

Diminuer les halos lumineux pour protéger le ciel et l'environnement.



© Alain LE GUE¹ et Nicolas BESSOLAZ²
¹Secrétaire LICORNESS, ²Vice-président LICORNESS
¹ et ² Membres de l'ANPCEN



Avec une société fonctionnant 24 heures sur 24, nous éclairons de plus en plus et partout. Cela concerne l'éclairage public mais aussi les publicités lumineuses le long des routes et des zones commerciales...

Tout ces éclairages participent à la formation des halos lumineux au dessus des villes et des zones commerciales et ont un impact certain sur la faune, la flore et la santé humaine.

Depuis quelque temps l'action des défenseurs du Ciel Noir commence à porter ses fruits. Des lois ou règlements apparaissent dans beaucoup de pays visant à mieux orienter les flux lumineux et les diminuer pour économiser l'énergie. Si ne nous faisons rien, il est devenu évident que nous allons vivre une crise de l'énergie qui deviendra de plus en plus chère.

Devant ces actes, certains éclairagistes de la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) mettent en doute les demandes des astronomes pour la diminution des Halos lumineux en voulant attaquer le principe de luminaire « Full Cut-Off », « complètement défilé » pour les Français.

De plus les fabricants, surfant sur la vague des économies d'énergie, proposent de nouvelles lampes de plus en plus efficaces et font la promotion des éclairages de couleur blanche. Ils proposent aussi de nouveaux lampadaires autonomes en énergie, avec des éoliennes ou des panneaux solaires, équipés par des LED. Hélas ces lampadaires dits écologiques participent à la diffusion de lumière dans les endroits où la nature sauvage est à préserver. De plus ces luminaires à LED ont hélas un spectre lumineux tirant vers le bleu, très préjudiciable pour les biotopes. C'est aussi le cas des lampes ayant une lumière blanche.

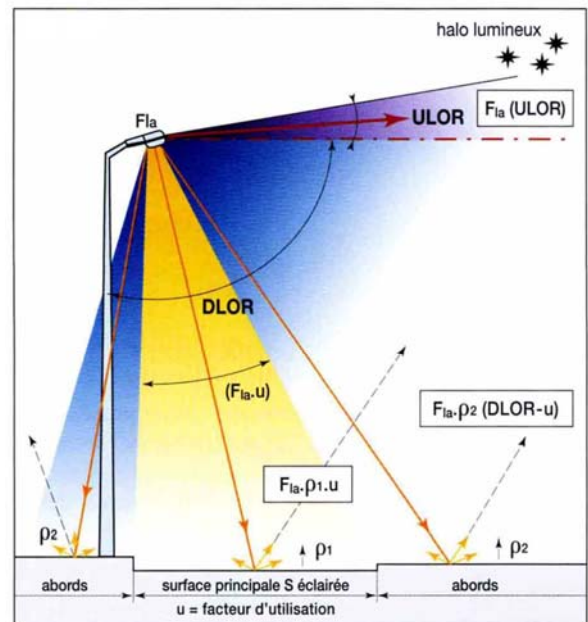
Dans cet article, nous allons essayer de préciser ce que l'on attend des luminaires « Full Cut Off » ou « complètement défilés » et de préciser aussi leur spectre lumineux pour qu'ils puissent respecter l'environnement nocturne et en particulier ceux utilisant des LED.

UN HALO DE LUMIERE.

La formation du Halo.

C'est sur la formation des halos lumineux que les avis divergent selon que l'on soit astronome ou éclairagiste. Un fait est entendu : c'est à cause de la diffusion de la lumière dans l'atmosphère. Mais d'où vient cette lumière ? Deux écoles s'affrontent, même si les éléments à la base pris en compte sont les mêmes, i.e. émission directe et réflexion.

Selon la CIE et l'AFE, le halo est formé de deux composantes : la clarté naturelle du ciel due au rayonnement des sources célestes et la luminescence naturelle de l'atmosphère supérieure, et le halo artificiel due à la lumière émise directement vers le Ciel par les lampes et les luminaires (ULOR) et de la lumière réfléchiée par les surfaces éclairées ou les abords. (Réf.1). Ils ont en partie raison mais ils oublient la physique de la propagation de la lumière dans l'atmosphère et que la partie naturelle de la clarté du ciel est négligeable.



$$UPF = F_{ia} [ULOR + \rho_1 \cdot u + \rho_2 (DLOR - u)] \quad (1)$$

Selon les astronomes, toute la lumière émise vers le ciel ne contribue pas avec la même importance à l'augmentation du halo. Les théories de l'AFE seraient donc incomplètes. Ajoutons que la luminosité naturelle du ciel, toutes causes confondues est extrêmement faible variant de 1.7×10^{-4} cd/m² en période de minimum solaire à 2.5×10^{-4} cd/m² lors des maximas.

D'après Jan HOLLAN, un des pionniers dans les études sur la Pollution Lumineuse avec Pierantonio CINZANO, la quantité totale de lumière revenant vers le sol dans le cas d'un ciel nuageux dépend peu de la direction des émissions vers le haut, mais seulement de la répartition géographique de la lumière retournant vers le paysage, ainsi que de la distribution de luminance du ciel comme on peut l'observer de n'importe quel endroit. Mais sous un ciel sans nuages, la direction des émissions vers le haut est alors primordiale. La grande majorité de la lumière émise vers le haut s'échappe dans l'univers. Prenons une analogie, en été, la lumière du soleil arrive à midi non diffusée au sol dans sa grande majorité, de sorte que l'ombre, seulement éclairée par la lumière diffusée, est beaucoup plus sombre. Pour la lumière directement émise vers le haut à proximité du zénith et en l'absence de nuages, environ 8 pour cent retourne vers le sol en raison de la diffusion.

La lumière qui va presque horizontalement et vers le haut, cependant, est presque totalement diffusée sur son chemin car l'épaisseur d'atmosphère traversée est 6 fois plus grande pour un angle de 10° de hauteur par rapport à un trajet quasi vertical. Reprenons notre analogie de la lumière solaire, maintenant celle de son coucher qui est faible, l'éclairement horizontal en quasi-totalité au sol est dû à la diffusion de lumière. La moitié de cette lumière est dispersé vers le haut, la moitié vers le bas, la dispersion étant symétrique. Ainsi, une telle lumière s'élevant juste au dessus de l'horizontal contribue six fois plus au halo (50 à peu près égal à 8x6). Le halo dû à cette lumière dépend de la turbidité de l'air. Avec de l'air très limpide, il peut être vu jusqu'à 300 kilomètres, avec de l'air très chargé en particules ou en humidité, la majeure partie de cette lumière est dispersée à moins de dix kilomètres de la source. En tout cas, le halo visible des sites situés à plusieurs dizaines de kilomètres des sources lumineuses dépend presque uniquement de la lumière émise à quelques degrés au-dessus de l'horizon.

La réduction de cette composante est donc autant que possible la mesure la plus importante pour protéger la vision du ciel nocturne, de l'univers et de l'environnement nocturne naturel en général. D'autre part beaucoup d'études et de travaux de modélisation numérique ont montré quantitativement, ces dix dernières années que dans différentes conditions atmosphériques, la contribution totale des émissions lumineuses de réflexion lambertienne au halo est trois fois inférieure que les émissions presque horizontales.

