

« La lumière bleue des LED »

Rappel aux bases de la physique de la lumière et à ses influences sur l'œil humain.

Résumé

Depuis la publication du rapport de l'ANSES sur les effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (LED) en 2010, chaque publication scientifique sur le sujet, pour peu que ses conclusions soient un tant soit peu « anxieuses », est reprise en cœur par les médias qui se hâtent de diffuser des messages alarmistes. La dernière publication de l'INSERM en décembre 2016 n'y a pas échappé. Pourtant, si on se donne la peine de lire l'article, sans se cantonner à ses conclusions, les risques photobiologiques que présenteraient les LED par rapport aux autres sources de lumière sont loin d'être prouvés. Dans cet article, on essaie de remonter à l'exposition réelle à laquelle les yeux des rats ont été exposés malgré l'absence des paramètres dimensionnant le niveau de risque lié à la lumière bleue. En effet, le niveau moyen et le contraste de luminance, pas plus que le spectre d'émission n'y sont précisés. Notre conclusion, que nous avons essayé d'établir en toute objectivité scientifique, est bien moins dramatique que celle retenue par les médias.

Des résultats moins alarmistes qu'ils n'y paraissent

Un article scientifique¹ récemment paru a encore ajouté aux troubles quant aux risques de l'éclairage à LED. Dommage, car si la conclusion de l'article peut sembler alarmiste, les résultats le sont bien moins si on prend le temps de les lire. Comme l'écrivent clairement les auteurs : à 500 lux, 12 heures par jour, pupilles NON dilatées², il n'y a pas d'impact de l'éclairage, quelle que soit la source lumineuse CFL (Compacte Fluorescente) ou LED, sur la rétine des rats normaux. Seuls les rats albinos semblent en souffrir.

Les auteurs rappellent d'ailleurs que « l'extrapolation aux humains (des résultats de l'étude) à partir d'animaux est particulièrement difficile, en particulier, avec les rats qui n'ont pas de macula et donc ne présentent pas les caractéristiques des rétines humaines ». Les rats albinos ajoutent une difficulté supplémentaire dans « l'extrapolation des résultats », dans la mesure où ils sont, tous comme les humains frappés d'albinisme, bien plus sensibles à la lumière. On utilise à leur sujet le terme « photophobie », c'est-à-dire que leurs yeux craignent la lumière qui leur provoque des sensations visuelles pénibles, voire douloureuses, d'où qu'elle vienne.

Un phénomène connu

La vision est le fruit de réactions photochimiques. Cependant plusieurs travaux scientifiques montrent que la lumière peut induire des réactions photochimiques délétères au niveau de la rétine. On parle alors de phototoxicité. Est mise en cause une zone particulière du spectre du rayonnement électromagnétique visible située dans la partie bleue du spectre des couleurs. Les paramètres qui permettent d'estimer cette phototoxicité sont la luminance « énergétique »³ dans la zone incriminée du spectre et la durée d'exposition. En aucun cas, la source qui la produit. Le photon ou le rayonnement électromagnétique ignore en effet tout de la source qui les a produits et est physiquement indiscernable. A la lecture de l'article mentionné ci-dessus, il nous a semblé nécessaire de repréciser ce point.

Effectivement, ce n'est pas la « luminosité » qui compte, mais bien l'énergie qui arrive sur la rétine qui peut déclencher, ou pas, ces réactions photochimiques délétères. A luminance énergétique égale, la luminosité perçue peut varier du tout au tout en fonction du spectre de rayonnement des sources de lumière, et réciproquement. En effet, tous les rayonnements électromagnétiques n'ont pas la même efficacité lumineuse. Certains ne produisent même aucune lumière, bien qu'ils soient suffisamment énergétiques pour provoquer quelques dégâts. On songera, par exemple, « aux coups de soleil » provoqués par le rayonnement UV lors de trop longues expositions au soleil.

