

# I-1 : LES SOURCES LUMINEUSES

Florence Rigaudière

Yvon Grall

Jean-François Le Gargasson

## Pour citer ce document

Florence Rigaudière, Yvon Grall et Jean-François Le Gargasson, «I-1 : LES SOURCES LUMINEUSES», *Oeil et physiologie de la vision* [En ligne], I-La stimulation visuelle, mis à jour le 10/12/2013, URL : <http://lodel.irevues.inist.fr/oeiletphysiologiedelavision/index.php?id=168>, doi:10.4267/oeiletphysiologiedelavision.168

## Plan

### La stimulation visuelle optimale

*La lumière visible*

Rappel

La lumière naturelle

La lumière artificielle

*La lumière invisible*

### Adapter la stimulation aux contraintes physiologiques

Les écrans cathodiques

Les écrans plats

### De l'idéal à la réalité...

### Les appareillages du commerce

### Conclusion

## Texte intégral

Remerciements : Jacques Charlier

## La stimulation visuelle optimale

Notre système visuel fonctionne de façon optimale en *lumière du jour* ou *lumière visible*, que cette lumière soit naturelle délivrée par le rayonnement solaire ou par des sources de lumière artificielles. Bien peu de nos activités se déroulent en ambiance obscure tandis que les stimulations également de *lumière visible*, sont alors de niveaux lumineux faibles voire très faibles. Dans ce cas, par exemple la nuit par clair de lune, notre système visuel a besoin d'un temps d'adaptation à l'obscurité pour que la perception de lumières de faibles niveaux soit possible, nos performances visuelles étant alors médiocres.

Pour tester le fonctionnement de notre système visuel, il est nécessaire d'adapter la stimulation visuelle au plus près de sa physiologie et de ses propriétés pour en obtenir des réponses optimales.

## La lumière visible

### Rappel

La lumière visible fait partie des rayonnements électromagnétiques avec ses deux aspects périodiques, l'un dans l'espace, caractérisé par la longueur d'onde  $\lambda$  (mesurée en nanomètre  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) et l'autre dans le temps, caractérisé par la fréquence  $\nu$ , inverse de la période  $T$ , mesurée en hertz (Hz). Elle se propage dans le vide à la vitesse  $c$  de  $300.000 \text{ km/s}$  ou dans les milieux transparents à la vitesse  $v$ , d'une distance égale à la longueur d'onde durant chaque période :  $\lambda = c.T = c/\nu$ .

Le milieu est caractérisé par son indice  $n$ , rapport entre la vitesse de propagation de la lumière dans le vide  $c$  et dans le milieu considéré  $v$  :  $n = c/v$ . Pour l'air, l'indice est très proche de 1 ; pour l'eau, il est égal à  $4/3$ , voisin de celui des milieux oculaires.

Elle présente les caractéristiques classiques des radiations électromagnétiques avec un aspect discontinu ou corpusculaire, la lumière est alors assimilée à un ensemble d'énergies élémentaires discrètes ou photons, possédant chacun une énergie  $E = h\nu$  ; un aspect continu ou ondulatoire qui traduit bien les propriétés de propagation, de transmission, de réflexion, de réfraction et de diffraction de la lumière.

La lumière est dite visible car elle procure une sensation. Pour ce faire, elle contient nécessairement tout ou partie des longueurs d'onde comprises entre  $400 \text{ nm}$  et  $700 \text{ nm}$ , seul intervalle où les radiations sont efficaces sur le système visuel. Elle contient aussi d'autres radiations en deçà ou au-delà de cet intervalle qui sont alors inefficaces pour la vision. Les énergies de chaque radiation qui la compose sont de niveaux comparables. La figure I-1-1 montre cependant que l'énergie des longueurs d'onde de lumière visible naturelle comprises entre  $400$  et  $500 \text{ nm}$  est plus importante que pour celles comprises schématiquement entre  $500$  et  $700 \text{ nm}$ .

