

Diodes électroluminescentes : risques pour les travailleurs exposés à la lumière bleue ?

AUTEURS :

A. Barlier-Salsi¹, M.A. Gautier², D. Brissinger¹, J.M. Deniel¹

¹ Département Ingénierie des équipements de travail, INRS

² Département Études et assistance médicales, INRS

EN RÉSUMÉ

Les diodes électroluminescentes (LED), auxquelles la population générale et les travailleurs sont de plus en plus exposés, sont souvent considérées comme présentant un risque pour la santé du fait de la lumière bleue qu'elles émettent. Cet article décrit les effets sur la santé de la lumière bleue ainsi que l'exposition des travailleurs à la lumière bleue, liée ou non à l'éclairage aux LED. Il met en évidence que l'exposition des salariés en condition normale d'utilisation n'entraîne pas de risque lésionnel. L'exposition professionnelle aux LED peut en revanche présenter un danger lésionnel pour la rétine chez les salariés qui les produisent. Il existe aussi des effets de la lumière bleue sur l'horloge biologique. L'exposition à la lumière bleue peut ainsi impacter le sommeil et peut également être utilisée à des fins préventives chez les travailleurs de nuit.

MOTS CLÉS

Éclairage /
Sommeil /
Rayonnement
optique
artificiel (ROA) /
Rayonnement
visible /
Chronobiologie /
Horloge biologique



© Fabrice Dimier pour l'INRS

La généralisation de l'usage des diodes électroluminescentes (*light emitting diode* ou LED) dans la dernière décennie a notablement modifié l'environnement lumineux des postes de travail tant dans le secteur tertiaire que dans l'industrie. Les LED sont présentes dans les nouvelles installations d'éclairage ou en remplacement des lampes incandescentes ou halogènes classiques et de celles à vapeur de mercure (ballons fluorescents) qui sont désormais toutes interdites à la vente. Elles sont également utilisées pour le rétro-éclairage des écrans de tous types (ordinateurs, tablettes, smartphones notamment). Dès leur apparition, les LED ont donné lieu à une multitude d'études sur la lumière bleue qu'elles émettent et sur le danger potentiel que pourrait présenter cette technologie. En effet, les LED blanches ont la particularité d'émettre un rayonnement bleu, en partie absorbé par un matériau luminescent, qui réémet un rayonnement sur le reste du spectre visible. L'action du rayonnement bleu sur la rétine est connue depuis longtemps et les résultats d'études conduites dès 1976 ont permis d'établir des courbes d'action et de fixer des valeurs limites d'exposition (VLE) reprises aujourd'hui dans la réglementation. Son action sur les cycles circadiens est de plus en plus connue et a des applications pratiques, thérapeutiques et préventives. Des études concluent que le risque « lumière bleue » des LED est supérieur à celui d'autres dispositifs d'éclairage [1 à 4] et certaines

Diodes électroluminescentes : risques pour les travailleurs exposés à la lumière bleue ?

tendent à remettre en cause la validité des VLE réglementaires. Le dernier avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) sur les LED va également dans ce sens [5]. En revanche, les positions exprimées dans les rapports européens du *Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks* (Comité scientifique sur les risques sanitaires, environnementaux et émergents – SCHEER) [6] ou internationaux de la Commission internationale de l'éclairage (CIE) [7] et de l'*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants – ICNIRP) [8] considèrent que les résultats d'études, à ce jour, ne permettent pas d'affirmer que les LED utilisées pour l'éclairage présentent un danger prépondérant pour le risque lumière bleue. Elles s'appuient notamment sur le fait que les études « à charge » ont été réalisées à des niveaux d'intensité lumineuse très élevés et qu'elles ne permettent donc pas d'affirmer que l'exposition chronique à la lumière bleue à de faibles intensités peut avoir des effets sur la rétine. Toutes les sources d'éclairage, naturelles et artificielles (à incandescence, fluorescentes, à décharge, LED), émettent de la lumière bleue. Selon la proportion de lumière bleue présente dans le spectre, la lumière émise est d'apparence plus ou moins froide, avec une température de couleur variable, qui se traduit par une modification de la couleur perçue. La question est aujourd'hui de savoir si les éclairages à LED présentent plus de risque pour la santé des travailleurs que les autres moyens d'éclairage et si les LED des écrans de visualisation sont une problématique de santé et sécurité au travail.

EFFETS SANITAIRES DE LA LUMIÈRE BLEUE

Tous les rayonnements de longueurs d'onde comprises entre 300 et 1400 nm traversent, dans des proportions variables selon leurs longueurs d'onde, les différents milieux oculaires et atteignent la rétine. Seuls les rayonnements compris entre 380 et 780 nm sont perçus ou agissent sur la vision. Les cellules rétinienne (cônes et bâtonnets) sont sensibles à de faibles niveaux d'éclairement. Cependant, une perception visuelle correcte de la tâche, sans engendrer de fatigue visuelle, nécessite un niveau d'éclairement adapté (300 à 500 lux pour une tâche de bureau par exemple). Un excès de rayonnement, notamment dans le domaine bleu, peut en revanche altérer les cellules rétinienne ou avoir une action sur les cycles circadiens et le sommeil.

EFFETS PHOTOCHEMISTIQUES

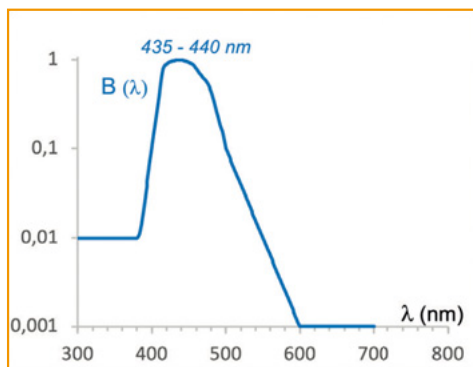
L'effet photochimique sur la rétine [9] dépend de la dose, qui est le produit de l'éclairement énergétique par la durée d'exposition. Ainsi, les lésions rétinienne résultent de l'exposition à une lumière très intense pendant une courte durée ou à une lumière moins intense pendant une durée plus longue. Un effet connu est la photorétinite solaire, consécutive à une observation directe du soleil, qui se traduit par un scotome (tache aveugle) plus ou moins réversible selon l'intensité du rayonnement et la durée d'observation. Ces lésions rétinienne photochimiques sont plus connues sous le terme de « lésions dues à la lumière bleue » et référencées comme lésion de type II par l'ICNIRP [9]. Elles sont causées par des expositions de l'ordre de 10 secondes à 1 ou 2 heures et liées à l'absorption des rayonnements de 380 à 520 nm (figure 1) par l'épi-

thélium pigmentaire rétinien et la choroiide. C'est cet effet qui est pris en compte pour évaluer les risques dans les recommandations de l'ICNIRP et dans la réglementation relative à la prévention des risques d'exposition aux rayonnements optiques artificiels en milieu professionnel (Code du travail, art 4452-1 et suivants). À noter que l'ICNIRP mentionne aussi les lésions de type I révélées par des études sur des animaux exposés à des lumières vives pendant plusieurs jours. Ces études suggèrent que ce type de lésions est lié aux dommages des photorécepteurs résultant d'un blanchiment prolongé de la rhodopsine. À ce jour, elles n'ont pas permis de conduire à l'établissement d'une VLE spécifique.

