



HAL
open science

Evaluation des risques visuels liés à la lumière bleue émise par des LED bleues et blanches : règles de la conception des luminaires à LED non éblouissants pour l'éclairage général des bureaux

Michel Garcia, Christophe Martinsons

► To cite this version:

Michel Garcia, Christophe Martinsons. Evaluation des risques visuels liés à la lumière bleue émise par des LED bleues et blanches : règles de la conception des luminaires à LED non éblouissants pour l'éclairage général des bureaux. Rapport technique PR2009_B&S_05_SP2_L1 (EN-ECL 10.07.R), CSTB - Centre scientifique et technique du bâtiment, France. 2010. hal-04854483

HAL Id: hal-04854483

<https://cstb.hal.science/hal-04854483v1>

Submitted on 23 Dec 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Bâtiment et Santé

**Evaluation des risques visuels liés à la
lumière bleue émise par des LED bleues et
blanches**

**Règles de la conception des luminaires à LED non
éblouissants pour l'éclairage général des bureaux**

Rapport final

GARCIA Michel, MARTINSONS Christophe

Janvier 2010

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT

SIÈGE SOCIAL > 84 AVENUE JEAN JAURÈS | CHAMPS-SUR-MARNE | 77447 MARNE-LA-VALLÉE CEDEX 2

TÉL. (33) 01 64 68 82 82 | FAX. (33) 01 60 05 70 37 | SIRET 775 688 229 000 27 | www.cstb.fr

ÉTABLISSEMENT PUBLIC À CARACTÈRE INDUSTRIEL ET COMMERCIAL | RCS MEAUX 775 688 229 | TVA FR 70 775 688 229

MARNE-LA-VALLÉE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS

Bâtiment et Santé

**Evaluation des risques visuels liés à la
lumière bleue émise par des LED bleues et
blanches**

**Règles de la conception des luminaires à LED non
éblouissants pour l'éclairage général des bureaux**

Rapport final

GARCIA Michel, MARTINSONS Christophe

Université Paris-Est, Centre scientifique et Technique du Bâtiment, DAE

Janvier 2010

Diffusion restreinte

Rapport EN-ECL 10.07.R

Programme recherche CSTB

Champs d'action : Recherche Développement & Innovation

Programme : Bâtiment et Santé

Action de recherche : Risques associés aux technologies émergentes rayonnantes : champs électromagnétiques basses fréquences et éclairage à LED

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent document, faite sans l'autorisation du CSTB est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Loi du 1er juillet 1992 - art. L 122-4 et L 122-5 et Code Pénal art. 425).

*Toute citation d'extraits ou reproduction doit obligatoirement faire apparaître la référence de ce document sous la forme : **GARCIA M., MARTINSONS C., Bâtiment et Santé : Evaluation des risques visuels liés à la lumière bleue émise par des LED bleues et blanches, CSTB, 2009, 53 pages, rapport n° 05_SP2_L1***

Résumé

L'objet de cette étude est d'évaluer les risques visuels liés à la lumière bleue émise par les Leds bleues et blanches. Notre approche sera basée sur les préconisations de la norme NF EN 62471. L'apparition ces dernières années de nouvelles sources de lumière utilisant de manière parfois massive les Leds, nous incite à faire cette démarche. Les risques évalués seront de deux ordres, ceux imputables à l'émission de lumière bleue et ceux dus aux fortes luminances de ces sources dont la petite taille accentue les risques d'éblouissement

Mots clés : Diode électroluminescente, éblouissement, risques, luminance

Abstract

The object of this study is to evaluate the visual risks related to the blue light emitted by Leds blue and white. Our approach will be based on the recommendations of standard NF EN 62471. The appearance these last years of new sources of light using in a sometimes massive way Leds, encourages us to make this research. The evaluated risks will be of two orders, those ascribable with the emission of blue light and those due to strong brightness of these sources whose small size accentuates the risks of dazzling

Keywords: Lighting emitting diode, glazing, risk, luminance

Résumé long

Ce travail montre que la durée maximale d'exposition pour certaines LED est inférieure à 100 s. Elle est parfois de l'ordre de 3 ou 4 s pour les LED bleues les plus puissantes. Le groupe de risque correspondant est « Groupe de risque 2 : risque modéré ». Par conséquent, l'exposition de l'œil à cette LED pendant des durées supérieures au temps d'aversion est risquée.

Pour réduire le risque sur la rétine, il faut limiter les niveaux de luminance lumineuse et/ou énergétique dans les systèmes d'éclairage à LED en utilisant des solutions optiques.

Pour l'éclairage en lumière bleue, le seuil de sécurité, exprimé en luminance énergétique, sera égale à 10 000 W/m²/sr, ce qui correspond à une durée limite d'exposition supérieure ou égale à 100 s, quelle que soit la nuance de bleu choisie.

La recommandation la plus simple serait de préconiser l'interdiction de tout luminaire ou lampe d'éclairage à LED dont les sources seraient directement visibles par les usagers, sauf preuve de conformité à l'appartenance au groupe de risque « sans risque », évaluée selon la norme NF EN 62 471 à la distance de 200 mm, et non à la distance donnant un éclairement de 500 lux.

On pourrait aussi exiger que la conformité des luminaires à LED à la norme NF EN 62 471 (et à la directive européenne de 2005) soit exigée de manière réglementaire dans le cadre du marquage CE des produits.

De manière générale, nos préconisations sont les suivantes :

- Eviter l'utilisation de LED bleues et « blanc froid »
- Favoriser les LED « blanc chaud »
- Empêcher la vision directe des LED dont la luminance dépasse 104 cd/m².
- Utiliser des systèmes optiques pour faire baisser la luminance. Par exemple, des micro-grilles de défilement
- Appliquer des matériaux diffusants : diffuseurs opales, matériaux réfléchissants blancs, diffuseurs holographiques, etc.
- Utiliser des lentilles et des miroirs pour orienter le faisceau en dehors du champ de vision des occupants
- Pour un flux lumineux donné, il faut favoriser l'utilisation d'un plus grand nombre de LED moins lumineuses, plutôt que d'utiliser peu de LED de plus forte luminance.
- La conception doit satisfaire les exigences de limitation de l'éblouissement d'inconfort, exprimé en termes d'indice UGR. Or, cet indice ne peut pas être calculé pour des petites sources (dimension inférieure à 0,0003 stéradian). L'analyse de l'éblouissement doit être effectuée en utilisant les

paramètres décrivant l'éblouissement perturbateur (ou d'incapacité). On calcule alors la luminance de voile qui est utilisé pour quantifier la diminution du contraste perçu en présence d'une source éblouissante. L'indice TI peut par exemple être calculé, même s'il n'existe actuellement pas de recommandations sur des valeurs de TI en éclairage intérieur

Table des matières

INTRODUCTION.....	12
1. PRINCIPE DE LA MÉTHODE D'ÉVALUATION UTILISÉE	13
1.1 Méthode d'évaluation de la luminance pondérée L_B	13
1.2 Détermination du champ de vision effectif en fonction des durées d'exposition	14
1.3 Rappel des limites d'exposition de la norme nf en 62471 et des classes de risques.....	16
1.4 Méthodologie d'évaluation de risque	16
2. APPLICATION À DES LED TYPE CMS SUBSTRAT CÉRAMIQUE	17
2.1 Conditions d'observation	19
2.2 Spectres lumineux des led	19
2.3 Calcul du facteur de pondération b	21
2.4 Cartes de luminance mesurées sur les led	24
2.4.1 Led bleu roi.....	24
2.4.2 Led blanc froid et blanc neutre.....	26
2.4.3 Led blanc chaud.....	28
2.4.4 Calcul des champs de vision et des surfaces effectives à considérer pour calculer la luminance pondérée I_b	30
2.5 Résultats et analyses.....	33
2.5.1 Résultats pour les LED bleu roi.....	33
2.5.2 Résultats pour les LED blanc froid	35
2.5.3 Résultats pour les LED blanc neutre.....	36
2.5.4 Résultats pour les LED blanc chaud.....	38
2.5.5 Synthèse des résultats.....	38
3. ÉVALUATION DE RISQUE EN PRÉSENCE D'UNE MATRICE DE LED BLANCHES	39
3.1 Evaluation de la distance correspondant à 500 lux en fonction du nombre de led.....	40
3.2 Taille de la source.....	41
3.3 Evaluation de la dimension angulaire de la source en fonction du nombre de led.....	41
3.4 Evaluation de la luminance pondérée en fonction du nombre de led de la matrice	42
3.5 Evaluation de la durée limite d'exposition et du groupe de risque en fonction du nombre de led de la matrice.....	43
3.5.1 Cas de 64 LED.....	43
3.6 Synthèse des résultats obtenus pour des matrices de led.....	44
4. RÈGLES DE CONCEPTION DE LUMINAIRES À LED NON EBLOUISSANTS	45
4.1 Recommandations applicables aux systèmes d'éclairage	45
4.1.1 Solutions d'éclairage et matériels	45
4.1.2 Distribution des luminances.....	47
4.1.3 Eblouissement.....	48
4.1.4 Exemples de situations éblouissantes.....	49

4.1.5 Champ visuel	50
CONCLUSION.....	51

Liste des tableaux

Tableau 1 : Facteur B (part de la luminance énergétique contribuant au risque à la lumière bleue) pour les LED bleu roi.....	21
Tableau 2 : Facteur B (part de la luminance énergétique contribuant au risque à la lumière bleue) pour les LED blanches	23
Tableau 3 : Estimation de la luminance énergétique des LED bleu roi en fonction des valeurs mesurées de luminance et de flux lumineux	26
Tableau 4 : Estimation de la luminance énergétique des LED blanc froid et blanc neutre en fonction des valeurs mesurées de luminance et de flux lumineux	28
Tableau 5 : Estimation de la luminance énergétique des LED blanc chaud en fonction des valeurs mesurées de luminance et de flux lumineux	30
Tableau 6 : Résultats de l'analyse de risque sur la rétine lié à la lumière bleue émise par des LED au format CMS, substrat céramique, à puce de 1,4 mm x 1,4 mm	39

Liste des figures

Figure 1 : Conditions d'observation pour l'évaluation de la luminance énergétique selon la norme NF EN 62471:2008	15
Figure 2 : Démarche schématique de l'évaluation de risque lié à la lumière bleue selon la norme NF EN 62471	17
Figure 3a et b : Vues de face et de côté d'une LED blanc froid. L'échelle des photographies est donnée par la grille rouge dont chaque division mesure 0,5 mm de côté	18
Figure 4 : Densité spectrale de flux normalisée pour les LED bleu roi. La courbe noire représente la fonction $B(\lambda)$	19
Figure 5 : Densité spectrale de flux normalisée pour les LED blanc froid. La courbe noire représente la fonction $B(\lambda)$	20
Figure 6 : Densité spectrale de flux normalisée pour les LED blanc neutre. La courbe noire représente la fonction $B(\lambda)$	20
Figure 7 : Densité spectrale de flux normalisée pour les LED blanc chaud. La courbe noire représente la fonction $B(\lambda)$	21
Figure 8 : Graphe montrant les valeurs du facteur B en fonction de la longueur d'onde d'émission maximale des LED bleu roi	22
Figure 9 : Graphe montrant les valeurs du facteur B en fonction de la température de couleur proximale des LED blanches.....	24
Figure 10 : Carte de luminance mesurée sur une LED bleu roi.....	25
Figure 11 : Carte de luminance mesurée sur une LED blanc froid	27
Figure 12 : Carte de luminance mesurée sur une LED blanc chaud	29
Figure 13 : Graphe indiquant l'évolution de la luminance pondérée L_B des LED bleu roi en fonction du temps d'exposition pour un flux énergétique de 500 mW. La limite d'exposition est représentée par le trait plein de couleur rouge	34
Figure 14 : Graphe indiquant l'évolution de la luminance pondérée L_B des LED bleu roi en fonction du temps d'exposition pour un flux énergétique de 1W. La limite d'exposition est représentée par le trait plein de couleur rouge.....	34