Si l'énergie de la lumière visible est suffisamment intense, elle procure une sensation blanche, d'où également sa dénomination de *lumière achromatique* ou *lumière blanche*.

## La lumière naturelle

Délivrée par le soleil, la lumière du jour est de composition relativement constante, mais d'intensité variable, d'un moment du jour à l'autre, d'une saison à l'autre ou d'un point du globe à l'autre (figure I-1-1). Si notre mode de vie y est adapté, cette stimulation naturelle est exclue pour toute exploration fonctionnelle qui nécessite des conditions parfaitement définies, stables et reproductibles.

Les stimulations visuelles doivent être constantes aussi bien dans leur composition spectrale (contenu en longueurs d'onde) que pour leurs niveaux énergétiques, afin que les réponses cellulaires soient elles aussi, reproductibles. Elles devraient être émises par des sources de lumière ayant des propriétés similaires à celles de la lumière du jour naturelle.

Plusieurs types de sources de lumière répondent à ces conditions. Leurs caractéristiques sont succinctement rappelées ci-dessous.

## La lumière artificielle

### Sources primaires de lumière proche de la lumière naturelle

Une source de lumière est dite primaire si elle correspond à une surface ou un volume qui émet de l'énergie rayonnante, contrôlable et reproductible. Certaines ont des caractéristiques proches de celles de la lumière naturelle.

En 2009, les sources primaires dont les caractéristiques sont les plus proches de celles de la lumière naturelle procèdent de l'émission lumineuse par fluorescence ; elles correspondent, en pratique, aux tubes fluorescents et aux diodes électroluminescentes.

### *Rappel sur l'émission lumineuse par fluorescence*

Lorsqu'un corps passe d'un état excité instable créé par un apport initial d'énergie -un courant électrique par exemple- à un autre état énergétiquement stable, le retour à la stabilité s'accompagne de la restitution de l'énergie initiale sous forme d'énergie lumineuse dite de fluorescence (pour un exposé très simplifié de la question, voir la figure I-1-2).

### *Tubes fluorescents*

L'exemple courant en est le tube appelé familièrement *tube au néon* ou sous sa forme compacte, le tube fluocompact. L'excitation et la restitution de l'énergie se font dans un gaz, mélange d'argon et de vapeurs de mercure ; l'énergie restituée n'est pas visible, mais excite à son tour la fluorescence de poudres déposées sur les parois du tube qui, elles, émettent des longueurs d'onde comprises entre 400 et 700 nm donc visibles. La lumière émise se compose d'un spectre de raies émises sur un fond continu donnant une *sensation* de type lumière du jour (figure I-1-3).

Ces tubes ne sont pas utilisés comme stimulateurs pour l'exploration visuelle, mais fréquemment comme source primaire de lumière du jour pour éclairer des tests comme ceux de la vision des couleurs.

### *Les diodes électroluminescentes*

Les diodes électroluminescentes ou LED (Light Emitting Diode) émettent une énergie lumineuse par un mécanisme de type fluorescence. L'excitation et la restitution de l'énergie se fait dans un semi-conducteur situé à l'intérieur d'une enveloppe en résine époxy ([http://fr.wikipedia.org/wiki/diode\\_electroluminescente](http://fr.wikipedia.org/wiki/diode_electroluminescente)).

Les LED les plus proches de la lumière du jour ont un large spectre qui couvre toutes les longueurs d'onde comprise entre 380 et 780 nm environ ; l'énergie de leur émission pour les radiations comprises entre 400 et 500 nm est supérieure à celle des autres longueurs d'onde (figure I-1-4). Ce type de source primaire donne une lumière proche de celle du jour.

Les diodes actuelles sont des sources puissantes avec des luminances maximales allant jusqu'à  $150 \text{ cd.m}^{-2}$ . Leur dynamique c'est-à-dire le rapport entre la luminance maximale et minimale, peut s'étendre sur 7 unités logarithmiques, permettant d'avoir une gamme d'énergies de très faibles à fortes, utile pour l'exploration visuelle.

