivement été retirées du commerce depuis 2009 en raison de leur faible rendement lumineux. Elles sont remplacées par des ampoules dont l'efficacité énergétique est meilleure.



<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/49/Wolfram-Halogenglühlampe.png>

Lampe à incandescence de type halogène

Dans le modèle présenté ici, la lampe halogène, de petite taille, est enfermée dans une ampoule de taille standard.

L'efficacité énergétique de ces ampoules est meilleure que celle des ampoules traditionnelles.

Actuellement seules les lampes à incandescence de type halogène et quelques modèles spéciaux à fonctionnement classique sont autorisées de vente.

À partir de 2016, seules les ampoules des classes d'efficacité énergétique A et B pourront être vendues (voir ci-après le tableau comparatif des caractéristiques des lampes).

Lampe fluorescente

Comme la lampe halogène, la lampe fluorescente a été mise au point vers le milieu du siècle passé. Elle a longtemps existé sous la forme de tubes improprement appelés tubes au néon. Cette appellation provient du fait que les premiers tubes luminescents étaient des tubes remplis de gaz néon. Ils donnaient (et donnent encore) une lumière rouge utilisée dans les enseignes lumineuses.

Le tube fluorescent contient en fait de la vapeur de mercure. Ce gaz de mercure est traversé par un courant électrique qui en excite les atomes. Cette excitation a pour effet de produire un rayonnement ultraviolet (énergie de retour à l'état fondamental des atomes de mercure). À son tour, ce rayonnement ultraviolet excite les atomes d'une pellicule fluorescente déposée sur la paroi intérieure du tube (effet photoélectrique). Et c'est cette pellicule qui émet la lumière visible. La couleur de cette lumière peut être influencée par le choix de la composition chimique de la pellicule fluorescente.

La lampe fluo compacte est apparue à la fin des années 70, mais elle ne s'est répandue qu'à partir de années 90. Il s'agit d'un petit tube fluorescent enroulé en spirale de manière à pouvoir tenir dans une ampoule ressemblant à une ampoule à incandescence opale.

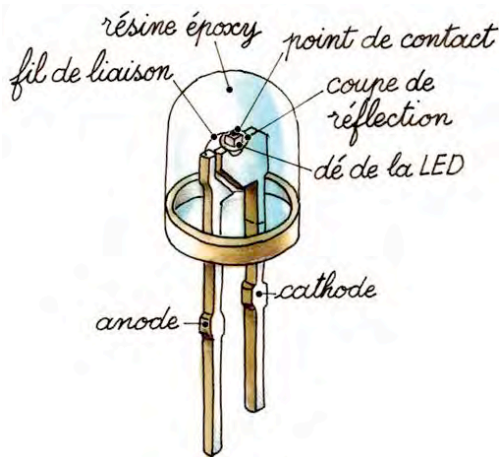


Les tubes fluorescents restent d'actualité chaque fois que l'on veut un éclairage économique et linéaire (sur un plan de travail par exemple). Il existe beaucoup de sorte de lampes fluocompactes de puissances différentes, avec petit culot (E14), gros culot (E127) ou baïonnettes.

Les lampes fluorescentes présentent des inconvénients : la vapeur de mercure est toxique, les lampes posent un problème de recyclage et elles sont source de pollution électromagnétiques.

La lampe LED ou DEL

20 à



Le principe de la LED

Dans cette figure, la diode électroluminescente est un petit élément semi-conducteur, le "dé de la LED" sur le dessin, dont l'anode est reliée en un "point de contact" par un "fil de liaison" à une électrode notée "anode", tandis que la cathode de la diode est reliée à l'électrode désignée par "cathode" sur le dessin.

Lorsqu'une tension est appliquée entre l'anode et la cathode (positif sur l'anode et négatif sur la cathode), le phénomène de recombinaison entre électrons et trous s'accompagne de l'émission de photons dans une bande d'énergie correspondant à de la lumière visible. La couleur de la lumière produite par la LED est déterminée par la composition chimique du semi-conducteur.

L'habillage en résine époxy transparente fait l'effet d'une lentille qui concentre la lumière. De plus, cet habillage protège le semi-conducteur des éléments extérieurs.

<http://ampouleled.a.m.pic.centerblog.net/e4548285.jpg>

La technologie LED s'utilise dans les écrans de TV, de tablettes ou d'ordinateurs. L'association de LED de trois couleurs (cyan, vert et magenta) permet de produire de la lumière de toutes les couleurs.

Pour l'éclairage, les lampes LED sont de loin celles qui ont le rendement le plus élevé. Par différentes astuces techniques, on est capable de leur faire produire de la lumière avec un spectre quasi-continu.