Pour argumenter ce fait, les travaux de Christopher BADDILEY complètent ceux de Jan HOLLAN. Il travaille depuis des années avec l'Institution of Lighting Engineers (ILE) en grande Bretagne qui a édité le Skyglow'guidance paru en automne 2006. Dans ses différents travaux, il a étudié la contribution de la luminance du ciel en fonction de l'angle de défilement du luminaire et avec une intensité lumineuse isotrope. Le modèle utilisé est celui qu'il emploie depuis quelques années et qui a été présenté à la Conférence Starlight en 2007 et dans une publication de l'ILE (Réf.2 et 3)

Nous résumerons les conclusions du travail de Christopher Baddiley par ce petit schéma qui décrit les zones où l'émission de lumière est soit la plus efficace, soit la plus gênante :

A : 0-75° Distribution idéale de la lumière.

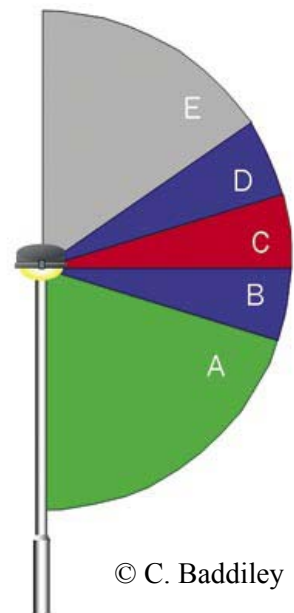
B_{bis} : 75-85° Zone émettant de la lumière éblouissante pour les usagers de la route.

B : 85-90° Contribution significative au halo vu de loin par la réflexion, mais la lumière réfléchi a plus de chances d'être obstruée par des bâtiments, les arbres et la topographie.

C : 90-95° Zone critique pour le halo et la lumière intrusive vue à une dizaine de km (dans les zones rurales), où il dépend fortement de la diffusion des aérosols.

D : 95-100° Contribution importante au halo, en particulier dans les zones rurales où il est dépend plus des aérosols. Probablement peu de risque pour la lumière intrusive.

E : 100-180° Zone critique pour la compréhension du halo de toutes les zones urbaines, mais proportionnellement, il y a moins d'impact dans les zones rurales.



© C. Baddiley

En conclusion de cette partie, nous pouvons dire que le halo est causé par la lumière directement émise et réfléchi qui est diffusée par l'atmosphère comme le dit l'AFE, mais ce n'est pas suffisant ! Il faut aussi savoir que l'angle d'émission lumineuse est important ! Mais aussi que les obstacles et la turbidité de l'atmosphère joue un rôle non négligeable bien que secondaire par rapport à l'angle de l'émission directe de la lumière. Les éclairagistes et les astronomes doivent travailler ensemble. Leurs spécialités respectives ne peuvent qu'aboutir à une conception d'un éclairage efficace.

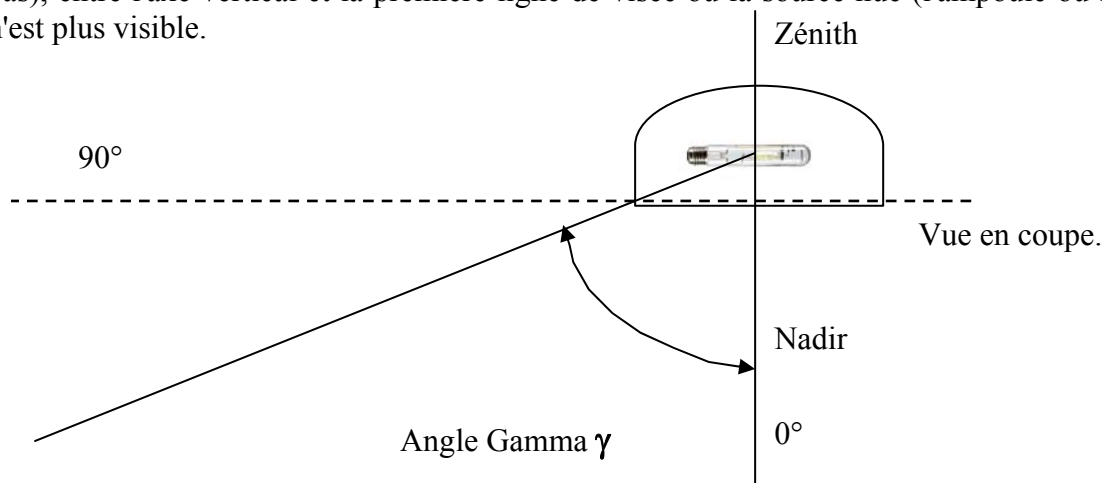
Entièrement défilé, la seule solution ?

Il est donc évident que la forme du luminaire est primordiale dans la formation du halo, mais aussi pour éviter l'éblouissement source d'inconfort pour les usagers, la lumière intrusive et les impacts sur l'environnement. Des voix s'élèvent dans la communauté européenne des éclairagistes pour dire que certaines formes de luminaire dit « Full Cut-Off » seraient inutiles pour limiter la formation du halo mais aussi augmenteraient la consommation en énergie. Nous allons voir cela plus en détail.

Soyons réalistes, il est indispensable que les luminaires cachent au maximum à la vue directe des usagers la lampe. Ceci maximisera le flux vers la surface à éclairer, ce qui permettra de le l'ajuster pour chaque cas et ainsi d'utiliser au mieux l'énergie. Ceci évitera aussi l'éblouissement et la lumière intrusive. Pour cela il faut que le luminaire soit défilé et même respecte le terme « défilé absolu » défini par les américains et canadiens.

Commençons par quelques définitions liées au terme « défilé ».

Commençons par définir l'angle de défilement (Cut-off) qui est donné dans les notices techniques des lampadaires. C'est l'angle γ , mesuré vers le haut à partir du nadir (c.-à-d., en bas), entre l'axe vertical et la première ligne de visée ou la source nue (l'ampoule ou la lampe) n'est plus visible.



Nous passerons sous silence les luminaires non défilés, qui sont une aberration pour l'éclairage de nos rues, même pour les éclairagistes français.

