

EXPERTISE COLLECTIVE : SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

Relatives à la saisine « Effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (LED) »

Ce document synthétise les travaux du comité d'experts spécialisés et du groupe de travail

Présentation de la question posée

La Directive européenne pour l'éco-conception (2005/32/CE) dite « EuP » (*Energy using Products*) prévoit l'amélioration des performances énergétiques de certains produits de consommation courante. Cette directive a été transposée en 2007 par les États membres de l'Union européenne et son entrée en vigueur a été planifiée entre 2008 et 2010.

En application de la Directive EuP, la Commission européenne, par décision du 18 mars 2009, a prévu une interdiction progressive de la commercialisation des lampes les plus consommatrices d'énergie, suivant un calendrier s'étalant du 1^{er} septembre 2009 au 1^{er} septembre 2016. Les ampoules fluo-compactes, dites « basse consommation », ou d'autres sources d'éclairage comme les diodes électroluminescentes (LED)¹ plus économes en énergie, ont pour vocation, à terme, à les remplacer.

Les diodes électroluminescentes sont des sources d'éclairage en plein développement technologique et économique. Utilisées depuis de nombreuses années dans l'électronique comme sources de lumières faibles et monochromatiques pour des applications de témoins lumineux, elles trouvent aujourd'hui leur place dans des systèmes d'éclairage à part entière : feux de signalisation, éclairage portatif, feux de véhicules et éclairages domestiques d'ambiance, par exemple.

La première LED à spectre visible a été créée en 1962, émettant une intensité lumineuse extrêmement faible. La diode bleue a été inventée en 1990, suivie par la mise au point de la diode blanche, qui a permis de nouvelles applications majeures, notamment dans le domaine de l'éclairage et des écrans de télévisions et d'ordinateurs. Les premières LED blanches sont peu à peu apparues sur le marché et sont maintenant de plus en plus puissantes² (de l'ordre de plusieurs Watts). Pour produire de la lumière blanche, le procédé le plus répandu couple une LED bleue à un phosphore jaune.

La société OSYRIS³ s'est inquiétée, dans un courrier à destination de l'Institut de veille sanitaire (InVS) datant du 27 décembre 2007, des possibles impacts des LED sur la rétine. Dans ce courrier était souligné le lien possible entre l'exposition de l'œil à des rayonnements de longueurs d'ondes courtes, proches des ultraviolets (caractéristiques des spectres lumineux des LED) et le risque d'induire une pathologie oculaire : la dégénérescence maculaire liée à l'âge.

¹ Nous utiliserons le terme « LED » pour désigner les diodes électroluminescentes, plutôt que l'acronyme français DEL, beaucoup moins usité.

² Source ADEME : « Les LED de faible puissance c'est-à-dire inférieure à 1 Watt sont utilisées comme voyant lumineux sur les appareils électroménagers par exemple. Les LED de forte puissance c'est-à-dire supérieure à 1 Watt supportent des courants plus importants (jusqu'à 1 500 mA) et fournissent d'avantages de lumière (135 lm / W) »

³ Société française spécialisée autour des lasers et leurs applications dans les domaines médical et industriel.

L'InVS a transféré la lettre de la société OSYRIS à l'Afsset dans un courrier daté du 14 janvier 2008.

Parallèlement, la question de l'impact des LED sur la santé au travail a été soulevée lors de discussions informelles entre l'Afsset et la Direction générale du travail (DGT), celle-ci étant alertée par les projets récents d'éclairage intérieur de bâtiments au moyen de LED. Il est en effet probable que le développement de ce type de solutions d'éclairage s'accélère, notamment pour des raisons de coût économique.

Contexte scientifique et normatif

L'éclairage représente en France 10 % de la consommation électrique totale, soit 350 kW / h par an et par ménage⁴. Les LED sont des systèmes d'éclairage beaucoup moins consommateurs d'énergie que d'autres types d'éclairage et ont des durées de vie beaucoup plus longues.

Les lampes à incandescence ont une efficacité lumineuse de l'ordre de 10 à 15 lumens⁵ par Watt (lm / W), les lampes halogènes de l'ordre de 15 à 30 lm / W, les lampes fluorescentes compactes de l'ordre de 50 à 100 lm / W. Actuellement, certaines LED atteignent des rendements allant jusqu'à 100 à 150 lm / W, avec des prévisions pour 2020 de l'ordre de 200 lm / W⁶.

La définition de la durée de vie d'une LED n'est pas à ce jour normalisée. Les LED ont actuellement des durées de vie importantes (estimées jusqu'à 50 000 h⁷, soit cinquante fois celles des lampes à incandescence, et 3 à 5 fois celles des lampes fluorescentes compactes).

La technologie des LED, qui présente certains avantages par rapport aux autres types d'éclairage (efficacité énergétique, durée de vie), est en pleine évolution mais la qualité de la lumière (température de couleur⁸, indice de rendu de couleur⁹) émise par ces lampes ne présente pas toujours le même niveau de performances que les autres sources d'éclairage. À l'heure actuelle, l'impact environnemental des LED est nettement moins bon que les autres types d'éclairage.

Des composantes intenses dans la partie bleue du spectre de la lumière émise par les LED, ainsi que des intensités de rayonnement très importantes émises par ces sources quasiment ponctuelles font craindre de nouveaux risques sanitaires liés à ces sources d'éclairage.

