

Le directeur général

Maisons-Alfort, le – 5 AVR. 2019

**AVIS**  
**de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation,**  
**de l'environnement et du travail**

**relatif aux « effets sur la santé humaine et sur l'environnement (faune et flore) des systèmes utilisant des diodes électroluminescentes (LED) »**

---

*L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.*

*L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.*

*Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part à l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.*

*Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du code de la santé publique).*

*Ses avis sont publiés sur son site internet.*

---

L'Anses a été saisie le 19 décembre 2014 par la Direction générale de la santé, la Direction générale du travail, la Direction générale de la prévention des risques et la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes afin de réaliser une expertise visant à évaluer les effets sur la santé humaine et sur l'environnement (faune et flore) des systèmes utilisant des diodes électroluminescentes (LED).

## **1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE**

L'expertise mise en œuvre par l'Anses a eu pour objectif de mettre à jour les connaissances sur les effets sanitaires liés à l'exposition aux systèmes d'éclairage utilisant des LED. La demande portait plus précisément sur l'évaluation des risques liés à l'exposition aux systèmes à LED pour la population générale et pour les travailleurs, en distinguant les différents types d'application des systèmes d'éclairage ou objets en disposant (éclairage domestique, usages professionnels, phares de véhicules, jouets, écrans, etc.) et en prenant en compte des situations réelles d'exposition. Par ailleurs, un examen des éventuels risques pour l'environnement que pourraient poser ces systèmes tout au long de leur cycle de vie était demandé.

En application de la Directive européenne n° 2005/32/CE sur l'éco-conception des produits consommateurs d'énergie, dite Directive « EuP » (*Energy using Products*), le retrait programmé des lampes à incandescence (étalé entre 2009 et 2012) et des lampes halogènes classiques (fixé à septembre 2018) du marché de l'éclairage, a induit un fort développement des éclairages à LED sur le marché grand public, augmentant ainsi l'exposition de la population aux éclairages utilisant cette technologie. Les domaines d'application des systèmes à LED se sont élargis : ils concernent aujourd'hui non seulement un nombre important d'applications à usage professionnel, mais aussi des applications d'usage public pour l'affichage et la signalisation, certains objets et dispositifs (jouets, objets de décoration, etc.), le rétro-éclairage d'écrans (téléphones mobiles, tablettes, téléviseurs, ...) et l'éclairage intérieur et extérieur.

Lors de la publication de son premier avis sur les effets sanitaires liés aux LED (rapport d'expertise collective de l'Anses publié en 2010<sup>1</sup>), l'Agence attirait l'attention sur les effets toxiques pour la rétine de la lumière bleue. Les LED possèdent en effet la caractéristique particulière d'émettre une lumière riche en longueurs d'onde courtes : une lumière dite riche en bleu. L'Anses avait, à cette occasion, émis des recommandations relatives notamment à la mise sur le marché des LED et à l'information des consommateurs.

Les effets sanitaires potentiels liés à l'exposition à la lumière émise par les LED sont désormais mieux documentés. Depuis l'avis émis par l'Agence en 2010, de nouvelles données expérimentales, notamment chez l'animal, concernant la phototoxicité associée à une exposition de longue durée à la lumière bleue, ont été publiées. De nouvelles données ont aussi été publiées concernant la dérégulation de l'horloge biologique par la lumière bleue, l'éblouissement et les effets sanitaires liés à la modulation temporelle de la lumière (fluctuation du niveau lumineux de l'éclairage potentiellement perceptible visuellement selon sa fréquence). Concernant les effets éventuels sur l'environnement, des données existent et interrogent sur les déséquilibres potentiellement induits sur les écosystèmes, qui pourraient entraîner des conséquences sur la faune et la flore, mais aussi sur l'Homme et sa santé.

L'ajout ou la substitution d'une lumière artificielle à la lumière solaire naturelle pose la question des effets sanitaires potentiels qui pourraient en découler, du fait de l'accumulation ou de la modification de l'environnement lumineux. En quelques décennies, l'Homme a notablement augmenté son exposition à la lumière bleue le soir avec des éclairages artificiels ou des rétro-éclairages riches en lumière bleue. Auparavant, les éclairages utilisés se situaient plutôt dans des teintes jaune-orange (bougie, lampes à incandescence).

La mise à jour de l'expertise a considéré l'ensemble des effets sur la santé humaine mais aussi sur l'environnement (faune et flore) qui pourraient être liés à l'exposition à la lumière des lampes à LED.

## 2. ORGANISATION ET METHODOLOGIE DE L'EXPERTISE

La présente expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ». L'Agence a mandaté un groupe de travail d'experts intitulé « Effets sanitaires des systèmes à LED » pour réaliser cette expertise, sous l'égide du CES.

### Groupe de travail

Le groupe de travail a été constitué à la suite d'un appel à candidatures public émis le 28 avril 2015. Les experts membres de ce groupe ont été retenus pour leurs compétences scientifiques et techniques dans les domaines de la physique, de la métrologie des rayonnements optiques, de la vision, de l'ophtalmologie, de la chronobiologie, de la biologie, de l'environnement et de la

<sup>1</sup> <https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2008sa0408.pdf>

règlementation dans le domaine des éclairages. Le groupe de travail a été créé en septembre 2015. Il s'est réuni 25 fois en séances plénières entre septembre 2015 et mai 2018.

### **Contributions extérieures**

Afin de pallier le manque de données relatives à la caractérisation des expositions aux systèmes à LED, trois études ont été financées par l'Agence.

#### *Caractérisation des éclairages artificiels disponibles sur le marché français*

Une première « convention de recherche et de développement » a été établie entre l'Anses et l'Institut national de la consommation (INC) afin de procéder à une étude comparative actualisée des caractéristiques techniques de différents éclairages disponibles sur le marché.

#### *Documentation de l'exposition des populations à la lumière*

La réalisation d'une seconde étude a été confiée au Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), afin de caractériser l'exposition de la population aux différents éclairages artificiels et systèmes à LED, dans des conditions réelles d'exposition. Un logiciel, développé à cet effet, a permis d'évaluer l'exposition lumineuse pour plusieurs scénarios d'exposition (enfants, travailleurs, personnes âgées, ...).

#### *Évaluation des dispositifs de protection contre la lumière bleue destinés au grand public*

Une troisième étude a été menée, avec le CSTB, pour évaluer la capacité des moyens de protection à destination du grand public à filtrer la lumière bleue (filtres pour écrans, verres traités, lunettes filtrantes, protections logicielles).

### **Expertise collective**

Les travaux d'expertise 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 discutés avec 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 ».

Les liens d'intérêts déclarés par les experts ont été analysés par l'Anses avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise. Les déclarations d'intérêts des experts sont rendues publiques *via* le site internet : <http://www.anses.fr>

### **Méthodologie d'expertise**

#### *Recherche et analyse bibliographique*

L'expertise collective s'est principalement appuyée sur une analyse critique et une synthèse des données publiées dans la littérature scientifique (articles, rapports, etc.). La recherche bibliographique a ainsi été menée sur une période qui s'étend de janvier 2010 à juillet 2017.

Les résultats des études financées par l'Anses afin de compléter les connaissances relatives aux expositions des populations à la lumière artificielle et aux moyens de protection ont été pris en compte dans l'expertise.

Le groupe de travail a également auditionné des experts et personnalités extérieures ainsi que des représentants de l'industrie de l'éclairage et des associations pour la protection de l'environnement, afin d'apporter des informations et des données complémentaires aux données disponibles pour l'expertise.

#### *Évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires*

Pour chaque effet sanitaire étudié, les résultats des études disponibles chez l'Homme d'une part, et chez l'animal d'autre part, ont été considérés séparément afin de caractériser les éléments de preuve apportés sur le lien entre l'exposition à la lumière des LED, et en particulier la lumière riche en bleu, et la survenue de l'effet sanitaire. Au final, les éléments de preuve chez l'Homme et chez

l'animal ont été combinés afin d'établir une évaluation globale du niveau de preuve de l'effet sanitaire d'une exposition à la lumière des LED, dans une des catégories suivantes :

- effet avéré ;
- effet probable ;
- effet possible ;
- les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet ;
- probablement pas d'effet.

#### *Caractérisation de l'exposition*

Le manque de données bibliographiques portant sur l'exposition de la population aux technologies à LED a conduit l'Anses à financer la réalisation de campagnes de mesures spécifiques, notamment pour décrire la nature et la quantité de lumière émise par des systèmes à LED utilisés au quotidien (lampes d'éclairage, objets intégrant des LED, projecteurs automobiles et écrans d'ordinateurs, de tablettes, de téléphones mobiles etc.). Les expositions à la lumière riche en bleu, induites notamment par les systèmes à LED, ont été évaluées dans le cadre de scénarios de vie, grâce à des mesures réalisées *in situ* dans des environnements spécifiques.

Le tableau 1 en annexe rappelle les principales grandeurs physiques utilisées en particulier pour quantifier les émissions et les expositions dans le domaine de l'éclairage.

#### *Évaluation des risques pour la santé humaine*

En combinant l'évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires obtenue à partir de l'analyse des articles scientifiques et les données issues des scénarios d'exposition, l'expertise a cherché à caractériser les éventuels risques associés à l'exposition à des systèmes utilisant des LED, pour l'Homme. Ainsi, le groupe de travail a classé le risque de survenue des effets sanitaires chez l'Homme suivant les quatre niveaux définis ci-dessous :

- risque élevé ;
- risque modéré ;
- risque faible ;
- sans risque prévisible.

Le rapport d'expertise collective détaille la méthodologie d'évaluation du niveau de preuve des effets étudiés et l'évaluation qualitative du risque associé.

### **3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES**

Le comité d'experts spécialisé « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » a adopté les travaux d'expertise collective ainsi que ses conclusions et recommandations, objets de la présente synthèse, lors de sa séance du 23 novembre 2018 et a fait part de cette adoption à la Direction générale de l'Anses.

#### **3.1 Spécificités de la lumière émise par les lampes à LED**

Les spécificités des LED résident d'une part dans le type de rayonnement émis et, d'autre part, dans les caractéristiques physiques des lampes utilisant cette technologie.