EFFETS SUR LE FONCTIONNEMENT DE L'HORLOGE BIOLOGIQUE ET LA RÉGULATION DES RYTHMES CIRCADIENS

En 2018, la Société française de recherche et médecine du sommeil a publié un consensus en chronobiologie et sommeil avec une synthèse des connaissances sur ce sujet. Chez l'homme, les fonctions biologiques sont régulées, dans leur grande majorité, par un système appelé circadien, constitué par une horloge principale (appelée également horloge circadienne ou centrale) et des horloges périphériques. L'horloge principale est située dans le système nerveux central, au niveau des noyaux suprachiasmatiques de l'hypothalamus. Les horloges périphériques sont présentes dans presque tous les tissus de l'organisme tels que la rétine, le foie, le cœur, le poumon ou la peau. Ce système va contrôler et réguler, tout au long du nyctémère, le fonctionnement harmonieux des fonctions physiologiques, psychologiques et comportementales, dont notamment la

Figure 1 : Courbe $B(\lambda)$ de sensibilité spectrale pour l'action photochimique de la lumière sur la rétine (sans unité) ; la sensibilité est en fonction de la longueur d'onde.



succession de l'éveil et du sommeil, la mémoire, la concentration, les sécrétions d'hormones, le contrôle de la température, le contrôle de la division cellulaire ou encore la réparation de l'ADN. Ce système a une rythmicité propre, programmée génétiquement et régulée de façon endogène. Cependant, ce rythme se synchronise sur la période du soleil (24 heures) et donc avec la lumière. La lumière perçue par la rétine est le synchroniseur le plus puissant et le plus important pour l'horloge et, par conséquent, joue un rôle fondamental dans la régulation de nombreuses fonctions physiologiques. Le mécanisme qui entre en jeu fait appel à des cellules visuelles particulières, les cellules ganglionnaires à mélanopsine. Elles transmettent l'information lumineuse à l'horloge biologique, mais aussi à différentes structures du cerveau, dont les zones impliquées dans la régulation du sommeil ou l'activité physique, par exemple. En effet, pour que l'organisme fonctionne parfaitement, les fonctions physiologiques doivent être programmées pour que certaines aient lieu la journée, d'autres la nuit, et selon des rythmes qui se synchronisent les uns par rapport aux autres. Si le fonctionnement de ce système circadien est perturbé, alors les rythmes vont se décaler les uns par rapport aux autres et des effets sur la santé pourront apparaître, tels que des troubles du sommeil, des cancers, des pathologies cardiovasculaires ou des troubles du métabolisme [10, 11].

Les effets de la lumière sur l'horloge circadienne dépendent principalement de :

- l'heure de l'exposition lumineuse : la sensibilité de l'horloge est maximale avant le coucher et après le lever ;
- l'intensité et la durée d'exposition à la lumière : l'horloge ne peut être synchronisée correctement que si les niveaux lumineux reçus dans la journée sont suffisants en durée et intensité ;
- l'historique lumineux : c'est la lumière reçue tout au long de la journée qui permet d'être synchronisé sur la période des 24 heures ;
- le spectre de la lumière : la lumière bleue des LED, de longueur d'onde 480 nm, est aussi efficace sur l'horloge qu'une lumière blanche d'intensité 100 fois supérieure.

L'exposition à la lumière de façon adaptée va ainsi favoriser et réguler le fonctionnement de l'horloge biologique et les différentes régulations physiologiques qui en dépendent. Par exemple, l'alternance entre la veille et le sommeil seront stables et de qualité. Cela favorisera en journée, *via* les régulations de la température corporelle et de la sécrétion de cortisol, les performances cognitives telles que la vigilance, la performance et la mémoire alors que la nuit, à la suite de la chute de la température corporelle, de la chute de la sécrétion de cortisol et de l'augmentation de la production de mélatonine, l'endormissement et le sommeil surviendront. Et c'est ainsi que l'exposition à la lumière des écrans (smartphone, ordinateur) en fin de journée peut retarder l'endormissement par blocage de la sécrétion de mélatonine. La photothérapie repose sur ce mécanisme de régulation du système veille-sommeil pour traiter la dépression saisonnière et certains troubles du sommeil [12, 13].

GRANDEURS UTILISÉES

L'ÉCLAIREMENT ET LA LUMINANCE

L'éclairement représente le flux émis par la source atteignant une surface, ramené à l'unité de cette surface. Il dépend de la puissance de la source et de la distance d'exposition.

La luminance est le flux émis par unité de surface apparente de la source et unité d'angle solide en direction de l'œil.

L'éclairement E (en lux) et la luminance L (en cd/m^2), lorsqu'ils sont qualifiés de lumineux, tiennent compte des effets visuels de la lumière et permettent de caractériser l'environnement lumineux d'un poste de travail. L'éclairement énergétique efficace E_B (en W/m^2) et la luminance énergétique efficace L_B ($\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}^{**}$) prennent en compte l'action photochimique de la lumière bleue sur la rétine et permettent d'évaluer le risque sur ce domaine spectral. Le calcul de ces grandeurs est réalisé à partir de la répartition spectrale de la source (tableau I).

* candela par mètre carré

** Stéradian

Tableau I

CALCUL DES DIFFÉRENTES GRANDEURS RADIOMÉTRIQUES

Grandeurs radiométriques	
Eclairement énergétique efficace en W/m^2	$E_B = \sum_{300}^{700} E_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$
Luminance énergétique efficace d'une source en $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$	$L_B = \sum_{300}^{700} L_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$
Luminance énergétique efficace d'une surface parfaitement diffusante en $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$	$L_{B(\text{surface})} = \frac{1}{\pi} \sum_{300}^{700} E_\lambda \cdot \rho(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$

E_λ : Répartition spectrale en éclairement énergétique en W/m^2 .
 $B(\lambda)$: Pondération spectrale pour l'action photochimique de la lumière bleue sur la rétine (sans unité).
 $\Delta\lambda$: Largeur de bande en nm.
 $\rho(\lambda)$: Facteur de réflexion spectral d'une surface (sans unité).