Figure 15 : Graphe indiquant l'évolution de la luminance pondérée L_B des LED blanc froid en fonction du temps d'exposition, pour un flux lumineux de 100 lm. La limite d'exposition est représentée par le trait plein de couleur rouge	35
Figure 16 : Graphe indiquant l'évolution de la luminance pondérée L_B des LED blanc froid en fonction du temps d'exposition, pour un flux lumineux de 200 lm. La limite d'exposition est représentée par le trait plein de couleur rouge	36
Figure 17 : Graphe indiquant l'évolution de la luminance pondérée L_B des LED blanc neutre en fonction du temps d'exposition, pour un flux lumineux de 100 lm. La limite d'exposition est représentée par le trait plein de couleur rouge	37
Figure 18 : Graphe indiquant l'évolution de la luminance pondérée L_B des LED blanc neutre en fonction du temps d'exposition, pour un flux lumineux de 200 lm. La limite d'exposition est représentée par le trait plein de couleur rouge	37
Figure 19 : Graphe indiquant l'évolution de la luminance pondérée L_B des LED blanc chaud en fonction du temps d'exposition, pour un flux lumineux de 200 lm. La limite d'exposition est représentée par le trait plein de couleur rouge	38
Figure 20 : Exemple d'assemblage régulier de 10 x 10 LED type SMD, de substrat céramique et à simple puce, étudiées dans la partie précédente.....	40
Figure 21 : Distance d'évaluation de risque correspondant à un éclairage de 500 lux	41
Figure 22 : Taille d'une LED	41
Figure 23 : Dimension angulaire de la matrice de LED vue à la distance d'évaluation d500 en fonction du nombre de LED	42
Figure 24 : Rapport entre la surface lumineuse et la surface totale de la matrice de LED	43
Figure 25 : Luminance pondérée, évaluée à la distance de 2,02 m correspondant à 500 lux, produite par une matrice carrée de 64 LED blanc froid	44
Figure 26 : Typologie des luminaires les plus employés.....	45
Figure 27 : Eviter l'éblouissement par l'emploi de luminaires adaptés.....	46
Figure 28 : : Valeurs indicatives des luminances (cd/m^2) de sources lumineuses	47
Figure 29 : Angles définissant les zones d'inconfort	48
Figure 30 : Spectre de sensibilité de l'œil humain à l'éblouissement (en blanc), superposé à des spectres de LEDs blanches	49
Figure 31 : Situations éblouissantes, à gauche le reflet sur l'ordinateur, à droite le contre jour.....	50
Figure 32 : Champ visuel.....	50

INTRODUCTION

L'objet de cette étude est d'évaluer les risques visuels liés à la lumière bleue émise par les Leds bleues et blanches. Notre approche sera basée sur les préconisations de la norme NF EN 62471. L'apparition ces dernières années de nouvelles sources de lumière utilisant de manière parfois massive les Leds, nous incite à faire cette démarche. Les risques évalués seront de deux ordres, ceux imputables à l'émission de lumière bleue et ceux dus aux fortes luminances de ces sources dont la petite taille accentue les risques d'éblouissement.

1. PRINCIPE DE LA MÉTHODE D'ÉVALUATION UTILISÉE

L'évaluation du risque photobiologique de la lumière bleue émise par des LED est effectuée selon les préconisations de la norme NF EN 62471 grâce aux données suivantes :

- spectre de la lumière émise (densité spectrale de flux, normalisée à 1) mesuré à l'aide d'un spectrophotomètre
- carte de luminances en cd/m² mesurée au moyen d'une caméra CCD étalonnée.

Ces données sont généralement disponibles sur les sites internet des fabricants et distributeurs de LED.

1.1 MÉTHODE D'ÉVALUATION DE LA LUMINANCE PONDÉRÉE L_B

La luminance pondérée L_B , sur laquelle repose la définition des seuils d'exposition, est évaluée à partir de la formule suivante :

$$L_B = \sum_{\lambda} L_{\lambda} B(\lambda) \Delta\lambda \quad (1)$$

où $B(\lambda)$ est le spectre d'action normalisé du risque due à la lumière bleue et L_{λ} la luminance énergétique spectrale.

Dans la présente évaluation, on suppose que le spectre d'émission de la LED ne varie pas selon :

- les angles d'incidence des rayons sur la pupille de l'œil
- les différentes zones de la surface effective d'émission

Ces hypothèses sont parfaitement justifiées étant donnés les petits angles d'incidence sur l'œil (quelques degrés) et les dimensions des surfaces effectives visées.

Le calcul de la luminance pondérée peut donc être séparé en une sommation spectrale et une prise de moyenne spatiale et angulaire, respectivement sur une surface et un angle solide donné.

On définit la luminance énergétique totale L_e :

$$L_e = \sum_{\lambda} L_{\lambda} \Delta\lambda \quad (2)$$

En introduisant la densité spectrale de flux $S(\lambda)$, normalisée à 1, on peut exprimer L_{λ} par l'expression suivante :

$$L_{\lambda} = L_e \frac{S(\lambda)}{\sum_{\lambda} S(\lambda)} \Delta\lambda \quad (3)$$

La définition de la luminance pondérée donnée par la relation (1) devient alors

$$L_B = L_e \frac{\sum_{\lambda} S(\lambda)B(\lambda)}{\sum_{\lambda} S(\lambda)} \quad (4)$$

Il est pratique ici d'introduire le facteur B défini par :

$$B = \frac{\sum_{\lambda} S(\lambda)B(\lambda)}{\sum_{\lambda} S(\lambda)} \quad (5)$$

On peut donc obtenir la luminance pondérée L_B en multipliant la luminance énergétique L_e par le facteur B :

$$L_B = B.L_e \quad (6)$$

Le facteur de pondération B représente la fraction de luminance énergétique d'une source contribuant au risque photobiologique lié à la lumière bleue. Le facteur B ne dépend que du spectre de la source considérée $S(\lambda)$ et du spectre d'action $B(\lambda)$ dont les valeurs sont tabulées et données dans la norme NF EN 62471.

1.2 DÉTERMINATION DU CHAMP DE VISION EFFECTIF EN FONCTION DES DURÉES D'EXPOSITION

La figure 1 présente les principaux paramètres décrivant les conditions d'observation d'une LED.

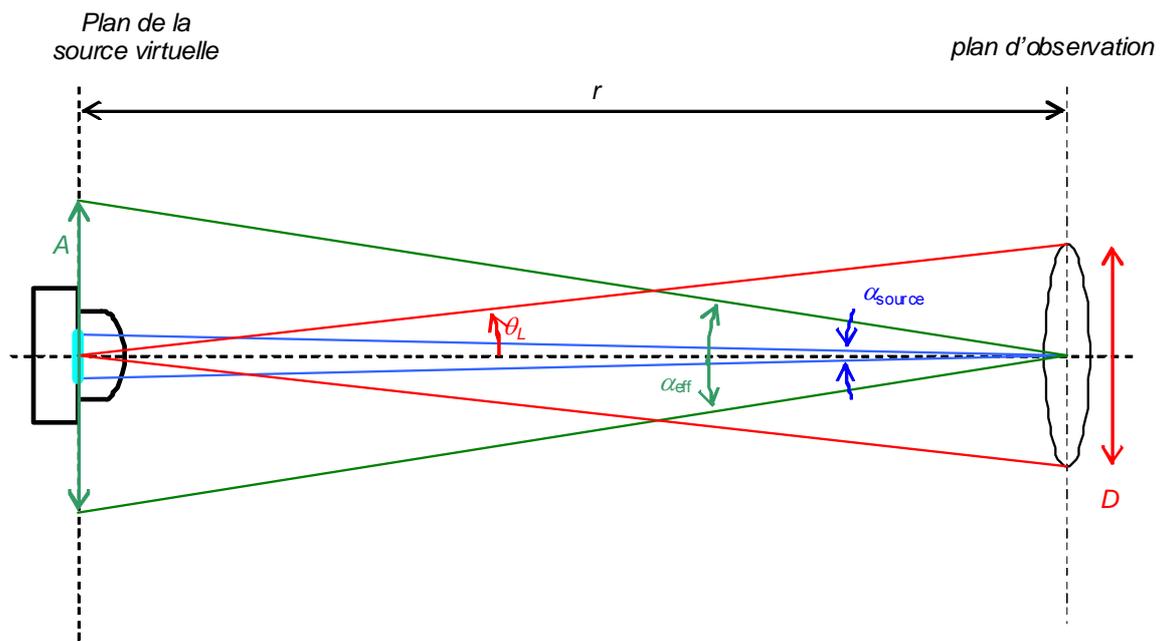


Figure 1 : Conditions d'observation pour l'évaluation de la luminance énergétique selon la norme NF EN 62471:2008

Les paramètres suivants doivent être précisément définis pour l'évaluation de risque :

- r : distance d'observation
- D : diamètre pupillaire
- θ_L : angle d'ouverture du faisceau lumineux entrant dans la pupille (angle d'incidence maximum sur la pupille)
- α_{source} : dimension angulaire propre de la source vue de l'observateur
- α_{eff} : champ de vision effectif
- A : surface effective d'intégration de la luminance de la source

Les mouvements de l'œil ont tendance à étaler l'image d'une source lumineuse produite sur la rétine. L'élargissement de l'image rétinienne se traduit par un champ de vision effectif qui augmente en fonction de la durée d'exposition t .

La luminance énergétique L_e doit être évaluée sur la surface d'émission A , correspondant au champ de vision effectif α_{eff} , ainsi que dans le cône angulaire défini par l'angle θ_L .

La norme NF EN 62471 donne les définitions suivantes pour calculer le champ de vision effectif à prendre en compte :

- pour t compris entre 0,25 s et 10 s, le champ de vision effectif est égal à $0,011 \cdot (t/10)^{1/2}$
- pour t compris entre 10 s et 100 s, le champ de vision effectif est égal à 0,011 rd
- pour t compris entre 100 s et 10 000 s, le champ de vision effectif est égal à $0,0011 \cdot t^{1/2}$
- pour $t \geq 10\,000$ s, le champ de vision effectif est égal à 0,1 rd

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

Quelle que soit la taille de la source, le champ de vision ne peut pas dépasser la limite supérieure de $\alpha_{\max} = 0,1$ rd, correspondant aux temps d'exposition supérieurs à 10 000 s.

1.3 RAPPEL DES LIMITES D'EXPOSITION DE LA NORME NF EN 62471 ET DES CLASSES DE RISQUES

Les limites d'exposition à la lumière bleue pour la rétine (LE) sont exprimées dans la norme NF EN 62471 en termes de luminance énergétique pondérée LB. Lorsque la durée d'exposition t est comprise entre 0,25 s (durée minimale d'exposition) et 10 000 s, la limite d'exposition est égale à $106/t$, e

Les groupes de risque de la norme NF EN 62471 sont définies par les conditions suivantes :

Groupe de risque 0 – sans risque : limite d'exposition atteinte pour des durées $\geq 10\,000$ s

Groupe de risque 1 – risque faible : limite d'exposition atteinte entre 100 s et 10 000 s

Groupe de risque 2 – risque modéré : limite d'exposition atteinte entre 0,25 s et 100 s

Groupe de risque 3 – risque élevé : limite d'exposition atteinte pour des durées $\leq 0,25$ s

1.4 MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DE RISQUE

Le schéma suivant présente les différentes étapes de l'évaluation du risque photobiologique lié à la lumière bleue émise par des LED.