D'une part, le spectre de lumière émis par des LED peut être plus riche en lumière bleue (il existe des lampes avec des températures de couleur<sup>2</sup> très élevées, supérieures à 6 000 K, fournissant une

<sup>2</sup> La température de couleur est une caractérisation des sources de lumière par comparaison à un matériau idéal émettant de la lumière uniquement par l'effet de la chaleur. Elle indique en kelvin (unité du système

lumière très riche en bleu) mais aussi plus pauvre en lumière rouge que la plupart des autres sources lumineuses, naturelles ou artificielles. L'excès de lumière bleue dans le spectre des LED par rapport aux autres sources lumineuses (déséquilibre spectral) pose la question des effets de la lumière des lampes à LED sur la rétine (effets phototoxiques) mais aussi sur les rythmes circadiens et le sommeil (effets mélanopiques). Le déficit en lumière rouge des LED pourrait par ailleurs priver des effets photoprotecteurs potentiels de ce rayonnement, notamment lors du processus physiologique d'emmétropisation<sup>3</sup> qui se produit dans l'enfance.

D'autre part, en raison de leur forte luminance<sup>4</sup> et de leur caractère ponctuel, les lumières à LED peuvent être plus éblouissantes que les lumières émises par d'autres technologies (incandescence, fluo-compactes, halogènes, etc.). Cela peut être le cas notamment des matrices de LED (agrégats de LED ponctuelles sur un même support), des lampes spots à LED, des feux d'éclairage automobile et des lampes torches.

Enfin, les LED sont très réactives aux fluctuations de leur courant d'alimentation. Ainsi, des variations de l'intensité lumineuse peuvent apparaître selon la qualité du courant injecté. Ces phénomènes sont regroupés sous la terminologie de « modulation temporelle de la lumière ». L'Homme peut subir des effets néfastes de ces variations, qu'elles soient ou non visuellement perceptibles.

### 3.2 Évolutions réglementaires et normatives depuis 2010

#### 3.2.1 Réglementations et normes relatives à la phototoxicité de la lumière

- Valeurs limites d'exposition

Concernant l'exposition aux rayonnements optiques, et en particulier la sécurité photobiologique, la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (Icnirp) a publié, en 2013, de nouvelles recommandations sur l'exposition aux rayonnements optiques visibles et infrarouges (Icnirp, 2013)<sup>5</sup>. Les valeurs limites d'exposition à la lumière bleue, inchangées par rapport à celles proposées en 1997, ne concernent que les expositions aiguës (exposition unique, continue et inférieure à 8 h).

- Textes réglementaires encadrant les usages de dispositifs, produits d'éclairage ou rayonnements optiques artificiels applicables notamment aux LED

- Population générale

La Directive européenne « basse tension » (2014/35/UE) a pour objectif d'assurer que le matériel électrique se trouvant sur le marché européen satisfait aux exigences assurant un niveau élevé de protection de la santé et de la sécurité des personnes. Les fabricants peuvent s'appuyer sur la conformité de leurs produits à des normes harmonisées afin de garantir le respect des exigences essentielles de cette directive.

Cependant, les éclairages portatifs (lampes torches, lampes frontales) n'entrent pas dans le champ de la Directive basse tension. Ils utilisent pourtant des sources LED pouvant atteindre des intensités lumineuses très élevées.

---

international dont le symbole est K) la température du corps noir dont l'apparence visuelle serait la plus proche de la source de lumière.

<sup>3</sup> L'emmétropisation est le processus de développement oculaire normal qui conduit à focaliser une image nette sur la rétine.

<sup>4</sup> La luminance est une grandeur correspondant à la sensation visuelle de luminosité d'une surface. Une surface très lumineuse présente une forte luminance, tandis qu'une surface parfaitement noire aurait une luminance nulle.

<sup>5</sup> Icnirp *Guidelines on limits of exposure to incoherent visible and infrared radiation* publié dans : Health Physics 105(1):74-96,2013.

De même, pour l'éclairage automobile (feux extérieurs), il n'existe pas de réglementation destinée à garantir la sécurité photobiologique, par exemple en limitant les intensités d'émission des feux ou l'exposition des personnes.

Le cas des jouets intégrant des LED n'est pas suffisamment couvert par la Directive européenne sur la sécurité des jouets (2009/48/CE), car elle fait référence, pour les risques liés à la santé, à la norme de sécurité laser (IEC 608251-1), inadaptée aux éclairages à LED. Cette norme ne considère par ailleurs pas la sensibilité plus élevée des enfants à la lumière bleue en raison d'un cristallin plus clair.

#### - Travailleurs

La Directive européenne 2006/25/CE du 5 avril 2006 relative aux prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (rayonnements optiques artificiels - ROA) inclut le risque lié à la lumière bleue. Pour ce risque particulier, elle s'appuie sur les recommandations de l'Icnirp publiées en 1997. En France, la Directive ROA a été transposée dans le Code du travail par décret en 2010<sup>6</sup>. Un arrêté de 2016<sup>7</sup> définit les modalités d'évaluation de risque, en s'appuyant sur des normes européennes relatives à l'exposition des personnes aux rayonnements optiques.

##### o Normes

Les normes relatives à l'évaluation de la sécurité photobiologique (CIE S009, IEC 62 471 et NF EN 62 471) se réfèrent aux valeurs limites de l'Icnirp et proposent une classification des lampes en groupes de risque : groupe de risque 0 : « sans risque », groupe de risque 1 : « risque faible », groupe de risque 2 : « risque modéré » et groupe de risque 3 : « risque élevé ».

En 2014, un rapport technique (IEC TR 62778 : 2014) accompagnant la norme NF EN 62471 a été publié par la Commission électrotechnique internationale (IEC). Ce rapport décrit une méthode pour évaluer le groupe de risque photobiologique dans le cas de la lumière bleue. Ce rapport reprend plusieurs recommandations de l'Anses, notamment une procédure pour transférer le groupe de risque d'une LED individuelle à un module de LED et à un produit fini (luminaire), ainsi que la spécification d'une distance minimale de vision pour les personnes exposées à des sources de lumière de groupe de risque supérieur ou égal à 2.

Depuis 2015, des normes harmonisées relatives à l'éclairage incluent des exigences de sécurité photobiologique<sup>8</sup> qui limitent les effets possibles du rayonnement sur l'œil et la peau. Une distinction existe entre les lampes d'une part, et les luminaires<sup>9</sup> alimentés par le réseau électrique (luminaires non portatifs) d'autre part. Pour ce qui concerne les lampes, les exigences consistent à limiter le groupe de risque photobiologique au niveau 0 ou 1 selon la norme NF EN 62471. Pour ce qui concerne les luminaires non portatifs, il n'existe pas de limitation du groupe de risque, mais uniquement une obligation d'avertir le consommateur en cas de groupe de risque supérieur ou égal à 2<sup>10</sup>.

<sup>6</sup> Décret n° 2010-750 du 2 juillet 2010 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements optiques artificiels, JORF n°0153 du 4 juillet 2010 page 12149, texte n° 11.

<sup>7</sup> Arrêté du 1er mars 2016 relatif aux modalités de l'évaluation des risques résultant de l'exposition aux rayonnements optiques artificiels en milieu de travail, JORF n°0066 du 18 mars 2016, texte n° 30.

<sup>8</sup> Ces exigences sont précisées notamment dans la norme NF EN 62 560– Lampes à DEL autoballastées pour l'éclairage général fonctionnant à des tensions > 50 V – Spécifications de sécurité et la norme NF EN 60 598-1 Luminaires – Partie 1 : exigences générales et essais (partie générale commune à tous les luminaires).

<sup>9</sup> Un luminaire est l'association d'une lampe (souvent appelée « ampoule ») avec un ornement décoratif ou l'association de plusieurs lampes.

<sup>10</sup> Pour les luminaires non portatifs appartenant au groupe de risque 2, les normes de sécurité (par exemple la norme NF EN 60598-1 portant sur les exigences générales des luminaires) imposent un marquage de la

### 3.2.2. Réglementations et normes relatives aux autres effets sanitaires

Il n'existe pas, à ce jour, de réglementation spécifique concernant les effets liés à la perturbation des rythmes circadiens, à l'éblouissement et à la modulation temporelle de la lumière.

- *Perturbation des rythmes circadiens*

En 2004, la Commission internationale de l'éclairage (CIE) a publié un document, remis à jour en 2009 (CIE, 2009)<sup>11</sup>, qui définit notamment des courbes de sensibilité spectrale des cellules ganglionnaires à mélanopsine de la rétine<sup>12</sup>.

- *Éblouissement*

Les normes concernant l'éblouissement n'ont pas évolué depuis 2010. L'industrie de l'éclairage utilise les indices normatifs d'éblouissement définis par la CIE, notamment l'UGR (*Unified Glare Rating*). La formule de l'UGR a été initialement élaborée pour des luminaires intérieurs équipés de tubes fluorescents. La validité de la mise en application de l'UGR aux systèmes d'éclairages intégrant des LED pose question. La publication en 2013 de la CIE, « *Review of Lighting Quality Measures for Interior Lighting with LED Lighting Systems* » CIE 205:2013, conclut qu'un nouveau système d'évaluation de l'éblouissement est nécessaire pour l'éclairage à LED.

- *Effets sanitaires liés à la modulation temporelle de la lumière*

Depuis 2015, de nouvelles normes et documents techniques ont été élaborés ou remis à jour par la plupart des organismes de normalisation pour décrire les phénomènes liés à la modulation temporelle de la lumière. Cependant, il n'existe pas de réglementation européenne ou française limitant la modulation temporelle de la lumière émise par les lampes et les luminaires. La réglementation sur l'éclairage (en matière d'écoconception et d'étiquetage) est en cours de révision par la Commission européenne ; des aspects concernant la modulation temporelle de la lumière devraient figurer dans le texte en préparation.

### 3.3 Risques pour la santé humaine liés à l'exposition à la lumière des LED

Les risques pour la santé humaine liés à l'exposition à la lumière des LED sont essentiellement dus à la composition spectrale d'une part et à la modulation temporelle de la lumière d'autre part.

Parmi les effets sanitaires des LED, ceux liés à la lumière bleue que sont la phototoxicité et la perturbation des rythmes circadiens sont très dépendants de l'âge de la personne exposée. En effet, le cristallin joue notamment le rôle de filtre à lumière bleue dans l'œil et sa transmittance évolue fortement avec l'âge. Les enfants naissent avec un cristallin clair, laissant passer toute la lumière bleue pour atteindre un taux de filtrage optimal vers l'âge de 20 ans. Les personnes de plus de 60 ans ont un taux de filtrage de la lumière bleue environ deux fois supérieur à une personne de 20 ans.