Diodes électroluminescentes :
risques pour les travailleurs
exposés à la lumière bleue ?

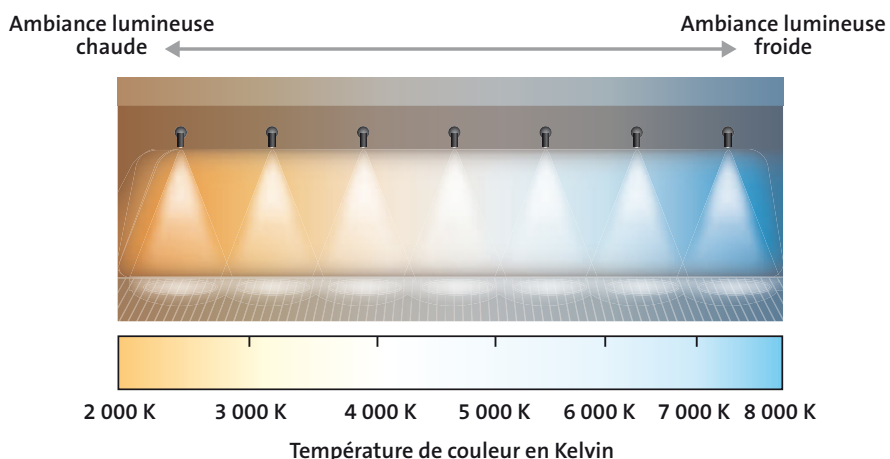
Au niveau d'un poste de travail, il est également nécessaire de prendre en compte la lumière réfléchiée par le plan de travail et les surfaces environnantes. Ainsi, **la luminance d'une surface supposée mate** dépend d'une part de l'éclairage qu'elle reçoit et, d'autre part, de son facteur de réflexion spectral $\rho(\lambda)$ qui agira sur la quantité de lumière renvoyée vers l'œil et sur la couleur perçue.

LA TEMPÉRATURE DE COULEUR

La température de couleur, exprimée en Kelvin (K), indique la température du corps noir dont l'apparence visuelle se rapproche le plus de la source de lumière considérée. Plus la température de couleur est élevée, plus la proportion de rayonnement bleu présent dans la lumière émise est importante et plus l'ambiance lumineuse est froide. Inversement, une source lumineuse de température de couleur plus faible émet un rayonnement riche en composante rouge et rend une ambiance lumineuse chaude (figure 2). Pour l'éclairage des locaux les températures de couleur de la lumière émise varient globalement de 2 700 à 6 500 K.

La lumière fournie par les premières LED commercialisées était froide et avait donc un aspect bleuté. Aujourd'hui, les LED blanches présentes dans les luminaires d'éclairage couvrent la même gamme de température de couleur que celle des tubes fluorescents, c'est-à-dire : 2 700-3 000 K (blanc chaud), 4 000 K (blanc « neutre ») et 6 000 - 6 500 K (blanc froid). Le choix de la température de couleur s'effectue selon la complexité de la tâche à accomplir et donc du niveau d'éclairage requis [14]. Des lampes du commerce permettent également de moduler la température de couleur grâce à l'assemblage de différentes LED.

Figure 2 : Illustration de l'effet de la température de couleur des sources sur l'environnement lumineux.



ÉVALUATION DU RISQUE PHOTOCHIMIQUE POUR LA RÉTINE

LA NORME FRANÇAISE NF EN 62471 ET LES VALEURS LIMITES D'EXPOSITIONS (VLE) RÉGLEMENTAIRES

La conception des lampes et des luminaires répond à des exigences basées sur la norme de « Sécurité photobiologique des lampes et des appareils utilisant des lampes » NF EN 62471 [15] et sur le rapport technique de la Commission électrotechnique internationale 62778 relatif à l'évaluation du risque lumière bleue [16]. La norme NF EN 62471 définit 4 groupes de risque (GR) avec des limites de durée et de luminance énergétique efficace pour la lumière bleue (tableau II). Les exigences de marquage des

lampes dépendent du groupe de risque :

- risque nul (GR0) ou faible (GR1) : aucun marquage n'est requis ;
- risque modéré (GR2) : pour les systèmes fixes, une distance de sécurité (celle qui permet de ramener le luminaire en GR1) doit être déterminée et l'installation de l'appareil (précisée sur la notice de montage) ne doit pas permettre l'observation prolongée à une distance inférieure à la distance de sécurité. Pour les systèmes portatifs, la consigne de ne pas regarder fixement la source doit être visible sur l'enveloppe du produit ;
- risque élevé (GR3) : à ce jour, aucun dispositif d'éclairage à LED disponible sur le marché n'entre dans cette catégorie.

La VLE pour le risque dû à la lumière bleue est basée sur la luminance énergétique efficace (tableau III)

↓ Tableau II

➤ DÉFINITION DES GROUPES DE RISQUE (GR) POUR LE RISQUE DÛ À LA LUMIÈRE BLEUE DE GR 0 (RISQUE NUL OU FAIBLE) À GR 3 (RISQUE ÉLEVÉ) [15]

Groupes de risque	GR 0	GR 1	GR 2	GR 3
Durée d'exposition (s)	10 000	100	0,25	0,25
Luminance énergétique efficace L_B ($W/m^2/sr$) moyennée sur la surface visée	< 100	< 10^4	< 4.10^6	> 4.10^6

↓ **Tableau III**

➤ **VALEUR LIMITE D'EXPOSITION RÉGLEMENTAIRE POUR LE RISQUE DÛ À LA LUMIÈRE BLEUE**

Valeur limite d'exposition (VLE) de la luminance énergétique efficace L_B	
en $W/m^2/sr$	
Durée d'exposition $t \leq 10\ 000$ s	Durée d'exposition $t > 10\ 000$ s
$\frac{10^6}{t}$	100

car la grandeur pertinente pour évaluer le risque rétinien est l'éclairement atteignant la rétine, grandeur qui n'est pas mesurable. Le lien de proportionnalité entre la luminance de la source ou de l'objet observé et l'éclairement rétinien est donc utilisé.

