

LUMIERE BLEUE : QUELS SONT SES RISQUES POUR LES YEUX ?

Les dangers potentiels de la lumière bleue sur l'œil humain font débat, surtout depuis la généralisation des lampes à LED. Nous allons successivement tenter d'expliquer ce qu'est la lumière bleue, montrer où elle se trouve, indiquer pourquoi elle peut être nocive et dans quelles conditions. Nous terminerons par quelques recommandations pour en limiter les risques.



Dr. Jean Leid

Jean Leid est ophtalmologiste libéral spécialiste en vision des couleurs, auteur de nombreuses publications sur ce sujet. Il a été longuement administrateur de l'International Color Vision Society. Chargé de cours à la faculté de médecine de Paris 7, il a été le coordinateur du rapport des Sociétés d'Ophtalmologie de France sur les Dyschromatopsies en 2001.

La lumière bleue existe depuis que le monde est monde et jusqu'alors personne ne s'en est ému. Depuis quelques petites années on la retrouve pourtant dans bon nombre d'articles de presse tant dans le domaine du grand public que dans la littérature scientifique. Pourquoi tant de sollicitude, en fait tant d'inquiétude ?

La lumière bleue se trouve partout à commencer et surtout dans la lumière solaire. Cela n'est pas nouveau. Ce qui a changé, ce sont nos modes de vie : globalement on peut dire qu'en quelques décennies nous sommes passés de l'ombre à la lumière ! modification de l'habitat où les pièces à vivre sont maintenant orientées vers le sud et pourvues de grandes baies vitrées alors que les anciens tendaient à se protéger du soleil ; large exposition de notre corps à la lumière solaire dans les pays occidentaux où le vêtement s'est allégé et où les loisirs sont préférentiellement orientés vers le soleil (mer, montagne, ski...) ; mais ce n'est pas tout. Les années les plus récentes ont vu apparaître deux technologies fondamentales favorables à l'émergence de surexpositions à la lumière bleue : les lampes à LED et les dernières générations d'écrans. Dans le même temps un véritable fléau s'abat sur les populations les plus âgées, la DMLA (dégénérescence maculaire liée à l'âge) et la « consommation » que nous faisons tous des écrans, surtout les plus jeunes, explose littéralement. Il n'en fallait pas plus pour que les craintes surgissent, que les interrogations se multiplient.

Qu'est-ce que la lumière bleue ?

Le plus souvent la lumière bleue ne se « voit » pas en tant que telle. Elle n'est qu'une des différentes composantes spectrales d'une lumière donnée. Cela est vrai aussi bien

MOTS-CLÉS

Lumière bleue, DMLA, lampes à LED, température de couleur, indice de rendu des couleurs (IRC), luminance, spectre d'émission, écrans OLED / AMOLED, dispositifs digitaux, cécités unilatérales transitoires, toxicité rétinienne, stress oxydatif, dégénérescence des photorécepteurs, effet cumulatif

pour la lumière solaire que pour les lumières artificielles. L'œil humain est un récepteur très sélectif des ondes électromagnétiques puisqu'il n'est sensible qu'à une infime partie de celles-ci. En l'occurrence son « spectre » couvre environ les longueurs d'onde allant de 400 à 700 nanomètres nous permettant de voir successivement les couleurs de l'arc en ciel depuis les teintes dites « froides » : violet, bleu, bleu-vert de 400 à 500 nm, jusqu'aux couleurs dites « chaudes » : orangé, rouge de 590 à 700 nm, en passant par les couleurs intermédiaires : vert, jaune, de 500 à 590 nm. Ce spectre correspond à ce que nous appelons la lumière visible. D'autres espèces animales possèdent des récepteurs capables de percevoir d'autres régions du spectre électromagnétique.

Ces termes de lumière chaude ou froide sont à rapporter à une caractéristique renseignant sur la sensation colorée générale produite par une source lumineuse donnée : la température de couleur. Celle-ci s'exprime en kelvin (K) (on ne parle plus de degrés kelvin depuis 1967 !), allant de 2000 à 3000 K pour une lumière rougeâtre (ampoule à incandescence de basse puissance par exemple) jusqu'à des valeurs de 6000 à 7000 K donnant l'apparence d'une lumière bleutée telle celle d'un ciel en été à midi, en passant par des valeurs intermédiaires de l'ordre de 4000 à 5000 K pour une lumière d'apparence jaunâtre telle qu'émet par exemple une lampe halogène (fig. 1).