Disposées les unes à côtés des autres, en pavées d'environ  $15 \times 25 \text{ cm}$ , elles sont utilisées comme stimulateurs portables, sources primaires de flashes avec l'avantage d'un temps d'éclairage-extinction pratiquement instantané ; les flashes générés sont de durée réglable à partir de 1 ms et davantage.

Actuellement, leur rendement énergétique est encore restreint mais devrait s'améliorer avec le progrès de leur développement. Elles sont aussi coûteuses.

### **Autres sources primaires de lumière**

Les lampes à incandescence y compris les lampes à halogène sont des sources primaires différentes de la lumière du jour, même si ce sont des sources de lumière artificielle utilisée fréquemment dans la vie courante. En effet, l'énergie émise pour les longueurs d'onde comprises entre 400 et 500 nm est moindre que celle émise pour les autres longueurs d'onde (figure I-1-5). Elles ne sont pas utilisées comme sources primaires de stimulations visuelles.

### **Les sources secondaires de lumière**

#### *Stimuler la rétine sur toute sa surface*

Les sources de lumière primaires décrites ci-dessus émettent leur énergie sur une surface restreinte. Pour être stimulée de façon homogène, la rétine doit l'être par l'intermédiaire d'une énergie répartie sur une large surface.

Pour ce faire, l'énergie émise par une source primaire est réfléchiée idéalement sur une large surface totalement réfléchissante c'est-à-dire que toutes les longueurs d'ondes émises et leurs énergies afférentes sont intégralement réfléchies. En pratique, une telle surface totalement réfléchissante n'existe pas ; si toutes les longueurs peuvent bien être réémises, il y a toujours absorption d'une faible partie de l'énergie. Cette lumière réémise correspond à une source secondaire.

#### *Sources secondaires et caractéristiques de la lumière émise ou transmise*

Les sources secondaires ne sont donc pas elles-mêmes génératrices d'énergie mais elles renvoient ou transmettent tout ou partie de la lumière reçue, par exemple, d'une source primaire. Tout objet de l'espace est une source secondaire vis-à-vis de la lumière solaire ou d'une lumière artificielle.

Les caractéristiques du rayonnement réémis par la source secondaire varient selon le comportement de l'objet intermédiaire vis-à-vis des caractéristiques énergétiques et spectrales du rayonnement de la lumière incidente ainsi que de la composition spectrale du rayonnement de la lumière incidente.

### *La coupole : source secondaire*

En pratique, les stimulateurs pour l'exploration de la fonction visuelle sont effectivement constitués d'une source primaire dont l'énergie est réfléchi sur une surface en forme d'hémisphère dite coupole qui devient alors la source de stimulation : c'est une source secondaire.

Cette stimulation émise en coupole peut être de longue durée ; elle correspond alors à un fond d'un niveau lumineux donné qui sert à l'adaptation rétinienne.

Une deuxième source peut projeter sur la coupole et son fond adaptant des stimulations lumineuses qui, pour être efficaces doivent avoir une énergie supérieure à celle du fond adaptant.

### *Fond adaptant de lumière blanche*

Des LED blanches peuvent servir de fond adaptant de lumière blanche en coupole. Cette solution n'est pas celle actuellement adoptée dans la majorité des appareillages d'exploration de la fonction visuelle par électrophysiologie.

On verra que la solution pratique adoptée, si elle semble équivalente d'un point de vue perceptif, ne l'est pas d'un point de vue physiologique.

## **La lumière invisible**

Elle correspond à tous les rayonnements électromagnétiques qui sont émis par les sources primaires ou secondaires dont les radiations se situent en dehors de l'intervalle 400 – 700 nm. En deçà de 400 nm, on parle d'ultra-violet et au-delà de 700 nm d'infrarouge. Dans des conditions normales, ces radiations ne donnent pas de sensation car les premières -les ultra-violets- sont en grande partie absorbées par la cornée et le cristallin ; les secondes -les infra-rouges- participent à l'échauffement des milieux antérieurs par absorption ; une trop grande exposition à ces radiations lèsent les milieux oculaires et participent à leur vieillissement prématuré en favorisant par exemple la survenue de sénescence du cristallin [Dillon, 1994] et de dégénérescence de la macula [Bialek-Szymanska et al., 2007].