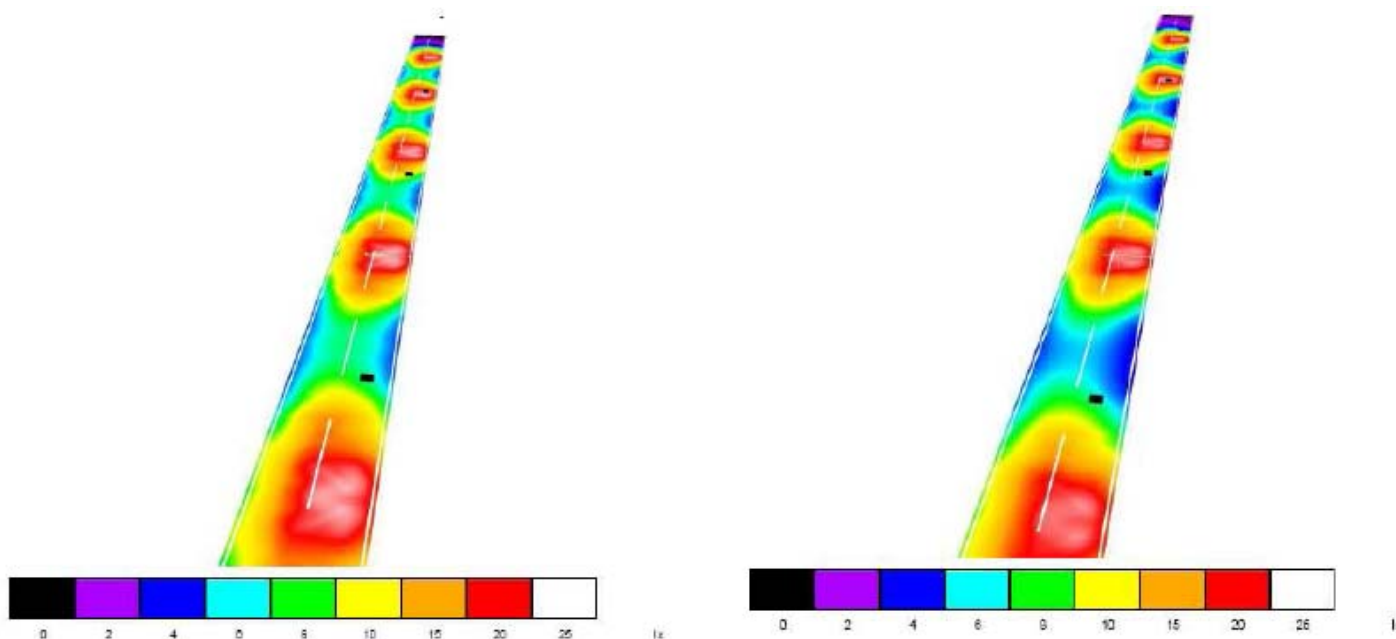
Avant tout définissons le terme « défilé » et ses différentes variantes. Prenons la définition de l'AFE qui suit les recommandations de la CIE. Les luminaires **défilés** ont une intensité lumineuse maximale noté I_{max} pour un angle de défilement γ supérieur ou égale à 90° de 10 candélas par 1000 lumen ce qui donne un flux lumineux directement émis vers le ciel entre 0 et 6% (au maximum on a en effet un flux égal à $2\pi * I_{max}$), et de 30 candélas par 1000 lumens pour un γ entre 80° et 90° . L'intensité lumineuse maximale se trouve pour une direction comprise entre 0 et 65° . Les luminaires **semi-défilés** ont une intensité lumineuse maximale pour un γ supérieur ou égale à 90° de 50 candélas par 1000 lumen, ce qui correspond à un flux lumineux directement émis vers le ciel qui va de 0 et 31%, et de 100 candélas par 1000 lumens pour un γ entre 80° et 90° . L'intensité lumineuse maximale se trouve dans une direction entre 0 et 75° . Pour l'Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), les définitions sont différentes. Les luminaires **semi-défilés** ont de 0 à 31 % du flux lumineux émis vers le ciel avec une intensité (candela) maximale inférieure en valeur à 5 % du flux lumineux (lumen) émis au-dessus de l'horizon et une intensité maximale inférieure à 20 % du flux lumineux (lumen) émis entre 0° et 10° sous l'horizon. Les luminaires **défilés** ont de 0 à 16 % de flux lumineux émis vers le ciel avec une intensité (candela) maximale inférieure à 2,5 % en valeur du flux lumineux (lumen) émis au-dessus de l'horizon et une intensité (candela) inférieure à 10 % du flux lumineux (lumen) émis entre 0° et 10° sous l'horizon. Enfin les luminaires **défilés absolu** ou **complètement défilés** (full cut-off en anglais) n'ont aucun flux lumineux émis au-dessus de l'horizon et une intensité (candela) inférieure en valeur à 10 % du flux lumineux émis entre 0° et 10° sous l'horizon.

Cela ne sert à rien d'éclairer ce qui ne doit pas être éclairé ! Eclairer une route, un trottoir, un parking, un panneau de signalisation, n'implique pas d'éclairer le ciel, les façades, les jardins, etc. C'est du simple bon sens. Cela permet en plus de limiter l'éblouissement et du fait d'une utilisation maximale du flux lumineux d'économiser l'énergie.

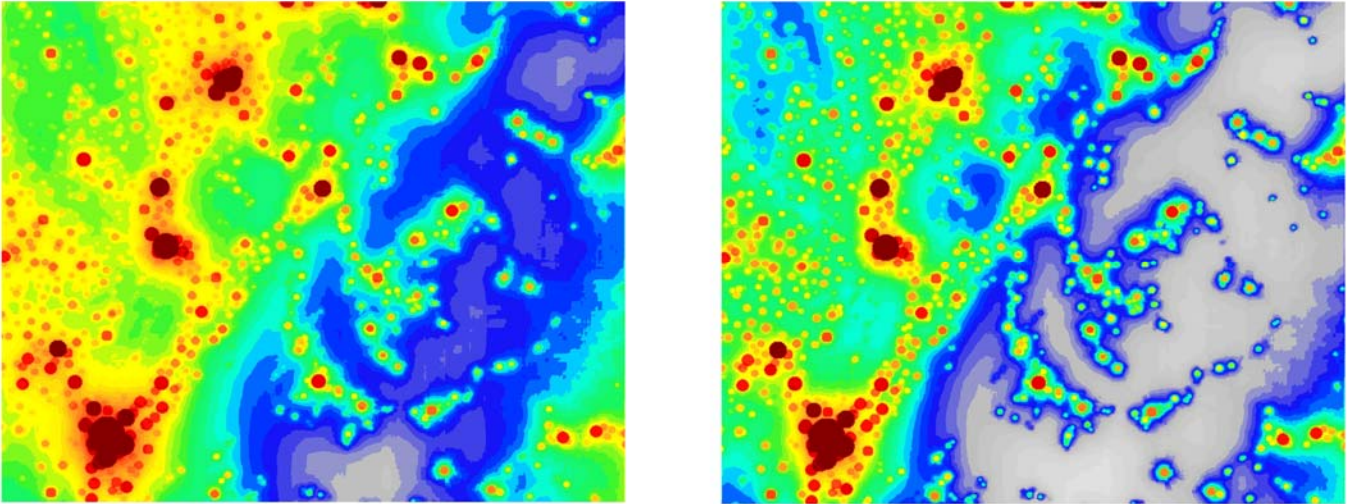
Les constructeurs font des efforts. Voici un exemple d'installation dans la commune de Cognin en Savoie, une ville de 6000 habitants. Les lampadaires entièrement défilés conduisent à un cône de lumière visible sur le mur avec un angle γ maximum d'environ 70° . Le seul problème est la luminance trop forte, ici de 30 lux au sol dans une zone résidentielle à faible circulation. Car avec ces types de lampadaires, beaucoup d'éclairagistes oublient d'ajuster la puissance des lampes utilisées par rapport aux lampadaires plus classiques ...



L'un d'entre nous, à l'aide du logiciel Dialux a modélisé l'efficacité du lampadaire Philips Iridium avec une lampe SHP de 70 watts et avec deux types de vasques différentes. La différence entre les luminaires **complètement défilés** (verre plat à gauche) et **semi-défilés** (verre bombé à droite) ne souffre pas de comparaison (voir les images de modélisation ci-dessous). Dans les deux cas, les luminaires ont une hauteur de feux de 7,5m et espacés de 32,4m soit un rapport espacement/hauteur d'environ 4.3 et sans inclinaison pour ne pas avoir d'émission directe de lumière dans le cas complètement défilé (FCO) et limiter cette dernière dans l'autre cas. Les caractéristiques recherchées sont celle d'une départementale traversant un village par exemple avec une luminance moyenne cible de 0.75 cd/m². On obtient que dans un tel cas, seul le FCO parvient à maintenir ce niveau de luminance et que l'uniformité d'éclairage est meilleure avec un éclairage moyen au sol de 10 lux. Le luminaire à verre bombée nécessite en fait un espacement plus faible ou l'utilisation d'une ampoule de puissance supérieure entraînant un suréclairage pour respecter le niveau de luminance voulu pour ce type de voies. Les FCO sont gagnants sur tous les plans (économie, écologie, photométrie ...).