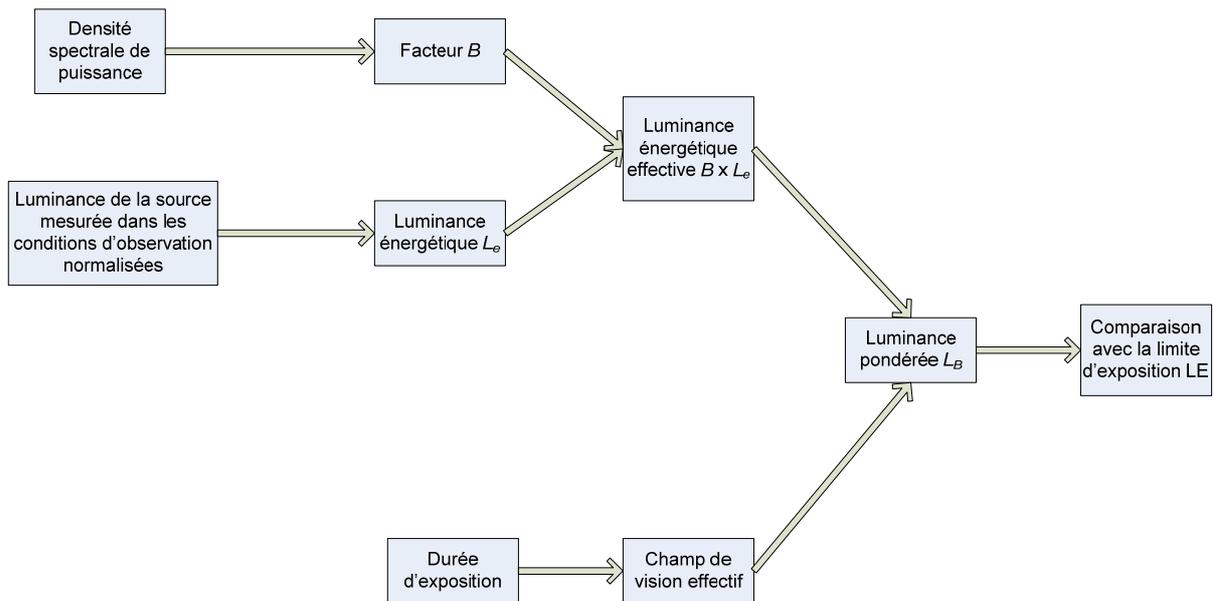


Figure 2 : Démarche schématique de l'évaluation de risque lié à la lumière bleue selon la norme NF EN 62471

2. APPLICATION À DES LED TYPE CMS SUBSTRAT CÉRAMIQUE

A titre d'exemple, l'évaluation de risque lié à la lumière bleue est effectuée pour les dernières générations de LED de format CMS (composant monté en surface), dont le substrat est en céramique et ne comportant qu'une seule puce.

Les références étudiées sont les suivantes :

- Bleu roi : cinq références correspondant chacune à des maxima d'émission compris entre 435 nm et 460 nm
- Blanc froid : onze références correspondant à des températures de couleurs proximales comprises entre 5100 K et 8400 K
- Blanc neutre : sept références correspondant à des températures de couleurs proximales comprises entre 3800 K et 4000 K

Les fichiers de mesures photométriques sont disponibles sur le site du fabricant. Ils sont fournis sous la forme de fichiers de rayons, exploitables notamment pour la conception de systèmes optiques. L'exploitation des mesures de champ proche est effectuée à l'aide du logiciel d'optique ZEMAX. A l'aide de ce logiciel, on génère les cartes de luminances correspondant à des zones et des champs angulaires spécifiés par l'utilisateur selon les préconisations de la norme NF EN 62 471. Blanc chaud : dix références correspondant à des températures de couleurs proximales comprises entre 2600 K et 3400 K

La taille de source apparente est de 1,4 mm x 1,4 mm (voir les figures 3a et 3b).

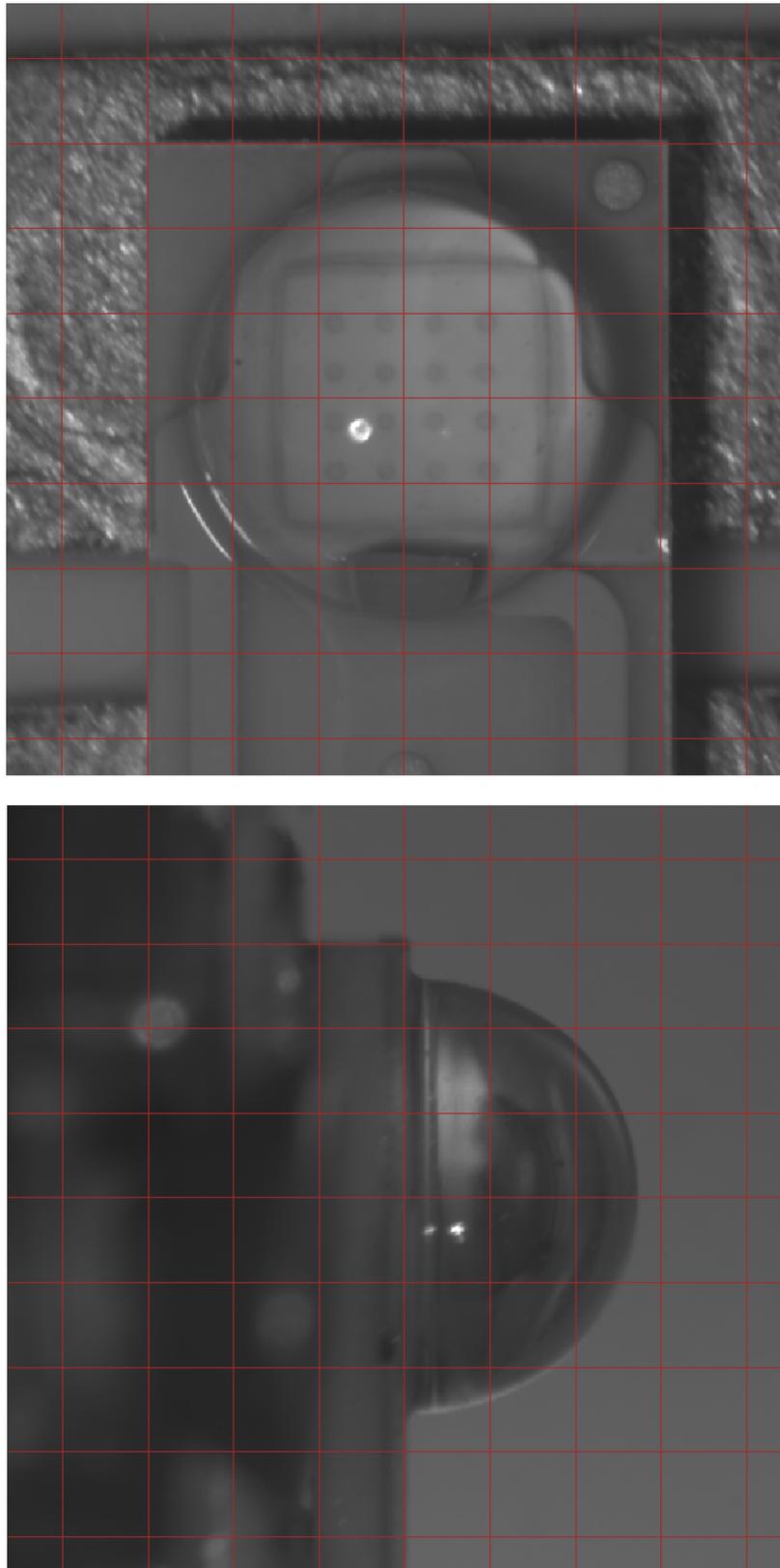


Figure 3a et b : Vues de face et de côté d'une LED blanc froid. L'échelle des photographies est donnée par la grille rouge dont chaque division mesure 0,5 mm de côté

2.1 CONDITIONS D'OBSERVATION

Dans cette partie, nous étudions la LED de manière individuelle, en tant que composant. Il est alors préconisé dans la norme de procéder à l'évaluation de risque pour une distance d'observation de $r = 200$ mm. On suppose par ailleurs que la LED est observée dans la direction de son axe optique, en incidence normale.

La dimension angulaire α_{source} de la source à la distance d'observation est de 0,007 rd. Le demi-angle θ_L sous-tendu par la pupille de diamètre $D = 7$ mm à 200 mm est de 1° .

La luminance énergétique sera évaluée dans le plan de la source puis intégrée sur la surface effective A et dans le cône angulaire défini par $\theta = 1^\circ$ de part et d'autre de l'axe d'observation.

2.2 SPECTRES LUMINEUX DES LED

La densité spectrale de flux des LED étudiées a été fournie par le fabricant avec un pas de 1 nm. Elles sont représentées sur les figures 4, 5 et 6. La fonction $B(\lambda)$ a également été représentée sur ces courbes afin de pouvoir évaluer de manière qualitative l'importance de l'énergie émise dans la bande spectrale à risque.

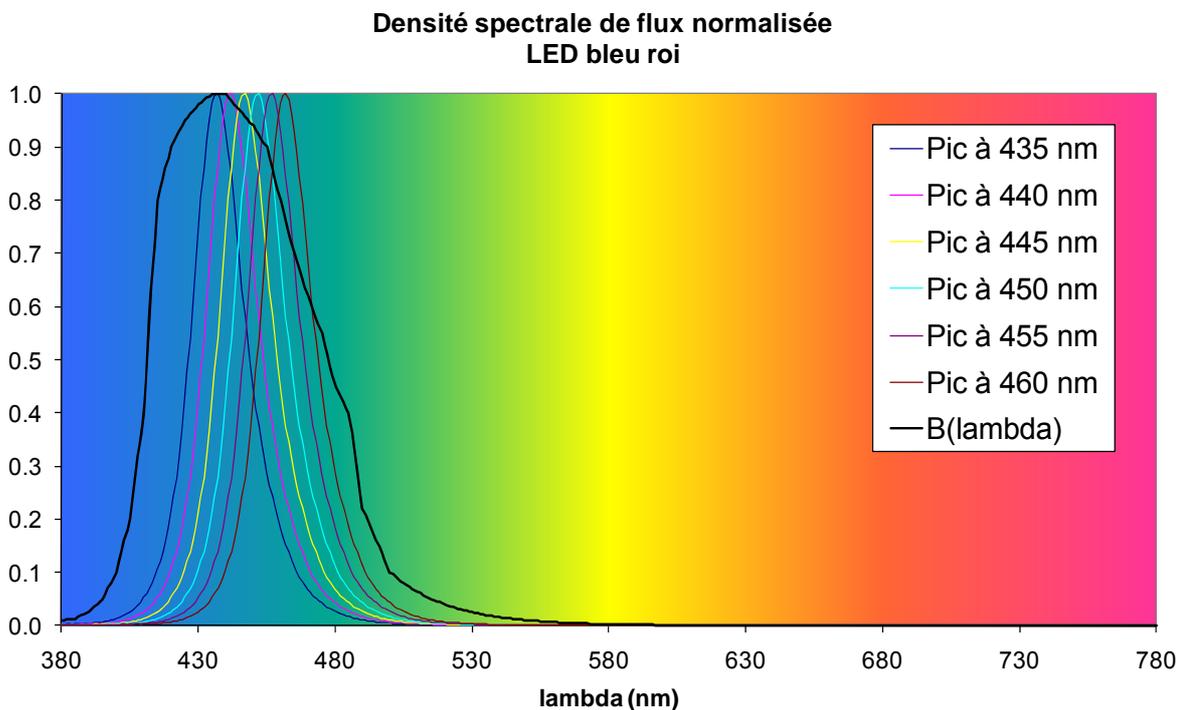


Figure 4 : Densité spectrale de flux normalisée pour les LED bleu roi. La courbe noire représente la fonction $B(\lambda)$