COMPARAISON DE DIFFÉRENTES SOURCES LUMINEUSES ARTIFICIELLES EN VISION DIRECTE

Quelques études récentes [17, 18] ont comparé des sources lumineuses en termes de risque dû à la lumière bleue. Il s'agit de sources évaluées en vision directe. L'étude réalisée par l'Institut fédéral allemand pour la sécurité et la santé au travail [17] a consisté à déterminer la luminance énergétique efficace à une distance de 20 cm dans les conditions d'expérimentation spécifiées par la norme NF EN 62471, à en déduire les GR correspondants et à calculer les durées maximales d'exposition (figure 3). Selon cette étude, le GR2 contient uniquement la LED nue et la durée maximale d'exposition est de 23 secondes. Les travailleurs susceptibles d'être exposés à la vision directe de ce type de LED sont principalement employés dans l'industrie de production de ces LED. Il est évident qu'à ces postes de travail, des dispositifs de protection doivent être mis en place pour protéger les salariés [19]. Pour tous les dispositifs d'éclairage laissant apparaître nettement la source, que ce soit la LED (lampe LED à réflecteur) ou le filament incandescent (ampoule claire incandescence 60 W, halogène 77 W ou halogène à réflecteur dichroïque 50 W), les valeurs de la luminance énergétique efficace sont du même ordre de grandeur, les classant en GR1 avec une durée maximale

d'exposition de 9 à 14 minutes. En revanche, les ampoules à LED opales et les lampes fluorescentes compactes ne présentent aucun risque photobiologique dû à la lumière bleue. Par ailleurs, les valeurs de luminance énergétique efficace relevées sur un écran d'ordinateur et un smartphone sont très faibles en comparaison des autres sources : ces appareils ne présentent également aucun risque photobiologique.

COMPARAISON DE DIFFÉRENTES SOURCES LUMINEUSES EN SITUATION DE TRAVAIL

ÉCLAIRAGE GÉNÉRAL

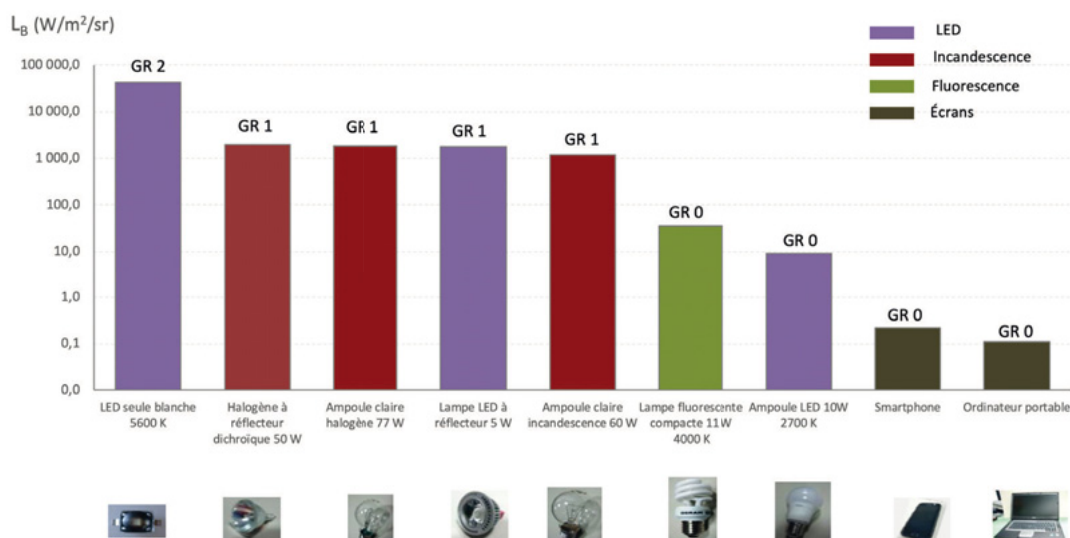
Une installation d'éclairage répondant aux normes de conception [20] ou d'ergonomie [21] du poste de travail ne permet pas une vision directe de la source afin de limiter les risques d'éblouissement. L'utilisation de luminaires spécifique-

ment dédiés à la source considérée (notamment dans le cas des LED), de dispositifs basse luminance, de diffuseurs, ou encore le fait de disposer les luminaires hors du champ visuel sont des solutions souvent préconisées pour répondre aux exigences de ces normes. Par ailleurs, l'exposition directe à une source émettant une lumière vive conduit à une réaction naturelle d'aversion du regard, ce qui réduit notablement le risque d'exposition rétinienne. Ainsi, un travailleur est le plus souvent exposé indirectement à la lumière réfléchi par le plan de travail et les parois environnant son poste. Les seules sources lumineuses en vision directe sont les écrans et le ciel vu au travers des baies vitrées.

L'INRS a simulé l'éclairage d'un bureau avec différentes sources d'éclairage artificiel : incandescent, fluorescent, LED de teintes froides et chaudes ainsi que par l'éclairage naturel. Cette simulation a été réalisée de manière à obtenir un éclairement (lumineux) de 500 lux sur le plan de travail (figure 4). En effet, la

Figure 3 : Évaluation du risque lumière bleue pour différentes sources lumineuses [17]

L_B : luminance énergétique efficace (en $W/m^2/sr$)
 LED : diode électroluminescente
 GR : groupes de risque de 0 (nul ou faible) à 3 (élevé)



Diodes électroluminescentes : risques pour les travailleurs exposés à la lumière bleue ?

comparaison de différentes sources d'éclairage n'a de sens qu'à température de couleur égale et à conditions d'expositions identiques.

La répartition spectrale de l'éclairage E_λ correspondant à un éclairement (lumineux) de 500 lux a été calculée pour chacune des sources (figure 5). Les LED sont souvent soupçonnées d'émettre une lumière riche en bleu du fait d'un spectre présentant un pic aux environs de 440 nm, correspondant à l'action photochimique maximale de la lumière (figure 1). Or, un pic à lui seul n'a pas de signification : seule la quantité réelle de rayonnement émis sur le domaine bleu du spectre permet de quantifier le risque. La représentation des spectres (figure 5) correspondant à un éclairement (lumineux) de 500 lux permet de relativiser quant à l'émission du pic

bleu des LED lorsqu'il est comparé au spectre d'émission des autres sources de lumière artificielles et naturelle.

