

**anses**

agence nationale de sécurité sanitaire  
alimentation, environnement, travail



*Connaître, évaluer, protéger*

# Effets sur la santé humaine et sur l'environnement (faune et flore) des diodes électroluminescentes (LED)

Annexes 2, 3, 4 et 5

Avril 2019 - Édition scientifique

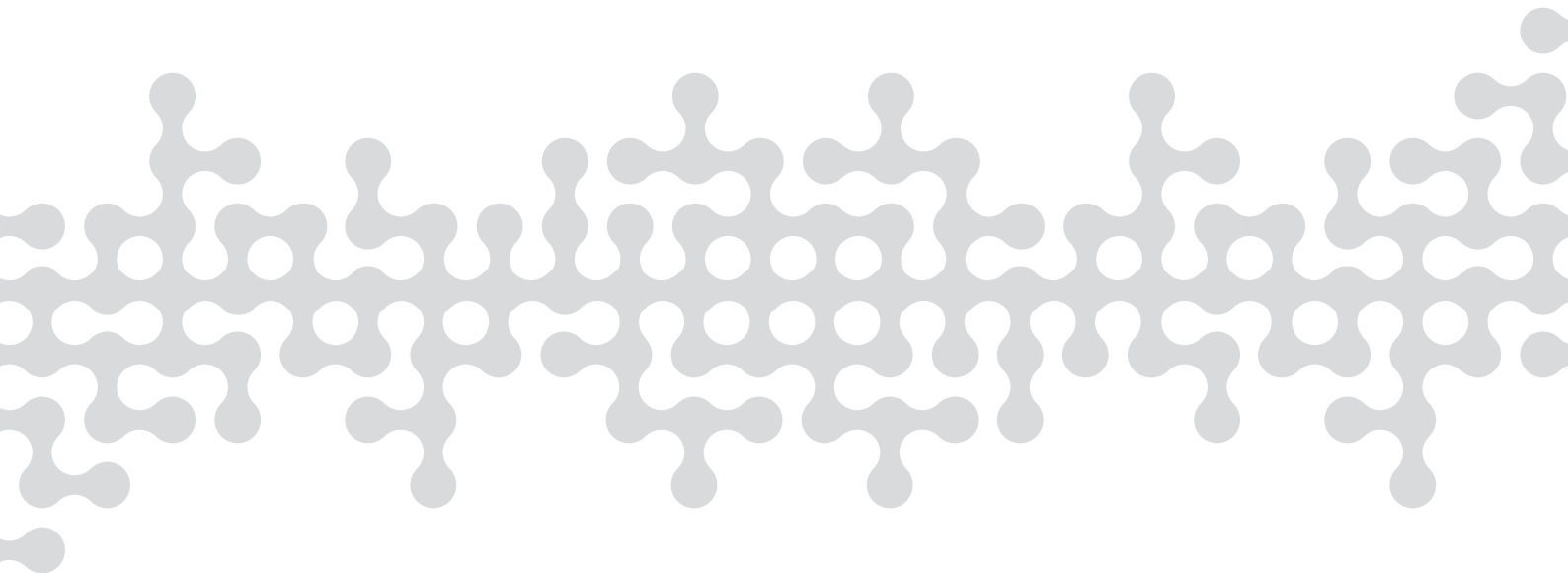




# Effets sur la santé humaine et sur l'environnement (faune et flore) des diodes électroluminescentes (LED)

Annexes 2, 3, 4 et 5

Avril 2019 - Édition scientifique







---

## **Effets sur la santé humaine et sur l'environnement (faune et flore) des systèmes utilisant des diodes électroluminescentes (LED)**

**Mise à jour de l'expertise de 2010 portant sur les effets sanitaires de l'éclairage utilisant des LED**

---

**Saisine « n°2014-SA-0253 »  
Saisine liée « n°2008-SA-0408 »**

**ANNEXES 2,3,4,5  
Novembre 2018**

## SOMMAIRE

Liste des figures.....	4
Liste des tableaux.....	6
Annexe 2 : Synthèse sur la réglementation et la normalisation applicables aux LED .....	8
1. Organismes de normalisation impliqués dans l'éclairage à LED.....	8
2. Normes européennes harmonisées .....	9
3. Normes relatives à l'exposition aux rayonnements optiques et à la sécurité photobiologique.....	9
4. Normes concernant la modulation temporelle de la lumière .....	26
5. Normes concernant les phénomènes d'éblouissement .....	44
6. Normes concernant les effets non visuels de lumière liés à l'excitation de la mélanopsine .....	45
7. Normes électrotechniques ou normes « produits » .....	47
8. Normes relatives aux installations d'éclairage .....	53
9. Norme de caractérisation électrique et photométrique des dispositifs d'éclairage à LED .....	55
10. Normes de compatibilité électromagnétique des dispositifs d'éclairage .....	55
11. Normes d'exposition aux champs électromagnétiques .....	55
12. La réglementation européenne sur les rayonnements optiques artificiels.....	56
13. La réglementation européenne sur les produits d'éclairage général à LED.....	58
14. La réglementation européenne sur l'éclairage automobile.....	60
15. Synthèse des recommandations, des normes et des réglementations concernant l'éclairage à LED .....	61
Annexe 3 : Eblouissement et inconfort visuel : notions supplémentaires en photométrie .....	66
1. Relation photométrique entre l'éclairement sur la rétine et la luminance du stimulus (Rappel).....	66
2. Luminance et luminosité.....	66
3. Le modèle de photométrie mésopique.....	66
4. Echelles d'éblouissement inconfortable .....	67
Annexe 4 : Les données d'exposition issues du logiciel Lumexpo.....	69
1. Définition de scénarios d'exposition.....	69
2. Présentation du logiciel Lumexpo.....	69
3. Résultat du scénario « employé de bureau » .....	75
4. Résultat du scénario « travailleur de nuit ».....	82
5. Résultats du scénario « enfant à la maternelle » .....	89

<b>6. Résultats du scénario « adolescent » .....</b>	<b>96</b>
<b>7. Résultats du scénario « personne âgée » .....</b>	<b>103</b>
Annexe 5 : Analyse du cycle de vie.....	111
<b>1. Tableau d'évaluation des ACVs .....</b>	<b>111</b>
<b>2. Catégories d'impact inclus dans les sept ACVs qualifiées.....</b>	<b>115</b>
<b>3. Unités de catégories d'impact utilisées dans les sept ACVs qualifiées, et l'unité la plus courante. ....</b>	<b>117</b>
<b>4. Impacts environnementaux des ACVs détaillées, pour le cycle de vie entier, par Mlmh. ....</b>	<b>120</b>

## Liste des figures

Figure 1 : courbes de sensibilité spectrale du risque rétinien de la lumière bleue pour la population générale (courbe B(□)) et pour les sujets aphaques, pseudophaques et enfants de deux ans et moins (courbe A(□)).	13
Figure 2 : efficacité du rayonnement lumineux au risque rétinien de la lumière bleue en fonction de la température de couleur (CCT) pour différentes sources de lumière blanche (source : IEC TR 62778)	21
Figure 3 : estimation de la luminance visuelle ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) correspondant à la valeur limite d'exposition à 100 s (limite entre RG1 et RG2), en fonction de la température de couleur de la lumière blanche émise par la source (source : IEC TR 62778 (IEC 2012)).	22
Figure 4 : estimation de l'éclairement (lx) correspondant à la valeur limite d'exposition à 100 s (limite entre RG1 et RG2), en fonction de la température de couleur de la lumière blanche émise par la source (source IEC TR 62778 (IEC 2012)).	22
Figure 5 : le graphe représente une forme d'onde quelconque. L'axe des abscisses représente le temps (s). L'axe des ordonnées représente le niveau lumineux, en unité arbitraires. Les définitions mathématiques de l'indice de papillotement ( <i>flicker index</i> ) et du pourcentage de modulation ( <i>flicker percent</i> ) sont données (source : tirée de la norme IEEE 1789).	28
Figure 6 : définition mathématique du pourcentage de modulation à la fréquence dominante $\text{Mod}\%_1$ . (source : IEA 4 <sup>E</sup> SSL spécifications internet).	29
Figure 7 : étapes de calcul de l'indice $P_{st}^{LM}$ de sévérité à court terme du papillotement défini par l'IEC dans le rapport technique (IEC 2015). Le bloc b comprend une modélisation mathématique de la réponse en fréquence du système humain « œil-cerveau » vis-à-vis de la visibilité des fluctuations temporelles de la lumière.	30
Figure 8 : étapes de mesures et de calcul de l'indice ASSIST	31
Figure 9 : matrice de risque de l'IEEE 1789	37
Figure 10 : extrait de la norme IEEE 1789. Niveaux de risques pour les cinq effets indésirables évalués selon la fréquence de modulation et le pourcentage de modulation.	37
Figure 11 : graphes représentant les différentes recommandations existantes en termes de pourcentage de modulation. Les limites relatives à l'indice Pst et SVM ont été calculées en supposant une modulation purement sinusoïdale.	41
Figure 12 : sensibilité spectrale de l'excitation mélanopique, donnée dans la publication CIE TN 003.	47
Figure 13 : marquage prescrit par la norme de sécurité NF EN 60598 dans le cas de luminaire dont le groupe de risque dépasse RG2 au-delà de 200 mm.	50
Figure 14 : angles de défilement des luminaires à forte luminance spécifiés dans la norme NF EN 12464-1	53
Figure 15 : étiquettes énergie pour une lampe (à gauche), un luminaire intégrant des lampes remplaçables (au milieu) et un luminaire à LED dont les modules LED ne peuvent pas être changés (à droite).	60
Figure 16 : zones climatiques RT2012 (source : <a href="http://www.rt-batiment.fr">http://www.rt-batiment.fr</a> )	71
Figure 17 : graphes comparant les résultats pour les différents éclairages et pour différentes bandes spectrales	73



Figure 18 : courbes spectrales pour la bande phototoxique, la bande mélanopique, la bande visible et la bande de couleur rouge.....	73
Figure 19 : exemple de cartographie de l'exposition sur la rétine .....	74
Figure 20 : spectres de sources lumineuses.....	74



## Liste des tableaux

Tableau 1 : effets photobiologiques sur l'œil et la peau des rayonnements optiques incohérents identifiés par l'Icnirp .....	11
Tableau 2 : luminance limites de sources de lumière blanche correspondant à un groupe de risque ne dépassant pas RG1. ....	23
Tableau 3 : éclairagements limites fournis par une source de lumière blanche correspondant à un groupe de risque ne dépassant pas RG1. ....	23
Tableau 4 : spécifications de l'Agence Internationale de l'Energie concernant la modulation temporelle des lampes LED non dirigées. ....	40
Tableau 5 : résumé des différents indices normatifs liés à la modulation temporelle de la lumière. ....	42
Tableau 6 : détail de la gamme de fréquences de modulation, de la règle d'additivité des composantes fréquentielles et de l'applicabilité aux formes d'onde dont le rapport cyclique est différent de 0.5, pour chaque indice présenté. ....	43
Tableau 7 : rapports recommandés de luminance dans le champ visuel, extraits de la norme NF X 35-103. ....	54
Tableau 8 : différence entre les luminances mésopiques et photopique en pourcentage calculées avec le système mésopique recommandé pour différentes sources lumineuses (LPS : lampe sodium basse pression, HPS : lampe sodium haute pression, MH : Lampe aux halogénures métalliques, LED) .....	67
Tableau 9 : tableau comparatif des indices d'éblouissement inconfortable les plus usités. (Carlucci et al., 2015). ....	68
Tableau 10 : scénario considéré pour un employé de bureau .....	75
Tableau 11 : résultats dans le plan rétinien en hiver .....	76
Tableau 12 : résultats dans le plan rétinien au printemps .....	77
Tableau 13 : résultats dans le plan rétinien en été .....	78
Tableau 14 : résultats dans le plan rétinien en automne .....	79
Tableau 15 : résultats dans le plan rétinien pour une année complète .....	80
Tableau 16 : résultats dans le plan rétinien en hiver .....	82
Tableau 17 : résultats dans le plan rétinien au printemps .....	83
Tableau 18 : résultats dans le plan rétinien en été .....	85
Tableau 19 : résultats dans le plan rétinien en automne .....	86
Tableau 20 : résultats dans le plan rétinien pour une année complète .....	87
Tableau 21 : scénario considéré pour un enfant de maternelle .....	89
Tableau 22 : résultats dans le plan rétinien en hiver .....	90
Tableau 22 : résultats dans le plan rétinien au printemps .....	91
Tableau 23 : résultats dans le plan rétinien en été .....	92
Tableau 24 : résultats dans le plan rétinien en automne .....	93
Tableau 25 : résultats dans le plan rétinien pour une année complète .....	94

Tableau 10 : scénario considéré pour un adolescent .....	96
Tableau 26 : résultats dans le plan rétinien en hiver .....	97
Tableau 27 : résultats dans le plan rétinien au printemps .....	98
Tableau 28 : résultats dans le plan rétinien en été .....	99
Tableau 29 : résultats dans le plan rétinien en automne .....	100
Tableau 30 : résultats dans le plan rétinien pour une année complète .....	101
Tableau 33 : scénario considéré pour une personne âgée .....	103
Tableau 31 : résultats dans le plan rétinien en hiver .....	104
Tableau 32 : résultats dans le plan rétinien au printemps .....	105
Tableau 33 : résultats dans le plan rétinien en été .....	106
Tableau 34 : résultats dans le plan rétinien en automne .....	107
Tableau 35 : résultats dans le plan rétinien pour une année complète .....	108
Tableau 36 : tableau d'évaluation des ACVs .....	111
Tableau 37 : catégories d'impact inclus dans les 7 ACVs qualifiées .....	115
Tableau 38 : unités de catégories d'impact utilisées dans les ACVs qualifiées (Pt= point).....	117
Tableau 39 : impacts environnementaux des ACSs détaillées pour le cycle de vie entier .....	120

## Annexe 2 : Synthèse sur la réglementation et la normalisation applicables aux LED

Les normes sont des référentiels techniques élaborés conjointement par les acteurs économiques d'une filière (industriels, installateurs, fournisseurs d'énergie, *etc.*) et des organismes indépendants (associations, laboratoires publics, *etc.*). Elles ont vocation à décrire les bonnes pratiques qui garantissent la qualité des produits et des services, ainsi que la sécurité des biens et des personnes.

En tant que guides de bonnes pratiques, les normes sont d'application volontaire. Elles ne possèdent pas de valeur juridique et ne peuvent être considérées comme obligatoires en dehors d'un contexte réglementaire particulier. Cependant, elles fournissent un cadre de travail commun et partagé par toute une filière. Le respect des normes permet ainsi d'éviter la conception et l'installation de produits inefficaces, incompatibles entre eux, voire dangereux.

La normalisation en éclairage rassemble les domaines de l'électrotechnique et de l'éclairagisme. La normalisation électrotechnique concerne les aspects liés aux performances et à la sécurité des produits ainsi qu'aux installations électriques d'éclairage artificiel.

Les normes d'éclairagisme portent sur les spécifications des projets d'éclairage en termes de confort, d'ergonomie et d'efficacité énergétique. Elles expriment un ensemble de valeurs photométriques adaptées aux activités des usagers et des locaux à éclairer et permettent d'aboutir à un éclairage de qualité.

Pour appuyer les normes de sécurité et de performance, il existe des normes à caractère métrologique décrivant les méthodes de mesures physiques associées aux grandeurs optiques (grandeurs radiométriques et photométriques) et électriques utilisées en éclairage. Ces grandeurs sont définies quant à elles dans des normes plus fondamentales concernant la lumière et la vision.

Dans le domaine sanitaire, il existe des normes sur l'exposition humaine aux rayonnements optiques et aux champs électromagnétiques émis par les produits et les installations. Ces normes proposent des valeurs limites d'exposition ainsi que des méthodes de mesure associées.

### 1. Organismes de normalisation impliqués dans l'éclairage à LED

La CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) est l'organisme responsable au niveau mondial de définir des notes techniques, des rapports techniques et des normes internationales dans les domaines de la lumière, de la vision, de l'éclairagisme et dans certains domaines connexes comme les systèmes d'affichage ou la photobiologie.

Les normes de la CIE sont parfois transposées en norme de l'ISO, le bureau international de la normalisation, qui a un groupe de travail sur la lumière et l'éclairage.

La CIE est structurée autour de plusieurs divisions, chacune comprenant des groupes de travail dont certains sont communs avec d'autres organismes comme l'IEC. La CIE compte un grand nombre de délégations nationales, comme CIE-France par exemple.

En raison de ses missions dédiées à l'éclairage, la CIE est l'organisme scientifique le plus actif dans l'éclairage à LED. Une grande partie des groupes de travail se consacre à faire évoluer les documents existants et à en proposer de nouveaux pour tenir compte de l'évolution

technologique liée aux LED et autres sources de lumières apparues récemment. Tous les domaines sont concernés : redéfinition de toutes les méthodes de mesures photométriques et colorimétriques, mise au point de nouveaux indices de rendu des couleurs, nouvelles caractérisation de la modulation temporelle de la lumière, nouveaux indices d'éblouissement, etc.

Au niveau européen, la normalisation « non-électrotechnique » de l'éclairage est prise en charge par le CEN (Comité Européen de Normalisation) qui élabore des normes EN. Des groupes miroirs du CEN sont présents au niveau des pays pour traiter la normalisation nationale de l'éclairage : AFNOR en France, DIN en Allemagne, etc.

Aux USA, l'IESNA (Illuminating Engineering Society of North America) est très active dans la production de normes d'éclairage non-électrotechniques. Cet organisme mène des travaux indépendants de la CIE sur l'éclairage.

Les activités de la CIE ne couvrent pas tous les aspects électrotechniques de l'éclairage qui sont pris en charge au niveau international par l'IEC (International Electrotechnical Commission).

L'IEC élabore les normes « produits » relatives à la sécurité et aux performances des produits d'éclairage. En Europe, ces normes « produits » sont transposées en normes EN par le CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique). La transposition nationale est effectuée via l'AFNOR en France.

En dehors de l'Europe, les normes de l'IEC ne sont pas systématiquement transposées en normes nationales. Certains pays, bien que membres de l'IEC ont recours à d'autres organismes, souvent nationaux. En particulier, les USA utilisent notamment des normes de l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) et de l'UL (Underwriters Laboratories).

## **2. Normes européennes harmonisées**

Les normes harmonisées sont des documents émanant des organismes européens de normalisation (CEN ou CENELEC) ayant été élaborés dans le cadre d'un mandat de la Commission Européenne. Les références de ces normes sont régulièrement publiées et mises à jour dans le Journal officiel de l'Union Européenne.

Les normes harmonisées constituent le cadre technique de référence de l'ensemble des réglementations européennes, dont les directives basse tension, de compatibilité électromagnétique (CEM) et d'exposition des travailleurs. Elles peuvent donc acquérir un caractère obligatoire.

Dans le domaine de l'éclairage, les normes de sécurité et de CEM des produits d'éclairage (lampes, luminaires, modules, ballasts, drivers, etc.) ont été harmonisées et sont donc d'application obligatoire.

## **3. Normes relatives à l'exposition aux rayonnements optiques et à la sécurité photobiologique**

L'exposition humaine aux sources d'éclairage peut avoir des effets indésirables sur l'œil et la peau, en raison des interactions entre le rayonnement optique et les tissus biologiques exposés. Il existe plusieurs séries de normes traitant de l'exposition humaine aux sources d'éclairage, dont certaines définissent des notions de sécurité photobiologique.

La plupart des normes et des réglementations relatives à l'exposition humaine aux rayonnements optiques s'appuient sur les recommandations de l'Incirp. Il faut noter cependant que des organismes nationaux font également autorité dans certains pays, comme l'ACGIH

(American Conference of Governmental Industrial Hygienists) aux USA, qui émet des recommandations de radioprotection souvent très proches de celles de l'Icnirp, mais pas toujours identiques.

### 3.1 Recommandations de l'Icnirp

L'Icnirp (International Commission on Non Ionising Radiation Protection) est un groupe d'experts indépendants, non affiliés à des entreprises commerciales ou industrielles, constitué pour évaluer l'état des connaissances des effets des rayonnements non ionisants sur la santé. C'est un organisme non gouvernemental officiellement reconnu par l'Organisation Mondiale de la Santé, l'Organisation Internationale du Travail et l'Union européenne.

L'Icnirp émet des avis et des recommandations d'ordre scientifique concernant la protection contre l'exposition aux rayonnements non ionisants, formule en toute indépendance et sur la base de données scientifiques, des principes généraux et des limites d'exposition. Ces recommandations s'adressent autant au public qu'au monde du travail.

Les sources d'éclairage actuelles émettent toutes de la lumière incohérente. Seuls les lasers émettent de la lumière cohérente. Ainsi, dans le domaine des sources d'éclairage et des LED émettant de la lumière visible, les recommandations à prendre en compte sont celles concernant les rayonnements optiques incohérents, que l'Icnirp a remis à jour en 2013 (Icnirp guidelines on limits of exposure to incoherent visible and infrared radiation).

Les LED utilisées dans les applications d'éclairage ou d'affichage n'émettent pas de rayonnements ultraviolet ou infrarouge (à l'exception du rayonnement thermique lié à la température des surfaces extérieures des produits). A l'inverse, les lampes à incandescence et les lampes à décharge (incluant les lampes fluorescentes) émettent toutes un rayonnement plus ou moins intense en dehors du spectre visible. Par conséquent, on peut compléter les recommandations relatives aux domaines du visible et de l'infrarouge par celles concernant les rayonnements ultraviolets qui font l'objet d'une autre publication de l'Icnirp : Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation).

L'objectif des recommandations de l'Icnirp est de donner les niveaux maximums d'exposition aux rayonnements optiques incohérents, de manière à éviter les effets photobiologiques indésirables sur l'œil et la peau.

Neufs types d'effets biologiques sont identifiés par l'Icnirp. Ils sont résumés dans le Tableau 1.

**Tableau 1 : effets photobiologiques sur l'œil et la peau des rayonnements optiques incohérents identifiés par l'Icnirp**

	Effet	Longueur d'onde	Pathologie associée Au dépassement des limites d'exposition
<b>Œil</b>	Endommagement thermique de la cornée	Infrarouge (IR) 1400 nm – 1 mm	Brûlure de la cornée
	Endommagement thermique de l'iris	Visible et proche IR 380 nm – 1 400 nm	Brûlure de l'iris
	Endommagement thermique du cristallin	Proche IR 800 nm – 3000 nm	Brûlure du cristallin
	Endommagement thermique de la rétine	Visible et proche IR 380 nm – 1400 nm	Brûlure de la rétine
	Endommagement photochimique de la rétine de type I	Visible 380 nm – 780 nm	Photorétinite associée à un blanchiment prolongé des photorécepteurs
	Endommagement photochimique de la rétine de type II « Blue light hazard »	Visible (bleu) 380 nm - 550 nm Visible (bleu) et proche UV 300 nm – 550 nm pour les aphaques et les enfants de moins de 2 ans	Photorétinite avec scotome (altération de la vision dans une zone du champ de vision)
	Endommagement photochimique de la cornée et de la conjonctive	Ultraviolet 180 - 300 nm	Photokératite, Photoconjonctivite
	Endommagement photochimique du cristallin	Ultraviolet 295 nm - 400 nm	Cataracte
<b>Peau</b>	Endommagement thermique de la peau	Visible et IR 380 nm – 1 mm	Brûlure de la peau
	Endommagement photochimique de la peau	Tout le domaine ultraviolet et le bleu	Erythème
	Réactions allergiques de la peau induites par l'exposition	Ultraviolet et visible selon le type de photosensibilisant	Diverses pathologies
	Effets à long terme sur la peau	Tout le domaine ultraviolet	Vieillessement accélééré, plusieurs formes de cancers

Les types de LED qui émettent du rayonnement visible ne peuvent pas induire les effets liés à l'infrarouge et l'ultraviolet. De plus, leurs niveaux lumineux sont très loin de pouvoir provoquer des endommagements thermiques (brûlures), que ce soit pour la peau ou pour la rétine. Seules des lampes à décharge de très grande puissance (20 kW) ou des sources d'éclairage à base de laser pourraient typiquement engendrer des brûlures de la rétine à très courte distance (Slinney, 2016).

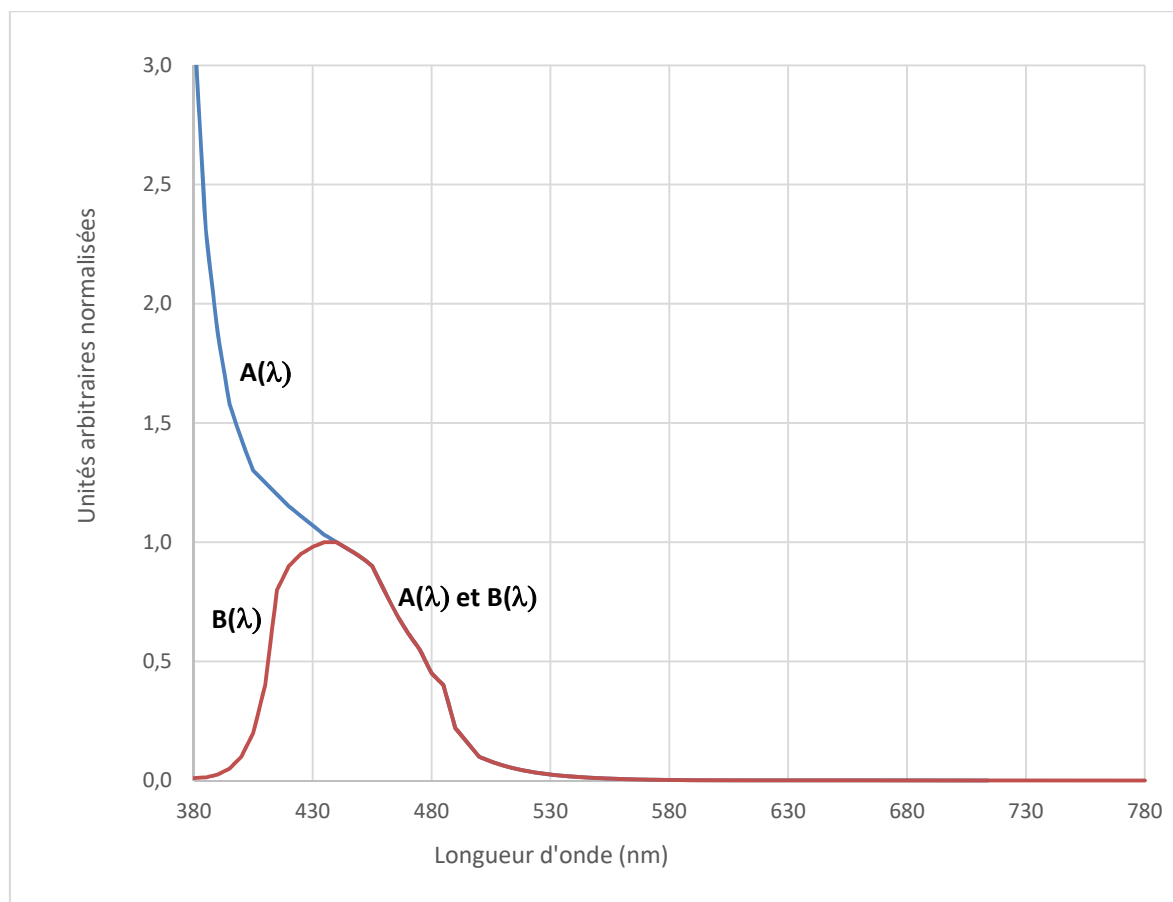
Pour les LED émettant dans le domaine visible, seuls subsistent les dangers liés aux endommagements photochimiques de la rétine. L'Icnirp en cite deux types :

- Type I : endommagement photochimique de la rétine résultant d'une exposition prolongée à de la lumière très intense (Noell *et al.*, 1966; Williams et Howell 1983; Mellerio, 1994). Ce mécanisme serait provoqué par l'endommagement des photorécepteurs résultant du blanchiment prolongé de la rhodopsine.
- Type II : endommagement photochimique de la rétine uniquement provoqué par la lumière bleue et lié à l'absorption de ce rayonnement par l'épithélium pigmentaire rétinien (Ham *et al.*, 1976; Ham, 1989; Lund *et al.*, 2006). Les lésions ont été mises en évidence expérimentalement à partir de durées d'exposition courtes, de l'ordre de 10 s. Ce type d'endommagement constitue le « blue light hazard » ou risque rétinien lié à la lumière bleue (Sloney et Wolbarsht, 1980).

En complément des recommandations de l'Icnirp, on peut noter que l'existence de l'endommagement de type I a été remise en question par Van Norren et al (Van norren, 2011) sur la base d'une analyse approfondie de l'ensemble des travaux publiés qui a abouti à l'identification d'un manque de données reproductibles pour ce type d'endommagement.

Le risque rétinien lié à la lumière bleue est induit par des rayonnements principalement situés entre 380 nm (limite bleu-ultraviolet) et 550 nm. Cependant, pour les personnes aphaques (sans cristallin) ou pseudophaques (avec cristallins artificiels), la sensibilité s'étend jusqu'à 300 nm dans l'ultraviolet. La Figure 1 montre les courbes de sensibilité spectrale au risque rétinien de la lumière bleue. La courbe B(□) décrit la population générale et la courbe A(□) décrit la sensibilité des aphaques et des pseudophaques. Le maximum de la courbe B(□) est atteint à 440 nm. Par contre, la courbe A(□) n'a pas de maximum et dépasse la valeur unitaire pour les longueurs d'onde inférieures à 440 nm, de manière à assurer une continuité avec l'évaluation des risques oculaires du rayonnement ultraviolet, décrit avec la courbe de sensibilité spectrale S(□).





**Figure 1 : courbes de sensibilité spectrale du risque rétinien de la lumière bleue pour la population générale (courbe B(□)) et pour les sujets aphaques, pseudophaques et enfants de deux ans et moins (courbe A(□)).**

L'Icnirp recommande d'utiliser la courbe A(□) pour évaluer l'exposition rétinienne à la lumière bleue pour les enfants âgés de 2 ans et moins. Chez ces enfants, en effet, les tissus et les milieux oculaires situés en avant de la rétine sont beaucoup plus transparents pour les courtes longueurs d'ondes. Ils ne filtrent pas le proche ultraviolet ni le bleu.

La valeur limite d'exposition à la lumière bleue fixée par l'Icnirp s'exprime en termes de dose de luminance pondérée de la source de lumière  $D_B = L_B \times t$ , où  $L_B$  est la luminance pondérée de la source par le spectre d'action considéré - A(□) ou B(□) - et  $t$  est la durée d'exposition :

$$D_B^{EL} = 1 \times 10^6 \text{ Jm}^{-2}\text{sr}^{-1}$$

où le suffixe EL désigne la limite d'exposition (Exposure Limit).

Pour des durées d'exposition supérieures à 10 000 s, soit 2.8 h, la valeur limite ne s'exprime plus en termes de dose mais en termes de luminance pondérée.

$$L_B^{EL} = 100 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$$

L'Icnirp considère ainsi qu'il y a « saturation » de l'exposition lorsque celle-ci est prolongée au-delà de 10 000 s. L'Icnirp implique donc qu'il existe des mécanismes réparateurs des endommagements photochimiques, sans toutefois en faire mention explicite. Cependant, l'Icnirp ne donne aucune valeur limite d'exposition pour les expositions chroniques quotidiennes, dont les doses peuvent être inférieures à la valeur limite d'exposition, mais répétées fréquemment au cours de la journée. De même, il n'y a pas de recommandations concernant le cumul d'expositions faibles à la lumière bleue pour des durées très longues, de l'ordre du mois, de l'année ou de plusieurs années.

Lorsque l'œil n'est pas mis artificiellement au repos, comme à l'occasion lors d'un examen ophtalmologique, la mesure de la luminance pondérée doit s'effectuer dans un champ de vision effectif qui dépend du temps d'exposition, de manière à prendre en compte l'étalement de l'image de la source sur la rétine induits les mouvements oculaires. Ce champ de vision effectif varie entre 11 mrd et 100 mrd en fonction du temps d'exposition considéré.

Lorsque le champ de vision effectif est plus grand que le diamètre angulaire de la source à la distance d'exposition, il faut moyenner la luminance sur une surface effective plus grande que celle de la source. La luminance résultante, à prendre en compte dans l'évaluation de risque, est donc inférieure à la luminance de la source.

La recommandation de l'Icnirp de 2013 ne fournit pas la restriction de base à l'origine de la valeur limite de dose de luminance pondérée. La restriction de base est relative à la dose d'éclairement reçue par la rétine, au travers de l'œil. On trouve cependant cette restriction de base dans une autre publication de l'Icnirp (Adjustment of guidelines for exposure of the eye to optical radiation from ocular instruments: statement from a task group of the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (Icnirp). Pour des durées d'exposition inférieures à 10 000 s, la restriction de base correspond à une dose d'éclairement de la rétine, pondéré par le spectre d'action B( $\square$ ).

### **Dose limite d'éclairement rétinien pondéré par B( $\square$ ) : 2.2 J/cm<sup>2</sup>**

Pour des longues durées d'exposition, la restriction de base n'est plus exprimée en termes de dose mais en termes d'éclairement :

### **Eclairement pondéré de la rétine pour des durées supérieures à 10 000 s : 0.22 mW/cm<sup>2</sup>**

Pour l'œil aphaque, la restriction de base est définie relativement à ces valeurs, mais avec une pondération de l'éclairement rétinien par la courbe de sensibilité A( $\square$ ).

Les valeurs de restrictions de base proviennent des études de Ham et Hochheimer. Elles ont été établies avec un facteur de sécurité de 5 à 10 par rapport aux niveaux nécessaires à l'apparition de lésions chez les singes macaques et rhesus (doses comprises entre 11 et 22 J/cm<sup>2</sup>).

La conversion de ces restrictions de base en limites d'exposition relatives à la source a été effectuée par l'Icnirp en utilisant un modèle géométrique simple de l'œil humain (modèle de Gullstrand) en considérant une longueur focale de 17 mm, un facteur de transmission des milieux oculaires situés en avant de la rétine de 0.9 et un diamètre pupillaire de 3 mm. Ce diamètre est une valeur relative à un œil normal (pupille non dilatée).

Lors de l'évaluation des valeurs limites d'exposition relatives à des examens ophtalmologiques, l'Icnirp recommande d'évaluer les doses rétinienne en considérant que la pupille est dilatée, avec un diamètre de 7 mm. Cependant, l'Icnirp ne prend en compte dans ces recommandations l'aggravation possible de l'exposition de la rétine par la lumière bleue lorsque celle-ci est anormalement dilatée (diminution du réflexe pupillaire) comme cela peut être le cas si les cônes et les cellules ganglionnaires à mélanopsine sont peu excités par la lumière incidente. Ce cas peut se rencontrer en éclairage générale avec des longueurs d'onde lumineuse courtes, produisant une faible stimulation visuelle et une faible excitation des cellules ganglionnaires à mélanopsine (voir la section sur les effets non-visuels de la lumière liés à l'excitation de la mélanopsine dans la rétine).

### 3.2 Les normes de sécurité photobiologique CIE S009, IEC 62471 et NF EN 62471

Les normes de sécurité photobiologique sont des normes visant à évaluer le niveau de risque des lampes et des produits utilisant des lampes. Le développement de ces normes a été fait dans les années 1970 et 1980. L'historique et le contexte des travaux aboutissant à ces documents sont détaillés dans un article récent, rédigé par des membres des groupes de travail de cette époque. Ces travaux ont initialement été menés aux USA par l'ACGIH et l'IESNA et ont abouti dans les années 1990 aux premières normes de sécurité photobiologiques des lampes : la série de normes américaines RP27 publiée conjointement par l'ANSI et l'IESNA. Dans les années 2000, des travaux ont été entrepris conjointement par la CIE et l'IEC pour adapter ces normes au niveau international, ce qui a abouti à la publication de la norme CIE S009 en 2002 puis à la norme IEC 62471 en 2006. La transposition européenne de la norme IEC 62471 par le CENELEC a donné la norme NF EN 62471 de 2008. La norme européenne NF EN 62471 est harmonisée avec la directive européenne Basse Tension et avec la directive européenne sur les Rayonnements Optiques Artificiels.

L'objectif des normes de sécurité photobiologique est de fournir des informations relatives à la sécurité d'un produit, en s'appuyant sur les recommandations de l'Icnirp. Elles s'appliquent aux sources de radiations optiques, alimentées électriquement, incohérentes (les faisceaux lasers sont exclus), à spectre large (comprenant les LED et les lampes « colorées »), dont les longueurs d'onde émises sont comprises entre 200 nm à 3 000 nm. Les effets biologiques concernés sont ceux décrits pour l'œil et la peau dans les recommandations de l'Icnirp.

La notion de groupe de risque a été introduite de manière assez similaire à celle des classes laser, mais elles ne peuvent pas être comparées entre elles.

Quatre groupes de risques sont ainsi définis :

- **Groupe de risque 0 (RG 0)** : sans risque ; aucun danger optique n'est considéré comme raisonnablement probable.
- **Groupe de risque 1 (RG 1)** : faible risque ; ces produits sont sans danger dans la plupart des applications, excepté pour des expositions prolongées.
- **Groupe de risque 2 (RG 2)** : risque modéré ; ces produits ne posent généralement pas de danger optique réaliste si le réflexe d'évitement limite la durée d'exposition ou si de longues durées d'exposition ne sont pas réalistes ;
- **Groupe de risque 3 (RG 3)** : risque élevé ; ces produits posent un danger potentiel même pour des expositions momentanées et des règles de sécurité pour ces systèmes sont généralement essentielles.

Le classement d'une source dans un groupe de risque est établi en fonction de la durée d'exposition maximale vis-à-vis des recommandations de l'Icnirp pour un observateur placé dans des conditions spécifiques :

- **RG 0** : durée d'exposition maximale admissible > 10 000 s
- **RG 1** : durée d'exposition maximale admissible comprise entre 100 s et 10 000 s
- **RG 2** : durée d'exposition maximale admissible comprise entre 0.25 s et 100 s
- **RG 3** : durée d'exposition maximale admissible < 0.25 s

La durée maximale d'exposition admissible correspond au temps au bout duquel au moins une des valeurs limites d'exposition de l'Incirp est dépassée pour un des effets sur l'œil ou la peau (1).

Pour évaluer précisément les durées maximales d'exposition à la source considérée et son groupe de risque, les normes de Tableau sécurité photobiologique spécifient les conditions et procédures de mesure du rayonnement émis par les lampes. En particulier, les mesures doivent être effectuées dans la direction où l'intensité émise est la plus élevée. Outre la direction d'observation, la distance à laquelle les mesures sont effectuées est définie précisément. Il est important de noter que cette distance n'est pas une distance liée à un scénario d'exposition mais est bien une distance de mesure pour déterminer un niveau d'émission de la source et déterminer son groupe de risque.

Dans les normes de sécurité photobiologique, une distinction est faite entre les « lampes d'utilisation courante » destinées à l'éclairage général et les autres lampes à usage plus spécifiques utilisées dans les projecteurs de lumière, les traitements médicaux, processus industriels, etc.

Pour des lampes d'usages courants, il faut caractériser le rayonnement accessible dans un plan où l'éclairement est égal à 500 lx. Toutefois, cette distance ne sera pas inférieure à 200 mm de la source lumineuse même si les 500 lx ne sont pas atteints à cette distance. Pour les lampes d'usage spécifiques, il faut caractériser le rayonnement à la distance de 200 mm.

La référence (Sloney) rappelle l'historique des choix de la distance de 200 mm et du plan de référence de 500 lx. Ceux-ci ont été faits par le comité technique de photobiologie de l'IESNA dans les années 1970. La distance de 200 mm a été choisie pour d'une part mesurer les luminances avec une bonne résolution spatiale de manière à évaluer correctement les risques rétinien qui sont liés à l'image de la source formée par l'œil sur la rétine, et d'autre part augmenter le rapport signal sur bruit des signaux UV-B très faible mesurés par spectroradiométrie à bande étroite. Il ne s'agit pas d'une distance liée à un quelconque scénario d'exposition.