## **Adapter la stimulation aux contraintes physiologiques**

Certaines cellules visuelles répondent de façon optimale lorsque l'énergie de la stimulation est répartie sur une large surface de façon inhomogène mais organisée, sous forme d'une structure.

Pour se faire, il est indispensable de faire appel à des stimulateurs qui permettent une alternance d'énergie de différents niveaux (figure I-3-1, figure I-3-2 ou figure I-3-5) reproductibles dans l'espace et dans le temps et, du moins en théorie, sans inertie temporelle.

Ces stimulations structurées reproductibles sont réalisables sur des écrans.

## **Les écrans cathodiques**

Il s'agit de tubes à vide où des électrons, accélérés, excitent les couches fluorescentes disposées sur les parois internes d'un écran. Les trajectoires des électrons sont guidées grâce à un masque, de façon à parvenir uniquement sur l'un des trois groupes de luminophores dits R-G-B qui ont une émission maximale dans le rouge, le vert et le bleu. Leur combinaison permet d'obtenir une gamme de couleurs et de luminances compatibles avec des images et des stimulations visuelles.

Ces écrans sont encore utilisés dans de nombreux stimulateurs pour l'électrophysiologie visuelle, notamment pour la présentation de damiers alternants avec eux-mêmes ou avec un champ lumineux homogène, dont la dimension des cases et leurs contrastes sont réglables.

Dans la vie courante, les tubes cathodiques sont largement remplacés par des écrans plats. Mais en 2009, ils ne présentent pas encore les avantages des tubes cathodiques en particulier pour les stimulations en damier alternant.

## Les écrans plats

[http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89cran\\_%C3%A0\\_cristaux\\_liquides](http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89cran_%C3%A0_cristaux_liquides). Ce sont des écrans à cristaux liquides ; ils sont les principaux composants des moniteurs plats pour l'informatique, la photo ou la télévision.

Ils sont basés sur le principe de la polarisation de la lumière grâce à des filtres polarisants et à la biréfringence de certains cristaux liquides dont l'orientation varie en fonction d'un champ électrique. Ces cristaux ne sont pas eux-mêmes émetteurs de lumière mais doivent être éclairés pour restituer ou non la lumière incidente selon la polarisation des cristaux.

Ils peuvent être de grandes dimensions, avoir un nombre important de pixels. Vus de face, le contraste, c'est-à-dire le rapport de luminance entre un pixel blanc et noir, peut être de 600/1 voire 3000/1, la luminance maximale de 250 à 320 cd.m<sup>-2</sup>, mais leur temps de réponse est lent de 2 à 16 ms.

La technologie la plus utilisée est celle dite TFT (Thin Film Transistor). Très schématiquement, l'écran est composé de différentes couches de verres très fins comprenant les cristaux liquides pour les couleurs et les électrodes pour la mise sous tension et ses variations.

Les écrans plats ont beaucoup d'avantages, finesse de l'image, excellent contrôle du contraste et de la luminance.

Ils présentent des inconvénients majeurs pour générer des stimulations visuelles structurées : les cristaux liquides sont très lents et leurs mouvements asymétriques. Les temps d'établissement et de disparition de l'image sont différents ; il est donc difficile d'avoir par exemple, des damiers dont les alternances sont symétriques et donc efficaces pour l'exploration visuelle.

## De l'idéal à la réalité...

Si les écrans cathodiques et bientôt la nouvelle génération des écrans plats sont des sources lumineuses adoptées par l'ensemble des concepteurs d'appareillage pour l'électrophysiologie, les sources lumineuses utilisées en pratique pour les stimulations de *lumière blanche* sont loin de ressembler à ce qui a été décrit.