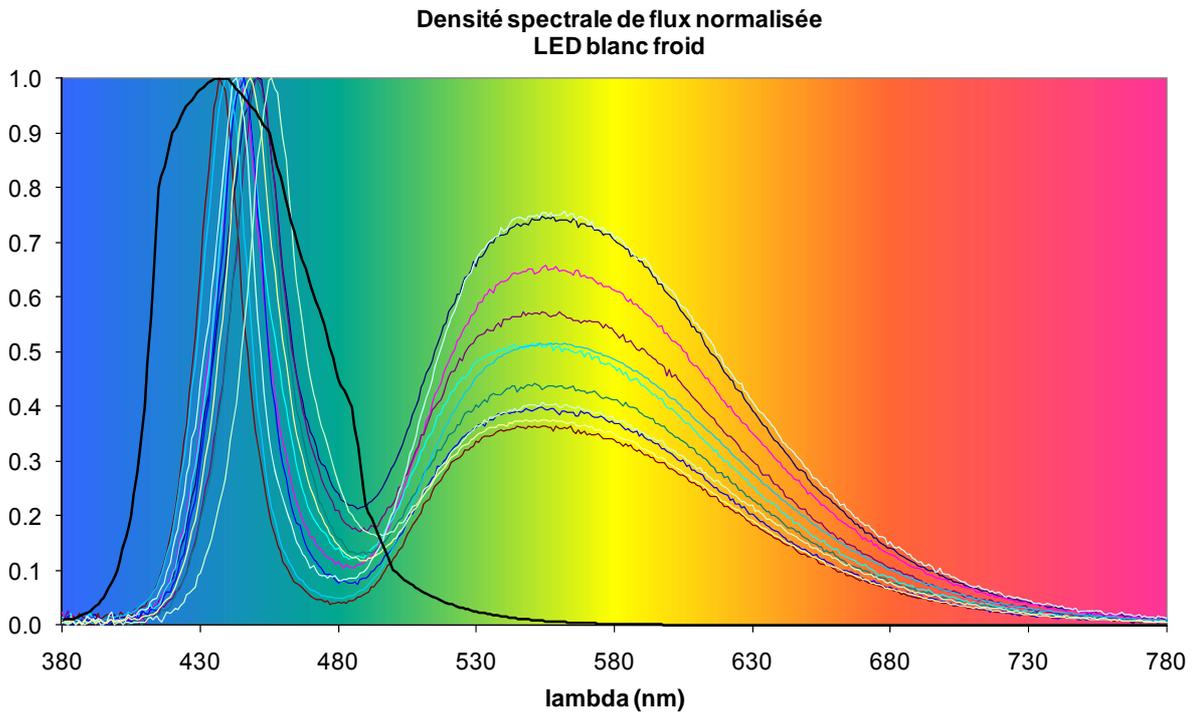


Figure 5 : Densité spectrale de flux normalisée pour les LED blanc froid. La courbe noire représente la fonction $B(\lambda)$

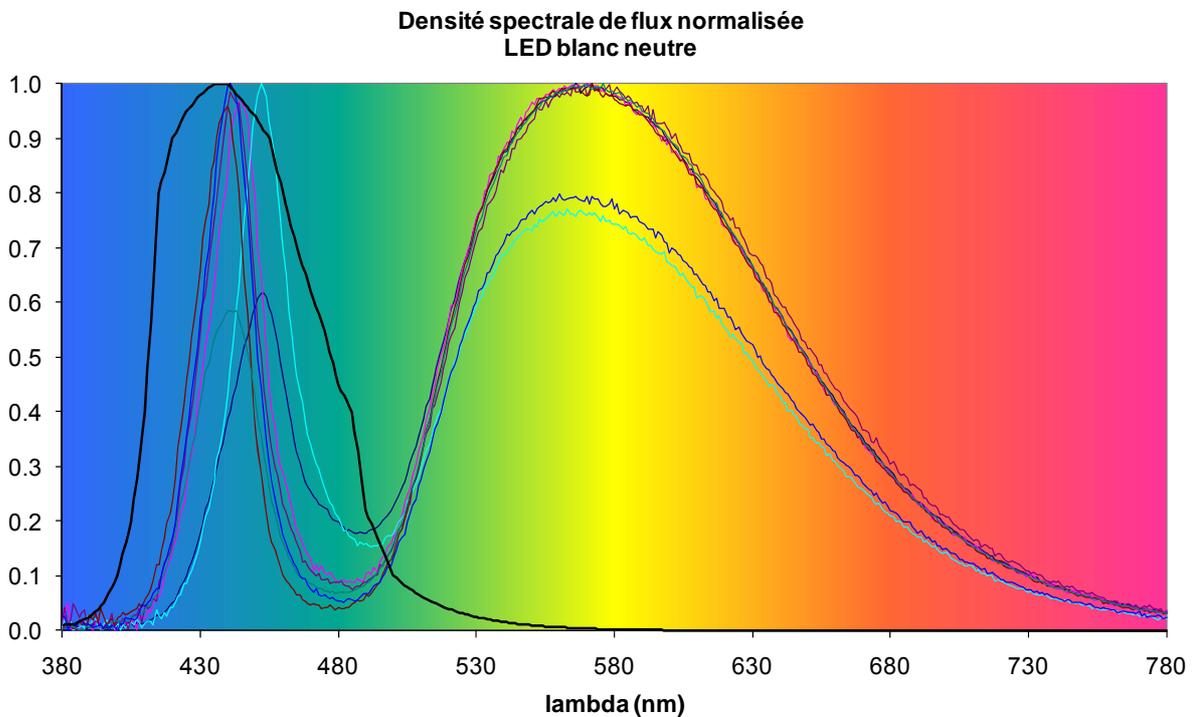


Figure 6 : Densité spectrale de flux normalisée pour les LED blanc neutre. La courbe noire représente la fonction $B(\lambda)$

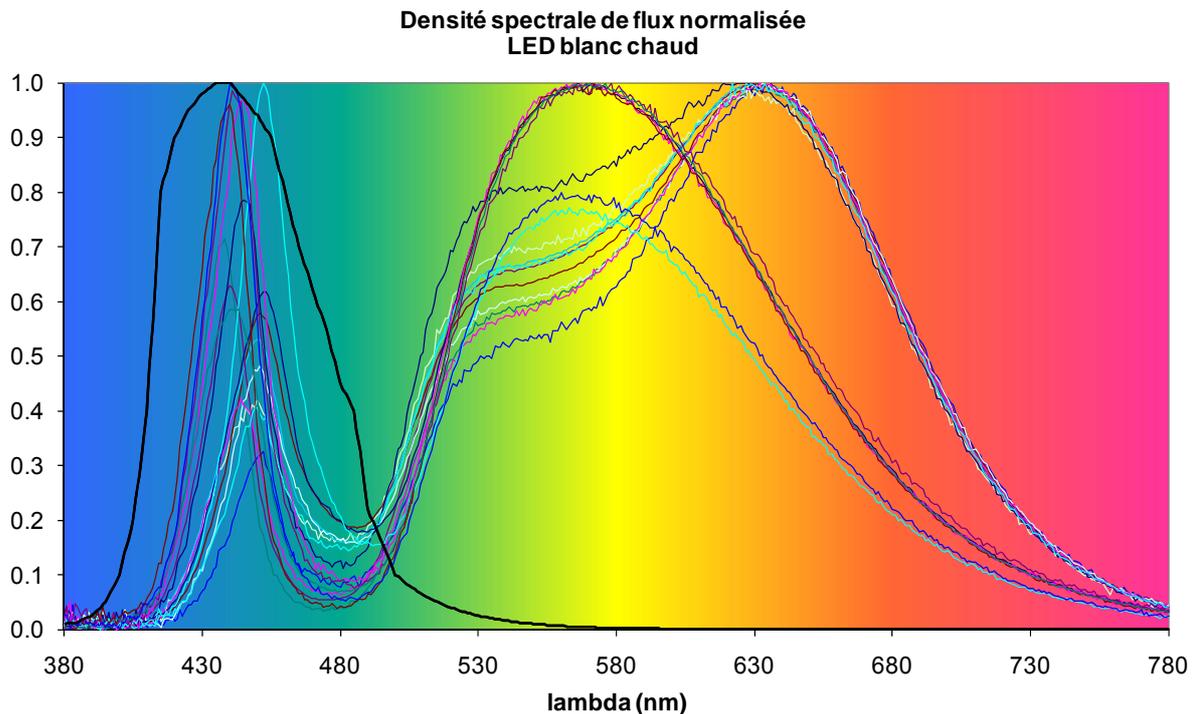


Figure 7 : Densité spectrale de flux normalisée pour les LED blanc chaud. La courbe noire représente la fonction $B(\lambda)$

2.3 CALCUL DU FACTEUR DE PONDÉRATION B

Le calcul du facteur B a été effectué par intégration numérique sur le domaine spectral 380-780 nm selon la formule (5), par pas de 1 nm. Les résultats obtenus pour les LED bleu roi sont présentés dans le tableau 1 et représentés graphiquement sur la figure 8. On constate une diminution régulière du facteur B avec la longueur d'onde d'émission maximale. Pour les LED bleu roi dont le maximum d'émission est inférieur à 440 nm, le facteur B est supérieur à 0,9, ce qui signifie qu'au moins 90% de l'énergie émise par ces LED contribue au risque à la lumière bleue.

Tableau 1 : Facteur B (part de la luminance énergétique contribuant au risque à la lumière bleue) pour les LED bleu roi

λ_{pic}	B
435 nm	0,92
440 nm	0,91
445 nm	0,88
450 nm	0,84
455 nm	0,78
460 nm	0,71

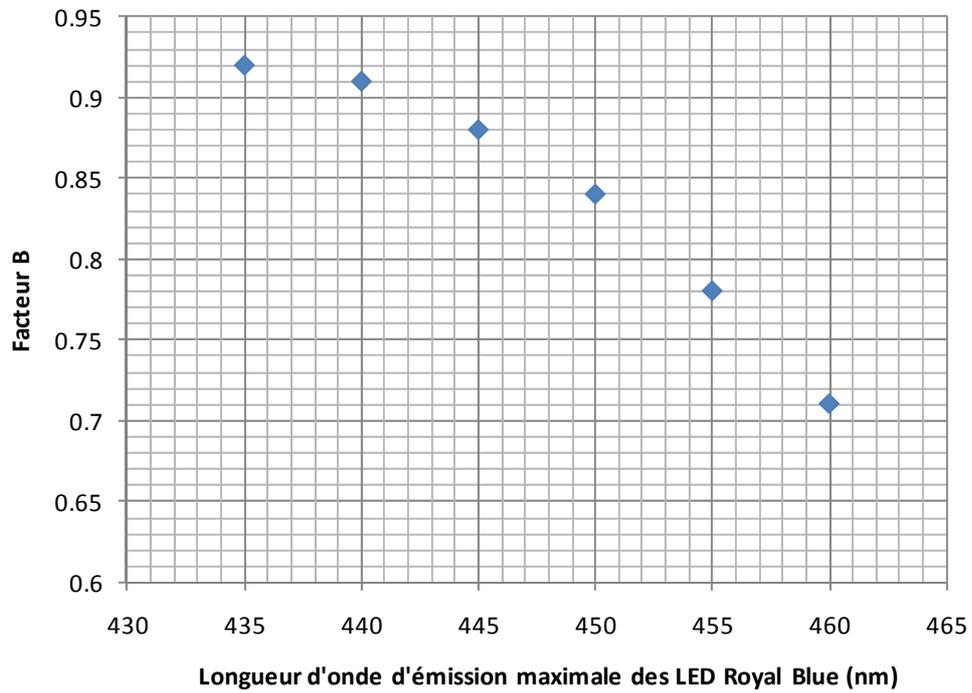


Figure 8 : Graphe montrant les valeurs du facteur B en fonction de la longueur d'onde d'émission maximale des LED bleu roi

Le tableau 2 présente les résultats obtenus sur l'ensemble des LED blanches, pour chaque température de couleur. La figure 9 présente graphiquement pour l'ensemble des LED blanches, l'évolution du facteur B en fonction de la température de couleur proximale. On constate une augmentation régulière du facteur B en fonction de la température de couleur proximale.