Dans le domaine de l'éclairage on utilise aussi une autre caractéristique de la lumière, appelée indice de rendu des couleurs (IRC) qui est d'une autre nature, exprimant la capacité d'une source lumineuse à procurer à l'œil un rendu des couleurs le plus proche de la réalité, jusqu'à la valeur limite supérieure de 100.

Ces caractéristiques sont parfois visibles de façon codée sur les sources de lumières artificielles que l'on trouve dans le commerce, notamment sur les « néons ». Un code 840 fréquemment retrouvé sur les tubes fluorescents

classiques signifie que l'on aura une lumière dont l'IRC sera supérieur à 80 et dont la température de couleur sera de 4000 K. Les industriels aiment toutefois attribuer des noms, plus évocateurs, à ces chiffres. Cette lumière sera ainsi appelée par exemple « blanc neutre », d'autres « blanc chaud », « blanc froid » ou « lumière du jour ».

Où se trouve la lumière bleue ?

Nous commençons à saisir qu'un type de source donné peut produire des lumières de « qualité » différente et que, plus on parle de lumière froide, plus il y aura du bleu dans le spectre.

Nous étions plutôt habitués autrefois avec les bonnes vieilles lampes bulbes à incandescence (les fameuses « ampoules » connues depuis Edison en 1879) à parler de quantité de lumière selon la puissance fournie par l'ampoule. La qualité de la lumière n'était pas le point important car de toute façon ce type de lampe ne donnait que des lumières orangées à jaunâtres à peine un peu plus « claires » pour les lampes de 100W. L'IRC était franchement mauvais, la température de couleur basse. Par contre leur spectre ne contenait que très peu de lumière bleue (fig. 2). N'en parlons plus, différents lobbies sont parvenus à les faire définitivement disparaître en Europe depuis 2012, c'est bien dommage pour notre confort et la santé de nos yeux ! On ne peut d'ailleurs que s'étonner du fait que ces décisions drastiques ne prennent la source de leur justification que dans l'économie d'énergie globale espérée du fait des mauvais rendements énergétiques des lampes à incandescence par rapport aux lampes plus modernes sans tenir compte de l'empreinte carbone laissée par la fabrication et surtout le recyclage de ces dernières, sujet sur lequel il y aurait beaucoup à dire.

En matière de lampe à incandescence, il nous reste toutefois encore les lampes halogènes. Apparues beaucoup plus tard (dernier quart du XX^e siècle, leur invention datant de 1959 : Zubler et Mosby), elles conservent

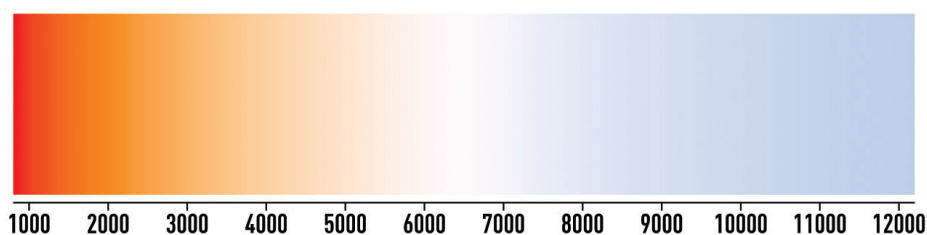


FIG. 1] Les différentes températures de couleur en K représentant la couleur du rayonnement d'un corps noir (corps théorique chauffé à ces températures) pour un observateur en lumière du jour standard D65 (<http://www.cie.co.at/index.php>)

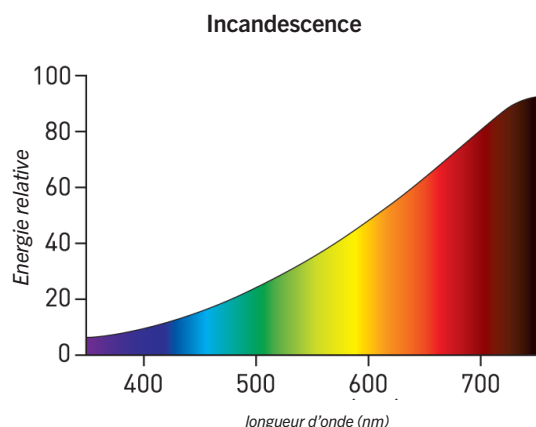


FIG. 2| Spectre d'une lampe à incandescence. Il contient très peu de bleu.