On distingue les sources lumineuses (ou objets lumineux) émettant de la lumière bleue, des objets qui ont une couleur bleue. Dans le premier cas, le spectre lumineux reçu par l'œil est (souvent) enrichi en lumière bleue. La quantité de lumière reçue par la rétine dans la bande bleue peut être importante et avoir des effets phototoxiques sur l'œil et un effet perturbateur sur les rythmes biologiques. Dans le second cas, la couleur bleue des objets et matériaux environnants, sous un éclairage classique, résulte de la réflexion d'une partie du spectre et a pour effet d'absorber une

---

distance seuil et des mentions suivantes : « *il convient que le luminaire soit positionné de telle manière que la vision prolongée du luminaire à une distance inférieure à  $x$  m ne soit pas attendu* » et « *ne pas fixer la source lumineuse en fonctionnement* ».

<sup>11</sup> CIE 158:2009 : *ocular lighting effects on human physiology and behavior*.

<sup>12</sup> La mélanopsine est un photopigment présent dans la rétine et les cellules ganglionnaires sensibles à la lumière.

partie de la puissance lumineuse. La puissance de la source lumineuse est globalement atténuée, et la perception colorée peut avoir des effets apaisants.

### **3.3.1. Perturbation des rythmes circadiens, perturbation du sommeil, effet sur les performances cognitives et le niveau de vigilance**

#### 3.3.1.1 Caractérisation du danger

##### o *Perturbations des rythmes circadiens*

La lumière reçue par la rétine a deux effets majeurs : elle permet la formation d'images (effets visuels) et transmet à l'organisme une indication du moment de la journée (effet non visuel). Cet effet non visuel implique les cellules ganglionnaires à mélanopsine (CGM) de la rétine qui ont une sensibilité spectrale particulière : elles sont fortement stimulées par la lumière bleue, avec un pic de sensibilité aux environs de 480 nm. Les CGM envoient leurs messages vers les noyaux supra-chiasmatiques de l'hypothalamus, siège de l'horloge circadienne centrale. Cette horloge centrale distribue le message vers le reste du corps, afin de synchroniser l'ensemble des fonctions biologiques avec le rythme jour/nuit. Ainsi, une régulation adéquate de l'activité des CGM est primordiale pour la bonne synchronisation des rythmes biologiques des organismes avec leur environnement. La bande de longueurs d'ondes dite « mélanopique » (bleu turquoise, 480 - 490 nm) est ainsi liée à des effets sur la rythmicité circadienne.

L'horloge biologique centrale détermine la production d'une hormone, appelée mélatonine, dont la sécrétion commence en soirée environ deux heures avant le coucher, atteint un niveau maximum vers le milieu de la nuit, pour revenir à des niveaux très bas voire indétectables le matin et le reste de la journée. Ainsi, le rythme journalier des concentrations circulantes de mélatonine est un indicateur fiable de l'activité de l'horloge biologique et de ses perturbations.

La synchronisation efficace de l'horloge circadienne centrale, et donc des fonctions biologiques qui en dépendent, notamment le rythme de veille/sommeil, nécessite une intensité de lumière importante durant la journée et une obscurité totale pendant la nuit. Le mode de vie actuel, notamment urbain, tend de plus en plus à déréguler le rythme journalier naturel lumière/obscurité avec d'une part une journée passée à l'intérieur (accompagnée par une baisse d'intensité lumineuse) et d'autre part une soirée et une nuit exposées à de multiples sources lumineuses (éclairages, écrans).

Il existe un nombre important de publications étudiant la perturbation des rythmes circadiens liée à une exposition à la lumière en soirée ou la nuit. Les résultats de plusieurs études expérimentales menées chez l'Homme, au cours desquelles les personnes étaient soumises à des lumières riches en bleu issues d'éclairages artificiels ou d'écrans (ordinateurs, téléphones, tablettes, ...) convergent et indiquent que la synthèse nocturne de mélatonine est retardée ou inhibée par une exposition, même très faible, à de la lumière riche en bleu.

L'intensité de la perturbation circadienne semble dépendre de l'intensité lumineuse, du moment et de la durée d'exposition, mais également de l'historique de l'exposition de l'individu à la lumière dans la journée. Cependant, une valeur aux alentours de 10-40 lux, voire en dessous (niveau très faible pouvant être largement dépassé en éclairage domestique) suffit pour observer un impact sur l'horloge circadienne (témoigné par la suppression de la sécrétion nocturne de la mélatonine).

En conclusion, compte tenu des éléments de preuve suffisants apportés par les études réalisées chez l'Homme, la perturbation des rythmes circadiens induite par l'exposition à une lumière riche en bleu en soirée ou la nuit est considérée comme avérée.

Par ailleurs, des travaux expérimentaux chez l'animal ont démontré que la mélatonine circulante de la mère traverse la barrière placentaire pour entrer dans la circulation du fœtus, qui possède des récepteurs à la mélatonine. Ainsi, la mélatonine maternelle peut agir sur le développement du fœtus, notamment sur la mise en place de son système circadien. La nuit, l'exposition de la mère à la lumière modifie les niveaux de mélatonine et induit un effet prénatal dont les conséquences persisteraient chez l'adulte (effets sur les rythmes circadiens, effets métaboliques, etc.). On peut

raisonnablement supposer que chez l'Homme l'effet de l'éclairage moderne la nuit sur la sécrétion de mélatonine maternelle impacte négativement le développement du fœtus *in utero*.

La perturbation des rythmes circadiens est par ailleurs associée à d'autres effets sanitaires<sup>13</sup> (perturbation de la qualité et de la quantité de sommeil, troubles métaboliques, risque augmenté de cancer - notamment le cancer du sein -, pathologies cardiovasculaires, effets sur la santé psychique). Cependant, le lien direct entre l'exposition à la lumière riche en bleu en soirée ou la nuit et la survenue de ces effets sanitaires, bien que fortement suspecté, n'est pas établi à ce jour chez l'Homme.

- *Perturbation du sommeil*

La plupart des travaux scientifiques disponibles montrent que la lumière bleue altère la régulation du sommeil par le biais des perturbations circadiennes. Les éléments de preuve apportés par les études réalisées chez l'Homme sont suffisants pour conclure à un effet avéré de l'exposition à une lumière riche en bleu en soirée sur la latence à l'endormissement, la durée et la qualité du sommeil.

- *Effet sur le niveau de vigilance et les performances cognitives*

Plusieurs études ont montré que l'exposition à la lumière bleue (notamment issues de LED) de jour comme de nuit améliore les performances cognitives et augmente le niveau de vigilance. Ainsi, un certain nombre d'études se sont intéressées aux effets de l'éclairage, et en particulier à la lumière bleue, sur les performances de travailleurs de nuit. L'objectif est l'optimisation à court terme de la vigilance et la baisse de la somnolence afin de réduire les accidents industriels ou routiers et d'améliorer les performances et la productivité. Il s'agit d'un enjeu important de nos sociétés contemporaines. Cependant, la question d'impacts éventuels sur la santé, en raison notamment d'une possible phototoxicité accrue de la lumière la nuit, reste à définir.

### 3.3.1.2 Caractérisation des sources lumineuses à LED et des expositions

L'évaluation de l'exposition à la lumière bleue pour ses effets sur la mélatonine et les rythmes circadiens est étudiée dans la bande dite « mélanopique » (bleu turquoise, 480 - 490 nm).

La quantité de lumière bleue émise par un objet à LED peut être estimée à partir de sa température de couleur, exprimée en Kelvin (K), et de son niveau d'éclairement sur une surface, exprimé en lux (notamment sur le plan de l'œil).

Les campagnes de mesures menées pour décrire la nature et la quantité de lumière émise par des systèmes à LED ont montré que la lumière émise par des écrans de téléviseurs, d'ordinateurs, de téléphones mobiles ou encore de tablettes présentait un faible niveau d'éclairement mais était riche en bleu. En effet, les écrans d'ordinateurs à LED présentaient des températures de couleur variant de 4 500 K à 6 900 K et des éclaircements sur le plan de l'œil variant de 20 à 60 lux. Pour les écrans à LED de *smartphones* ou de tablettes électroniques, les températures de couleur variaient de 4 100 K à 7 000 K et les éclaircements sur le plan de l'œil de 2 à 10 lux. Pour ce qui est de l'éclairage domestique, les lampes à LED disponibles sur le marché peuvent proposer des températures de couleur variant de 2 500 K (lumière peu riche en bleu) à 6 900 K (lumière très riche en bleu).

Concernant l'exposition des personnes à la lumière bleue dans la bande mélanopique, aucune donnée n'a été identifiée dans la littérature scientifique. Les scénarios d'exposition à la lumière développés pour cette expertise, représentant des conditions de vie typiques pour différentes populations, ont mis en évidence que l'exposition dans la bande mélanopique est similaire avec des éclairages à LED modérément riches en bleu (température de couleur variant de 2 700 K à 4 000 K), des lampes fluocompactes ou des lampes halogènes. Néanmoins, avec des scénarios de vie intégrant des situations de type « pire cas » (LED très riches en bleu, température de couleur autour de 6 500 K), l'exposition dans la bande mélanopique est augmentée par rapport aux autres technologies d'éclairage, et ce quelle que soit la population concernée. Par ailleurs, l'utilisation

<sup>13</sup> Évaluation des risques sanitaires liés au travail de nuit, rapport d'expertise collective de l'Anses, Juin 2016.

d'écrans et d'objets à LED est susceptible d'augmenter l'exposition à la lumière bleue dans la bande mélanopique.

#### 3.3.1.3 Estimation du risque sanitaire

Les données disponibles ne permettent pas de quantifier précisément le risque de perturbation des rythmes circadiens, ou de perturbation du sommeil lié à l'exposition aux LED. Les experts du groupe de travail, sur la base d'une approche qualitative, estiment néanmoins, au vu de ce qui précède, que le risque de perturbation circadienne associé à l'exposition aux lumières à LED riches en bleu en soirée ou la nuit est élevé.

En particulier, l'exposition avant le coucher aux éclairages et écrans à LED de téléviseurs et technologies de communication, enrichis en lumière bleue, serait susceptible de nuire à la durée et à la qualité du sommeil et d'avoir un impact sur les fonctions cognitives.