Quelques travaux scientifiques [Dawson *et al.*, 2001¹⁰, Ueda *et al.*, 2009¹¹] s'appuyant sur des expériences réalisées sur des singes en laboratoire avec des LED bleues laissent en effet suspecter un danger pour la rétine lié à l'exposition à des diodes électroluminescentes.

Pour sa part, Altkorn [Altkorn *et al.*, 2005] s'est intéressé à l'impact sanitaire des LED en décrivant le débat qui existait sur le positionnement des LED dans le contexte normatif : doivent-elles être classées, en termes de risque photobiologique, selon les normes relatives aux

⁴ Source ADEME 2010

⁵ Le lumen est l'unité utilisée pour quantifier le flux lumineux

⁶ La limite théorique de l'efficacité lumineuse des sources lumineuses est fixée à 683 lm/W.

⁷ Source ADEME 2010

⁸ La température de couleur d'une lumière blanche permet de définir sa teinte, plus ou moins chaude ou froide ; les lumières de teintes chaudes « tirent » sur le jaune-orangé et ont une température de couleur inférieure à 3 000 K. Plus la température de couleur augmente et plus la teinte est dite « froide ».

⁹ L'Indice de Rendu des Couleurs (IRC) est un indice compris entre 0 et 100 qui définit l'aptitude d'une source lumineuse à restituer les différentes couleurs des objets qu'elle éclaire, par rapport à une source de référence. La lumière solaire a un IRC de 100, tandis que certaines lampes à vapeur de sodium basse pression (utilisées dans les tunnels routiers par exemple) ont un IRC de 20. Dans les magasins, les locaux scolaires ou les bureaux, l'IRC devrait toujours être supérieur à 80.

¹⁰ Dawson, et al, *Local fundus response to blue (LED and laser) and infrared (LED and laser) sources*, Exp. Eye Res., 73(1):137-47 2001

¹¹ Ueda et al, *Eye damage control by reduced blue illumination*, Exp. Eye Res, 89(6):863-8. 2009

lasers ou selon les normes relatives aux sources incohérentes ? Jusqu'en 2008, en effet, les LED étaient traitées de la même manière que les sources laser. Depuis janvier 2008, la norme « lasers » NF EN 60825-1 recommande d'utiliser, pour les dispositifs à LED, la norme de sécurité photobiologique relative aux sources incohérentes CIE¹² S009:2002 «Photobiological safety of lamps and lamp systems » transcrite en norme française (NF EN 62471) en décembre 2008.

Organisation de l'expertise

Le sujet de l'impact sanitaire des LED a été discuté par le Comité d'experts spécialisés (CES) « agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » de l'Afsset le 23 septembre 2008. Le CES a jugé cette thématique suffisamment préoccupante et s'est déclaré prêt à traiter cette question sous la forme d'une auto-saisine.

Le Conseil scientifique de l'Afsset a donné un avis favorable, le 29 septembre 2008, à l'auto-saisine de l'Afsset sur la question des impacts sanitaires liés à l'usage des systèmes d'éclairage par diodes électroluminescentes. L'Afsset a confié la réalisation de cette expertise au CES « agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ». Sur avis du CES, l'agence a mandaté un groupe de travail pour instruire cette expertise. Ce groupe de travail a été constitué, à la suite d'un appel à candidatures public ouvert du 12 décembre 2008 au 12 mars 2009, d'experts en ophtalmologie, en dermatologie, en éclairage et en physique des rayonnements optiques.

Le groupe de travail coordonné par l'Afsset s'est réuni à 10 reprises en sessions plénières, du 13 mai 2009 au 26 mars 2010. Le groupe de travail a par ailleurs sollicité l'audition d'experts scientifiques nationaux, internationaux et de représentants de l'Association française de l'éclairage (AFE) afin d'obtenir toutes les informations pertinentes pour répondre à cette auto-saisine. Pour réaliser cette expertise, le groupe de travail s'est appuyé sur une large revue de la littérature scientifique internationale complétée par des auditions de personnalités scientifiques. Une contribution écrite portant sur le marché de l'éclairage français et européen et sur le recyclage des lampes a été sollicitée auprès de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie).

L'analyse bibliographique entreprise par le groupe de travail « LED » a été aussi exhaustive que possible. Les travaux scientifiques pris en compte dans le rapport sont issus de publications écrites dans des revues internationales anglophones à comité de lecture.

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été soumis régulièrement au CES, tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise » avec pour objectif de respecter les critères de compétence, d'indépendance et de transparence tout en assurant la traçabilité.

Résultat de l'expertise collective

L'expertise des membres du groupe de travail s'est articulée autour de différents axes :

- un état des lieux de l'éclairage ;
- une présentation de la technologie des LED ;
- une analyse de l'interaction de la lumière avec les systèmes biologiques (œil, peau) ;
- une synthèse de la normalisation applicable aujourd'hui aux LED ;
- une analyse des effets sanitaires potentiels des LED.

¹² CIE : Commission Internationale de l'Eclairage

L'originalité de ce travail réside notamment dans les calculs et mesures effectués par les membres du groupe de travail dans leurs laboratoires respectifs (CSTB¹³, INRS¹⁴, LNE¹⁵) pour classer en termes de groupe de risque quelques exemples de systèmes à LED selon la norme de sécurité photobiologique applicable aux LED (NF EN 62471).

Le CES « agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » a adopté les travaux d'expertise collective ainsi que ses conclusions et recommandations, objets du présent rapport, lors de sa séance du 03 juin 2010 et a fait part de cette adoption à la Direction générale de l'Afsset.