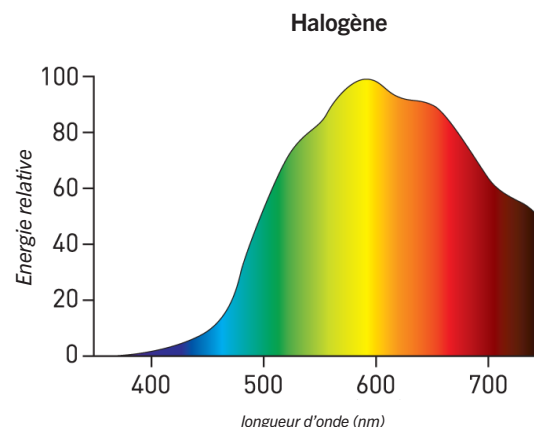


FIG. 3| Spectre d'une lampe halogène. Il contient très peu de bleu mais plus de jaune que celui d'une lampe à incandescence ordinaire

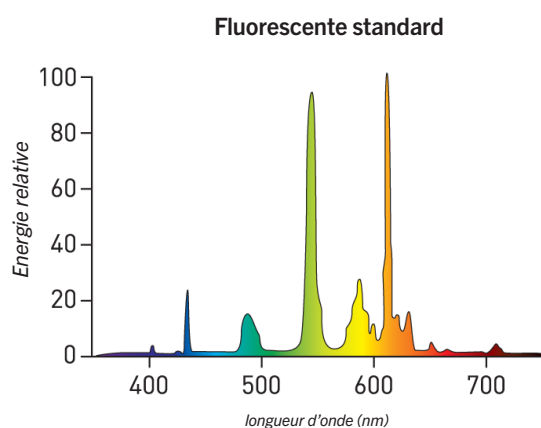


FIG. 4| Spectre d'une lampe fluorescente standard. Spectre de raies, peu de bleu

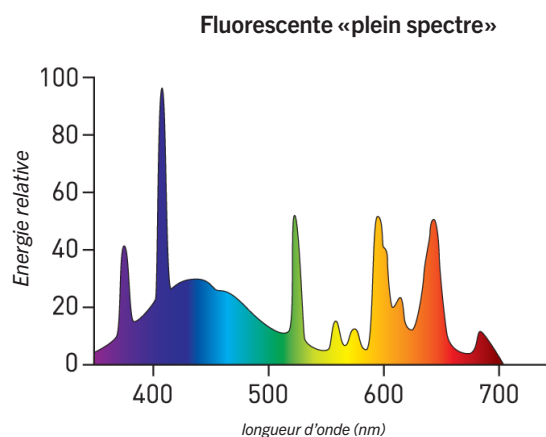


FIG. 5| Spectre d'une lampe fluorescente dite « plein spectre ». Il se rapproche du spectre solaire et contient beaucoup de bleu

l'avantage d'un spectre pauvre en lumière bleue (fig. 3) mais sont dotées d'une température de couleur plus élevée. Leur IRC reste faible car nous sommes encore loin du spectre solaire. Les instances européennes auraient également décidé de les interdire. Il serait question d'une suppression en 2018.

Les lampes fluorescentes sont anciennes (Germer 1926) sous leur forme de longs tubes dits « néons ». Il n'y a plus de néon depuis longtemps dans ces lampes dont le système de production de lumière aboutit à un spectre très différent des précédentes puisqu'il s'agit d'un spectre de raies (fig. 4).

Nous l'avons vu plus haut, ce spectre peut être très variable suivant les caractéristiques de lumière recherchées (fig. 5).

L'évolution moderne de ce type de lampe (début des années 80) est représentée par les lampes « fluo-compactes » dites « basse consommation » dont le spectre est assez proche et de même type et dont l'encombrement réduit facilite l'usage. On peut facilement trouver maintenant des lampes fluorescentes contenant peu de bleu dans leur spectre.

Enfin les lampes à LED envahissent inexorablement le marché depuis quelques années seulement (1990) mais avec une progression foudroyante. Les leaders de l'industrie de l'éclairage estiment que plus de 90% de toutes les sources lumineuses mondiales reposeront sur les produits d'éclairage à semi-conducteurs et les LEDs d'ici 2020.