¹ A. Krigel, , M. Berdugo, , E. Picard, , R. Levy-Boukris, , I. Jaadane, , L. Jonet, , M. Dernigoghossian, , C. Andrieu-Soler, , A. Torriglia, , F. Behar-Cohen - Light-induced retinal damage using different light sources, protocols and rat strains reveals LED phototoxicity, Neuroscience, Volume 339, 17 December 2016, Pages 296-307

² C'est-à-dire un éclairage raisonnablement proche de celui auquel on peut être exposé dans un intérieur de bureau ou domestique sous un éclairage artificiel (50 à 500 lux), qui reste dans tous les cas, bien inférieur à l'éclairage en extérieur en journée (100 000 lux en plein soleil). Un moyen très grossier de le calculer est par exemple de faire la somme des lumens des lampes installées, divisée par la surface en m² : 600 lumens pour 6 m² fournissent moins de 100 lux en moyenne.

³ La luminance énergétique (en anglais radiance) est la puissance du rayonnement émise en un point d'une surface et dans une direction donnée, par unité de surface et par unité d'angle solide. Elle s'exprime en W·m⁻²·sr⁻¹. La luminance visuelle traduit la luminosité ressentie par un observateur humain à la vision de cette surface et est exprimée en cd/m².

POINT DE VUE

20/03/2017

L'efficacité lumineuse d'un rayonnement exprime cette relation entre la luminosité perçue par l'œil humain et le flux énergétique du rayonnement électromagnétique reçu en fonction de sa longueur d'onde (Figure 1). On constate que pour atteindre un même niveau d'éclairage, il faut entre 20 et 30 fois plus d'énergie pour s'éclairer dans le bleu (autour de 450 nm de longueur d'onde) que dans le vert (555 nm) !

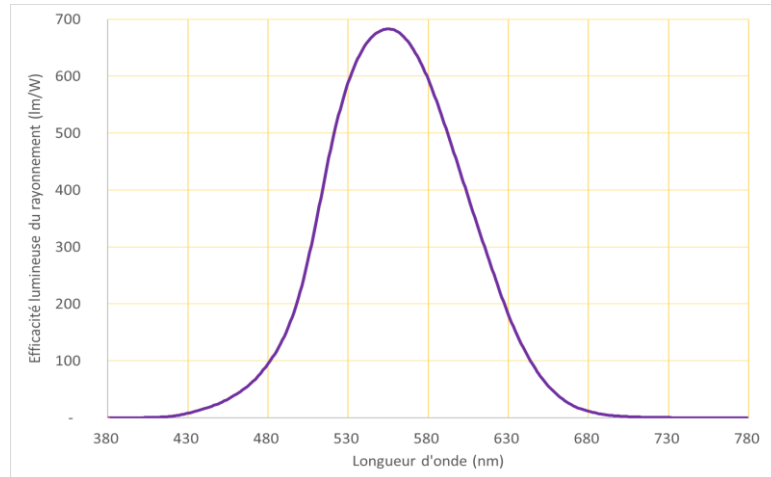


Figure 1 : Efficacité lumineuse $V(\lambda)$ d'un rayonnement électromagnétique suivant sa longueur d'onde.

Ce sur quoi tous les scientifiques s'accordent, c'est la méthode pour calculer l'exposition au risque de la lumière bleue. Elle nécessite la connaissance de la densité spectrale de luminance énergétique $L(\lambda)^4$ à laquelle sont exposés les yeux. Pour estimer le risque, la luminance énergétique spectrale doit être pondérée par le spectre d'action de la lumière, c'est une fonction nommée $B(\lambda)$ (Figure 2), normalisée, qui traduit « l'efficacité de nuisance » de la lumière en fonction de la longueur d'onde. On remarque que le risque est maximum dans la gamme 415-455nm de longueur d'onde et décroît très rapidement en dehors de cette zone.

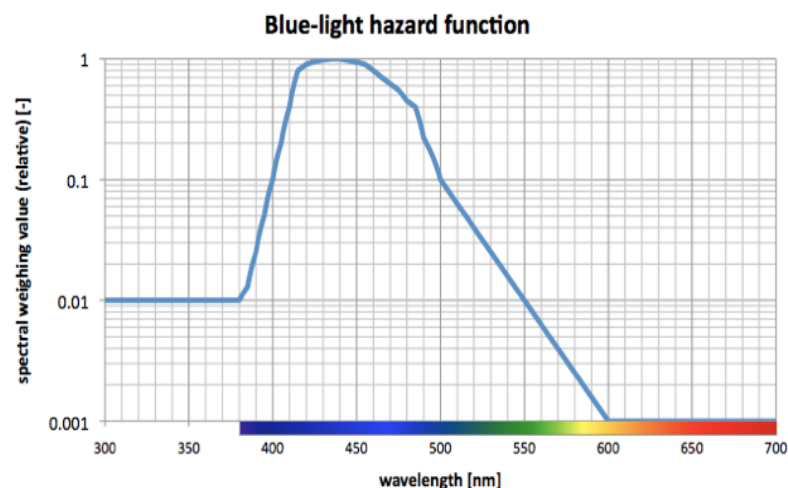


Figure 2 : La fonction $B(\lambda)$ représente le niveau de risque photobiologique du rayonnement en fonction de sa longueur d'onde. Remarque : l'axe des ordonnées est logarithmique.