Les LED blanches comme il a été dit, présentent encore un coût et des caractéristiques de rendement qui en font des sources courantes à venir.

La *lumière blanche* tant pour les fonds adaptants que pour les stimulations flash, est la combinaison d'au minimum trois, mais plutôt cinq diodes électroluminescentes de caractéristiques précises : les longueurs d'onde émises ont une bande passante étroite et une énergie modulable sur plusieurs unités logarithmiques (figure I-1-6).

La combinaison de ces différentes longueurs d'onde donne effectivement une sensation achromatique ou *blanche* car chacune stimule de façon spécifique un ou plusieurs groupes de cônes à l'origine de la sensation visuelle lorsque le niveau lumineux est fort (vision de jour et vision des couleurs). Les quelques longueurs d'onde choisies stimulent le système visuel par l'intermédiaire d'un spectre de raies (figure I-1-7) et non pas d'un continuum de longueurs d'onde comme ce qui se fait avec une source ayant les caractéristiques de la lumière du jour.

Ce type de stimulation par spectre de raies a l'avantage d'un coût restreint et des inconvénients limités, l'ensemble des réponses cellulaires obtenues étant peu différent de celles recueillies avec une stimulation de spectre continu, type lumière du jour...

## Les appareillages du commerce

Plusieurs compagnies commercialisent des appareillages pour l'exploration de la fonction visuelle par électrophysiologie. Tous les stimulateurs délivrent des stimulations de lumière visible de différents niveaux lumineux, de durée brève pour les flashes, sur une coupole, avec possibilité d'avoir un fond adaptant.

Les stimulations structurées en damier ou en hexagones sont toutes générées sur des écrans.

Leur facilité de mise en œuvre, le recueil et traitement des signaux évoqués, obéissent aux normes édictées par la société internationale d'exploration de la fonction visuelle (International Society for Clinical Electrophysiology of Vision : ISCEV <http://iscev.org> ) avec présentations et lisibilité des résultats personnalisés.

Le lecteur pourra approfondir les caractéristiques des différents appareillages pour l'exploration de la fonction visuelle par électrophysiologie, en se référant à la liste non exhaustive des sites ci-dessous établie en juin 2009.

CH Electronics: <http://www.ch-electronics.net>

CSO Ocular Electrophysiology: <http://www.csophthalmic.com>

Diagnosys: <http://www.diagnosysllc.com>

LKC technologies: <http://www.lkc.com>

Métrovision: <http://www.metrovision.fr>

Roland Consult: <http://www.roland-consult.com>

Siem Bio-Médicale: <http://www.siem-biomedicale.com>

Tomey – rétine-électrophysiologie: <http://www.ebcmedical.com>

## Conclusion

Les sources sont l'élément fondateur de la stimulation visuelle. Le but final de celle-ci est d'exciter ou d'inhiber des groupes de cellules en étant le plus sélectif possible.

Pour cela, le physiologiste va choisir les paramètres d'énergie, de temps, de longueurs d'onde et de répartition spatiale de la stimulation permettant d'obtenir la meilleure identification possible de la fonction cellulaire testée.

Il est possible de remplir toutes les conditions requises si et uniquement si la source détient au minimum les caractéristiques demandées.

De la stimulation naturelle, source solaire, à celle comparable mais reproductible et maîtrisable que ce soit en termes de caractéristiques physiques, d'aspect technologique ou de coût, de nombreuses solutions sont proposées par l'ensemble des concepteurs d'appareillage en vue de l'exploration par électrophysiologie. Malgré tout, elles sont parfois loin de l'idéal... Un bon compromis est le plus souvent trouvé qui permet de stimuler le système visuel et de recueillir ses réponses dans des conditions toujours identiques.

Les progrès technologiques en particulier pour les diodes électroluminescentes blanches et les écrans plats, apporteront dans un futur proche des solutions dont on peut souhaiter qu'elles soient encore plus proches de la physiologie.