Les industriels parent ces lampes de toutes les qualités : longue durée de vie, constance de la lumière émise, peu sensibles au nombre d'allumage et aux chocs, lumière froide et surtout considérable économie d'énergie du fait de leur rendement énergétique exceptionnel. Hélas tout cela est loin d'être avéré, à commencer par la durée de vie qui n'est que théorique et qui dépend très fortement de la qualité de fabrication de la lampe et de ses capacités à refroidir... car seule la lumière est froide, mais pas la lampe ! Cependant le plus inquiétant pour l'ophtalmologiste à propos de ces lampes est leur double inconvénient résultant de leur importante émission de lumière bleue (pour la plupart des lampes à LED actuelles) et de leur formidable luminance qui est de l'ordre de 1000 fois supérieure à celle d'une lampe classique du fait de la concentration extrême du faisceau.

Les lampes à LED sont des lampes à décharge en phase solide utilisant des semi-conducteurs de sorte qu'elles ne



« Le danger provient non pas de la quantité totale de lumière émise (le flux lumineux) mais du double risque constitué par la faible distance d'observation et la durée d'utilisation. Regarder un film sur un smartphone à écran AMOLED peut s'avérer ainsi fort dangereux. »

peuvent émettre qu'un seul pic de lumière (soit donc une seule « couleur »). Ainsi les LEDs blanches n'existent pas. Pour obtenir une lumière blanche il faut soit combiner plusieurs LEDs colorées (en combinant 3 couleurs fondamentales) mais cela revient très cher, soit ajouter un phosphore sur l'enveloppe de la diode (donnant ainsi une LED blanche lumière du jour) (fig. 6), soit tromper l'œil de l'utilisateur grâce à des LEDs bleues dont la très forte luminance produit une sensation de lumière « blanche ». C'est le cas actuellement de la majorité des LEDs vendues dans le commerce, notamment pour les lampes bon marché et les lampes de poche. Leur spectre est catastrophique pour l'œil avec un pic unique dans le bleu et qui plus est dans le bleu le plus toxique (fig.7). Heureusement on commence à voir apparaître des lampes à LED blanc chaud où la proportion de bleu est bien moindre grâce à une technologie utilisant deux phosphores mais au prix d'un coût élevé et d'une diminution importante du rendement énergétique (fig. 8).

Et le soleil dans tout cela ? Il reste de très loin le premier « producteur » de lumière bleue. Le spectre solaire dépend fortement de l'heure de la journée, de la latitude d'observation, de l'altitude, de la saison et de l'atmosphère (présence de nébulosité). Le spectre de référence de la lumière du jour dite naturelle est celui d'un ciel observé au Nord dans l'hémisphère Nord, à midi. Ce spectre est assez équilibré ce qui nous permet de considérer que cette lumière est d'apparence « blanche » (fig. 9).

Pour autant il contient une part importante de lumière bleue dont nous devons éminemment nous méfier. Selon les normes (ASTM G173-03 et D65), la lumière bleue représente 24 à 30% de la lumière du jour. Quand on sait que la luminance d'un ciel ensoleillé est d'au moins 5000 cd/m² et celle d'un écran d'ordinateur de l'ordre de 250 à 300 cd/m², cela donne à réfléchir !

Lumière bleue et écrans

Outre les lampes à LED, l'inquiétude se porte sur l'usage de plus en plus prolongé des écrans. 60% de la population passe plus de 6 heures par jour devant un appareil numérique ! (Etude « Bleu en lumière »). ^[1]

Nous avons vu que la luminance des écrans est faible en comparaison de celle de la lumière solaire. Néanmoins, non seulement nous utilisons de longues heures par jour

les écrans mais encore nous ne songeons pas encore à nous en protéger contrairement à la lumière solaire. De plus si les télévisions sont le plus souvent regardées à une distance respectable, ce n'est pas le cas des écrans d'ordinateur encore moins des tablettes et des téléphones portables dont les plus jeunes surtout font usage parfois plusieurs heures par jour !

La proportion de lumière bleue émise par les écrans dépend fortement de leur technologie.

Dans les écrans LCD classiques, la dalle est rétroéclairée par des tubes fluorescents. La perception de lumière bleue par l'utilisateur est très réduite, il y a très peu de risques. Dans les écrans LCD-LED, ce sont des LEDs qui rétroéclairent la dalle ou sont situées sur les côtés pour diminuer l'épaisseur de l'écran. La traversée de la dalle LCD diminue fortement les risques.