⁴ Appelée usuellement le spectre d'émission ou le spectre d'une source

La luminance bleue pondérée directement liée au risque de la lumière bleue se calcule par la formule :

$$L_{bleu} = \sum_{300}^{700} L_{\lambda} B_{\lambda} \Delta\lambda$$

Quelles ont été les conditions d'exposition ?

Aucun des spectres dont la connaissance est essentielle au calcul du niveau de risque ne sont précisés dans l'article en question. Seuls sont donnés des niveaux d'éclairage. On peut essayer de remonter à la densité spectrale à partir de la longueur d'onde approximative des LED bleues et vertes, ou de la température de couleur des LED blanches (6300 K). Mais on ne peut pas faire ce travail pour la lampe CFL dont on ne connaît pas la température de couleur. Or, on sait que, pour une même luminance, l'exposition à la lumière bleue est d'autant plus élevée que la température de couleur est élevée (Figure 3)⁵.

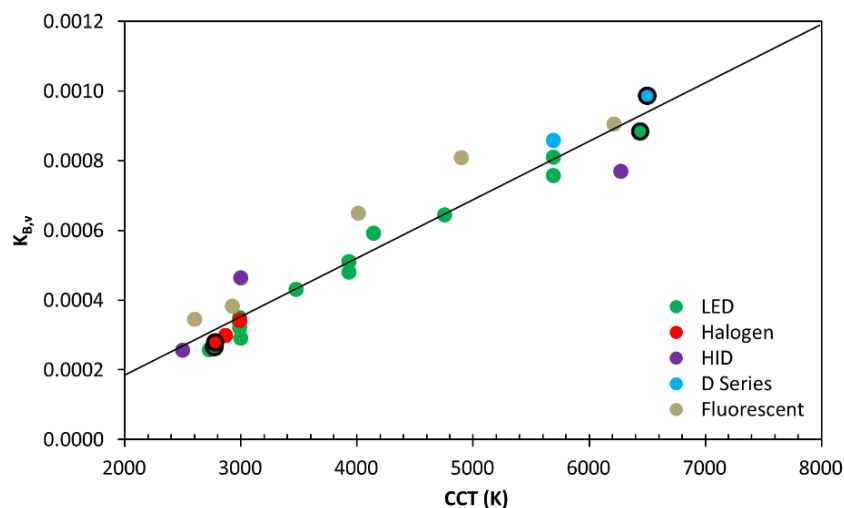


Figure 3 : Corrélation entre température de couleur et facteur de risque lié à la lumière bleue à luminance énergétique identique (Source : Optical Safety Fact Sheet – DOE, disponible sur Internet⁶). Il est clair que le niveau de risque n'est pas lié à la technologie de la source, mais à sa température de couleur. Notons que le soleil est dans la partie la plus haute de la courbe (5500K ou 6500K).

Afin d'illustrer concrètement ce propos, nous avons relevé la « densité spectrale de luminance énergétique », ou plus simplement dit le « spectre d'émission », de 2 sources à 6500K, l'une à LED et l'autre fluorescente et les avons comparés au spectre de la « lumière naturelle » (illuminant de référence D65) (Figure 4). Si on calcule la luminance bleue pondérée, nous constatons qu'à niveau d'éclairage identique, elle est 6% supérieure avec l'éclairage fluorescent qu'avec l'éclairage LED.

⁵ C'est d'ailleurs parce qu'elle est riche en bleue qu'une lumière blanche nous paraît froide.