Il est également précisé dans (Sloney) que l'éclairement de référence de 500 lx pour les sources d'éclairage général a été choisi à l'époque comme une valeur réaliste de la moyenne temporelle des éclairagements reçus au niveau du front et du dos des mains sur les lieux de travail les plus éclairés en lumière directe, correspondant à un éclairage de 1000 lx sur le plan de travail. Cette valeur moyenne d'éclairement, jugée pertinente pour l'exposition humaine, avait alors été évaluée entre 300 lx et 500 lx en considérant les coefficients de réflexion typiques des murs, des sols et des meubles. Par ailleurs, toujours d'après Sloney (Sloney), une seconde raison a justifié le choix du niveau de 500 lx : sous un éclairage fluorescent ou halogène à très fort éclairage, la composante UV-B est équivalente à celle reçue par une lampe fluorescente ou halogène donnant un éclairage de 500 lx.

Les membres des groupes de travail les plus « conservateurs » dans l'évaluation des risques avaient alors accepté l'éclairement de référence de 500 lx pour effectuer la mesure et la classification, même pour des durées d'exposition allant jusqu'à 12 h ou 16 h.

Lorsque la distance de mesure est définie, l'éclairement énergétique spectrique ( $W/m^2/nm$ ) ou la luminance énergétique spectrique ( $W/m^2/sr/nm$ ) sont mesurés sur tout le domaine spectral d'émission de la source. En ce qui concerne les risques rétinien, la luminance énergétique

spectrique est utilisée pour calculer la luminance pondérée par la sensibilité spectrale au risque considéré. Pour les sources considérées comme ponctuelles, les normes de sécurité photobiologiques permettent aussi d'utiliser l'éclairement pour évaluer les risques rétinien selon une approximation validée par l'Icnirp dans ces recommandations (approximation des petites sources).

### 3.3 Révision des normes de sécurité photobiologique

Un comité technique commun entre la CIE et l'IEC est actuellement en charge de réviser les normes CIE S009 / IEC 62471. Ce comité est présidé par John O'Hagan (Public Health England, Royaume-Uni). L'audition de John O'Hagan par l'Anses a permis de connaître les principales évolutions envisagées, même si, à l'heure de la rédaction de ce chapitre, le nouveau texte n'est pas adopté.

Le premier objectif de la révision de la future norme conjointe CIE/IEC 62471 est d'appliquer les dernières évolutions des recommandations de l'Icnirp de 2013. En particulier, pour le risque rétinien de la lumière bleue, la version actuelle de la norme IEC 62471 définit un angle de mesure de la luminance de 1,7 mrd pour les temps d'exposition courts tandis que l'Icnirp préconise depuis 2013 un angle minimum de 11 mrd.

Le groupe de travail CIE/IEC envisage de revoir la dénomination des groupes de risque :

- le groupe de risque RG0 resterait « sans risque »
- le groupe de risque RG1 « faible » deviendrait « extrêmement faible »
- le groupe de risque RG2 « modéré » deviendrait « faible »
- le groupe de risque RG3 « élevé » deviendrait « modéré »

L'objectif de cette proposition, non adoptée à la date de l'audition de John O'Hagan, est de revenir à l'esprit initial de la définition des groupes de risques qui précédait la publication des premières normes de sécurité photobiologique. Dans cet esprit, la dénomination des groupes de risque devait être mieux alignée avec celle des classes laser ?

### 3.4 Le rapport technique IEC TR 62471-2

Afin d'aider les fabricants de lampes et d'appareils incorporant des lampes à évaluer les risques photobiologiques, l'IEC a produit en août 2009 le rapport technique IEC TR 62471-2 (CEI TR 62471-2). Ce guide est relatif aux appareils comprenant des sources optiques « non-laser ».

Il précise notamment les conditions (distance et niveau d'éclairement) dans lesquelles la luminance doit être évaluée et définit la notion de distance minimale de sécurité photobiologique. Dans ce rapport, il est précisé que des luminaires d'éclairage général incorporant des sources non exemptes de risque photobiologique doivent être associés à une distance de sécurité minimale ou un accès contrôlé de manière à ce que, dans ces conditions, le groupe de risque du luminaire soit le groupe 0 (sans risque). Enfin, ce rapport propose des critères pour l'étiquetage des lampes vis-à-vis des risques photobiologiques.

Le rapport technique IEC TR 62471-2 donne par ailleurs la définition d'une distance minimale de sécurité photobiologique, distance à laquelle le rayonnement rentre dans le groupe de risque le plus bas.

Dans ce rapport technique, la distinction est faite entre les lampes et les systèmes utilisant des lampes tels que les luminaires. La question du « transfert » du groupe de risque de la source à celui du système est examinée. Pour le risque lié à la lumière bleue, dont l'évaluation repose sur la luminance, il est possible dans certaines conditions de transférer le groupe de risque de la LED au luminaire. Dans le cas général, le fabricant d'un système incorporant des lampes devrait procéder à l'évaluation du groupe de risque de son produit. Si le produit n'est pas

exempt de risque (groupe de risque supérieur à RG0), le fabricant devrait fournir les distances de risques correspondant à tous les groupes de risque inférieurs (« distances de sécurité »).

Lorsque les conditions d'évaluation du groupe de risque (200 mm ou distance à 500 lx) sont non représentatives des conditions d'utilisation d'un système incorporant des lampes, le fabricant a la possibilité d'évaluer son produit dans les conditions d'exposition les plus défavorables, par exemple à la distance minimale et à la durée maximale d'observation. Les cas d'application du système incorporant des lampes peuvent alors être classés en trois catégories :

- exposition de courte durée et non-intentionnelle (exemple : automobile, projecteurs) ;
- exposition intermittente, occasionnelle (exemple : jouets pour enfants) ;
- exposition intentionnelle ou probable à long terme (éclairage général, afficheurs).

Aucune base de temps n'est donnée pour évaluer dans quelle catégorie se situe une application particulière.

Lorsque le produit est évalué sous ces conditions spécifiques d'utilisation, le groupe de risque peut différer de celui des lampes incorporées dans le produit. Le guide IEC TR 62471-2 définit, pour information, des groupes de risque maximum autorisé selon le type d'application (Tableau 2).

**Tableau 2 : tiré de (IEC 2009), groupe de risque maximum acceptable des produits évalués sur la base du risque de l'observateur dans les conditions spécifiques d'utilisation**

Risk group of the lamp system	Risk group assessed under application specific conditions – viewer-related risk		
	Unintentional short term	Intentional short-term	Intentional (or likely) long-term
Risk Group RG0	Risk Group RG0	Risk Group RG0	Risk Group RG0
Risk Group RG1	Risk Group RG1	Risk Group RG1	Risk group RG0 Exposure limited by access distance or by controlled access
Risk Group RG2	Risk Group RG3	Risk Group RG1 – exposure limited by access distance or/and exposure duration or product used in restricted location	Risk group RG0 Exposure limited by access distance or by controlled access
Risk Group RG3	Risk Group RG2 – exposure limited by access distance or product used in restricted location	Risk Group RG1 – exposure limited by access distance or/and exposure duration or product used in restricted location	Risk group RG0 Exposure limited by access distance or by controlled access

Par exemple, si une LED de groupe de risque RG2 est incorporée dans un afficheur (système pour laquelle l'exposition à long terme est intentionnelle), l'afficheur est acceptable si son groupe de risque est RG0, ce qui peut être atteint en garantissant une distance minimale de risque RG0 (distance de sécurité).

D'après ce rapport technique, les luminaires d'éclairage général incorporant des sources non exemptes de risque photobiologique (RG0) doivent être associés à une distance de sécurité minimale et/ou un accès contrôlé de manière à ce que, dans ces conditions, le groupe de risque du luminaire soit le groupe RG0 (sans risque)

Ce rapport technique propose également des critères pour le marquage des lampes pour la sécurité photobiologique. Vis-à-vis du risque lié à la lumière bleue, le marquage n'est pas requis pour les groupes de risque RG0 et RG1. Par contre, pour les lampes appartenant au groupe de risque RG2, le marquage suivant est requis :

*CAUTION<sup>1</sup> : Possibly hazardous optical radiation emitted from this product.*

<sup>1</sup> « CAUTION » : « AVERTISSEMENT » en français



Pour le groupe de risque RG3, toujours vis-à-vis de la lumière bleue, le marquage proposé est le suivant :

*WARNING<sup>2</sup> : Possibly hazardous optical radiation emitted from this product.*

Les marquages devraient être apposés sur les produits et devraient figurer dans la notice d'utilisation. Des symboles d'avertissement décrits dans la norme devraient être utilisés.

Pour toutes les lampes, ainsi que les systèmes utilisant des lampes, qui n'appartiennent pas au groupe de risque RG0, le rapport technique IEC TR 62471-2 indique que les informations suivantes devraient être données à l'utilisateur :

- une déclaration que la lampe ou le système de lampe n'est pas exempt de risque et que le risque de l'observateur dépend du mode d'installation et d'utilisation du produit ; Le détail des types de risque qui conduisent à un groupe de risque supérieur à RG0 ;
- les valeurs d'exposition et les distances de risque, avec un graphique optionnel présentant l'exposition en fonction de la distance ;
- les distances de risques pour tous les groupes de risques inférieurs au groupe de risque nominal ;
- une liste d'instructions adéquates pour l'assemblage, la manipulation, l'installation, la maintenance et l'utilisation dans des conditions de sécurité. Des avertissements clairs doivent être donnés pour éviter l'exposition potentielle aux rayonnements présentant des risques ;
- des conseils et des avertissements sur les risques prévisibles dus à de mauvaises pratiques, défauts de fonctionnement et certains modes de défaillance spécifiques ;

En particulier, l'explication du marquage photobiologique concernant le groupe de risque RG2 pour la lumière bleue est la suivante :

*Do not stare<sup>3</sup> at operating lamp. Maybe harmful to the eyes*

Pour le groupe de risque RG3, l'explication du marquage est la suivante :

*Do not look<sup>4</sup> at operating lamp. Eye injury may result*

Depuis la publication de ce rapport technique, l'industrie de l'éclairage a connu des difficultés pour appliquer la procédure du Tableau 2 et établir des liens entre les groupes de risque des LED et les groupes de risque des produits intégrant des LED.

La procédure de transfert du groupe de risque est traitée plus précisément dans le cas du risque de la lumière bleue dans un rapport technique plus récent, le rapport IEC TR 62778 :2014. Il est directement applicable aux LED.

### 3.5 Le rapport technique IEC TR 62778

Ce rapport a été publié dans sa version finale en 2014 dans le but d'être plus précis que le document IEC TR 62471-2 lors de l'évaluation du risque de la lumière bleue. Il donne en

---

<sup>2</sup> « WARNING » : « DANGER » en français

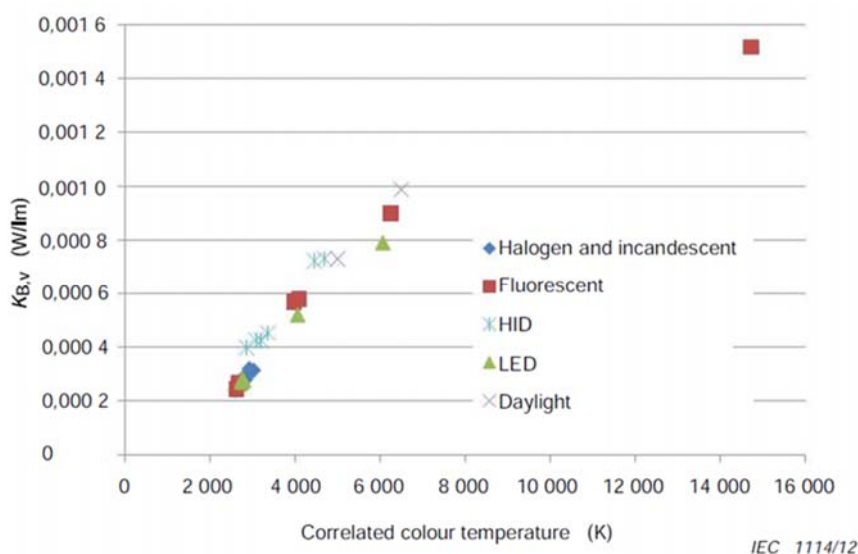
<sup>3</sup> « Do not stare » : « Ne pas fixer » en français, « Do not look » : « Ne pas regarder » en français

<sup>4</sup> « Do not look » : « Ne pas regarder » en français



particulier une méthode pour transférer le groupe de risque du composant LED au produit intégrant ces LED.

Ce rapport technique établit en premier lieu une corrélation linéaire (Figure 2) entre l'efficacité du rayonnement lumineux au risque rétinien de lumière bleue et la température de couleur de différentes lumières blanches d'origine naturelle (lumière du jour) et artificielle (lampes halogènes, lampes à décharge, lampes fluorescentes et LED), pour des températures de couleurs comprises entre 2 200 K et 6 200 K. Ce paramètre d'efficacité est défini par la CIE dans la note technique CIE TN 002.



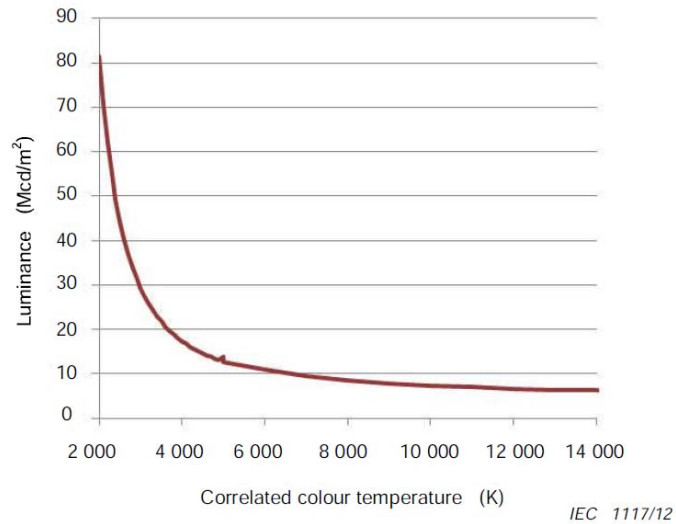
**Figure 2 : efficacité du rayonnement lumineux au risque rétinien de la lumière bleue en fonction de la température de couleur (CCT) pour différentes sources de lumière blanche (source : IEC TR 62778)**

Cette corrélation est utilisée pour établir des relations linéaires simplifiées reliant la luminance  $L_B$  et l'éclairement  $E_B$ , pondérés par la courbe  $B(\lambda)$  de l'Inirp, à la luminance et à l'éclairement visuels, exprimés respectivement en  $\text{cd/m}^2$  et en  $\text{lx}$ .

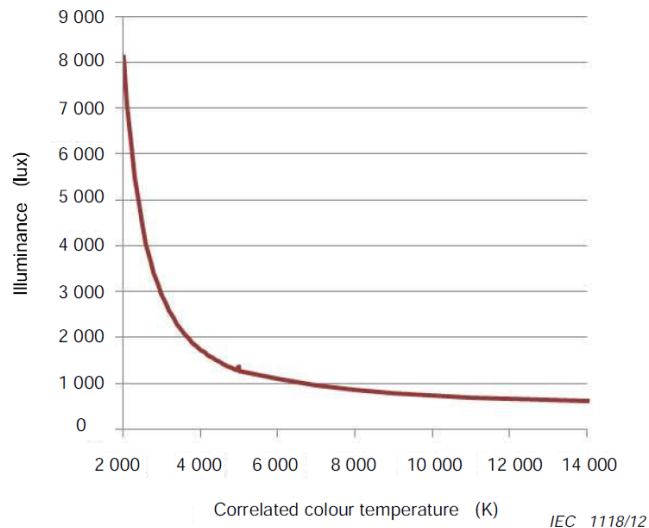
Le rapport technique présente une estimation des grandeurs photométriques nécessaires pour atteindre la limite d'exposition au bout de 100 s. Cette durée correspond à la frontière entre les groupes de risque RG1 et RG2. Dans ce cas, la limite d'exposition est égale à  $L_B = 10\,000 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ .

L'estimation est effectuée en termes de luminance et d'éclairement. Pour l'éclairement, l'approximation de petite source est utilisée (éclairement fourni par une source ponctuelle équivalente). Elle représente une estimation de pire cas. En effet, pour un éclairement donné, la luminance d'une petite source équivalente est toujours supérieure à la luminance de la source réelle.

Le résultat est présenté dans les Figure 3 et Figure 4 qui indiquent respectivement la luminance et l'éclairement nécessaires pour dépasser la limite d'exposition de égale à  $L_B = 10\,000 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ , en fonction de la température de couleur de la lumière blanche considérée.



**Figure 3 : estimation de la luminance visuelle ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) correspondant à la valeur limite d'exposition à 100 s (limite entre RG1 et RG2), en fonction de la température de couleur de la lumière blanche émise par la source (source : IEC TR 62778 (IEC 2012)).**



**Figure 4 : estimation de l'éclairement (lx) correspondant à la valeur limite d'exposition à 100 s (limite entre RG1 et RG2), en fonction de la température de couleur de la lumière blanche émise par la source (source IEC TR 62778 (IEC 2012)).**

La Figure 4 indique également que l'éclairement limite entre RG0 et RG1 n'atteint jamais le niveau de 500 lx. Ceci signifie que l'évaluation des sources de lumière blanche à la distance où l'éclairement est égal à 500 lx aboutira toujours à un groupe de risque RG0 pour le risque rétinien de la lumière bleue. C'est pourquoi le rapport technique IEC TR 62778 abandonne la notion d'éclairement de référence de 500 lx dans l'évaluation du risque rétinien de la lumière bleue, pour les sources de lumière blanche.

Les courbes de la Figure 3 et de la Figure 4 permettent d'établir des limites protectrices de luminances et d'éclairement en fonction de domaines de température de couleur souvent utilisés dans l'industrie de l'éclairage. Ces limites sont présentées dans le Tableau 2 et dans le

Tableau 3. Elles ont été établies avec une marge de sécurité de 2 par rapport à la Figure 3 et à la Figure 4 pour tenir compte des incertitudes liées à la corrélation linéaire entre l'efficacité du rayonnement au risque de la lumière bleue et la température de couleur.

**Tableau 2 : luminance limites de sources de lumière blanche correspondant à un groupe de risque ne dépassant pas RG1.**

Température de couleur CCT (K)	Luminance limite L (cd m <sup>-2</sup> )
CCT ≤ 2350 K	RG1 si L ≤ 4 × 10 <sup>7</sup> cd/m <sup>2</sup>
2 350 K < CCT ≤ 2 850 K	RG1 si L ≤ 1.85 × 10 <sup>7</sup> cd/m <sup>2</sup>
2 850 K < CCT ≤ 3 250 K	RG1 si L ≤ 1.45 × 10 <sup>7</sup> cd/m <sup>2</sup>
3 250 K < CCT ≤ 3 750 K	RG1 si L ≤ 1.1 × 10 <sup>7</sup> cd/m <sup>2</sup>
3 750 K < CCT ≤ 4 500 K	RG1 si L ≤ 8.5 × 10 <sup>6</sup> cd/m <sup>2</sup>
4 500 K < CCT ≤ 5 750 K	RG1 si L ≤ 6.5 × 10 <sup>6</sup> cd/m <sup>2</sup>
5 750 K < CCT ≤ 8 000 K	RG1 si L ≤ 5 × 10 <sup>6</sup> cd/m <sup>2</sup>

**Tableau 3 : éclairagements limites fournis par une source de lumière blanche correspondant à un groupe de risque ne dépassant pas RG1.**

Température de couleur CCT (K)	Eclairage limite E (lx)
CCT ≤ 2350 K	RG1 si E ≤ 4 000 lx
2 350 K < CCT ≤ 2 850 K	RG1 si E ≤ 1 850 lx
2 850 K < CCT ≤ 3 250 K	RG1 si E ≤ 1 450 lx
3 250 K < CCT ≤ 3 750 K	RG1 si E ≤ 1 100 lx
3 750 K < CCT ≤ 4 500 K	RG1 si E ≤ 850 lx
4 500 K < CCT ≤ 5 750 K	RG1 si E ≤ 650 lx
5 750 K < CCT ≤ 8 000 K	RG1 si E ≤ 500 lx

En s'appuyant sur ces estimations, le rapport technique fixe une limite de luminance visuelle en dessous de laquelle toutes les sources émettant de la lumière blanche sont exemptes de risques liés à la lumière bleue (RG0), et ce quels que soient le spectre considéré et la température de couleur associée. Cette limite est fixée à 10 000 cd/m<sup>2</sup>.

Une nouvelle notion est introduite dans ce rapport technique : les **groupes de risque RG0 et RG1 « illimités »**, qui n'existent pas dans les normes de sécurité photobiologique. Ces groupes de risques illimités ont pour but de pouvoir transférer le groupe de risque d'un composant au

groupe de risque d'un système qui les intègre, sans recourir à une caractérisation physique du système. Ainsi, lorsqu'un composant est classé RG0 illimité (ou respectivement RG1 illimité), le groupe de risque d'un système utilisant plusieurs de ces composants ne pourra jamais dépasser le niveau RG0 (ou respectivement RG1).

Par exemple, les composants émettant de la lumière blanche avec une luminance inférieure à 10 000  $\text{cm}^2$  sont classés RG0 illimité selon l'IEC TR 62778, sans nécessité de faire de mesure selon la norme IEC 62471. De même, les valeurs des Tableau 2 et Tableau 3 constituent également des limites en termes de luminance ou d'éclairement pour lesquelles les sources émettant de la lumière blanche à des niveaux inférieurs peuvent être classées RG1 illimité sans nécessité de faire de mesure IEC 62471.

Le rapport technique décrit une procédure de classification basée sur des mesures de luminance (ou d'éclairement pour les sources plus petites que 2.2 mm) effectuées à la distance de 200 mm dans un angle de 11 mrd. Dans ces conditions, une source non-ponctuelle est classée RG0 illimité si la luminance pondérée  $L_B$  est inférieure à 100  $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$ , ou RG1 illimité si la luminance pondérée est inférieure à 10 000  $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$ .

Si des composants sont classés RG2, alors il faut déterminer l'éclairement seuil  $E_{th}$  en lux qui correspond au niveau où le groupe de risque redescend à RG1. Il s'agit d'une notion « d'éclairement de sécurité ».

Lorsqu'un système intègre des composants classés RG2, la détermination du groupe de risque de ce système passe par la détermination de la distance à laquelle l'éclairement dépasse l'éclairement de seuil  $E_{th}$ . Cette distance constitue la distance seuil  $d_{th}$ , qui correspond à une distance de sécurité au-delà de laquelle le système final est en classification RG1.

Pour les luminaires intégrant des composants RG2, le rapport technique recommande de communiquer soit un message disant de ne pas fixer le luminaire (*do not stare into the luminaire*), soit une information de la distance seuil.

Les notions d'éclairement seuil et de distance seuil ont été introduites spécifiquement dans le document IEC TR 62778 et n'existent pas dans les normes de sécurité photobiologique. On constate que la notion de distance de sécurité n'est pas la même dans le rapport technique IEC TR 62471-2 (distance de sécurité définie par rapport à RG0) et dans le rapport technique IEC TR 62778 (définition par rapport à RG1).

Le rapport IEC TR 62778 permet donc aux fabricants de système, typiquement de luminaires, de ne pas recourir à une évaluation de groupe de risque rétinien à la lumière bleue selon la norme IEC / EN 62471 si les composants qu'ils intègrent ont été caractérisées selon cette norme.

Pour les fabricants de systèmes intégrant des LED (lampes, luminaires, etc.), cette méthodologie facilite l'évaluation des risques photobiologiques puisque le recours à une mesure selon IEC 62471 n'est plus forcément nécessaire.

### 3.6 Autres documents IEC concernant la sécurité photobiologique

L'IEC a édité récemment plusieurs normes et rapports techniques susceptibles de concerner des systèmes intégrant des LED :

IEC TR 62471-3:2015 Photobiological safety of lamps and lamp systems Part 3: Guidelines for the safe use of intense pulsed light source equipment on humans

Ce rapport technique est applicable aux lampes de type "IPL" (intensed pulsed light) notamment utilisées pour certains actes à visée esthétique.

IEC 62471-5: 2015 Photobiological safety of lamps and lamp systems Part 5: Image projectors

Cette norme est applicable aux projecteurs d'image (vidéo-projecteurs, projecteurs de cinéma, etc.).

### 3.7 Les normes de mesure de l'exposition humaine aux rayonnements optiques artificiels

La série de normes européennes NF EN 14255 s'inscrit dans le cadre de la mise en œuvre de la directive européenne 2006/25/CE sur l'exposition aux rayonnements optiques artificiels et a pour objectif de définir les méthodes de mesurage et d'évaluation de l'exposition des personnes aux rayonnements optiques incohérents. Elle comprend quatre parties :

- Partie 1 : rayonnements ultraviolets émis par des sources artificielles sur les lieux de travail – mai 2005
- Partie 2 : rayonnements visibles et infrarouges émis par des sources artificielles sur les lieux de travail – février 2006
- Partie 3 : rayonnement ultraviolet émis par le soleil – juin 2008
- Partie 4 : Terminologie et grandeurs utilisées pour le mesurage de l'exposition au rayonnement ultraviolet, visible et infrarouge – décembre 2006.

Seules les parties 2 et 4 concernent le rayonnement émis par les LED.

#### La norme NF EN 14255 – 2

Cette norme s'applique à l'exposition aux rayonnements visible et infrarouge sur les lieux de travail intérieur et extérieur. Elle ne spécifie pas de valeur limite d'exposition et préconise d'appliquer les valeurs limites définies par les réglementations nationales ou par les recommandations internationales.

Les mesurages de l'exposition aux rayonnements sont souvent longs et coûteux, la norme préconise d'y avoir recours uniquement lorsqu'on ne peut pas estimer à l'avance si les valeurs limites seront respectées ou non. Elle propose donc de démarrer l'évaluation des risques par une analyse préliminaire comprenant une estimation de l'exposition. Plusieurs solutions sont listées, selon les sources de rayonnement :

le classement des sources en termes de risque. Pour les lampes, par exemple, la norme NF EN 62471 peut être appliquée.

l'évaluation de l'exposition des personnes déterminée par calcul à partir de données telles que le spectre, la géométrie, la durée d'exposition.

S'il s'avère que l'exposition individuelle est négligeable et que les valeurs limites ne sont pas dépassées, aucune autre mesure n'est requise. Dans ce cas contraire, un mesurage de l'exposition doit être mis en œuvre. Le mode opératoire du mesurage est détaillé, notamment le choix de la méthode et des appareils de mesures en fonction des conditions d'exposition. Une liste des différentes méthodes de détermination des grandeurs est présentée en annexe de la norme.

La norme fixe également les exigences relatives au matériel (sensibilité, correction, étalonnage, etc.) et aux méthodes de mesures (durée des mesures, géométrie du mesurage, etc.).

## La norme NF EN 14255 – 4

Plusieurs grandeurs expriment l'exposition aux rayonnements optiques. Selon les sources de références, normes ou recommandations de valeurs limites, certaines de ces grandeurs sont définies différemment. Cette partie 4 de la norme spécifie donc une terminologie et une écriture uniformes des grandeurs qui s'appliquent notamment dans les parties 1, 2 et 3 mais également lors de la révision de normes ou de recommandations de valeurs limites correspondantes.

### **4. Normes concernant la modulation temporelle de la lumière**

La modulation temporelle de la lumière est un phénomène physique de fluctuation temporelles rapide, périodique ou non, de la quantité de lumière (ou de la couleur) émise par une source de lumière. Il s'agit d'un phénomène qui n'est pas en général recherché dans les systèmes d'éclairage, à l'exception des lampes stroboscopiques, des clignotants automobiles, de gyrophares ou de certains dispositifs routiers de signalisation de dangers ou de travaux.

Dans le cas des LED, la modulation temporelle de la lumière émise n'est pas directement liée au processus d'émission lumineuse mais au courant d'alimentation du composant. En effet, la faible inertie électrique et thermique de la LED a pour conséquence que la production de lumière suit exactement la forme temporelle du courant d'alimentation, et ce jusqu'à des échelles de temps très courtes, au moins de l'ordre de la microseconde. Si un LED est alimentée avec un courant qui n'est pas parfaitement continu mais présente une modulation résiduelle (périodique ou transitoire), alors on retrouve cette modulation résiduelle dans la lumière émise. Il s'agit donc d'un phénomène particulièrement critique pour l'éclairage à LED. Il est d'ailleurs quelquefois mis à profit volontairement pour des applications de communications optiques sans fil (Li-Fi) ou de gradation du niveau lumineux par modulation du rapport cyclique (méthode *Pulse-Width Modulation* ou PWM).

Des fluctuations anormales de la lumière émise par des LED proviennent quelquefois de l'association d'un produit d'éclairage LED avec un variateur incompatible. L'incompatibilité des équipements est à l'origine de fluctuations du courant d'alimentation des LED et d'une modulation temporelle anormale de la lumière.

En 2016, la CIE dans sa note technique CIE TN 006 a défini précisément la terminologie liée à la modulation temporelle de la lumière et aux effets visuels induits. La CIE considère ainsi que la modulation temporelle de la lumière est une caractéristique purement lumineuse, et donc physique, liée aux sources de lumière. Cette notion avait été jusqu'en 2016 assimilée au papillotement (*flicker* en anglais) de la lumière. Or, le papillotement est en réalité un effet visuel de la modulation temporelle de la lumière. En plus du papillotement, il existe d'autres effets visuels de la modulation temporelle de la lumière ainsi que des effets non-visuels. En-dehors de l'humain, il existe également des effets particuliers sur des systèmes électroniques de détection et d'imagerie qui ne rentrent pas dans le cadre de l'expertise Anses.

#### **4.1 La terminologie de la note technique CIE TN 006**

Ce document a proposé pour la première fois en 2016, une classification de trois effets visuels distincts produits par la modulation temporelle de la lumière. Ces effets, quelquefois appelés *temporal light artifacts* en anglais (TLA), sont les suivants :

Le papillotement (*flicker*) : il s'agit de la perception d'une variation temporelle de la lumière dans le cas d'un observateur statique dans un environnement statique. Cet effet est observable à des fréquences de modulation atteignant typiquement 70 Hz.

L'effet stroboscopique : il s'agit d'un changement perçu par un observateur statique du mouvement d'un objet éclairé par une lumière modulée. Cette situation correspond donc à un environnement non statique. Lorsque l'objet en mouvement est une partie du corps humain (bras, main, doigt) passant devant l'œil, cet effet est typiquement observable pour des fréquences de modulation comprises entre 70 Hz et 2000 Hz (NEMA).

L'effet de réseau fantôme (*phantom array effect*) : il s'agit de la perception d'images multiples de sources de lumière modulée, apparaissant lorsque l'observateur effectue une saccade oculaire. Dans des travaux de recherche récents (ROBERTS 2013), cet effet est détectable pour des fréquences de modulation allant jusqu'à 2 500 Hz.

La visibilité de ces trois effets visuels de la lumière modulée dépend d'un grand nombre de facteurs qui sont détaillés dans le chapitre spécifique de ce rapport.

## 4.2 Définition des indices normatifs relatifs à la modulation temporelle de la lumière

Les indices relatifs à la modulation temporelle de la lumière se calculent tous à partir de la mesure des variations dans le temps d'une quantité photométrique. Il peut s'agir de la luminance, de l'intensité ou du flux lumineux. Aucun organisme technique n'a encore établi d'indice décrivant la modulation temporelle de la couleur de la lumière (modulation temporelle chromatique), qui est un phénomène plus rarement étudié.

### La forme d'onde lumineuse

La fonction de variation temporelle de la quantité photométrique considérée est appelée la forme d'onde lumineuse, terme issu du domaine du génie électrique. La forme d'onde peut être périodique (sinusoïdale par exemple) ou non-périodique. Les formes d'onde observées en éclairage sont très souvent périodiques. La fréquence de modulation la plus fréquemment mesurée en éclairage est de deux fois la fréquence du secteur, soit 100 Hz en Europe ou 120 Hz aux USA et au Japon. De plus, les formes d'ondes ont des profils temporels pouvant être complexes, contenant très fréquemment des composantes harmoniques d'ordre impair (pour l'Europe : 300 Hz, 500 Hz, 600 Hz, etc.). En fonctionnement anormal d'un produit d'éclairage, on peut observer aussi des composantes sous-harmoniques et des composantes inter-harmoniques.

Certains organismes de normalisation ont intégré dans les normes présentées dans la suite de ce chapitre des préconisations concernant la mesure physique de la forme d'onde. Les préconisations ne sont pas encore harmonisées entre les différents organismes. La CIE a entrepris ce travail d'harmonisation dans un nouveau groupe de travail comprenant des membres représentatifs de l'ensemble des parties concernées, y compris des autres organismes de normalisation.

A titre d'information, les conditions de mesures suivantes seront précisées par la CIE :

- Type de détecteur optique
- Environnement physique (sphère d'intégration par exemple)
- Utilisation d'un filtre photopique
- Limitation de la lumière parasite
- Bande passante de l'électronique d'acquisition de données
- Filtres anti-repliement de spectre



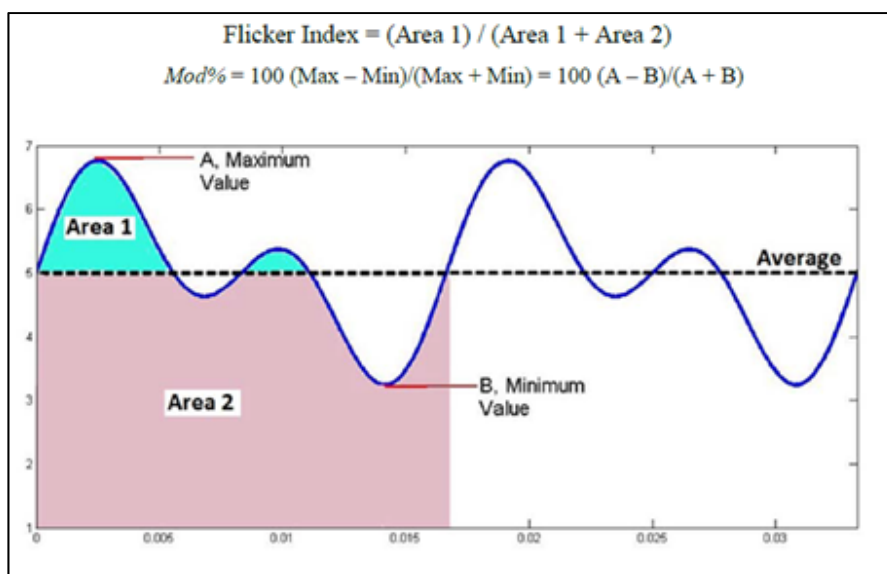
- Linéarité de l'instrumentation
- Résolution temporelle d'échantillonnage
- Durée de l'acquisition temporelle
- Préconisations spécifiques pour l'analyse spectrale de Fourier (fenêtres de pondération, résolution fréquentielle, etc.)

### Pourcentage de modulation et indice de papillotement

Deux indices simples sont utilisés par l'IESNA pour caractériser la modulation temporelle de la lumière : le pourcentage de modulation et l'indice de papillotement (IESNA 2000 Lighting Handbook). Ils se déterminent tous les deux directement à partir de la forme d'onde :

- Pourcentage de modulation (*flicker percent* en anglais): il s'agit de la profondeur de modulation de la forme d'onde, appelé improprement pourcentage de papillotement.
- Indice de papillotement (*flicker index* en anglais) : il s'agit du rapport entre l'aire de la forme d'onde située au-dessus du niveau moyen et l'aire totale de la forme d'onde.

La Figure 5 : le graphe représente une forme d'onde quelconque. L'axe des abscisses représente le temps (s). L'axe des ordonnées représente le niveau lumineux, en unité arbitraires. Les définitions mathématiques de l'indice de papillotement (*flicker index*) et du pourcentage de modulation (*flicker percent*) sont données (*source : tirée de la norme IEEE 1789.*) montre un exemple de forme d'onde et les formules de calcul de ces deux indices de modulation temporelle.



**Figure 5 : le graphe représente une forme d'onde quelconque. L'axe des abscisses représente le temps (s). L'axe des ordonnées représente le niveau lumineux, en unité arbitraires. Les définitions mathématiques de l'indice de papillotement (*flicker index*) et du pourcentage de modulation (*flicker percent*) sont données (*source : tirée de la norme IEEE 1789.*)**

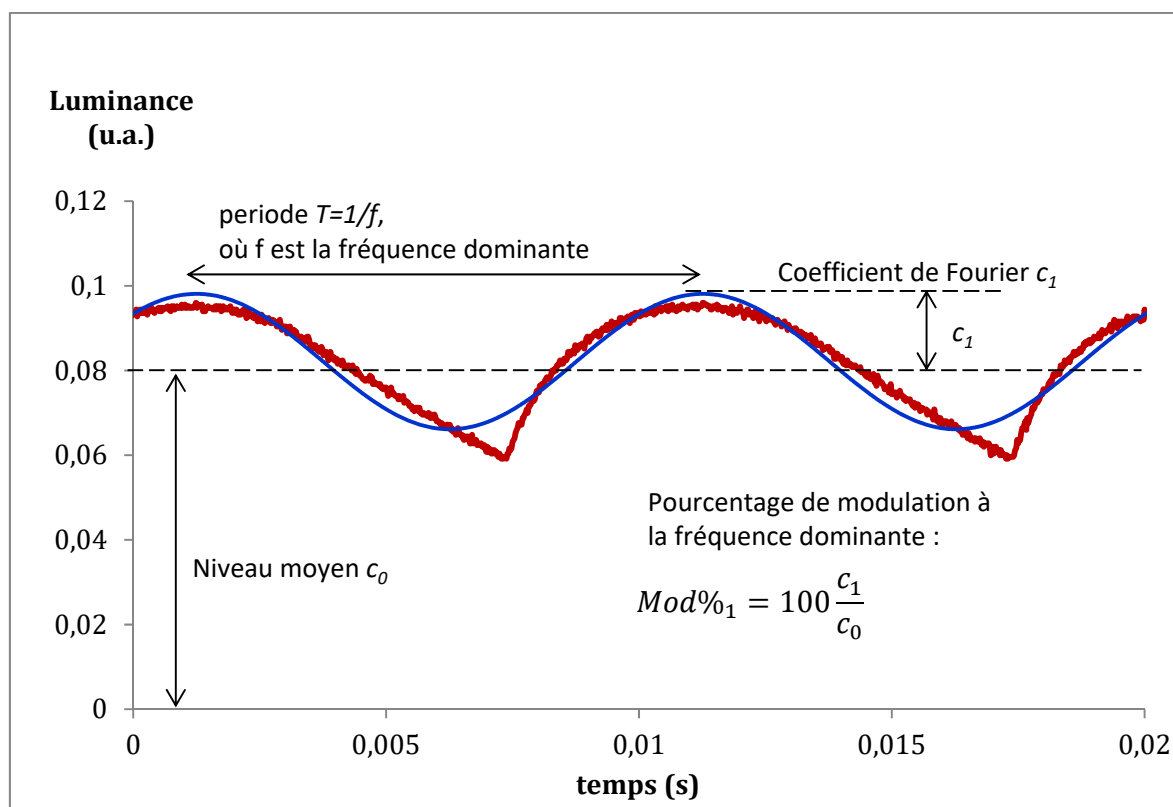
Ces indices sont purement physiques et ne traduisent pas la perception du papillotement, contrairement à ce que leur nom anglais indique. En effet, le papillotement est un effet visuel,



physiologique, induit par la modulation de la lumière. Il est fortement dépendant de la fréquence de la modulation temporelle ainsi que de la sensibilité spatio-temporelle du système œil-cerveau de l'être humain.

La norme IEEE 1789 (IEEE 2015), qui présente de manière approfondie les effets de la modulation temporelle de la lumière émise par les LED, étend la notion de pourcentage de modulation à l'ensemble du spectre fréquentiel de la forme d'onde, calculé par transformation de Fourier. Lorsque la modulation de la lumière est périodique, il est possible de calculer les pourcentages de modulation pour chaque composante fréquentielle. En prenant l'exemple du cas très courant en Europe de modulation temporelle de la lumière à 100 Hz, il est possible de déterminer les pourcentages de modulation à 100 Hz, 300 Hz, 500 Hz etc.

La décomposition fréquentielle de la forme d'onde est bien adaptée aux modulations périodiques, qui sont de loin les plus fréquentes pour les produits d'éclairage. Elle constitue la base de la construction d'autres indices, comme l'indice SVM, cité dans (NEMA, 2017), ou comme le « pourcentage de modulation à la fréquence dominante » introduit par l'Agence Internationale de l'Energie dans ses spécifications de qualité de l'éclairage LED. Ce paramètre est calculé à partir du premier coefficient de la série de Fourier de la forme d'onde. Il est illustré sur la Figure 6. Cette définition est semblable à celle du taux d'ondulation (*ripple ratio* en anglais) introduit par De Lange en 1952 (De lange, 1952 ; De lange, 1954) pour décrire la visibilité du papillotement lorsque la modulation temporelle n'est pas sinusoïdale.