Tableau 2 : Facteur B (part de la luminance énergétique contribuant au risque à la lumière bleue) pour les LED blanches

<i>Catégorie</i>	<i>Température de couleur proximale (K)</i>	<i>Facteur B</i>
Cold White	5106	0,227
	5410	0,229
	6377	0,281
	5899	0,249
	6478	0,321
	6823	0,288
	6846	0,308
	5224	0,260
	4663	0,199
	7439	0,287
Neutral White	8411	0,330
	3793	0,121
	3893	0,159
	4439	0,187
	3728	0,158
	3598	0,120
	3729	0,152
Warm White	4054	0,189
	3381	0,113
	2732	0,074
	3006	0,075
	2930	0,086
	2945	0,093
	3098	0,097
	3084	0,100
	3117	0,086
	2786	0,100
2606	0,059	

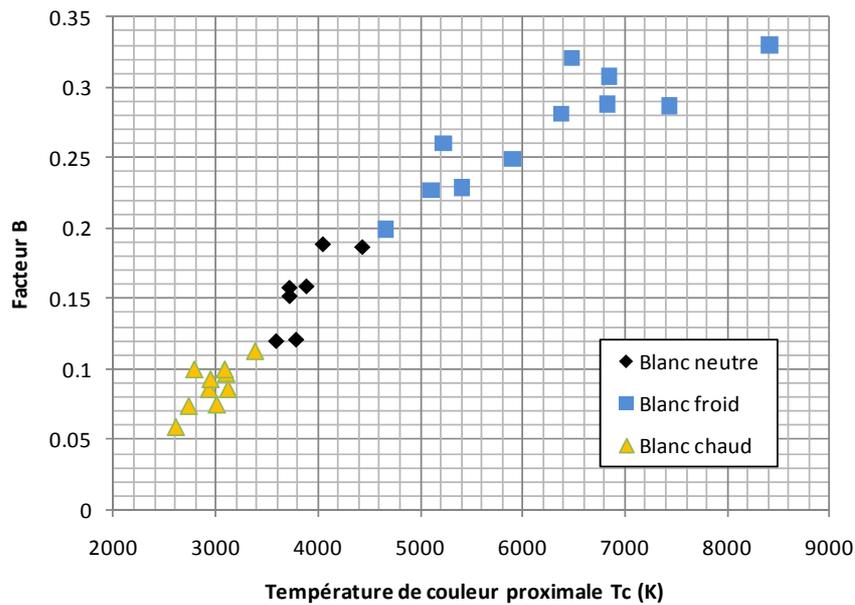


Figure 9 : Graphe montrant les valeurs du facteur B en fonction de la température de couleur proximale des LED blanches

2.4 CARTES DE LUMINANCE MESURÉES SUR LES LED

Les cartes de luminance ont été mesurées à l'aide d'un photogoniomètre en champ proche de marque Radiant Imaging, modèle SIG300.

2.4.1 LED BLEU ROI

Conditions d'alimentation de la LED :

- Tension et courant : 3.1 V et 350 mA en courant continu
- Puissance électrique mesurée : 1,08 W

Flux lumineux mesuré : 12 lm

Luminance moyenne de la surface du chip (1,4 mm x 1,4 mm) : 3,6 106 cd/m².

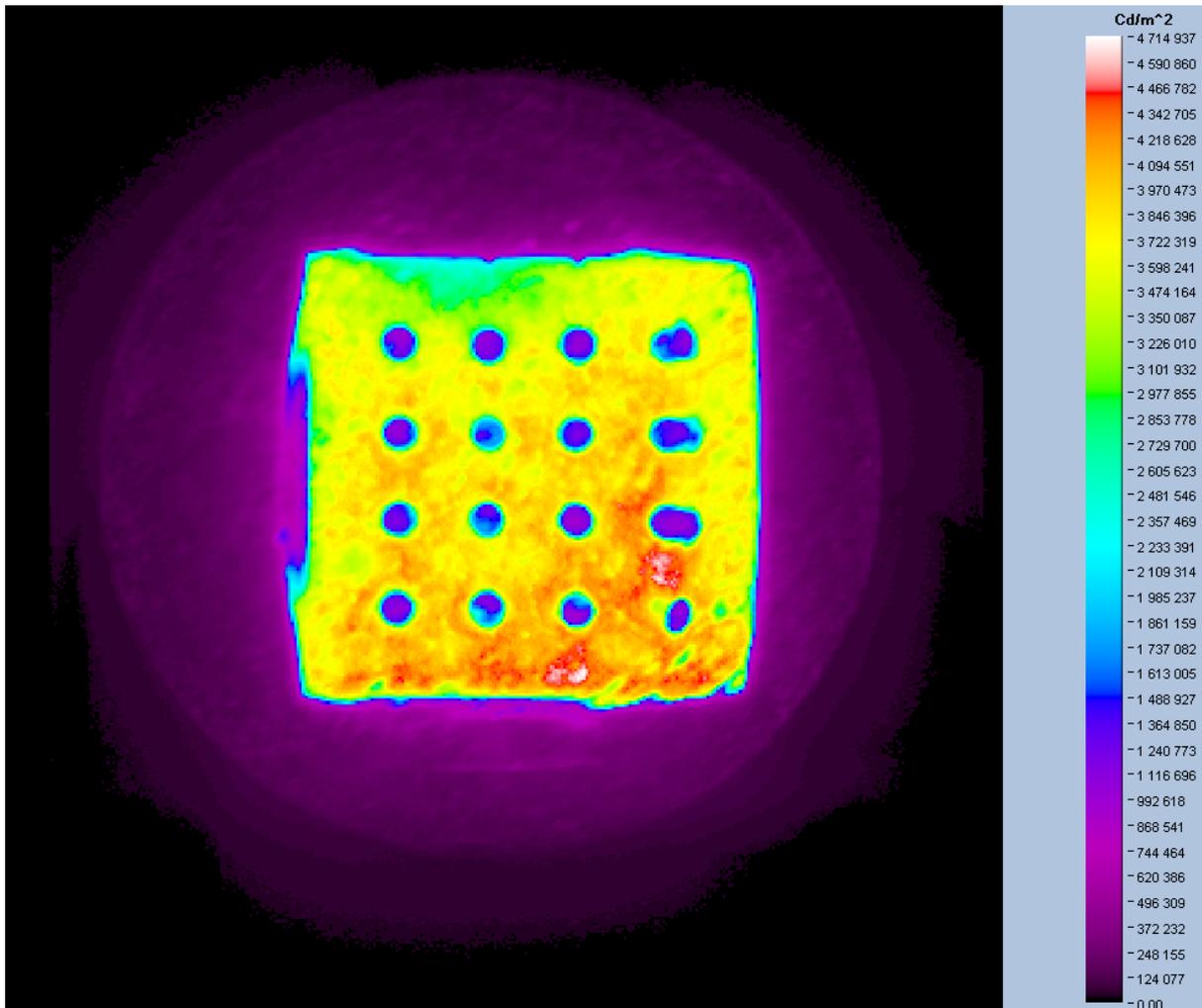


Figure 10 : Carte de luminance mesurée sur une LED bleu roi

On distingue assez nettement la structure interne de la puce de la LED, avec les zones sombres représentant les trous visibles dans la photographie de la figure 3a.

Pour chaque type de LED bleu roi, on peut calculer l'efficacité de rayonnement V , en lumen par watt, à l'aide la formule suivante :

$$V = \frac{\sum_{\lambda} S(\lambda)V(\lambda)}{\sum_{\lambda} S(\lambda)}$$

où $S(\lambda)$ est la densité spectrale de flux émis par la LED et $V(\lambda)$ est la sensibilité de l'œil en vision photopique, normalisée par la CIE. L'efficacité de rayonnement V permet de déduire le flux et la luminance énergétiques correspondant au flux lumineux de 12 lm.

On peut ensuite exprimer la luminance énergétique pour un flux énergétique fixé arbitrairement à 0,5 W, correspondant à la catégorie de flux (« radiometric flux bin ») moyenne spécifiée par le fabricant.

Quelle que soit la longueur d'onde dominante des LED bleu roi, on trouve alors que la luminance énergétique moyenne de la LED varie peu et est en moyenne égale à 150 000 Wm⁻²sr⁻¹. Le produit de la luminance énergétique par le facteur B varie quant à lui dans des proportions plus importantes, entre 106 000 et 138 000 Wm⁻²sr⁻¹. Les résultats sont reportés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Estimation de la luminance énergétique des LED bleu roi en fonction des valeurs mesurées de luminance et de flux lumineux

λ_{pic}	Efficacité de rayonnement (lm/W)	Flux énergétique pour 12 lm (W)	Luminance énergétique de la surface émissive pour un flux énergétique de 0,5 W (Wm ⁻² sr ⁻¹)	Produit B × L _e pour un flux énergétique de 0,5 W (Wm ⁻² sr ⁻¹)
435 nm	20	0,6	150 000	138 000
440 nm	25,5	0,47	150 200	136 682
445 nm	32	0,375	150 000	132 000
450 nm	39,8	0,3	150 750	126 630
455 nm	49,1	0,24	152 700	119 106
460 nm	60,3	0,20	149 250	105 968

2.4.2 LED BLANC FROID ET BLANC NEUTRE

Conditions d'alimentation de la LED :

- Tension et courant : 3 V et 350 mA en courant continu
- Puissance électrique mesurée : 1,05 W

Flux lumineux mesuré : 66,82 lm

Luminance moyenne de la surface du chip (1,4 mm x 1,4 mm) : 1,1 107 cd/m².