⁶ https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/opticalsafety_fact-sheet.pdf

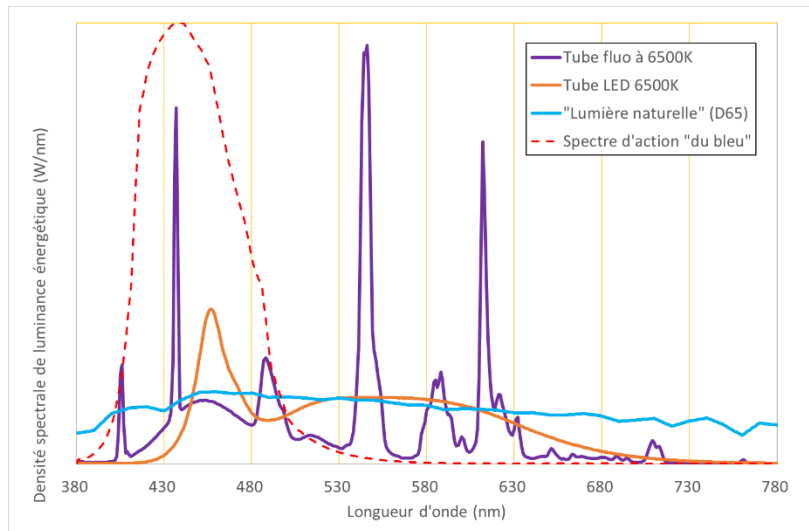


Figure 4 : Spectres comparés de la « lumière naturelle » (D65), d'un tube fluorescent et d'une lampe LED à température de couleur identique (6500K) pour un même niveau d'éclairage. Superposé en pointillés, le spectre d'action de la lumière bleue. (Mesures PISEO).

Par ailleurs, outre le manque d'information sur le spectre des sources utilisées, il est également impossible de connaître la répartition de luminance à laquelle est exposée la rétine des rats à partir des maigres informations données, sauf à faire quelques suppositions à ce sujet. L'uniformité de cette luminance est également en question dans la mesure où, pour une même luminance moyenne, l'emploi de lampes fluocompactes ou de simples LED (le composant électronique tel quel) se traduit par des contrastes de luminance totalement différents.

Des résultats difficilement transposables à l'homme

Passons maintenant en revue les résultats des 3 types d'expositions comparées subies par les rats.

Le premier résultat constate que, quelle que soit la source de lumière, LED, fluocompacte ou tube fluorescent, des éclairages de 6000 lux, avec des pupilles dilatées et pendant 24 heures non-stop, provoquent des dommages aux rétines des rats, albinos ou non.

Les pupilles se ferment quand la luminance de la scène observée augmente. Chez les humains, son diamètre peut varier entre 2 et 8 mm, ce qui correspond à un rapport de 1 à 16 sur la quantité de lumière qu'elle laisse passer. Sous une lumière faible, la pupille du rat peut atteindre un diamètre de 1,2 mm, alors qu'elle rétrécit pour devenir une petite ouverture d'environ 0,2 mm de diamètre sous une luminance intense, soit un rapport de 1 à 36. Or, dans la première expérience, l'éclairage est de 6000 lux, on peut supposer que la luminance moyenne correspondante⁷ est typiquement de 1500 cd/m², dans ces conditions le diamètre de la pupille des yeux humains est à son minimum. Si c'était aussi le cas pour les rats⁸, les dilater artificiellement revient à multiplier par 36 le flux reçu par la rétine

⁷ Correspondance entre lux et cd.m⁻² : un diffuseur parfait devient une source secondaire dont la luminance est égale à 1/π fois l'éclairage reçu en lux. Pratiquement les surfaces mates les plus blanches ne diffusent qu'environ 80% de la lumière reçue, leur luminance L est donc $L = (1/\pi) \times 0,8$, soit environ 1/4 de l'éclairage E reçu d'où $L(\text{cd.m}^{-2}) = E(\text{lx})/4$.

⁸ Nous n'avons pas trouvé d'indication concernant la relation entre le diamètre de l'iris du rat et la luminance.

dans ces conditions d'exposition par rapport à leur normale d'adaptation physiologique. Soit une luminance « effective » de 125 000 cd/m² (ou 24 000 si on se « contente » du facteur 16 pour l'homme).