Cet extrait tiré d'une page trouvée sur Internet avec le moteur de recherche Google en tapant « lampe LED, images » donne un aperçu de la très grande variété de ces lampes aujourd'hui disponibles dans le commerce.

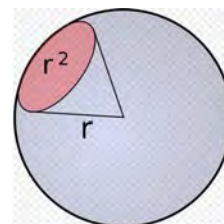


Intensité, flux et rendement lumineux

L'intensité d'une source lumineuse se mesure en candelas, symbole [cd], du mot latin qui signifie « chandelle ». La candela est l'une des sept unités fondamentale du système international d'unités (SI). Une intensité de 1 candela est approximativement l'intensité lumineuse d'une flamme de bougie.

Le flux lumineux irradié par une source de lumière se mesure en lumens, symbole [lm] (du mot latin signifiant lumière). 1 lumen est le flux émis dans un angle solide de 1 stéradian par une source lumineuse ponctuelle diffusant sa lumière de manière homogène et dont l'intensité vaut 1 candela.

Un stéradian est l'angle solide d'un cône qui, ayant son sommet au centre d'une sphère de rayon r , découpe sur la surface de cette sphère une aire égale à r^2 .



Comme l'œil humain ne perçoit pas de la même manière la lumière selon sa couleur, on détermine le flux lumineux dit "visuel" en le pondérant par une fonction d'efficacité lumineuse spectrale $K(\lambda)$ où λ est la longueur d'onde. Dans le cas d'un rayonnement lumineux monochromatique de longueur d'onde de 555 nm correspondant au maximum de sensibilité de l'œil (couleur jaune-vert) et pour une puissance d'émission de la source de 1 W, le flux est de 683 lumens. Ce rendement lumineux théorique de 683 lm/W est la valeur maximum possible. Dans cette hypothèse, il n'y a pas de rayonnement infrarouge et donc un rendement de 100% de la transformation par laquelle l'énergie alimentant la source devient énergie lumineuse (rendement physique ρ). Dans la réalité, les sources lumineuses à spectre continu émettent une partie de leur rayonnement dans l'invisible, essentiellement dans l'infrarouge (pertes thermiques) et le rendement ρ est bien inférieur à 100%. D'autre part elles émettent de la lumière mal perçue par l'œil (fonction d'efficacité lumineuse K variant avec la longueur d'onde). Ces deux facteurs péjorent fortement le rendement des sources lumineuses, notamment le rendement des lampes d'éclairage électriques qui ne sont que de quelques dizaines de lumens par watt. Quant au rayonnement solaire, il est d'environ 100 lm/W. Il faut encore noter que pour les sources lumineuses à spectres discret, (lampes à fluorescence), le rayonnement dans l'infrarouge est relativement faible, ce qui améliore leur rendement ρ . L'efficacité spectrale quant à elle se rapporte aux longueurs d'ondes émises dont le mélange produit l'effet visuel perçu.

Le rendement lumineux qui se mesure en lumens par watt tient compte du rendement physique ρ et de l'efficacité lumineuse K .

La température de couleur

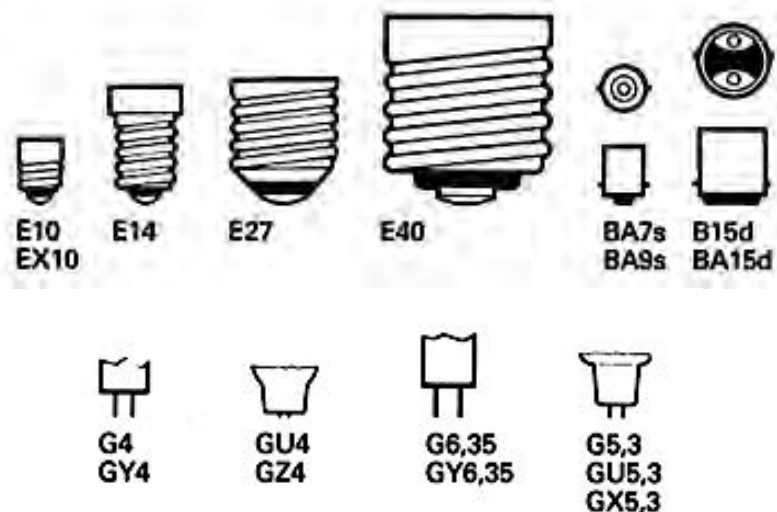
Une autre caractéristique des sources lumineuse est ce qu'on appelle la température de couleur. Cette grandeur physique est basée sur une analogie avec la température de surface d'un corps incandescent (ce que les physiciens appellent corps noir) et dont l'aspect passe du rouge sombre au bleu très lumineux au fur et à mesure que sa température s'élève.