La seule grandeur pertinente pour évaluer le risque rétinien est la luminance énergétique efficace des sources ou objets présents dans l'environnement du poste de travail. Elle a été calculée pour les conditions d'exposition décrites ci-dessus (figure 4). **À température de couleur égale et à éclairement (lumineux) identique, les sources d'éclairage à LED n'émettent pas plus (voire moins) de lumière bleue que les autres sources d'éclairage artificiel** (figure 6). Les luminances énergétiques efficaces de la surface observée varient de 0,04 à 0,06 W/m²/sr pour les sources artificielles chaudes et de 0,12 à 0,15 pour les sources artificielles froides. Par comparaison, elle

est 1,5 à 2 fois plus élevée sous éclairage naturel qu'avec une source artificielle froide à LED ou fluorescente. La luminance (lumineuse) d'un ciel bleu est estimée à 4 000 cd/m², ce qui correspond à une luminance énergétique efficace de 6 W/m²/sr (figure 6). Cette valeur est 50 fois plus élevée que celle d'une surface éclairée par une LED de température de couleur équivalente.

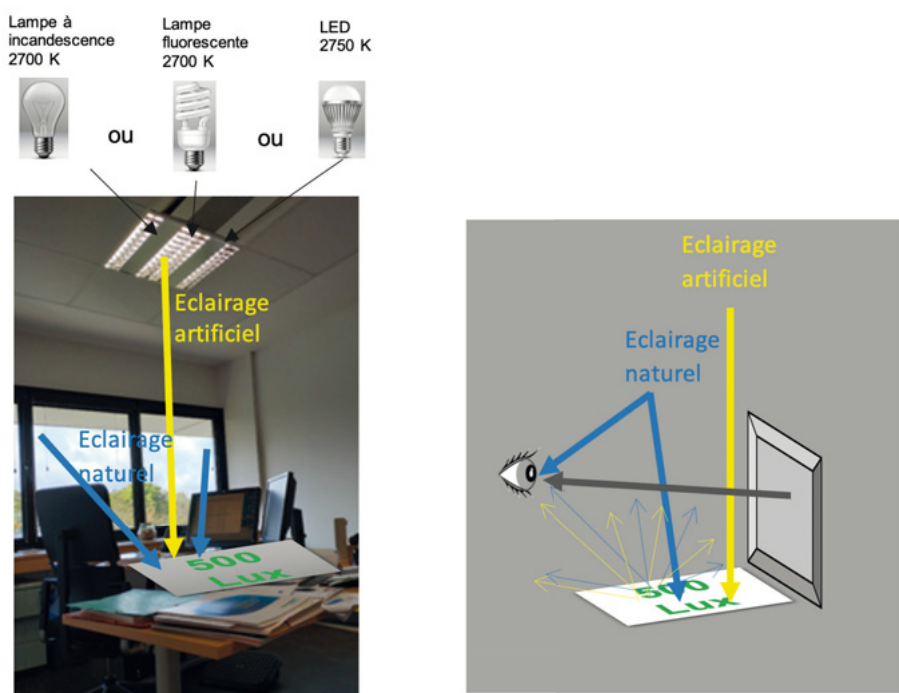
Pour ce qui concerne l'évaluation des risques vis-à-vis des limites réglementaires, il apparaît que les différentes valeurs de luminance énergétique efficace enregistrées dans le champ visuel du travailleur sont très loin d'atteindre la VLE de 100 W/m²/sr, correspondant à une durée d'exposition continue supérieure à 10 000 s, même pour le ciel lorsqu'il est en vision directe.

ÉCRANS

La luminance énergétique efficace relevée sur un écran d'ordinateur est égale à 0,11 W/m²/sr. Elle est moitié moindre de celle d'une surface blanche (0,22 W/m²/sr) éclairée sous 500 lux en éclairage naturel (figure 6). Par ailleurs, la luminance énergétique efficace d'un ciel bleu vu au travers des baies vitrées, estimée à 6 W/m²/sr, est 50 fois plus élevée que celle relevée sur l'écran d'ordinateur.

En revanche, le travail sur écran peut engendrer des troubles visuels qui ne sont pas spécifiquement liés à la quantité de lumière bleue émise par ces écrans. En effet, travailler devant un écran pendant plusieurs heures d'affilée peut entraîner une fatigue visuelle pouvant se traduire par diverses manifestations, notamment : des sensations de lourdeur des globes oculaires, des rougeurs, des picotements, des éblouissements, une myopie temporaire, les yeux secs, des maux de tête. Les facteurs de

Figure 4 : Simulation de l'éclairage d'un bureau.



Le travailleur à son bureau est exposé :

- aux rayonnements directs du ciel et de l'écran d'ordinateur ;
- aux rayonnements naturel et artificiel réfléchis par une surface blanche parfaitement diffusante.

Figure 5 : Répartition spectrale en éclairage énergétique E_λ de différentes sources d'éclairage à deux températures de couleur pour produire un éclairage (lumineux) de 500 lux

λ : longueur d'onde (en nm)