#### 3.3.1.4 Populations sensibles

Les études disponibles ont montré des effets de retardement de l'heure du coucher, dus à l'altération de fonctions non-visuelles et notamment la suppression de la mélatonine, encore plus marqués chez les enfants, les adolescents et les jeunes adultes (avant 20 ans). Un facteur évident est la transparence du cristallin, plus importante chez les jeunes, qui laisse passer plus de lumière que chez les adultes. En plus de l'utilisation très répandue d'appareils à écrans à LED chez les adolescents, les changements comportementaux, hormonaux et circadiens qui interviennent à cet âge (allongement de la période endogène du cycle circadien) sont probablement aussi impliqués.

De manière plus générale, plusieurs populations ont pu être identifiées comme étant plus spécifiquement sensibles au risque de perturbation circadienne et du sommeil associés à une exposition aux LED :

- les nourrissons, les enfants et les adolescents, les jeunes adultes (en raison d'un cristallin clair) ; les personnes aphakes (sans cristallin) et pseudo-phakes (ayant un cristallin artificiel) ;
- les femmes enceintes (effets sanitaires potentiels sur l'enfant à naître) ;
- les travailleurs de nuit<sup>14</sup> ;
- les personnes souffrant de pathologies ou d'anomalies oculaires, les personnes souffrant de troubles du sommeil.

### 3.3.2 Effets et pathologies oculaires

#### 3.3.2.1 Caractérisation du danger

La phototoxicité est un mécanisme d'altération cellulaire induit par la lumière qui peut conduire à la mort cellulaire. L'exposition à une lumière intense et aiguë est phototoxique car elle entraîne la perte irréversible de cellules rétiniennes qui peut conduire à une baisse de l'acuité visuelle partielle, définitive (scotome<sup>15</sup>, diminution du champ visuel, baisse de la résolution) ou totale (cécité). Une exposition chronique à des lumières phototoxiques de faible intensité accélère le vieillissement des tissus rétiniens, pouvant conduire à une baisse de l'acuité visuelle et à des maladies dégénératives telles que la DMLA (dégénérescence maculaire liée à l'âge).

En ce qui concerne les effets toxiques d'une lumière riche en bleu sur l'œil, les données disponibles mettent en évidence le fait que :

<sup>14</sup> Les travailleurs de nuit sont particulièrement sensibles dans le sens où ils sont potentiellement exposés de manière importante aux éclairages à LED.

<sup>15</sup> Lacune dans le champ visuel due à l'insensibilité de certains points de la rétine.

- l'effet phototoxique sur la rétine d'une exposition aiguë (inférieure à 8 heures) à une lumière riche en bleu est avéré ;
- l'effet de l'exposition chronique de la rétine (plusieurs années) à la lumière riche en bleu sur la contribution à la survenue de dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA) est avéré ; les effets à long terme des éclairages artificiels sur l'œil n'étant pas étudiés à ce jour, ces conclusions se basent sur des études épidémiologiques prenant en compte l'exposition à la lumière solaire (lumière riche en bleu) ;
- au-delà de la dose phototoxique reçue, le moment de l'exposition joue un rôle important. Certaines études expérimentales, aujourd'hui limitées à l'animal, démontrent une vulnérabilité augmentée de la rétine à la phototoxicité pendant la nuit, en raison d'un rythme journalier de photosensibilité et des effets perturbateurs sur l'horloge rétinienne endogène.

De nombreuses études montrent que les valeurs limites d'exposition (VLE) retenues par l'Icnirp pour la toxicité rétinienne de la lumière ne sont pas suffisamment protectrices. Certains auteurs (Hunter *et al.*, 2012)<sup>16</sup> ont estimé que ces VLE étaient supérieures d'un facteur 20 par rapport à des VLE protectrices. De plus, l'expertise a permis de souligner que ces VLE ne sont proposées que pour une exposition aiguë (exposition inférieure à 8 h) et éludent la question d'une exposition à long terme. Les experts ont par ailleurs mentionné l'existence de nouveaux systèmes UV-LED<sup>17</sup> qui pourraient présenter des risques phototoxiques.

Par ailleurs, l'examen de la littérature scientifique sur la myopie et le syndrome sec<sup>18</sup> a conduit à conclure que :

- l'effet de la lumière riche en bleu sur la myopie est possible (positif ou négatif) ;
- l'effet de la lumière riche en bleu sur la survenue du syndrome sec est possible.

### 3.3.2.2 Caractérisation des sources lumineuses à LED et des expositions

L'évaluation de l'exposition à la lumière bleue est étudiée dans la bande dite « phototoxique » (bleu profond, 450 – 470 nm).

Les mesures physiques effectuées dans le cadre de cette expertise montrent que certains dispositifs lumineux à LED testés (des lampes-torches, des lampes frontales, des jouets ou certains phares automobiles - notamment les feux de croisement -, etc.), émettent une lumière riche en bleu (dispositifs classés en groupe de risque 2, temps d'exposition admissible inférieur à 100 s, selon les valeurs limites d'exposition définies par l'Icnirp). Certains écrans de téléphones et tablettes électroniques utilisant la technologie LED émettent une lumière à des niveaux d'intensité assez bas, mais là aussi systématiquement riche en bleu. On note par ailleurs l'apparition sur le marché de LED bleues décoratives et l'utilisation de LED dans un nombre croissant d'applications (par exemple dans l'éclairage agricole, pour l'éclairage d'aquarium, ...).

L'addition d'un éclairage artificiel à l'éclairage naturel est de nature à modifier les doses oculaires reçues par la cornée et par la rétine dans la bande phototoxique (jusqu'à 50 % d'augmentation). La comparaison de la contribution des éclairages à LED à l'exposition globale des personnes, par rapport à d'autres technologies d'éclairage et selon des scénarios définis, a permis de mettre en évidence les éléments suivants :

<sup>16</sup> Hunter, Jennifer J., Jessica I. W. Morgan, William H. Merigan, David H. Sliney, Janet R. Sparrow, et David R. Williams. 2012. « The Susceptibility of the Retina to Photochemical Damage from Visible Light ». *Progress in Retinal and Eye Research* 31 (1): 28-42.

<sup>17</sup> Nouvelle génération de LED dont le pic de lumière bleue est décalé dans le domaine de l'ultraviolet (vers 410 nm).

<sup>18</sup> Le syndrome sec se manifeste par un mauvais fonctionnement du système lacrymal qui entraîne une sécheresse au niveau de la surface oculaire (cornée, conjonctive, etc.). Ce syndrome se manifeste par un inconfort oculaire avec des sensations de picotements ou une impression de corps étranger dans l'œil.

- de façon générale, les éclairages à LED augmentent le déséquilibre des longueurs d'onde en faveur de la lumière bleue par rapport à la lumière rouge, en comparaison à d'autres éclairages, à température de couleur égale ;
- l'exposition dans la bande phototoxique est d'autant plus importante que la température de couleur est élevée (lumière riche en bleu), quelle que soit la technologie d'éclairage (LED ou non).

Pour ce qui concerne la dose phototoxique reçue par la rétine, les résultats issus de l'étude des scénarios d'exposition montrent que les LED ne se distinguent des autres technologies que dans le scénario « pire cas », dans lequel les éclairages à LED utilisés sont très riches en bleu (température de couleur élevée autour de 6 500 K). Pour autant, les experts soulignent que ce scénario « pire cas » peut correspondre au cas de certaines populations très peu exposées à la lumière naturelle et soumises à des éclairages riches en bleu sur leur lieu de travail (par exemple, en hiver, il fait nuit le matin au départ du domicile et le soir au retour du domicile, la journée étant passée sous un éclairage exclusivement artificiel riche en bleu).

Les experts du groupe de travail signalent le développement commercial important de petites LED décoratives nues émettant de la lumière bleue (guirlandes, éclairages d'ambiance, ...). Ces LED peuvent augmenter l'exposition dans la bande phototoxique et ce même à de faibles luminances. En effet, les photons composant la lumière bleue sont plus énergétiques que les photons associés à des longueurs d'onde plus grandes. Ainsi, ils peuvent induire des réactions photochimiques comparables à celles provoquées par les rayonnements ultraviolets. De plus, la perception visuelle humaine est moins sensible à la lumière bleue. Des niveaux d'énergie élevés de lumière bleue peuvent donc être reçus par la rétine sans que cela ne crée une forte sensation visuelle. Cette lumière de couleur bleue n'étant pas nécessairement éblouissante, sa fixation prolongée est possible, notamment par les enfants.

#### 3.3.2.3 Estimation du risque sanitaire

Les données disponibles ne permettent pas de quantifier précisément le risque de survenue de pathologies oculaires lié à l'exposition aux LED. Cependant, sur la base d'une approche qualitative, les experts estiment au vu de ce qui précède que le risque de toxicité aiguë des LED à usage domestique « blanc chaud » (basse température de couleur) est faible.

Il faut noter que des dispositifs lumineux appartenant à un groupe de risque 2 (lampes-torches, lampes frontales, jouets ou certains phares automobiles) sont disponibles sur le marché. Le risque de survenue de pathologies oculaires lié à l'exposition à ces dispositifs est augmenté et ce d'autant plus pour les populations sensibles. De même, des objets émettant spécifiquement de la lumière bleue (par exemple les LED décoratives), même à faible intensité, peuvent augmenter l'exposition dans la bande phototoxique.

En raison du manque de données sur les effets chroniques d'une exposition à la lumière froide à faibles doses (écrans, par exemple), le niveau de risque associé à une exposition chronique à des LED riches en bleu ne peut être évalué à ce jour.

#### 3.3.2.4 Populations sensibles

Plusieurs populations sensibles ont pu être identifiées au vu des données de la littérature, s'agissant du risque lié aux pathologies oculaires :

- les nourrissons, les enfants, les adolescents, les jeunes adultes (cristallin clair) ; les personnes aphakes (absence de cristallin) et pseudo-phakes (cristallin artificiel) ;
- les personnes souffrant de pathologies oculaires (œil sec, DMLA, glaucome, rétinopathies...) ; les personnes souffrant de troubles moteurs ou cognitifs qui réduisent les capacités d'évitement ou de prise de décision face à une lumière trop intense ; les personnes prenant des médicaments photosensibilisants ou exposés à des polluants photosensibilisants ;

- les travailleurs de nuit<sup>19</sup> ou tout professionnel potentiellement exposé de manière importante aux éclairages à LED (les chirurgiens, les dentistes, les éclairagistes, les revendeurs d'éclairages, les métiers des arts de la scène, les personnes travaillant dans les installations sportives, les personnes travaillant dans l'agroalimentaire utilisant des LED (serres, aquaculture), etc.).