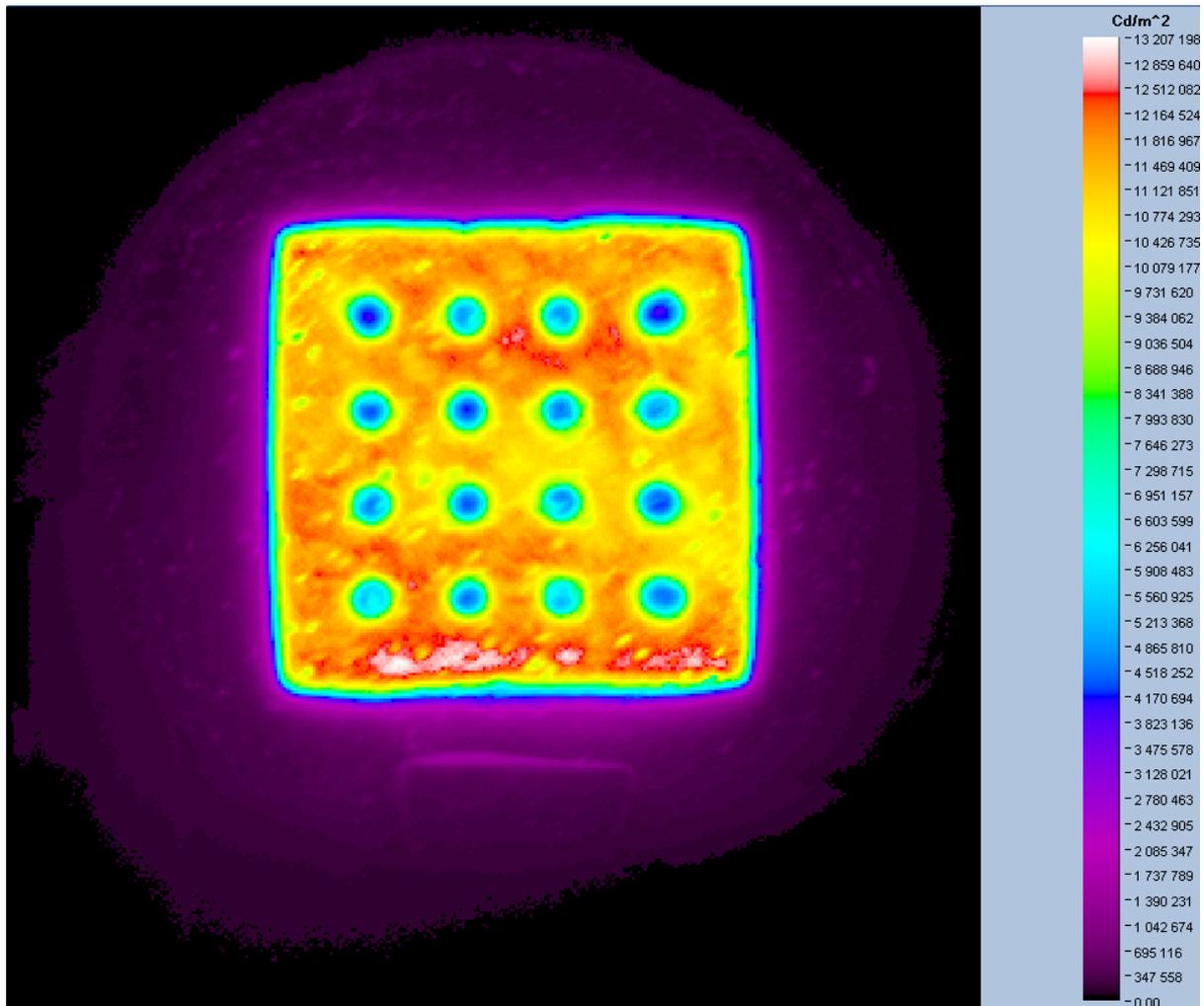


Figure 11 : Carte de luminance mesurée sur une LED blanc froid

Comme sur la LED bleu roi, on distingue assez nettement la structure interne de la puce de la LED, avec les zones sombres représentant les trous visibles dans la photographie de la figure 3b.

En considérant un flux lumineux ramené arbitrairement à 100 lm, correspondant à la catégorie de flux lumineux (« luminous flux bin ») moyenne spécifiée par le fabricant, la luminance de la surface émissive des LED blanc froid et blanc neutre est de 1,6 107 cd/m².

Comme pour les LED bleu roi, le spectre des LED blanc froid et blanc neutre permet de déterminer leur efficacité de rayonnement V. A partir de cette valeur, on peut calculer la luminance énergétique correspondant au flux lumineux de 100 lm. On trouve alors que la luminance énergétique varie entre 47 000 et 57 000 Wm⁻²sr⁻¹. Pour les LED blanc froid, le produit de la luminance énergétique par le facteur B varie entre 9000 et 19 000 Wm⁻²sr⁻¹. Pour les LED blanc neutre, le produit de la luminance énergétique par le facteur B varie entre 5600 et 9500 Wm⁻²sr⁻¹. Les résultats sont reportés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Estimation de la luminance énergétique des LED blanc froid et blanc neutre en fonction des valeurs mesurées de luminance et de flux lumineux

Catégorie	Température de couleur proximale (K)	Efficacité de rayonnement (lm/W)	Luminance énergétique L_e de la surface émissive pour un flux lumineux de 100 lm ($Wm^{-2}sr^{-1}$)	Produit $B \times L_e$ pour un flux lumineux de 100 lm ($Wm^{-2}sr^{-1}$)
Cold White	5106	333	49 436	11222
	5410	330	49 885	11424
	6377	313	52 595	14779
	5899	321	51 284	12770
	6478	297	55 428	17792
	6823	304	54 152	15596
	6846	303	54 330	16734
	5224	321	51 284	13334
	4663	348	47 305	9414
	7439	295	55 804	16016
Neutral White	8411	286	57 560	18995
	3793	350	47 035	5691
	3893	339	48 561	7721
	4439	326	50 497	9443
	3728	332	49 585	7834
	3598	354	46 503	5580
	3729	343	47 995	7295
	4054	329	50 037	9457

2.4.3 LED BLANC CHAUD

Conditions d'alimentation de la LED :

- Tension et courant : 3.5 V et 350 mA en courant continu
- Puissance électrique mesurée : 1,23 W

Flux lumineux mesuré : 52,21 lm

Luminance moyenne de la surface du chip (1,4 mm x 1,4 mm) : 6,2 106 cd/m².

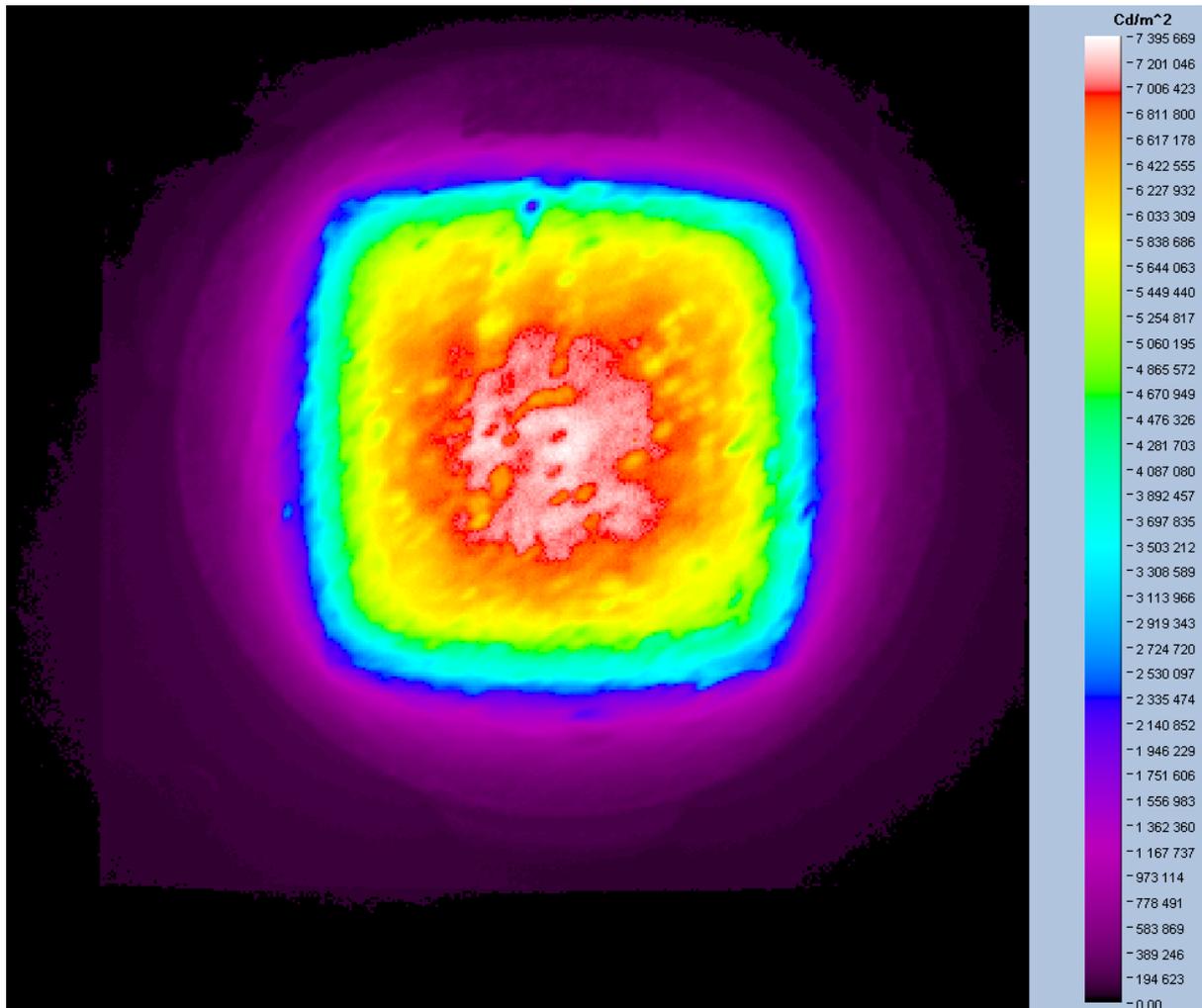


Figure 12 : Carte de luminance mesurée sur une LED blanc chaud

On constate sur la figure 12 qu'il n'est plus possible de distinguer la structure interne de la puce de la LED en raison de la diffusion optique dans la couche de luminophores.

En considérant un flux lumineux ramené arbitrairement à 100 lm, correspondant à la catégorie de flux lumineux (« luminous flux bin ») moyenne spécifiée par le fabricant, la luminance de la surface émissive des LED blanc chaud est de 1,1 107 cd/m^2 .

Comme pour les LED bleu roi, le spectre des LED blanc chaud permet de déterminer leur efficacité de rayonnement V. A partir de cette valeur, on peut calculer la luminance énergétique correspondant au flux lumineux de 100 lm. On trouve alors que la luminance énergétique varie entre 37 000 et 42 000 $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$. Le produit de la luminance énergétique par le facteur B donne des valeurs bien plus faibles que pour les LED bleu roi, blanc froid et blanc neutre, variant entre 2500 et 4300 $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$. Les résultats sont reportés dans le tableau 5.

Tableau 5 : Estimation de la luminance énergétique des LED blanc chaud en fonction des valeurs mesurées de luminance et de flux lumineux

Catégorie	Température de couleur proximale (K)	Efficacité de rayonnement (lm/W)	Luminance énergétique L_e de la surface émissive pour un flux lumineux de 100 lm ($Wm^{-2}sr^{-1}$)	Produit $B \times L_e$ pour un flux lumineux de 100 lm ($Wm^{-2}sr^{-1}$)
Warm White	3381	289	38 062	4301
	2732	270	40 741	3015
	3006	282	39 007	2926
	2930	267	41 198	3543
	2945	276	37 162	3456
	3098	275	40 000	3880
	3084	267	41 198	4120
	3117	284	38 732	3331
	2786	265	41 509	4151
	2606	263	41 825	2468

2.4.4 CALCUL DES CHAMPS DE VISION ET DES SURFACES EFFECTIVES À CONSIDÉRER POUR CALCULER LA LUMINANCE PONDÉRÉE L_B

Les valeurs de luminances énergétiques déterminées ci-dessus sont à intégrer spatialement sur la surface A correspondant au champ de vision effectif, lui-même dépendant de la durée d'exposition. On peut calculer le rapport k entre la surface émissive, égale à 1,96 mm², et la surface effective visée. Lorsque ce rapport est inférieur à 1, le champ de vision effectif est plus large que la source elle-même. Dans ce cas, la luminance pondérée L_B à prendre en compte pour le calcul des limites d'exposition sera la luminance énergétique moyenne multipliée par k . Sinon, dans le cas où k est supérieur à 1, le champ de vision effectif est plus petit que la source. Alors, la luminance pondérée L_B sera égale au produit $B \times L_e$ qui a été évalué dans les tableaux précédents.

$$L_B = k \times B \times L_e \quad \text{si } k < 1$$

$$L_B = B \times L_e \quad \text{si } k \geq 1$$

Les tableaux 6a à 6d présentent les résultats obtenus pour des temps d'exposition variant entre 0,25 s et 10 000 s.