Conclusions de l'expertise collective

Le groupe de travail, à l'issue de son travail d'analyse de la littérature scientifique existante et des données recueillies lors d'auditions complémentaires, a identifié des effets sanitaires potentiels liés à l'usage des LED.

Caractéristiques des LED, pertinentes pour l'évaluation des risques

Le principe de fonctionnement des diodes électroluminescentes repose sur la polarisation d'un semi-conducteur par application d'une tension qui provoque l'émission de photons. Un rayonnement quasi-monochromatique est émis, dont la longueur d'onde dépend du semi-conducteur utilisé. Il n'existe pas de semi-conducteur permettant à lui seul d'émettre de la lumière blanche. Il existe néanmoins aujourd'hui trois méthodes différentes pour produire indirectement de la lumière blanche avec une LED. Etant données les limites technologiques et les impératifs de rendement énergétique, la méthode de production de lumière blanche la plus répandue aujourd'hui utilise la transformation d'une partie de la lumière d'une diode bleue par un luminophore jaune.

- **Déséquilibre spectral dans le bleu**

Le spectre des LED blanche présente une forte proportion de lumière bleue (pic bleu dans le spectre). Par ailleurs, le spectre d'émission des LED blanches est composé d'émissions très faibles entre le bleu et le jaune. Ces caractéristiques sont très particulières des LED, elles ne sont pas rencontrées pour les autres types d'éclairage conventionnels.

- **Fortes luminances¹⁶**

Les LED sont des sources de lumière ponctuelles que l'on peut agréger dans un luminaire pour atteindre des flux élevés. Du fait de leur caractère ponctuel, la surface émissive des LED possède une forte luminance, au moins 1 000 fois plus élevée (10^7 cd/m²) que celle d'une source d'éclairage traditionnelle.

- **Effet stroboscopique**

Les alimentations électriques des systèmes d'éclairage à LED peuvent, en fonction de leur architecture, fournir une puissance présentant des variations temporelles, ce qui se traduit par des fluctuations de l'intensité de la lumière produite, plus ou moins perceptibles par l'œil. Ces variations d'amplitudes ne sont pas encore caractérisées finement¹⁷. Les fréquences de ces

¹³ CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

¹⁴ INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles.

¹⁵ LNE : Laboratoire National de Métrologie et d'Essais.

¹⁶ La luminance (en cd/m²) quantifie la lumière émise par une source étendue, par unité de surface. Elle définit l'impression lumineuse perçue par un observateur qui regarde la source. Elle permet donc d'évaluer l'éblouissement.

¹⁷ La fréquence ainsi que le taux de modulation (rapport entre l'amplitude de la fluctuation et la valeur moyenne de la lumière) dépendent fortement du mode d'alimentation. Pour une alimentation en courant continu (redressée et filtrée), la fréquence de la fluctuation est de 100 Hz et le taux de modulation peut

effets peuvent varier de quelques Hertz à quelques centaines de Hertz¹⁸ pour les LED déjà étudiées.

Effets sanitaires identifiés

Les principaux risques sanitaires associés à l'éclairage par LED résultent de leur très grande luminance (c'est-à-dire la densité surfacique d'intensité lumineuse émise par ces sources de taille très faible) associée à un spectre d'émission particulier des LED blanches, riche en lumière bleue (courtes longueurs d'onde). D'autres effets potentiels sont évoqués comme la perturbation des rythmes circadiens et les effets stroboscopiques.

Vis-à-vis des nombreux effets potentiels identifiés (effet photochimique, éblouissement, *etc.*), il n'existe actuellement que peu de données pour quantifier les risques sanitaires associés. D'autre part, il n'existe actuellement pas de données d'exposition des personnes relatives à un éclairage avec des systèmes utilisant des LED. Il en est de même pour les autres types d'éclairage.

Ainsi, le groupe de travail n'a pu présenter des évaluations chiffrées que dans le cas des risques liés à l'exposition à la lumière bleue, évalués selon la norme NF EN 62471 de sécurité photobiologique. Cependant, cette norme est mal adaptée à des éclairages utilisant des LED. Compte tenu des connaissances actuelles, les valeurs limites d'exposition données dans cette norme ne permettent pas de prendre en compte l'exposition quotidienne aux LED.

Dans la description suivante des risques identifiés par le groupe de travail, les effets sur l'œil, d'origine thermique ou photochimique, ont été séparés des autres effets se rapportant notamment à la perturbation des rythmes circadiens.

Effets sur l'œil

- **Risque lié à un effet thermique de la lumière**

Le risque d'effet thermique est associé à une brûlure de la rétine résultant généralement d'une exposition de courte durée à une lumière très intense. Ce type de danger concerne toutes les longueurs d'onde, de l'ultraviolet à l'infrarouge en passant par le visible. Ce type de risque associé aux lasers est peu probable dans un usage classique des LED.

- **Risques liés aux effets photochimiques de la lumière bleue**

Le risque d'effet photochimique est associé à la lumière bleue et son niveau dépend de la dose cumulée de lumière bleue à laquelle la personne a été exposée. Ainsi, il s'agit généralement d'expositions modérées répétées sur de longues durées.