**Figure 6 : définition mathématique du pourcentage de modulation à la fréquence dominante  $Mod\%_1$ . (source : IEA 4<sup>e</sup> SSL spécifications internet).**

La courbe rouge représente la forme d'onde lumineuse. La courbe sinusoïdale bleue représente la première composante de Fourier, à la fréquence dominante (ici 100 Hz).

### Les indices de visibilité des effets visuels de la modulation temporelle de la lumière

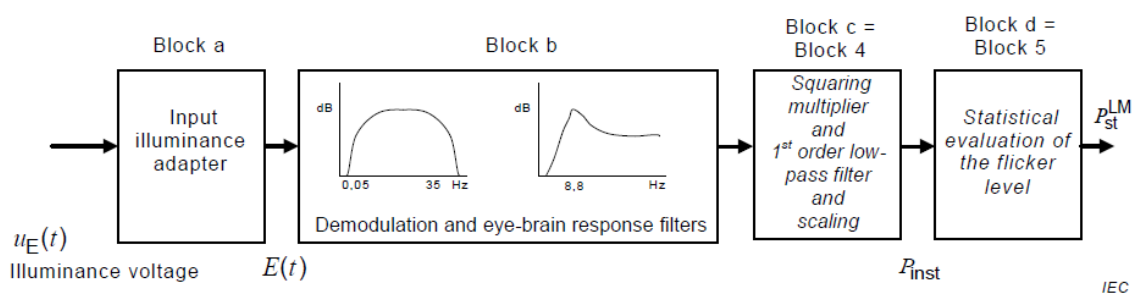
Deux hypothèses importantes sont implicites dans la définition de tous les indices de visibilité existants dans les normes et recommandations présentées dans la suite de cette section. Ces hypothèses ne sont pas systématiquement rappelées dans les documents cités. Il s'agit des hypothèses de linéarité et de stationnarité du système « œil – cerveau ». La sensibilité à la lumière modulée est supposée stationnaire (elle ne varie pas en fonction du temps, même si le niveau d'éclairage ou la position du regard varient) et linéaire par rapport au taux de modulation. Cette hypothèse permet de définir de manière équivalente des modes de calcul en fonction du temps et en fonction de la fréquence, via l'analyse de Fourier (décomposition d'un signal en somme de composantes fréquentielles sinusoïdales pures).

#### *L'indice $P_{st}^{LM}$ de visibilité du papillotement*

Les normes de compatibilité électromagnétique de l'IEC, transposées en normes européennes, comportent depuis très longtemps un indice de visibilité du papillotement. Il s'agit en particulier de la norme NF EN 61000-3-3 qui traite de l'immunité des équipements d'éclairage aux fluctuations de tension. Cette norme se base sur la visibilité du papillotement pour définir les limites d'acceptabilité des fluctuations de tension. Selon l'IEC, ces fluctuations de tensions sont acceptables si 50% des observateurs ne distinguent pas le papillotement qu'elles induisent dans une lampe à incandescence de 60 W.

Dans cette norme, un appareil appelé « flickermètre IEC » est utilisé pour prédire l'effet d'une fluctuation de tension arbitraire (périodique, non-périodique, transitoire, etc.) sur le flux lumineux émis par une lampe à incandescence théorique et normalisée, de manière à prédire si cette fluctuation de tension a statistiquement 50% de chance de produire un impact visible par un observateur.

Le flickermètre IEC est un appareil normalisé qui est décrit dans la norme NF EN 61000-4-15. Il est basé sur le calcul de l'indice  $P_{st}$  de « sévérité à court-terme du papillotement ». Cet indice fait appel à une modélisation mathématique de la réponse « œil-cerveau » chez l'humain et de la relation théorique tension-luminance d'une lampe à incandescence. Afin de fournir un indice indépendant de la source lumineuse, l'IEC a récemment introduit, dans le rapport technique IEC TR 61547, un nouvel indice similaire, appelé  $P_{st}^{LM}$ , qui permet de prédire la visibilité du papillotement directement à partir de la forme d'onde de la modulation temporelle de la lumière. La Figure 7 montre les étapes de calcul de l'indice  $P_{st}^{LM}$ .



**Figure 7 : étapes de calcul de l'indice  $P_{st}^{LM}$  de sévérité à court terme du papillotement défini par l'IEC dans le rapport technique (IEC 2015). Le bloc b comprend une modélisation mathématique de la réponse en fréquence du système humain « œil-cerveau » vis-à-vis de la visibilité des fluctuations temporelles de la lumière.**

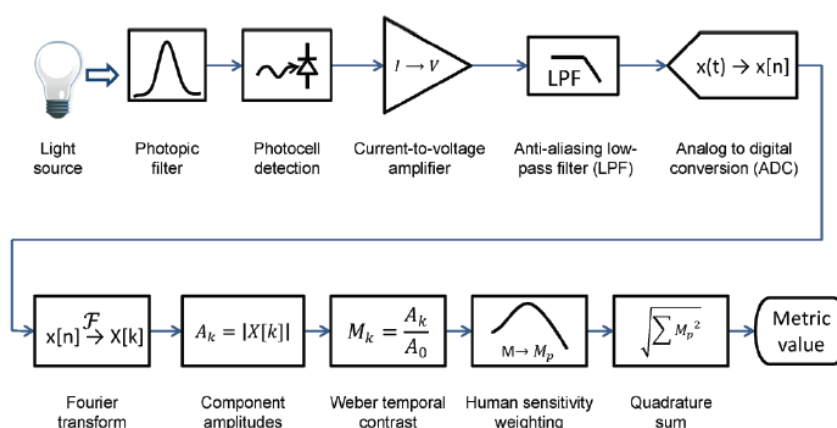
La courbe de sensibilité du système œil-cerveau au papillotement utilisé par l'IEC est dérivée des travaux de De Lange publié en 1961 (De lange, 1961) et de Rashbass (Rashbass, 1970). Ce modèle est applicable en vision directe et centrale avec une petite source lumineuse (diamètre angulaire apparent d'environ 2°), avec un niveau d'éclairement moyen supérieur à 100 lx et en condition d'adaptation totale au papillotement. La règle d'additivité des composantes fréquentielle de la forme d'onde est la somme quadratique.

L'indice  $P_{st}^{LM}$  a été construit de manière à ce que la valeur de 1 corresponde au seuil de visibilité du papillotement pour 50% des observateurs. Ainsi, lorsque  $P_{st}^{LM} = 1$ , le papillotement d'une source de lumière correspond à celui d'une lampe à incandescence de 60 W vue par un observateur moyen : 50% des observateurs ne perçoivent pas de papillotement, 50% des observateurs perçoivent le papillotement. Lorsque  $P_{st}^{LM} < 1$ , la source de lumière provoque un papillotement plus faible qu'une lampe à incandescence de 60 W pour l'observateur moyen. Lorsque  $P_{st}^{LM} > 1$ , la source de lumière provoque un papillotement plus élevé qu'une lampe à incandescence de 60 W pour l'observateur moyen.

L'indice  $P_{st}^{LM}$  est un indice de papillotement qui se calcule ou se mesure en fonction du temps (domaine temporel) sans avoir forcément recours à la décomposition de Fourier de la forme d'onde. Il est ainsi très bien adapté aux modulations complexes de la lumière comme par exemple les fluctuations quasi-périodiques ou aléatoires apparaissant lors de tests de compatibilité électromagnétique ou de qualité de réseau électrique.

#### L'indice de perception du papillotement FPM

L'organisation Nord-Américaine ASSIST (Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies) a proposé dans (ASSIST, 2015) une méthode d'évaluation du papillotement, utilisant une approche basée sur la décomposition de Fourier de la forme d'onde. Chaque composante fréquentielle doit être pondérée par une fonction de sensibilité humaine au papillotement. L'indice de perception du papillotement FPM (Flicker Perception Metrics) est obtenu par la somme quadratique de chaque composante fréquentielle pondérée. La Figure 8 donne les étapes de mesure et de calcul de l'indice ASSIST.



**Figure 8 : étapes de mesures et de calcul de l'indice ASSIST**

La courbe de sensibilité humaine au papillotement utilisé par l'ASSIST est issue d'une publication récente menée par le laboratoire américain Lighting Research Center (Boddington, 2015). Les fréquences de modulation étudiées étaient comprises entre 5 Hz et 65 Hz.

Dans cette étude, 10 sujets ont été testés pour établir empiriquement cette courbe dans des conditions de vision directe d'une lampe (diamètre angulaire apparent 5°) éclairant un fond

blanc avec des éclairage de l'ordre de 100 lx à 1000 lx. Cette étude a également établi une règle d'additivité quadratique des composantes fréquentielles de la forme d'onde : la visibilité du papillotement dépend de la somme quadratique des visibilités de chaque composante fréquentielle.

#### *L'indice SVM de visibilité de l'effet stroboscopique*

La visibilité de l'effet stroboscopique dépend beaucoup de l'objet en mouvement qui est éclairé par la source de lumière modulée. S'il s'agit d'une machine en mouvement très rapide, le phénomène pourra être visible jusqu'à des fréquences de modulation très élevées.

Dans la norme récente (NEMA, 2017) et le projet de norme (IEC 24/388/DC 2017), l'indice de visibilité SVM (stroboscopic visibility measure) de l'effet stroboscopique a été retenu comme pertinent dans le cas du mouvement d'une partie du corps de l'observateur, typiquement la main passant devant l'œil de l'observateur (vitesse < 4 m/s). L'indice SVM a été construit pour prédire la visibilité de l'effet stroboscopique en éclairage intérieur, dans des environnements de bureau (éclairage > 100 lx), lorsque les seules sources de lumière produisent de la lumière modulée. L'indice SVM est issu d'une étude récente menée sous la coordination de Philips Lighting et publiée en 2015 (Perz, 2015).

Le calcul est basé sur la décomposition de la forme d'onde en composantes fréquentielles puis de la pondération de chaque composante par une courbe de sensibilité qui traduit le seuil de visibilité de l'effet stroboscopique en fonction de la fréquence de modulation. Cette courbe couvre la gamme de fréquences de modulation comprise entre 80 Hz et 2000 Hz.

Après calcul des composantes fréquentielles pondérées, l'indice SVM est calculé par une somme de l'ensemble des composante par la formule de Minkowski d'exposant 3,7. L'étude de Perz (Perz, 2015) ayant permis d'établir la définition de l'indice SVM a été menée par deux équipes différentes, mais liées par une collaboration, sur des échantillons de 20 à 30 personnes, représentant un total d'environ 160 personnes. Deux séries d'expérimentations indépendantes ont permis d'établir d'une part la courbe de sensibilité en fonction de la fréquence et, d'autre part, l'exposant de 3,7 utilisé dans la formule de sommation des composantes fréquentielles de la forme d'onde.

L'indice SVM a été normalisé de manière à ce que la valeur de 1 corresponde au seuil de visibilité de l'effet stroboscopique pour 50% des observateurs

#### *Indices concernant l'effet de réseau fantôme*

Il n'existe actuellement aucun indice publié dans des normes ou des recommandations. Un calcul est toutefois donné, uniquement à titre d'exemple, dans la note technique de la CIE (CIE 2016). Cet exemple se base sur la décomposition de la forme d'onde en série de Fourier, de la pondération des composantes fréquentielles par une courbe de sensibilité et de la somme des composantes. La courbe de sensibilité est une droite calculée à partir de deux points de mesures (120 Hz et 2500 Hz) tirés de la publication (Roberts, 2013). La sommation des différentes composantes fréquentielles est une somme de Minkowski d'exposant 4. Il n'y a aucune référence bibliographique citée par la CIE pour justifier cette formule de sommation. Le texte indique que l'effet de réseau fantôme est par nature « spatio-temporel », ce qui permet de supposer une variation quadratique avec la modulation temporelle et une variation quadratique avec la modulation spatiale due au mouvement. La combinaison de ces deux sommes quadratiques impliquerait un exposant 4 dans la somme résultante.

### Indices concernant les effets non-visuels de la modulation temporelle de la lumière

Il n'y a aucun indice donné dans les normes ou les recommandations internationales permettant de quantifier l'importance des effets non-visuels de la lumière modulée, que ce soit pour des effets sur la santé ou des effets sur les performances visuelles.

Il existe néanmoins un indice, l'indice CFD (compact flicker degree), qui a été élaboré par le bureau d'étude allemand Der Lichtpeter de manière à intégrer la visibilité des trois effets visuels de la lumière modulée (papillotement, effet stroboscopique et effet de réseau fantôme) ainsi que des effets sanitaires dans un indice unique destiné à juger de l'acceptabilité de la modulation temporelle (Der Licht Peter, 2017).

Cet indice se base sur des données de sensibilité publiées dans (ASSIST) et (IEEE) décrits dans ce chapitre. Le calcul passe par la décomposition de la forme d'onde en série de Fourier, la pondération par une courbe de sensibilité et la somme quadratique des composantes fréquentielles pondérées.

Il est important de noter que cet indice n'a fait l'objet d'aucune publication scientifique à l'heure où ce chapitre est rédigé. L'auteur revendique cependant une utilisation répandue de l'indice CFD par l'industrie allemande et par le bureau de contrôle allemand TÜV Süd (LEDs Magazine, 2017).

## **4.3 Recommandations et limites existantes**

On trouve des recommandations et des normes portant sur la limitation des phénomènes induits par la modulation temporelle de la lumière dans plusieurs documents. Ces documents sont pour la plupart très récents et ont été établis pour couvrir l'éclairage à LED.

### Les recommandations de la CIE

La CIE n'a pas encore émis de recommandations. C'est un travail en cours initié par la publication de deux notes techniques (CIE 2016) et (CIE 2017).

Deux groupes techniques ont été constitués au sein de la CIE : un groupe sur les méthodes de mesures physiques et un groupe sur les indices liés aux effets de la lumière modulée.

### La recommandation du Lighting Handbook de l'IESNA

L'organisme américain IESNA recommande dans son Lighting Handbook (IESNA) que les applications d'éclairage nécessitent un indice de papillotement (*flicker index*) < 0.1 pour limiter les effets visibles.

Cette recommandation est une règle empirique certainement élaborée avant l'avènement de l'éclairage à LED. Elle est insuffisante pour les LED car elle ne prend en compte ni l'aspect fréquentiel (fréquence de modulation fondamentale et ses composantes harmoniques), ni la sensibilité de la perception des contrastes spatio-temporels par le système œil-cerveau.

### Les recommandations de l'IEC

L'IEC recommande dans (IEC TR 61547-1) une limitation du papillotement à la valeur limite de 1 pour l'indice de visibilité du papillotement  $P_{st}^{LM}$ .

### La recommandation de Public Health England

Dans un rapport publié en 2016 (CIBSE 2016) par Public Health England, les auteurs citent une règle empirique utilisée par cet institut et suivie par l'agence britannique Health Protection

Agency. Cette règle empirique est que le taux de modulation temporelle des nouvelles technologies d'éclairage ne devrait pas dépasser le taux de modulation des technologies plus anciennes. En éclairage domestique, une valeur de maximale du taux de modulation a été fixée arbitrairement à 15% lorsque la fréquence de modulation dominante est de 100 Hz.

### Les recommandations américaines ASSIST concernant la perception du papillotement

Les recommandations de l'ASSIST (ASSIST 2015) concernent le papillotement et utilisent l'indice de perception du papillotement FPM. Celui-ci ne doit pas dépasser 1 pour une probabilité de détection du papillotement de 50%. La recommandation est valable pour des fréquences de modulation comprises entre 5 Hz et 65 Hz.

L'indice FPM est également mentionné dans les spécifications les plus récentes (version 2.1) de la certification américaine ENERGY STAR, gérée par l'agence publique américaine EPA (Environmental Protection Agency) concernant les lampes et les luminaires (ENERGY STAR Method of Measurement for Light Source Flicker, 2017). Les spécifications ENERGY STAR demandent, dans leur version 2.1, de mesurer l'indice FPM, le pourcentage de modulation et l'indice de papillotement de l'IESNA.

### Les recommandations américaines ASSIST concernant la perception de l'effet stroboscopique

Les recommandations de l'ASSIST (ASSIST, 2015) concernent l'effet stroboscopique. Ces recommandations reposent sur la publication (Bullough, 2012 : Detection and acceptability of stroboscopic effects from flicker, JD Bullough, K Sweater Hickcox, TR Klein, A Lok and N Narendran, Lighting Res. Technol. 2012; 44: 477–483).

Un pourcentage de modulation maximal  $p_{max}$  est recommandé pour que les effets stroboscopiques ne dépassent pas ceux produits par une lampe à incandescence de 60 W :

$$p_{max} (\%) = 0.16f - 5.6, \text{ où } f \text{ est la fréquence de modulation}$$

Pour une fréquence de modulation de 100 Hz, la valeur maximale recommandée par l'ASSIST est de 10.4 %.

Cette recommandation est valable entre 100 Hz et 660 Hz.

### Les recommandations NEMA

L'organisme américain NEMA recommande dans la norme récente (NEMA 77:2017) des limites à l'indice de visibilité du papillotement  $P_{st}^{LM}$  et à l'indice de visibilité de l'effet stroboscopique SVM. Les valeurs limites de ces deux indices sont différentes selon qu'il s'agit d'éclairage intérieur ou d'éclairage extérieur :

Eclairage intérieur :  $P_{st} \leq 1$  ;  $SVM \leq 1.6$

Eclairage extérieur :  $P_{st} \leq 1$  ; pas de limite concernant l'indice SVM

En éclairage extérieur, la norme NEMA n'impose pas de limitation à la modulation temporelle au-delà de 80 Hz. Le choix de ne pas imposer de limite à l'indice SVM signifie que la norme NEMA considère que l'effet stroboscopique n'est pas un problème en éclairage extérieur.



### Les recommandations de Der Lichtpeter

Le bureau d'études Der LichtPeter recommande de limiter l'indice CFD à 25%, une valeur acceptable pour limiter l'impact de l'ensemble des effets visuels et non visuels de la modulation temporelle en éclairage général. Le site internet de Der Lightpeter contient des recommandations plus détaillés :

- 1% < CFD < 12% : imperceptible
- 12% < CFD < 25% : acceptable (rarement perceptible)
- 25% < CFD < 50% : modéré (potentiellement perceptible, maux de tête et fatigue visuelle après exposition prolongée).
- 50% < CFD < 75% : effets nocifs (perception probable par plus de 50% de la population, maux de tête et fatigue visuelle après une exposition prolongée)
- CFD > 75% : risques extrêmes (perception probable par plus de 75% de la population, déclenchement de crises d'épilepsie photosensible, maux de tête et malaise général après une exposition prolongée)

Ces recommandations ne s'appuient pas sur un travail scientifique spécifique mais sur l'analyse et la compilation de plusieurs études ayant été publiées sur le sujet dont les références (ASSIST) et (IEEE).

### Les recommandations de la norme IEEE 1789

La norme IEEE 1789 (IEEE 1789) est l'aboutissement de plus de 10 ans de travail d'une ampleur inédite dans le domaine de la modulation temporelle de la lumière. Les travaux ont été menés par un groupe d'experts rassemblant des compétences en électronique, en éclairage, en sciences de la vision, en photobiologie, en psychologie et en analyse de risque pour la santé publique.

L'objectif de cette norme est de fournir des recommandations bien adaptées à l'éclairage à LED intégrant l'ensemble des phénomènes induits par la modulation temporelle de la lumière : effets visibles et invisibles, effets sanitaires, effets sur les performances visuelles. Au contraire des autres organismes cités précédemment, l'IEEE a effectué une véritable expertise sanitaire des effets de la lumière modulée en étudiant les publications scientifiques et les résultats de tests de nombreux produits d'éclairage à LED. Ces résultats sont présentés en détails dans le chapitre dédié de ce rapport.

Les effets pris en compte dans les recommandations de l'IEEE sont les suivants :

- Effets visibles perçus par le système œil-cerveau : papillotement, effet stroboscopique, effet de réseau fantôme
- Effets non-visibles (appelé « invisible flicker » dans la norme IEEE 1789) : effets liés à la détection de la modulation temporelle de la lumière par la rétine (mise en évidence expérimentale par électrorétinogramme), sans sensation visuelle ressentie.

Les effets visibles et invisibles peuvent engendrer à leur tour des effets sanitaires :

- Apparition d'électroencéphalogrammes épileptiformes et déclenchement de crises d'épilepsie (effet fortement corrélé à la visibilité du papillotement)
- maux de têtes, migraines.
- fatigue visuelle, tension oculaire (*eyestrain* en anglais), asthénopie, vision floue
- augmentation du rythme cardiaque chez les personnes agoraphobes
- augmentation des comportements répétés chez les personnes autistes

Les effets invisibles de la lumière modulée peuvent également avoir des effets sur les performances visuelles, sans nécessairement avoir des conséquences sanitaires :

- réduction de la performance visuelle
- réduction de la vitesse de recherche visuelle
- augmentation des saccades lors de la lecture d'un texte

La Figure 9 illustre la matrice de risques présentée dans la norme IEEE 1789. Cette matrice propose un positionnement de chaque effet selon deux axes : la probabilité de l'effet (notion d'exposition) et sa sévérité (notion de danger). La probabilité de l'effet est définie de la manière suivante :

- probabilité très faible : entre 0 et 0.01 dommage potentiel par million de personnes
- probabilité faible : entre 0.01 et 0.1 dommage potentiel par million de personnes
- probabilité moyenne : entre 0.1 et 1 dommage potentiel par million de personnes
- probabilité élevée : entre 1 et 10 dommages potentiels par million de personnes
- probabilité très élevée > 10 dommages potentiels par million de personnes

Les niveaux de sévérité sont définis de la manière suivante :

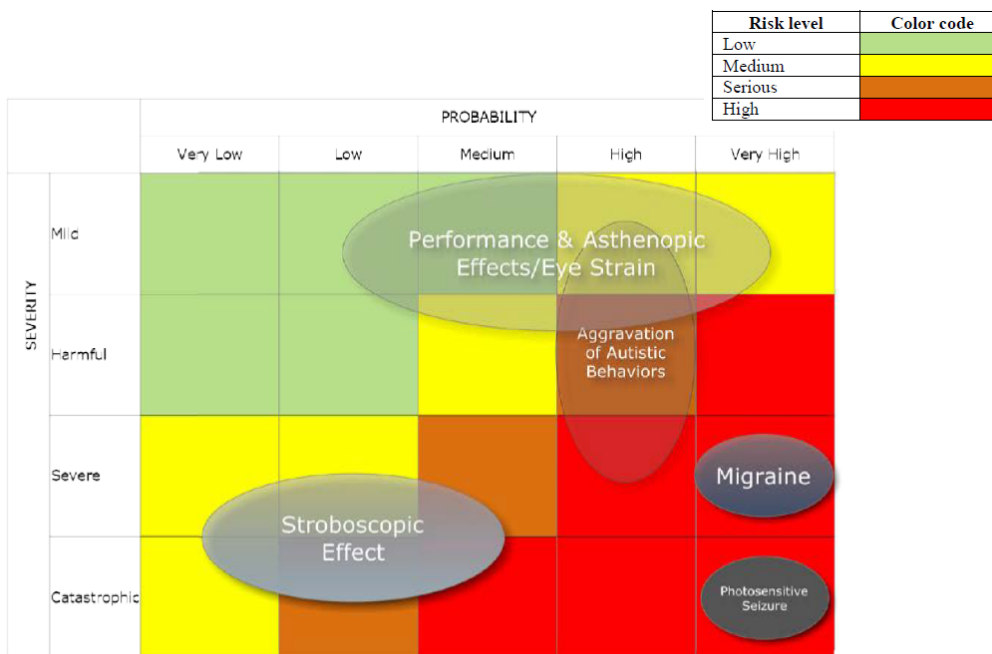
- légère (mild) : inconfort léger, fatigue, malaise, faculté de concentration légèrement réduite
- nocive (harmful) : symptômes ne nécessitant pas plusieurs jours d'absence au travail, performance visuelle affectée de manière mesurable, vomissement, inconfort significatif, faculté de concentration significativement affectée
- Sévère : hospitalisation, symptômes nécessitant plusieurs jours d'absence au travail, performances visuelles substantiellement affectée incluant une vision floue, photophobie sévère, crise d'épilepsie
- Catastrophique : mort, atteinte permanente d'un membre ou d'une fonction

Les couleurs utilisées dans la matrice correspondent chacune à un niveau de risque, résultant de la combinaison de la probabilité de l'effet et de sa sévérité.

- Vert : risque faible
- Jaune : risque moyen
- Orange : risque sérieux
- Rouge : risque élevé

La Figure 10 propose un schéma de présentation de cinq dangers (crises d'épilepsie photosensible, effet stroboscopique, aggravation des troubles autistiques, migraine, performance et fatigue visuelles).





NOTE—Greater saturation corresponds to greater certainty.

Figure 16—Risk matrix by hazard

Figure 9 : matrice de risque de l'IEEE 1789

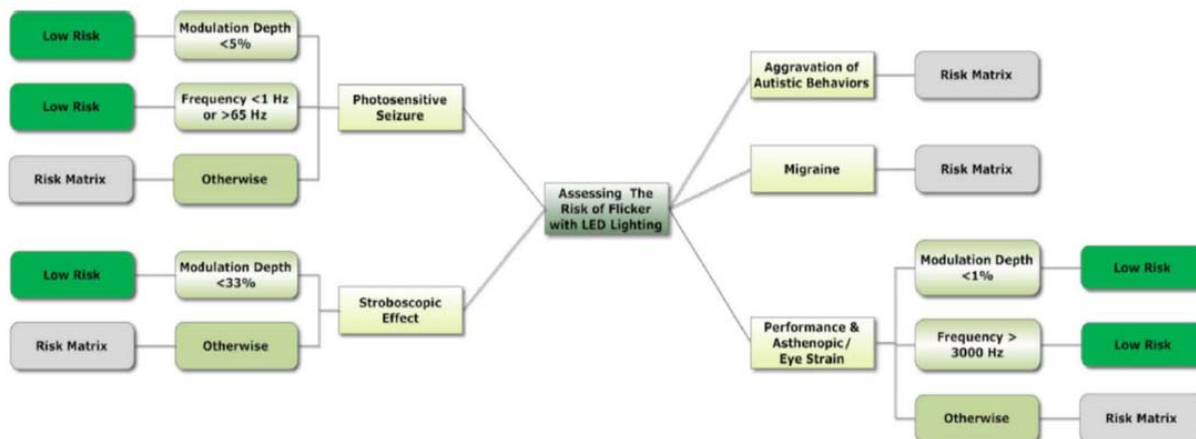


Figure 10 : extrait de la norme IEEE 1789. Niveaux de risques pour les cinq effets indésirables évalués selon la fréquence de modulation et le pourcentage de modulation.

L'analyse de risques de l'IEEE 1789 a conduit à donner des limites de modulation temporelle correspondant à deux niveaux de risques différents : « risque faible » et « pas d'effet observable » (Noel : No Observable Effect Limit).

La définition retenue du niveau de risque faible dans la norme IEEE 1789 est la suivante : c'est la valeur pour laquelle le paramètre d'influence correspond à la transition entre la présence et

l'absence d'effet observable, en supposant que les autres paramètres d'influence sont dans leur valeur de pire cas. Le niveau de risque non observable (Noel) correspond à une valeur d'exposition pour laquelle il n'y a aucune augmentation significative dans la fréquence ou la sévérité d'un quelconque effet entre la population exposée et une population de contrôle appropriée.

Les paramètres retenus dans la norme IEEE pour définir le niveau de risque faible et le niveau de risque non-observable sont le pourcentage de modulation et la fréquence de modulation.

Les limites de risque peuvent s'exprimer mathématiquement. Pour le niveau de risque faible :

- en dessous de 8 Hz : pourcentage de modulation  $< 0.2\%$
- entre 8 Hz et 90 Hz : pourcentage de modulation inférieur à  $0.025 \times$  fréquence
- entre 90 Hz et 1250 Hz : pourcentage de modulation inférieur à  $0.08 \times$  fréquence
- au-delà de 1250 Hz : aucune restriction

Pour l'absence de risque (niveau NOEL), les limites sont les suivantes :

- en dessous de 8 Hz : pourcentage de modulation de  $0\%$
- entre 8 Hz et 90 Hz : pourcentage de modulation inférieur à  $0.01 \times$  fréquence
- entre 90 Hz et 3000 Hz : pourcentage de modulation inférieur à  $0.0333 \times$  fréquence
- au-delà de 3000 Hz : aucune restriction

En utilisant ces limites, l'IEEE a défini trois recommandations différentes :

- Recommandation 1 : s'il est désirable de limiter les effets biologiques adverses de la modulation temporelle, alors le pourcentage de modulation doit être inférieur au niveau de risque faible.
- Recommandation 2 : s'il est désirable d'éviter tout effet biologique néfaste de la modulation temporelle, alors le pourcentage de modulation doit être inférieur au niveau d'absence de risque (Noel).
- Recommandation 3 : En dessous de 90 Hz, le pourcentage de modulation doit rester inférieur à  $5\%$  pour assurer la prévention des crises d'épilepsie.

En Europe, la fréquence de modulation temporelle de la lumière la plus couramment rencontrée est de 100 Hz. La limite de risque faible est dans ce cas un taux de modulation inférieur à  $8\%$ . La limite d'absence de risque est un taux de modulation inférieur à  $3\%$ . Dans le cas d'une modulation de type PWM avec un pourcentage de modulation de  $100\%$ , la limite basse de fréquence de modulation de risque faible est de 1250 Hz. Pour l'absence de risque, la limite basse de fréquence de modulation PWM est de 3000 Hz.

Afin de prendre en compte des modulations temporelles complexes de la lumière, la norme IEEE 1789 introduit un indice composé, l'indice NM (normalized modulation). Cet indice utilise la décomposition de Fourier de la forme d'onde. Chaque composante fréquentielle est normalisée par la valeur du taux de modulation correspondant à la limite de risque (risque faible ou bien absence de risque) à la fréquence considérée. L'indice NM est ensuite calculé par somme algébrique (somme simple des contributions à chaque fréquence).

Si l'indice NM est inférieur à 1, la modulation temporelle de la lumière est acceptable au niveau de risque considéré dans l'étape de pondération (risque faible ou absence de risque).

### Les critiques et la polémique soulevées par la norme IEEE 1789 au sein de la filière éclairage

Depuis sa publication en 2015, la norme IEEE a créé un véritable tollé dans le secteur de l'éclairage. Des syndicats professionnels et des industriels majeurs ont vivement critiqué cette norme en publiant des communiqués (LIGHTING EUROPE PHILIPS). D'autres organisations de normalisation comme IEC et NEMA ont également publié des communiqués allant contre cette norme.

**Critique 1 :** la discontinuité observée à 90 Hz ne trouve pas d'explication physique ou biologique.

**Critique 2 :** Les pourcentages de modulation de risque faible sont du même ordre de grandeur que ceux des lampes à incandescence. Les valeurs correspondant à l'absence de risque sont parfois inférieures aux pourcentages de modulation des lampes à incandescence.

**Critique 3 :** La majorité des produits d'éclairage à LED ne satisfont pas les limites de risques faibles de la norme IEEE 1789. L'industrie de l'éclairage est techniquement capable d'abaisser les niveaux de modulation temporelle à des niveaux conformes à ceux recommandés par la norme IEEE 1789 mais avec une complexité accrue des circuits électroniques d'alimentation et d'un coût de production augmenté. Cette augmentation de prix est difficile à tenir dans un contexte de marché très compétitif (NEMA).

**Critique 4 :** Les recommandations portent sur le taux de modulation de la forme d'onde et ne sont pas applicables aux formes d'onde complexes. Ces cas particuliers sont les suivants :

Modulations aperiodiques ou transitoires (cas de fluctuations de tensions d'alimentation).

Fréquence dominante différente de la fréquence fondamentale (cas de quelques circuits d'alimentation de LED très rares sur le marché)

Présence de fréquences inter-harmoniques ou d'une fréquence sous-harmonique, le plus fréquemment correspondant à la fréquence du secteur (50 Hz) et traduisant une mauvaise conception électronique ou un défaut de vieillissement des composants électroniques.

Rapports cycliques différents de 0,5, apparaissant avec des gradateurs.

Concernant la critique 4, on remarque que l'indice composé NM a été défini dans la norme IEEE 1789 pour prendre en compte l'ensemble du spectre fréquentiel, permettant ainsi de traiter l'ensemble des formes d'onde complexes mentionnées ci-dessus. Cependant, l'indice NM n'est pas utilisé dans les recommandations officielles de la norme IEEE 1789.

Les organismes ayant émis officiellement des critiques de la norme IEEE 1789 sont impliqués dans la rédaction d'autres normes, dont celles qui ont été présentées auparavant dans ce chapitre. Cependant, on constate que ces normes ne portent que les effets visibles de la modulation temporelle, et n'incluent pas les effets sanitaires liés aux modulations de la lumière non perceptibles.

### Les spécifications de l'AIE (IEA-4E-SSL)

L'agence internationale de l'énergie (AIE) élabore au nom des gouvernements de ses pays membres des spécifications de qualité des produits d'éclairage à LED qui sont actualisées régulièrement. Ces spécifications sont à la disposition des organismes désirant mettre en place des référentiels de qualité pour des réglementations nationales, ou d'autres dispositions (surveillance de marché, certificats d'économie d'énergie, etc.). L'objectif est de promouvoir le bon usage des LED pour réduire la consommation énergétique et les impacts environnementaux de l'éclairage.

Dans ces spécifications (IEA 4<sup>E</sup> SSL), résumées dans le Tableau 4, l'AIE préconise une limitation de la modulation temporelle de la lumière pour les produits d'éclairage intérieur, de

manière à limiter les effets visibles et les effets sanitaires. L'AIE s'est basée sur les recommandations IEEE 1789 qui sont les actuellement les seules à couvrir l'ensemble des effets visibles et sanitaires de la lumière modulée.

Reconnaissant qu'il n'est pas possible de décrire les formes d'onde complexes par le seul pourcentage de modulation, l'AIE a adapté les recommandations de l'IEEE en ne les faisant porter que sur le pourcentage de modulation à la fréquence dominante, défini par la composante de Fourier à cette fréquence, qui dans la très grande majorité des produits d'éclairage à LED correspond à deux fois la fréquence du secteur. Le pourcentage de modulation à la fréquence dominante étant sensible au rapport cyclique de la forme d'onde, il s'applique bien aux lampes et luminaires associées à des gradateurs. Par contre, cet indice ne peut pas s'appliquer si la fréquence dominante est différente de la fréquence de modulation fondamentale. Dans ce cas de figure rare, l'AIE recommande d'appliquer les limites de l'IEEE à la fréquence fondamentale et à la fréquence dominante. On note que l'utilisation de la composante fondamentale de Fourier a été proposée et validée par De Lange dès 1952 pour décrire la visibilité des contrastes temporels.

**Tableau 4 : spécifications de l'Agence Internationale de l'Energie concernant la modulation temporelle des lampes LED non dirigées.**

Dominant light modulation frequency ( $f$ ) Modulation percent at this frequency (Mod%) <sup>7</sup> (Includes Flicker effects)	Dominant modulation frequency ( $f$ )	Modulation percent at $f$	Dominant modulation frequency ( $f$ )	Modulation percent at $f$
		$f \leq 90$ Hz	Mod% < $(0.025 \times f)$	$f \leq 90$ Hz
	$90\text{Hz} < f \leq 1250$ Hz	Mod% < $(0.08 \times f)$	$90\text{Hz} < f \leq 1250$ Hz	Mod% < $(0.08 \times f)$
	$f > 1250$ Hz	No Mod% requirement	$f > 1250$ Hz	No Mod% requirement

### Les recommandations californiennes « California Title 24 »

La commission californienne de l'énergie (California Energy Commission) est en charge de la réglementation sur l'efficacité énergétique des bâtiments construits dans cet état. L'éclairage artificiel y est traité dans le titre 24.

L'article JA8.4.6 spécifie que les sources de lumières doivent avoir un niveau de modulation « réduit » lorsque qu'elles sont testées à 100% et à 20% d'abaissement. Ce niveau maximal admissible est défini comme un pourcentage de modulation de 30% pour des fréquences de modulation inférieures à 200 Hz.

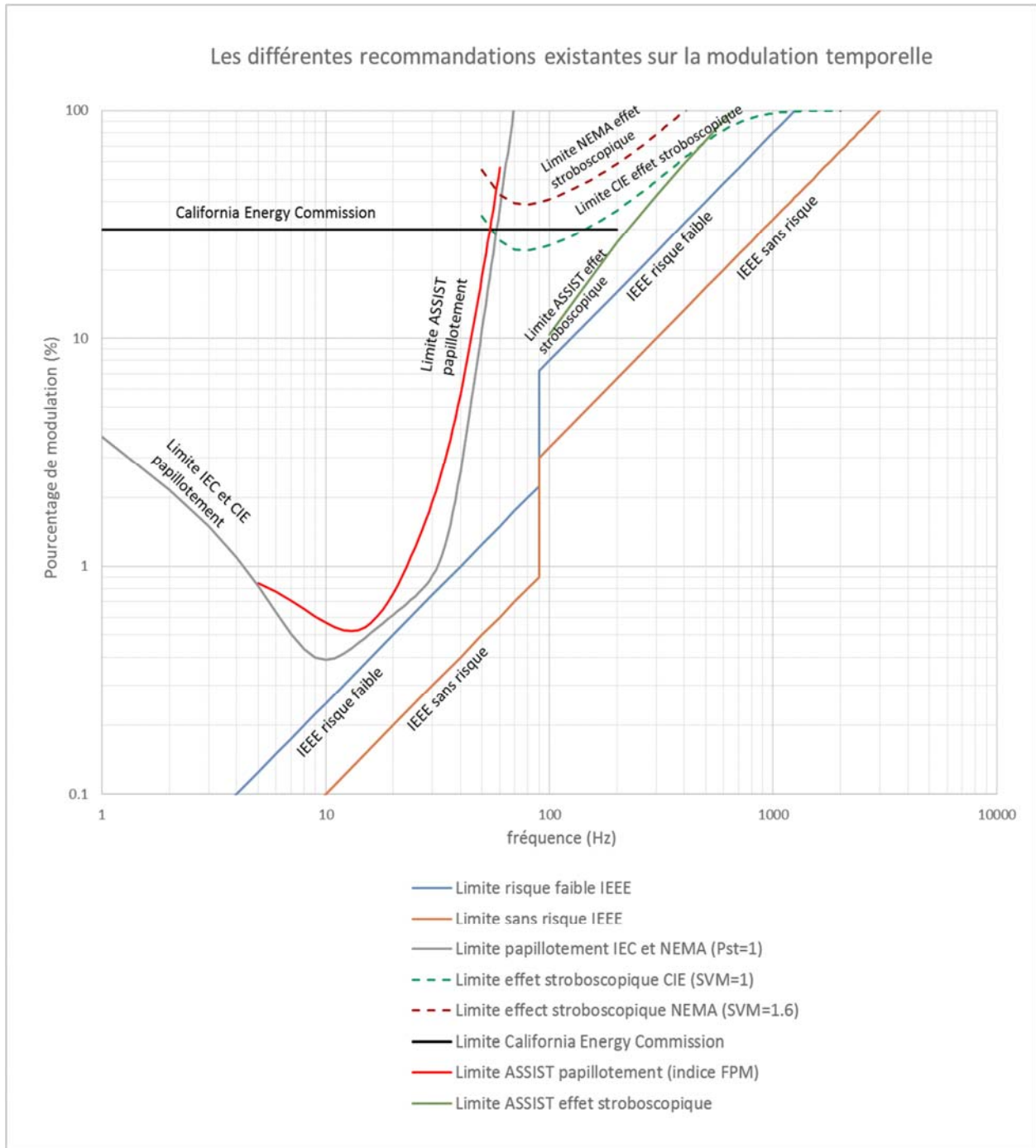
Cette valeur est beaucoup plus élevée que celles qui sont recommandées par les autres organismes. En raison de cette limite très élevée, cette réglementation ne permet pas de réduire les effets biologiques visuels et non visuels de la modulation temporelle de la lumière.

Les mesures doivent être effectuées selon une méthode spécifique, décrite dans l'annexe JA-10 de cette réglementation.