Il a ensuite, grâce au logiciel THOTPRO développé par Michel BONAVIDACOLA au départ et dans une nouvelle version, modélisé les effets de ces mêmes éclairages sur l'intensité des halos lumineux sur le département de la Savoie. Pour résumer, voici deux modélisations qui montrent l'effet de la généralisation de l'utilisation de lampadaires FCO (à droite) sur la réduction de la pollution lumineuse à grande échelle par rapport à des lampadaires défilés (à gauche) avec une fraction du flux lumineux total (lumen) du luminaire émise au-dessus de l'horizon (ULOR) égale à 3%. L'échelle de couleur correspond au rapport moyen entre la luminosité artificielle du ciel et celle naturelle mesurée à 45° au dessus de l'horizon. La couleur grise sur les cartes correspond à des zones où la pollution lumineuse peut être considérée comme négligeable.



Ce travail est disponible sur le site de LICORNESS. (Réf.4)

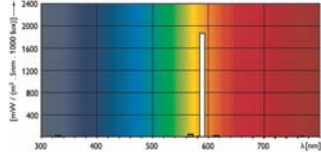
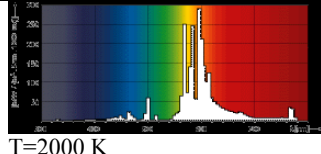
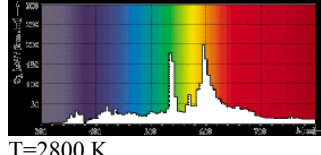
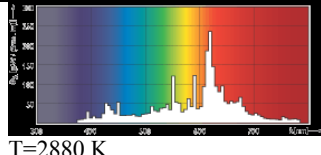
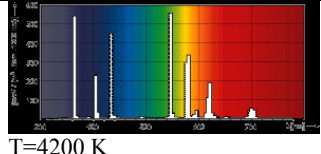
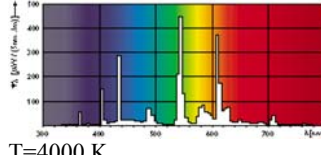
L'importance du spectre de la lumière sur l'amplification du halo lumineux

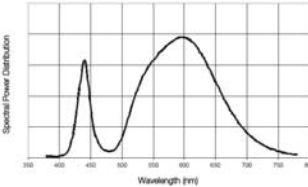
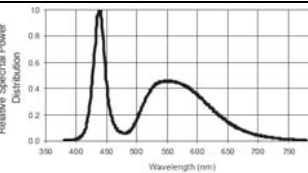
D'autre part, la formation du halo est fortement influencée par le spectre des lampes utilisées. La lumière dans les courtes longueurs d'onde du spectre est nettement plus diffusée puisque le pouvoir diffusant pour une molécule varie en λ^{-4} (loi de Rayleigh) donc une radiation dans le bleu à 450 nm sera $(550/450)^{-4} = 2,23$ fois plus diffusée qu'une radiation dans le jaune à 550 nm. On a intégré la diffusion sur tout le spectre d'une lampe et en utilisant la réponse de l'œil dans la bande de sensibilité considérée, et on obtient les valeurs dans le tableau ci dessous. En ce qui concerne les aérosols, la dépendance de la diffusion en fonction de la longueur d'onde est plus faible et typiquement varie en λ^{-1} pour des distributions en taille et en composition typique de ceux trouvées en Europe. Pourtant les résultats demeurent les mêmes en ordre de grandeur avec un impact pour la lumière blanche accrue d'un facteur jusqu'à deux fois plus que la lumière au sodium haute pression comme on peut le voir dans ce tableau.

On a en particulier calculé l'impact minimal sur l'environnement nocturne en supposant que l'œil humain en vision scotopique se rapproche le plus de la vision nocturne de la faune. Il faut noter que c'est bien un impact minimal car la courbe de sensibilité de la vision des insectes en particulier est beaucoup plus grande en deçà de 400nm que pour l'œil humain qui atteint alors sa limite de détection dans ses longueurs d'onde.

Le tableau ci-dessous résume cet important travail.

L'impact du type de spectre lumineux sur l'environnement nocturne © N. Bessolaz

Type de lampe considérée	Spectre et température de couleur associée	Rendement lumineux (en lm/W) dans les différentes bandes de sensibilité de l'œil humain			Facteur d'amplification de la diffusion Rayleigh par rapport à une lampe au Sodium Haute Pression dans la bande scotopique	Economie d'énergie possible en utilisant la lumière blanche par rapport au Sodium Haute Pression pour une luminance de 0,5 cd/m ² (en %)	Impact minimal sur l'environnement nocturne
		Photopique (L > 3 cd/m ²)	Mésopique* (L = 0,5 cd/m ²)	Scotopique (L < 0,001 cd/m ²)			
Sodium Basse Pression (Philips SOX 90W)	 T=1800 K	152	146	33	0,41	37,7	0,26
Sodium Haute Pression (Philips SON-T 70W)	 T=2000 K	95	106	64	1	0	1
Iodures métalliques à brûleur céramique 1 MASTER CityWhite CDO-TT 70W	 T=2800 K	86	116	86	1,92	9,4	1,75
Iodures métalliques à brûleur céramique 2 MASTER CosmoWhite CPO-TW 90W	 T=2880 K	112	148	144	2,49	39,6	1,79
Vapeur de Mercure Haute Pression Philips HPL 4 80W	 T=4200 K	50	61	50	0,87 (en fait 1,51) pour obtenir le même flux lumineux qu'avec une SHP !	-76,6	1,51
Induction PhilipsMASTER QL 85W	 T=4000 K	82	114	121	2,05	7,6	1,91

LED Luxeon K2 blanc chaud	 <p>T=3000 K</p>	62	82	80	1,29 (en fait 1.67) pour obtenir le même flux lumineux qu'avec une SHP !	-29	1,67
LED Luxeon K2 blanc froid	 <p>T=5500 K</p>	84	129	160	2,91	21,7	2.40

*La courbe de sensibilité de l'œil en vision mésopique utilisée ici pour un niveau de luminance photopique moyen de 0.5 cd/m² (correspondant à la fourchette plutôt basse des niveaux préconisées par la norme EN 13201) est calculée à partir du travail de Bullough & Rea (2008) intitulé « *Innovative, Energy-Efficient Lighting for New York State Roadways : Opportunities for Incorporating Mesopic Visibility Considerations Into Roadway Lighting Practice* » effectué au « *Lighting Research Center Rensselaer Polytechnic Institute* »

Ce tableau récapitulatif montre différents résultats. Le sodium basse pression reste la lampe impactant de loin le moins l'environnement nocturne et doit rester la norme à proximité des observatoires malgré son rendu de couleur médiocre. Les lampes avec une **lumière blanche froide** (T-5500K) ont ainsi **un impact 10X supérieur à une lampe au sodium basse pression !**

On voit que les **sources en lumière blanche**, même si on adapte à la baisse les niveaux d'éclairage pour maintenir le même niveau de luminance pour l'éclairage public (pris ici pour l'exemple à 0.5 cd/m² de moyenne) afin d'avoir des performances visuelles équivalentes au sodium haute pression tout en faisant quelques économies d'énergie (qui reste la plupart du temps bien faible), **contribuent à amplifier la pollution lumineuse de 50 à 140 % par rapport au sodium haute pression**. On a supposé ici que la réflectance des chaussées était similaire pour les différents types des spectres des sources. La prise en compte de cette variable ne modifie pas les résultats au-delà de 2 %.