- **Caractérisation du risque**

Des arguments issus d'observations humaines et d'expériences sur des cultures cellulaires et sur différentes espèces animales convergent pour démontrer une toxicité particulière des courtes longueurs d'ondes (bleues) pour la rétine.

atteindre des valeurs allant de 2 % à 20 % en fonction de la qualité du filtrage. Pour une alimentation PWM (*Pulse Width Modulation*), la fréquence est de l'ordre de dizaines de kilo-Hertz, le taux de modulation peut être variable, et il peut dépasser 50 %. Enfin, pour la nouvelle technologie des LED alimentées en courant alternatif, la fréquence de fluctuation est de 100 Hz et le taux de modulation peut atteindre 100 %.

¹⁸ *A Review of the Literature on Light Flicker: Ergonomics, Biological Attributes, Potential Health Effects, and Methods in Which Some LED Lighting May Introduce Flicker*, IEEE Standard P1789 (2010)

La lumière bleue est responsable de dommages photochimiques. Les lésions touchent la rétine externe (photorécepteurs et cellules de l'épithélium pigmentaire) et apparaissent de façon retardée. Ces lésions peuvent ne pas être visibles par l'examen ophtalmoscopique. Deux types de lésions photochimiques ont été décrites : celles résultant d'interaction avec les pigments visuels touchent les photorécepteurs et celles liées à l'interaction avec la lipofuscine touchent les cellules de l'épithélium pigmentaire.

Ces interactions induisent la production de radicaux libres cytotoxiques à forte dose. Les pigments photoréactifs (lipofuscine) dans l'épithélium s'accumulent avec l'âge, augmentant le risque de stress oxydant. La mort cellulaire a des conséquences fonctionnelles d'autant plus marquées qu'elle touche la région maculaire (vision centrale). La question de savoir si les lésions cumulées résultant de stress oxydant à faibles doses pourraient, au long cours, favoriser un vieillissement prématuré de la rétine et favoriser une dégénérescence maculaire reste posée.

A ce jour, il n'existe pas de modèles animaux pertinents de dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA), car tous les modèles utilisent des rongeurs, or seuls les primates et certains oiseaux ont des maculae. Les durées nécessaires aux suivis de ceux-ci sont incompatibles avec les protocoles expérimentaux.

Chez l'homme, des expositions solaires répétées à de fortes luminances peuvent induire des lésions maculaires irréversibles proches de celles observées dans les maculopathies liées à l'âge, mais les études épidémiologiques réalisées dans ce domaine n'ont pas permis d'identifier de façon unanime l'exposition solaire comme un facteur de risque de DMLA.

Les effets aggravants de la lumière bleue sur la DMLA sont fortement soupçonnés et issus d'observations convergentes sur des modèles expérimentaux. Ces effets n'ont jamais pu être démontrés par des études épidémiologiques chez l'homme, en raison d'une difficulté à évaluer l'exposition et les prédispositions individuelles.

Le cristallin des adultes (qui, du fait de son jaunissement, absorbe en partie les rayonnements bleus) et les pigments maculaires protègent en partie de cette toxicité par leur capacité à absorber la lumière bleue. Ces mécanismes protecteurs sont plus faibles chez l'enfant (dont le cristallin est transparent), le sujet aphake (absence de cristallin) et le sujet pseudophake (cristallin artificiel). Cette protection est également réduite en cas de diminution du pigment maculaire, comme observée au cours de certaines pathologies maculaires (par exemple la DMLA).

- **Exposition aux LED**

Il n'existe actuellement pas de données d'exposition des personnes à un éclairage avec des systèmes utilisant des LED. Il en est de même pour les autres types d'éclairage existants.

- **Normes de sécurité photobiologique**

Présentation de la norme NF EN 62471 et groupes de risques

La norme NF EN 62471 relative à la sécurité photobiologique des lampes et des appareils utilisant des lampes propose des limites d'exposition au rayonnement des sources de lumière utilisées notamment en éclairage, et donne une classification basée sur les

luminances et les éclairagements effectifs ainsi qu'une méthode de mesure de ces grandeurs. Cette norme s'intéresse à l'ensemble des dangers photobiologiques pour l'œil (dangers thermiques et photochimiques), pour des longueurs d'ondes allant de l'ultraviolet à l'infrarouge.

La norme définit 4 groupes de risques :

- groupe de risque 0 (exempt de risque), le produit ne présente aucun risque photobiologique ;
- groupe de risque 1 (risque faible), le produit ne présente pas un risque lié aux limites d'exposition en condition d'utilisation normale ;
- groupe de risque 2 (risque modéré), le produit ne présente pas un risque lié à la réponse d'aversion pour les sources à lumière très brillante ou en raison de l'inconfort thermique ;
- groupe de risque 3 (risque élevé), le produit peut présenter un risque même pour une exposition momentanée ou courte.

Carences et inadaptation de la norme

- *Valeurs limites d'exposition non adaptées pour des expositions répétées à la lumière bleue*

Les valeurs limites d'exposition pour la population générale destinées à éviter des lésions aiguës de la rétine sont proposées par l'ICNIRP^{19,20} et reprises dans la Norme NF EN 62 471 et la directive européenne 2006/25/CE relative aux rayonnements optiques artificiels.

Ces valeurs limites d'exposition sont calculées pour une exposition à une source de lumière dans le champ de vision pour une journée de travail de 8 heures. Elles sont issues de données expérimentales et pondérées par un facteur minorant de 5 à 10 fois les énergies nécessaires à produire des lésions observables.

En pratique, des expériences chez l'animal ont déterminé les seuils d'énergie capables d'induire des lésions du fond d'œil observables macroscopiquement par ophtalmoscopie après une exposition unique à la lumière. Ces lésions correspondent à un blanchiment de la rétine neurale, consécutive à un œdème des couches rétinienne superficielles.