Par contre dans les écrans OLED ou AMOLED (Active Matrix Organic Light Emitting Diode), c'est la dalle elle-même qui produit sa propre lumière, directement visible par l'utilisateur. Ces écrans sont dits émissifs par opposition aux écrans LCD qui sont dits transmissifs. Très fins, ils sont de plus en plus utilisés dans les smartphones et les tablettes. La lumière bleue émise est directement recueillie par la rétine et ce à une très faible distance. Le danger provient non pas de la quantité totale de lumière émise (le flux lumineux) mais du double risque constitué par la faible distance d'observation et la durée d'utilisation. Regarder un film sur un smartphone à écran AMOLED peut s'avérer ainsi fort dangereux. Tout dernièrement il a été rapporté des cécités unilatérales transitoires chez des jeunes femmes ayant longuement regardé leur smartphone dans le noir en position couchée latérale. ^[2] Cela pour ne parler que des risques immédiats. Nous ne sommes qu'au début des ennuis. La simple et banale observation comparative d'un écran de smartphone AMOLED et d'un écran LCD-LED permet vite à tout individu lambda de bonne foi de comprendre que l'on n'est pas dans le même registre de luminosité. Tout l'art des commerciaux est de faire ressentir cela comme un avantage, là où il n'y a en fait qu'inconfort et danger. Le même discours est de mise pour les écrans d'ordinateur de bureau. Même le délégué général de l'agence française de l'éclairage a des mots très durs sur ces tendances de marketing : « le marché est pourri par des fabricants opportunistes qui vendent des produits de très mauvaise qualité ». ^[3]

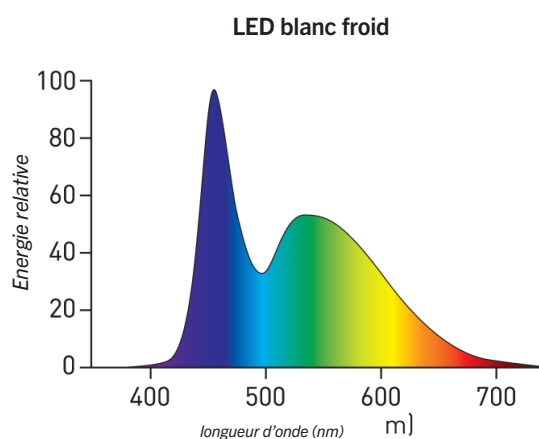


FIG. 6| Spectre d'une lampe à LED blanc froid. Il contient beaucoup de bleu (35%) et dans sa localisation la plus toxique

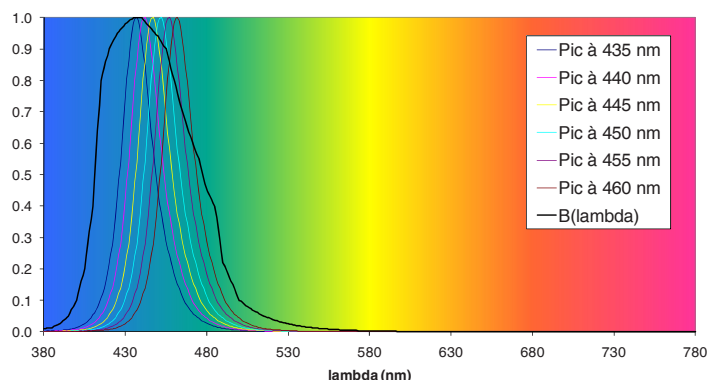


FIG. 7| Spectre des lampes à LED bleues. Pic moyen vers 440 à 450 nm soit proche de la couleur la plus toxique (figure issue du rapport ANSES)

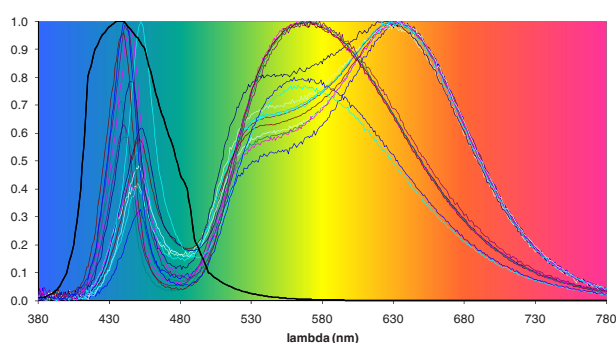


FIG. 8| Spectre des lampes à LED blanc chaud utilisant 2 phosphores additionnels (figure issue du rapport ANSES)