### 3.3.3 Éblouissement et confort visuel

#### 3.3.3.1 Caractérisation du danger

L'éblouissement se définit par des conditions de vision dans lesquelles une personne éprouve une gêne ou une réduction de l'aptitude à distinguer des détails ou des objets, par suite d'une répartition défavorable des luminances ou d'un contraste excessif. Il convient de distinguer l'éblouissement perturbateur (éblouissement d'incapacité), qui diminue les capacités et les performances visuelles du sujet, de l'éblouissement inconfortable qui apporte une sensation de gêne au sujet, sans provoquer de baisse de performance visuelle.

Plusieurs facteurs modulent l'incapacité due à l'éblouissement : la quantité de lumière envoyée dans l'œil par la source elle-même, mais aussi la distance à la source éblouissante et l'âge de l'observateur. La composition spectrale de la lumière, en revanche, ne modifie pas le phénomène d'éblouissement d'incapacité.

Il apparaît que la multiplicité des sources ponctuelles visibles dans les luminaires (matrices à LED), aggrave notablement l'inconfort. Toutes les études s'accordent à montrer que (1) les sources non-uniformes sont plus éblouissantes que les sources uniformes de même luminance moyenne et (2) plus le contraste est élevé, plus la sensation d'inconfort est grande. De plus, la diffusion de la lumière dans les milieux oculaires augmentant avec l'âge, l'inconfort augmente également. Pour ce qui concerne tant les sources à LED que les sources lumineuses « traditionnelles », la température de couleur ne semble pas être un facteur déterminant du confort visuel. Cependant, à température de couleur égale, la composition spectrale et en particulier l'enrichissement en bleu du spectre a des conséquences probables sur l'inconfort visuel.

Les effets à long terme de la répétition des éblouissements ne sont pas connus à ce jour. Il existe par ailleurs une grande variabilité interindividuelle dans la population générale quant à l'appréciation des situations éblouissantes.

#### 3.3.3.2 Caractérisation des sources lumineuses à LED et des expositions

La luminance, mesurée en vision directe d'une source lumineuse à courte distance, exprimée en  $\text{cd/m}^2$ <sup>20</sup>, permet d'évaluer le niveau d'éblouissement que peut provoquer cette source de lumière. Les lampes à LED testées dans le cadre de cette expertise présentent des niveaux de luminance disparates, certaines étant très éblouissantes, notamment dans les spots à LED.

Un autre aspect du confort visuel est lié au rendu des couleurs. L'indice de rendu de couleur (IRC) représente la capacité d'une lumière à rendre compte d'une couleur de manière fidèle. Un IRC égal à 100 désigne une lumière optimale, et il est admis qu'un IRC est jugé acceptable au-dessus de 80. Les lampes à LED ne sont pas encore à ce jour au niveau des lampes halogènes, dont les IRC avoisinent 100, mais présentent des performances similaires aux lampes fluocompactes, avec des IRC mesurés parfois au-dessus de 80. Par rapport à la précédente expertise de l'Anses publiée en 2010, la technologie à LED propose aujourd'hui un rendu de couleur de meilleure qualité.

#### 3.3.3.3 Estimation du risque sanitaire

<sup>19</sup> Les travailleurs de nuit sont particulièrement sensibles dans le sens où ils sont potentiellement exposés de manière importante aux éclairages à LED.

<sup>20</sup>  $\text{cd/m}^2$  : candelas par mètre carré.

Les données disponibles ne permettent pas de quantifier précisément le risque d'éblouissement perturbateur ou d'inconfort visuel lié à l'exposition aux LED. Cependant, les experts, sur la base d'une approche qualitative, estiment au vu de ce qui précède que certains dispositifs d'éclairage incluant des LED peuvent conduire à un risque d'éblouissement important : les lampes torches, les phares automobiles, les spots à LED, matrices de LED, etc. De plus, même si certaines lampes à LED ont un meilleur rendu de couleur qu'il y a quelques années, celui-ci reste perfectible.

#### 3.3.3.4 Populations sensibles

L'âge est un facteur aggravant le risque d'éblouissement associé aux LED, de jour comme de nuit. La dégradation de l'acuité visuelle s'accélère au-delà de l'âge de 60 ans, de façon plus ou moins prononcée selon les personnes. Le voile de luminance généré autour des sources augmente considérablement avec l'âge, abaissant la perception du contraste des objets et, de ce fait, les performances visuelles.

Les sujets migraineux semblent être spécifiquement sensibles à l'éblouissement causé par certaines irrégularités de la répartition spectrale d'énergie de la lumière.

### 3.3.4 Effets cutanés

#### 3.3.4.1 Caractérisation du danger

La lumière bleue pourrait avoir un effet nocif sur la peau, accélérant le vieillissement et retardant les processus de cicatrisation, alors que l'exposition à des longueurs d'onde comprises entre 590 et 700 nm (lumière rouge) aurait des effets inverses. Les experts concluent que l'effet d'une exposition à la lumière riche en bleu sur la survenue de pathologies cutanées est possible.

Par ailleurs, l'effet cancérigène (induction de mélanome) retardé induit par une photothérapie à LED bleues pour traiter l'ictère néonatal devrait faire l'objet d'une attention particulière. Des cinq études réalisées pour évaluer le risque de développer des lésions mélanocytaires bénignes ou malignes suite à une photothérapie néonatale à la lumière bleue, trois ont montré un nombre accru de nævi communs ou atypiques chez les enfants exposés.

#### 3.3.4.2 Caractérisation des sources lumineuses à LED et des expositions

Il n'existe pas de données d'exposition spécifiques aux émissions de lumières bleues sur la peau. Néanmoins, le groupe de risque photobiologique renseigne sur la quantité de lumière bleue émise par les éclairages à LED (*cf.* § portant sur la caractérisation de l'exposition pour les pathologies oculaires).

#### 3.3.4.3 Estimation du risque sanitaire

Les données disponibles ne permettent pas de quantifier l'existence d'un risque pour la peau, lié à l'exposition aux LED. Les experts estiment, sur la base d'une approche qualitative, compte tenu des niveaux d'exposition associés à un usage domestique des éclairages à LED et de la faible profondeur de pénétration des rayonnements optiques bleus dans la peau, que le risque de survenue de pathologies cutanées lié à une exposition à la lumière bleue issue des LED est faible.

#### 3.3.4.5 Populations sensibles

Les experts ont identifié certaines populations potentiellement sensibles :

- les nouveau-nés dans le cas d'une photothérapie à LED bleues prescrite pour traiter l'ictère néonatal ;
- les personnes atteintes de certaines pathologies cutanées (lésions épithéliales, plaies, ...) ; ces populations auraient un risque accru de voir survenir ou s'aggraver des lésions cutanées lors d'une exposition à la lumière bleue.

### 3.3.5 Autres troubles (migraines, maux de tête, fatigue visuelle, accidents, crises d'épilepsie)

### 3.3.5.1 Caractérisation du danger

La modulation temporelle d'un système d'éclairage est principalement caractérisée par sa fréquence de modulation et le taux de modulation associé, exprimé en pourcentage de l'intensité lumineuse (valeurs comprises entre 0 et 100 %). Selon sa fréquence, cette modulation peut être perceptible ou non par le système visuel humain. Trois effets visuels (perception consciente de la modulation) distincts ont été décrits : le papillotement (*flicker*), l'effet stroboscopique et l'effet de réseau fantôme. Des effets sanitaires peuvent être induits directement par ces effets visuels, ou apparaître sans perception consciente d'une quelconque modulation. Les effets sanitaires qui peuvent découler de la perception consciente ou non de la modulation sont les crises d'épilepsie, les accidents de la route et ceux liés à l'utilisation de machines, ainsi que les migraines, les maux de tête et la fatigue visuelle.

Les effets comme les maux de tête, les migraines, la fatigue visuelle, peuvent être associés à des fréquences de modulation temporelle comprises entre 80 et 120 Hz. Les éléments de preuve associés apportés par les études sont limités chez l'Homme.

Des phénomènes comme l'effet stroboscopique (immobilité ou ralentissement apparent d'un objet en mouvement) ou l'effet de réseau fantôme (rémanence de l'image lors d'une saccade visuelle) peuvent se produire à des fréquences élevées de modulation (supérieures à environ 80 Hz). Dans un contexte industriel ou domestique, il est vraisemblable que l'effet stroboscopique impacte la sécurité lors de l'usage de machines ou d'outils.

La modulation temporelle de la lumière peut également être associée au déclenchement de crises chez les personnes souffrant d'épilepsie. Cependant, les fréquences de modulation des lampes et luminaires à LED disponibles sur le marché sont trop élevées pour déclencher des crises chez ces personnes. Il subsiste néanmoins une possibilité de déclenchement de crises dans la population des sujets épileptiques lors d'une exposition à des lampes et luminaires à LED présentant une modulation temporelle anormale (produits défectueux ou incompatibilité avec le variateur).

Par ailleurs, certains éclairages autonomes sur les vélos (rechargement par induction magnétique) sont très fortement modulés (pourcentage de modulation de 100 %) à des fréquences variant avec la vitesse du cycliste. À certaines vitesses, les modulations temporelles se situent dans la bande la plus critique pour le déclenchement de crises d'épilepsie, autour de 15 Hz.

Dans tous ces cas, la modulation temporelle de la lumière est associée à un inconfort visuel et à une diminution de l'ergonomie visuelle, notamment aux postes de travail dans le cadre professionnel.

### 3.3.5.2 Caractérisation des sources lumineuses à LED et des expositions

Des résultats issus de la littérature scientifique portant sur la modulation temporelle de lampes à LED ont été agrégés avec des mesures réalisées dans le cadre de cette expertise ; sur les 53 lampes testées :

- 18 lampes (environ 34 %) ont une modulation temporelle très faible (pourcentage de modulation inférieur à 1 %) ;
- 12 lampes (environ 23 %) ont un pourcentage de modulation temporelle compris entre 1 % et 15 %, semblable à celui des lampes halogènes et fluocompactes ;
- 14 lampes (environ 26 %) ont un pourcentage de modulation compris entre 12 % et 70 %, des valeurs significativement plus élevées que celles des technologies halogènes et fluocompactes ;
- 9 lampes (environ 17 %) ont un pourcentage de modulation très élevé, supérieur à 70 % et pouvant atteindre 100 %.

On estime qu'environ 43 % des lampes à LED à usage domestique ont des performances dégradées (taux de modulation supérieur à 15 % à 100 Hz) en matière de modulation temporelle par rapport aux technologies halogènes et fluocompactes.