### **Synthèse des indices et des recommandations sur la modulation temporelle de la lumière**

La Figure 11 montre les limites imposées au pourcentage de modulation par les différentes recommandations, en fonction de la fréquence de modulation. Le Tableau 5 récapitule l'ensemble des indices et des recommandations portant sur la modulation temporelle de la lumière.

On constate que les différentes recommandations sont très différentes entre elles. Les recommandations de la norme IEEE 1789, basées sur une expertise sanitaire, sont les plus protectrices.



**Figure 11 : graphes représentant les différentes recommandations existantes en termes de pourcentage de modulation. Les limites relatives à l'indice Pst et SVM ont été calculées en supposant une modulation purement sinusoïdale.**

Le Tableau 5 rappelle ces différentes limites.

**Tableau 5 : résumé des différents indices normatifs liés à la modulation temporelle de la lumière.**

Organisme	Indice	Effet considéré chez l'homme	Recommandation
IESNA	Flicker index FI	Indice non lié à un effet biologique	FI < 0.1
CIE IEC NEMA	$P_{st}^{LM}$	Papillotement	$P_{st}^{LM} < 1$
CIE IEC NEMA	SVM	Effet stroboscopique	SVM < 1 (CIE et IEC) SVM ≤ 1.6 en éclairage intérieur (NEMA)
ASSIST	FPM	Papillotement	FPM < 1
ASSIST	Pourcentage de modulation Mod%	Effet stroboscopique	$Mod(\%) \leq 0.16f - 5.6$ pour $100 \text{ Hz} \leq f \leq 660 \text{ Hz}$
Der Lightpeter	CFD	Papillotement Effet stroboscopique Réseau fantôme Photoépilepsie Maux de têtes Fatigue visuelle	1% < CFD < 12% : imperceptible 12% < CFD < 25% : acceptable 25% < CFD < 50% : modéré 50% < CFD < 75% : effets nocifs CFD > 75% : risques extrêmes
IEEE	Pourcentage de modulation Mod% en fonction de la fréquence de modulation f	Papillotement Effet stroboscopique Effet de réseau fantôme Photoépilepsie Migraine / maux de tête Aggravation de symptômes autistiques	<u>Risque faible :</u> f < 8 Hz : mod% < 0.2% 8 Hz < f < 90 Hz : mod% < 0.025 x f 90 Hz < f < 1250 Hz : mod% < 0.08 x f f > 1250 Hz : aucune restriction <u>Absence de risque :</u> f < 8 Hz : mod% = 0 % 8 Hz < f < 90 Hz : mod% < 0.01 x f 90 Hz < f < 3000 Hz : mod% < 0.0333 x f f > 3000 Hz : aucune restriction <u>Prévention des crises d'épilepsie :</u> f < 90 Hz : mod% < 5%
IEEE	Modulation normalisée NM	Asthénopie, incluant fatigue visuelle, vision floue, diminution des performances visuelles	NM < 1 (recommandation non normative citée dans la norme IEEE 1789).
IEA 4 <sup>E</sup> SSL	Pourcentage de modulation à la fréquence dominante Mod%		<u>Tiers 1 (base)</u> f ≤ 90 Hz : mod% < 0.025 x f 90 Hz < f < 1250 Hz : mod% < 0.08 x f f > 1250 Hz : aucune restriction <u>Tiers 2 et 3 :</u> f ≤ 90 Hz : mod% < 0.01 x f 90 Hz < f < 1250 Hz : mod% < 0.08 x f

			f > 1250 Hz : aucune restriction
California Energy Commission	Pourcentage de modulation Mod% en fonction de la fréquence de modulation f	Indéterminé	Mod% < 30% pour f ≤ 200 Hz

Le Tableau 6 donne les gammes de fréquences de validité de chaque indice, ainsi que la règle de sommation des composantes fréquentielles de la forme d'onde.

**Tableau 6 : détail de la gamme de fréquences de modulation, de la règle d'additivité des composantes fréquentielles et de l'applicabilité aux formes d'onde dont le rapport cyclique est différent de 0.5, pour chaque indice présenté.**

	Indice	Gamme de fréquence	Règle de sommation des composantes fréquentielles	Règle de sommation validée par des études sur sujets	Applicable aux formes d'ondes complexes (rapport cyclique ≠ 0.5)
IESNA	Pourcentage de modulation Mod%	Toutes fréquences	Non applicable car indépendant de la fréquence		Oui
IESNA	Indice de papillotement FI	Toutes fréquences	Non applicable car indépendant de la fréquence		Oui
CIE IEC NEMA	Short term flicker severity $P_{st}^{LM}$	1 Hz – 70 Hz	Quadratique (exposant 2)	Oui	Oui
CIE IEC NEMA	Stroboscopic visibility measure SVM	80 – 2000 Hz	exposant 3.7	Oui	Oui
CIE	Exemple d'indice de visibilité du réseau fantôme	120 Hz – 2500 Hz	exposant 4	<b>Non</b>	Oui
ASSIST	Flicker perception metrics FPM	5 Hz – 65 Hz	Quadratique (exposant 2)	Oui	Oui
Der Lightpeter	Compact flicker degree CFD	1 Hz – 2500 Hz	Quadratique (exposant 2)	<b>Non</b>	Oui
IEEE	Pourcentage de modulation Mod% en fonction de la fréquence de modulation f	1 Hz – 3000 Hz	Non applicable car le critère s'applique pour la fréquence de modulation dominante		<b>Non</b>
IEEE	Modulation normalisée NM		Algébrique (exposant 1)	<b>Non</b>	Oui
IEA 4 <sup>E</sup> SSL	Pourcentage de modulation à la fréquence		Non applicable car le critère s'applique à une seule fréquence.		Oui



	dominante Mod%			
--	----------------	--	--	--

On constate que les gammes de fréquences des indices ainsi que les règles de sommation des composantes fréquentielles sont spécifiques à chaque indice, avec parfois des règles différentes pour décrire les mêmes effets. Par exemple, l'indice NM de l'IEEE additionne de manière algébrique les composantes tandis que les indices de visibilité de la CIE et de l'ASSIST sont associés à une règle quadratique. Les indices NN (IEEE 1789), CFD (Der Lichtpeter), CIE-réseau fantôme (introduit comme exemple) ont des règles de sommation des composantes fréquentielles qui n'ont pas été validés expérimentalement (Tableau FFF).

Les indices de visibilité du papillotement PstLM et FPM reposent sur une règle de sommation quadratique qui paraît très bien établie dans de nombreux travaux, depuis les travaux fondateurs de De Lange et qui sont présentés dans le chapitre dédié à la modulation temporelle de la lumière.

La règle de sommation algébrique utilisée pour le calcul de l'indice composé NM de l'IEEE 1789 est la plus protectrice puisqu'elle conduit à accorder plus de poids aux composantes fréquences pondérées les plus fortes.

## 5. Normes concernant les phénomènes d'éblouissement

Les phénomènes d'éblouissement ont été classés en deux catégories par la CIE : l'éblouissement d'incapacité et l'éblouissement d'inconfort.

### 5.1 Eblouissement d'incapacité

L'éblouissement d'incapacité est produit par la présence d'une source de lumière très lumineuse sur un fond beaucoup plus sombre. La lumière de la source est diffusée par les milieux oculaires et crée un voile lumineux dans le champ de vision. Ce phénomène diminue la visibilité des autres objets présents dans le champ de vision car le contraste est réduit par la luminance de voile. Il se produit typiquement à l'extérieur, en condition nocturne, en présence de luminaires d'éclairage public ou d'installations sportives. Il est responsable également de l'éblouissement des piétons et des automobilistes par les éclairages des véhicules.

L'éblouissement d'incapacité est toujours associé à une baisse de l'acuité visuelle, sans être obligatoirement associé à une sensation de gêne.

La publication technique de la CIE (CIE 2002) décrit le calcul de la luminance de voile et définit l'indice TI (*Threshold Increment*) appelé « augmentation relative au seuil de perception »

L'indice TI est utilisé dans les normes d'éclairage public (éclairage des chaussées). Il traduit l'augmentation relative de la luminance minimale perceptible, due à la présence de la source d'éblouissement. Le calcul fait notamment intervenir l'âge de l'observateur (23 ans par défaut) et la position de la source d'éblouissement dans le champ de vision.

### 5.2 Eblouissement d'inconfort

Contrairement à l'éclairage d'incapacité qui possède une origine physiologique, l'éblouissement d'inconfort traduit une gêne qui survient quand la lumière est ressentie comme trop intense ou anormalement variable. Il augmente avec la luminance des sources ou des surfaces éblouissantes, leur nombre et leur étendue ainsi qu'avec leur localisation. Ce phénomène d'éblouissement correspond typiquement à des situations d'éclairage intérieur pour lesquelles le contraste de luminance est trop élevé. Contrairement à l'éblouissement d'incapacité, la gêne ressentie n'est pas associée à une réduction de l'acuité visuelle.



La publication CIE 55 de 1983 considère que la luminance de la source doit être supérieure à 500-700 cd/m<sup>2</sup> pour qu'un éblouissement d'inconfort puisse être ressenti en éclairage intérieur.

L'indice d'éblouissement d'inconfort actuellement normalisé par la CIE est l'indice UGR (*Unified Glare Rating*). On trouve sa définition dans le document CIE 117 de 1995. L'UGR est défini comme étant proportionnel au logarithme d'une somme pondérée des rapports des luminances des surfaces éblouissantes par rapport à la luminance du fond. Il est important de noter que l'UGR est défini pour des sources dont le diamètre angulaire apparent se situe entre 0.0003 sr et 0.1 sr. La limite basse correspond à une source de 2 cm de diamètre vue à 1 m de distance ou bien une source de 20 cm vue à la distance de 10 m. La limite haute correspond à une source de 35 cm de diamètre vue à 1 m de distance ou bien une source de 3.5 m de diamètre vue à 10 m de distance.

L'échelle des valeurs de l'indice UGR est la suivante : 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31. Les valeurs correspondent à des appréciations psychologiques de l'inconfort (critères d'Hopkinson) :

- UGR = 10 : imperceptible
- UGR = 13 : tout juste perceptible
- UGR = 16 : perceptible
- UGR = 19 : tout juste acceptable
- UGR = 22 : inacceptable
- UGR = 25 : tout juste inconfortable
- UGR = 28 : inconfortable
- UGR = 31 : tout juste intolérable

Dans le cas des petites sources, la CIE a défini dans la publication CIE 147 l'indice spécifique UGR<sub>small</sub>, basé sur l'intensité lumineuse et non la luminance. Cet indice suppose que la résolution angulaire de l'œil étant limitée, la taille de l'image créée sur la rétine atteint une limite de résolution et l'intensité lumineuse de la source devient ainsi le paramètre déterminant.

La formule de l'UGR a été élaborée pour des luminaires équipés de tubes fluorescents. Il n'est pas évident que son application aux systèmes d'éclairages intégrant des LED conduise à des résultats valables. La publication de la CIE CIE 205:2013 « Review of Lighting Quality Measures for Interior Lighting with LED Lighting Systems » conclue qu'un nouveau système d'évaluation de l'éblouissement est nécessaire pour l'éclairage à LED.

En éclairage extérieur, l'indice GR (*glare rating*) est utilisé dans les normes d'éclairage des installations sportives et des lieux de travail extérieurs.

## 6. Normes concernant les effets non visuels de lumière liés à l'excitation de la mélanopsine

En 2004, la CIE a publié le document (CIE 2009), remis à jour en 2009, consacré aux effets non visuels de la lumière impliquant l'œil. Ce document décrit les découvertes de la décennie précédente mettant en évidence les effets biologiques et comportementaux de la lumière impliquant les cellules ganglionnaires à mélanopsine de la rétine. Cette publication indique que la lumière peut être utilisée pour traiter des troubles cliniques et peut aussi avoir des applications plus larges pour lutter contre les problèmes du travail posté et du décalage horaire.

La publication précise comment l'éclairage peut être intégré à la conception architecturale des bâtiments pour optimiser la vision, la stimulation physiologique et comportementale.

En 2016, un groupe de travail de l'ISO a proposé au vote, un projet de norme internationale rédigé sous l'impulsion de l'Allemagne, appelée « Biologically Effective Illumination – Design Guidelines » dans le cadre d'un nouveau groupe de travail de l'ISO nommé « Human Centric Lighting Application ». Cette future norme, si elle est approuvée, aura pour objectif de traiter les effets biologiques de la lumière du jour, de l'éclairage artificiel et du mélange des deux. Elle ne couvre pas les applications thérapeutiques mais différentes applications d'éclairage général (écoles, maisons de retraite, maternités, chambres d'hôpitaux, etc.) en vue d'améliorer le bien-être dans ces espaces de vie. Les effets recherchés de l'éclairage cités dans ce document sont les suivants :

- Activation et amélioration de la concentration
- Régularisation de la capacité de travail et réduction de la fatigue immédiate
- Régularisation du rythme circadien des individus
- Amélioration de l'humeur
- Structuration temporelle du cycle veille-sommeil, de préférence pour le synchroniser au rythme nycthéral
- Renforcement de l'amplitude de l'horloge biologique

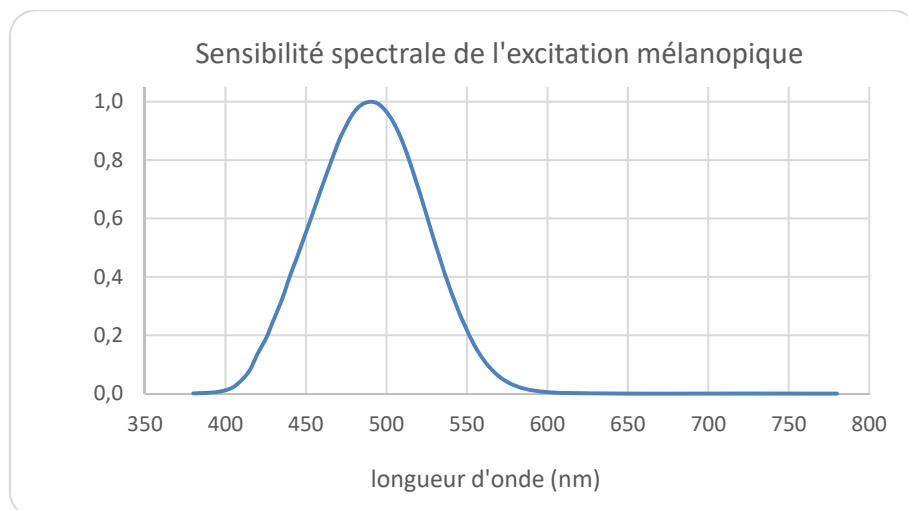
Le projet de norme traite de l'utilisation optimale de surfaces colorées filtrant la lumière du jour en calculant le facteur d'excitation mélanopique résultant. L'éclairage artificiel est optimisé selon les horaires d'éclairage en déterminant des niveaux d'éclairement et de température de couleur variables. Le projet de norme abouti à des « calendriers » lumineux (light schedules en anglais).

Face à l'engouement des industriels de l'éclairage pour le « human centric lighting », la CIE a émis des réserves en 2015 (CIE 2015) contre les revendications d'effets biologiques et sanitaires parfois abusives et fortement mises en valeur dans le marketing des produits d'éclairage dit « biodynamique ». En effet, selon la CIE, les effets non-visuels de la lumière sont liés à un traitement complexe effectué par le système nerveux central et influencé par des interactions encore inconnues de l'ensemble des photorécepteurs. Ces effets sont dépendants du spectre, de l'intensité, de la durée, des horaires de l'exposition et de l'historique des expositions précédentes. La méconnaissance des caractéristiques de type « entrée-sorties » entre l'excitation lumineuse et les réponses non-visuelles rend impossible la conception d'un éclairage parfaitement adapté à produire un effet désiré.

Par contre, la CIE confirme les effets bénéfiques sur la santé humaine et les performances visuelles produits par des systèmes d'éclairage développés sur la base des quelques principes bien établis de ce domaine scientifique. Ces principes sont d'augmenter les niveaux lumineux et/ou de modifier le spectre de la lumière pendant la journée de manière à augmenter l'excitation des cellules ganglionnaires à mélanopsine, tout en faisant le contraire le soir et avant la nuit.

### **Mesure de la lumière pour l'évaluation des effets non visuels**

La note technique TN 003 de la CIE (CIE 2013) définit précisément les courbes de sensibilité spectrales, appelées aussi spectres d'action, de l'ensemble des photorécepteurs de la rétine humaine : les trois types de cônes, les bâtonnets et les cellules ganglionnaires à mélanopsine. Les données présentées prennent en compte le facteur de transmission spectrale des milieux oculaires. La courbe de sensibilité spectrale de l'excitation des cellules ganglionnaires à mélanopsine est définie comme le spectre d'action mélanopique ou la sensibilité mélanopique. Cette courbe est représentée dans la Figure 12. Son maximum est atteint à la longueur d'onde de 490 nm.



**Figure 12 : sensibilité spectrale de l'excitation mélanopique, donnée dans la publication CIE TN 003.**

La note technique TN 002 de la CIE (CIE 2014) définit les notions de facteur d'excitation mélanopique du rayonnement lumineux et l'efficacité mélanopique du rayonnement optique qui traduisent l'importance relative de l'excitation mélanopique d'un rayonnement lumineux par rapport à l'excitation visuelle qu'il induit.

Les données de la CIE concernant l'excitation mélanopique ont été reprises dans le projet de norme européenne prNF EN 16791 de 2014 (CEN 2014).

## 7. Normes électrotechniques ou normes « produits »

Pour chaque type de dispositif (lampes, luminaires, périphériques), il existe une norme de sécurité matérielle rassemblant les exigences de sécurité (électrique, mécanique, thermique, optique) ainsi qu'une norme de performance, rassemblant des exigences de performance photométrique, colorimétrique, de durabilité, etc.

### 7.1 Normes de sécurité des produits d'éclairage général à LED

Les normes de sécurité des produits sont harmonisées avec la directive basse tension. Leurs exigences sont donc obligatoires dans le cadre du marché européen et du marquage CE.

Pour les systèmes d'éclairage à LED, les normes portent en particulier sur les dispositifs suivants :

- le module de LED : norme NF EN 62031
- le luminaire à LED : norme NF EN 60598-1 et série de normes NF EN 60598-2-x
- les lampes à LED alimentées à plus de 50 V : norme NF EN 62560
- les lampes à LED alimentées à moins de 50 V : norme NF EN 62838
- Les lampes à LED sans ballast intégré : norme NF EN 62663-1
- Les tubes LED : norme NF EN 62776

Les exigences concernent surtout les aspects électriques : mise à la terre, protection contre le contact accidentel avec des parties actives, résistance à l'humidité et isolement, rigidité diélectrique, mais aussi la résistance à la chaleur, au feu et aux courants de cheminement, ainsi que la résistance à la corrosion.

Certains marquages doivent figurer sur les produits : en plus du marquage des paramètres électriques, la valeur de la température maximale sur la surface extérieure doit figurer sur les modules de LED. L'aspect auquel se rapporte cette température doit être indiqué dans la documentation technique.

Depuis 2015, toutes les normes européennes de sécurité des produits d'éclairage à LED incluent des exigences de sécurité photobiologique pour limiter les effets possibles du rayonnement sur l'œil et la peau. Ces exigences consistent à limiter le groupe de risque photobiologique du produit concerné.

Pour l'ultraviolet, l'efficacité pour le risque lié aux ultraviolets du rayonnement lumineux d'une lampe à LED ne doit pas dépasser 2 mW/klm (2 mW pour un flux lumineux de 1000 lm). La définition de ce paramètre est donnée dans la note technique CIE TN 002. La conformité est vérifiée par la mesure de la répartition de la puissance spectrale, suivi du calcul de l'efficacité pour le risque lié aux ultraviolets du rayonnement lumineux.

En ce qui concerne le rayonnement infrarouge, les normes de sécurité des produits LED considèrent qu'il est peu probable que les LED atteignent un niveau de rayonnement infrarouge pour lequel un marquage ou d'autres mesures de sécurité sont exigés. Aucune mesure n'est donc exigée.

Le risque de la lumière bleue pour la rétine doit être évalué conformément au rapport technique IEC TR 62778, qui doit être considéré comme normatif dans le cadre des essais pratiqués sur les modules LED, les lampes à LED et les luminaires à LED.

### Exigences de sécurité photobiologique de la norme de sécurité des modules LED

Les modules LED sont des composants intégrant des LED associées à d'autres fonctions optique, mécanique ou électronique. Les modules ne sont pas des produits finalisés. Ils sont achetés, utilisés et intégrés par des fabricants de lampes et ou de luminaires.

La norme NF EN 62031 de sécurité des modules de LED précise que si l'évaluation selon le rapport technique EC TR 62778 entraîne une classification en groupe de risque RG0 ou RG1, il convient que tout luminaire incorporant un ou plusieurs de ces modules de LED soit aussi classé dans le même groupe de risque en ce qui concerne le risque lié à la lumière bleue, quelles que soient les optiques et la distance de visualisation.

Toutefois, il convient de laisser le fabricant du luminaire décider s'il applique ou non l'IEC TR 62778 directement au luminaire ce qui pourrait conduire à une classification dans un groupe de risque inférieur.

Si l'évaluation du module LED selon l'IEC TR 62778 conduit à une classification en groupe de risque RG2, le seuil d'éclairement  $E_{thr}$  doit être évalué. La norme exige alors de considérer tout luminaire incorporant un ou plusieurs modules de LED comme ayant le même seuil d'éclairement  $E_{thr}$ . Il convient de calculer la distance de visualisation à laquelle ce seuil d'éclairement est atteint conformément à la section 7.1 de l'IEC TR 62778 à partir de la mesure de la répartition du flux lumineux du luminaire.

Toutefois, le fabricant du luminaire décide s'il applique ou non l'IEC TR 62778 directement au luminaire ce qui pourrait conduire à un éclairement de seuil  $E_{thr}$  supérieur à celui du module de LED.

### Exigences de sécurité photobiologique des normes de sécurité des lampes à LED

Les lampes à LED (lampes à culot standard) doivent être classées dans le groupe de risque « RG0 illimité » ou le groupe de risque « RG1 illimité ». Ces groupes de risques « illimités » sont définis dans le rapport technique IEC TR 62778.

### Exigences de sécurité photobiologique des normes de sécurité des luminaires

Les luminaires à LED sont couverts par la norme NF EN 60598-1 ainsi que par la série de normes NF EN 60598-2-x. Ces normes sont applicables à tous les types de luminaires, selon leur usage et indépendamment de la technologie des lampes. Les luminaires à LED ne font donc pas l'objet d'un traitement spécifique. Cependant, ils sont couverts au même titre que d'autres luminaires comportant des lampes intégrées et non remplaçables.

La norme « luminaires » donne une classification des luminaires basée sur les indices de protection électriques (chocs électriques) et mécaniques (humidité, choc, poussières, *etc.*). On y trouve toutes les exigences en termes d'isolement, de rigidité diélectrique, de lignes de fuite et distances dans l'air, de résistance à la chaleur, au feu, *etc.* Un protocole d'essais d'endurance est décrit.

Pour garantir la sécurité des usagers qui sont susceptibles de manipuler le luminaire, la norme NF EN 60598-1 donne des prescriptions de températures de surface maximales admissibles des luminaires. Elles sont spécifiées selon la partie du luminaire considérée, l'accessibilité de ces parties à l'utilisateur, la nature des matériaux utilisés. Par exemple, en fonctionnement normal, les parties destinées à être saisies fréquemment à la main ne doivent pas dépasser 70°C si elles sont métalliques et 85°C si elles sont non métalliques.

La dernière révision de 2016 de la norme NF EN 60598 précise que si les luminaires utilisent une source lumineuse possédant un groupe de risque « RG0 illimité » ou « RG1 illimité » conformément au rapport technique IEC TR 62778, ou qui ont été évaluées comme RG0 ou RG1 complètement assemblés pour l'utilisation dans les mêmes conditions, alors aucune exigence concernant le risque rétinien lié à la lumière bleue ne s'applique.

Pour les luminaires classés en groupe de risque RG2, le seuil de l'éclairement lumineux Ethr doit être évalué conformément au rapport technique IEC TR 62778. Dans ce cas, les exigences suivantes s'appliquent :

- Pour les luminaires fixes, une évaluation supplémentaire conformément à l'IEC TR 62778 doit être effectuée afin de trouver la distance seuil limite entre RG2 et RG1. Le luminaire doit alors posséder un marquage particulier.
- Il est requis que les luminaires portatifs et les baladeuses dépassant RG1 à 200 mm soient également marqués.

Dans certaines conceptions de luminaire, par exemple les luminaires avec sources lumineuses intégrées, il peut s'avérer nécessaire de soumettre à l'essai le luminaire complet. Les données photométriques indiquées par les fabricants pour le luminaire peuvent être utilisées comme base pour l'évaluation détaillée du luminaire, sans nécessairement avoir recours à une caractérisation physique en laboratoire.

Les luminaires portatifs pour enfants, traités par la norme NF EN 60598-2-10, et les veilleuses montées sur des prises de courant réseau, traitées par la NF EN 60598-2-12 ne doivent pas dépasser RG1 à 200 mm.

Pour tous les luminaires portatifs et baladeuses, pas nécessairement à destination des enfants, ayant été classés RG2 en association avec une distance seuil (limite RG1/RG2) supérieure à 200 mm, le symbole d'avertissement "Ne pas fixer la source lumineuse en fonctionnement" doit

être visible et positionné de telle manière qu'il puisse être lu sans regarder la source de lumière en fonctionnement.

Pour les luminaires fixes ayant été classés RG2 en association avec une distance seuil (limite RG1/RG2) supérieure à 200 mm, les instructions du fabricant accompagnant le luminaire doivent fournir le texte suivant : "Il convient que le luminaire soit positionné de telle manière que le regard prolongé du luminaire à une distance inférieure à x mètre ne soit pas attendu", où x désigne la distance seuil dthr entre la source lumineuse et les yeux de l'observateur.

La norme NF EN 60598 précise également qu'en vue des opérations de maintenance, tous les luminaires incorporant des sources lumineuses ayant été classés RG2 et directement visibles lors de la maintenance du luminaire doivent être marqués avec le symbole d'avertissement "Ne pas fixer la source lumineuse en fonctionnement" (Figure 13).

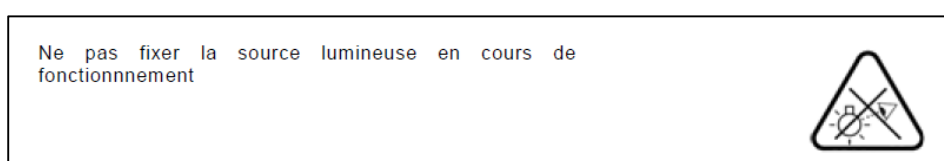


Figure 13 : marquage prescrit par la norme de sécurité NF EN 60598 dans le cas de luminaire dont le groupe de risque dépasse RG2 au-delà de 200 mm.

## 7.2 Cas particulier des nouveaux systèmes d'éclairage à base de laser

A ce jour, aucune norme de sécurité ne porte spécifiquement sur la technologie d'éclairage utilisant des lasers. Cette technologie apparaît actuellement dans l'éclairage automobile haut de gamme.

Le principe physique est d'exciter un luminophore par un laser de courte longueur d'onde, bleu ou UV, de manière à produire de la lumière blanche incohérente. A l'inverse d'une LED, le faisceau « pompe » ne doit pas sortir du produit et n'est donc pas accessible à l'extérieur du produit.

La sécurité photobiologique pour ce type de source (source laser mais lumière incohérente en sortie) est abordée dans la dernière version de la norme de sécurité laser NF EN 60825-1 (section 4.4).

Lorsque la source de lumière n'est pas ponctuelle (diamètre apparent > 5 mrd à 200 mm) et que le niveau de luminance énergétique est inférieur à  $(1 \text{ MWm}^{-2}\text{sr}^{-1})/\alpha$  où  $\alpha$  est le diamètre angulaire apparent de la source à 200 mm (compris entre 5 mrd et 100 mrd), alors le rayonnement sortant peut être évalué par la norme de sécurité photobiologique IEC / EN 62471.

Cependant, la classification laser est toujours obligatoire. Si aucune lumière laser n'est émise, le produit sera en classe laser 1. Il peut donc exister des produits dont le niveau d'émission de lumière incohérente est très élevé, classé donc en RG2 ou RG3 avec la norme 62471, mais classé « sans risque » par la norme laser (classe laser 1). A l'inverse, si un rayonnement laser résiduel monochromatique est accessible à l'observation, il serait possible d'avoir une classe laser plus élevée, classe 3B par exemple, alors que le groupe de risque de la norme IEC / EN 62471 est faible ou modéré (RG1 ou RG2), ce qui est autorisé dans les applications automobiles par le rapport technique IEC TR 62471-2.

Il existe donc une confusion possible dans l'évaluation des risques si celle-ci est basée uniquement sur la classification selon l'une des deux normes. La classe laser et le groupe de risque sont deux informations complémentaires et doivent être évaluées ensemble.



### 7.3 Normes concernant les feux automobiles

Les spécifications des feux automobiles font l'objet de réglementations européennes spécifiques présentées dans la suite de ce chapitre.

Des normes concernant l'éclairage automobile sont définies par la CIE avec les contributions du GTB (Groupe de Travail "Bruxelles 1952") qui rassemble des experts internationaux de l'éclairage automobile et de la signalisation.

Le rapport technique CIE 188 donne les exigences photométriques requises pour réaliser un éclairage performant en limitant l'éblouissement des piétons et des autres automobilistes.

La norme CIE S021 (CIE 2011) qui donne les méthodes de mesures adaptées à la détermination des performances photométriques des éclairages automobiles. Le rapport technique CIE 183 définit la notion de coupure de faisceaux des feux avant des véhicules.

### 7.4 Normes de sécurité d'autres systèmes incorporant des LED

De très nombreux produits sont susceptibles d'inclure des LED. Il est impossible ici de lister et de décrire les normes relatives à tous ces produits. On peut néanmoins citer le domaine de l'éclairage portatif autonome (non alimentés sur le secteur) comme les lampes torches et les lampes frontales par exemple, ainsi que les jouets intégrant des LED.

#### Eclairage portatif autonome (hors secteur)

Il existe très peu de normes dans ce domaine. Les produits incorporent pratiquement tous des LED avec des niveaux lumineux parfois très élevés. Il existe une norme américaine ANSI/NEMA FL1 sur les performances de base (intensité lumineuse, autonomie, résistance aux impacts). Contrairement aux produits d'éclairage alimentés à partir du secteur, il n'existe actuellement aucune exigence de sécurité photobiologique normative pour ces produits.

#### Cas des jouets

Le domaine des jouets est également concerné par les LED et fait l'objet de la norme de sécurité NF EN 62115. Cette norme stipule que les jouets ne doivent pas présenter de risques liés aux rayonnements émis par des sources laser ou des LED. Dans son annexe E, il est demandé de vérifier que le rayonnement accessible soit évalué avec la norme de sécurité laser IEC 60825-1 dans sa version 1993 (ou NF EN 60825-1 version 1994). Le risque laser doit être alors de classe 1 (et pas 1M) en cas d'accès direct au rayonnement du laser ou de la LED (sans lentilles, réflecteurs ou filtres). Pour les essais en laboratoire, le flux accessible peut être évalué à une distance de 14 mm au minimum. Pour être de classe 1, il ne faut pas dépasser les limites de la classe 1 pour une vision à l'œil nu mais aussi à l'aide d'un instrument d'optique. En effet, il existe un « risque » en cas de visualisation à l'aide d'un instrument d'optique de certains produits. Ceux-ci sont alors classés 1M.

De plus pour l'évaluation, on doit appliquer les conditions de défaut électroniques qui se résument la plupart du temps, à supposer que le rayonnement émis serait continu et avec une amplitude égale au niveau crête du mode de fonctionnement impulsionnel.

Il faut noter que dans les toutes éditions plus récentes de la norme laser IEC 60825-1, il est recommandé d'utiliser les normes de sécurité photobiologique des lampes dans le cas des LED (CIE S009 ou IEC 62471), sans exclure le fait que des exigences normatives particulières imposent le recours à la norme laser, ce qui est le cas de la norme de sécurité des jouets.

Notons qu'un protocole d'évaluation des risques présentés par les LED intégrés dans les jouets a été proposé par l'agence britannique Health Protection Agency (Higlett ; 2012)) dans le but de

prendre en compte les mauvais usages envisageables des jouets et la transmission optique plus importante des milieux oculaires du très jeune enfant conduisant à une surexposition de la rétine. Un aspect intéressant mentionné dans cette publication est que les enfants sont susceptibles d'utiliser les jouets électriques pendant des périodes bien plus longues que ce qui était supposé. Les scénarios d'exposition retenus sont une exposition cumulée de 8h à la distance de 200 mm et une exposition cumulée de 100 s à la distance de 10 mm.

Dans ce travail, des mesures ont été effectuées sur plus de 280 LED utilisées dans des jouets. Les conclusions des auteurs sont des suivantes :

- La majorité des LED testées peuvent être considérées sans risque pour cet usage, notamment les LED rouges, oranges et jaunes, ainsi que les LED vertes de faible puissance.
- Les LED vertes les plus puissantes (courant d'alimentation > 100 mA) peuvent présenter des risques surtout si elles sont associées en matrice.
- Certaines LED bleues dépassent les valeurs limites d'exposition de l'Incirp pour le risque rétinien, même pour des composants de faible puissance. Ces LED doivent faire l'objet d'analyses détaillées. En effet, la faible stimulation visuelle dans ce domaine spectrale peut compromettre le réflexe d'aversion et augmenter ainsi la durée de l'exposition. Les LED émettant dans le bleu profond, en bordure de l'UV-A, de faible puissance (courant d'alimentation < 100 mA) sont sans risque pour les enfants de plus de trois ans.
- Les LED blanches de faible puissance (courant d'alimentation < 100 mA) peuvent être considérées sans risque pour les yeux. Pour des LED blanches plus puissantes, le dépassement des valeurs limites d'exposition de l'Incirp est possible.

## 7.5 Normes de performances des produits d'éclairage général à LED

Les normes électrotechniques sur la performance des produits d'éclairage à LED sont les suivantes :

- le module de LED : NF EN 62717
- le luminaire : NF EN 62722-1
- le luminaire à LED : NF EN 62722-2-1
- les lampes à LED alimentées à plus de 50 V : Norme NF EN 62612
- les lampes à LED sans ballast intégré : norme NF EN 62663-2

Ces normes ne spécifient pas d'exigences de performances minimales. Elles définissent la liste des performances que doit annoncer le fabricant ou le distributeur, et d'éventuels marquages spécifiques liés à ces performances. Les performances concernées sont le flux lumineux, l'intensité lumineuse et l'angle de faisceau, des indices d'efficacité lumineuse et énergétique, certains paramètres colorimétriques, la durée de vie nominale, le facteur de conservation du flux lumineux, le taux de lampes de produits défectueuses lorsque la durée de vie nominale est atteinte.

Ces normes définissent des méthodes et conditions d'essais permettant de mesurer les performances et d'évaluer la conformité des produits vis-à-vis des valeurs annoncées. Par exemple, des essais d'endurance sont détaillés dans ces normes (essais commutation marche/arrêt répétée, essais en température, etc.).

Certaines de ces normes sont harmonisées avec les règlements européens issus de la directive d'écoconception des produits électriques dite directive ErP (Energy Related Products) et imposant un ensemble de performances minimales aux produits d'éclairage.



## 8. Normes relatives aux installations d'éclairage

Ces normes ne sont pas spécifiques aux installations d'éclairage à LED mais concernent toutes les technologies d'éclairage susceptibles d'être utilisées

### 8.1 Normes relatives à la sécurité des installations

En France, les exigences de sécurité des installations électriques d'éclairage sont décrites par les séries de normes NF C 15-100 pour l'éclairage intérieur et NF C 17-200 pour l'éclairage extérieur. Ces normes sont d'application obligatoire en France. Quelques dispositions de sécurité électrique particulières sont applicables aux luminaires et lampes à LED.

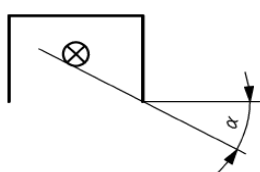
### 8.2 Normes relatives aux performances des installations

Les normes relatives aux performances des installations ne sont pas des normes harmonisées. Elles sont cependant largement appliquées, de manière volontaire, lors de la conception des installations d'éclairage dans les secteurs non résidentiels.

#### Normes de performance lumineuse et d'ergonomie visuelle sur les lieux de travail

Les normes européennes d'éclairage des lieux de travail intérieurs (NF EN 12464-1) et extérieurs (NF EN 12464-2) donnent des recommandations applicables aux lieux de travail, qui permettent de satisfaire aux besoins de confort visuel et de performance visuelle des personnes dont la capacité visuelle est normale.

Toutes les tâches visuelles courantes sont considérées, y compris le travail sur écran. Les normes spécifient les exigences concernant la quantité et la qualité d'éclairage des solutions d'éclairage pour la plupart des lieux de travail : éclairement moyen à maintenir, uniformité de l'éclairement, indice d'éblouissement maximal (UGR en éclairage intérieur, GR en éclairage extérieur), indice de rendu de couleur des lampes. Ces normes exigent également l'absence de phénomènes visibles de papillotement et d'effets stroboscopiques, sans donner de critère quantitatif. Une disposition spécifique de la norme NF EN 12464-1 impose de limiter l'angle de défilement (angle de masquage de la lumière) des luminaires d'éclairage intérieur si leur luminance est élevée (Figure 14).



Lamp luminance kcd·m <sup>-2</sup>	Minimum shielding angle $\alpha$
20 to < 50	15°
50 to < 500	20°
≥ 500	30°

**Figure 14 : angles de défilement des luminaires à forte luminance spécifiés dans la norme NF EN 12464-1**

Des procédures de mesures in-situ sont données dans ces normes afin de vérifier la conformité des installations.

La France dispose également de la norme d'ergonomie visuelle NF X 35-103 qui donne des recommandations supplémentaires. En éclairage intérieur des lieux de travail, cette norme recommande de modifier les exigences de la norme européenne NF EN 12464-1 en y incluant un critère d'âge au-delà de 45 ans, la prise en compte de la difficulté de la tâche visuelle et la

criticité de cette tâche visuelle. En suivant les recommandations de la norme NF X 35 103, on peut être amené à augmenter le niveau d'éclairage moyen.

Un apport important de la norme NF X 35-103 est de proposer une méthode basée sur les luminances, et non pas seulement sur les éclairages. Cette méthode rend mieux compte du confort visuel, très dépendant des contrastes de luminance dans le champ de vision.

**Tableau 7 : rapports recommandés de luminance dans le champ visuel, extraits de la norme NF X 35-103**

Localisation \ Exigence visuelle	Forte	Moyenne	Faible
Entre la zone de travail et la zone périphérique	Entre 1 et 5	Entre 1 et 10	Entre 1 et 20
Entre la zone de travail et son environnement immédiat	Entre 1 et 3	Entre 1 et 5	Entre 1 et 10
Entre un luminaire et son pourtour	< 20	< 50	< 80
Entre une baie vitrée et les murs adjacents	< 20	< 50	< 100

Le respect des rapports de luminances recommandés dans le Tableau 7 garantit l'absence d'éblouissement. Des rapports de luminance trop élevés entre la source lumineuse directe ou indirecte et son environnement génèrent un éblouissement inconfortable ou incapacitant. Ce phénomène doit être évité par la mise en place des actions suivantes :

la réduction de la luminance excessive des luminaires

la réduction de luminance des fenêtres par des stores

l'augmentation des luminances dans le champ visuel pour en assurer l'équilibre.

Dans le champ visuel, le rapport de luminance entre une source lumineuse et son environnement immédiat ne doit pas excéder un rapport de 50. Dans le cas d'une tâche à forte exigence visuelle et selon le besoin, ce rapport peut être ramené à la valeur de 20.

La norme NF X 35 103 propose aussi une méthodologie de diagnostic sur site de l'éclairage des postes de travail. Elle est utilisée en France par les centres de mesures physiques de la CARSAT, l'inspection de travail, l'INRS ainsi que par des ergonomes.

### Normes de performance lumineuse et d'ergonomie visuelle en éclairage extérieur

L'éclairage public et l'éclairage des routes en général fait l'objet de la série de normes européennes NF EN 13201-x. Ces normes visent à dimensionner l'éclairage extérieur en fonction de la typologie des chaussées de manière à « voir et être vu » vis-à-vis de personnes dont les capacités visuelles sont normales.