## Figures

**Lumière du jour :**  
Répartition spectrale de l'énergie relative du rayonnement solaire à travers l'atmosphère

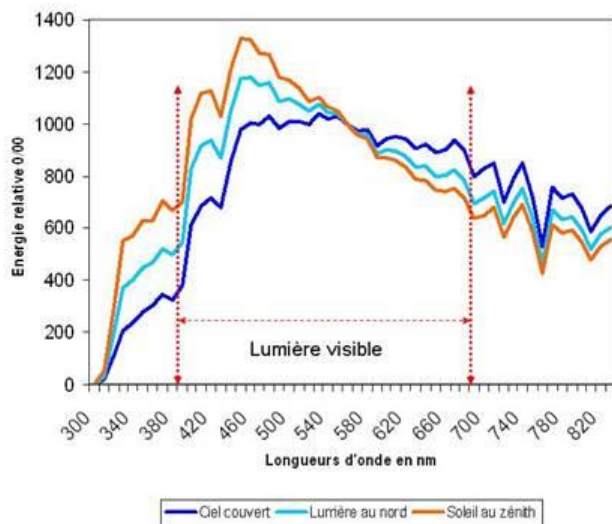


Figure I-1-1

Figure I-1-1. Répartition spectrale continue d'énergie relative de la lumière solaire à travers l'atmosphère, variable selon le moment du jour ou la saison (*d'après Le Grand Y. T II, tableau 21 p. 294*).

**Emission lumineuse par fluorescence**  
Principe schématique en 3 étapes...

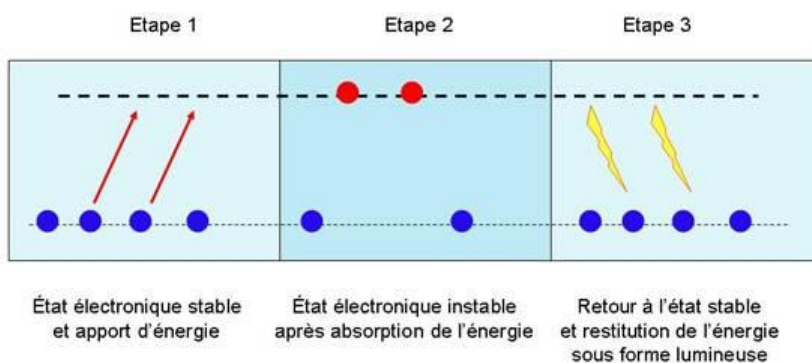


Figure I-1-2

Figure I-1-2. Etapes schématiques de l'émission par fluorescence.

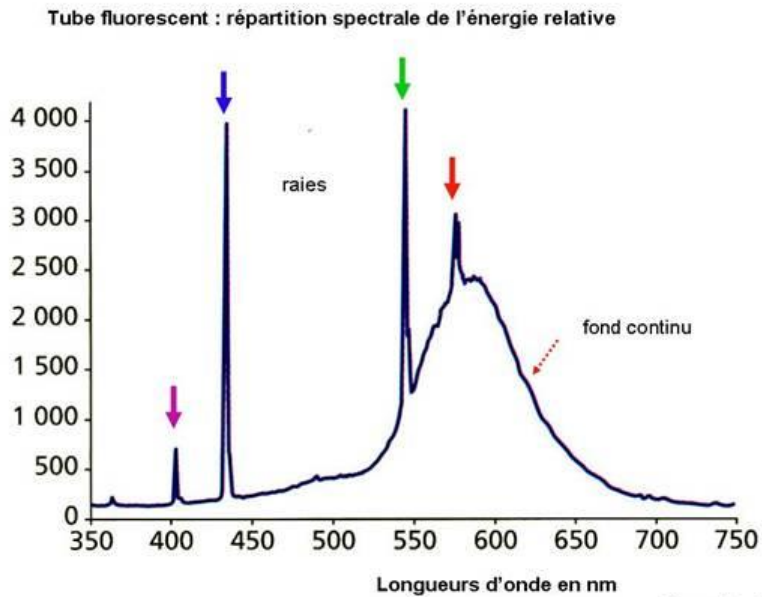


Figure I-1-3. Energie relative émise (en %) en fonction de la longueur d'onde pour une source primaire par fluorescence : superposition d'un spectre de 4 raies sur un fond continu (d'après [Leid, 2008] p. 65).