Cette grandeur physique s'exprime donc, comme une température absolue, en kelvin, symbole [K]. Comme points de repères, on peut se référer à la température de couleur du Soleil qui est de 6'000 K. Dans l'éclairage artificiel, on atteint une telle valeur avec la technique à fluorescence et la technique à LED de type "lumière du jour". Par contre, avec la technique à incandescence, on ne dépasse pas les 2'700 K, 3'200 K dans le cas des lampes halogènes.

Diverses sortes de culots pour les divers types de lampes électriques

Les plus courants :

- E modèle à vis
- B Modèle à baïonnette
- G Modèle à broche



Extrait d'un document produit par ELDAS (Electro Datenbank Schweiz) et téléchargé sur :

http://www.eldas.ch/service_download.aspx?language=FR

Indications figurant sur les lampes

Une ampoule électrique se caractérise par diverses grandeurs dont en particulier :

1. Type de culot
2. Puissance électrique en watts (W)
3. Flux lumineux en lumens (lm)
4. Température de couleur en kelvins (K)
5. Durée de vie en heure (h)
6. Classe énergétique (code par une lettre allant de A à G)

Le type de culot et la puissance électrique sont toujours indiqués sur la lampe ou sur son emballage. De plus en plus systématiquement, on trouve aussi les indications concernant le flux lumineux, la température de couleur, la durée de vie et la classe énergétique. On trouve aussi des indications concernant la forme et la transparence de l'ampoule.

Comparaison des éclairagements produits par deux lampes

Éléments théoriques

Intensité lumineuse

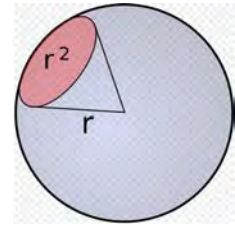
L'intensité d'une source lumineuse se mesure en candelas, symbole [cd], du mot latin qui signifie « chandelle ». La candela est l'une des sept unités fondamentale du système international d'unités (SI). Une intensité de 1 candela est approximativement l'intensité lumineuse d'une flamme de bougie.

Flux lumineux

Le flux lumineux irradié par une source de lumière se mesure en lumens, symbole [lm] (du mot latin signifiant lumière). 1 lumen est le flux émis dans un angle solide de 1 stéradian [sr] par une source lumineuse ponctuelle diffusant sa lumière de manière homogène et dont l'intensité vaut 1 candela.

$$1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot 1 \text{ sr}$$

Un stéradian est l'angle solide d'un cône qui, ayant son sommet au centre d'une sphère de rayon r , découpe sur la surface de cette sphère une aire égale à r^2 .



Remarque : une ampoule électrique se caractérise par diverses grandeurs dont en particulier :

1. Type de culot
2. Puissance électrique en watts (W)
3. Flux lumineux en lumens (lm)
4. Température de couleur en kelvins (K)
5. Durée de vie en heure (h)
6. Classe énergétique (code par une lettre allant de A à G)

Le type de culot et la puissance électrique sont toujours indiqués sur la lampe ou sur son emballage. De plus en plus systématiquement, on trouve aussi les indications concernant le flux lumineux, la température de couleur, la durée de vie et la classe énergétique. On trouve aussi des indications concernant la forme et la transparence de l'ampoule.

Éclairement

L'éclairement est l'effet lumineux produit sur une surface exposée au rayonnement d'une source de lumière. Il se mesure en lux, symbole [lx]

Le lux est l'éclairement produit lorsqu'une surface de 1 m^2 est exposée à un flux lumineux de 1 lumen

$$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm} / \text{m}^2$$

Remarque : pour un flux lumineux donné, l'éclairement varie avec le carré de la distance séparant la source de la surface éclairée. Doubler cette distance signifie diviser par 4 l'éclairement.

(Voir méthode de comparaison des éclairagements produits par deux lampes au verso)

Méthode de comparaison des éclairagements produits par deux lampes

Une manière simple, bien qu'approximative, de comparer les éclairagements produits par deux lampes, est de placer ces lampes de part et d'autre d'un écran translucide (papier blanc ordinaire) sur lequel on a fait une tache semi-transparente avec une goutte d'huile ou de cire. En éloignant ou rapprochant les lampes de l'écran, on fait varier les éclairagements produits. Pour comparer ces éclairagements est pour pouvoir estimer qu'ils sont égaux, on observe la tache semi-transparente. Si l'éclairage de l'écran est plus fort d'un côté que de l'autre, cette tache apparaît plus foncée ou plus claire que le reste de l'écran. Si on a disposé les lampes de sorte que les éclairagements s'égalisent, la tache semi-transparente n'est (presque) plus visible.