La norme NF EN 13201-2 fixe les valeurs minimales à maintenir (éclairage, luminance, uniformité, éclairage des bords) et les indices d'éblouissement (indice TI) à ne pas dépasser pour chaque classe de chaussée. Une méthode de sélection des classes d'éclairage (élaborée en France) est présentée dans le document technique FD EN 13201-1 (non normatif). Ce document propose, en plus des valeurs d'éclairage minimales à maintenir, des valeurs maximales à ne pas dépasser.

La norme NF EN 13201-5 décrit le calcul de l'efficacité énergétique des installations d'éclairage extérieur en prenant en compte le fonctionnement dynamique de l'installation au cours de la nuit (abaissments nocturnes), un mode de fonctionnement facilité par l'utilisation des LED associées à des systèmes de pilotage électronique.

### 8.3 Autres normes d'éclairagisme

Il existe d'autres normes françaises et européennes d'éclairagisme concernant des installations d'éclairage susceptibles d'accueillir des produits LED. On peut citer, par exemple, l'éclairage des installations sportives (NF EN 12193) ainsi qu'une norme française (CR 14380) d'éclairage des tunnels.

## 9. Norme de caractérisation électrique et photométrique des dispositifs d'éclairage à LED

La publication CIE 127 de 2007 définit les techniques de mesures photométriques des composants LED. Elle ne couvre pas les produits finis.

La norme la plus récente sur les mesures photométriques et électriques des modules, lampes et luminaires à LED a été élaborée conjointement par la CIE et le CEN. Il s'agit de la norme internationale CIE S025 et de la norme européenne NF EN 13032-4 dont les contenus sont identiques. La norme européenne est devenue une norme harmonisée et entre donc dans le champ des réglementations européennes, notamment pour la mesure et la vérification des performances des produits.

Cette norme, à caractère métrologique, décrit les méthodes de mesures des principales caractéristiques électriques et photométriques des produits à LED comme le flux lumineux, le flux spectrique, l'intensité lumineuse, la luminance, les paramètres colorimétriques, la puissance électrique, l'efficacité lumineuse.

La version actuelle de cette norme ne donne pas d'indications sur la mesure de la modulation temporelle de la lumière.

## 10. Normes de compatibilité électromagnétique des dispositifs d'éclairage

La normalisation CEM rassemble des normes visant à limiter les émissions de champs électromagnétiques (normes d'émission) et des normes d'immunité, visant à spécifier des critères de bon fonctionnement en présence de signaux électromagnétiques perturbateurs.

On distingue des normes concernant le mode rayonné et le mode conduit. En mode rayonné, les normes correspondantes s'intéressent aux perturbations liées aux champs électromagnétiques. En mode conduit, les normes concernent les perturbations électriques apparaissant (courant et tension) dans les câbles d'alimentation et d'interconnexion des produits.

Ces normes sont harmonisées avec la directive européenne sur la CEM et les règlements européens associés.

## 11. Normes d'exposition aux champs électromagnétiques

Comme tous les dispositifs rayonnants, les dispositifs d'éclairage à LED ne doivent pas exposer les usagers à des niveaux de champs électromagnétiques qui présentent des risques pour la santé.

### 11.1 Recommandation de l'Icnirp

Les valeurs limites des champs électromagnétiques ont été définies au niveau international par l'Icnirp (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) (Icnirp, 1998). Ces

valeurs limites sont données pour les composantes électrique et magnétique du champ. Elles dépendent de la bande de fréquence considérée et ont été établies sur la base des effets sanitaires provoqués par l'interaction des champs avec les tissus humains.

## 11.2 Norme de base pour tous les appareils électriques et électroniques

La norme NF EN 50392 est la norme de base pour démontrer la conformité des appareils électriques et électroniques, aux restrictions de base pour l'exposition du corps humain aux champs électromagnétiques (0 Hz – 300 GHz).

## 11.3 Normes de mesure de l'exposition humaine aux champs émis par appareil d'éclairage

La norme NF EN 62493 propose une méthode physique d'évaluation de l'exposition produite par les équipements d'éclairage : conditions de mesure, protocole, analyse des résultats, critères de conformité aux recommandations de l'Incirp. Ces critères concernent les densités de courant induit respectivement par les composantes électriques et magnétiques pour des fréquences allant de 20 kHz à 10 MHz. De plus, le débit d'absorption spécifique (DAS) est évalué pour les fréquences comprises entre 100 kHz et 300 MHz. Le protocole d'essai repose sur des mesures de densité de courants induits par des champs électromagnétiques dans un modèle de tête l'utilisation d'un modèle de tête (sphère métallique) au-dessus de laquelle est placé le luminaire ou la lampe à tester. Les distances entre le luminaire et la sphère représentant la tête sont spécifiées en fonction de l'application typique du matériel à tester.

En ce qui concerne les lampes fluorescentes compactes, l'Afsset a défini un protocole de mesure des champs électromagnétiques (Afsset, 2008) en vue de réaliser des campagnes d'évaluation des champs électromagnétiques émis par ces lampes. L'examen des systèmes d'éclairage à LED peut être envisagé sur ces aspects, notamment en raison de l'utilisation d'alimentation électrique haute fréquence.

## 12. La réglementation européenne sur les rayonnements optiques artificiels

La directive 2006/25/CE est relative aux prescriptions minimales réglementaires de sécurité et de santé, relatives à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements optiques artificiels (ROA). Elle porte sur les risques qu'entraînent, pour la santé et la sécurité des travailleurs, les effets nocifs sur les yeux et sur la peau de l'exposition à des rayonnements optiques artificiels. Par rayonnement optique artificiel, elle comprend les rayonnements cohérents (laser) et les rayonnements incohérents émis par toutes les sources autres que les lasers.

La directive reprend les valeurs limites d'exposition de l'Incirp de 1997 qui étaient disponibles au moment de la rédaction de la directive. Il y a des différences notables avec les recommandations plus récentes de l'Incirp. Citons par exemple le spectre d'action et les limites d'exposition au risque thermique rétinien qui ont été modifiés en 2013. En ce qui concerne la lumière bleue, le champ de vision effectif à prendre à compte pour les courtes durées d'exposition a également été modifié par l'Incirp en 2013. Ces évolutions des recommandations de l'Incirp n'ont pas été introduites dans la directive à l'heure où ce rapport est rédigé.

Il est important de noter que les valeurs limites de la directive sont toujours fixées pour des journées de travail de 8 heures.

La directive 2006/25/CE est relative à l'exposition à l'ensemble des sources de rayonnement auxquelles les travailleurs sont exposés. C'est pourquoi il n'est pas possible, dans le cas général, de déterminer la conformité à la directive sur la base du seul groupe de risque photobiologique des sources. Il peut y avoir des effets additifs, notamment en ce qui concerne l'exposition de la peau et de la cornée qui se mesure en termes d'éclairement. Pour le risque à la lumière bleue, seuls les lampes et luminaires à LED classés dans les groupes de risque « RG0 illimité » et « RG1 illimité » selon le rapport technique IEC TR 62778 garantissent de pas dépasser les valeurs limites d'exposition sur la rétine en dessous de 10 000 s, même lorsque plusieurs de ces sources sont utilisées simultanément.

Au niveau français, la directive ROA a été transposée en règlement français en 2010 par le décret n° 2010-750. Un arrêté émanant du ministère du travail daté du 1 mars 2016 précise les modalités relatives à l'évaluation des risques. Cet arrêté fait référence à la norme de sécurité laser NF EN 60825-1 et à la série de normes concernant l'exposition des personnes aux rayonnements optiques NF EN 14255-1, -2 et -4.

Elle fixe notamment les obligations des employeurs en ce qui concerne :

- la détermination de l'exposition et l'évaluation des risques (article 4) ;
- les dispositions visant à éviter ou à réduire les risques (article 5) ;
- l'information et la formation des travailleurs (article 6) ;
- la consultation et la participation des travailleurs (article 7).
- Elle préconise aussi de prendre des mesures de mises en place de la surveillance de la santé des travailleurs.

L'article 4.1 précise que l'employeur évalue et, si nécessaire, mesure et/ou calcule les niveaux de rayonnement optique auxquels les travailleurs sont susceptibles d'être exposés et que la méthodologie employée dans l'évaluation, la mesure et/ou les calculs est conforme aux normes IEC en ce qui concerne les rayonnements lasers et aux recommandations de la CIE et du CEN en ce qui concerne les rayonnements incohérents.

La directive comprend également 2 annexes ; la première se rapporte aux rayonnements optiques incohérents, la seconde aux rayonnements optiques cohérents. Chacune de ces annexes donne pour chaque domaine spectral :

- la nature du risque lié au domaine spectral concerné ;
- les grandeurs à déterminer pour évaluer le risque ;
- les valeurs limites d'exposition correspondant aux grandeurs déterminées.

Un guide détaillé d'application de la directive ROA a été publié sous contrat de la commission européenne par le Health Protection Agency (UK). Ce guide donne des exemples d'évaluation des risques photobiologiques dans des situations d'exposition spécifiques. Pour les LED, on trouve un exemple traitant d'un voyant lumineux vert de faible puissance, qui ne présente aucun risque. On note également dans ce guide des exemples d'évaluations menées sur les éclairages de quatre automobiles. Le risque rétinien de la lumière bleue a été mis en évidence pour les feux de route et les feux de croisement en vision directe dans le faisceau à la distance de 1 m. Pour les feux de route, les durées limites d'exposition estimées dans le guide varient de 3 min à 1 h selon les modèles testés. Cependant, à l'époque de la rédaction du guide, la technologie LED n'était pas utilisée pour ces éclairages.

En France, l'INRS a publié un guide méthodologique pour accompagner l'application de la directive européenne ROA.

### 13. La réglementation européenne sur les produits d'éclairage général à LED

Les réglementations applicables aux produits d'éclairage à LED sont des règlements européens élaborés dans le cadre de directives européennes. Les normes harmonisées constituent les référentiels techniques associés à ces règlements.

Les directives européennes concernent essentiellement les domaines de la santé, de la sécurité, de l'environnement et de l'énergie. Dans le domaine des produits d'éclairage, il s'agit essentiellement de la directive basse tension, de la directive de compatibilité électromagnétique, de la directive d'écoconception des produits et de la directive sur la santé et la sécurité des travailleurs.

La conformité réglementaire des produits électriques vendus en Europe est attestée par le marquage CE. Ce marquage est auto-déclaratif. Il est apposé par le fabricant ou le distributeur qui engage sa responsabilité sur la conformité du produit marqué.

Pour l'éclairage à LED, les exigences de sécurité réglementaires sont celles des normes harmonisées présentées dans les sections précédentes de ce chapitre et concernant la sécurité électrique et photobiologique, la CEM et l'exposition des personnes aux rayonnements électromagnétiques.

Les produits d'éclairage font également l'objet d'exigences de performances minimales, issus des règlements mettant en œuvre la directive européenne 2005/32/CE concernant l'écoconception des produits. Ces règlements d'écoconception ont un impact considérable sur toute la filière éclairage en partant du niveau industriel jusqu'aux consommateurs. En effet, ils définissent depuis 2009 un calendrier comportant des étapes de mise en œuvre d'exigences minimales de plus en plus fortes. L'application des règlements d'écoconception des produits d'éclairage a conduit concrètement au bannissement des lampes à incandescence non directionnelle et des lampes à vapeur de mercure utilisées en éclairage public.

Les règlements d'écoconception incluent des exigences d'information et d'affichage. Ils donnent également les procédures de vérification aux fins de surveillance de marché.

#### 13.1 Le règlement 244/2009

Ce règlement donne des exigences de fonctionnalité applicable aux lampes non directionnelles applicables en particulier aux lampes LED du marché grand public (lampes à usages domestiques non dirigées).

Les performances minimales réglementaires sont l'efficacité énergétique, la durée de vie, la conservation du flux lumineux, le nombre de cycles de commutations avant défaillance, le temps de démarrage, le temps de chauffe, le taux de défaillances prématurées et le facteur de puissance.

La sécurité photobiologique vis-à-vis des rayonnements ultraviolets est abordée dans ce règlement en limitant le rayonnement UV aux valeurs limites suivantes :

UV-A et UV-B : 2  $\mu\text{W}/\text{lm}$

UV-C : 0.1  $\mu\text{W}/\text{lm}$

Ces valeurs limites d'efficacité de rayonnement lumineux pour les risques UV visent essentiellement les lampes fluorescentes.



### 13.2 Le règlement 1194/2012

Ce règlement donne les exigences de fonctionnalité applicables aux lampes dirigées (lampes directionnelles de type « spot ») et aux lampes LED, dirigées et non dirigées. Il faut noter que le règlement s'applique également aux modules LED destinés à être intégrés dans des luminaires.

Les performances minimales réglementaires sont l'efficacité énergétique, le facteur de survie des lampes à 6000 h, la conservation du flux à 6000 h, le nombre de cycles de commutation avant défaillance, la durée d'allumage, le temps de préchauffage, le taux de défaillance prématurées, l'indice de rendu de couleur, la constance de la couleur et le facteur de puissance.

Pour les lampes dirigées, le règlement impose, entre autres paramètres, un affichage et une communication d'autres paramètres comme l'angle du faisceau, l'intensité maximale et le flux lumineux mesuré dans un cône de 90°.

### 13.3 Le règlement 2015/1428 modifiant les règlements 244/2009 et 1192/2014

Certains points techniques des règlements 244/2009 et 1192/2014 ont été modifiés en 2015 par le règlement 2015/1428. On note en particulier que la dernière étape du calendrier de renforcement des exigences minimales d'efficacité énergétique des lampes non dirigées est repoussée à septembre 2018 au lieu de septembre 2016.

Cette modification du calendrier initial du règlement 244/2009 a été décidée par la Commission Européenne sous la pression de la France. La conséquence a été un retard de deux ans de l'interdiction des lampes halogènes non dirigées.

### 13.4 Le règlement européen 874/2012 sur l'étiquetage énergétiques des lampes et des luminaires

Ce règlement décrit « l'étiquette énergie » obligatoirement apposée sur les lampes et les luminaires. Les classes « énergie » vont de E à A++. Il n'y a pas d'indication de flux lumineux ni de durée de vie. Pour les lampe, il y a un affichage obligatoire de la consommation énergétique en kWh pour 1000 h d'usage.

Pour les lampes et luminaires LED, les classes énergie sont déterminées par l'indice d'efficacité énergétique décrit dans le règlement européen 1194/2012.

Dans le cas des luminaires, l'étiquette informe le consommateur que le luminaire intègre des LED par l'intermédiaire du texte « ce luminaire comporte des lampes à LED intégrées ». S'il s'agit de lampes LED ou de modules LED non-remplaçables, un texte supplémentaire est affiché : « les lampes à LED de ce luminaire ne peuvent pas être changées ». La Figure 15 montre un exemple d'étiquette énergie pour un luminaire à LED dont les modules LED ne peuvent pas être changés.

En ce qui concerne la surveillance du marché et les critères de conformité, il est important de noter que le règlement 874/2012 introduit la « règle des 10% » en moyenne sur un lot de 20 lampes minimum, y compris pour l'indice d'efficacité énergétique.

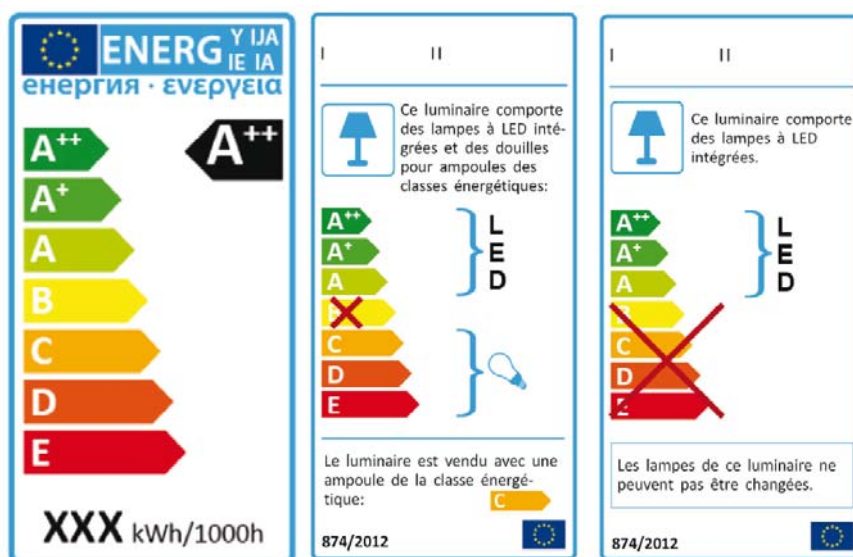


Figure 15 : étiquettes énergie pour une lampe (à gauche), un luminaire intégrant des lampes remplaçables (au milieu) et un luminaire à LED dont les modules LED ne peuvent pas être changés (à droite).

### 13.5 Evolution des règlements européens d'écoconception et d'étiquetage des produits d'éclairage

Au début de l'année 2017, une refonte des règlements portant sur les produits d'éclairage a été initiée par la Commission Européenne, à partir des conclusions de l'étude « omnibus review » (VHK 2014) menée en 2014 par plusieurs consultants de la Commission.

Cette étude a montré qu'un potentiel important de réduction de la consommation énergétique de l'éclairage pourrait être réalisée en améliorant de nouveau l'efficacité énergétique des lampes et des luminaires.

## 14. La réglementation européenne sur l'éclairage automobile

La réglementation européenne sur l'éclairage automobile est prise en charge par l'UNECE (The United Nations Economic Commission for Europe) et plus particulièrement par son groupe de travail sur l'éclairage et la signalisation (GRE). Ce groupe représente l'UNECE au forum mondial de l'harmonisation des réglementations automobiles (WP.29). Les réglementations nationales sont prises par les représentants des gouvernements présents lors des votes au WP.29.

Il existe environ 40 règlements de l'UNECE portant sur l'éclairage automobile (règlements UN/ECE Rxx). Certaines sont transposées en règlement européen par la Commission Européenne. L'audition de la FIEV par l'Anses a mis en évidence l'importance des règlements suivants :

- UNECE R48 « Prescriptions uniformes relatives à l'homologation des véhicules en ce qui concerne l'installation des dispositifs d'éclairage et de signalisation lumineuse »
- UNECE R87 « Prescriptions uniformes relatives à l'homologation des feux- circulation diurne pour véhicules à moteur »



- Cette réglementation limite l'intensité lumineuse des feux de jour à 1200 cd, avec un minimum de 400 cd dans l'axe de référence. La surface apparente de ces feux, dans la direction de l'axe de référence, doit être comprise entre 25 cm<sup>2</sup> et 200 cm<sup>2</sup>.
- UNECE R112 « Prescriptions uniformes relatives à l'homologation des projecteurs pour véhicules automobiles émettant un faisceau de croisement asymétrique ou un faisceau de route ou les deux à la fois et équipés de lampes à incandescence et/ou de modules à diode électroluminescente (DEL) »
- UNECE R113 « Prescriptions uniformes relatives à l'homologation des projecteurs pour véhicules automobiles émettant un faisceau de croisement symétrique ou un faisceau de route ou les deux à la fois et équipés de lampes à incandescence, de sources lumineuses à décharge ou de modules DEL »

Le règlement R113 est applicable dans le cas des systèmes d'éclairage avant adaptatifs AFS (Adaptive Frontlight System). Les feux adaptatifs permettent d'orienter ou de modifier automatiquement la position et/ou la géométrie du faisceau lumineux, notamment lorsque le véhicule effectue un virage. Les règlements R112 et R113 définissent des diagrammes d'intensité lumineuse pour les feux de croisement et les feux de route. L'intensité des feux de croisement est limitée dans plusieurs directions de manière à limiter l'éblouissement.

Les flux lumineux exigés pour des feux de croisement à LED ne sont pas supérieurs à ceux requis pour les autres technologies. Ils doivent être compris entre 1 000 et 2 000 lm. L'intensité des feux de route est au minimum de 40 500 cd et ne doit pas dépasser 215 000 cd.

On remarque que les valeurs d'intensité maximales réglementaires des feux automobiles ne peuvent pas être directement reliées aux phénomènes d'éblouissement et aux indices d'éblouissements normalisés par la CIE.

La directive européenne 2008/89/CE du 24 septembre 2008 a rendu obligatoire la présence de feux de jour à allumage automatique sur tous les véhicules à moteur, pour en augmenter la visibilité et améliorer la sécurité routière. Cette réglementation a eu un impact important sur les LED puisque cette technologie a été retenue par les constructeurs pour assurer cette fonction avec une meilleure efficacité énergétique qu'avec les lampes halogènes ou à décharge.

A ce jour, il n'existe pas de réglementation spécifique concernant les effets photobiologiques des systèmes d'éclairage et de signalisation automobile. Les constructeurs citent la norme IEC 62471 comme référence normative et réglementaire dans ce domaine.

## **15. Synthèse des recommandations, des normes et des réglementations concernant l'éclairage à LED**

Depuis la parution en 2010 du premier rapport d'expertise de l'Anses concernant les aspects sanitaires des LED, de nouvelles normes, ou des compléments de normes existantes, ont été publiés en lien avec des volets sanitaires. Cette synthèse reprend les principales évolutions des recommandations, normes et des réglementations portant sur quatre catégories d'effets sanitaires : endommagement de la rétine par la lumière bleue, effets de la modulation temporelle, éblouissement et effets non-visuels.

## 15.1 Concernant la sécurité photobiologique (risque de la lumière bleue)

De nouvelles recommandations de l'Incirp sur les rayonnements optiques visibles et infrarouges ont été publiées en 2013. Les évolutions sont mineures en ce qui concerne le risque rétinien de la lumière bleue, qui reste le seul risque photobiologique associé au LED dans la liste des risques définis par ces recommandations. Les valeurs limites d'exposition à la lumière bleue sont inchangées et concernent une exposition aiguë (exposition unique, continue et prolongée). Au regard des connaissances actuelles, les valeurs limites d'exposition en vigueur ne permettent pas d'évaluer le risque d'exposition chronique quotidienne. Cela n'exclut pas que des expositions répétées et prolongées puissent induire un risque cumulé potentiellement supérieur à celui évalué sur la base des valeurs limites actuelles. Par ailleurs, les valeurs limites sont basées sur un diamètre pupillaire de 3 mm. La diminution du réflexe de contraction pupillaire (pupille dilatée) lorsque la lumière a une faible excitation mélanopique n'est pas prise en compte par l'Incirp. L'Incirp définit néanmoins une population sensible à la lumière bleue de courte longueur d'onde : les aphaques, les pseudophaques ainsi que les enfants de 2 ans et moins. Un spectre d'action spécifique est recommandé par l'Incirp pour évaluer l'exposition de cette population. On note néanmoins que la maturation du cristallin n'est pas achevée à 2 ans et se poursuit jusqu'à l'âge adulte.

La directive européenne ROA de 2006 concernant l'exposition des travailleurs aux rayonnements optiques artificiels inclut le risque de la lumière bleue. Pour ce risque particulier, elle est alignée sur les précédentes recommandations de l'Incirp. En France, la directive ROA a été transposée par décret en 2010 et un arrêté de 2016 définissant les modalités d'évaluation de risque, en s'appuyant sur des normes européennes d'exposition des personnes aux rayonnements optiques.

Les normes de sécurité photobiologique, comme la norme NF EN 62471, sont également alignées avec les précédentes recommandations de l'Incirp. Ces normes sont des normes d'émission des produits qui définissent des groupes de risque mais ne prennent pas en compte les scénarios d'exposition (pas de prise en compte d'expositions chroniques répétées), ni les personnes sensibles (pas de prise en compte de courbe de sensibilité des enfants à la lumière bleue recommandée par l'Incirp, pas de prise en compte de pathologies oculaires).

Depuis l'expertise de 2010, le rapport technique IEC TR 62778:2014 a été publié par l'IEC pour que les industriels puissent mieux évaluer le groupe de risque photobiologique dans le cas de la lumière bleue. Ce document est utile pour les fabricants puisqu'il définit un protocole très précis d'évaluation, basé sur une mesure à 200 mm, associé à des limites de luminance et d'éclairement protectrices pour qu'un produit soit classé en groupe de risque 0 ou 1. Il remplace la notion de groupe de risque 2 par les notions d'éclairement seuil et de distance seuil correspondant à la frontière entre les groupes de risques 1 et 2. Des conditions de transfert de groupe de risque entre composant et produit final sont données.

Le rapport technique IEC TR 62778 :2014 a acquis une valeur normative et réglementaire puisqu'il est référencé comme méthode de base dans les normes de sécurité des produits d'éclairage général (lampes et luminaires), qui sont obligatoires dans le cadre de la directive Basse Tension (normes harmonisées). Ainsi, il existe depuis 2015 des prescriptions obligatoires de limitation et d'affichage de sécurité photobiologique (pour les luminaires appartenant au groupe de risque 2) pour les lampes et luminaire d'éclairage général. Les lampes doivent appartenir aux groupes de risque « 0 illimité » ou « 1 illimité » (l'association de plusieurs lampes dans un luminaire ne modifie pas le groupe de risque associé à la lampe). Les luminaires peuvent être classés dans le groupe de risque 2 à condition qu'il y ait un marquage de la distance seuil et de la mention « ne pas regarder fixement la source ».

Dans l'éclairage automobile (feux extérieurs), il n'existe pas de prescriptions de sécurité photobiologique visant à limiter l'émission ou l'exposition des personnes. Il existe à présent dans l'éclairage automobile une technologie basée sur l'utilisation de laser. L'évaluation de ces projecteurs est très susceptible de donner des résultats très différents selon que la norme laser ou que la norme de sécurité photobiologique des lampes est utilisée. Il est nécessaire d'utiliser les deux normes pour l'évaluation des niveaux d'émission de ces sources.

Le domaine des éclairages portatifs non reliés au secteur (lampes torches, lampes frontales) reste en-dehors des normes de sécurité des produits d'éclairage général. Ils utilisent pourtant des sources LED pouvant atteindre des niveaux de flux très élevés.

Le cas des jouets intégrant des LED n'est pas bien traité puisque la norme de sécurité des jouets fait référence à la norme laser et ne considère pas la sensibilité plus élevée des enfants à la lumière bleue.

## 15.2 Concernant la modulation temporelle de la lumière

Jusqu'à 2015, il n'existait que des normes anciennes et incomplètes décrivant les phénomènes liés à la modulation temporelle de la lumière. Des nouvelles normes et documents techniques ont été élaborés ou remis à jour par la plupart des organismes de normalisation depuis 2015. C'est le cas de la CIE, de l'IEEE, de NEMA et de l'IEC.

Dans ces documents récents, le papillotement est l'effet le mieux décrit et les indices relatifs à ce phénomène sont très bien établis. En éclairage intérieur, l'indice de visibilité du papillotement PstLM est très bien adapté à la quantification de cet effet pour des lampes et des luminaires. Il repose sur des bases scientifiques solides et sa définition est bien établie. Par contre, le domaine de validité de l'indice PstLM est très limité. Ainsi, cet indice n'est pas bien adapté à décrire la visibilité du papillotement des grandes surfaces éclairées par des sources de lumière modulée : plans de travail, murs, plafonds, etc.

La sensibilité humaine aux contrastes temporels en vision périphérique révèle que les excitations lumineuses doivent être de plus grande taille pour être visibles. La fréquence critique de fusion est également plus petite qu'en vision centrale. Par contre, dans un domaine spatio-temporel plus limité qu'en vision centrale, la sensibilité aux contrastes est plus élevée. C'est pourquoi la visibilité du papillotement des grandes surfaces observées en vision périphériques (écrans, luminaires, plans de travail éclairés par des lumières modulées, etc.) peut paraître plus importante qu'en vision centrale. L'indice PstLM n'est pas adapté pour décrire la visibilité du papillotement en vision périphérique.

La fréquence critique de fusion est plus faible en condition de faible éclairage. Ainsi, le papillotement des anciennes générations de lampes à décharge en éclairage public n'a jamais été un sujet de controverses alors que la modulation temporelle de la lumière émise était largement supérieure à celle des lampes utilisées en éclairage intérieur. Les indices de papillotement actuels comme PstLM ne sont pas adaptés à l'éclairage extérieur en condition de faible éclairage. Il n'existe actuellement pas d'indice dans ce domaine, et a fortiori pas de limite bien définie

La prise en compte de travaux de recherche récents sur l'effet stroboscopique a permis de normaliser un nouvel indice décrivant sa visibilité lors de mouvements de la main. Il s'agit de l'indice SVM de visibilité de l'effet stroboscopique a été introduit en 2014 et rapidement adopté dans la normalisation après 2015. Il manque cependant des études de validation de cet indice, notamment dans d'autres conditions expérimentales que le travail de bureau et le mouvement de la main.

Il n'existe actuellement pas de normes sur l'effet de réseau fantôme qui a néanmoins été décrit par la CIE et l'IEEE.

Certains indices ont été construits pour tenter d'agréger les effets visibles et les effets sanitaires de la modulation temporelle (indice NM de IEEE 1789, indice CFD de DerLichtPeter par exemple). Aucune étude n'a été menée pour valider ou invalider cette approche globale des phénomènes.

Les normes de sécurité et de performance des produits LED n'incluent à l'heure actuelle aucune limitation de la modulation temporelle de la lumière émise. De plus, les normes relatives aux dispositifs de contrôle-commande des lampes et luminaires ne garantissent pas la compatibilité et le bon fonctionnement de ces produits avec les systèmes à LED.

La seule norme qui émet des recommandations précises destinées à protéger la santé humaine est la norme américaine IEEE 1789 publiée en 2015. Les recommandations reposent sur une expertise sanitaire incluant des analyses de risques. Cependant, les valeurs limites de cette norme sont fortement contestées par l'industrie car elles lui paraissent trop exigeantes. Le GT confirme que la plupart des lampes à incandescence dépassent les limites recommandées par la norme IEEE 1789. De plus, les paramètres sur lesquels sont basées ces recommandations ne sont pas directement applicables aux modulations temporelles complexes : modulations irrégulières, rapports cycliques différents de 0.5, modulations transitoires. Le GT confirme cette critique mais souligne néanmoins que les paramètres utilisés dans la norme IEEE 1789 (fréquence et pourcentage de modulation) sont tout-à-fait applicables à la grande majorité des lampes et des luminaires à LED.

Il existe actuellement des lacunes dans les documents normatifs en ce qui concerne les mesures physiques de la modulation temporelle de la lumière. Les conditions de mesures ne sont pas toutes précisées, notamment en ce qui concerne la mesure de la forme d'onde. Il s'agit notamment des fréquences d'échantillonnage des signaux, de la bande passante des équipements, de la géométrie de la mesure, des paramètres et des méthodes utilisés pour effectuer l'analyse spectrale de la forme d'onde (décomposition en composantes fréquentielles de Fourier). L'application numérique des formules de calcul des différents indices mériterait également d'être mieux décrite dans les normes.

En ce qui concerne la réglementation européenne, aucun règlement ne fournit à l'heure actuelle de limitation de la modulation temporelle de la lumière des lampes et des luminaires.

La seule réglementation française concernant la modulation temporelle de l'éclairage général est l'Article R4223-8 du Code du Travail concernant les obligations de l'employeur à propos de l'éclairage des lieux de travail. Une disposition impose que les phénomènes de fluctuation de la lumière ne doivent pas être perceptibles ni provoquer d'effet stroboscopique. Aucun critère quantitatif n'est donné.

### 15.3 Concernant l'éblouissement

Les normes concernant l'éblouissement n'ont pas évolué depuis 2010. L'industrie de l'éclairage utilise les mêmes indices normatifs d'éblouissement définis par la commission internationale de l'éclairage (CIE). Ces indices sont l'UGR (Unified Glare rating) en éclairage intérieur, le TI (Threshold increment) et le GR (Glare rating) en éclairage extérieur. Les conditions d'application de ces indices ne sont pas toujours satisfaites pour les LED, notamment lorsqu'une lampe ou qu'un luminaire est composée d'un module LED de petite taille ou composée d'une matrice de LED. Dans le cas de l'éblouissement par des petites sources, l'indice  $UGR_{small}$  introduit par la CIE en 2002 n'est pas entré dans les normes et n'est pas utilisé par l'industrie, bien qu'il semble adapté à certains types de luminaires et lampes à LED. Le cas de l'éblouissement créé par des matrices de LED fait l'objet de travaux à la CIE depuis 2013 et n'a pas encore abouti à des recommandations.

La limitation de l'éblouissement est un des aspects fondamentaux de la conception des installations d'éclairage et a toujours figuré dans les normes d'éclairagisme. Les normes européennes d'éclairagisme concernent l'éclairage professionnel (lieux de travail, espaces publics, installation sportives). Les recommandations de limitation de l'éblouissement de ces normes sont toujours exprimées sur la base des indices UGR, TI et GR.

En France, la norme d'ergonomie visuelle (NF X 35-103), remise à jour en 2016, est très bien adaptée à l'éclairage des lieux de travail intérieurs par des LED. Les recommandations de limitation de l'éblouissement sont exprimées en termes de contrastes de luminance et prennent en compte de nombreux facteurs comme l'âge ou la tâche visuelle.

La seule réglementation française concernant l'éblouissement produit par l'éclairage général est l'article R4223-8 du Code du Travail concernant les obligations de l'employeur à propos de l'éclairage des lieux de travail. Une disposition impose de limiter l'éblouissement et la fatigue visuelle des travailleurs, provoqués par des surfaces à forte luminance ou par des rapports de luminance trop importants entre surfaces voisines. Il n'y a pas de critère quantitatif donné.

## 15.4 Concernant les effets non-visuels

Un effort important a été entrepris par les industriels de l'éclairage pour normaliser les recherches concernant le système de sensibilité non-visuelle de l'homme à la lumière, reposant sur l'excitation des cellules ganglionnaires à mélanopsine de la rétine. Ainsi, une courbe de sensibilité de ces cellules a été normalisée. Il s'agit de la courbe d'excitation mélanopique, ayant une forme en cloche avec un maximum à 490 nm (note technique de la CIE TN-003 : 2015).

Il n'y actuellement aucune réglementation portant sur les effets non visuels de la lumière sauf pour les lampes de luminothérapie qui sont couvertes par la réglementation relatives aux dispositifs médicaux. Or, la technologie LED a remplacé les sources fluorescentes dans les lampes utilisées en luminothérapie.

Au-delà de la luminothérapie, l'effort de normalisation des effets non-visuels de la lumière a été entrepris par l'industrie pour soutenir le développement commercial de nouvelles offres de produits d'éclairage général basés sur la variation de l'excitation mélanopique. Ces produits sont qualifiés d'éclairages « biodynamiques » en France, une traduction du terme anglais *human-centric lighting*.

La CIE a émis officiellement des réserves en 2015 (CIE statement on non visual effects of light) contre les revendications abusives de l'éclairage biodynamique (revendications sanitaires non fondées, efficacité et effets indésirables non évalués). Le corpus actuel de publications scientifiques, examinées au sein de la CIE et au sein de ce GT ne permet pas de valider à ce jour l'efficacité de l'approche biodynamique et d'apporter les bienfaits revendiqués par les industriels et les installateurs. En effet, les variables impliquées dans les mécanismes neuro-physiologiques liés à l'excitation lumineuse et à son influence sur les rythmes circadiens, les performances visuelles, le sommeil et d'autres fonctions métaboliques sont nombreuses, complexes, corrélées et dépendantes des individus. La CIE a souligné l'importance de paramètres tels que le moment de l'exposition, les doses, l'historique des expositions lumineuses antérieures, la phase de l'horloge biologique de l'individu, etc. Parmi les nombreux aspects qui sont à l'heure actuelle mal compris et font l'objet de recherches fondamentales, on peut notamment citer les couplages entre les photorécepteurs participant à la vision et les cellules ganglionnaires à mélanopsine.

## Annexe 3 : Eblouissement et inconfort visuel : notions supplémentaires en photométrie

### 1. Relation photométrique entre l'éclairement sur la rétine et la luminance du stimulus (Rappel)

Pour l'œil, la grandeur à prendre en compte est l'éclairement direct  $E$  ( $\text{lm}/\text{m}^2$ ) sur la rétine, qui est proportionnel à la luminance  $L$  ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) du stimulus, à la surface de la pupille  $S$  ( $\text{mm}^2$ ) de la pupille et à la transmission  $\tau$  des milieux oculaires.

$$E = 0.0036LS\tau$$

### 2. Luminance et luminosité

La luminance et la luminosité sont deux termes n'appartenant pas au même domaine lexical.

La luminance est une grandeur photométrique, obtenue par le calcul, en effectuant l'intégrale du produit de la répartition spectrale d'énergie de la lumière par la fonction d'efficacité lumineuse spectrale de l'observateur photométrique de référence. Par définition, la luminance est une grandeur additive. Certes, la luminance tient compte de la réponse de l'œil à la lumière, car elle a été mesurée dans des conditions de laboratoire précises où des observateurs avaient été invités à évaluer l'effet de chaque radiation du spectre visible et où il avait été vérifié que les réponses de chaque observateur étaient bien additives. Mais, depuis que la fonction d'efficacité lumineuse  $V(\lambda)$  a été figée par la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) en 1924, la luminance est une grandeur photométrique obtenue par le calcul.

Or, l'impression lumineuse perçue par un observateur peut ne pas être fidèlement traduite par la luminance. Il en est ainsi lorsque le système visuel ne fournit pas une réponse additive procédant de l'addition simple des signaux des cônes mais reçoit une information plus complète. C'est le cas pour la vision d'une source étendue, fixe et/ou colorée. Dans de tels cas, on fait appel à la notion de luminosité, qui s'applique à la sensation lumineuse ressentie par un observateur réel. La luminosité n'est pas une grandeur additive. Bien qu'étant une grandeur subjective, la luminosité peut être évaluée sérieusement par un observateur en employant des méthodes psychophysiques, essentiellement fondées sur des comparaisons visuelles pour lesquelles l'humain est performant.

La luminosité permet donc d'évaluer le confort, l'éblouissement...

### 3. Le modèle de photométrie mésopique

Outre les grandeurs photométriques pour la vision photopique et pour la vision scotopique, la Commission internationale de l'Eclairage (CIE, 2010) a développé un modèle de photométrie mésopique pour tenir compte du fonctionnement simultané des cônes et des bâtonnets en vision mésopique. Le domaine mésopique adopté s'étend de 0.005 à 5  $\text{cd}/\text{m}^2$ . Le modèle tient compte de deux facteurs, la luminance (photopique) du fond d'adaptation  $L$  et le rapport entre la sensibilité spectrale de l'œil de jour et de nuit  $S/P$ . De ces deux facteurs, on déduit un coefficient de pondération  $m$  entre l'efficacité lumineuse relative spectrale photopique  $V(\lambda)$  et l'efficacité lumineuse relative spectrale scotopique  $V'(\lambda)$ . Les tables donnant les valeurs du coefficient  $m$  sont disponibles.



Les tables servent à modéliser la fonction d'efficacité lumineuse mésopique applicable à la performance visuelle.

$$M(m)V_{mes}(\lambda) = mV(\lambda) + (1 - m)V'(\lambda)$$

$M(m)$  est un coefficient de normalisation de la fonction  $V_{mes}(\lambda)$  à l'unité.

La valeur de la luminance mésopique  $L_{mes}$  est obtenue selon le mode habituel

$$L_{mes} = \frac{683}{V_{mes}(\lambda_0)} \int V_{mes}(\lambda)L_e(\lambda)d\lambda$$

Pour se faire une idée de l'apport de ce modèle de photométrie, on peut se référer directement au tableau suivant, où les LED, surtout les LED blanc froid sont qualifiées plus lumineuses par le modèle de photométrie mésopique que par la photométrie photopique.