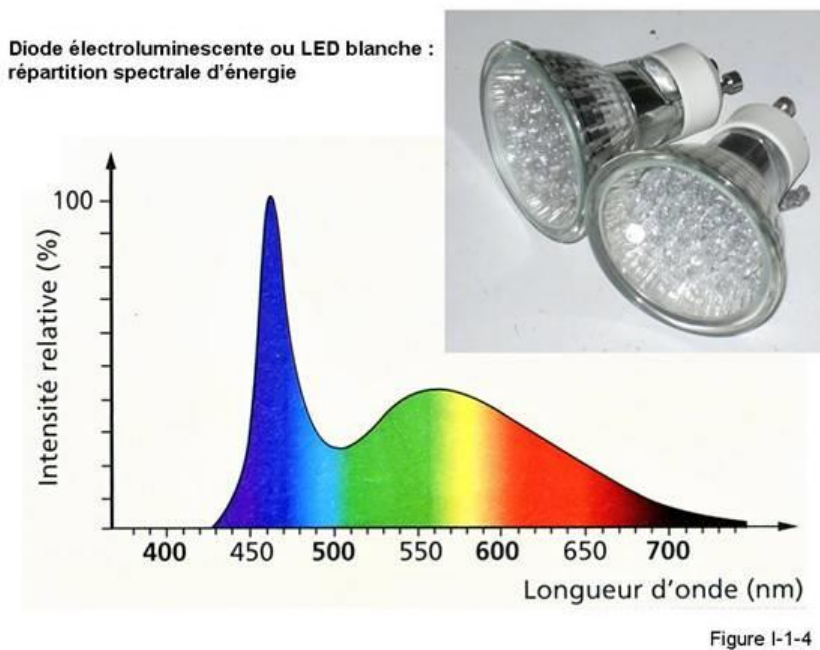


Figure I-1-4. Diode électroluminescente blanche : répartition spectrale de l'énergie (d'après [Leid, 2008] p. 65 - aspect de diodes blanches d'après <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/12/Ampoules.jpg/200px-Ampoules.jpg>)

Lumière émise par une lampe à incandescence en comparaison à celle du jour :  
répartition spectrale d'énergie

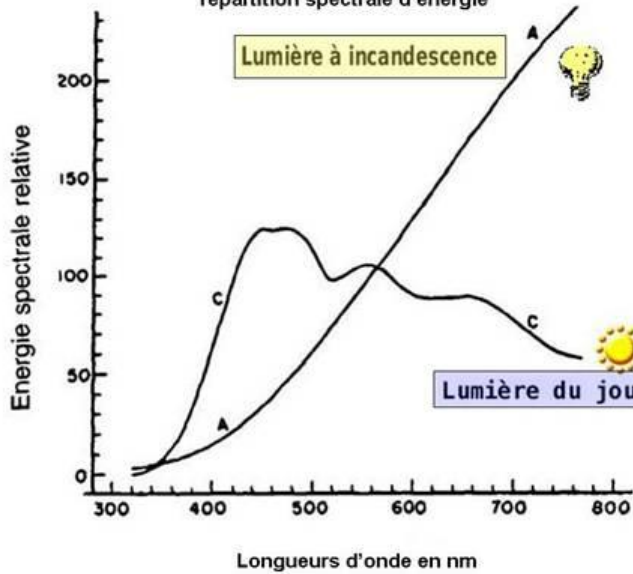


Figure I-1-5

Figure I-1-5. Répartition spectrale continue d'énergie relative de la lumière du jour et d'une lampe à incandescence (d'après [Leid, 2008] p. 64).