Dans l'illustration ci-dessous, la lampe sphérique produit un éclairage plus fort que la lampe-flamme. La tache semi-transparente apparaît foncée du côté de la lampe sphérique et claire du côté de la lampe-flamme. En éloignant de l'écran la lampe sphérique ou rapprochant la lampe-flamme, on peut faire rendre cette tache quasiment invisible.



Tache foncée

Vue de l'autre côté :

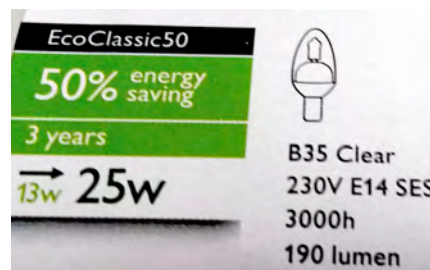


Tache claire

Remarque : Comme l'éclairage varie avec le carré de la distance séparant la source de la surface éclairée, si l'on doit placer une des deux lampes x fois plus loin que l'autre pour produire le même éclairage, c'est qu'elle x^2 fois plus "puissante" que l'autre : le flux lumineux qu'elle produit est x^2 fois plus intense.



330 lumen Lampe LED 4 W



Lampe halogène

Dans notre cas, le rapport des flux lumineux est de $330 \text{ lumens} / 190 \text{ lumens} = 1,74$

Les distances à l'équilibre des éclairagements devraient donc être dans le rapport $\sqrt{1,74} = 1,32$.

On devrait avoir par exemple 20 cm environ du côté de la lampe sphérique et de 15 cm environ du côté de la lampe flamme.

Expérimentalement, dans ce cas, on a un peu plus de 20 cm d'un côté pour 15 cm de l'autre.

Tableau comparatif des quatre types de production de lumière à partir d'électricité

Type Carac- téristique	Incandescence classique (N'est plus en vente !)	Incandescence halogène	Fluorescence (tubes et lampes fluocompactes)	LED (modèles pour l'éclairage)
Rendement lumineux en lumen/watt	10 – 15 lm/W	20 – 25 lm/W	60 – 70 lm/W	50 – 90 lm/W
Rendement approx. en watt lumière/ watt électricité	5%	8%	16%	23%
Classe d'efficacité	G F E	D C B	B A	A
Durée de vie approximative	1'000 h	2'000 h	8'000 h	30'000 h
Nature du spectre lumineux	Spectre continu, mais limité dans le bleu (pas de lumière blanche possible)	Spectre continu. La température plus élevée que dans la lampe classique permet une lumière plus blanche.	Spectre discontinu. Le mélange de quelques couleurs de rayonnement (grâce au choix de la composition chimique de la pellicule fluorescente) permet de produire de la lumière dont l'apparence va du blanc chaud rosé au blanc froid bleuté.	Spectre continu, mais avec une pointe dans le bleu. Comme pour les lampes à fluorescence, on peut obtenir de la lumière blanche plus ou moins "chaude".
Température de couleur en kelvins	Jusqu'à 2'700 K	Jusqu'à 3'000 K	De 2'500 K à 6'500 K	De 2'500 K à 6'500 K
Avantages	Les ampoules étaient peu coûteuses à produire et donc bon marché à l'achat.	Rendement lumineux supérieur d'environ 30% sur la lampe à incandescence classique.	Rendement lumineux 5 fois supérieur à la lampe à incandescence classique et 4 fois supérieur à lampe à incandescence halogène. Longue durée de vie.	Rendement lumineux 6 fois supérieur à la lampe à incandescence classique et 4,5 fois supérieur à lampe à incandescence halogène. Très longue durée de vie. Pas de problème de rayonnement.
Inconvénients	Température élevée de l'ampoule (danger de brûlure et d'incendie). Sensible aux allumages répétés. Durée de vie courte.	Température élevée de l'ampoule (danger de brûlure et d'incendie). Sensible aux allumages répétés.	Présence de mercure (intoxication et pollution). Rayonnement électromagnétique (danger potentiel pour la santé).	Intensité lumineuse ponctuelle élevée qui peut provoquer des lésions de la rétine. La pointe spectrale dans le bleu pourrait favoriser ces lésions. Coût d'achat plus élevé que toutes les autres lampes.

Toutes ces lampes existent avec des culots à vis E27 et E14 ainsi qu'avec des culots à baïonnette.