**Tableau 8 : différence entre les luminances mésopiques et photopique en pourcentage calculées avec le système mésopique recommandé pour différentes sources lumineuses (LPS : lampe sodium basse pression, HPS : lampe sodium haute pression, MH : Lampe aux halogénures métalliques, LED)**

		Photopic luminance / $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$										
		S/P	0,01	0,03	0,1	0,3	0,5	1	1,5	2	3	5
LPS ~	0,25	-75%	-52%	-29%	-18%	-14%	-9%	-6%	-5%	-2%	0%	
	0,45	-55%	-34%	-21%	-13%	-10%	-6%	-4%	-3%	-2%	0%	
HPS ~	0,65	-31%	-20%	-13%	-8%	-6%	-4%	-3%	-2%	-1%	0%	
	0,85	-12%	-8%	-5%	-3%	-3%	-2%	-1%	-1%	0%	0%	
MH warm white ~	1,05	4%	3%	2%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	
	1,25	18%	13%	8%	5%	4%	3%	2%	1%	1%	0%	
	1,45	32%	22%	15%	9%	7%	5%	3%	3%	1%	0%	
LED cool white ~	1,65	45%	32%	21%	13%	10%	7%	5%	4%	2%	0%	
	1,85	57%	40%	27%	17%	13%	9%	6%	5%	3%	0%	
	2,05	69%	49%	32%	21%	16%	11%	8%	6%	3%	0%	
MH daylight ~	2,25	80%	57%	38%	24%	19%	12%	9%	7%	4%	0%	
	2,45	91%	65%	43%	28%	22%	14%	10%	8%	4%	0%	
	2,65	101%	73%	49%	31%	24%	16%	12%	9%	5%	0%	

#### 4. Echelles d'éblouissement inconfortable

Le degré d'éblouissement inconfortable est évalué sur une échelle subjective. La plus courante est l'échelle de de Boer, comprenant 9 échelons : 1 = Unbearable ou insupportable, 3 = Disturbing, 5 = Just permissible, 7 = Satisfactory, 9 = Just noticeable ou négligeable (ASSIST, 2011). Les sujets réussissent assez bien à se situer, mais il peut être utile de diminuer le nombre d'échelons, d'inclure une notation 0 = absence d'éblouissement, ou de proposer un nombre pair de notes pour éviter un choix moyen (Fotios, 2015). Dans tous les cas, il convient d'assortir une définition verbale à chaque échelon.

Citons aussi l'indice  $GR$  spécifique aux terrains de sport prend en compte la luminance de voile d'un luminaire ponctuel et de l'environnement, compris entre 10 et 90 (Tashiro *et al.*, 2015).

**Tableau 9 : tableau comparatif des indices d'éblouissement inconfortable les plus usités. (Carlucci et al., 2015)**

Degree of glare sensation	BGI	VCP	CGI	DGI	UGR
Intolerable	31	12	34	30	34
Just intolerable	28	20	31	28	31
Uncomfortable	25	28	28	26	28
Just uncomfortable	22	36	25	24	25
Unacceptable	19	43	22	22	22
Just acceptable	16	50	19	20	19
Perceptible	13	59	16	18	16
Just perceptible	10	67	13	16	13
Imperceptible	7	75	10	14	10



## Annexe 4 : Les données d'exposition issues du logiciel Lumexpo

### 1. Définition de scénarios d'exposition

Le groupe de travail a listé un nombre important de scénarios d'exposition à la lumière qu'il serait pertinent de documenter. L'idée de produire un logiciel (logiciel Lumexpo) permettant d'évaluer l'exposition lumineuse sur une année, une saison ou une journée est apparue. Le groupe de travail voulait questionner l'existence ou non de différences d'exposition selon la nature de l'éclairage artificiel (halogène, fluocompacte ou éclairage à LED). Pour cela, 5 scénarios ont été priorisés :

- un scénario pour des employés de bureau ;
- un scénario pour des travailleurs de nuit ;
- un scénario pour des enfants en maternelle ;
- un scénario pour adolescents ;
- un scénario pour des personnes âgées.

Ces populations ont été choisies car elle représente soit des populations sensibles pour ce qui concerne leur exposition à la lumière bleue (enfant, adolescent, personnes âgées, travailleurs de nuit) soit parce qu'elle concerne une grande partie de la population (employés de bureau). Le logiciel Lumexpo peut être exploité pour un nombre infini de scénario d'exposition en injectant dans l'outil des situations d'exposition réelles.

### 2. Présentation du logiciel Lumexpo

#### Introduction

Le niveau d'exposition à la lumière varie naturellement au cours de la journée et de l'année en fonction des activités pratiquées, des environnements dans lequel se trouve un individu et des sources artificielles utilisées. Les mesurages réalisés dans divers environnements (maison individuelle, bureau, école, transports, ...) ne sont donc pas suffisants pour quantifier l'exposition annuelle global d'un individu ni pour étudier l'évolution de ce niveau d'exposition au cours d'une journée moyenne. Une évaluation réaliste de l'exposition doit donc intégrer un scénario d'exposition prenant également en compte les apports directs et indirects de l'éclairage naturel.

Un logiciel spécifique a donc été développé afin de réaliser ces bilans d'expositions. Sur la base d'un ensemble d'éléments décrivant les situations dans lesquelles évoluent des sujets types, cet outil recompose alors l'évolution de l'exposition globale à la lumière. Chaque scénario est construit à partir de la description des éléments suivants :

- un calendrier annuel
- des journées types
- des situations (travail de bureau, lecture, ...)

- des environnements (domicile, bureau, extérieur, ...)
- des sources artificielles.

En parcourant simplement toutes les situations d'une année type d'une manière chronologique, ce logiciel détermine les conditions d'expositions à chaque instant et permet la réalisation d'analyses diverses (exposition globale, évolution temporelle, étude spectrale ou sur la base d'indicateurs plus agrégés).

### **Mode de fonctionnement**

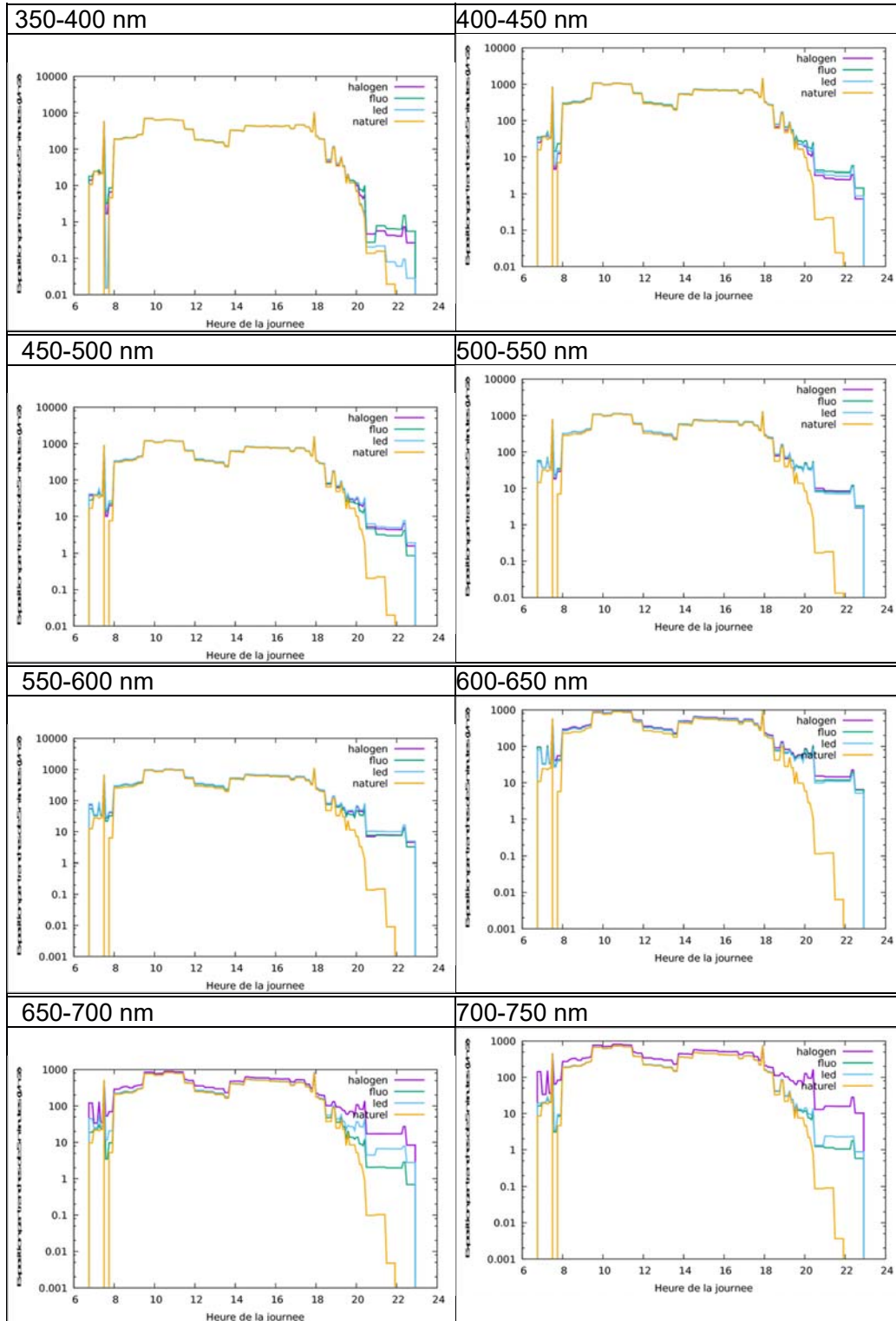
Le logiciel LumExpo fonctionne essentiellement comme un séquenceur faisant défiler les situations de manière chronologique selon le calendrier saisi. Pour chaque instant de la journée, il traduit donc les situations rencontrées sous la forme de périodes d'expositions à quelques sources artificielles (décrites pour trois types de technologie) et à l'éclairage naturel.

Les conditions d'expositions à la lumière artificielle sont donc totalement décrites par l'utilisateur mais le niveau d'exposition à la lumière naturelle dépend, à chaque instant, du type de local dans lequel se déroule chaque situation, de son orientation et de la ville dans laquelle il est placé.

Pour l'évaluation des niveaux d'exposition à la lumière naturelle, LumExpo exploite le principe d'un ciel paramétrique (couramment utilisé maintenant en simulation d'éclairage (Martinez 2011)) et de précalculs réalisés sur divers locaux types. Cette approche permet de dissocier la disponibilité de la lumière du jour dans un local, des conditions climatiques du site étudié. Une décomposition du ciel en 2000 zones permet une modélisation fine de la contribution du ciel et du soleil.



périodes de l'année. Chaque graphe présente alors les niveaux associés à quatre variantes (l'éclairage naturel seul et l'éclairage naturel complété par 3 types d'éclairage artificiel)



### Figure 17 : graphes comparant les résultats pour les différents éclairages et pour différentes bandes spectrales

Les niveaux d'expositions sont également analysés en tenant compte de plusieurs sensibilités spectrales afin d'évaluer :

- la dose **lumineuse**, exprimée en lx.h, elle est associée au niveau d'éclairage moyen,
- la dose dans la bande **phototoxique**, exprimée en mJ / cm<sup>2</sup>, caractérise le risque à la "lumière bleue",
- la dose dans la bande **mélanopique**, exprimée en z-lx.h, elle intervient dans la régulation du rythme chronobiologique,
- le **ratio bleu/rouge**, sans unité, caractérise l'équilibre spectral entre deux bandes du domaine visible, centrées respectivement sur 490 nm et 670 nm.

Ces doses sont déterminées à partir des distributions spectrales présentées dans la Figure 18. le **ratio bleu/rouge** exprime le rapport entre la dose mélanopique et celle associée à la courbe de sensibilité nommée "ratio rouge".

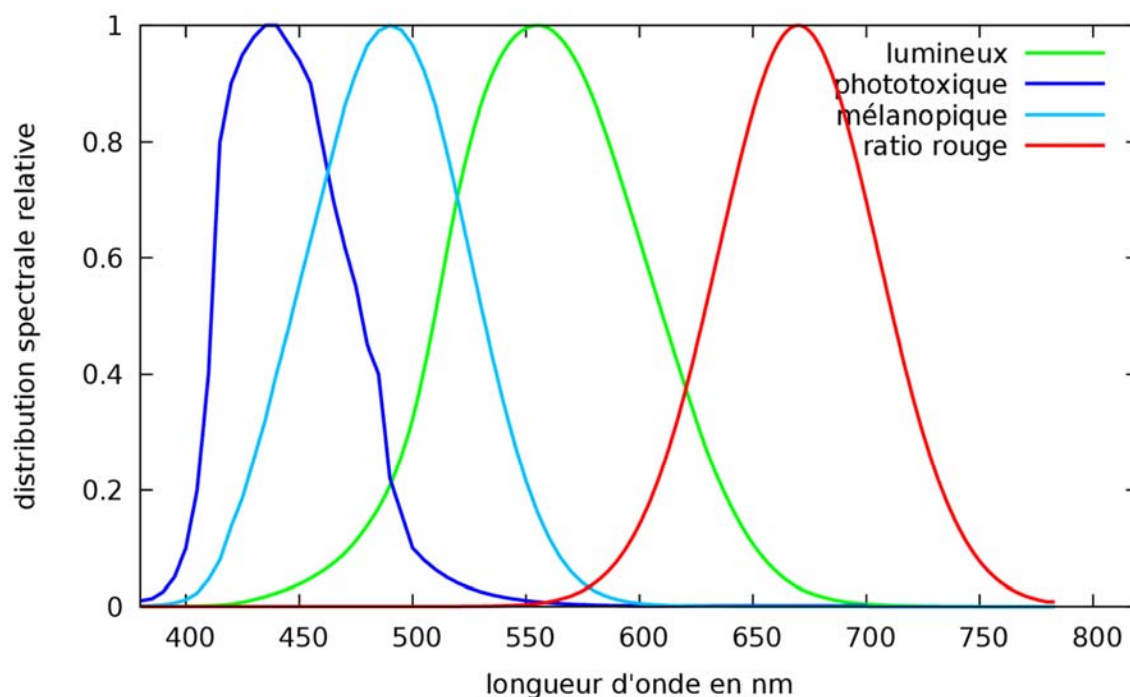


Figure 18 : courbes spectrales pour la bande phototoxique, la bande mélanopique, la bande visible et la bande de couleur rouge

Les analyses ont également porté sur les niveaux d'exposition moyens journaliers sur la cornée et sur la rétine, pour chaque saison ainsi que pour l'année entière. Une synthèse des résultats concernant l'éclairage rétinien est disponible en Annexe 4.

Les indicateurs présentés sont déterminés sur la zone la plus éclairée de la rétine pour quatre types de technologie d'éclairage artificiel sauf pour les indicateurs liés à la bande mélanopique (où l'éclairage moyen sur la rétine est utilisé). La part d'exposition liée à l'éclairage naturel, est présentée dans une cinquième colonne. On retrouve alors les niveaux d'expositions pour les configurations suivantes :

- la contribution de l'éclairage artificiel pour une installation exploitant majoritairement des lampes halogènes ;
- la contribution de l'éclairage artificiel pour une installation exploitant majoritairement des lampes fluorescentes ;
- la contribution de l'éclairage artificiel pour une installation exploitant majoritairement des lampes à LED ;
- la contribution de l'éclairage artificiel pour une installation « pire cas » exploitant majoritairement des lampes à LED très froides ;
- la part de l'éclairage naturel dans le scénario.

Pour chaque configuration, une cartographie présente la distribution spatiale de l'éclairage sur la rétine. Pour une meilleure lisibilité, cette cartographie n'est pas inversée (haut/bas) : les sources les plus importantes étant généralement placée dans la partie supérieure du champs visuel.

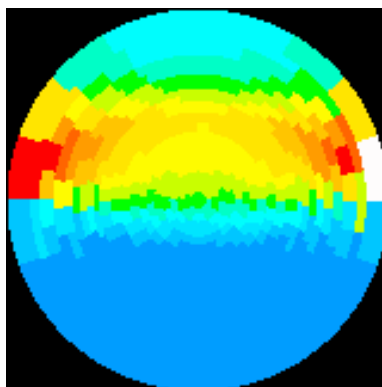


Figure 19 : exemple de cartographie de l'exposition sur la rétine

Pour chaque scénario analysé, les installations d'éclairage artificiel sont décrites sur la base des mesures réalisées sur sites (maison individuelle, bureau, transport, ...) et font référence à des sources disponibles sur le marché.

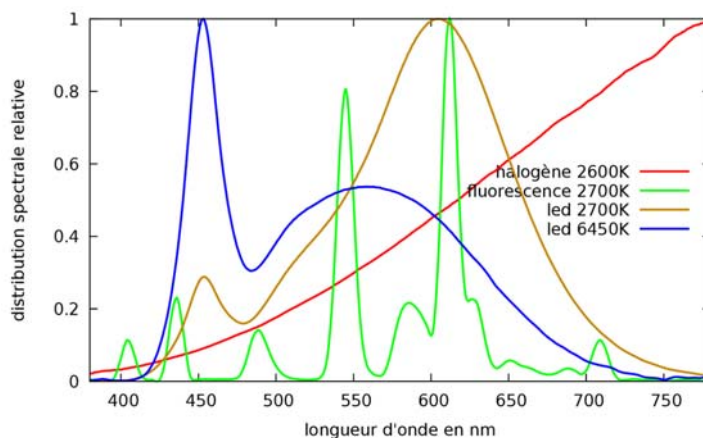


Figure 20 : spectres de sources lumineuses

### 3. Résultat du scénario « employé de bureau »

#### 3.1 Présentation du scénario

Le scénario de l'employé de bureau différencie plusieurs périodes de la semaine de travail afin d'intégrer des activités de loisirs diverses, il intègre des semaines de congés (sur la côte d'azur, en normandie) ainsi que des variantes pour la fin de semaine (ensoleillé, pluvieux, courses). Voici à quoi correspond une journée du lundi :

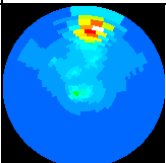
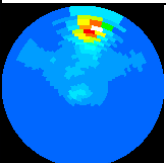
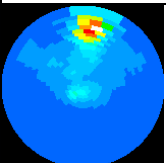
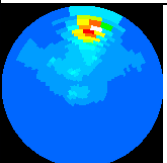
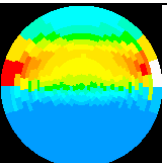
**Tableau 10 : scénario considéré pour un employé de bureau**

Heure début	Situation	Environnement	Couleur halogène	Couleur fluorescence	Couleur LED	Couleur LED froide
(00:00:00)	sommeil	black room	-	-	-	-
(06:45:00)	bain	sdb	2600 K	2750 K	3100 K	6400 K
(07:00:00)	petit dej	cuisine	2600 K	2750 K	2950 K	6400 K
(07:15:00)	brossage dents	sdb	2600 K	2750 K	3100 K	6400 K
(07:20:00)	habillage	chambre enfant	2600 K	2750 K	3100 K	6400 K
(07:30:00)	trajet à pied	extérieur	-	-	-	-
(07:35:00)	trajet métro	black room	2600 K	3850 K	3800 K	6400 K
(08:00:00)	travail de bureau	bureau	2600 K	3850 K	3850 K	6400 K
(12:30:00)	dejeuner entreprise	restaurant	2600 K	3850 K	3900 K	6400 K
(14:00:00)	travail de bureau	bureau	2600 K	3850 K	3850 K	6400 K
(17:30:00)	trajet métro	black room	2600 K	3850 K	3800 K	6400 K
(17:55:00)	trajet à pied	exterieur	-	-	-	-
(18:00:00)	activité sportive	gymnase	2600 K	5850 K	6000 K	6400 K
(19:15:00)	trajet à pied	extérieur	-	-	-	-
(19:20:00)	trajet métro	black room	2600 K	3850 K	3800 K	6400 K
(19:35:00)	trajet à pied	extérieur	-	-	-	-
(19:40:00)	bain	sdb	2600 K	2750 K	3100 K	6400 K
(19:55:00)	activités domestiques	cuisine	2600 K	2750 K	2950 K	6400 K
(20:30:00)	repas famille	salon	2600 K	2900 K	2950 K	6400 K
(21:00:00)	télévision	salon	4400 K	5700 K	7550 K	7550 K
(22:30:00)	lecture chambre	chambre enfant	2600 K	2750 K	3100 K	6400 K
(23:00:00)	sommeil	black room	-	-	-	-

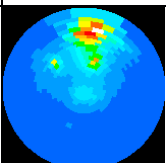
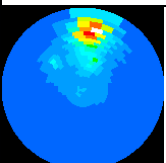
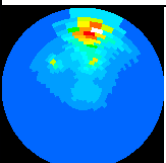
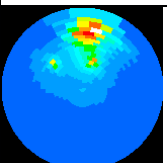
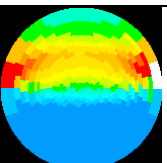


### 3.2 Dans le plan rétinien, en hiver

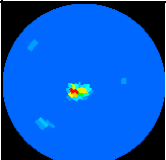
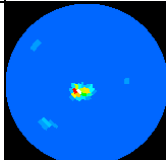
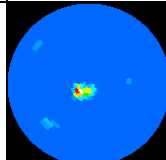
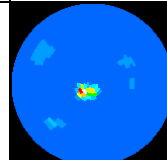
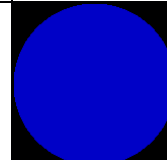
Tableau 11 : résultats dans le plan rétinien en hiver

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	164 lx.h				128 lx.h
dose phototoxique	15 mJ / cm <sup>2</sup>	31 mJ / cm <sup>2</sup>	26 mJ / cm <sup>2</sup>	49 mJ / cm <sup>2</sup>	53 mJ / cm <sup>2</sup>
dose mélanopique'	141 z-lx.h	122 z-lx.h	138 z-lx.h	163 z-lx.h	154 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.53	1.77	2.04	2.81	1.60
cartographie					

#### Bilan moyen journalier

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	19 lx.h				11 lx.h
dose phototoxique	1 mJ / cm <sup>2</sup>	3 mJ / cm <sup>2</sup>	3 mJ / cm <sup>2</sup>	5 mJ / cm <sup>2</sup>	4 mJ / cm <sup>2</sup>
dose mélanopique'	15 z-lx.h	13 z-lx.h	15 z-lx.h	19 z-lx.h	13 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.45	1.76	1.70	2.73	1.69
cartographie					

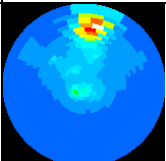
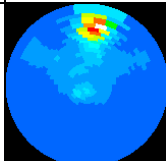
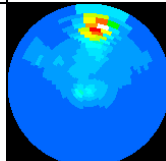
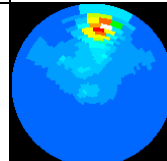
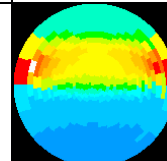
#### Bilan moyen 2 heures après le lever

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	12 lx.h				0 mlx.h
dose phototoxique	3 mJ / cm <sup>2</sup>	3 mJ / cm <sup>2</sup>	4 mJ / cm <sup>2</sup>	4 mJ / cm <sup>2</sup>	0 mJ / cm <sup>2</sup>
dose mélanopique'	12 z-lx.h	10 z-lx.h	11 z-lx.h	12 z-lx.h	0 mz-lx.h
ratio bleu/rouge	0.68	1.83	2.80	2.93	0.00
cartographie					

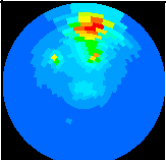
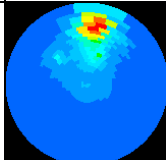
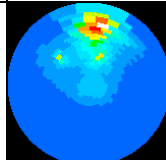
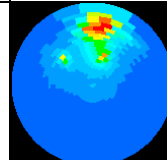
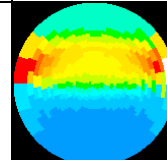
*Bilan moyen 2 heures avant le coucher*

### 3.2 Dans le plan rétinien, au printemps

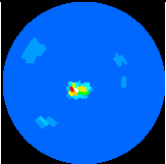
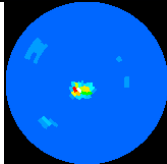
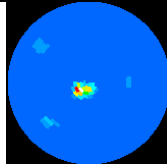
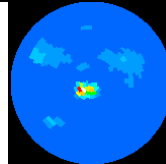
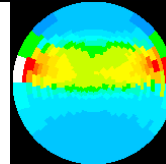
**Tableau 12 : résultats dans le plan rétinien au printemps**

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	163 lx.h				204 lx.h
dose phototoxique	14 mJ / cm <sup>2</sup>	30 mJ / cm <sup>2</sup>	26 mJ / cm <sup>2</sup>	49 mJ / cm <sup>2</sup>	78 mJ / cm <sup>2</sup>
dose mélanopique'	139 z-lx.h	121 z-lx.h	136 z-lx.h	161 z-lx.h	234 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.53	1.78	2.02	2.80	1.44
cartographie					

*Bilan moyen journalier*

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	18 lx.h				21 lx.h
dose phototoxique	1 mJ / cm <sup>2</sup>	3 mJ / cm <sup>2</sup>	2 mJ / cm <sup>2</sup>	5 mJ / cm <sup>2</sup>	8 mJ / cm <sup>2</sup>
dose mélanopique'	14 z-lx.h	12 z-lx.h	15 z-lx.h	18 z-lx.h	25 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.45	1.76	1.71	2.73	1.52
cartographie					

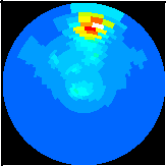
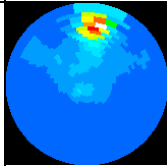
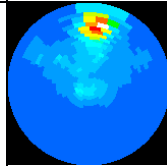
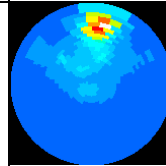
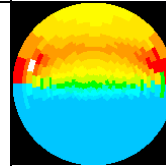
*Bilan moyen 2 heures après le lever*

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	11 lx.h				355 mlx.h
dose phototoxique	2 mJ / cm <sup>2</sup>	3 mJ / cm <sup>2</sup>	3 mJ / cm <sup>2</sup>	4 mJ / cm <sup>2</sup>	0 mJ / cm <sup>2</sup>
dose mélanopique'	11 z-lx.h	9.4 z-lx.h	10 z-lx.h	11 z-lx.h	417 mz-lx.h
ratio bleu/rouge	0.67	1.82	2.71	2.92	1.58
cartographie					

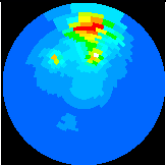
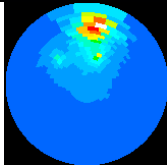
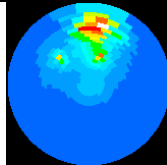
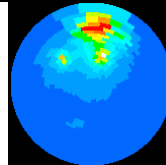
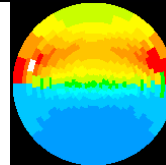
*Bilan moyen 2 heures avant le coucher*

### 3.3 Dans le plan rétinien, en été

**Tableau 13 : résultats dans le plan rétinien en été**

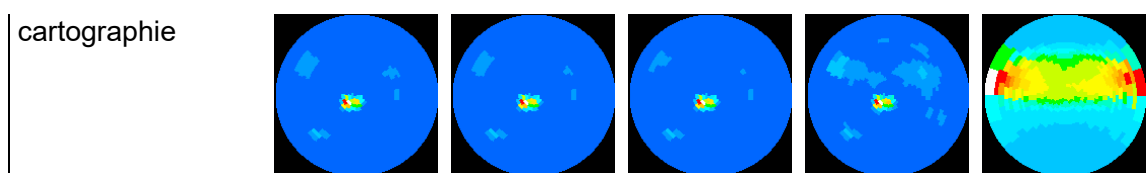
Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	120 lx.h				413 lx.h
dose phototoxique	11 mJ / cm <sup>2</sup>	22 mJ / cm <sup>2</sup>	19 mJ / cm <sup>2</sup>	36 mJ / cm <sup>2</sup>	155 mJ / cm <sup>2</sup>
dose mélanopique'	101 z-lx.h	88 z-lx.h	99 z-lx.h	119 z-lx.h	468 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.51	1.77	1.94	2.79	1.43
cartographie					

*Bilan moyen journalier*

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	13 lx.h				58 lx.h
dose phototoxique	1 mJ / cm <sup>2</sup>	2 mJ / cm <sup>2</sup>	2 mJ / cm <sup>2</sup>	4 mJ / cm <sup>2</sup>	23 mJ / cm <sup>2</sup>
dose mélanopique'	10 z-lx.h	9.0 z-lx.h	10 z-lx.h	13 z-lx.h	68 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.42	1.75	1.53	2.73	1.48
cartographie					

*Bilan moyen 2 heures après le lever*

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	7.4 lx.h				5.9 lx.h
dose phototoxique	1 mJ / cm <sup>2</sup>	1 mJ / cm <sup>2</sup>	2 mJ / cm <sup>2</sup>	2 mJ / cm <sup>2</sup>	2 mJ / cm <sup>2</sup>
dose mélanopique'	7.3 z-lx.h	6.0 z-lx.h	6.8 z-lx.h	7.3 z-lx.h	7.2 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.67	1.81	2.67	2.92	1.69



*Bilan moyen 2 heures avant le coucher*

### 3.4 Dans le plan rétinien, en automne

**Tableau 14 : résultats dans le plan rétinien en automne**

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	141 lx.h				312 lx.h
dose phototoxique	12 mJ / cm <sup>2</sup>	26 mJ / cm <sup>2</sup>	22 mJ / cm <sup>2</sup>	42 mJ / cm <sup>2</sup>	122 mJ / cm <sup>2</sup>
dose mélanopique'	121 z-lx.h	105 z-lx.h	118 z-lx.h	140 z-lx.h	361 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.53	1.78	2.04	2.81	1.48
cartographie					

*Bilan moyen journalier*

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	16 lx.h				28 lx.h
dose phototoxique	1 mJ / cm <sup>2</sup>	3 mJ / cm <sup>2</sup>	2 mJ / cm <sup>2</sup>	5 mJ / cm <sup>2</sup>	12 mJ / cm <sup>2</sup>
dose mélanopique'	12 z-lx.h	11 z-lx.h	12 z-lx.h	16 z-lx.h	35 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.44	1.75	1.59	2.73	1.65
cartographie					

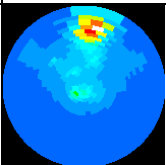
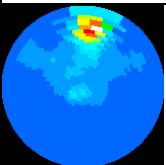
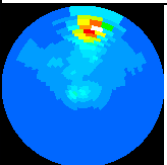
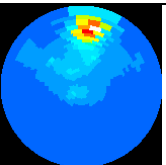
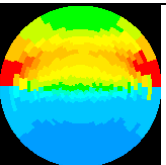
*Bilan moyen 2 heures après le lever*

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	11 lx.h				787 mlx.h
dose phototoxique	2 mJ / cm <sup>2</sup>	3 mJ / cm <sup>2</sup>	3 mJ / cm <sup>2</sup>	4 mJ / cm <sup>2</sup>	0 mJ / cm <sup>2</sup>
dose mélanopique'	11 z-lx.h	9.4 z-lx.h	10 z-lx.h	11 z-lx.h	957 mz-lx.h
ratio bleu/rouge	0.67	1.82	2.73	2.92	1.66
cartographie					

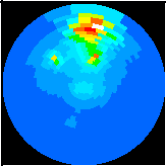
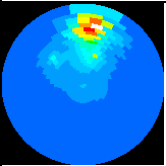
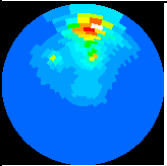
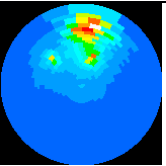
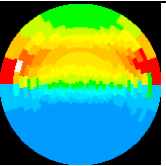
*Bilan moyen 2 heures avant le coucher*

### 3.5 Dans le plan rétinien, année complète

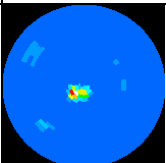
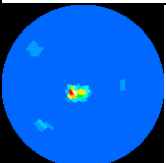
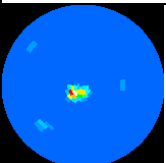
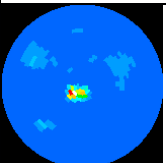
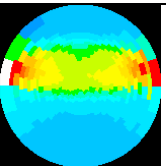
Tableau 15 : résultats dans le plan rétinien pour une année complète

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	147 lx.h				264 lx.h
dose phototoxique	13 mJ / cm <sup>2</sup>	27 mJ / cm <sup>2</sup>	23 mJ / cm <sup>2</sup>	44 mJ / cm <sup>2</sup>	102 mJ / cm <sup>2</sup>
dose mélanopique'	126 z-lx.h	109 z-lx.h	123 z-lx.h	146 z-lx.h	305 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.53	1.78	2.02	2.80	1.47
cartographie					

#### Bilan moyen journalier

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	17 lx.h				30 lx.h
dose phototoxique	1 mJ / cm <sup>2</sup>	3 mJ / cm <sup>2</sup>	2 mJ / cm <sup>2</sup>	5 mJ / cm <sup>2</sup>	12 mJ / cm <sup>2</sup>
dose mélanopique'	12 z-lx.h	11 z-lx.h	13 z-lx.h	16 z-lx.h	35 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.44	1.76	1.60	2.73	1.55
cartographie					

#### Bilan moyen 2 heures après le lever

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	10 lx.h				1.76 lx.h
dose phototoxique	2 mJ / cm <sup>2</sup>	2 mJ / cm <sup>2</sup>	3 mJ / cm <sup>2</sup>	3 mJ / cm <sup>2</sup>	0 mJ / cm <sup>2</sup>
dose mélanopique'	10 z-lx.h	8.8 z-lx.h	10.0 z-lx.h	10 z-lx.h	2.2 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.67	1.82	2.73	2.92	1.68
cartographie					

#### Bilan moyen 2 heures avant le coucher

### 3.6 Conclusion

L'exposition rétinienne aux sources artificielles est loin d'être négligeable : pour une installation en LED, la dose phototoxique est proche de la moitié de la dose phototoxique naturelle en hiver, proche de 13 % en été et proche de 22 % sur l'année complète.

Ces niveaux d'expositions sont environ deux fois plus élevés dans le scénario « pire cas », exploitant des LEDs très froides.

Comme l'illustrent les cartographies, l'exposition aux sources artificielles est principalement liée aux luminaires des bureaux et aux écrans d'ordinateurs. Si la différence est assez faible entre la version LED « réaliste » et la version fluorescence, la version LED très froide conduit à des niveaux beaucoup plus importants.

Le soir, les écrans (télévision, téléphone) constituent la source d'exposition la plus élevée.

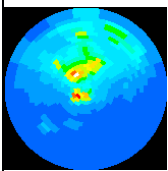
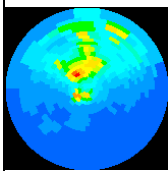
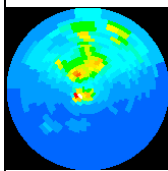
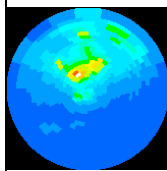
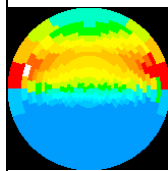
## 4. Résultat du scénario « travailleur de nuit »

### 4.1 Présentation du scénario

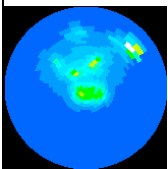
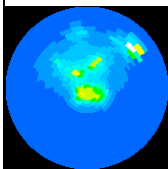
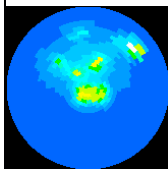
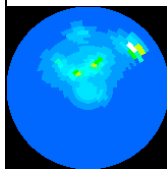
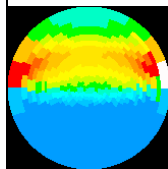
Ce scénario se différencie du précédent par la période d'activité durant la semaine. Réalisé de nuit (entre minuit et 8 heures du matin avec environ 1 heure de pause), cette personne n'a pas d'accès à la lumière du jour. Durant sa période de travail, l'éclairage est principalement assuré par des sources dont la température de couleur est proche de 4000 K pour les configurations « fluorescence » et « LED ». Les périodes de weekend et de congés sont inchangées.