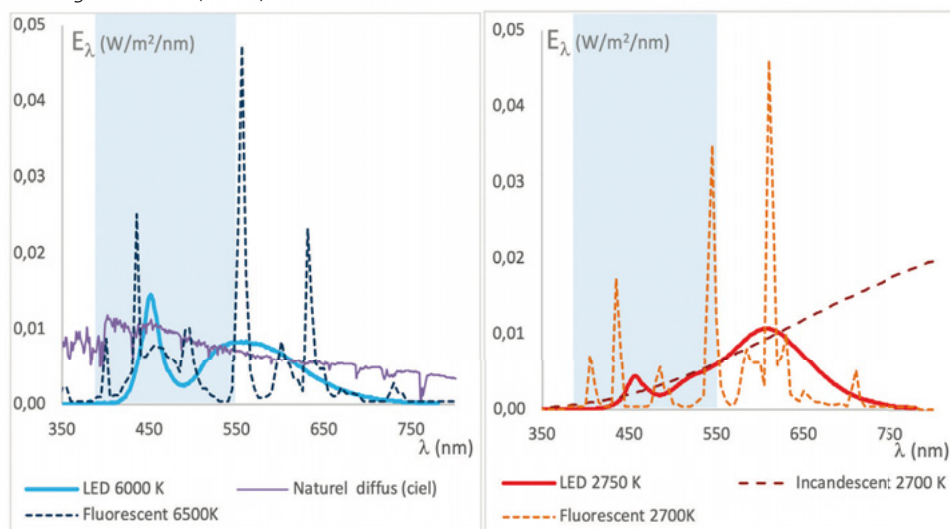
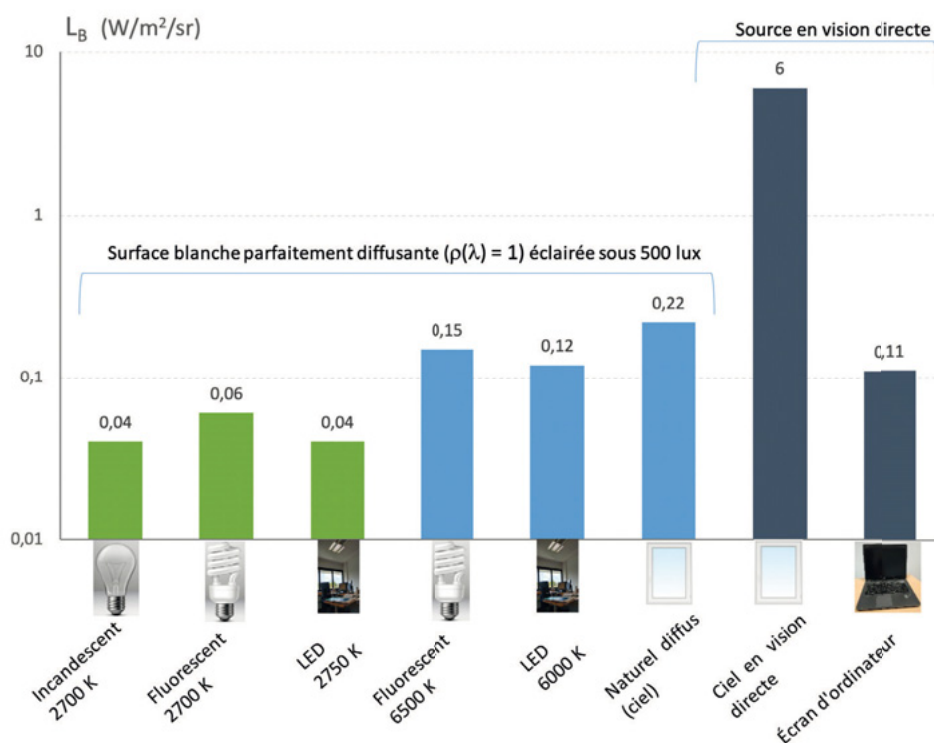


Figure 6. Luminances énergétiques efficaces L_B des sources ou surfaces présentes dans le champ visuel d'un travailleur (bureau) à son poste de travail éclairé par différents dispositifs d'éclairage [17]

$\rho(\lambda)$: facteur de réflexion spectral



risque de la fatigue visuelle sont individuels (défaut visuel non corrigé par exemple), ou liés à la conception du poste de travail (comme la présence de reflets sur l'écran), ou encore organisationnels (durée excessive du travail sur écran sans pauses visuelles par exemple) [22].

ÉVALUATION DES EFFETS DE LA LUMIÈRE BLEUE SUR LES CYCLES CIRCAIDIENS, LE SOMMEIL ET LA VIGILANCE

Plusieurs études expérimentales et observationnelles ont mis en évidence l'influence de la lumière,

en particulier de la lumière bleue, sur le sommeil, la vigilance et la régulation du rythme circadien. Ces phénomènes sont soupçonnés de pouvoir être à l'origine de dysfonctionnements des fonctions physiologiques et d'avoir des impacts sur la santé, et ce même lorsque l'exposition est de faible intensité. Des effets positifs sont également mis en évidence, en particulier sur les fonctions cognitives, et la lumière est alors utilisée comme une thérapeutique.

Une revue de la littérature publiée en 2019 a choisi 15 articles portant sur les impacts de l'exposition à la lumière sur les rythmes circadiens, via la mesure des taux de mélatonine sécrétée et des mouvements oculaires pendant le sommeil. L'analyse de ces publications a mis en évidence que le moyen le plus efficace pour stopper la sécrétion de mélatonine était une exposition en soirée à une lumière bleue de longueur d'onde égale à 460 nm (voire à une lumière violette de 424 nm) et que la sécrétion de mélatonine reprenait rapidement après 15 minutes seulement de cessation de l'exposition à la lumière. De plus, des données montrent que l'exposition à la lumière pendant la nuit, de façon intermittente, à des faibles intensités lumineuses (5-10 lux) pouvait avoir une influence sur le rythme circadien [23].

D'autres travaux ont été menés, en 2011, par une équipe germano-canadienne, sur l'influence d'une exposition à une lumière bleue froide (800 K) et à une lumière naturelle orangée chaude (4 000 K). Il a été observé que le rythme biologique des sujets exposés à la lumière chaude suivait le rythme de la lumière naturelle, avec un réveil provoqué par l'aube alors que les sujets exposés à la lumière bleue s'étaient réglés sur le rythme im-

Diodes électroluminescentes : risques pour les travailleurs exposés à la lumière bleue ?

posé par cette lumière artificielle éclairant leur bureau, et donc sur leurs horaires de travail. Les auteurs concluent que la lumière « riche en bleu » agit comme un « *Zeitgeber* » ou donneur de temps, que cet effet dépend du spectre lumineux et qu'il est plus important quand le spectre est dans les bleus [24].

D'autres équipes de recherche ont mené des travaux sur l'influence de la lumière bleue émise par des smartphones sur le sommeil et la vigilance. Ainsi, 22 personnes ont été exposées soit à des smartphones équipés de lumière bleue (LED), soit à des smartphones dans lesquels la lumière bleue était supprimée. Pour cela, elles devaient jouer à des jeux entre 19h30 et 22 heures. Les taux de mélatonine étaient mesurés toutes les heures avant, durant et après l'utilisation des smartphones. Les mesures des taux de cortisol et de la température étaient réalisées toutes les 2 heures pendant cette même période. Les sujets ont également répondu à des tests pour évaluer leurs capacités cognitives et leur vigilance (*Profile of Mood States* POMS – évaluation de l'humeur, *Epworth Sleepiness Scale* ESS – échelle de somnolence d'Epworth, *Fatigue Severity Scale* FSS – échelle de sévérité de la fatigue, *Auditory and visual Continuous Performance tests* CPTs – tests de performance auditive et visuelle). Les résultats de cette étude ont mis en évidence que dans le groupe qui utilisait un smartphone diffusant une lumière bleue, la somnolence était diminuée, les performances cognitives meilleures mais il y avait un retard d'endormissement et des erreurs dans l'application des consignes [25].