Au vu des connaissances actuelles, les valeurs limites d'exposition en vigueur ne permettent pas d'évaluer le risque d'exposition chronique quotidienne à la lumière bleue. La classification des lampes suivant les niveaux ne prend pas en compte les risques au long cours des expositions cumulées. Cela signifie que des expositions répétées et prolongées pourraient induire un risque cumulé potentiellement supérieur à celui évalué par les valeurs limites d'exposition.

- *Ambigüité dans les distances de mesures*

Pour les lampes d'éclairage courant, la norme NF EN 62 471 prévoit une évaluation du groupe de risque à la distance à laquelle elles produisent un

¹⁹ ICNIRP Commission Internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants, « *Guidelines on limits of exposure to broad band incoherent optical radiation (0.38 to 3 μm)* », (1997)

²⁰ ICNIRP Commission Internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants, « *ICNIRP statement on light-emitting diodes (LED) and laser diodes : implication for hazard assessment* », (2000)

éclairage de 500 lx. Pour les autres types de lampes, la détermination du groupe de risque doit se faire pour le pire cas d'observation, à savoir une distance de 200 mm.

Le groupe de risque d'un système d'éclairage à LED peut être déterminé selon l'un ou l'autre des protocoles de mesure, conduisant à une classification très différente (l'évaluation à 500 lx donne toujours une évaluation minorée par rapport à l'évaluation à 200 mm). Il existe donc une ambiguïté sur la distance à laquelle les mesures doivent être faites.

- **Non prise en compte des populations sensibles à la lumière bleue**

Pour évaluer le risque lié à la lumière bleue, la norme NF EN 62 471 recommande d'utiliser la courbe de phototoxicité de la lumière bleue proposée par l'ICNIRP. Cette courbe ne convient que pour les adultes. La norme ne donne pas de recommandations particulières pour les populations dont les mécanismes naturels de filtrage de la lumière bleue sont réduits (enfants, aphakes, pseudophakes), ou plus sensibles car atteintes de maladies rétinienne(s). Or, une autre courbe de phototoxicité de la lumière bleue est proposée par l'ICNIRP pour les populations aphakes. La norme actuelle ne permet pas de prendre en compte les populations sensibles à la lumière bleue.

- **Les mesures du groupe de travail**

Le groupe de travail a conduit des évaluations du risque définies selon la norme NF EN 62 471 pour différents systèmes d'éclairage afin de comparer les LED aux autres types d'éclairage.

Il apparaît que certaines LED très couramment utilisées en éclairage, signalisation et balisage appartiennent au groupe de risque 2, alors que toutes les autres sources d'éclairage disponibles pour le grand public ne dépassent pas les groupes de risque 0 ou 1. Les durées limites d'exposition induites par ce classement dans le groupe 2 varient entre quelques secondes pour certaines LED bleu roi et quelques dizaines de seconde pour certaines LED blanc froid.

Les LED et les systèmes d'éclairage à base de LED peuvent se trouver dans différents groupes de risque selon leur luminance et leur teinte (blanc froid, blanc chaud, *etc.*), augmentant ainsi la difficulté de maîtriser ce risque.

- **Populations sensibles ou particulièrement exposées**

Trois populations plus particulièrement sensibles au risque ou particulièrement exposées à la lumière bleue ont été identifiées :

- les enfants (transparence du cristallin), les personnes aphakes (sans cristallin) ou pseudophakes (cristallin artificiel) qui ne filtrent pas (ou peu) les courtes longueurs d'ondes (notamment la lumière bleue) du fait de leur cristallin ;
- les populations sensibles à la lumière : patients atteints de certaines maladies oculaires et cutanées, patients consommant des substances photosensibilisantes, *etc.*) pour lesquelles la lumière bleue peut être un facteur aggravant de leur pathologie ;
- les populations particulièrement exposées aux LED (certaines populations de travailleurs : installateurs éclairagistes, métiers du spectacle, *etc.*) qui sont soumises à des éclairages de forte intensité, et sont donc susceptibles d'être exposées à de fortes quantités de lumière bleue.

- **Conclusions relatives au risque lié à la lumière bleue**

Il est important de signaler que d'autres sources très utilisées en éclairage, notamment des lampes à décharge haute pression (lampes à iodures métalliques pour l'éclairage extérieur) sont également classées dans le groupe de risque 2. Cependant, ces lampes sont destinées à des applications bien maîtrisées et ne peuvent être installées que par des professionnels qui sont tenus de limiter le niveau d'exposition de la population.

L'arrivée des LED sur le marché de l'éclairage grand public marque un tournant sans précédent : c'est la première fois que des sources classées dans le groupe de risque 2 sont accessibles au grand public, en vue d'applications domestiques et qui plus est, sans marquage de ce risque.

Une même LED considérée individuellement ou intégrée dans un système d'éclairage pourrait être classée dans des groupes de risques différents selon la distance d'évaluation imposée par la norme NF EN 62 471.

Les évolutions des technologies d'éclairage à LED, d'un point de vue des performances lumineuses, devraient largement se poursuivre dans les prochaines années. Les risques associés à une exposition aux systèmes d'éclairage à LED sont donc susceptibles d'être accentués avec l'augmentation des luminances.