### 4.2 Dans le plan rétinien, en hiver

Tableau 16 : résultats dans le plan rétinien en hiver

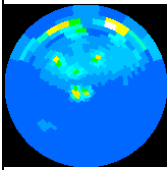
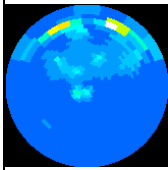
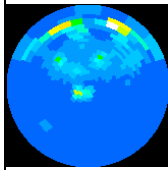
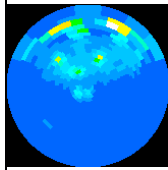
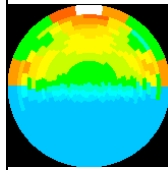
Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	(pire) naturel (seul)
dose lumineuse	68 lx.h				89 lx.h
dose phototoxique	6 mJ/cm	8 mJ/cm	8 mJ/cm	20 mJ/cm	38 mJ/cm
dose mélanopique	57 z-lx.h	48 z-lx.h	55 z-lx.h	67 z-lx.h	108 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.52	1.81	1.91	2.85	1.63
cartographie					

#### Bilan moyen journalier

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	(pire) naturel (seul)
dose lumineuse	13 lx.h				11 lx.h
dose phototoxique	1 mJ/cm	1 mJ/cm	1 mJ/cm	4 mJ/cm	5 mJ/cm
dose mélanopique	11 z-lx.h	9.4 z-lx.h	10 z-lx.h	13 z-lx.h	14 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.52	1.55	1.66	2.73	1.68
cartographie					

#### Bilan moyen 2 heures après le lever

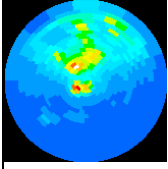
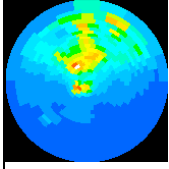
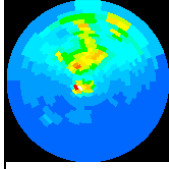
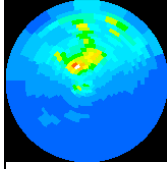
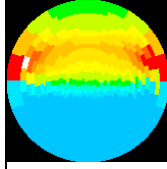


Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	20 lx.h				856 mlx.h
dose phototoxique	1 mJ/cm	3 mJ/cm	3 mJ/cm	6 mJ/cm	0 mJ/cm
dose mélanopique	18 z-lx.h	15 z-lx.h	17 z-lx.h	20 z-lx.h	1.05 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.58	1.91	2.20	2.89	1.71
cartographie					

*Bilan moyen 2 heures avant le coucher*

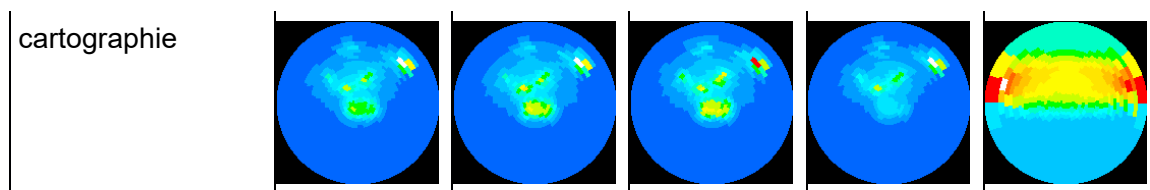
### 4.3 Dans le plan rétinien, au printemps

Tableau 17 : résultats dans le plan rétinien au printemps

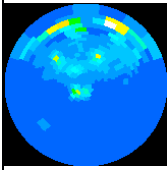
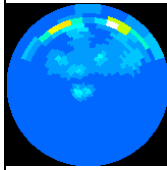
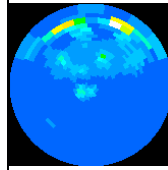
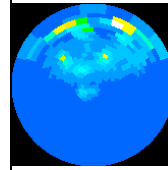
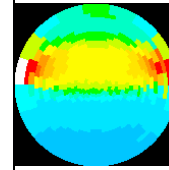
Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	63 lx.h				127 lx.h
dose phototoxique	5 mJ/cm	7 mJ/cm	8 mJ/cm	19 mJ/cm	48 mJ/cm
dose mélanopique	53 z-lx.h	45 z-lx.h	51 z-lx.h	62 z-lx.h	146 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.52	1.84	1.93	2.85	1.44
cartographie					

*Bilan moyen journalier*

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	10 lx.h				24 lx.h
dose phototoxique	0 mJ/cm	0 mJ/cm	1 mJ/cm	3 mJ/cm	9 mJ/cm
dose mélanopique	9.0 z-lx.h	7.4 z-lx.h	8.5 z-lx.h	10 z-lx.h	28 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.51	1.55	1.64	2.73	1.48



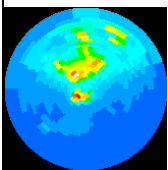
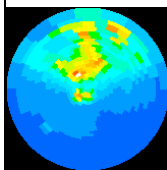
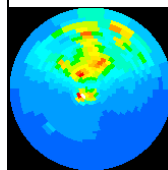
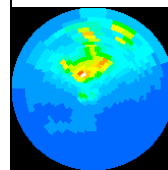
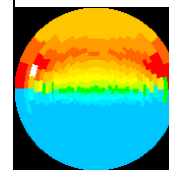
*Bilan moyen 2 heures après le lever*

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	22 lx.h				13 lx.h
dose phototoxique	2 mJ/cm	3 mJ/cm	3 mJ/cm	6 mJ/cm	5 mJ/cm
dose mélanopique	20 z-lx.h	16 z-lx.h	19 z-lx.h	22 z-lx.h	16 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.57	1.92	2.15	2.88	1.61
cartographie					

*Bilan moyen 2 heures avant le coucher*

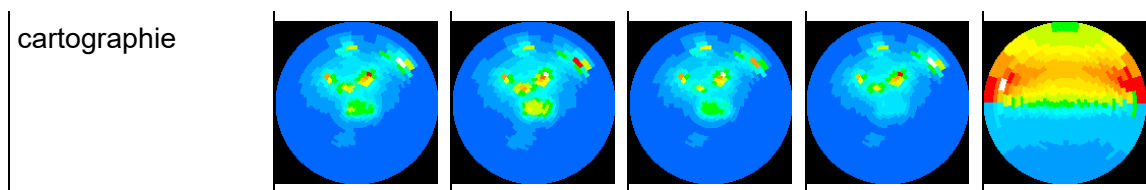
#### 4.4 Dans le plan rétinien, en été

Tableau 18 : résultats dans le plan rétinien en été

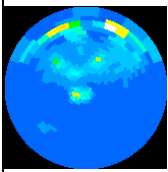
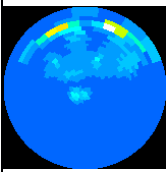
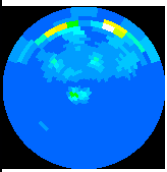
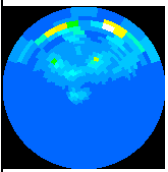
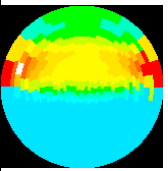
Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	46 lx.h				336 lx.h
dose phototoxique	4 mJ/cm	5 mJ/cm	5 mJ/cm	13 mJ/cm	126 mJ/cm
dose mélanopique	38 z-lx.h	33 z-lx.h	37 z-lx.h	46 z-lx.h	382 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.51	1.84	1.90	2.85	1.43
cartographie					

*Bilan moyen journalier*

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	6.2 lx.h				61 lx.h
dose phototoxique	0 mJ/cm	0 mJ/cm	0 mJ/cm	1 mJ/cm	23 mJ/cm
dose mélanopique	5.0 z-lx.h	4.1 z-lx.h	4.7 z-lx.h	6.2 z-lx.h	69 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.48	1.49	1.53	2.73	1.43



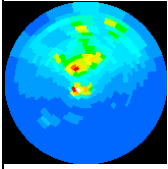
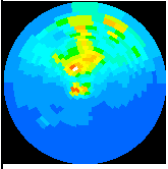
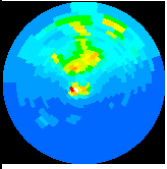
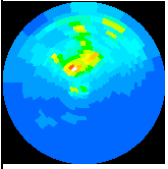
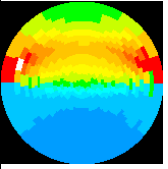
Bilan moyen 2 heures après le lever

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (cas)	(pire naturel (seul))
dose lumineuse	17 lx.h				22 lx.h
dose phototoxique	1 mJ/cm	3 mJ/cm	3 mJ/cm	5 mJ/cm	9 mJ/cm
dose mélanopique	16 z-lx.h	13 z-lx.h	15 z-lx.h	17 z-lx.h	26 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.59	1.92	2.24	2.89	1.55
cartographie					

Bilan moyen 2 heures avant le coucher

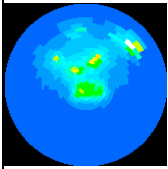
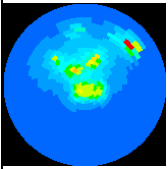
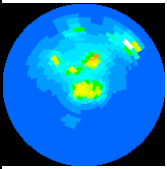
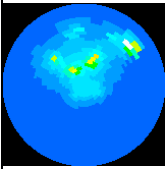
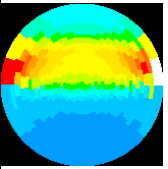
### 4.5 Dans le plan rétinien, en automne

Tableau 19 : résultats dans le plan rétinien en automne

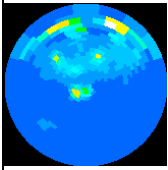
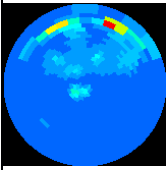
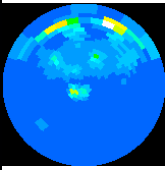
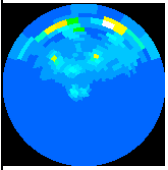
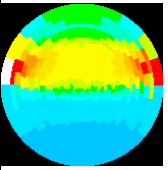
Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (cas)	(pire naturel (seul))
dose lumineuse	56 lx.h				229 lx.h
dose phototoxique	5 mJ/cm	6 mJ/cm	7 mJ/cm	17 mJ/cm	90 mJ/cm
dose mélanopique	48 z-lx.h	41 z-lx.h	46 z-lx.h	56 z-lx.h	267 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.53	1.84	1.97	2.86	1.50
cartographie					

Bilan moyen journalier

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (cas)	(pire naturel (seul))

dose lumineuse	8.1 lx.h				36 lx.h
dose phototoxique	0 mJ/cm	0 mJ/cm	0 mJ/cm	2 mJ/cm	15 mJ/cm
dose mélanopique	6.6 z-lx.h	5.4 z-lx.h	6.2 z-lx.h	8.0 z-lx.h	43 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.50	1.52	1.58	2.73	1.58
cartographie					

*Bilan moyen 2 heures après le lever*

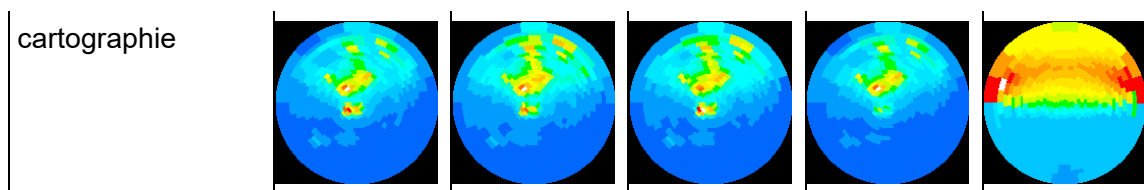
Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	20 lx.h				12 lx.h
dose phototoxique	1 mJ/cm	3 mJ/cm	3 mJ/cm	6 mJ/cm	5 mJ/cm
dose mélanopique	18 z-lx.h	15 z-lx.h	17 z-lx.h	20 z-lx.h	15 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.60	1.92	2.30	2.89	1.63
cartographie					

*Bilan moyen 2 heures avant le coucher*

## 4.6 Dans le plan rétinien, année complète

**Tableau 20 : résultats dans le plan rétinien pour une année complète**

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	58 lx.h				196 lx.h
dose phototoxique	5 mJ/cm	7 mJ/cm	7 mJ/cm	17 mJ/cm	76 mJ/cm
dose mélanopique	49 z-lx.h	42 z-lx.h	48 z-lx.h	58 z-lx.h	226 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.52	1.83	1.93	2.85	1.48

*Bilan moyen journalier*

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (cas)	(pire naturel (seul))
dose lumineuse	9.7 lx.h				33 lx.h
dose phototoxique	0 mJ/cm	0 mJ/cm	0 mJ/cm	2 mJ/cm	13 mJ/cm
dose mélanopique	8.0 z-lx.h	6.6 z-lx.h	7.6 z-lx.h	9.6 z-lx.h	39 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.51	1.53	1.61	2.73	1.50
cartographie					

*Bilan moyen 2 heures après le lever*

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (cas)	(pire naturel (seul))
dose lumineuse	20 lx.h				12 lx.h
dose phototoxique	1 mJ/cm	3 mJ/cm	3 mJ/cm	6 mJ/cm	5 mJ/cm
dose mélanopique	18 z-lx.h	15 z-lx.h	17 z-lx.h	20 z-lx.h	14 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.58	1.92	2.22	2.89	1.59
cartographie					

*Bilan moyen 2 heures avant le coucher***4.7 Conclusion**

L'exposition rétinienne aux sources artificielles est également importante dans ce scénario : en hiver la dose phototoxique liée de la configuration « LED » représente environ 20% de l'apport naturel (10 % sur l'année complète).

Les cartographies mettent bien en évidence l'importance de l'éclairage artificiel général.

Pour ce scénario, l'exposition aux sources LED est similaire à celle des sources fluorescentes mais l'usage de sources LED très froides (pire cas) peut conduire à des niveaux 2,5 fois plus élevés.

## 5. Résultats du scénario « enfant à la maternelle »

### 5.1 Présentation du scénario

Ce scénario concerne un enfant de 4 ans, scolarisé à la maternelle. Il déjeune également à la cantine et reste à l'accueil périscolaire jusqu'à 18 heures. Sa sensibilité au risque photobiologique à la lumière bleu est plus importante que celle d'un adulte. Voici la description d'une de ses journées :

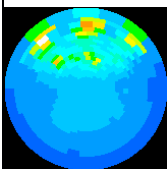
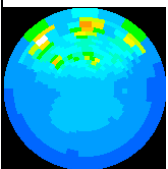
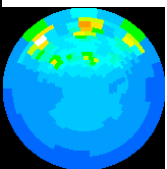
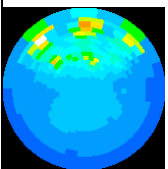
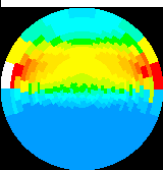
Tableau 21 : scénario considéré pour un enfant de maternelle

Heure début	Situation	Environnement	Couleur halogène	Couleur fluorescence	Couleur LED	Couleur LED froide
(00:00:00)	enfant dodo	black room	2600 K	2800 K	6300 K	6400 K
(07:00:00)	toilettes	black room	2600 K	2750 K	2900 K	6400 K
(07:10:00)	enfant petit dej	cuisine	2600 K	2750 K	2950 K	6400 K
(07:25:00)	brossage dents	sdb	2600 K	2750 K	3100 K	6400 K
(07:30:00)	habillage	chambre enfant	2600 K	2750 K	3100 K	6400 K
(07:40:00)	jeux	chambre enfant	2600 K	2750 K	2700 K	6400 K
(08:00:00)	trajet maison école	extérieur	-	-	-	-
(08:30:00)	travail écrit classe	salle de classe	2600 K	3650 K	3850 K	6400 K
(10:00:00)	récréation	récréation	-	-	-	-
(10:30:00)	pipi école	toilettes école	2600 K	3900 K	3850 K	6400 K
(10:40:00)	travail écrit classe	salle de classe	2600 K	3650 K	3850 K	6400 K
(11:45:00)	repas cantine	cantine	2600 K	3900 K	3850 K	6400 K
(12:30:00)	toilettes	black room	2600 K	2750 K	2900 K	6400 K
(12:40:00)	récréation	récréation	-	-	-	-
(13:00:00)	enfant dodo	black room	2600 K	2800 K	6300 K	6400 K
(13:30:00)	pipi école	toilettes école	2600 K	3900 K	3850 K	6400 K
(13:40:00)	travail écrit classe	salle de classe	2600 K	3650 K	3850 K	6400 K
(15:30:00)	goûter école	salle de classe	2600 K	3600 K	3850 K	6400 K
(16:00:00)	récréation	récréation	-	-	-	-
(16:30:00)	pipi école	toilettes école	2600 K	3900 K	3850 K	6400 K
(16:40:00)	garderie	garderie	2600 K	3600 K	3850 K	6400 K
(18:00:00)	trajet maison école	extérieur	-	-	-	-
(18:30:00)	jeux	chambre enfant	2600 K	2750 K	2700 K	6400 K
(19:00:00)	bain	sdb	2600 K	2750 K	3100 K	6400 K
(19:30:00)	repas famille	cuisine	2600 K	2750 K	2950 K	6400 K
(20:00:00)	brossage dents	sdb	2600 K	2750 K	3100 K	6400 K
(20:05:00)	lecture chambre	chambre enfant	2600 K	2750 K	3100 K	6400 K
(20:30:00)	enfant dodo	black room	2600 K	2800 K	6300 K	6400 K

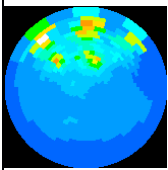
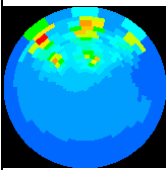
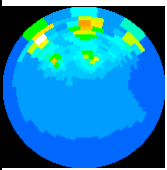
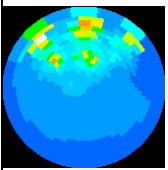
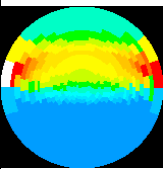


## 5.2 Dans le plan rétinien, en hiver

Tableau 22 : résultats dans le plan rétinien en hiver

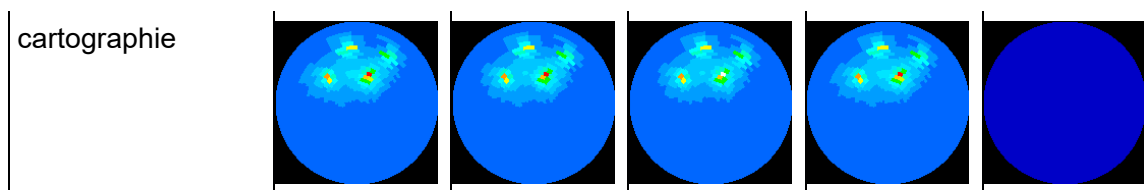
Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	59 lx.h				143 lx.h
dose phototoxique	7 mJ/cm	11 mJ/cm	9 mJ/cm	18 mJ/cm	145 mJ/cm
dose mélanopique	28 z-lx.h	32 z-lx.h	44 z-lx.h	58 z-lx.h	173 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.25	1.57	1.55	2.73	1.62
cartographie					

### Bilan moyen journalier

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	7.5 lx.h				1.86 lx.h
dose phototoxique	0 mJ/cm	1 mJ/cm	1 mJ/cm	2 mJ/cm	1 mJ/cm
dose mélanopique	3.7 z-lx.h	4.1 z-lx.h	5.0 z-lx.h	7.5 z-lx.h	2.4 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.25	1.43	1.28	2.73	1.96
cartographie					

### Bilan moyen 2 heures après le lever

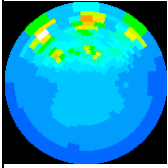
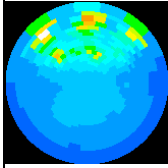
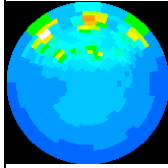
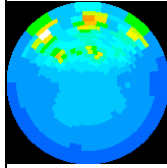
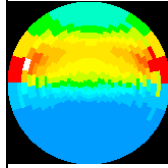
Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	20 lx.h				0 mlx.h
dose phototoxique	2 mJ/cm	4 mJ/cm	2 mJ/cm	6 mJ/cm	0 mJ/cm
dose mélanopique	10 z-lx.h	7.6 z-lx.h	11 z-lx.h	20 z-lx.h	0 mz-lx.h
ratio bleu/rouge	0.25	0.87	0.74	2.73	0.00



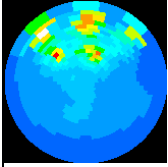
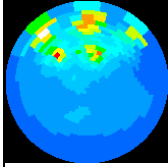
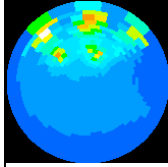
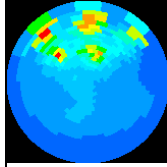
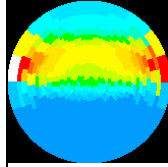
*Bilan moyen 2 heures avant le coucher*

### 5.3 Dans le plan rétinien, au printemps

**Tableau 23 : résultats dans le plan rétinien au printemps**

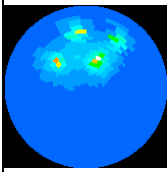
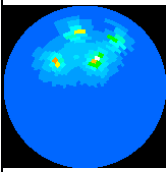
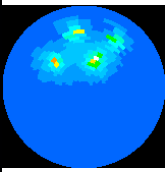
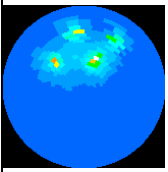
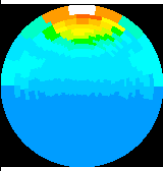
Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (cas)	(pire naturel (seul))
dose lumineuse	52 lx.h				327 lx.h
dose phototoxique	6 mJ/cm	10 mJ/cm	8 mJ/cm	16 mJ/cm	295 mJ/cm
dose mélanopique	25 z-lx.h	29 z-lx.h	39 z-lx.h	51 z-lx.h	378 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.25	1.56	1.58	2.73	1.47
cartographie					

*Bilan moyen journalier*

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (cas)	(pire naturel (seul))
dose lumineuse	6.0 lx.h				32 lx.h
dose phototoxique	0 mJ/cm	1 mJ/cm	0 mJ/cm	1 mJ/cm	34 mJ/cm
dose mélanopique	2.9 z-lx.h	3.2 z-lx.h	4.0 z-lx.h	5.9 z-lx.h	39 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.25	1.42	1.28	2.73	1.67
cartographie					

*Bilan moyen 2 heures après le lever*

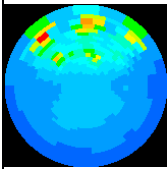
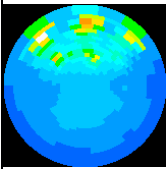
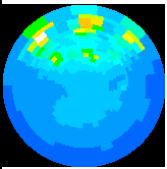
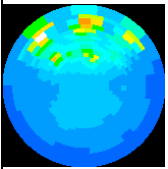
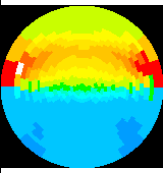
Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (cas)	(pire naturel (seul))
dose lumineuse	19 lx.h				9.0 lx.h
dose phototoxique	2 mJ/cm	3 mJ/cm	2 mJ/cm	6 mJ/cm	8 mJ/cm

dose mélanopique	9.6 z-lx.h	7.2 z-lx.h	10 z-lx.h	19 z-lx.h	10 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.25	0.87	0.74	2.73	1.51
cartographie					

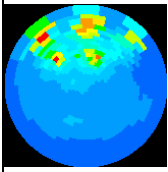
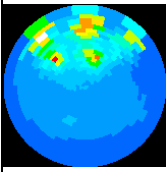
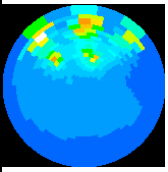
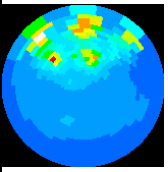
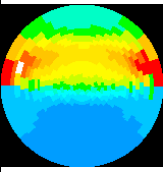
Bilan moyen 2 heures avant le coucher

### 5.4 Dans le plan rétinien, en été

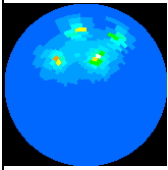
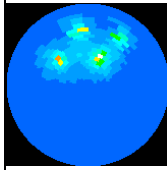
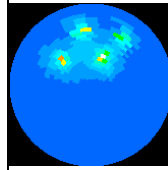
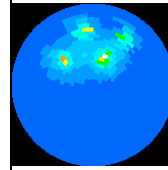
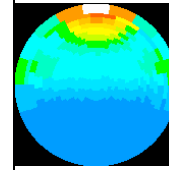
Tableau 24 : résultats dans le plan rétinien en été

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	49 lx.h				469 lx.h
dose phototoxique	6 mJ/cm	9 mJ/cm	8 mJ/cm	15 mJ/cm	395 mJ/cm
dose mélanopique	24 z-lx.h	27 z-lx.h	37 z-lx.h	49 z-lx.h	529 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.25	1.58	1.62	2.73	1.41
cartographie					

Bilan moyen journalier

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	5.4 lx.h				63 lx.h
dose phototoxique	0 mJ/cm	1 mJ/cm	0 mJ/cm	1 mJ/cm	66 mJ/cm
dose mélanopique	2.6 z-lx.h	2.9 z-lx.h	3.6 z-lx.h	5.4 z-lx.h	77 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.25	1.43	1.28	2.73	1.61
cartographie					

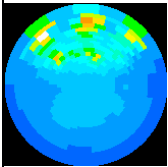
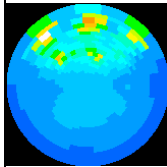
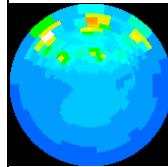
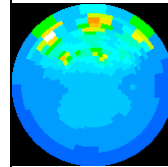
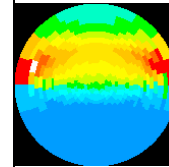
Bilan moyen 2 heures après le lever

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	16 lx.h				30 lx.h
dose phototoxique	2 mJ/cm	3 mJ/cm	2 mJ/cm	5 mJ/cm	27 mJ/cm
dose mélanopique	8.3 z-lx.h	6.2 z-lx.h	9.2 z-lx.h	16 z-lx.h	35 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.25	0.87	0.74	2.73	1.48
cartographie					

*Bilan moyen 2 heures avant le coucher*

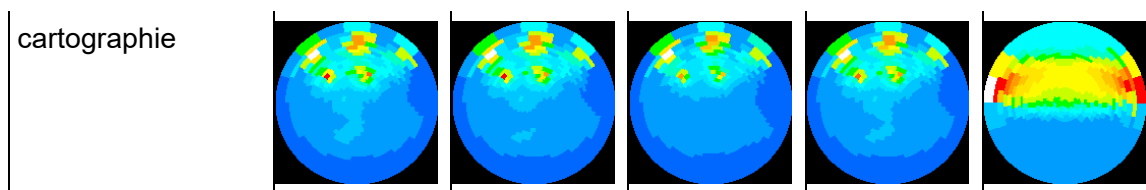
## 5.5 Dans le plan rétinien, en automne

**Tableau 25 : résultats dans le plan rétinien en automne**

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	51 lx.h				379 lx.h
dose phototoxique	6 mJ/cm	10 mJ/cm	8 mJ/cm	15 mJ/cm	346 mJ/cm
dose mélanopique	25 z-lx.h	28 z-lx.h	39 z-lx.h	51 z-lx.h	440 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.25	1.56	1.59	2.73	1.48
cartographie					

*Bilan moyen journalier*

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	6.1 lx.h				30 lx.h
dose phototoxique	0 mJ/cm	1 mJ/cm	0 mJ/cm	1 mJ/cm	33 mJ/cm
dose mélanopique	3.0 z-lx.h	3.3 z-lx.h	4.1 z-lx.h	6.1 z-lx.h	38 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.25	1.43	1.28	2.73	1.68



Bilan moyen 2 heures après le lever

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (cas)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	18 lx.h					14 lx.h
dose phototoxique	2 mJ/cm	3 mJ/cm	2 mJ/cm	5 mJ/cm	14 mJ/cm	14 mJ/cm
dose mélanopique	9.2 z-lx.h	6.9 z-lx.h	10 z-lx.h	18 z-lx.h	17 z-lx.h	17 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.25	0.87	0.74	2.73	1.56	1.56
cartographie						

Bilan moyen 2 heures avant le coucher

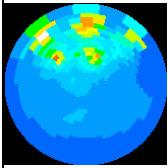
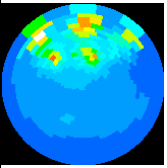
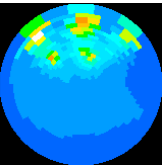
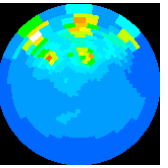
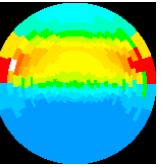
### 5.6 Dans le plan rétinien, année complète

Tableau 26 : résultats dans le plan rétinien pour une année complète

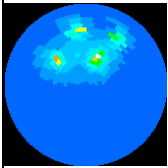
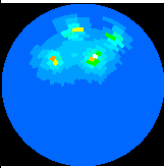
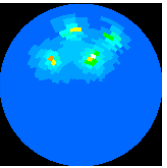
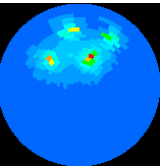
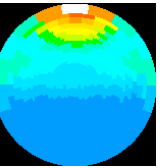
Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (cas)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	53 lx.h					329 lx.h
dose phototoxique	7 mJ/cm	10 mJ/cm	8 mJ/cm	16 mJ/cm	295 mJ/cm	295 mJ/cm
dose mélanopique	25 z-lx.h	29 z-lx.h	40 z-lx.h	52 z-lx.h	379 z-lx.h	379 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.25	1.57	1.58	2.73	1.47	1.47
cartographie						

Bilan moyen journalier

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (cas)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	6.3 lx.h					31 lx.h

dose phototoxique	0 mJ/cm	1 mJ/cm	1 mJ/cm	1 mJ/cm	33 mJ/cm
dose mélanopique	3.1 z-lx.h	3.4 z-lx.h	4.2 z-lx.h	6.2 z-lx.h	39 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.25	1.43	1.28	2.73	1.64
cartographie					

*Bilan moyen 2 heures après le lever*

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (cas)	(pire naturel (seul))
dose lumineuse	18 lx.h				13 lx.h
dose phototoxique	2 mJ/cm	3 mJ/cm	2 mJ/cm	5 mJ/cm	12 mJ/cm
dose mélanopique	9.3 z-lx.h	7.0 z-lx.h	10 z-lx.h	18 z-lx.h	15 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.25	0.87	0.74	2.73	1.51
cartographie					

*Bilan moyen 2 heures avant le coucher*

## 5.7 Conclusion

L'exposition rétinienne aux sources artificielle est assez faible dans ce scénario : la dose phototoxique associée au LED représente environ 6 % de la dose naturelle en hiver (moins de 3 % en moyenne sur l'année).

Sur ce scénario, les cartographies mettent en évidence une exposition liée principalement à un éclairage général assez diffus, cet enfant passe peu de temps devant des écrans et profite de l'éclairage naturel.

## 6. Résultats du scénario « adolescent »

### 6.1 Présentation du scénario

Ce scénario concerne un enfant de 14 ans, amateur d'écrans en tout genre. Le rythme de sa journée d'école est marqué par diverses pauses sur son téléphone et moniteurs d'ordinateur. Une bonne partie de ses weekends et vacances est également consacrée à ces médias. Sa sensibilité au risque photobiologique à la lumière bleue est très légèrement plus forte que celle d'un adulte. Voici la description d'une de ses journées :

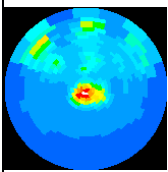
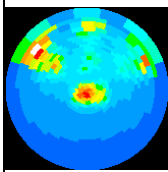
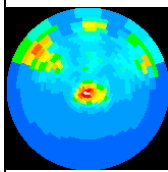
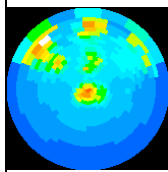
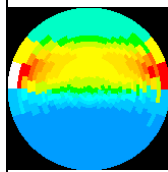
Tableau 27 : scénario considéré pour un adolescent

Heure début	Situation	Environnement	Couleur halogène	Couleur fluorescence	Couleur LED	Couleur LED froide
(00:00:00)	enfant dodo	black room	2600 K	2800 K	6300 K	6400 K
(07:00:00)	toilettes	black room	2600 K	2750 K	2900 K	6400 K
(07:10:00)	enfant petit dej	cuisine	2600 K	2750 K	2950 K	6400 K
(07:20:00)	téléphone	cuisine	4100 K	5950 K	7550 K	7550 K
(07:25:00)	brossage dents	sdb	2600 K	2750 K	3100 K	6400 K
(07:30:00)	habillage	chambre enfant	2600 K	2750 K	3100 K	6400 K
(07:35:00)	téléphone	cuisine	4100 K	5950 K	7550 K	7550 K
(07:40:00)	trajet maison école	extérieur	-	-	-	-
(07:50:00)	trajet métro	black room	2600 K	3850 K	3800 K	6400 K
(08:00:00)	travail écrit classe	salle de classe	2600 K	3650 K	3850 K	6400 K
(10:00:00)	récréation	récréation	-	-	-	-
(10:05:00)	téléphone	cuisine	4100 K	5950 K	7550 K	7550 K
(10:10:00)	travail écrit classe	salle de classe	2600 K	3650 K	3850 K	6400 K
(12:00:00)	repas cantine	cantine	2600 K	3900 K	3850 K	6400 K
(12:45:00)	téléphone	cuisine	4100 K	5950 K	7550 K	7550 K
(13:00:00)	travail écrit classe	salle de classe	2600 K	3650 K	3850 K	6400 K
(13:15:00)	téléphone	cuisine	4100 K	5950 K	7550 K	7550 K
(13:25:00)	pipi école	toilettes école	2600 K	3900 K	3850 K	6400 K
(13:30:00)	travail écrit classe	salle de classe	2600 K	3650 K	3850 K	6400 K
(16:00:00)	trajet métro	black room	2600 K	3850 K	3800 K	6400 K
(16:10:00)	trajet maison école	extérieur	-	-	-	-
(16:20:00)	repas famille	cuisine	2600 K	2750 K	2950 K	6400 K
(16:30:00)	trajet maison école	extérieur	-	-	-	-
(16:40:00)	activité sportive	black room	2600 K	5850 K	6000 K	6400 K
(17:50:00)	trajet maison école	extérieur	-	-	-	-
(18:00:00)	jeux internet	salon	2600 K	2750 K	3000 K	6400 K
(19:30:00)	lecture chambre	chambre enfant	2600 K	2750 K	3100 K	6400 K
(19:50:00)	bain	sdb	2600 K	2750 K	3100 K	6400 K
(20:00:00)	repas famille	cuisine	2600 K	2750 K	2950 K	6400 K
(20:25:00)	brossage dents	sdb	2600 K	2750 K	3100 K	6400 K
(20:30:00)	jeux internet	salon	2600 K	2750 K	3000 K	6400 K
(23:00:00)	enfant dodo	black room	2600 K	2800 K	6300 K	6400 K

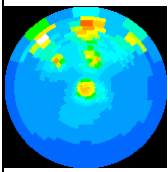
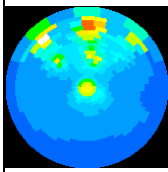
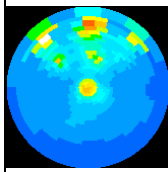
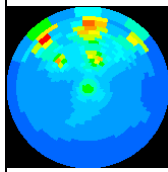
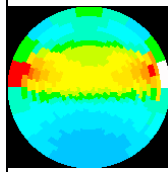


## 6.2 Dans le plan rétinien, en hiver

Tableau 28 : résultats dans le plan rétinien en hiver

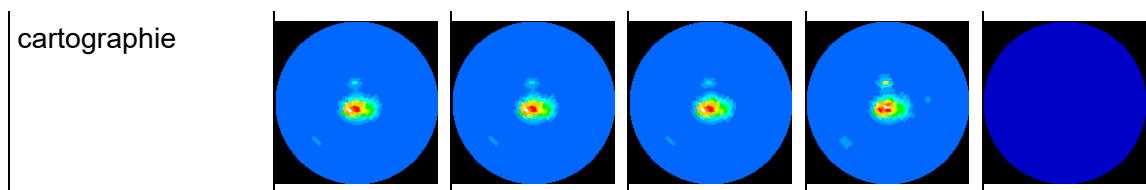
Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	53 lx.h				131 lx.h
dose phototoxique	8 mJ/cm	10 mJ/cm	11 mJ/cm	16 mJ/cm	66 mJ/cm
dose mélanopique	46 z-lx.h	45 z-lx.h	46 z-lx.h	53 z-lx.h	157 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.57	1.78	2.16	2.78	1.58
cartographie					

### Bilan moyen journalier

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	9.4 lx.h				7.8 lx.h
dose phototoxique	0 mJ/cm	1 mJ/cm	1 mJ/cm	2 mJ/cm	3 mJ/cm
dose mélanopique	6.7 z-lx.h	6.5 z-lx.h	7.8 z-lx.h	9.3 z-lx.h	9.2 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.56	1.86	1.98	2.82	1.53
cartographie					

### Bilan moyen 2 heures après le lever

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	13 lx.h				0 mlx.h
dose phototoxique	3 mJ/cm	3 mJ/cm	4 mJ/cm	4 mJ/cm	0 mJ/cm
dose mélanopique	13 z-lx.h	11 z-lx.h	12 z-lx.h	13 z-lx.h	0 mz-lx.h
ratio bleu/rouge	0.83	2.09	2.67	2.87	0.00



Bilan moyen 2 heures avant le coucher

### 6.3 Dans le plan rétinien, au printemps

Tableau 29 : résultats dans le plan rétinien au printemps

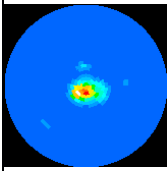
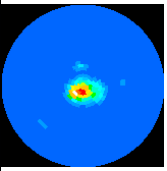
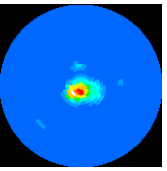
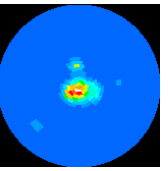
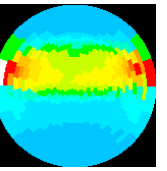
Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	40 lx.h				256 lx.h
dose phototoxique	7 mJ/cm	8 mJ/cm	10 mJ/cm	12 mJ/cm	117 mJ/cm
dose mélanopique	35 z-lx.h	34 z-lx.h	35 z-lx.h	39 z-lx.h	291 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.59	1.80	2.21	2.78	1.43
cartographie					

Bilan moyen journalier

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	6.5 lx.h				27 lx.h
dose phototoxique	0 mJ/cm	0 mJ/cm	1 mJ/cm	1 mJ/cm	13 mJ/cm
dose mélanopique	4.9 z-lx.h	4.6 z-lx.h	5.5 z-lx.h	6.5 z-lx.h	32 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.60	1.87	2.04	2.82	1.51
cartographie					

Bilan moyen 2 heures après le lever

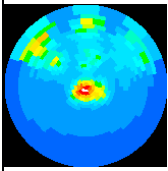
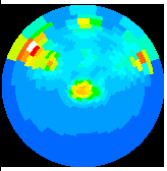
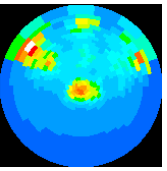
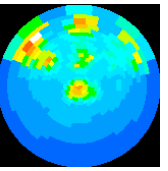
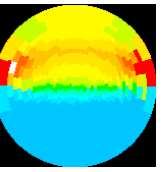
Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	13 lx.h				262 mlx.h
dose phototoxique	3 mJ/cm	3 mJ/cm	4 mJ/cm	4 mJ/cm	0 mJ/cm

dose mélanopique	13 z-lx.h	10 z-lx.h	12 z-lx.h	13 z-lx.h	317 mz-lx.h
ratio bleu/rouge	0.89	2.16	2.72	2.89	1.65
cartographie					

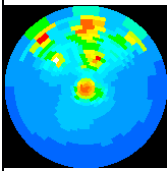
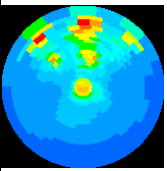
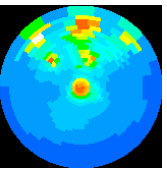
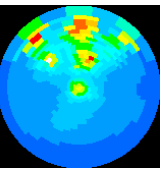
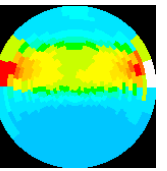
*Bilan moyen 2 heures avant le coucher*

## 6.4 Dans le plan rétinien, en été

**Tableau 30 : résultats dans le plan rétinien en été**

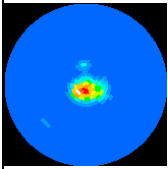
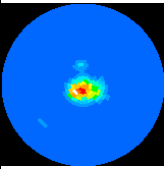
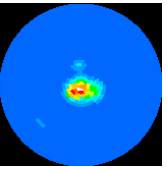
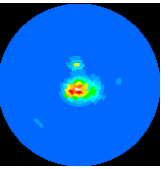
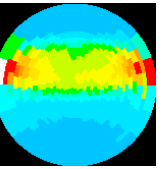
Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	41 lx.h				362 lx.h
dose phototoxique	5 mJ/cm	9 mJ/cm	9 mJ/cm	12 mJ/cm	159 mJ/cm
dose mélanopique	35 z-lx.h	35 z-lx.h	36 z-lx.h	40 z-lx.h	404 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.57	1.79	2.13	2.78	1.39
cartographie					

*Bilan moyen journalier*

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	6.1 lx.h				46 lx.h
dose phototoxique	0 mJ/cm	0 mJ/cm	0 mJ/cm	1 mJ/cm	23 mJ/cm
dose mélanopique	4.5 z-lx.h	4.2 z-lx.h	5.1 z-lx.h	6.0 z-lx.h	54 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.58	1.85	2.00	2.81	1.52
cartographie					

*Bilan moyen 2 heures après le lever*

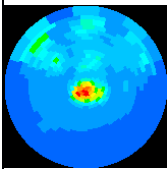
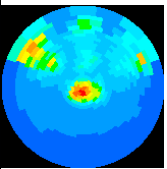
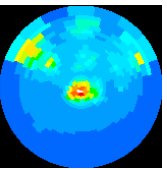
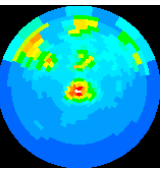
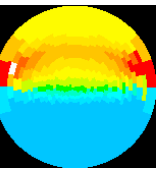
Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)

dose lumineuse	10 lx.h				5.0 lx.h
dose phototoxique	2 mJ/cm	2 mJ/cm	3 mJ/cm	3 mJ/cm	2 mJ/cm
dose mélanopique	10 z-lx.h	8.8 z-lx.h	9.9 z-lx.h	10 z-lx.h	6.2 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.90	2.17	2.66	2.89	1.73
cartographie					

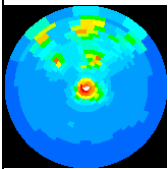
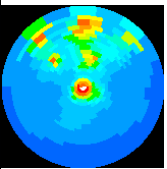
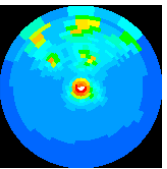
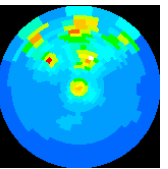
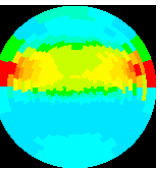
*Bilan moyen 2 heures avant le coucher*

## 6.5 Dans le plan rétinien, en automne

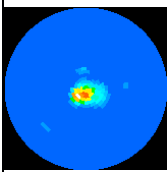
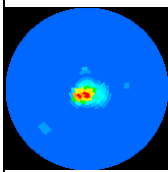
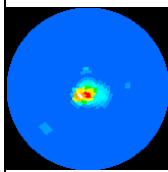
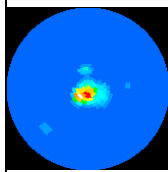
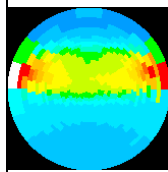
**Tableau 31 : résultats dans le plan rétinien en automne**

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	34 lx.h				294 lx.h
dose phototoxique	6 mJ/cm	8 mJ/cm	10 mJ/cm	11 mJ/cm	134 mJ/cm
dose mélanopique	30 z-lx.h	29 z-lx.h	30 z-lx.h	34 z-lx.h	334 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.61	1.82	2.26	2.79	1.43
cartographie					

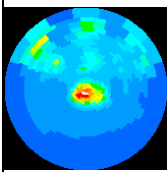
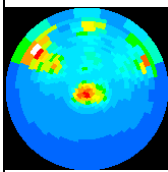
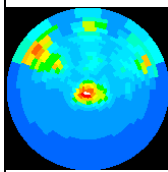
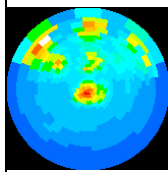
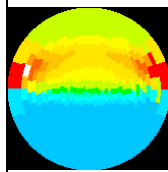
*Bilan moyen journalier*

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	6.4 lx.h				25 lx.h
dose phototoxique	0 mJ/cm	0 mJ/cm	1 mJ/cm	1 mJ/cm	11 mJ/cm
dose mélanopique	5.0 z-lx.h	4.5 z-lx.h	5.4 z-lx.h	6.3 z-lx.h	28 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.62	1.88	2.08	2.82	1.43
cartographie					

*Bilan moyen 2 heures après le lever*

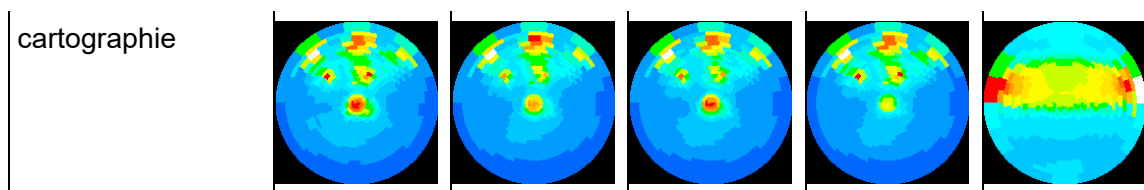
Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	12 lx.h				459 mlx.h
dose phototoxique	3 mJ/cm	3 mJ/cm	4 mJ/cm	4 mJ/cm	0 mJ/cm
dose mélanopique	12 z-lx.h	10 z-lx.h	11 z-lx.h	12 z-lx.h	546 mz-lx.h
ratio bleu/rouge	0.96	2.22	2.76	2.90	1.62
cartographie					

*Bilan moyen 2 heures avant le coucher***6.6 Dans le plan rétinien, année complète****Tableau 32 : résultats dans le plan rétinien pour une année complète**

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	41 lx.h				260 lx.h
dose phototoxique	6 mJ/cm	8 mJ/cm	10 mJ/cm	12 mJ/cm	119 mJ/cm
dose mélanopique	36 z-lx.h	35 z-lx.h	36 z-lx.h	41 z-lx.h	296 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.58	1.80	2.19	2.78	1.43
cartographie					

*Bilan moyen journalier*

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	6.8 lx.h				26 lx.h
dose phototoxique	0 mJ/cm	1 mJ/cm	1 mJ/cm	2 mJ/cm	12 mJ/cm
dose mélanopique	5.1 z-lx.h	4.8 z-lx.h	5.7 z-lx.h	6.7 z-lx.h	31 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.59	1.87	2.02	2.82	1.49

*Bilan moyen 2 heures après le lever*

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	12 lx.h				1.43 lx.h
dose phototoxique	2 mJ/cm	3 mJ/cm	4 mJ/cm	4 mJ/cm	0 mJ/cm
dose mélanopique	12 z-lx.h	10 z-lx.h	11 z-lx.h	12 z-lx.h	1.78 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.90	2.16	2.71	2.89	1.72
cartographie					

*Bilan moyen 2 heures avant le coucher*

## 6.7 Conclusion

L'exposition rétinienne aux sources artificielles est notable dans ce scénario : pour une installation en LED, la dose phototoxique est proche de 17 % de la dose phototoxique naturelle en hiver et proche de 8% sur l'année complète.