Lumière du jour

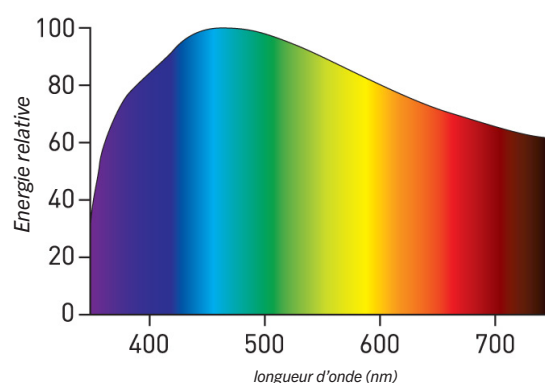


FIG. 9| Spectre de la lumière solaire (illuminant D65 CIE). Beaucoup de bleu (24 à 30%) et équilibre des différentes composantes

Quels sont les risques oculaires de la lumière bleue ?

Il est donc clair que nous recevons tous de plus en plus de lumière bleue. Alors, cette fameuse « lumière bleue » est-elle vraiment nocive et doit-on en avoir peur ?

Tout d'abord pourquoi le bleu serait-il plus dangereux que le rouge ou le vert ?

La réponse tient en une simple formule posée en 1900 par Max Planck : $W=h\nu$, montrant que l'énergie d'un oscillateur (la notion de photon n'émergera qu'en 1926 après les travaux d'Einstein puis de Compton) est directement proportionnelle à sa fréquence soit à l'inverse de sa longueur d'onde (h étant la constante de Planck). Plus la lumière est de faible longueur d'onde, plus elle est porteuse d'énergie. Le bleu est donc en première ligne sur ce point.

Cela toutefois ne suffit pas à expliquer la toxicité rétinienne de la lumière bleue.

Il semble que la première étude sur la phototoxicité de la lumière bleue (sur les bâtonnets des rats illuminés par des lampes fluorescentes) date d'un demi-siècle (Noell 1966).^[4]

Ce sont cependant les importants travaux de John Marshall qui ont défriché la question. Il a commencé à montrer dès 1972 la toxicité des lumières de courte longueur d'onde sur les cônes de pigeon.^[5] Il s'en est suivi de très importants travaux montrant *in vitro* les mécanismes de la destruction des photorécepteurs par les lumières bleues dans la DMLA.

Il a été ainsi précisé que la photo-activation du tout-trans rétinale par la lumière bleu-violet peut entraîner un stress oxydatif dans les segments externes des photorécepteurs. Plus précisément, c'est l'A2E, composant photosensible de la lipofuscine, qui peut être excité par des radiations de lumière bleue de 440 nm entraînant à terme la dégénérescence des photorécepteurs et des cellules de l'épithélium pigmentaire.

Pour autant il serait imprudent de bannir totalement la lumière bleue car pour des longueurs d'onde à peine supérieures, à 480 nm, il y a un véritable bénéfice à recevoir cette lumière car elle correspond au pic de sensibilité des cellules ganglionnaires à mélanopsine qui sont directement impliquées dans la synchronisation de l'horloge circadienne (travaux de Provencio 1998^[6] et de Brainard 2001).^[7]

« Ainsi, il faudrait pouvoir limiter les risques rétinien de la lumière bleue mais préserver la fonction essentielle de l'horloge circadienne. Pour cela il faudrait couper la lumière bleue jusqu'à environ 455 nm et ne pas filtrer au-delà de 465 nm »

La porte est donc très étroite entre le « bon bleu » utile à notre cycle circadien dont les incidences dans l'économie générale de la physiologie humaine est considérable et le « mauvais bleu » capable à terme de détruire nos récepteurs visuels si précieux.

Ainsi, il faudrait pouvoir limiter les risques rétinien de la lumière bleue mais préserver la fonction essentielle de l'horloge circadienne. Pour cela il faudrait couper la lumière bleue jusqu'à environ 455 nm et ne pas filtrer au-delà de 465 nm. Autant dire que la marge de manœuvre est étroite ! (Fig. 10).

L'apparition des LEDs après 1990 a amené les chercheurs à se pencher directement sur leurs risques.