Les sources à lumière blanche doivent donc être réservées aux centres urbains et ne doivent pas se généraliser pour ne pas dégrader encore plus notre environnement nocturne. Par contre pour des bien plus faibles niveaux de luminances dans la bande photopique L~0.05 cd/m² (équivalent à des éclairages au sol juste en dessous du lux pour les chaussées typiques en France) qui sont exploitables en particulier pour le déplacement des piétons ou l'éclairage des zones résidentielles, les sources à lumière blanche pourraient être utilisées avec efficacité, notamment avec les sources à LED couplées à des détecteurs de présence, tout en ayant un impact sur l'environnement nocturne à peu près équivalent aux sources classiques au sodium haute pression. Les éclairages au sol équivalents dans la bande mésopique seraient en effet confortables pour un tel usage autour de 3 lux. Par contre, même dans ce dernier cas, les spectres des LEDS auront un fort impact pour l'étude des propriétés physiques des objets astrophysiques car l'émission de rayonnement produite par les LEDS forme un fort continuum infrarouge contrairement aux spectres des lampes à décharges composées essentiellement d'un nombre fini de raies dont on peut s'affranchir en partie en spectroscopie haute résolution.

DE LA LUMIERE ET DE LA VIE.

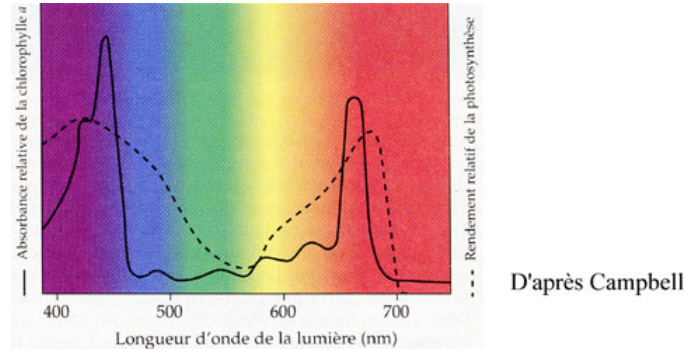
Lumière spectres et impact sur la vie.

La lumière indispensable à la vie... Sans lumière pas de vie, c'est un lieu commun... La lumière c'est de l'énergie et elle participe à la grande chaîne de la vie. Les plantes synthétisent leur matière organique qui ensuite est mangé par les faunes herbivores et eux-mêmes par les faunes carnivores. Les faunes nocturnes ne font pas autrement...

Avant de voir les effets de la lumière sur la vie, voyons quelques généralités sur les spectres lumineux perçus par les différentes formes de vie.

Pour la flore

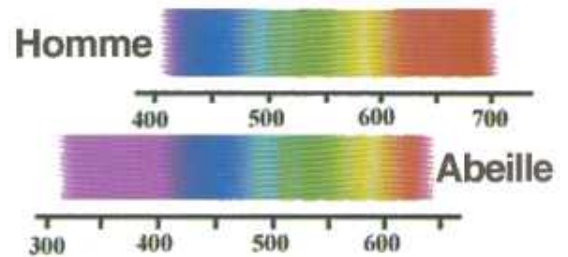
La photosynthèse indispensable à la vie des plantes utilise surtout de la lumière bleue et aussi dans le rouge (Trait continu), avec un rendement plus fort dans la partie bleue du spectre (Trait en pointillé). Voir la figure ci-contre. (Réf.5)



Pour la faune

Nous prendrons quelques exemples à savoir les insectes et les oiseaux.

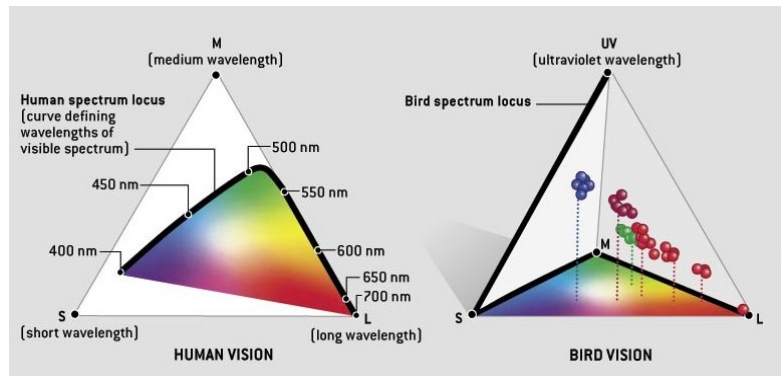
Les insectes sont très sensibles aux radiations bleues et ultra-violettes du spectre



© DR

Les oiseaux sont eux aussi très sensibles à certaines radiations notamment dans le bleu.

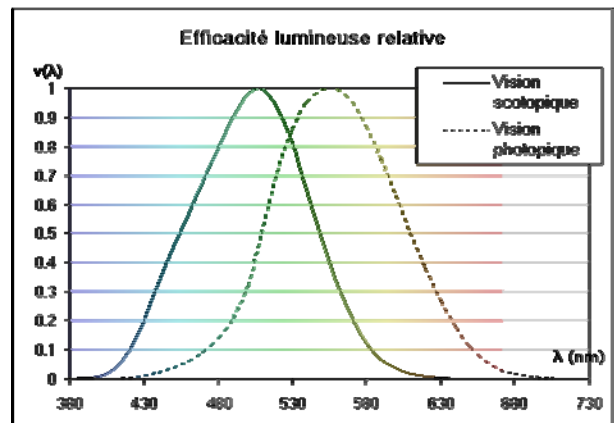
En général les reptiles et les oiseaux ont une vision en quadrichromie à 565, 508, 445 et 370 nanomètres.



Pour les humains

Les mammifères dont l'être humain fait partie ont une vision en trichromie avec des cônes à 560, 530 et 424 nanomètres.

La vision nocturne des hommes est très sensible dans les radiations jaunes vertes du spectre lumineux. En vision nocturne (Scotopique), nous avons un pic vers 510 nm (bleu vert) là où les 120 millions de bâtonnets fonctionnent et en vision diurne (Photopique) un pic vers 555 nm (jaune vert) grâce aux 7 millions de cônes.



(c)DR

Un éclairage respectueux de la vie.

Eclairer en tout lieu tout le temps et avec une lumière se rapprochant de la lumière du jour est aberrant. La Terre a toujours connu le jour et la nuit et la vie s'est adaptée à ce rythme et elle ne peut se maintenir qu'en le conservant.

La lumière et la flore.

Il ne faut pas oublier que les plantes comme nous, respirent ! **Les échanges gazeux liés à la respiration et ceux de la photosynthèse sont des mécanismes complémentaires.**

De jour, la photosynthèse est le processus dominant (la plante produit davantage de nutriments qu'elle n'en utilise durant la respiration). De nuit, la respiration devient le processus exclusif (la plante consomme des nutriments pour sa croissance ou d'autres réactions métaboliques).

L'alternance profite successivement aux deux phénomènes vitaux.

Ainsi si une plante est éclairée toute la nuit, nous l'épuisons car en fait nous l'asphyxions... (Réf.6)

La lumière comme agent perturbant de la faune.

La lumière sert à voir et à s'orienter, pour les invertébrés comme pour les vertébrés. Ils sont très sensibles à certaines radiations.