Les écrans (principalement ceux des téléphones) constituent la principale source d'exposition, notamment avant le coucher comme l'illustrent les cartographies : la partie centrale de la rétine est toujours la plus exposée. La différence avec la configuration « pire cas » est alors plus faible que pour les autres scénarios.

## 7. Résultats du scénario « personne âgée »

### 7.1 Présentation du scénario

Ce scénario concerne une personne de 70 ans dont les activités sont très variées : intérieures/extérieures, lectures et écrans. Voici la description d'une de ses journées.

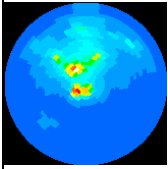
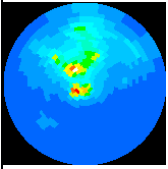
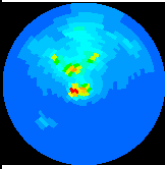
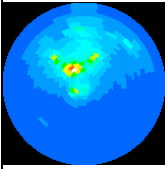
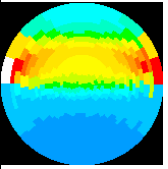
Tableau 33 : scénario considéré pour une personne âgée

Heure début	Situation	Environnement	Couleur halogène	Couleur fluorescence	Couleur LED	Couleur LED froide
(00:00:00)	sommeil	black room	-	-	-	-
(04:00:00)	toilettes	black room	2600 K	2750 K	2900 K	6400 K
(04:05:00)	sommeil	black room	-	-	-	-
(07:00:00)	petit dej	cuisine	2600 K	2750 K	2950 K	6400 K
(07:30:00)	brossage dents	sdb	2600 K	2750 K	3100 K	6400 K
(07:35:00)	bain	sdb	2600 K	2750 K	3100 K	6400 K
(08:00:00)	habillage	chambre enfant	2600 K	2750 K	3100 K	6400 K
(08:20:00)	trajet à pied	extérieur	-	-	-	-
(08:30:00)	trajet métro	black room	2600 K	3850 K	3800 K	6400 K
(09:00:00)	courses	black room	2600 K	3850 K	3850 K	6400 K
(10:00:00)	téléphone	salon	4100 K	5950 K	7550 K	7550 K
(10:30:00)	jardinage	extérieur	-	-	-	-
(11:00:00)	bricolage	atelier	2600 K	2750 K	2950 K	6400 K
(11:30:00)	activites domestiques	cuisine	2600 K	2750 K	2950 K	6400 K
(12:30:00)	repas famille	salon	2600 K	2900 K	2950 K	6400 K
(13:30:00)	activités domestiques	cuisine	2600 K	2750 K	2950 K	6400 K
(14:00:00)	sommeil	black room	-	-	-	-
(14:30:00)	trajet à pied	extérieur	-	-	-	-
(14:35:00)	trajet métro	black room	2600 K	3850 K	3800 K	6400 K
(15:00:00)	temps libre	salon	2600 K	2900 K	2950 K	6400 K
(16:00:00)	promenade	extérieur	-	-	-	-
(16:30:00)	pause thé	salon	2600 K	2900 K	2950 K	6400 K
(17:00:00)	relations sociales	salon	2600 K	2900 K	2950 K	6400 K
(17:30:00)	lecture livre	chambre enfant	2600 K	2750 K	3100 K	6400 K
(18:00:00)	jeux internet	salon	2600 K	2750 K	2700 K	6400 K
(18:30:00)	télévision	salon	4400 K	5700 K	7550 K	7550 K
(19:00:00)	activités domestiques	cuisine	2600 K	2750 K	2950 K	6400 K
(19:30:00)	repas famille	salon	2600 K	2900 K	2950 K	6400 K
(19:50:00)	brossage dents	sdb	2600 K	2750 K	3100 K	6400 K
(20:00:00)	television	salon	4400 K	5700 K	7550 K	7550 K

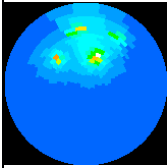
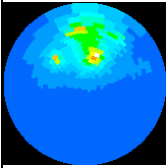
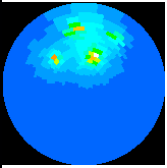
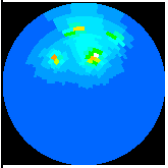
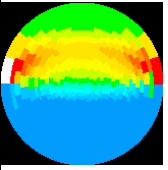
(22:30:00)	sommeil	black room	-	-	-	-
------------	---------	------------	---	---	---	---

## 7.2 Dans le plan rétinien, en hiver

Tableau 34 : résultats dans le plan rétinien en hiver

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	(pire naturel (seul))
dose lumineuse	57 lx.h				100 lx.h
dose phototoxique	5 mJ/cm	6 mJ/cm	7 mJ/cm	17 mJ/cm	42 mJ/cm
dose mélanopique	49 z-lx.h	41 z-lx.h	47 z-lx.h	57 z-lx.h	122 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.54	1.64	1.96	2.85	1.63
cartographie					

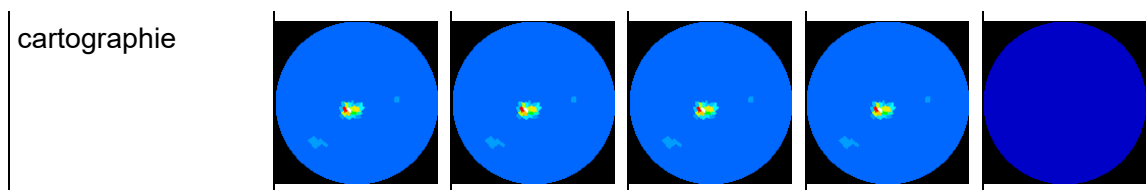
### Bilan moyen journalier

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	(pire naturel (seul))
dose lumineuse	17 lx.h				654 mlx.h
dose phototoxique	1 mJ/cm	1 mJ/cm	2 mJ/cm	5 mJ/cm	0 mJ/cm
dose mélanopique	8.4 z-lx.h	9.7 z-lx.h	10 z-lx.h	16 z-lx.h	847 mz-lx.h
ratio bleu/rouge	0.25	1.62	1.09	2.73	1.92
cartographie					

### Bilan moyen 2 heures après le lever

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	(pire naturel (seul))
dose lumineuse	11 lx.h				0 mlx.h
dose phototoxique	2 mJ/cm	3 mJ/cm	3 mJ/cm	3 mJ/cm	0 mJ/cm
dose mélanopique	11 z-lx.h	9.2 z-lx.h	10 z-lx.h	10 z-lx.h	0 mz-lx.h
ratio bleu/rouge	0.69	1.85	2.93	2.93	0.00





Bilan moyen 2 heures avant le coucher

### 7.3 Dans le plan rétinien, au printemps

Tableau 35 : résultats dans le plan rétinien au printemps

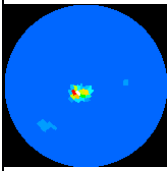
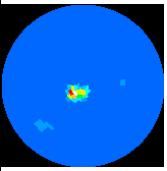
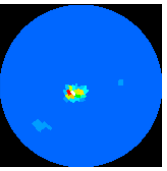
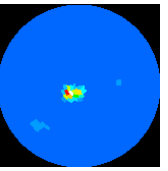
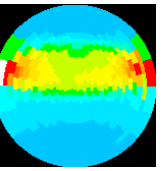
Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	53 lx.h				207 lx.h
dose phototoxique	4 mJ/cm	5 mJ/cm	6 mJ/cm	15 mJ/cm	79 mJ/cm
dose mélanopique	45 z-lx.h	38 z-lx.h	43 z-lx.h	52 z-lx.h	238 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.54	1.63	1.93	2.85	1.45
cartographie					

Bilan moyen journalier

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	16 lx.h				11 lx.h
dose phototoxique	1 mJ/cm	1 mJ/cm	2 mJ/cm	5 mJ/cm	5 mJ/cm
dose mélanopique	8.2 z-lx.h	9.6 z-lx.h	10 z-lx.h	16 z-lx.h	14 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.25	1.62	1.10	2.73	1.69
cartographie					

Bilan moyen 2 heures après le lever

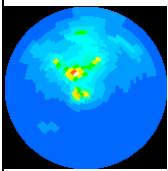
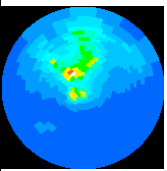
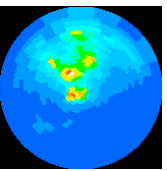
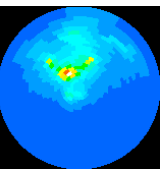
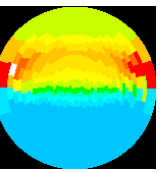
Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	10 lx.h				1.11 lx.h
dose phototoxique	2 mJ/cm	2 mJ/cm	3 mJ/cm	3 mJ/cm	0 mJ/cm

dose mélanopique	10 z-lx.h	8.5 z-lx.h	9.6 z-lx.h	9.6 z-lx.h	1.38 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.69	1.85	2.93	2.93	1.74
cartographie					

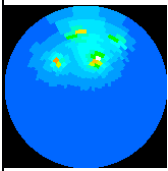
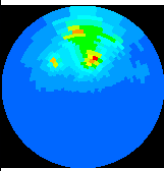
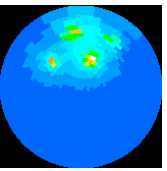
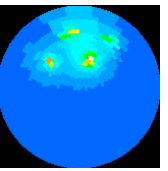
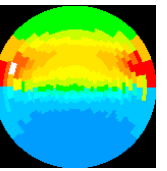
*Bilan moyen 2 heures avant le coucher*

## 7.4 Dans le plan rétinien, en été

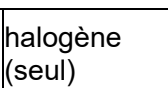
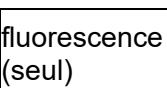
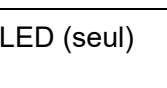
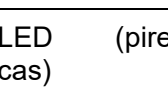
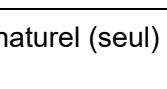
**Tableau 36 : résultats dans le plan rétinien en été**

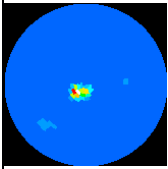
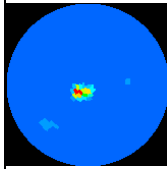
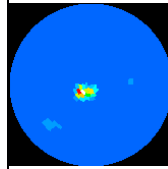
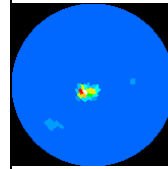
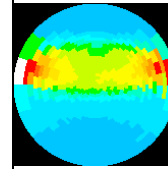
Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (cas)	(pire naturel (seul))
dose lumineuse	50 lx.h				299 lx.h
dose phototoxique	4 mJ/cm	5 mJ/cm	5 mJ/cm	15 mJ/cm	110 mJ/cm
dose mélanopique	41 z-lx.h	34 z-lx.h	40 z-lx.h	50 z-lx.h	335 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.50	1.61	1.77	2.84	1.40
cartographie					

*Bilan moyen journalier*

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (cas)	(pire naturel (seul))
dose lumineuse	15 lx.h				25 lx.h
dose phototoxique	1 mJ/cm	1 mJ/cm	2 mJ/cm	4 mJ/cm	10 mJ/cm
dose mélanopique	7.8 z-lx.h	9.1 z-lx.h	10 z-lx.h	15 z-lx.h	30 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.25	1.64	1.10	2.73	1.59
cartographie					

*Bilan moyen 2 heures après le lever*

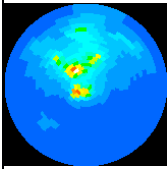
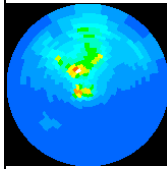
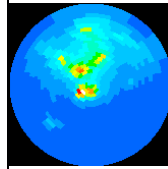
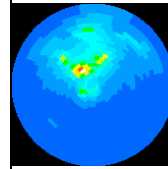
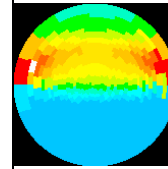
Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (cas)	(pire naturel (seul))
dose lumineuse	15 lx.h				25 lx.h
dose phototoxique	1 mJ/cm	1 mJ/cm	2 mJ/cm	4 mJ/cm	10 mJ/cm
dose mélanopique	7.8 z-lx.h	9.1 z-lx.h	10 z-lx.h	15 z-lx.h	30 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.25	1.64	1.10	2.73	1.59
cartographie					

dose lumineuse	7.0 lx.h				9.6 lx.h
dose phototoxique	1 mJ/cm	1 mJ/cm	2 mJ/cm	2 mJ/cm	4 mJ/cm
dose mélanopique	7.0 z-lx.h	5.8 z-lx.h	6.5 z-lx.h	6.5 z-lx.h	12 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.69	1.85	2.93	2.93	1.74
cartographie					

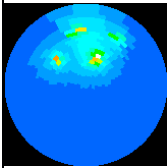
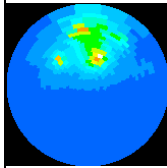
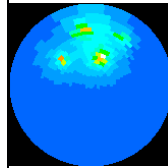
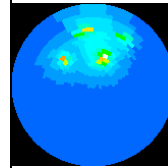
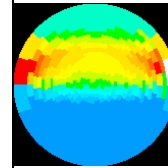
*Bilan moyen 2 heures avant le coucher*

## 7.5 Dans le plan rétinien, en automne

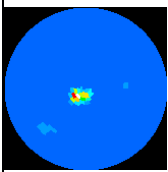
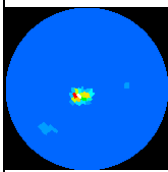
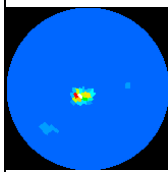
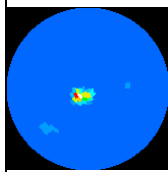
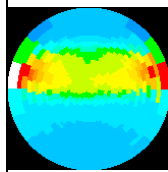
**Tableau 37 : résultats dans le plan rétinien en automne**

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	51 lx.h				244 lx.h
dose phototoxique	4 mJ/cm	5 mJ/cm	6 mJ/cm	15 mJ/cm	93 mJ/cm
dose mélanopique	44 z-lx.h	36 z-lx.h	42 z-lx.h	51 z-lx.h	280 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.53	1.63	1.89	2.85	1.45
cartographie					

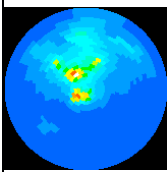
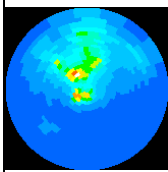
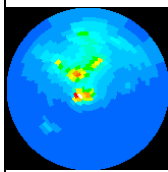
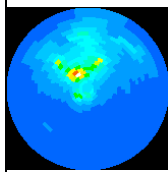
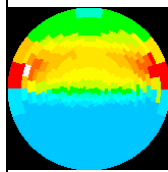
*Bilan moyen journalier*

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	16 lx.h				11 lx.h
dose phototoxique	1 mJ/cm	1 mJ/cm	2 mJ/cm	5 mJ/cm	4 mJ/cm
dose mélanopique	8.2 z-lx.h	9.5 z-lx.h	10 z-lx.h	16 z-lx.h	14 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.25	1.62	1.10	2.73	1.68
cartographie					

*Bilan moyen 2 heures après le lever*

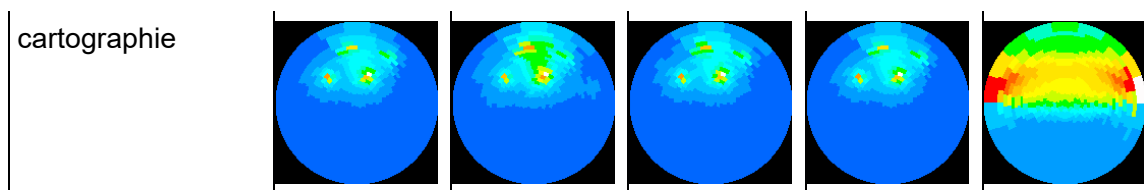
Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	9.7 lx.h				2.2 lx.h
dose phototoxique	2 mJ/cm	2 mJ/cm	3 mJ/cm	3 mJ/cm	0 mJ/cm
dose mélanopique	9.8 z-lx.h	8.1 z-lx.h	9.1 z-lx.h	9.1 z-lx.h	2.7 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.69	1.85	2.93	2.93	1.66
cartographie					

*Bilan moyen 2 heures avant le coucher***7.6 Dans le plan rétinien, année complète****Tableau 38 : résultats dans le plan rétinien pour une année complète**

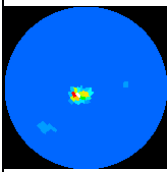
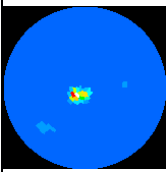
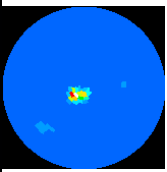
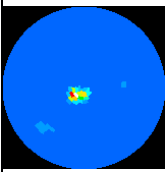
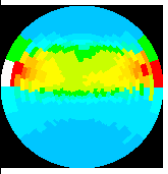
Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	53 lx.h				213 lx.h
dose phototoxique	4 mJ/cm	5 mJ/cm	6 mJ/cm	16 mJ/cm	81 mJ/cm
dose mélanopique	45 z-lx.h	37 z-lx.h	43 z-lx.h	52 z-lx.h	244 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.53	1.63	1.89	2.85	1.45
cartographie					

*Bilan moyen journalier*

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	16 lx.h				12 lx.h
dose phototoxique	1 mJ/cm	1 mJ/cm	2 mJ/cm	4 mJ/cm	5 mJ/cm
dose mélanopique	8.1 z-lx.h	9.5 z-lx.h	10 z-lx.h	16 z-lx.h	15 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.25	1.62	1.10	2.73	1.64



*Bilan moyen 2 heures après le lever*

Catégorie	halogène (seul)	fluorescence (seul)	LED (seul)	LED (pire cas)	naturel (seul)
dose lumineuse	9.5 lx.h				3.2 lx.h
dose phototoxique	2 mJ/cm	2 mJ/cm	3 mJ/cm	3 mJ/cm	1 mJ/cm
dose mélanopique	9.6 z-lx.h	7.9 z-lx.h	8.9 z-lx.h	8.9 z-lx.h	4.0 z-lx.h
ratio bleu/rouge	0.69	1.85	2.93	2.93	1.73
cartographie					

*Bilan moyen 2 heures avant le coucher*

## 7.7 Conclusion

L'exposition rétinienne aux sources artificielle est également notable dans ce scénario : pour une installation en LED, la dose phototoxique est proche de 17 % de la dose phototoxique naturelle en hiver et proche de 7% sur l'année complète.

On retrouve principalement une forte influence de l'éclairage général et des écrans, notamment avant le coucher. Même si l'usage des écrans est plus modéré que celui des adolescents, il concerne des produits plus petits et plus lumineux (tablettes et téléphones) et n'est pas compensé par d'aussi grandes périodes passées à l'extérieur.

Dans ce scénario, l'installation de LED de couleur froide conduit aisément au doublement des doses phototoxiques.



## Annexe 5 : Analyse du cycle de vie

### 1. Tableau d'évaluation des ACVs

(Abréviations de produits (basées sur la langue anglaise en général) : CFL = lampe fluocompacte, CMH = lampe aux halogénures métalliques en céramique, FL = lampe à fluorescence, IL = lampe à incandescence, IND = luminaire à induction, LED = diode électroluminescente, MH = lampe aux halogénures métalliques, SHP = lampe à sodium haute pression. Catégories : ADP = épuisement de ressources, AP = acidification, CED = demande d'énergie cumulée, EP = eutrophisation, FAETP = écotoxicité aquatique d'eau douce, FEP = eutrophisation d'eau douce, FSETP = écotoxicité des sédiments d'eau douce, GWP = réchauffement planétaire, HTP = toxicité humaine, HTPce = toxicité humaine - effets carcinogènes, HTPnce = toxicité humaine - effets non-carcinogènes, LUP = utilisation des terres, MAETP = écotoxicité marine aquatique, MEP = eutrophisation marine, MSETP = écotoxicité marine des sédiments, ODP = destruction de la couche d'ozone stratosphérique, POCP = formation d'ozone photochimique, TEP = eutrophisation terrestre, TETP = écotoxicité terrestre). \*) de l'avenir, \*\*) hypothétique.

Tableau 39 : tableau d'évaluation des ACVs

Unité fonctionnelle	Catégories d'impact environnemental	Évaluation de qualité (UF=unité fonctionnelle, CDV= cycle de vie, CDI =catégorie d'impact)	Qualité décente (O/N)	Examiné par les pairs (O/N)	Qualifié pour étude complémentaire (O/N)	Référence	Année
1 km d'une route illuminée; lmh; 1 luminaire (3 unités)	AP, GWP, EP, FAETP, HTP, MAETP, POCP, ADP, ODP, TETP, Eco-indicator 99	FU OK. Bonne sélection de CDIs. Contient 3 étapes primaires de cycle de vie.	O	O	O	Tähkämö & Halonen	2015
1 pièce du produit; 20 Mlmh; 251 507 Mlmh (3 unités)	Empreinte C (carbone), empreinte SPI (sustainable process index)	FU OK. SPI une unité inconnu (pareil de empreinte écologique (m2.y)). CDIs limitées. Empreinte carbone semble ne pas être en accord avec autres études. Ne présente pas de propres données d'inventaire mais réfère à US DOE 2012. Fin-de-vie exclu de l'étude.	N	O	N	Shahzad et al.	2015
1 lumen pour 50 000 h; 1 lux pour 50 000 h (2	GWP, ODP, HTPce, HTPnce; POCP, AP, TEP, FEP, MEP,	FU OK (1er). Bonne sélection de CDIs. Contient 3 étapes primaires	O	O	O	Principi & Fioretti	2014

unités)	FAETP, LUP, CED	de cycle de vie.					
36,375000 Mlmh (36375000lmh)	AP, ADP, GWP, EP, FAETP, FSETP, HTP, LUP, MAETP, MSETP, ODP, TETP, rayonnement ionisant, air malodorant, POCP	FO OK. Bonne sélection de CDIs. Contient 3 étapes primaires de cycle de vie.	O	O	O	Sangwan et al.	2014
1 pièce du produit	GWP, ReCiPe H/A (catégorie pas clair)	FU NOK. Sélection de CDIs limitée. Etape de l'utilisation exclue. Pièces électriques exclues.	N	O	N	Camañas et al.	2014
60 000 h	Énergie, carcinogènes, effets respiratoires organiques et inorganiques, GWP, radiation, ODP, écotoxicité, AP/EP, LUP, minéraux, combustibles fossiles, consommation d'eau	FU NOK (mais acceptable). Bonne sélection de CDIs. Contient 3 étapes primaires de cycle de vie. Données d'inventaire basées sur données par Hartley et al. (travaux antérieur de la groupe de Dale et al.), données de lampe et ballast par DEFRA (et Energy works). Terminologie un peu fausse mais les fondations de travaux OK.	O	O	O	Abdul Hadi et al.	2013
50 000 h et 1140 lm (57 Mlmh)	Énergie primaire, renouvelable, et non- renouvelable; ADP; consommation d'eau; déchets dangereux, non-dangereux, inertes et radioactifs; GWP; AP; pollution de l'air; pollution de l'eau; ODP; POCP; EP	FU OK. Bonne sélection de CDIs.	O	O	O	Tähkämö et al.	2013
20 Mlmh	GWP; AP; POCP, ODP; HTP; FAETP; MAETP; TETP; EP; dégradation des	FU OK. Bonne sélection de CDIs. Contient 3 étapes primaires de cycle de vie.	O	N	O	US DOE	2012



	écosystèmes; ADP; LUP; déchets dangereux, non-dangereux et radioactifs						
100 000 h	GWP, effets respiratoires, écotoxicité	FU NOK (flux lumineuse non spécifiée, ne donne que les puissances des luminaires). Sélection de CDIs décente. Fin-de-vie exclue. Fabrication des ballasts exclue (ou drivers) car les "systèmes sont similaires".	N	O	N	Dale et al.	2011
lm/h	Endpoints de Eco-indicator 99: ressources, qualité d'écosystèmes, santé humaine	FU NOK. Bonne sélection de CDIs (3 catégories "endpoint"). Presque tous données de l'inventaire du cycle de vie ne pas indiquées. Frontières du système pas clairs. Contient 3 étapes primaires de cycle de vie. Etude de plus de 5 ans.	N	O	N	Casamayor & Su	2011
800 lm pour 40 000 h; 100 lx à distance de 1 m pour 40 000 h (2 unités)	Consommation d'énergie	FU OK. CDIs limitées (1). N'indique que données (p.ex. de l'inventaire) très limitées. Contient 3 étapes primaires de cycle de vie. Etude de plus de 5 ans.	N	O	N	Yabumoto et al.	2010
1 Mlmh	GWP; AP; POCP, ODP; HTP; FAETP, MAETP, TETP; EP; dégradation des écosystèmes; ADP; LUP; déchets dangereux, non-dangereux et radioactifs	FU OK. Bonne sélection de CDIs. Contient 3 étapes primaires de cycle de vie. Etude de plus de 5 ans.	O	N	O	DEFRA	2009
345-420 lm pour 25 000 h	GWP, AP, POCP, HTP, EP, ADP,	FU NOK. Bonne sélection de CDIs. Contient 3 étapes primaires	N	N	N	Osram	2009

	consommation d'énergie	de cycle de vie. Etude de plus de 5 ans.					
1 Mlmh	Consommation d'énergie primaire, GWP	CDIs assez limitées. FU OK. Contient 3 étapes primaires de cycle de vie. Etude de plus de 5 ans.	N	N	<b>N</b>	Quirk	2009
-	Consommation d'énergie	FU NOK. N'inclue qu'une étape. Ne donne pas les détails de la lampe. Etude de plus de 5 ans.	N	O	<b>N</b>	Eckelman	2009
1 Mlmh	Consommation d'énergie	Qualité limitée parce que ne calcule que la consommation d'énergie et utilise 32MB DRAM comme proxy de LED fabrication (tous les deux sont composants semi-conductrices). Manque données publiques. Fin-de-vie exclu de l'étude. Etude de plus de 5 ans.	N	N	<b>N</b>	Slocum	2005

## 2. Catégories d'impact inclus dans les sept ACVs qualifiées.

Tableau 40 : catégories d'impact inclus dans les 7 ACVs qualifiées

Impact category	Abbreviation	Tähkämö & Halonen	Principi & Fioretti	Sangwan et al.	Abdul Hadi et al.	Tähkämö et al.	USDOE	DEFRA
acidification	AP	x	x	x + AP&EP endpoint	AP/EP	x	x	x
abiotic resource depletion	ADP	x		x		x	x	x
air pollution	APP					x		
cumulative energy demand	CED		x					
carcinogens	CP			x endpoint	x			
eutrophication	EP	x		x	AP/EP	x	x	x
energy	energy				x			
primary energy	PE					x		
energy, renewable	PER					x		
energy, non-renewable	PENR					x		
ecotoxicity	ETP			x endpoint	x			
ecosystem degradation/damage	EDP						x	x
freshwater aquatic ecotoxicity	FAETP	x		x			x	x
freshwater ecotoxicity	FETP		x					
freshwater eutrophication	FEP		x					
fossil fuels	FF			x endpoint	x			
freshwater sediment ecotoxicity	FSETP			x				
climate change (global warming)	GWP	x	x	x + endpoint	x	x	x	x
human toxicity	HTP	x		x			x	x
human toxicity, cancer effects	HTPce		x					
human toxicity, non-cancer effects	HTPnce		x					
ionizing radiation	IRP			x + endpoint				
land use (land occupation)	LUP		x	x + endpoint	x		x	x

malodorant air	MAP			x				
marine aquatic ecotoxicity	MAETP	x		x			x	x
marine eutrophication	MEP		x					
minerals	MiP				x			
mineral extraction	MP			x endpoint				
marine sediment ecotoxicity	MSETP			x				
ozone depletion/depleting (stratospheric)	ODP	x	x	x + endpoint	x	x	x	x
photochemical ozone formation/creation/photo-oxidant formation	POCP	x	x	x		x	x	x
radiation	RP				x			
respiratory effects	REP			x endpoint				
respiratory organics	ROP				x			
respiratory inorganics	RIP				x			
terrestrial ecotoxicity	TETP	x		x			x	x
terrestrial eutrophication	TEP		x					
water consumption	WCP				x	x		
water pollution	WPP					x		
waste, hazardous (landfilled in DEFRA & US DOE)	HWL					x	x	x
waste, non-hazardous, landfilled	NHWL					x	x	x
waste, radioactive, landfilled	RWL					x	x	x
waste, inert	IWL					x		
eco-indicator (single score)	EI99	x						

### 3. Unités de catégories d'impact utilisées dans les sept ACVs qualifiées, et l'unité la plus courante.

Tableau 41 : unités de catégories d'impact utilisées dans les ACVs qualifiées (Pt= point).

Abbréviation	Tähkämö & Halonen	Principi & Fioretti	Sangwan et al.	Abdul Hadi et al.	Tähkämö et al.	US DOE	DEFRA	COMMON
AP	kg SO2 eq	mol H+ eq	kg SO2 eq (CML) + Pt (AP&EP eco-ind.99)	Pt	kg SO2 eq	kg SO2 eq	kg SO2 eq	kg SO2 eq
ADP	kg Sb eq		kg Sb eq		kg Sb eq	kg Sb eq	kg Sb eq	kg Sb eq
APP					m3			
CED		MJ						
CP			Pt (eco-ind.99)	DALY + Pt				
EP	kg PO4 eq		kg PO4 eq	Pt		kg PO4 eq	kg PO4 eq	kg PO4 eq
energy				MWh				
PE					MJ			
PER					MJ			
PENR					MJ			
ETP			Pt (eco-ind.99)	Pt				
EDP						Pt	Pt	
FAETP	kg 1,4-DCB eq		kg 1,4-DCB eq			kg 1,4-DCB eq	kg 1,4-DCB eq	kg 1,4-DCB eq

FETP		CTUe						
FEP		kg P eq						
FF			Pt (eco-ind.99)	Pt				
FSETP			kg 1,4-DCB eq					
GWP	kg CO2 eq	kg CO2 eq	kg CO2 eq +Pt (Eco-ind.99)	DALY + Pt + tonnes CO2	kg CO2 eq	kg CO2 eq	kg CO2 eq	<b>kg CO2 eq</b>
HTP	kg 1,4-DCB eq		kg 1,4-DCB eq			kg 1,4-DCB eq	kg 1,4-DCB eq	<b>kg 1,4-DCB eq</b>
HTPce		CTUh						
HTPnce		CTUh						
IRP		DALY (CML) + Pt (Eco-ind. 99)						
LUP		kg C deficit	m2a (LU CML) + Pt (land occup. ecoind.99)	Pt		m2a	m2a	<b>m2a</b>
MAP			m3 air					
MAETP	10^3 ton kg 1,4-DCB eq		kg 1,4-DCB eq			kg 1,4-DCB eq	kg 1,4-DCB eq	<b>kg 1,4-DCB eq</b>
MEP		kg N eq						
MiP				Pt				
MP			Pt (eco-ind.99)					
MSETP			kg 1,4-DCB					

			eq					
ODP	g CFC-11 eq	kg CFC-11 eq	kg CFC-11 eq (CML) + Pt (eco-ind.99)	DALY + Pt	kg CFC-11 eq	kg CFC-11	kg CFC-11	<b>kg CFC-11</b>
POCP	kg C2H4 eq	kg NMVOC eq	kg C2H4 eq		kg C2H4 eq	kg O3 formed	kg O3 formed	<b>kg C2H4 eq</b>
RP				DALY + Pt				
REP			Pt (eco-ind.99)					
ROP				DALY + Pt				
RIP				DALY + Pt				
TETP	kg 1,4-DCB eq		kg 1,4-DCB eq			kg 1,4-DCB eq	kg 1,4-DCB eq	<b>kg 1,4-DCB eq</b>
TEP		mol N eq						
WCP				m3	l			
WPP					m3			
HWL					kg	kg waste	kg waste	<b>kg waste</b>
NHWL					kg	kg waste	kg waste	<b>kg waste</b>
RWL					kg	kg waste	kg waste	<b>kg waste</b>
IWL					kg			
EI99	Pt							

#### 4. Impacts environnementaux des ACVs détaillées, pour le cycle de vie entier, par Mlmh<sup>5</sup>.

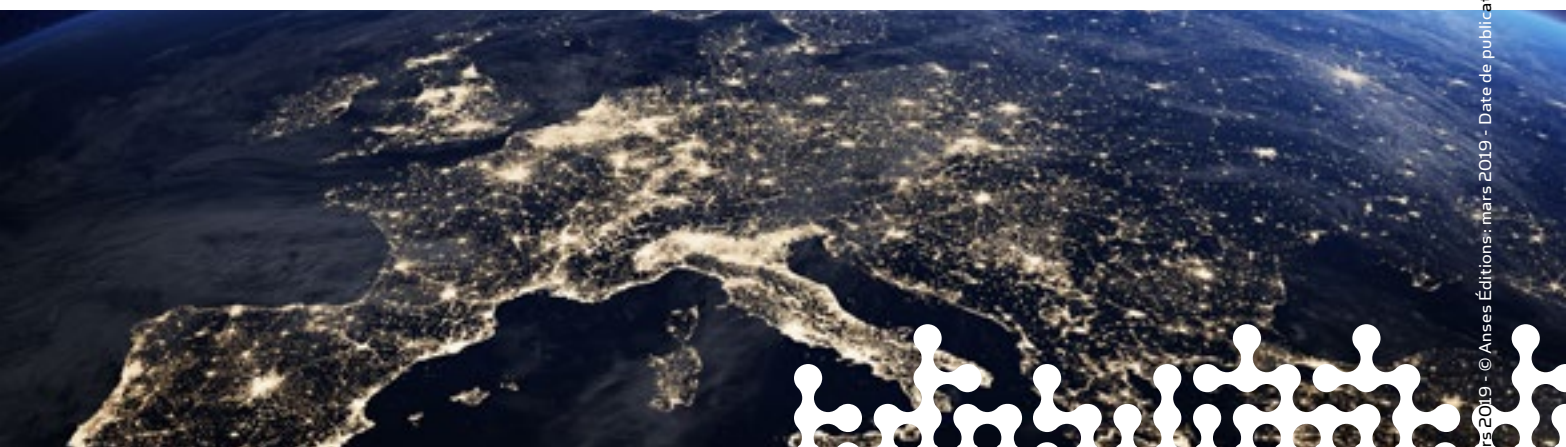
Tableau 42 : impacts environnementaux des ACVs détaillées pour le cycle de vie entier

Impact category	Unit	Tähkämö & Halonen	Principi & Fioretti	Sangwan et al.	Tähkämö et al.	US DOE: LED lamp 2012	US DOE: LED lamp 2017	DEFRA: LED lamp	DEFRA: LED luminaire	Max	Min
acidification	kg SO2 eq	2,87E-02		6,20E-02	1,08E-02	8,75E-02	4,27E-02	3,86E-02	3,23E-03	8,75E-02	3,23E-03
abiotic resource depletion	kg Sb eq	4,85E-02		1,09E-01	1,32E-02	9,25E-02	4,52E-02	8,00E-02	7,12E-03	1,09E-01	7,12E-03
eutrophication	kg PO4 eq	1,97E-02		2,91E-02	5,60E-04	2,65E-02	1,35E-02	2,87E-03	2,38E-03	2,91E-02	5,60E-04
freshwater aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DCB eq	3,41E+00		4,91E+00		2,34E-01	1,17E-01	3,15E-01	2,20E-01	4,91E+00	1,17E-01
climate change (global warming)	kg CO2 eq	6,62E+00	6,40E+00	1,58E+01	1,96E+00	1,26E+01	6,14E+00	1,04E+01	9,21E+00	1,58E+01	1,96E+00
human toxicity	kg 1,4-DCB eq	4,87E+00		1,36E+00		3,02E+00	1,52E+00	1,41E+00	1,10E+00	4,87E+00	1,10E+00
land use (land occupation)	m2a			3,45E-01		2,70E-01	1,33E-01	2,51E-01	2,12E-01	3,45E-01	1,33E-01
marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DCB eq	1,11E+01		2,85E+00		1,49E+00	7,69E-01	2,17E+00	1,69E+00	1,11E+01	7,69E-01
ozone depletion/depleting	kg CFC-11	3,29E-07	3,10E-07	1,07E-03	1,69E-09	1,90E-07	1,02E-07	3,32E-07	2,75E-07	1,07E-03	1,69E-09

<sup>5</sup> Mlmh : Million de lumen heure.



(stratospheric)											
photochemical ozone creation	kg C2H4 eq	1,23E-03		6,22E-04	3,09E-04					<b>1,23E-03</b>	<b>3,09E-04</b>
terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB eq	1,10E-01		4,43E-04		1,77E-03	9,10E-04	1,38E-03	1,07E-03	<b>1,10E-01</b>	<b>4,43E-04</b>
waste, hazardous, landfilled	kg waste				8,98E-04	4,04E-04	1,86E-04	3,05E-01	1,71E-01	<b>3,05E-01</b>	<b>1,86E-04</b>
waste, non-hazardous, landfilled	kg waste				2,44E-02	6,18E-01	3,72E-01	1,30E+02	1,05E+02	<b>1,30E+02</b>	<b>2,44E-02</b>
waste, radioactive, landfilled	kg waste				5,54E-03	5,31E-04	2,61E-04	4,35E-04	3,20E-04	<b>5,54E-03</b>	<b>2,61E-04</b>



Agence nationale de sécurité sanitaire  
de l'alimentation, de l'environnement et du travail  
14 rue Pierre et Marie Curie  
F94701 Maisons-Alfort cedex  
[www.anses.fr](http://www.anses.fr)  
[@Anses\\_fr](https://twitter.com/Anses_fr)