Tableau 6a, 6b, 6c et 6d : Valeurs du champ de vision effectif, du rayon effectif et du rapport k en fonction des durées d'exposition

Durée d'exposition (s)	Champ de vision effectif α_{eff} (rd)	Rayon de la surface visée à 200 mm (mm)	$k = \frac{\text{surface émissive}}{\text{surface effective}}$
0,25	0,0017	0,17	20,62
0,5	0,0025	0,25	10,31
0,75	0,0030	0,30	6,87
1	0,0035	0,35	5,16
2	0,0049	0,49	2,58
3	0,0060	0,60	1,72
4	0,0070	0,70	1,29
5	0,0078	0,78	1,03
6	0,0085	0,85	0,86
7	0,0092	0,92	0,74
8	0,0098	0,98	0,64
9	0,0104	1,04	0,57
10	0,0110	1,10	0,52

Durée d'exposition (s)	Champ de vision effectif α_{eff} (rd)	Rayon de la surface visée à 200 mm (mm)	$k = \frac{\text{surface émissive}}{\text{surface effective}}$
10	0,0110	1,10	0,52
20	0,0110	1,10	0,52
30	0,0110	1,10	0,52
40	0,0110	1,10	0,52
50	0,0110	1,10	0,52
60	0,0110	1,10	0,52
70	0,0110	1,10	0,52
80	0,0110	1,10	0,52
90	0,0110	1,10	0,52
100	0,0110	1,10	0,52
10	0,0110	1,10	0,52
20	0,0110	1,10	0,52
30	0,0110	1,10	0,52

Durée d'exposition (s)	Champ de vision effectif α_{eff} (rd)	Rayon de la surface visée à 200 mm (mm)	$k_c = \frac{\text{surface émissive}}{\text{surface effective}}$
100	0,0110	1,10	0,52
200	0,0156	1,56	0,26
300	0,0191	1,91	0,17
400	0,0220	2,20	0,13
500	0,0246	2,46	0,10
600	0,0269	2,69	0,09
700	0,0291	2,91	0,07
800	0,0311	3,11	0,06
900	0,0330	3,30	0,06
1000	0,0348	3,48	0,05
100	0,0110	1,10	0,52
200	0,0156	1,56	0,26
300	0,0191	1,91	0,17

Durée d'exposition (s)	Champ de vision effectif α_{eff} (rd)	Rayon de la surface visée à 200 mm (mm)	$k_c = \frac{\text{surface émissive}}{\text{surface effective}}$
1000	0,0348	3,48	0,052
2000	0,0492	4,92	0,026
3000	0,0602	6,03	0,017
4000	0,0696	6,96	0,013
5000	0,0778	7,78	0,010
6000	0,0852	8,53	0,009
7000	0,0920	9,21	0,007
8000	0,0984	9,85	0,006
9000	0,1044	10,44	0,006
10000	0,1100	11,01	0,005
1000	0,0348	3,48	0,052
2000	0,0492	4,92	0,026
3000	0,0602	6,03	0,017

On peut donc calculer, pour chaque référence de LED, la luminance LB en fonction de la durée d'exposition et tracer les graphes correspondants. La limite d'exposition LE est également représentée graphiquement de manière à déduire la durée maximale d'exposition, ce qui permet de déterminer la classe de risque. Les résultats obtenus pour les LED bleu roi, blanc froids, blanc neutre et blanc chaud sont donnés sur les figures 13 à 18.

On remarque que les courbes présentent une allure commune : un premier plateau, suivi d'une pente négative, suivie par un deuxième plateau, lui-même suivi par une décroissance en 1/t. Le premier plateau apparaît en raison du champ de vision effectif qui reste plus petit que la source elle-même. La

première pente correspond au champ de vision qui devient plus grand que la source, ce qui conduit à une diminution de la luminance pondérée en $1/t$. Le second plateau correspond à l'intervalle de temps 10 s – 100 s durant lequel le champ de vision effectif est constant. Au-delà de 100 s, la surface correspondant au champ de vision effectif diminue en $1/t$.

2.5 RÉSULTATS ET ANALYSES

2.5.1 RÉSULTATS POUR LES LED BLEU ROI

Pour les LED bleu roi émettant un flux énergétique de 0.5 W, les limites d'exposition sont dépassées au-delà de 15 à 20 s, selon le spectre de la LED considérée. Pour ces LED, la norme NF EN 62471 abouti au groupe de risque 2 : risque modéré (présente un risque pendant l'utilisation normale).

Notons que les LED bleu roi sont disponibles dans des gammes de flux énergétique atteignant 1 W. Pour ce niveau de flux, les durées limites d'exposition sont comprises entre 3 s et 4 s. Le groupe de risque associé est toujours le groupe de risque 2 mais ces durées limites sont particulièrement courtes au vue de l'usage courant de ces LED. La figure 14 présente les résultats de l'analyse des LED bleu roi pour un flux de 1 W.

L'analyse montre que les LED bleu roi, dont les puces sont de l'ordre de 1 mm^2 , devraient atteindre un flux énergétique de 15 W pour que la durée limite d'exposition soit égale à 0,25 s et qu'elles soient classées dans le groupe de risque 3 (risque élevé). Il ne semble pas raisonnable d'envisager dans les prochaines années que des LED atteignent un tel niveau de flux.

A l'inverse, il est possible de déterminer le flux énergétique maximal des LED bleu roi pour que la durée limite d'exposition soit supérieure ou égale à 100 s. On obtient ainsi un flux maximal de 70 mW pour la LED émettant avec un pic à 435 nm. En limitant le flux à 70 mW, toutes les LED bleu roi étudiées ici appartiennent au groupe de risque 1.

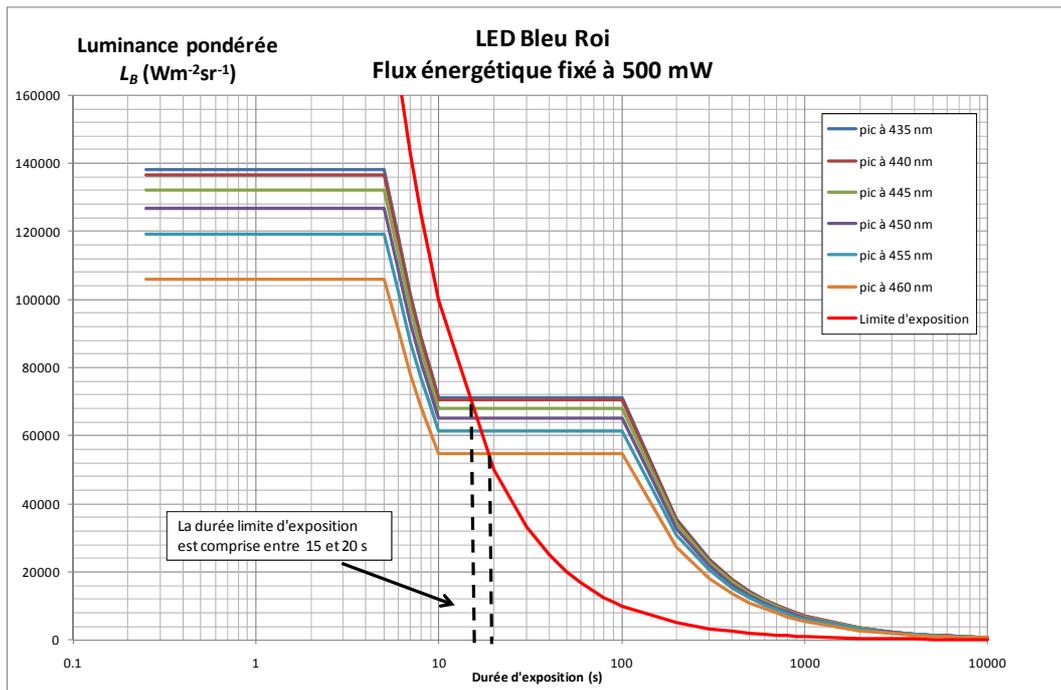


Figure 13 : Graphe indiquant l'évolution de la luminance pondérée L_B des LED bleu roi en fonction du temps d'exposition pour un flux énergétique de 500 mW. La limite d'exposition est représentée par le trait plein de couleur rouge

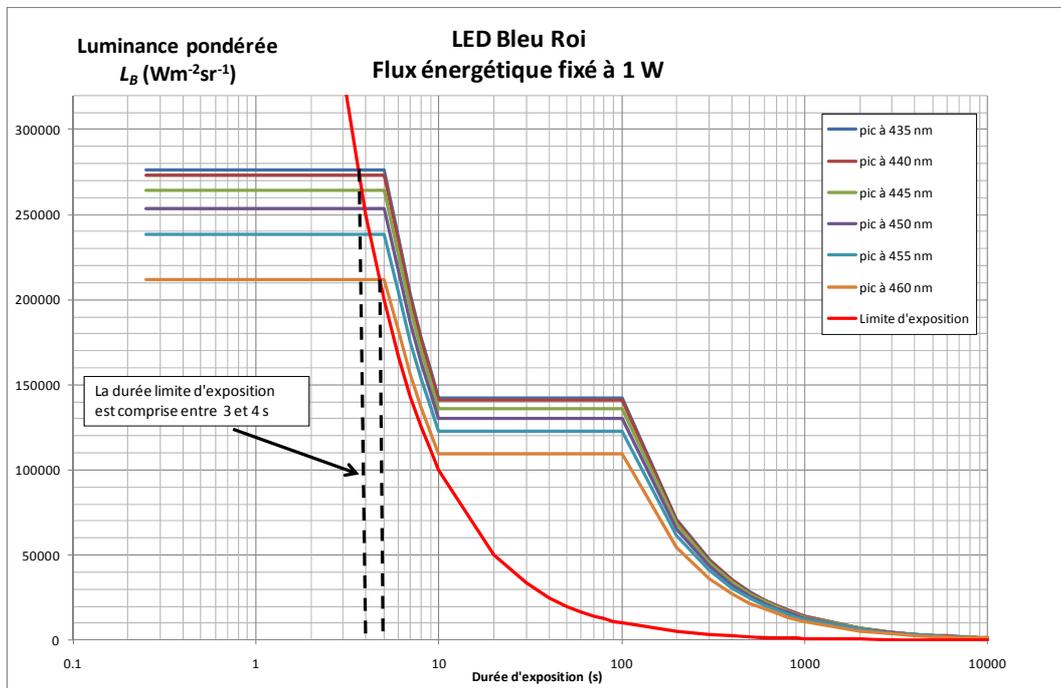


Figure 14 : Graphe indiquant l'évolution de la luminance pondérée L_B des LED bleu roi en fonction du temps d'exposition pour un flux énergétique de 1W. La limite d'exposition est représentée par le trait plein de couleur rouge

2.5.2 RÉSULTATS POUR LES LED BLANC FROID

Pour les LED blanc froid émettant un flux lumineux de 100 lm, les durées limites d'exposition ne sont jamais atteintes avant 10 000 s. Ces LED se situent donc dans le groupe de risque 0 (sans risque). Par contre, ces LED sont disponibles avec des flux lumineux de 200 lm, et parfois même atteignant les 300 lm. Pour un flux fixé à 200 lm, l'analyse conduit au graphe de la figure 16. Les limites d'exposition sont dépassées pour des durées comprises entre 40 s et 100 s, ce qui conduit à classer ces LED dans le groupe de risque 2 (risque modéré).