Dans un autre laboratoire, une équipe américaine a étudié le temps d'endormissement, la sécrétion de mélatonine, le décalage de phase du sommeil et la vigilance

matinale dans un échantillon de 12 jeunes adultes en bonne santé qui utilisaient soit un livre électronique équipé de LED, soit un livre « classique » en papier. Cette exposition avait lieu durant les quatre heures précédant leur coucher, cinq nuits de suite. Les participants qui lisaient le livre électronique, et donc exposés à la lumière bleue, mettaient plus de temps à s'endormir et rapportaient moins de somnolence nocturne. Leur sécrétion de mélatonine était diminuée, ils avaient un retard de phase dans le fonctionnement de leur horloge circadienne et ils étaient moins alertes au réveil. Ce travail montre encore que l'exposition à la lumière bleue le soir a un effet sur le sommeil et la vigilance et joue un rôle dans la régulation de l'horloge circadienne [26].

Cette influence de la lumière sur la régulation circadienne du sommeil, mais aussi sur les capacités cognitives, a amené à utiliser la lumière comme traitement. Ainsi, la photothérapie utilise de la lumière bleue artificielle de haute intensité selon des critères et des protocoles précis définis par les caractéristiques de l'exposition lumineuse et les effets engendrés sur l'horloge biologique. La photothérapie est utilisée dans le traitement de certains troubles du sommeil tels que les syndromes de retard et d'avance de phase ou pour la prévention des troubles du sommeil liés au travail posté et de nuit et ceux liés au *jet-lag* (décalage horaire). Les recommandations de la Société française de recherche sur le sommeil concernant l'utilisation de la photothérapie pour prévenir les troubles provoqués par le travail de nuit et posté sont de prévoir une exposition à la lumière en début de nuit, et une luminosité réduite en seconde partie de nuit ; de conseiller une obscurité pendant la période de sommeil diurne et l'utilisation de lunettes de soleil bloquant la lumière

bleue en fin de nuit pour en limiter l'exposition avant le coucher [13].

Par ailleurs, des expérimentations sont conduites pour utiliser les effets positifs de l'exposition aux LED sur la vigilance, sur la baisse de la somnolence des travailleurs de nuit et donc prévenir les risques d'erreurs et d'accidents du travail. C'est par exemple ce qui a été montré dans une étude faite chez les opérateurs de nuit d'une salle de contrôle dans une industrie pétrochimique et qui a mis en évidence une baisse de la somnolence, de la sécrétion de mélatonine, ainsi qu'une diminution des erreurs de mémorisation ou d'oubli, sans altération du temps de réaction, chez les opérateurs exposés à une lumière blanche enrichie en bleu (par rapport à ceux non exposés à ce type de lumière) [27]. Cependant, des travaux de recherche restent encore à faire pour préciser ces résultats. En effet, à titre d'exemple, un autre travail du même type n'a pas montré de différence évidente sur l'attention et la performance entre deux groupes de travailleurs (l'un exposé à la lumière enrichie en bleu, et l'autre pas). Seule une amélioration de la sensation objective de somnolence a été mise en évidence [28].

DISCUSSION ET CONCLUSION

Les données présentées dans cet article montrent qu'à température de couleur égale et à conditions d'exposition égales, les LED n'émettent pas plus (voire moins) de lumière bleue que les autres dispositifs d'éclairage artificiel. Elles mettent également en évidence que l'éclairage naturel est plus riche en lumière bleue que toutes les sources de lumière artificielles. Ces résultats sont d'ailleurs en concordance avec l'étude de

terrain [29] réalisée à l'aide d'exposimètres.

Certaines études tendent à remettre en cause la validité des VLE réglementaires vis-à-vis de l'exposition à lumière bleue émise par les LED. À ce jour, ces études ont été réalisées sur des rats, qui sont des animaux nocturnes, non pourvus de macula, et dont les caractéristiques optiques [30] sont très éloignées de celles de l'humain. Les résultats disponibles aujourd'hui ne permettent donc pas de remettre en cause les VLE.

De plus, en tout état de cause, une révision des VLE, si elle s'avérait nécessaire, n'affecterait pas spécifiquement les LED mais, comme le montrent les résultats, tous les types d'éclairage artificiel et surtout l'éclairage naturel qui émet 2 à 5 fois plus de rayonnement bleu qu'une LED.

En ce qui concerne les effets sur la santé, en dehors de la phototoxicité, la lumière a un effet direct sur la régulation de l'horloge biologique puisqu'elle est son principal synchroniseur. Elle a donc un effet direct sur la régulation de nombreuses fonctions physiologiques et peut avoir un impact sur la santé.

Certains effets concernant la régulation du sommeil et des fonctions cognitives semblent être affectés plus particulièrement par l'exposition à la lumière bleue. Ces caractéristiques sont utilisées à visée thérapeutique dans certains troubles du sommeil entre autres, et des applications pour la prévention des troubles de la vigilance chez les travailleurs de nuit sont de plus en plus étudiées et développées.

POINTS À RETENIR

- L'utilisation des diodes électroluminescentes (LED) pour l'éclairage s'est généralisée.
- Comme toutes les sources d'éclairage artificiel ou naturel, les LED émettent de la lumière bleue.
- La lumière bleue présente un risque de lésion de la rétine qui est fonction de la luminance énergétique de la source et de la durée d'exposition.
- Les LED utilisées pour l'éclairage en milieu professionnel en conditions normales ne présentent pas de risque lésionnel pour les travailleurs (en dehors de ceux qui les produisent).
- La comparaison de différentes sources d'éclairage n'a de sens qu'à température de couleur égale et à conditions d'exposition identiques.
- Des mesures de prévention spécifiques doivent être mises en œuvre dans l'industrie de la fabrication des LED.
- L'exposition à la lumière a des effets sur l'horloge biologique, notamment sur le cycle veille-sommeil, la vigilance et les capacités cognitives, surtout quand le spectre lumineux est dans les bleus.
- Ces effets physiologiques de la lumière bleue conduisent à des recommandations de prévention chez les travailleurs de nuit : augmenter ou diminuer l'exposition pour favoriser la vigilance la nuit et l'endormissement après le poste.
- Ces effets doivent encore être explorés pour améliorer les connaissances et proposer des mesures de prévention mieux adaptées.

BIBLIOGRAPHIE

1 | JAADANE I, BOULENGUEZ P, CHAHORY S, CARRÉ S ET AL. - Retinal damage induced by commercial light emitting diodes (LEDs). *Free Radic Biol Med.* 2015 ; 84 : 373-84.

2 | JAADANE I, VILLALPANDO RODRIGUEZ GE, BOULENGUEZ P, CHAHORY S ET AL. - Effects of white light-emitting diode (LED) exposure on retinal pigment epithelium in vivo. *J Cell Mol Med.* 2017 ; 21 (12) : 3453-66.