L'effet stroboscopique est particulièrement visible avec des lampes et luminaires à LED ayant une forte modulation temporelle à 100 Hz.

Certaines lampes et luminaires à LED possèdent des niveaux de modulation suffisamment élevés pour que l'effet de réseau fantôme soit perceptible, spécialement en situation de conduite automobile.

#### 3.3.5.3 Estimation du risque sanitaire

Pour les personnes souffrant d'épilepsie, les données disponibles ne permettent pas de quantifier le risque de déclenchement de crise associé à une modulation temporelle d'un système d'éclairage à LED.

Les experts estiment par ailleurs qu'en raison du nombre limité de données d'exposition, le risque associé aux effets (maux de tête, migraine, fatigue visuelle) intervenant dans la gamme de fréquences (80 – 120 Hz) associé à une exposition aux LED n'est pas connu.

Les données scientifiques ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet de la perception de l'effet stroboscopique ou de réseau fantôme sur l'accidentologie lors de la manipulation de machines ou d'outils, ou sur les routes.

#### 3.3.5.4 Populations sensibles

Les études portant sur la maturation du système de perception visuelle des contrastes chez l'Homme indiquent que la sensibilité maximale aux contrastes temporels est atteinte chez l'adolescent et le jeune adulte. Il s'agit donc d'une catégorie de population particulièrement sensible aux lumières modulées.

Les études épidémiologiques montrant une association entre lumière modulée et déclenchement de migraines désignent les personnes souffrant de migraine comme une population sensible aux lumières modulées.

Les travaux menés en utilisant des tubes fluorescents d'anciennes générations ont montré que certaines personnes ont une sensibilité accrue aux modulations temporelles de la lumière à la fréquence de 100 Hz. De plus, des études montrent que certains individus perçoivent visuellement le papillotement à 100 Hz.

Ainsi, plusieurs groupes de populations sensibles ont pu être identifiés concernant certains effets sanitaires liés à la modulation temporelle de la lumière :

- pour ce qui concerne les maux de tête, la migraine et la fatigue visuelle :
  - les enfants, adolescents et jeunes adultes ;
  - les personnes souffrant de migraines ;
- pour ce qui concerne le risque d'accident lié à l'effet stroboscopique ou à l'effet de réseau fantôme :
  - les opérateurs de machines et d'outils et les conducteurs de véhicules ;
  - les personnes souffrant de troubles moteurs ou cognitifs réduisant leurs capacités d'évitement ou de prise de décision ;
  - les enfants, adolescents et jeunes adultes ;
- pour ce qui concerne le déclenchement de crises d'épilepsie, les personnes souffrant d'épilepsie.

### 3.4 Efficacité des moyens de protection

Différentes solutions revendiquant une atténuation ou une suppression des effets de la lumière bleue existent : filtres incorporés aux écrans d'ordinateurs ou s'adaptant aux lunettes correctrices, systèmes d'éclairage programmables qui modulent la quantité de lumière mélanopique (longueur d'onde située autour de 480 - 490 nm) en fonction de l'heure.

D'après les mesures réalisées pour la présente expertise :

- les lunettes spécifiques de protection contre la lumière bleue ont une efficacité de filtrage plus importante que les verres ophtalmiques traités. Aucun de ces deux systèmes n'est cependant assez efficace pour être considéré comme un équipement de protection individuelle<sup>21</sup> (EPI) contre le risque de phototoxicité rétinienne aiguë résultant d'une exposition prolongée à une source LED d'intensité lumineuse importante ;
- selon les moyens de protection testés, la capacité de filtrage du rayonnement bleu dans la bande mélanopique est très variable : elle est très faible pour les verres traités, voire inexistante, malgré les revendications avancées par les fabricants ou distributeurs de ces produits. Il est impossible d'affirmer que ce filtrage est suffisant pour empêcher la diminution de la sécrétion de mélatonine induite par une exposition lumineuse en soirée et les effets de retard à l'endormissement qui peuvent être associés ;
- pour les écrans testés revendiquant une limitation de l'émission de lumière bleue, aucune efficacité réelle n'a été observée. La diminution de la température de couleur (passage au blanc chaud) et de la luminosité des écrans a, en revanche, montré une certaine efficacité sur la diminution de la quantité de bleu dans le spectre.

### 3.5 Impact des LED sur l'environnement

#### 3.5.1 Danger pour la biodiversité

La diversité du vivant se reflète dans la grande diversité des réponses métaboliques, physiologiques et comportementales de la faune et de la flore à la lumière. Ainsi, ce qui peut être un avantage pour une espèce donnée (animale ou végétale) peut s'avérer un inconvénient pour une autre. Des modifications des rythmes biologiques (journaliers et annuels), de l'orientation, de la répartition géographique, et de la migration des espèces peuvent ainsi être observées, à la suite d'une exposition à la lumière artificielle. Des effets indirects sont observés (à moyen et long termes), sur ces populations et leurs écosystèmes.

Les travaux de recherche sur l'impact de la lumière émise par les LED la nuit sur le vivant s'appuient encore beaucoup sur ceux se rapportant à la lumière artificielle en général. Ils concernent d'ailleurs un nombre encore très limité d'espèces. Quel que soit l'écosystème étudié, la tendance générale relevée dans la littérature scientifique montre, à long terme, une augmentation de la mortalité et un appauvrissement de la diversité des espèces animales et végétales étudiées dans les milieux éclairés la nuit, y compris par des éclairages à LED.

Selon la littérature scientifique, les effets de la lumière la nuit, notamment issue d'éclairages à LED, sur la faune et la flore et les écosystèmes, sont avérés pour toutes les espèces étudiées. Ces effets correspondent globalement à ceux de l'éclairage nocturne, parmi lesquels il faut distinguer ceux qui pourraient être spécifiquement liés à des caractéristiques propres aux LED (intensité, composition spectrale). Ces effets viennent s'ajouter aux autres pressions anthropiques (pollution chimique, barrières géographiques, réduction de l'espace vital, surexploitation...). L'extension continue des activités humaines, industrielles et de loisir, les nuisances physiques et chimiques auxquelles viennent s'ajouter les effets du changement climatique constituent autant de facteurs auxquels certaines populations animales et végétales seront probablement incapables de faire face, ce qui entraînera une accélération de la diminution de la biodiversité. Cependant, les données impliquant l'action combinée de ces multiples facteurs perturbants sont encore rarissimes.

#### 3.5.2 Pollution lumineuse

---

<sup>21</sup> À ce jour, il n'existe pas de norme fixant les méthodes d'essai et les exigences de performance pour des EPI vis-à-vis de la lumière bleue.

Le rapport d'expertise collective associé à cette synthèse propose une évaluation de l'effet du déploiement des LED (sources d'éclairage et d'affichage extérieurs notamment) sur la pollution lumineuse. Différents aspects ont été considérés, comme les effets sur le halo nocturne, les nuisances pour l'Homme (lumière intrusive, débordements lumineux, éblouissement, rythmes circadiens) et les nuisances pour les écosystèmes et la biodiversité.

Selon les experts du groupe de travail, le changement des technologies d'éclairage par des LED pourrait augmenter ou diminuer la pollution lumineuse, en fonction des choix retenus pour l'éclairage public, d'intérieur, de mise en valeur architecturale et paysagère, etc. Les catégories de systèmes d'éclairage à LED qui pourraient être responsables des plus grandes augmentations de la pollution lumineuse sont : les enseignes, les affiches et publicités lumineuses, ainsi que l'éclairage des zones commerciales, des zones agricoles (y compris les serres horticoles) et aquacoles et des zones industrielles. L'éclairage des parkings extérieurs de ces zones est également concerné. Dans ces catégories, la tendance est à l'augmentation du nombre et de l'intensité des points lumineux.

Le remplacement des lampes de l'éclairage public (sur la voirie) et d'intérieur par des LED pourrait contribuer à réduire la pollution lumineuse, en ciblant davantage les zones à éclairer (et donc en limitant la diffusion) et en modulant la qualité (longueur d'onde) et l'intensité de la lumière émise, ce que permet la technologie LED ; la condition associée est que le nombre de points lumineux à LED ne soit pas augmenté comparativement au nombre de points lumineux remplacés.

Malgré les résultats mis en avant ci-dessus, il est difficile d'évaluer l'impact global de la transition de l'éclairage existant vers les LED sur la pollution lumineuse.

### **3.5.3 Impacts liés au cycle de vie des lampes et luminaires à LED**

Plusieurs catégories d'impacts environnementaux sont définies lors de l'analyse du cycle de vie d'un produit : la consommation d'énergie, la quantité de déchets dangereux produite, la quantité d'eau utilisée, l'impact sur le réchauffement climatique, les effets toxiques sur la santé humaine, etc. Les résultats des études d'analyse du cycle de vie (ACV) des sources lumineuses analysées montrent que les lampes et luminaires à LED causent les impacts environnementaux les plus bas en comparaison avec d'autres technologies d'éclairage. Ceci est lié à une plus haute efficacité lumineuse des éclairages à LED par rapport aux autres sources. Le contenu des études d'ACV portant sur des lampes et luminaires varie cependant, en particulier dans les produits analysés et les méthodes choisies (l'unité fonctionnelle, les catégories d'impact, les étapes du cycle de vie incluses). Malgré des différences notables dans les méthodes d'ACV, les analyses ont généralement abouti à des résultats très similaires : c'est la phase d'utilisation des LED qui est majoritairement (70 à 99 %) responsable des impacts environnementaux, en raison de leur consommation d'énergie. Leur fabrication est responsable de la plupart des autres impacts.

Le CES note comme limitation, dans les ACV, l'absence de méthodologie pour évaluer les impacts de la lumière sur la santé humaine et l'environnement (faune et flore).

## Recommandations du CES

Sur la base des conclusions et recommandations du groupe de travail, le CES formule les recommandations suivantes visant à mieux protéger la santé humaine (population générale et travailleurs) et l'environnement vis-à-vis des effets liés à l'exposition aux systèmes à LED. Ces recommandations visent à limiter les effets néfastes liés à l'exposition aux LED en développant l'information de la population générale et en milieu de travail, et en améliorant l'encadrement normatif et réglementaire de l'usage des LED. Enfin, le CES souligne les efforts à mener en matière de recherche.