La méthodologie adoptée dans ce rapport a permis d'évaluer les risques photobiologiques liés à des LED dont le flux se situe dans la moyenne de la gamme de flux disponibles au moment de la rédaction de ce document. À ce jour et dans les quelques années qui viennent, les progrès technologiques ne laissent pas présager l'apparition de LED relevant du groupe de risque 3. En revanche, avec l'augmentation des flux et des luminances, il ne fait aucun doute que de plus en plus de LED vont apparaître dans le groupe de risque 2.

- **Risques liés à l'éblouissement**

Il existe deux types d'éblouissement : l'éblouissement d'inconfort et l'éblouissement d'incapacité.

L'éblouissement d'inconfort produit une sensation désagréable, sans nécessairement troubler la vision des objets. Il est lié à la luminance du luminaire et aux différences de contrastes. Il est associé à une baisse transitoire des performances visuelles.

L'éblouissement d'incapacité trouble la vision des objets (apparition d'une luminance de voile) sans provoquer nécessairement une sensation désagréable. Il est lié à la quantité de lumière incidente sur l'œil et à la luminance du luminaire. Il est susceptible d'entraîner des accidents domestiques (notamment chute de plain-pied ou de hauteur) ou de la route (collision), *etc.*

En éclairage d'intérieur, il est admis qu'une luminance supérieure à 10 000 cd / m² est visuellement gênante quelle que soit la position du luminaire dans le champ visuel. Cette valeur est couramment citée pour l'éblouissement d'inconfort en éclairage intérieur comme étant une valeur au dessus de laquelle on subit de manière sûre un éblouissement.

La norme d'ergonomie visuelle NF X 35 103 évoque une valeur limite de 2 000 cd / m² pour l'éblouissement d'inconfort, pour le cas d'une petite source située dans la zone centrale du champ visuel.

En raison notamment du caractère ponctuel de leur surface d'émission, les LED ont des luminances au moins 1 000 fois plus élevées que celles d'une source d'éclairage traditionnelle.

Le niveau de rayonnement direct de ce type de source dépasse largement le niveau d'inconfort visuel.

Le groupe de travail a mesuré des luminances supérieures à 10 000 000 cd / m² sur certaines LED d'une puissance électrique de 1 W (disponibles dans le commerce pour une utilisation domestique).

Dans les systèmes d'éclairage à LED disponibles sur le marché, les LED sont souvent directement apparentes afin de ne pas atténuer le niveau d'éclairage produit. Ceci conduit à un non respect des exigences normatives (ergonomie visuelle et exigences de sécurité) de l'éclairage relatives à la limitation des luminances élevées dans le champ visuel.

Autres effets

- **Risque de perturbation de l'horloge biologique et de la contraction pupillaire**

L'horloge biologique et la contraction pupillaire sont régulées chez l'homme par des longueurs d'onde situées autour de 480 nm qui suppriment la production de mélatonine (hormone participant à la régulation de l'horloge biologique et donc du cycle circadien).

Les LED présentent un spectre fondamentalement différent de celui de la lumière naturelle, avec une très faible proportion à 480 nm. Ceci pourrait exposer à un risque de dérèglement de l'horloge biologique et, par conséquent, des rythmes circadiens. Ces risques seraient accrus par des températures de couleur élevées (blanc froid et bleu), que l'on rencontre fréquemment dans les systèmes d'éclairage à LED.

Le dérèglement de l'horloge biologique peut induire des conséquences métaboliques, thymiques (dépression, troubles de l'humeur), troubles des cycles veille/ sommeil, *etc.*

Par ailleurs, la contraction pupillaire réflexe en forte luminance est induite par ces mêmes longueurs d'onde. Elle pourrait être réduite en présence d'éclairage à LED, conduisant à un éclairage rétinien plus important et une augmentation des risques associés à la lumière bleue.

- **Risque lié au papillotement de la lumière émise par les LED**

Conséquence de leur mode d'alimentation électronique, la lumière des LED peut présenter des fluctuations rapides et de grande amplitude. Cette fluctuation de la lumière, liée au fait que les LED ne présentent qu'une très faible rémanence, est le plus souvent imperceptible par le système visuel. En situation de mouvement ou dans des espaces confinés avec des variations périodiques de contraste, elle peut être responsable d'effets stroboscopiques. Ces effets stroboscopiques, qui n'ont cependant jamais été étudiés en profondeur, peuvent avoir une incidence directe sur la santé (crises d'épilepsie pour les sujets à risques), les performances visuelles et la sécurité. Une publication²¹ récente a montré que des LED pouvaient présenter des fluctuations de lumière à des fréquences auxquelles correspondent des effets sanitaires (3 à 60 Hz pour les fluctuations visibles et de 120 à 150 Hz pour les fluctuations non-visibles).

²¹ *A Review of the Literature on Light Flicker: Ergonomics, Biological Attributes, Potential Health Effects, and Methods in Which Some LED Lighting May Introduce Flicker*, IEEE Standard P1789 (2010)

Recommandations

Les recommandations suivantes s'appliquent à la fois aux systèmes d'éclairage utilisant des LED déjà présents sur le marché ainsi qu'aux futurs systèmes à LED.

S'agissant des risques sanitaires liés à l'exposition aux LED,

Considérant :

les risques sanitaires liés à la lumière bleue émise par des éclairages à LED dont les produits sont accessibles au public alors qu'ils appartiennent à des groupes de risques supérieurs à 1 (selon la norme NF EN 62 471) ;

le CES recommande :

- d'interdire que des éclairages appartenant à des groupes de risques supérieurs à 1, évalués à la distance d'observation de 200 mm, soient accessibles au public ;
- de réserver les LED appartenant à des groupes de risques supérieurs à 1 à des applications bien maîtrisées par des professionnels.