Les insectes sont très sensibles au spectre de courte longueur d'onde. C'est grâce à la lumière que les insectes diurnes repèrent leurs ressources alimentaires ou leurs congénères pour la reproduction. Normalement, dans l'obscurité ils sont inactifs. Mais la nuit, près d'une source lumineuse (lampe, réverbère), ils vont se croire en plein jour et vont explorer les environs. De jour, bien que la lumière diurne soit diffuse, ces insectes ne sont pas pour autant attirés par la source, le Soleil, au point d'essayer de l'atteindre. Pour les insectes nocturnes, la raison de l'attraction est liée à leurs déplacements. Pour s'orienter en vol, ils utilisent en effet la Lune et les étoiles, seules sources de lumières nocturnes naturelles disponibles depuis des millions d'années. En conservant un angle constant entre la direction de leur déplacement et la perception de ces astres, sur une courte période, ils gardent une trajectoire rectiligne. Pour plus d'efficacité, ces insectes ont décalé leurs perceptions du spectre lumineux vers l'ultraviolet, rayonnement important dans les étoiles. Ainsi un insecte nocturne virevolte, en décrivant des spirales, autour d'une ampoule allumée la nuit, en s'y référant pour s'orienter. Ponctuelles, plus proches et intenses que les astres, nos lumières artificielles, souvent riches en ultraviolet, sont des leurres pour les insectes nocturnes, nombreux à s'y faire décimer par les prédateurs opportunistes, ou tués directement par la chaleur de ces mêmes lampadaires et la circulation automobile (Réf.7)

Pour les oiseaux, la chouette Hulotte par exemple a une meilleure discrimination entre le bleu et le vert, qu'entre le vert et le rouge. Elle sera donc très perturbée par des éclairages blancs qui l'éblouiront.

De plus, les oiseaux pour s'orienter utilisent des repères astronomique comme le Soleil le jour et les étoiles la nuit. Pour s'orienter, les oiseaux migrateurs ont besoin aussi exactement de connaître l'heure. Ce qui suppose qu'ils possèdent une " horloge interne " et qu'ils savent évaluer le mouvement des astres dans le ciel. Il est possible qu'ils gardent en mémoire des repères géographiques de leur territoire d'arrivée afin de se guider sur les derniers kilomètres. Plusieurs hypothèses ont été avancées comme la sensibilité des oiseaux au magnétisme terrestre. Mais l'hypothèse la plus probable est qu'ils doivent pouvoir se rappeler quelle est la position angulaire de ces astres au dessus de leur territoire familier, et ceci à n'importe quelle heure. La comparaison entre l'image enregistrée, mémorisée et celle qu'ils voient à un endroit donné les aiderait à choisir leur direction, volant jusqu'à superposer ces deux images.

Récemment des neurobiologistes viennent de découvrir une zone spécialisée dans la vision nocturne dans le cerveau des oiseaux chanteurs migrant la nuit. Les chercheurs estiment que cette région pourrait permettre aux oiseaux de se diriger avec les étoiles et de "voir" le champ magnétique terrestre grâce à des molécules photoréceptrices dont la sensibilité est modulée par l'intensité du champ.

Pour migrer avec succès sur des milliers de kilomètres dans l'obscurité, certaines espèces doivent voir où elles volent. Des découvertes récentes ont démontré que leur système de vision possédait des molécules spécialisées ayant pour fonction de transformer l'information magnétique en données visuelles. Les biologistes ont ainsi supposé qu'une zone de leur cerveau devait servir à effectuer ce traitement.

Dans leur étude, ils ont étudié deux espèces migrant de nuit, la Fauvette des jardins (*Sylvia borin*) et le Merle noir (*Turdus merula*), à deux oiseaux chanteurs sédentaires, le Diamant mandarin (*Taeniopygia guttata*) et le Serin domestique (*Serinus sp.*). (Réf.8)

Toutes ces études montrent une chose. Toutes les lumières émises depuis le sol vers le ciel depuis les villes et villages, les immeubles éclairés, les phares, ponts et les balisages de constructions off shore (éoliennes, plateformes pétrolières) seront des éléments perturbateurs des oiseaux nocturnes et surtout migrateurs. (Réf.9). Deux récentes études montrent comment les plateformes pétrolières peuvent avoir des éclairages ayant peu d'impacts sur ceux-ci, en remplaçant les lampes rouges et blanches par des lampes de couleur bleue-verte. (Réf.10). D'après ces études, ce remplacement diminuerait de dix fois les perturbations des oiseaux migrateurs nocturnes. Ces études sont toutefois contrebalancées par d'autres notamment une américaine (Réf.11). En conclusion ces études sont au moins d'accord sur un point, **pas d'éclairage blanc qui perturbent énormément les oiseaux migrateurs.**

De plus l'éclairage nocturne perturbera les oiseaux diurnes qui comme les insectes croiront que le jour n'a pas de fin.

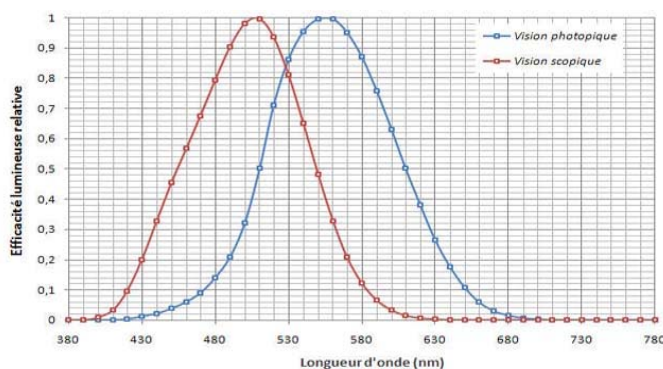
Toute ingérence de lumière dans les milieux naturels perturbera la vie des autres animaux, reptiles ou mammifères. Ces animaux ont besoin de la nuit pour se cacher, se nourrir, se reproduire ou simplement se reposer.... (Réf.12)

Lumière et activité biologique humaine.

La vision nocturne des hommes est, rappelons le, très sensible dans les radiations jaunes vertes du spectre lumineux. De plus les personnes âgées sont très sensibles à l'éblouissement, et surtout en lumière blanche. La figure ci contre illustre la performance de la vision humaine en vision nocturne (Scotopique) et diurne (Photopique).

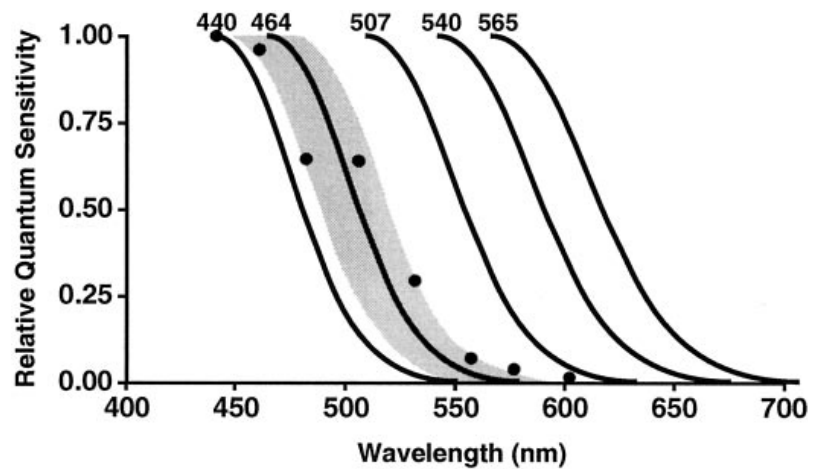
Comme nous sommes des animaux diurnes, nous ne sommes pas adaptés pour vivre la nuit, et notre évolution a fait que notre corps obéit au cycle jour et nuit. Par exemple, nous avons aussi tout simplement besoin du noir pour dormir et récupérer. D'autre part, le rythme circadien est une illustration de ce cycle jour/nuit. Notre corps maintient une activité par la production d'hormones diverses et pour lui commande certaines actions par exemple chez les enfants la production de l'hormone de croissance la nuit.

Il y aussi une hormone indispensable pour un bon endormissement, donc un sommeil de qualité et qui influence notre rythme circadien, la mélatonine. Des études récentes laissent à penser que la lumière avec un spectre lumineux au-delà de la longueur d'onde de 470 nm (464 à 440 nm) perturbe la production de mélatonine chez les humains.