Position de LED par rapport au spectre de lumière blanche

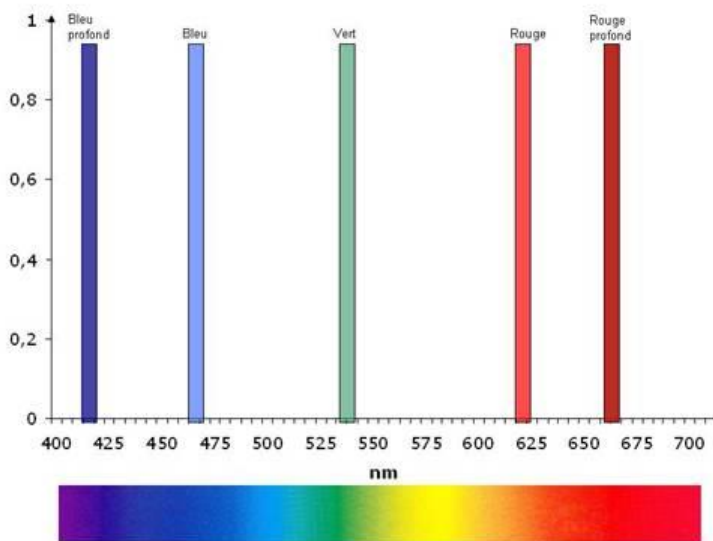


Figure I-1-6

Figure I-1-6. Cinq diodes électroluminescentes émettant autour de 415nm, 465nm, 535nm, 620nm et 660nm, avec une bande passante étroite de 20 à 40nm.

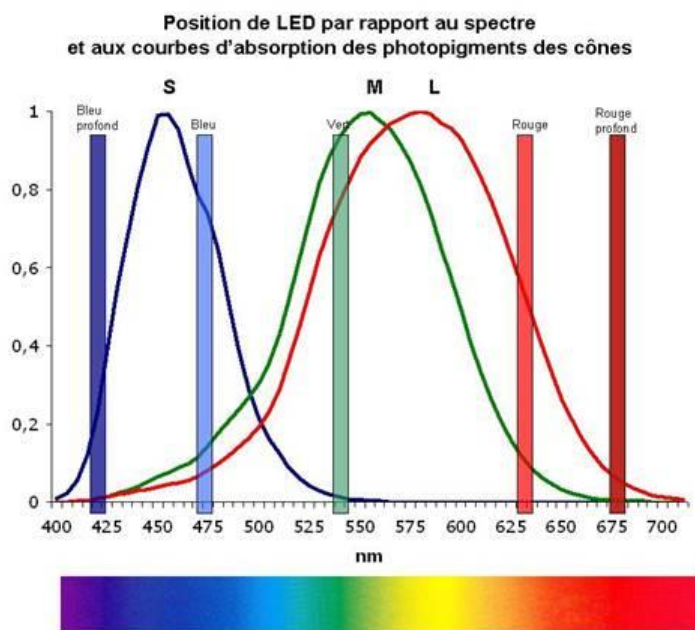


Figure I-1-7

Figure I-1-7. Superposition des cinq diodes électroluminescentes utilisées simultanément comme source primaire et les courbes d'absorption spectrales des trois types de cônes générant une sensation de lumière blanche.

## Bibliographie

Bialek-Szymanska, A., Misiuk-Hojlo, M., & Witkowska, K. (2007). [Risk factors evaluation in age-related macular degeneration]. *Klin Oczna*, 109 (4-6), 127-130. [Abstract].

Dillon, J. (1994). UV-B as a pro-aging and pro-cataract factor. *Doc Ophthalmol*, 88 (3-4), 339-344. [Abstract].

Leid, J. (2008). Spécial Vision des couleurs. *Supplément Ophtalmologie n° 32* (p. 86): Propos-Biopharma.