Considérant :

les risques sanitaires engendrés par des éclairages à LED, liés à de très fortes luminances et des éblouissements importants ;

le CES recommande aux fabricants et aux intégrateurs:

- pour protéger la population contre des luminances trop fortes des systèmes à LED et de forts éblouissements.,

- de concevoir des systèmes d'éclairage qui ne permettent pas la vision directe du faisceau émis par les LED. En particulier, le CES recommande d'utiliser des dispositifs optiques pour limiter les luminances perçues directes ou réfléchies et rendre les sources de lumière à LED plus diffuses ;
- de prendre en compte l'usure des couches de phosphores des LED blanches qui peut induire une augmentation du groupe de risque photobiologique.

- pour protéger les conducteurs automobiles, les piétons, les cyclistes et les motards du risque d'éblouissement lié à des luminances trop fortes émises par les éclairages automobiles à LED,

- de n'autoriser que les systèmes d'éclairage à LED des groupes de risques 0 ou 1 pour des phares automobiles de jour et de nuit, étant donné que l'éclairage automobile de jour sera rendu obligatoire à partir de février 2011 pour les nouvelles voitures (Directive européenne sur les feux de jour 2008/89/EC) ;

Considérant :

- les risques avérés d'une exposition aiguë à la lumière bleue et les incertitudes quant aux effets d'une exposition chronique de faibles doses, ainsi que les incertitudes quant aux effets sur l'horloge biologique et la diminution de la contraction pupillaire ;
- les populations sensibles à la lumière en général (enfants, aphakes, pseudophakes, patients atteints de certaines maladies oculaires et cutanées, patients consommant des substances photo-sensibilisantes, etc.) ;
- les populations de travailleurs pouvant être exposés à des éclairages à LED de forte intensité ;

le CES émet les recommandations suivantes :

- pour protéger spécifiquement les populations à risques comme les populations sensibles à la lumière et celles particulièrement exposées aux LED. Ainsi, le CES recommande :

- en ce qui concerne les enfants, d'éviter l'utilisation de sources de lumière émettant une forte lumière froide ou de la lumière bleue dans les lieux qu'ils fréquentent (maternité, crèches, écoles, lieux de loisirs, etc.) ou dans les objets qu'ils utilisent (jouets, afficheur lumineux, console et manette de jeu, veilleuse nocturne, etc.).
- de développer des moyens de protection adéquats (type lunettes de protection optique spécifiques aux LED) pour les travailleurs particulièrement exposés à un éclairage à LED ;
- de prévenir les patients sous médicaments photo-sensibilisant des risques liés à l'exposition à la lumière froide et plus particulièrement issue de LED, même celles classées dans le groupe de risque 0 ; informer les acteurs de la santé de l'existence de ce risque ;
- d'utiliser avec précaution les dispositifs conduisant à augmenter la dimension effective de la LED, même si ces dispositifs n'augmentent pas le niveau de luminance (cas des collimateurs optiques et des assemblages denses de puces LED type « *multichip* »). En effet, l'utilisation de ces dispositifs conduit à des durées limites d'exposition à la lumière bleue plus courtes que dans le cas de la LED à simple puce sans optique supplémentaire. Le groupe de risque peut alors augmenter.

Considérant :

la présence sur le marché de produits à LED à visée luminothérapeutique, de confort ou de bien être, le CES recommande d'évaluer la nocivité de ces appareils et de leur conformité avec les normes.

S'agissant des normes relatives à la qualité de l'éclairage et à la sécurité photobiologiques des LED,**Considérant :**

- que les normes en vigueur pour réaliser des installations d'éclairage ne sont actuellement pas toujours appliquées par les professionnels (électriciens, éclairagistes, concepteurs lumières) dans le cas des systèmes à LED ;
- que les normes liées à la sécurité photobiologique peuvent paraître mal adaptées aux éclairages à LED ;

le CES émet les recommandations suivantes :

- Faire appliquer par les professionnels réalisant des installations d'éclairage à LED, l'ensemble des normes relatives à la qualité de l'éclairage :

- NF X 35-103 « Ergonomie : Principes d'ergonomie visuelle applicables à l'éclairage des lieux de travail » ;
- NF EN 12464-1 « Éclairage des lieux de travail – Partie 1 : Lieux de travail intérieurs » ;
- NF EN 12464-2 « Éclairage des lieux de travail – Partie 2 : Lieux de travail extérieurs » ;
- série de normes NF EN 13201 « Éclairage public » ;
- NF EN 12193 « Éclairage des installations sportives ».

- Adapter la norme NF EN 62 471 « Sécurité photobiologique des lampes et appareils utilisant des lampes » aux systèmes à LED. Il est nécessaire de faciliter la prise en compte de cette norme par les fabricants et de lever tout doute quant à la façon dont elle doit être appliquée aux systèmes à LED. Le CES recommande ainsi :

- de préciser les conditions de mesure et d'évaluation des systèmes à LED dans la norme NF EN 62 471 ;
- d'éditer un guide d'application de cette norme exclusivement dédié aux systèmes à LED ;
- de déterminer le groupe de risque pour le pire cas d'observation : à une distance de 200 mm du système, on obtient ainsi le groupe de risque le plus défavorable ;
- d'adapter la norme aux enfants, personnes aphakes ou pseudophakes, en prenant en compte la courbe de phototoxicité de la lumière pertinente proposée par l'ICNIRP ;
- de proposer pour chaque groupe de risque des sous-groupes de risque qui permettraient d'affiner l'évaluation du risque en fonction des temps d'exposition ;
- dans le cas de groupes de risque supérieurs à 0, d'évaluer les distances de sécurité (distance à laquelle l'observation correspond au groupe de risque 0), et de le notifier de manière lisible au consommateur (cas des dispositifs grand public) ou au professionnel en charge de la réalisation de l'installation d'éclairage.