A titre de comparaison, la réverbération du soleil sur la neige produit une luminance d'environ 30 000 cd/m², un régime vraiment très dur pour les rétines. Même si imaginer une luminance effective 36 fois supérieure à la luminance réelle par le fait de la dilatation artificielle des pupilles n'est pas démontré, on se trouve quand même dans des domaines de luminance très élevée et l'impact sur les rétines n'est pas surprenant. Il aurait été plus facile de ne faire varier que le paramètre luminance après l'avoir soigneusement mesuré (surface concernée, valeur moyenne et contraste). Les résultats auraient été ainsi plus faciles à déterminer. La différence de résultat entre le tube fluorescent (CCFL) et la lampe fluocompacte (CFL), donc de spectres issus de la même technologie, fait ici soupçonner des températures de couleur différentes (une lampe CFL de même température de couleur que le tube aurait vraisemblablement produit un résultat identique).

Les auteurs ont répété la même expérience, mais sous un éclairage de 500 lx, pupilles toujours dilatées, et constatent que seul les yeux des rats exposés à l'éclairage LED subissent des dommages au niveau des photorécepteurs de la rétine supérieure.

Constatant l'effet (faible) à 500 lx des lampes à LED qui n'apparaissait pas avec les lampes fluocompactes, ils ont poursuivi leur étude en augmentant progressivement l'exposition pour les seules lampes à LED et ne sont pas allés plus loin avec les lampes CFL ou, du moins, les résultats n'ont pas été publiés. C'est dommage, car le seuil d'impact était peut-être simplement décalé par les caractéristiques même de la lampe CFL utilisée, plus précisément sa température de couleur qui, rappelons-le, n'est pas précisée.

Il est également important de préciser que les lampes de température de couleur très élevée comme celles utilisées dans cette étude (6300K) ne sont pas utilisées pour l'éclairage grand public. On peut en trouver assez rarement en usage professionnel en éclairage public, mais à niveau d'éclairage bien plus faible, pour le contrôle qualité de la couleur ou en dentisterie ou en bijouterie, par exemple.

Le dernier résultat donné dans la publication est qu'à 500 lx, 12 heures par jour, pupilles NON dilatées, comme le disent clairement les auteurs, il n'y a pas d'impact sur la rétine des rats normaux⁹. Seuls les albinos semblent en souffrir. On l'a vu, les rats albinos sont plus sensibles à la lumière. Ceci dit, seule la lumière bleue semble affecter la vision de ces rats, et non la lumière verte (la marge d'incertitude est assez importante, ce qui fait qu'on peut légitimement douter de la détérioration apparente au bout d'un mois sous un éclairage vert). Ce qui confirme que le type de source de lumière n'y est pour rien et que seule la luminance pondérée par le spectre d'action de la Figure 2 permet d'estimer le risque.

On retiendra qu'avec un éclairage à niveau raisonnable et une alternance, jour-nuit raisonnable, il n'y a pas d'effet constaté pour des rats normaux, même sous des flux bleus ou verts, malgré le niveau de puissance requis pour obtenir 500 lux dans le bleu¹⁰, même après 28 jours à ce régime.

⁹ "Long-term exposure to LED at 500 lux, in cyclic (light/dark) conditions induced retinal damage only in albinos rats but not in pigmented rats".

¹⁰ Il faut typiquement 25 fois plus d'éclairage énergétique dans le bleu (450 nm) que dans le vert (555 nm) pour obtenir le même éclairage lumineux. Ce rapport varie rapidement avec les longueurs d'onde des LED, mais reste néanmoins élevé.

Des résultats exploités trop rapidement par les médias ?

Dans la conclusion, les auteurs eux-mêmes disent combien ce genre d'étude est difficile à mener, car « de nombreux facteurs influencent l'exposition rétinienne et la toxicité induite au niveau de la rétine, comme la pigmentation de l'épithélium pigmentaire, le diamètre de la pupille, la « nature du rayonnement lumineux »¹¹, y compris son spectre¹², son intensité, la séquence et le rythme de l'exposition au rayonnement, l'âge, la teinte du cristallin qui jaunit avec le vieillissement... ».

Après lecture attentive, les résultats ne nous paraissent pas particulièrement surprenants, ni inquiétants, malgré cette phrase qui a suscité une large diffusion d'articles de presse : « Cette étude montre qu'à même éclairage et dans des conditions similaires, les LED blanches, bleues et vertes provoquent des lésions de la rétine¹³ alors que les lampes fluocompactes ne le font pas. Ils soulignent encore une fois la toxicité de la lumière bleue et en particulier des LED bleues¹¹ **11** ».