### Recommandations pour la protection de la population et de l'environnement, à destination des pouvoirs publics

Le CES recommande de développer des actions, notamment d'information, sur :

- la nécessité de limiter l'exposition à des lumières riches en bleu (issues de LED ou d'autres technologies), en privilégiant le recours à des éclairages de couleur chaude (température de couleur inférieure à 3 000 K) avant le coucher et pendant la nuit, particulièrement pour certains groupes de populations : enfants, adolescents, femmes enceintes (voir listes par effets sanitaires dans la partie 3). Notamment, le CES recommande de ne pas utiliser de veilleuse à lumière riche en bleu pour les nourrissons et les enfants et de limiter l'exposition des enfants et adolescents aux sources d'exposition à de la lumière riche en bleu (écrans d'ordinateurs, de tablettes, de téléphones mobiles, ...) la nuit et avant le coucher ;
- l'importance de renforcer le contraste lumineux entre le jour et la nuit en augmentant l'exposition à la lumière naturelle en journée et en limitant l'exposition à la lumière artificielle avant l'heure du coucher et la nuit ;
- l'effet phototoxique de la lumière associé à l'exposition à certains dispositifs d'éclairage à LED (lampes torches, lampes frontales, jouets, phares automobiles, guirlandes décoratives à lumière bleue) disponibles sur le marché, notamment pour les groupes de populations les plus sensibles comme les enfants ;
- l'efficacité très disparate des moyens de protection actuellement proposés vis-à-vis des effets néfastes pour la santé liés à l'exposition à des LED.

Dans un but de protection contre les effets néfastes liés à la pollution lumineuse pour l'humain et son environnement, le CES recommande :

- de mettre en œuvre des actions pour limiter les lumières intrusives dans l'habitat et ainsi réduire les risques de perturbations circadiennes ;
- de limiter le nombre d'installations lumineuses en extérieur, de réduire les surfaces des zones éclairées au strict nécessaire, d'améliorer le contrôle de leur directivité et d'en promouvoir une gestion raisonnée ;
- d'effectuer, là où l'éclairage s'impose, une étude d'impact de cet éclairage sur l'écosystème local dans les zones naturelles et périurbaines ;
- de créer des espaces protégés, sans éclairage artificiel.

### Recommandations pour la protection des travailleurs à destination des employeurs et de la médecine du travail

- considérant les effets phototoxiques de la lumière bleue et les effets potentiels de la modulation temporelle de la lumière, le CES rappelle l'obligation de limiter l'exposition des travailleurs à ces sources de lumière et de les informer des dangers associés ;

- par ailleurs, compte tenu des effets observés chez l'animal sur le développement du fœtus liés à l'exposition de la mère à la lumière la nuit, le CES recommande de limiter l'exposition des femmes enceintes à la lumière la nuit.

### **Recommandations concernant le cadre réglementaire et normatif dans un but de protection de la santé humaine et de l'environnement**

Au niveau national :

le CES recommande de faire respecter la réglementation sur l'extinction des éclairages intérieurs émis vers l'extérieur et l'illumination des façades de bâtiments (arrêté<sup>22</sup> du 25 janvier 2013 relatif à l'éclairage nocturne des bâtiments non résidentiels afin de limiter les nuisances lumineuses et les consommations d'énergie), et celle sur l'extinction des enseignes publicitaires (décret n° 2012-118<sup>23</sup> relatif à la publicité extérieure, aux enseignes et aux pré-enseignes).

Au niveau européen :

en ce qui concerne les évolutions normatives à entreprendre, le CES recommande :

- de réviser les valeurs limites d'exposition aux rayonnements optiques proposées par l'Incirp, de façon à les rendre suffisamment protectrices vis-à-vis du risque phototoxique. Elles devraient prendre en compte une exposition chronique et considérer d'autres indicateurs, notamment ceux de toxicité infra-cliniques<sup>24</sup> ;
- de créer et d'imposer le marquage d'un indice d'efficacité sur les moyens de protection à la lumière bleue (rendant compte du taux d'atténuation) ;
- d'élaborer une norme métrologique, au niveau européen, précisant les conditions de mesure de la modulation temporelle et du calcul des indices associés ;

en ce qui concerne les évolutions réglementaires à entreprendre, le CES recommande :

- d'imposer le marquage du groupe de risque photobiologique (évalué selon la norme NF EN 62471) pour les éclairages domestiques mais aussi pour les objets à LED ;
- de limiter la mise à disposition des systèmes à LED (lampes, luminaires, objets et notamment jouets) auprès du grand public à ceux de groupe de risque inférieur ou égal à 1 ;
- d'harmoniser le cadre réglementaire en modifiant les réglementations spécifiques à des systèmes à LED autres que lampes et luminaires, afin de tenir compte du risque photobiologique, et notamment :
  - la Directive européenne n° 2009/48/CE relative à la sécurité des jouets ;

---

<sup>22</sup> « Les éclairages intérieurs de locaux à usage professionnel sont éteints une heure après la fin de l'occupation de ces locaux. Les illuminations des façades des bâtiments sont éteintes au plus tard à 1 heure. Les éclairages des vitrines de magasins de commerce ou d'exposition sont éteints au plus tard à 1 heure ou une heure après la fin de l'occupation de ces locaux si celle-ci intervient plus tardivement. »

<sup>23</sup> « Les publicités lumineuses devront être éteintes la nuit, entre une heure et six heures du matin, sauf pour les aéroports et les unités urbaines de plus de 800 000 habitants, pour lesquelles les maires édicteront les règles applicables. Les enseignes lumineuses suivront les mêmes règles. »

<sup>24</sup> Par exemple, il peut y avoir mort cellulaire dans la rétine sans pour autant que ce soit visible lors de l'examen du fond de l'œil.

- les règlements UNECE<sup>25</sup> (*United Nations Economic Commission for Europe*) R112 et R113 relatifs aux prescriptions pour les sources lumineuses des véhicules.
- de limiter la luminance des phares de véhicules (sans forcément réduire le flux global, et donc la distance de visibilité) ;
- de prendre en compte dans la réglementation les spécificités des sources à barrettes ou à matrices de LED nues des dispositifs commercialisés auprès du grand public (agrégations de LED nues sur un même support) ;
- d'établir, au niveau européen, des limites de modulation temporelle de la lumière, afin de limiter les effets biologiques et sanitaires associés à la lumière émise par les lampes et luminaires à LED ;
- de modifier les réglementations existantes afin de tenir compte des risques liés à la modulation temporelle et notamment :
  - la Directive n°2006/25/CE du Parlement européen relative aux prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (rayonnements optiques artificiels) ;
  - les règlements UNECE, en imposant une fréquence minimale de modulation de l'ordre de 2 kHz lorsque les feux (feux avant et feux arrière) des véhicules sont utilisés en mode PWM (*Pulse Width Modulation*)<sup>26</sup>. Cette recommandation permet de limiter la visibilité de l'effet de réseau fantôme, source de perturbations visuelles avérées ;
- d'imposer la généralisation de la possibilité d'abaisser automatiquement la température de couleur (passage au blanc chaud) et la luminosité des écrans de téléphones mobiles et tablettes avant l'heure du coucher.

### Recommandations en matière de recherches

Si de nombreuses données sont disponibles pour évaluer l'impact de la lumière sur la santé, en particulier de la lumière bleue, les données scientifiques sont encore parcellaires en ce qui concerne l'effet spécifique des LED selon leur géométrie et leur qualité spectrale. Le CES insiste donc sur la nécessité d'améliorer l'évaluation quantitative de l'impact d'un passage général à la technologie LED sur la santé humaine et sur l'environnement.

Le CES encourage à poursuivre et intensifier les recherches sur les perturbations des rythmes circadiens par la lumière et les effets qui en découlent sur la vigilance, le sommeil, l'humeur, le bien-être, la cognition et la santé. Deux aspects encore peu documentés devront être particulièrement pris en compte chez l'humain ou dans des modèles animaux diurnes :

- l'impact de l'environnement lumineux maternel sur le développement du fœtus ;
- l'impact chez l'enfant et l'adolescent de l'environnement lumineux, en fonction de la période (jour, nuit), sur la synchronisation des rythmes biologiques et sur la santé, considérant notamment une transmission lumineuse plus élevée en raison d'un cristallin plus transparent, et d'une pupille plus ouverte.

---

<sup>25</sup> La Division des transports durables de l'UNECE fournit des services de secrétariat au Forum mondial pour l'harmonisation des réglementations sur les véhicules.

<sup>26</sup> Le mode PWM est une modulation de rapport cyclique. La lumière est modulée à une fréquence fixe et le changement de rapport cyclique modifie l'intensité moyenne de la lumière.

Des effets potentiellement bénéfiques d'un fort contraste lumineux entre le jour et la nuit ayant été décrits dans la littérature scientifique, il conviendrait :

- de confirmer les effets de l'exposition à des intensités lumineuses suffisantes le jour sur la qualité de vie, le sommeil, le bien-être et la santé, notamment des personnes souffrant de troubles des rythmes circadiens (sujets âgés, patients hospitalisés, personnes atteintes de démence, ...)
- d'approfondir les connaissances sur les effets d'une exposition à la lumière bleue le matin pour corriger les désynchronisations circadiennes et en évaluer les risques oculaires ;
- d'étudier, dans le cas des travailleurs de nuit, l'intérêt de favoriser l'exposition à certaines longueurs d'onde en fonction de l'heure pour favoriser d'une part la vigilance, et d'autre part la récupération en réduisant au maximum les effets secondaires néfastes.

Le CES recommande une meilleure évaluation des risques de survenues de sécheresse de l'œil et de pathologies oculaires en lien avec l'exposition à de la lumière dans la gamme phototoxique, en particulier sur le long terme. Une attention particulière devra être portée à certains groupes de populations sensibles (enfants, adolescents, populations souffrant de pathologies oculaires, personnes aphakes, etc.). Le CES recommande aussi d'étudier les facteurs qui pourraient intervenir dans la phototoxicité de la lumière : le moment de l'exposition, la possible modulation temporelle associée, les facteurs de risques liés à des pathologies oculaires. Il sera aussi opportun d'étudier dans quelle mesure l'extrapolation à l'Homme de résultats de phototoxicité obtenus chez le rongeur est possible.

La modulation temporelle de la lumière apparaissant comme un défaut majeur de certaines LED ou systèmes à LED, le CES recommande d'approfondir les connaissances sur ses effets visuels, biologiques et sanitaires. Il recommande en particulier de mener :

- des études pour mieux cerner les variations inter-individuelles de la sensibilité aux contrastes temporels, et mieux connaître la prévalence et l'incidence des effets liés à la modulation temporelle de la lumière dans la population générale ;
- des études permettant de quantifier les risques d'accidents liés à une exposition à un effet stroboscopique ou à un effet de réseau fantôme.