- Pour renforcer l'aspect de la sécurité photobiologique dans la mise en conformité des installations d'éclairage :

- d'introduire les exigences de sécurité photobiologique dans toutes les normes de sécurité relatives aux lampes à LED, modules de LED et luminaires à LED. On peut citer les normes suivantes qui sont particulièrement concernées :
 - série de normes NF EN 60 598 « Luminaires » ;
 - NF EN 62 031 : « Modules de LED pour l'éclairage général : spécifications de sécurité » ;
 - CEI 62 560 : « Lampes à LED auto-ballastées pour l'éclairage général fonctionnant à des tensions > 50 V - Spécifications de sécurité » ;
 - le projet de norme Pr CEI 62 663-1 « *Non ballasted single capped LED lamps for general lighting – safety requirements* ».

S'agissant de l'information des consommateurs, de la traçabilité, de la qualité et du marquage des LED,

Considérant :

- le manque d'information dont dispose le public concernant les produits à LED ;

le CES émet les recommandations suivantes :

- Informer les consommateurs sur la qualité et la performance de l'éclairage qu'il choisit. Donner au consommateur la possibilité de s'informer facilement des caractéristiques du produit qu'il achète ; le CES recommande de :

- veiller à ce que les fabricants et intégrateurs de LED réalisent des contrôles de qualité et de traçabilité des LED ; outre la qualité de l'éclairage, il est nécessaire qu'ils s'assurent de la conformité de leurs produits vis-à-vis de leur groupe de risques ;
- envisager un étiquetage compréhensible par le consommateur et pertinent (puissance, tension d'alimentation, température de couleur, flux lumineux, etc.) ;

- rendre obligatoire le marquage du groupe de risque de sécurité photobiologique évalué à la distance de 200 mm sur l'emballage des produits à LED. Pour les sources appartenant au groupe de risque 1, il faut imposer de faire figurer sur le marquage la distance de sécurité, au-delà de laquelle le groupe de risque redescend à 0.
- rendre obligatoire le marquage du groupe de risque de sécurité photobiologique pour tous les types d'éclairage
- envisager la création d'un label de qualité (reproductibilité, éco-marquage, etc.).

Recommandations d'études et d'axes de recherche

Considérant le manque de données sur l'exposition de la population à la lumière artificielle, le CES émet les recommandations suivantes :

- Caractériser et étudier l'exposition de la population à la lumière artificielle.

- Définir un indice permettant d'estimer le niveau d'éblouissement d'une source à LED. L'UGR (*Unified Glaring Rate* – taux d'éblouissement unifié) utilisé pour les autres types d'éclairage n'est pas pertinent pour les LED, il ne convient pas aux sources de faible dimension angulaire.

S'agissant des études et recherches sur les effets sanitaires des systèmes d'éclairage à LED, le CES recommande de :

- Mener des recherches cliniques afin d'obtenir des éléments de décision permettant de définir les valeurs limites d'exposition à la lumière bleue. Ainsi, le CES recommande :

- d'étudier les effets cumulatifs à moyen et long terme d'une exposition à la lumière bleue ;
- de réaliser des études prospectives et rétrospectives sur les populations traitées par luminothérapie avec des LED bleues ;
- de mettre en œuvre des protocoles expérimentaux évaluant les conséquences d'exposition prolongées et cumulées à des niveaux inférieurs aux valeurs limites d'exposition.

- Mener des recherches afin de mieux caractériser les effets de la lumière artificielle et en particulier sur la lumière issue de systèmes à LED sur les rythmes biologiques. Le CES recommande ainsi :

- d'approfondir les études permettant de mieux caractériser les spectres d'action des mécanismes de régulation de l'horloge biologique par la lumière ;
- de quantifier les conséquences d'une exposition à des lumières artificielles froides sur les rythmes circadiens et la contraction pupillaire ;
- de manière générale, d'étudier l'incidence sur la santé et sur les pathologies de la pollution lumineuse (en lien avec de possibles dérèglements de l'horloge biologique) et de la systématisation d'un éclairage à LED.

- Étudier systématiquement le déclenchement et/ ou l'aggravation des photo-dermatoses par un éclairage à LED

S'agissant des études et recherches à mener sur la technologie des LED pour en limiter les risques sanitaires, le CES émet les recommandations suivantes ;

- Améliorer la technologie des LED, ainsi le CES recommande :

- d'encourager des recherches pour développer des nouveaux matériaux émissifs couplés avec des luminophores optimisés pour obtenir une lumière blanche de bonne qualité avec une efficacité lumineuse aussi élevée que possible ;
- de développer la recherche sur la conception de luminaires adaptés aux LED (petite taille, flux lumineux important) afin d'en limiter la luminance, en utilisant des solutions optiques ;
- d'étudier les mécanismes de dégradation des LED blanches pouvant conduire à une dérive bleue (bleuissement) de la lumière émise.

Maisons-Alfort, le 03/06/2010

Au nom des experts du CES «Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements»,

le président du CES, Jean-François Doré