En 2001 Dawson et collaborateurs ont montré sur des rétines de singes que les lampes à LED émettant dans le bleu étaient aussi toxiques qu'un laser bleu à exposition égale. ^[8]

En 2010 l'ANSES, agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, a publié sous la direction du professeur Béhar-Cohen un très important rapport sur les « effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes ». ^[9] Ce rapport qui a été suivi de deux publications françaises en 2011 ^[10] et 2013 ^[11] met en alerte contre les risques des lampes à LED en relation directe avec d'une part le déséquilibre spectral de ces lampes en faveur des faibles longueurs d'onde dont la toxicité *in vitro* est amplement démontrée et d'autre part la très forte luminance de ces lampes, concluant notamment que le risque photochimique était lié à la dose cumulée de lumière bleue à laquelle la personne a été exposée.

Ce rapport émet des recommandations dont en particulier la nécessité de restreindre la mise sur le marché « grand

public » des systèmes d'éclairage à LED ainsi que d'adapter les normes et les faire respecter. Il convient aussi d'informer correctement le consommateur (étiquetage informatif des systèmes d'éclairage).

A ce jour, ces recommandations sont loin d'être appliquées et il n'apparaît pas clairement de volonté de le faire. Il n'y a pas encore de prise de conscience du risque des LEDs sur la santé publique et l'on ne peut que s'étonner et s'émouvoir du fait que le principe de précaution ne soit pas appliqué alors que quelques antécédents fâcheux en la matière dans les dernières décennies devraient inciter à la réflexion et à la prudence.

Il est patent qu'il n'existe pas suffisamment d'études permettant de transposer *in vivo* les constatations faites de façon irréfutable *in vitro* sur la toxicité maculaire des lumières de courte longueur d'onde. Peu d'études au long cours permettent d'établir clairement une relation entre l'exposition prolongée à la lumière bleue et la DMLA (Beaver Dam Eye Study ^[12], Etude EUREYE ^[13]). Tout n'est cependant qu'une question de moyens et de méthodologie. Il est nécessaire que des équipes de chercheurs acceptent de se lancer dans des études longues et difficiles prenant en compte dès aujourd'hui les paramètres nouveaux de nos modes de vie qui vont s'amplifier rapidement dans les années à venir (écrans, lampes à LED). Sans cela il sera difficile de faire entendre la voix de la prudence alors que les enjeux économiques sont majeurs dans ce secteur.

Conclusions

On ne peut sérieusement nier aujourd'hui les risques oculaires potentiels d'une surexposition à la lumière bleue.

Pour rester pondéré mais lucide devant cette question actuellement très débattue, nous devons garder en mémoire les principaux « producteurs » de cette lumière à haute énergie capable *in vitro* de détruire nos cellules

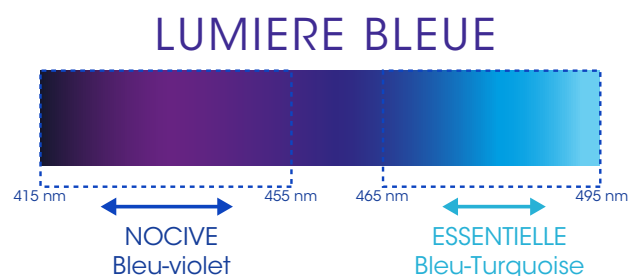


FIG. 10| Le dilemme de la lumière bleue



« Il ne faut surtout pas perdre de vue que c'est l'effet cumulatif au fil des ans qui est dangereux et qu'il faut combattre. Les précautions doivent être prises tôt et dans la durée »

maculaires. Ce sont en premier lieu le soleil, en second les lumières artificielles par LEDs blanc froid et les écrans AMOLED.

Se prémunir dans un souci de précaution de leurs effets néfastes passe avant tout par une protection oculaire permanente contre le rayonnement solaire grâce à de bons verres teintés. Des précautions dans l'usage des écrans à forte émission de lumière bleue sont également nécessaires, en évitant de les observer longtemps et de trop près et en utilisant le plus possible des systèmes optiques protégeant de la lumière bleue toxique. Ces procédés existent déjà et ne feront que s'améliorer et se généraliser. Il est plus difficile de se prémunir de la lumière des mauvaises lampes à LED qui se généralisent, sauf au minimum à les utiliser parcimonieusement à son domicile. Seule une prise de conscience des pouvoirs publics pourrait être efficace sur ce point.