Les divers effets sanitaires des LED mentionnés plus haut rendent nécessaire une meilleure évaluation de l'exposition des populations. Le CES recommande d'effectuer des mesures précises de la distribution des luminances, des répartitions spectrales d'énergie et de la modulation temporelle pour une large gamme de dispositifs à LED auxquels la population est exposée.

Le CES recommande une meilleure prise en compte de l'impact environnemental d'un passage général à la technologie LED, en augmentant les connaissances concernant les effets de la pollution lumineuse sur la faune et la flore et l'écosystème dans son ensemble.

Enfin, le CES recommande de considérer l'ensemble du cycle de vie des LED, en particulier :

- d'accéder aux données détaillées sur les produits entrant dans la fabrication des LED (matières premières, procédés de fabrication) et les produits rejetés dans l'air, l'eau et les sols lors de la fabrication des LED ;
- de documenter la fin de vie des LED : récupération et tri des produits usagés, récupération des matières premières, recyclage de certains composants des LED, traitement des déchets finaux.

#### 4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'Anses reprend les conclusions et recommandations de son comité d'experts spécialisé « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements », rappelées au paragraphe 3 de cet avis.

Une première expertise sur les effets sanitaires liés à une exposition aux lampes à LED a été publiée par l'Anses en 2010, alors que cette technologie commençait seulement à être déployée à grande échelle et que débutait, dans le même temps, le retrait progressif du marché des autres technologies d'éclairage (incandescence notamment). Cette expertise avait notamment souligné la toxicité pour la rétine de la lumière bleue présente dans les éclairages à LED et leur forte capacité d'éblouissement.

Longtemps présente essentiellement dans des applications spécifiques (signalisation, objets électroniques, etc.), la technologie LED est de plus en plus utilisée dans les véhicules automobiles (phares, etc.) et s'est aujourd'hui imposée dans l'éclairage domestique et public, ou encore dans les objets lumineux et les écrans (téléphones, ordinateurs, téléviseurs). L'exposition de la population et de son environnement à la lumière artificielle, auparavant riche en teintes jaune-orange, est ainsi dorénavant plus riche en bleu que celle qui prévalait il y a 10 ans, du fait de l'utilisation aujourd'hui prépondérante des LED dans les applications industrielles et grand public.

La présente expertise s'est attachée à mettre à jour l'état des connaissances depuis 2010 sur les différents effets sanitaires susceptibles d'être associés à l'exposition à la lumière riche en bleu et aux autres caractéristiques de l'éclairage LED. Elle s'est, pour cela, appuyée sur une méthodologie d'évaluation des niveaux de preuve associés aux effets sanitaires considérés.

Du fait du manque de données bibliographiques portant sur l'exposition de la population aux technologies à LED, l'Agence a par ailleurs financé la réalisation de campagnes de mesures spécifiques, notamment pour décrire la nature et la quantité de lumière émise par des systèmes à LED utilisés au quotidien (lampes d'éclairage, objets intégrant des LED, projecteurs automobiles et écrans d'ordinateurs, de tablettes, de téléphones mobiles, etc.).

Les nouvelles données scientifiques examinées viennent conforter le résultat de 2010 sur la phototoxicité et permettent d'établir que l'effet phototoxique sur la rétine d'une exposition aiguë à une lumière riche en bleu est avéré. L'effet sur le long terme d'une lumière riche en bleu sur la contribution à la survenue d'une dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA) est avéré.

L'agence confirme, pour certains dispositifs d'éclairages testés (les lampes torches, les phares automobiles, les spots à LED, les matrices de LED, etc.), qu'ils peuvent induire un éblouissement important.

En 2010, l'Anses avait évoqué la possibilité de perturbation des horloges biologiques induite par l'exposition aux LED. La mise à jour de l'expertise met aujourd'hui en évidence que la perturbation des rythmes circadiens (horloges biologiques) induit par l'exposition à une lumière LED riche en bleu en soirée ou la nuit est avéré. Les enfants et adolescents, exposés dès leur plus jeune âge notamment aux écrans (tablettes, consoles de jeux, téléphone mobiles, etc.), constituent une population particulièrement sensible.

Concernant la modulation temporelle de la lumière émise par les LED, les données examinées, montrent qu'une forte proportion de lampes à LED testées présentent des performances dégradées (modulation temporelle importante). Sans que le risque sanitaire associé à l'exposition à cette modulation ne soit déterminé, certaines personnes (enfants, adolescents et jeunes adultes, opérateurs de machines et conducteurs de véhicules, ...) pourraient être plus sensibles aux effets potentiels sur la santé induits par cette modulation de la lumière : maux de tête, fatigue visuelle, risque accidentel, etc.

Concernant l'impact de la lumière sur l'environnement, et en particulier sur la biodiversité, les études disponibles mettent en évidence une augmentation de la mortalité et un appauvrissement de la

diversité des espèces animales et végétales étudiées dans les milieux éclairés la nuit, y compris par des éclairages à LED.

### Recommandations de l'Agence

#### Faire progresser les connaissances

Concernant l'évaluation des risques associés à l'exposition aux LED, l'Anses souligne la nécessité de mieux quantifier les niveaux de risque liés aux effets identifiés, elle recommande ainsi d'engager des recherches complémentaires visant à :

- améliorer la connaissance des expositions de la population générale et professionnelle, ainsi que de l'environnement ;
- mieux caractériser les effets sanitaires liés à la modulation temporelle de la lumière des LED et la phototoxicité à long terme ;
- préciser les relations exposition-réponse entre l'exposition et la survenue des effets sanitaires (notamment ceux associés à la perturbation circadienne, la phototoxicité, ...).

Enfin, alertée par les effets sanitaires potentiels liés à l'exposition aux dispositifs de photothérapie à LED, l'Agence recommande aux pouvoirs publics de faire évaluer les risques associés à ces dispositifs au regard des bénéfices attendus par un organisme compétent.

#### Faire évoluer la réglementation et mieux informer

Compte tenu des nouvelles données expérimentales disponibles concernant les mécanismes de phototoxicité, l'Anses souligne la nécessité de mettre à jour les valeurs limites d'exposition (VLE) à la lumière bleue, notamment afin de tenir compte de la spécificité des enfants, dont le cristallin de l'œil filtre le bleu avec beaucoup moins d'efficacité que les adultes et personnes âgées. Ces VLE sont en effet utilisées pour vérifier la conformité des systèmes à LED aux exigences essentielles en matière de santé et de sécurité des directives européennes.

Considérant les résultats de l'estimation des risques par l'expertise collective, l'Anses recommande de faire évoluer le cadre réglementaire s'appliquant aux systèmes à LED, afin de :

- restreindre la mise à disposition des objets à LED auprès du grand public à ceux de groupe de risque photobiologique 0 ou 1 ;
- limiter l'intensité lumineuse des phares des véhicules automobiles, tout en garantissant la sécurité routière ;
- établir, au niveau européen, des limites réduisant au minimum le niveau de modulation temporelle de la lumière émise par toutes les sources lumineuses (éclairages, écrans, objets à LED), en lien avec une meilleure caractérisation des effets sanitaires associés.

Dans l'attente d'une évolution de la réglementation, l'Anses recommande de sensibiliser et d'inciter les personnes, et tout particulièrement les enfants, à limiter leur exposition :

- à la lumière riche en bleu avant le coucher et pendant la nuit (écrans à LED : téléphones mobiles, tablettes, ordinateurs, ... ) ;
- aux éclairages riches en bleu, c'est-à-dire les lampes et luminaires de type « blanc froid », en privilégiant un éclairage indirect ou utilisant des diffuseurs ;
- à la lumière directe des objets à LED dont le groupe de risque est supérieur ou égal à 2 (lampes torches, jouets, phares automobiles, ...).

L'Anses appelle par ailleurs l'attention sur l'hétérogénéité de l'efficacité des moyens de protection actuels contre la phototoxicité de la lumière bleue (verres traités, lunettes de protection, écrans

spécifiques, ...). Elle note par ailleurs leur absence d'action notable sur la préservation des rythmes circadiens, pour laquelle, dans le cas des écrans à LED, seule la diminution de la luminosité et de la température de couleur des écrans permet de limiter l'exposition. Elle encourage l'établissement de normes définissant les critères de performance des équipements de protection individuelle vis-à-vis de la lumière bleue.

Concernant l'environnement et la biodiversité, bien qu'il soit difficile d'évaluer l'impact sanitaire et environnemental global de la transition des technologies d'éclairage existantes vers les LED, l'Anses recommande de renforcer la prévention de la pollution lumineuse. L'Agence souligne ainsi la nécessité de faire respecter la réglementation déjà en vigueur et de la faire évoluer, notamment en limitant le nombre de points lumineux et en diminuant la pollution lumineuse, tout en veillant à assurer la sécurité des personnes.



Dr Roger Genet

**MOTS CLES**

Lumière bleue, LED, éclairage artificiel, phototoxicité, rythmes circadiens, modulation temporelle de la lumière, biodiversité, pollution lumineuse.

*Blue light, LED, artificial lighting, phototoxicity, circadian rhythms, temporal light modulation, biodiversity, light pollution.*

**ANNEXE**

**Tableau 1 : principales grandeurs physiques utilisées dans le domaine de l'éclairage.**

Grandeur	Unité	Descriptions
Luminance (L)	Candela par mètre carré (cd/m <sup>2</sup> )	Quantité de lumière visible émise par une surface lumineuse ou un objet, par exemple la luminance d'un écran d'ordinateur : environ 200 cd/m <sup>2</sup>
Éclairement (E)	Lux (lx)	Quantité de lumière reçue sur une surface. Exemple : 500 lux sur un bureau
Température de couleur (T)	Kelvin (K)	Précise la teinte d'une lumière blanche : une lumière « chaude » aura une température basse (couleur qui tire vers le jaune, T < 3 000 K), une lumière « froide » une température élevée (couleur qui tire vers le bleu, T > 5 000 K)
Indice de rendu de couleur (IRC)	Sans unité	Capacité d'une lumière à rendre compte de la couleur des objets de manière fidèle. Une lumière très fidèle aura un IRC de 100, une lumière de qualité moyenne un IRC inférieur à 80
Efficacité lumineuse	Lumen par Watt (lm/W)	Définit le rendement énergétique d'une source de lumière