Dans une étude BRAINARD et al, il y est dit : « Quand l'exposition est soigneusement dosée, cependant pour des illuminations aussi basses que 1.3 lux de lumière bleue monochromatique à 460 nanomètres ou 100 lux en lumière blanche à large spectre peuvent de manière significative supprimer la mélatonine chez l'homme ». (Réf.13)

Cette figure ci contre, illustre une comparaison entre la suppression de la mélatonine jusqu'à 80 % et les spectres visuels. La courbe de la suppression de la mélatonine est placée le long de la réponse spectrale maximale et des spectres de grande et courte longueur d'onde auxquels sont sensibles les bâtonnets et les cônes de la vision humaine. Le maximum de réponse se trouve vers 464 nm. (© Stockman et Sharpe, 1999). (Réf. 14)



De tout ce qui vient d'être dit, nous voyons que la flore et la faune, nous humains y compris, sont la nuit, perturbé par une lumière avec un spectre riche en courtes longueurs d'ondes.

Voilà pourquoi il nous semble important de demander des éclairages nocturnes évitant ces courtes longueurs d'ondes. Plus généralement il serait bon de limiter les éclairages pendant les périodes critiques pour la faune comme la reproduction et la migration. Et pour nous humains, il est donc indispensable que la lumière intrusive soit proscrite.

En conclusion nous préconisons des éclairages discrets avec des lampes non visibles, avec un flux lumineux adapté et avec une température de couleur bien inférieure à 3000 K et avec un maximum spectral vers 550 nm tirant sur le jaune.

NOUVELLES TECHNOLOGIES, ENERGIES RENOUVELABLES...

Lampadaires à Panneaux solaires ou éolienne, Eco-Logique ?

Toutes sortes de nouveaux lampadaires apparaissent. Ils sont vantés pour être respectueux de l'environnement et participer au développement durable. Tous sont sur le même modèle, une source d'énergie renouvelable, panneaux solaires ou éolienne et ensuite des LED.

Les LED ont quelques avantages comme une consommation potentiellement plus faible par exemple, mais aussi elles acceptent mieux les cycles d'allumage extinction et les variateurs de puissance. Mais nous verrons que leur lumière blanche la plupart du temps choisie a beaucoup d'inconvénients.

Les LED une menace ou un atout ?



luminaire EP
LED solaire
Autonoma
Ambiance
Lumie 6000
euros



Luminaire Eclairage Public à LED
Windella avec aérogénérateur

© DR

Voyons objectivement les avantages et les inconvénients de ce type de lampadaire.

Les avantages pour les lampadaires LED autonomes en énergie sont l'absence de fil et d'infrastructure d'énergie, une faible consommation, un prix équivalent à un lampadaire normal et selon les constructeurs une longue durée de vie du matériel comme de la lampe à LED bien qu'on manque encore de recul. Il faut en effet contrôler efficacement l'évacuation de la chaleur des LED de puissance pour limiter les températures de jonction autour des 50°C afin de maximiser leur temps de vie.

Passons maintenant aux inconvénients. Au vu de leur prise au vent, nous pouvons avoir des doutes en cas de forte tempête. D'autre part il comporte des batteries qui peuvent avoir des défaillances et qui sont autant de matériel à recycler en plus. Les panneaux solaires demandent également pour leurs fabrications des matières premières rares et des métaux lourds. Les LED ont aussi un cycle de fabrication très énergivore et qui utilise de nombreux matériaux rares comme l'indium, le gallium et l'arsenic. Elles sont recyclables en théorie mais il y a de nombreux doutes sur la réalité de ce recyclage en tant que déchets électroniques, tout comme les panneaux solaires d'ailleurs. Nous avons aussi des doutes sur la véritable durée de vie des LED puisque nous avons constaté dans un village où ont été installés ce types de luminaires qu'au bout d'un an d'utilisation, environ 10% des LED étaient en panne.

Enfin, ce type de lampadaire peut être source de « mitage lumineux » dans les zones naturelles, favorisant les atteintes à la vie sauvage comme le font les constructions dispersées dans la garigue provençale par exemple. Nous ne sommes plus à l'abri d'éclairage non maîtrisé et privé dans des zones protégées, parc naturels régionaux, voire parc nationaux.

Revenons sur l'idée que les LED consomment peu.

Après consultation des fiches techniques, nous sommes plus que perplexes sur les avantages en consommation. Prenons pour exemple la tête de lampadaire d'éclairage public LED de haute puissance du fabricant Joliet ayant pour référence Joliet 2 qui remplacerait une lampe sodium SHP de 150W à 7 mètre de hauteur. Il a une consommation électrique de 56W et avec l'appareillage de 75 watts. Son flux lumineux est de 4200 lm. Son prix est de 573.08 Euros. Et il émet une lumière très blanche entre 3000 et 7000K suivant le choix des LED. En raisonnant sur ces chiffres, il consomme donc environ deux fois moins mais en fait c'est bien pire puisqu'on s'attend à 15000 lm pour une SHP de 150W (même si le flux lumineux est mieux focalisé d'un facteur 1,6) et donc il consomme même plus pour avoir ces performances équivalentes car avec les niveaux de luminances utilisés en éclairage public actuellement au dessus de $0,3 \text{ cd/m}^2$, lumière blanche ou orangée conduisent à des niveaux de performances visuelles très similaires.

Même au sein des éclairagistes, le débat sur la consommation réelle des LED est vif. Car les appareillages qui commandent les LED ne sont pas mûrs et consomment eux-aussi de l'énergie.

Le luminaire Philips CityWing disponible en France, est constitué d'un mât et de deux crosses munies de modules optiques. En standard, chaque module optique est équipé soit de 18 LED blanches pour une température de couleur avoisinant les 5300 K, soit d'un mélange de LED blanches et ambres pour des températures de couleur de 2700 K, 3200 K ou 4000 K. Sa consommation totale est de 160 W et son prix minimum est de 159.90 euros... Ces lampadaires consomment donc actuellement beaucoup plus qu'attendu.

D'autre part reste le problème de l'orientation des luminaires car les LED, de part leur construction, sont très directives ce qui peut supprimer efficacement le flux lumineux émis au dessus de l'horizontale si la vasque les accueillant est un minimum optimisée. Mais la lumière blanche émise est très éblouissante pour les humains et notamment pour les personnes âgées et les déficients visuels si le bafflage n'est pas efficace pour des angles gamma supérieurs à 65° .

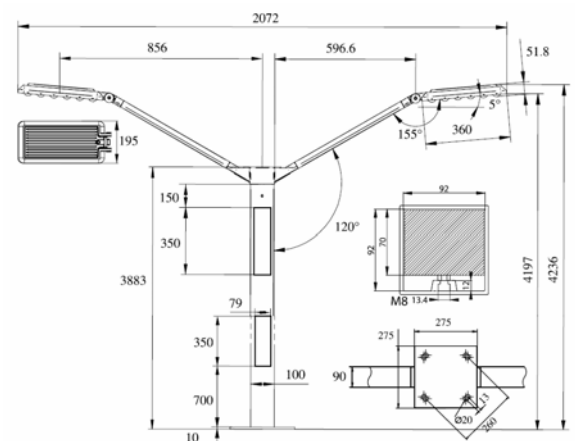
Mais le plus gros problème des nouvelles LED, de plus en plus efficace pour ce qui est de leur émission lumineuse (les LED XR-E du fabricant Cree avec une température de couleur blanc chaud à 3000K atteignent plus de 124 lumens), est surtout leur spectre.