Il ne faut surtout pas perdre de vue que c'est l'effet cumulatif au fil des ans qui est dangereux et qu'il faut combattre. Les précautions doivent être prises tôt et dans la durée. En particulier une attention soutenue sera portée sur les enfants dont les milieux oculaires laissent très largement passer ces lumières de haute énergie et sur les jeunes, enclins à s'exposer longtemps aux écrans et au soleil.

Enfin, l'accent devra être mis sur la nécessaire protection accrue des groupes à risque plus âgés : les opérés de cataracte, surtout s'ils n'ont pas bénéficié d'implants jaunes et les porteurs de maculopathies liées à l'âge.

Ne nous privons pas de la lumière qui est si fondamentale mais sachons comme pour beaucoup d'éléments naturels mieux la comprendre pour mieux en tirer parti sans risques. •



INFORMATIONS CLÉS

- La lumière bleue n'est pas visible en tant que telle, c'est une composante spectrale de la lumière visible qui correspond aux longueurs d'onde de 400 à 500 nm environ.
- Les principaux « producteurs » de la lumière bleue à haute énergie capable *in vitro* de détruire les cellules maculaires sont en premier lieu le soleil, en second les lumières artificielles par LEDs blanc froid et les écrans AMOLED.
- La récente émergence des lampes à LED et des dernières générations d'écrans sont responsables d'une surexposition à la lumière bleue.
- La lumière bleue de longueur d'onde 440 nm peut induire un stress oxydatif dans les segments externes des photorécepteurs qui, à terme, peut entraîner leur dégénérescence ainsi que celle des cellules de l'épithélium pigmentaire.
- Des précautions accrues doivent être prises en particulier pour les enfants, les opérés de cataracte et les personnes atteintes de maculopathies liées à l'âge.
- Toute la lumière bleue n'est pas à bannir car les longueurs d'onde à peine supérieures à 480 nm sont bénéfiques, elles sont directement impliquées dans la synchronisation de l'horloge circadienne.

RÉFÉRENCES

1. Campagne Bleu en Lumière : <http://www.bleuenlumiere.com/#bleuenlumiere>
2. Transient Smartphone "Blindness" N Engl J Med 2016; 374:2502-2504 June 23, 2016 DOI: 10.1056/NEJMc1514294
3. Les Brèves de l'AFE n° 64, mars 2011. <http://www.afe-eclairage.fr/docs/10267-ext.pdf>
4. Noell WK, Walker VS, Kang BS, Berman S. Retinal damage by light in rats. Invest Ophthalmol. 1966;5:450-473
5. Marshall J, Mellerio J, Palmer DA. Damage to pigeon retinae by moderate illumination from fluorescent lamps. Exp Eye Res 1972;14:164-9.
6. Provencio I, Jiang G, De Grip WJ, Hayes WP, Rollag MD. Melanopsin: an opsin in melanophores, brain, and eye. Proc Natl Acad Sci USA. 1998;95:340-5.
7. Brainard GC, Hanifin JP, Greeson JM, Byrne B, Glickman G, Gerner E, Rollag MD. Action spectrum for melatonin regulation in humans : evidence for a novel circadian photoreceptor. J Neurosci 2001;21:6405-6412. [PubMed: 11487664]
8. Dawson W, Nakanishi-Ueda T, Armstrong D, Reitze D, Samuelson D, Hope M, et al. Local fundus response to blue (LED and laser) and infrared (LED and laser) sources. Exp Eye Res 2001;73:137-47
9. ANSES. Effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (LED); 2010 [Disponible sur le site www.anses.fr].
10. Behar-Cohen F, Martinsons C, Viénot F, Zissis G, Barlier-Salsi A, Cesarini JP, et al. Light-emitting diodes (LED) for domestic lighting: any risks for the eye? Prog Retin Eye Res 2011;30:239-57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.preteyeres.2011.04.002> [Epub 2011 May 14].
11. Arnault E, Barrau C, Nanteau C, Gondouin P, Bigot K, Viénot F, et al. Phototoxic action spectrum on a retinal pigment epithelium model of age-related macular degeneration exposed to sunlight normalized conditions. PLoS One 2013;8:e71398. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0071398> [eCollection 2013]
12. Cruickshanks KJ, Klein R, Klein BE, et al. Sunlight and age-related macular degeneration the Beaver Dam Eye Study. Arch Ophthalmol 1993;111:514-18.
13. Fletcher AE, Bentham GC, Agnew M, et al. Sunlight exposure, antioxidants, and age-related macular degeneration. Arch Ophthalmol 2008;126:1396-403.