Comme on l'a dit, la lumière ignore tout de la source qui l'a produite. Elle ne se caractérise pas par cette dernière, mais par sa densité spectrale d'énergie, uniquement. Il est probable qu'une lampe fluocompacte de température très froide, équivalente aux 6300K des lampes LED étudiées et de même luminance aurait produit les mêmes résultats, car elle afficherait grosso-modo une même densité spectrale d'énergie dans le bleu.

De la lumière blanche avec les LEDs ?

Les auteurs suggèrent dans l'introduction que la méthode utilisée pour faire de la lumière blanche actuellement l'est car « moins chère », laissant supposer ainsi qu'il existe des méthodes moins « dangereuses », mais plus chères¹⁴. Depuis la première LED blanche datant du début des années 90 constituée effectivement d'une LED bleue et d'un luminophore jaune, des progrès significatifs ont été faits, avec l'usage notamment de luminophores rouges et verts, permettant de produire des blancs plus chauds et de meilleurs rendus de couleur. L'autre méthode pour faire de la lumière blanche consiste à mélanger 3 ou 4 LED de couleur. Mais si on veut un rendu de couleur de qualité, ces couleurs ne sont pas choisies au hasard. Il faut bien évidemment une LED bleue à 460 ou 455 nm suivant le nombre de couleurs utilisées, donc dans le spectre d'action de la lumière bleue ! Par ailleurs, il est vrai qu'une électronique sophistiquée, donc plus onéreuse, est alors nécessaire pour stabiliser la lumière ainsi produite. Les caractéristiques des LED, tant en couleur qu'en niveau de lumière ont en effet une fâcheuse tendance à évoluer avec les conditions de fonctionnement, ce qui produit dans cette configuration, des changements de couleurs inopportuns. Enfin, précisons que les LED vertes ont un rendement de conversion très faible, qui mettrait à mal l'efficacité énergétique de telles lampes. Des progrès sont encore nécessaires pour voir arriver ces sources de lumière sur le marché. Mais dans tous les cas, il faudra des LED bleues pour percevoir cette couleur.

Notons enfin que la luminance à laquelle nos yeux sont exposés en extérieur est typiquement 100 fois supérieure à celle produite par un éclairage artificiel. La lumière du soleil est « froide » (en termes de couleur), sensiblement équivalente à celle des LED utilisées dans cette étude, l'exposition au bleu est

¹¹ Conclusion surprenante : s'agirait-il de suggérer une différence de nature de la lumière suivant la source qui la produit ?

¹² Pourquoi les spectres des sources utilisées ne sont pas précisés ?

¹³ Un oubli ? Il s'agit des rétines de rats albinos

¹⁴ On peut lire en effet : "LED emit mono chromic lights, and the less expensive and currently used method to produce white light from LED is to combine a blue LED with yellow phosphore coverage";

donc de l'ordre de 100 fois plus intense au soleil qu'elle ne serait dans un local éclairé à 500 lux par ces LED, autrement dit, la dose de lumière bleue reçue une minute en extérieur équivaut à celle reçue une centaine de minutes en intérieur. Autant on peut se poser des questions sur le risque de la lumière bleue en vision directe de LED, notamment à cause de leur luminance élevée, autant la vision d'un environnement intérieur éclairé à 500 lux avec, de plus, des produits utilisant majoritairement des diffuseurs ou intégrés dans des abat-jours ne peut présenter un risque mesurable.

Que disent la réglementation et les normes ?

Dans le cadre du marquage CE des produits, la directive européenne dite Basse-tension (DBT) 2014/35/UE, impose que le risque à la lumière bleue des appareils d'éclairage à LED (lampes, modules et luminaires) équipés de LED blanches soit évalué. Pour cela, la directive renvoie aux normes harmonisées et documents techniques suivants :

- NF EN 62471 - 2008 : Sécurité photo-biologique des lampes et des appareils utilisant des lampes.
- NF EN 60598-1-2015 : Luminaires - Partie 1 : exigences générales et essais.
- IEC/TR 62778 : Application of IEC 62471 for the assessment of blue light hazard to light sources and luminaires.
- NF EN 62031-2015 : Modules de LED pour éclairage général - Spécifications de sécurité.
- NF EN 62560-2015 : Lampe à LED auto-ballastée pour l'éclairage général.