3 | SHANG YM, WANG GS, SLINNEY D, YANG CH ET AL. - White light-emitting diodes (LEDs) at domestic lighting levels and retinal injury in a rat model. *Environ Health Perspect.* 2014 ; 122 (3) : 269-76.

4 | KRIGEL A, BERDUGO M,

PICARD E, LEVY-BOUKRIS R ET AL. - Light-induced retinal damage using different light sources, protocols and rat strains reveals LED phototoxicity. *Neuroscience.* 2016 ; 339 : 296-307.

5 | Effets sur la santé humaine et sur l'environnement (faune et flore) des diodes électroluminescentes (LED). Avis de l'ANSES. Rapport d'expertise collective. ANSES, 2019 (<https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2014SA0253Ra.pdf>).

6 | Final Opinion on Light Emitting Diodes (LEDs). Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks (SCHEER). European Commission, 2018 (ec.europa.eu/health/scientific_

[committees/consultations/public_consultations/scheer_consultation_05_en](#)).

7 | Prise de position de la CIE sur les dangers de la lumière bleue. Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), 2019 (<http://cie.co.at/publications/position-statement-blue-light-hazard-april-23-2019>).

8 | Light-Emitting Diodes (LEDs): Implications for Safety. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). *Health Phys.* 2020 ; 118 (5) : 549-61.

9 | ICNIRP Guidelines on Limits of Exposure to Incoherent Visible and Infrared Radiation. *Health Phys.* 2013 ; 105 (1) : 74-96.

10 | LEGER D, METLAINE A, GRONFIER C - Physiologie de

l'horloge biologique. *Presse Méd.* 2018 ; 47 (11-12 Pt 1) : 964-68.

11 | Évaluation des risques sanitaires liés au travail de nuit. Avis de l'ANSES. Rapport d'expertise collective. ANSES, 2016 (<https://www.anses.fr/fr/content/1%e2%80%99anses-confirme-les-risques-pour-la-sant%c3%a9-li%c3%a9s-au-travail-de-nuit>).

12 | GRONFIER C - Le rôle et les effets physiologiques de la lumière : sommeil et horloge biologique dans le travail de nuit et posté. *Arch Mal Prof Environ.* 2009 ; 70 (3) : 253-61.

13 | LEGER D, DUFORÉZ F, GRONFIER C - Le traitement par la lumière des troubles circadiens du rythme veille-sommeil. *Presse Méd.* 2018 ;

Diodes électroluminescentes : risques pour les travailleurs exposés à la lumière bleue ?

BIBLIOGRAPHIE (suite)

47 (11-12 Pt 1) : 1003-09.

14 | DENIEL JM - Éclairage artificiel au poste de travail. 4^e édition. Fiche pratique de Sécurité ED 85. Paris : INRS ; 2019 : 4 p.

15 | Sécurité photobiologique des lampes et des appareils utilisant des lampes. Norme française homologuée NF EN 62471. Décembre 2008. La Plaine Saint-Denis : AFNOR ; 2008 : 46 p.

16 | Application of IEC 62471 for the assessment of blue light hazard to light sources and luminaires. Technical report IEC TR 62778:2014. Juin 2014. Genève : International Electrotechnical Commission (IEC) ; 2014 ; 37 p.

17 | UDOVICIC L, JANSSEN M - Photobiological safety of common office light sources. P0110. In: Proceedings of the 29th CIE Session. Washington D.C., USA, June 14-22, 2019. International Commission on Illumination (CIE), 2019 (<http://cie.co.at/publications/cie-session-washington-2019>).

18 | BULLOUGH JD, BIERMAN A, REA MS - Evaluating the blue-light hazard from solid state lighting. *Int J Occup Saf Ergon*. 2019 ; 25 (2) : 311-20.

19 | RUILIARD C, BRISSINGER D - Fabrication d'éclairage LED pour le domaine médical : évaluation des protections optiques. Étude de cas EC 25. *Hyg Sécur Trav*. 2019 ; 255 : 82-87.

20 | Lumière et éclairage. Éclairage des lieux de travail. Partie 1 : lieux de travail intérieurs. Norme française homologuée NF EN 12464-1. Juillet 2011. La Plaine Saint-Denis : AFNOR ; 2011 : 63 p.

21 | Ergonomie. Principes d'ergonomie applicables à l'éclairage des lieux de travail. Norme française homologuée NF X 35-103. Juin 2013. La Plaine Saint-Denis : AFNOR ; 2013 : 44 p.

22 | CAIL F - Écrans de visualisation. Santé et ergonomie. 2^e édition. Édition INRS ED 924. Paris : INRS ; 2017 : 86 p.

23 | TAHKÄMÖ L, PARTONEN T, PESONEN AK - Systematic review

of light exposure impact on human circadian rhythm. *Chronobiol Int*. 2019 ; 36 (2) : 151-70.

24 | VETTER C, JUDA M, LANG D, WOJTYSIK A ET AL. - Blue-enriched office light competes with natural light as a zeitgeber. *Scand J Work Environ Health*. 2011 ; 37 (5) : 437-45.

25 | HEO JY, KIM K, FAVA M, MISCHOULON D ET AL. - Effects of smartphone use with and without blue light at night in healthy adults: A randomized, double-blind, cross-over, placebo-controlled comparison. *J Psychiatr Res*. 2017 ; 87 : 61-70.

26 | CHANG AM, AESCHBACH D, DUFFY JF, CZEISLER CA - Evening use of light-emitting eReaders negatively affects sleep, circadian timing, and next-morning alertness. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2015 ; 112 (4) : 1232-37.

27 | MOTAMEDZADEH M, GOLMOHAMMADI R, KAZEMI R, HEIDARIMOGHADAM R - The effect of blue-enriched white light

on cognitive performances and sleepiness of night-shift workers: A field study. *Physiol Behav*. 2017 ; 177 : 208-14.

28 | SLETTEN TL, FTOUNI S, NICHOLAS CL, MAGEE M ET AL. - Randomised controlled trial of the efficacy of a blue-enriched light intervention to improve alertness and performance in night shift workers. *Occup Environ Med*. 2017 ; 74 (11) : 792-801.

29 | UDOVICIC L, PRICE LLA, KHAZOVA M - Light and blue-light exposures of day workers in summer and winter. OP19. In: Proceedings of the 29th CIE Session. Washington D.C., USA, June 14-22, 2019. International Commission on Illumination (CIE), 2019 (<http://cie.co.at/publications/cie-session-washington-2019>).

30 | POINT S, BEROUD M - Blue light hazard: does rat retina make relevant model for discussing exposure limit values applicable to humans? *Radioprotection*. 2019 ; 54 (2) : 141-47.