© Joliet énergie renouvelable



Philips City Wing

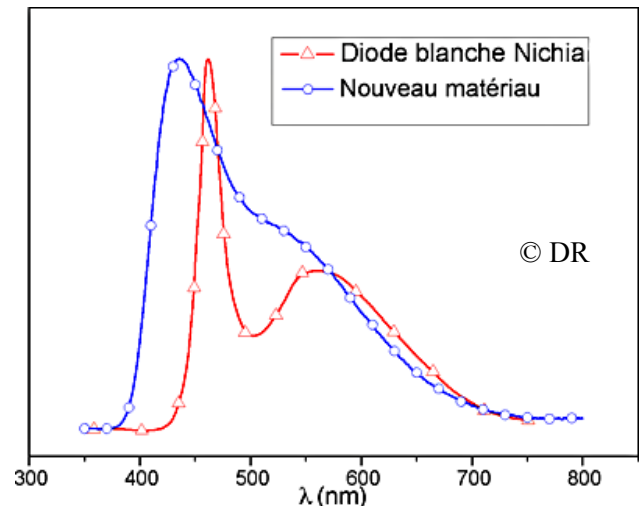


© Philips éclairage



© DR

La figure ci après montre le spectre lumineux typique des LEDs. Elles émettent de la lumière dans la partie ultra-violette et bleue du spectre. Comme décrit ci-dessus, ce type de rayonnement est très préjudiciable pour tout ce qui vit sur Terre. De plus, on a vu plus haut que cette lumière est nettement plus diffusée par l'atmosphère et augmente dans des proportions notables le halo urbain même s'ils sont correctement conçus pour avoir un ULOR nul à cause de la composante en réflexion qui est toujours présente dès qu'on éclaire. A puissance lumineuse égale avec des SHP, on rappelle que la lumière est en gros deux fois plus diffusée pour des LED à forte température de couleur qui représentent la majeure partie de celles utilisées actuellement !



Dans un cas général, **il serait préférable de promouvoir des luminaires équipés de lampe avec un spectre lumineux possédant une dominante jaune.**

Pour les zones naturelles, un spectre avec un maximum de 500 nm à 550 nm peut cependant être bon pour des éclairagements faibles équivalant à la presque pleine lune, avec une moyenne de niveaux inférieurs à environ 0,5 lux et des maxima en dessous de 1 lux. Ces niveaux sont l'avenir de l'éclairage extérieur durable en dehors des zones vraiment fréquentées des centres-villes et les passages pour piétons sur les routes très passantes. Avec une mise en valeur raisonnable de l'éclairage naturel, là où et quand c'est nécessaire.

Si toutefois les donneurs d'ordre acceptent les LEDs, ou si les éclairagistes les proposent, il est très important de demander des LEDs jaunes ayant une température bien inférieure à 3000°K.

Ces LED existent et ont de fait moins d'impact sur les biotopes et l'observation astronomique.

Vous pouvez vous rendre compte sur l'image ci-contre des différentes couleurs de LED disponibles.



© DR

Les éclairages avec des LED conforte la tendance d'installer partout des éclairages blancs, type lumière du jour, comme les lampes à halogénure métallique. Selon Jan HOLLAN des niveaux d'éclairage bas et durables ne sont pas réalisables avec les Lampes xénon type HID, mais très facilement avec les LED grâce à leur possible limitation en puissance lumineuse. Les normes devraient être modifiées en conséquence car il faut le rappeler :

Le halo lumineux et donc son impact sur l'environnement et l'observation astronomique sera plus de deux fois plus grand avec de la lumière blanche qu'avec la lumière jaune !

Pour conclure, la suppression de la lumière émise inutilement vers le Ciel ainsi que la lumière intrusive et l'éblouissement, pour nous humains, comme pour tout ce qui vit sur terre est importante. Mais il faut aussi supprimer la lumière ayant un spectre lumineux qui gêne la faune et la flore, et il se trouve que c'est un éclairage avec un spectre blanc/bleu qui a le plus d'impact. C'est à ce prix que nous économiserons l'énergie et protégerons la biodiversité et que nous redonnerons au paysage nocturne étoilé toute sa beauté.

Notes et références.

Réf.1 Les nuisances dues à la lumière Guide AFE 2006 Coll. Dir. Christian Remande ISBN 2-85604-037-3 page 11

Réf.2 A model to show the differences in Skyglow from type of luminaire designs, with a view to recovering rural dark skies., C. Baddiley STARLIGHT Conference LA PALMA 2007

Réf.3 Baddiley, C. J. and Webster, T. (2007). Towards understanding skyglow. A contribution to the discussion. Dorset UK British Astronomical Association, Campaign for the Dark Sky, and Rugby UK. Institution of Lighting Engineers

Réf.4 Vers un contrôle efficace de la pollution lumineuse : l'optimisation de l'éclairage public à partir d'une modélisation précise de la pollution lumineuse disponible sur : http://astrosurf.com/licorness/dossiers%20PDF/controle_PL.pdf

Réf.5 Campbell Neil A., Biologie 2^e édition, Éditions du Renouveau Pédagogique, St-Laurent, 2004

Réf.6 EXPOSÉ DE LA LIGUE ROC au 4^{ème} Symposium Européen pour la Protection du Ciel Nocturne, PARIS Nelly BOUTINOT- 25 septembre 2004.

Réf.7 Eisenbeis, G. and F. Hassel (2000) "Attraction of nocturnal insects to street lights - a study of municipal lighting systems in a rural area of Rheinhessen (Germany).", *Natur und Landschaft* 75(4):145-156. et Kolligs, D. (2000) ;

"Ecological effects of artificial light sources on nocturnally active insects, in particular on butterflies (Lepidoptera).", *Faunistisch-Oekologische Mitteilungen Supplement* 28:1-136 ;

Rydell, J., and H.J. Baagoe (1996) ;

Bats & streetlamps. *Bats* 14(4):10-13

Réf.8 Night-vision brain area in migratory songbirds Henrik Mouritsen, Gesa Feenders, Miriam Liedvogel, Kazuhiro Wada and Erich D. Jarvis PNAS, June 7, 2005, vol. 102, no. 23, 8339-8344.

Réf.9 Avery, M., Springer, P.F., Cassel, J.F. (1976). "The effects of a tall tower on nocturnal bird migration - A portable ceilometer study." *Auk* 93:281-291. et Baldwin, D.H. (1965). "Enquiry into the mass mortality of nocturnal migrants in Ontario." *The Ontario Naturalist* 3(1):3-11.)

Réf. 10 Poot, H., J.M. Marquenie, M.A.H. Donners, B.J. Ens, H. de Vries and M.R. Wernand, 2007. Green light for Nocturnally migrating birds. *Ecol. & Soc.* Submitted.

Green Lights to Birds Investigation into the effect of bird-friendly lighting F.J.T. Van de Laar 12 2007 NAM LOCATIE L15-FA-1

Réf.11 Evans, W. R., Y. Akashi, N. S. Altman, and A. M. Manville II. 2007. Response of night-migrating songbirds in cloud to colored and flashing light. *North American Birds* 60:476-488.

Réf.12 Le Corre, M., Ollivier, A., Ribes, S. & Jouventin, P. 2002. Light-induced mortality of petrels: a 4-year study from Reunion Island (Indian Ocean). *Biological Conservation*, 105(1): 93-102

Réf. 13 George C. Brainard & all "Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor" *The Journal of Neurosciences*, august 15 2001, 21(16): 6405-6412

Réf.14 Stockman A, Sharpe LT (1999) Cone spectral sensitivities and color matching. In: *Color vision: from genes to perception* (Gegenfurtner KR, Sharpe LT, eds), pp 53–87. Cambridge, UK: Cambridge UP.

Remerciements.

Nous tenons à remercier ici Michel BONAVITACOLA qui fait et conduit des stages pour avoir enfin en France des études sur l'impact de la lumière. Sans lui, nous n'aurions jamais travaillé sur ces sujets passionnants.