Ces normes et règlements imposent une limitation très stricte des niveaux de risque et particulièrement pour les lampes et luminaires pour le grand public qui peuvent être « regardés » sans risque particulier.

Conclusion

Une exposition directe à des luminances « blanches » inférieures à 10 000 cd/m² est peu susceptible de présenter un risque photochimique au niveau de la rétine. Pour ces sources de lumière, John Bullough, chercheur au Lighting Research Center, écrivait en 2000 : le calcul du risque de lumière bleue n'est pas nécessaire¹⁵. Ce n'est plus le cas à des luminances plus élevées, notamment celles auxquelles on peut être confrontées lorsque l'on regarde la surface d'émission des puces LED, les composants électroniques qui émettent la lumière. Un réflexe d'évitement nous fait cependant détourner le regard des sources éblouissantes.

Dans le cas qui est traité ici, il s'agit de luminance indirecte, c'est-à-dire de la luminance des surfaces éclairées. Un doute subsiste cependant sur les luminances réelles auxquelles ont été exposés les rats dans le cas de l'éclairage à 500 lux. Ces dernières ne semblent pas véritablement homogènes à la vue des images publiées et il y a probablement une vision mixte de luminances primaires (les sources) et secondaires (les surfaces éclairées). Il est possible donc que l'on s'écarte de la luminance moyenne (estimée à 125 cd/m² pour un éclairage moyen à 500 lux) et que par le biais des réflexions multiples, les yeux aient été exposés à de nombreux « spots » très lumineux correspondants aux LED utilisées et ce, malgré l'utilisation d'un diffuseur dont les caractéristiques ne sont pas connues.

¹⁵ Bullough, J. D. 2000. "The Blue-Light Hazard: A Review," Journal of the Illuminating Engineering Society 29(2):6-14

POINT DE VUE

20/03/2017

Nous recommanderions volontiers quelques améliorations aux conditions expérimentales comme par exemple renoncer à la dilatation des pupilles afin de laisser les protections naturelles jouer leur rôle ; caractériser spectralement les luminances énergétiques en niveau moyen et contraste ; éviter la comparaison rats albinos – rats pigmentés dans un premier temps en se concentrant sur les rats pigmentés ; évaluer l'exposition au risque de la lumière bleue à partir du spectre énergétique des sources et du spectre d'action $B(\lambda)$; enfin ne faire varier que le niveau de luminance énergétique et la durée d'exposition. Cette approche permettrait de mettre en évidence une loi (pour les rats) reliant l'apparition d'effets délétères au produit de la luminance par la durée d'exposition. Ces expérimentations seraient probablement plus longues, notamment pour les luminances faibles, mais bien plus faciles d'interprétation.

Enfin, même si le travail des scientifiques sur les effets de la lumière doit se poursuivre pour mieux comprendre les mécanismes en jeu, notamment en ce qui concerne les doses reçues, il est nécessaire et utile de rappeler que le dispositif réglementaire et normatif aujourd'hui en place est particulièrement complet et interdit la commercialisation de produits qui pourraient éventuellement présenter des risques. Il serait, en effet, dommage de se priver, à partir de conclusions erronées, d'une technologie qui présente bien des intérêts du point de vue de la consommation énergétique, de la durée de vie et de la qualité de la lumière produite.

Auteurs

Patrick Mottier, Directeur scientifique de PISEO.

Grégory Duchêne, Ingénieur Systèmes Optiques, diplômé de l'Institut d'Optique Graduate School, PISEO.

Joël Thomé, Directeur de PISEO.

Bernard Jannin, Président de PISEO, expert en normalisation AFNOR et IEC.

A propos de PISEO

PISEO est une plateforme d'innovation indépendante spécialisée dans la création et la qualification de systèmes optiques utilisant des LED. Créée sous forme de SAS fin 2011 à l'initiative du Cluster Lumière, du CEA-Leti et de YOLE Développement, la société réalise des prestations de services d'expertise, de R&D et d'essais et de mesures sur l'ensemble du cycle de vie des systèmes optiques. PISEO dispose notamment d'un laboratoire de photométrie accrédité ISO 17025 par le COFRAC.



Contact :

04 26 83 02 25

contact@piseo.fr

www.piseo.fr