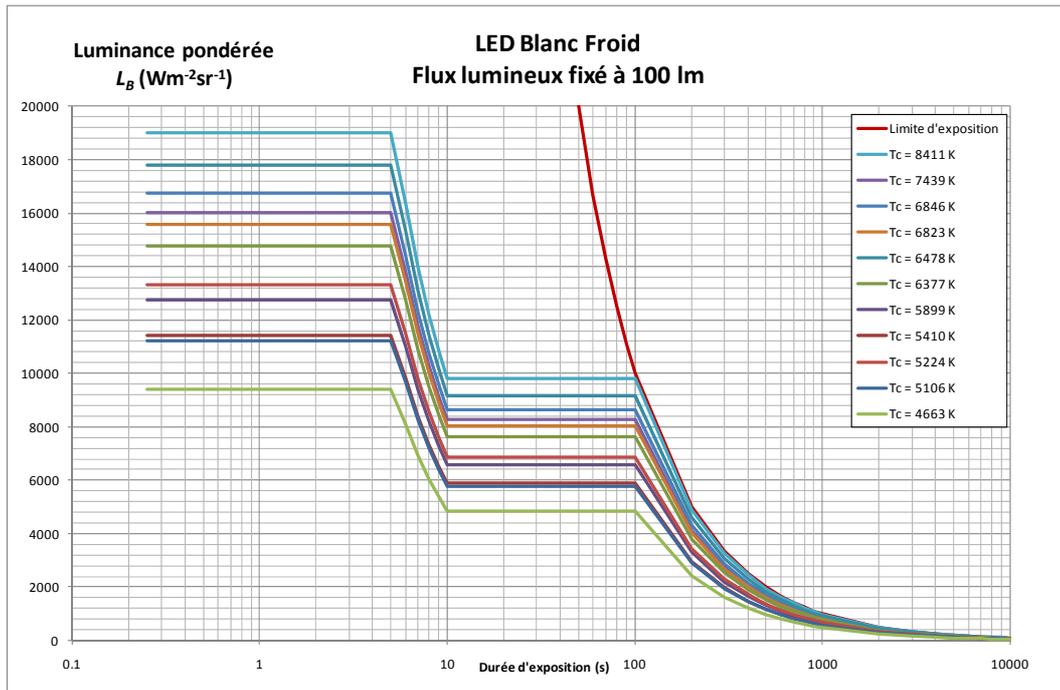


Figure 15 : Graphe indiquant l'évolution de la luminance pondérée L_B des LED blanc froid en fonction du temps d'exposition, pour un flux lumineux de 100 lm. La limite d'exposition est représentée par le trait plein de couleur rouge

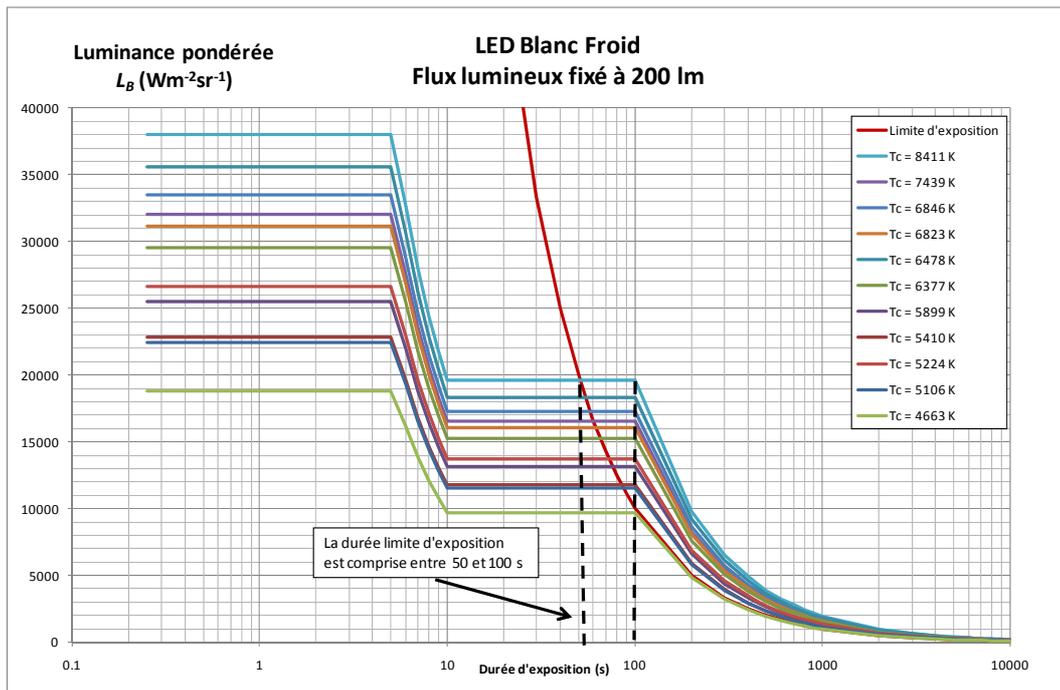


Figure 16 : Graphe indiquant l'évolution de la luminance pondérée L_B des LED blanc froid en fonction du temps d'exposition, pour un flux lumineux de 200 lm. La limite d'exposition est représentée par le trait plein de couleur rouge

2.5.3 RÉSULTATS POUR LES LED BLANC NEUTRE

Pour les LED blanc neutre émettant un flux lumineux de 100 lm, les durées limites d'exposition ne sont jamais atteintes avant 10 000 s. Ces LED se situent donc dans le groupe de risque 0 (sans risque). Par contre, ces LED sont également disponibles avec des flux lumineux de 200 lm, et parfois même atteignant les 300 lm. Pour un flux fixé à 200 lm, l'analyse conduit au graphe de la figure 18. Les limites d'exposition sont atteintes à 100 s dans le cas des températures de couleur supérieures à 4000 K, ce qui conduit à classer ces LED dans le groupe de risque 1 (risque faible).

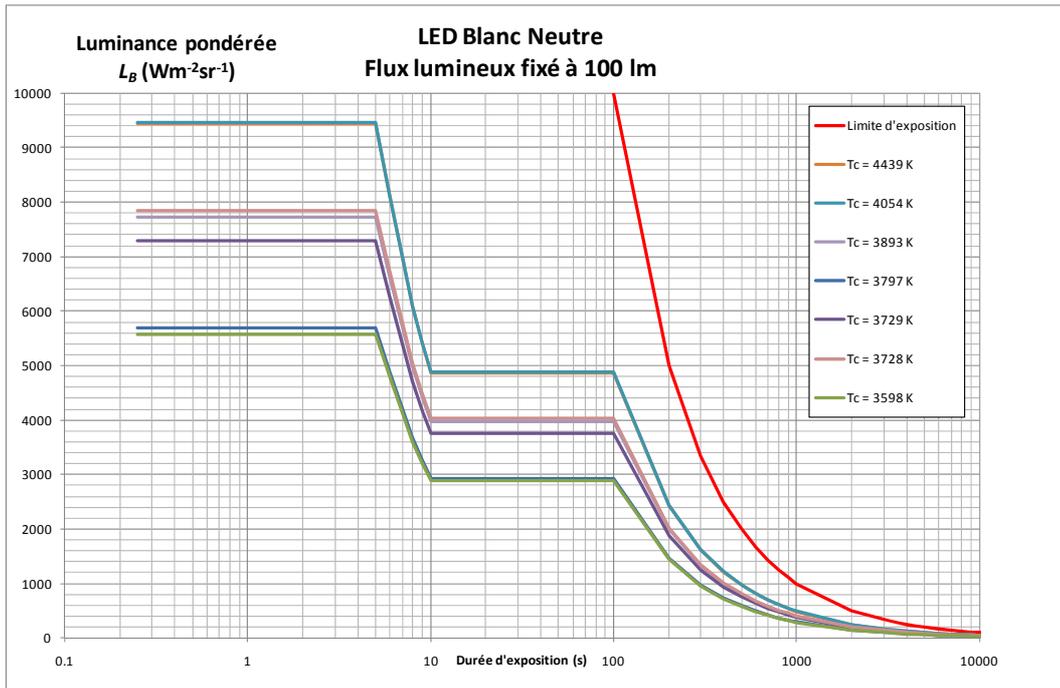


Figure 17 : Graphe indiquant l'évolution de la luminance pondérée L_B des LED blanc neutre en fonction du temps d'exposition, pour un flux lumineux de 100 lm. La limite d'exposition est représentée par le trait plein de couleur rouge

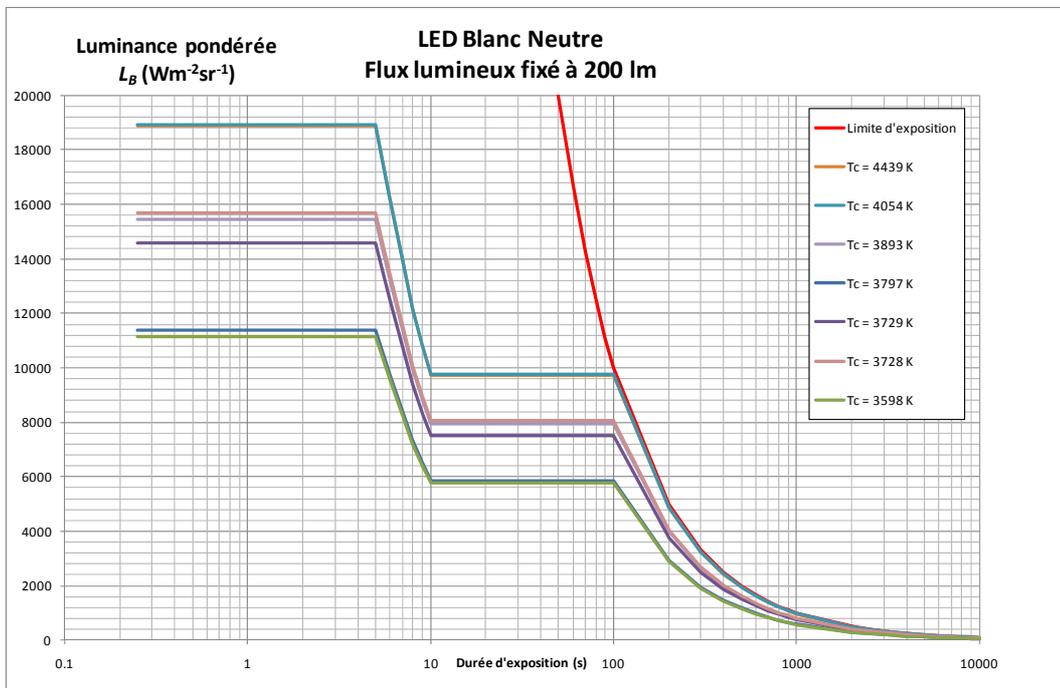


Figure 18 : Graphe indiquant l'évolution de la luminance pondérée L_B des LED blanc neutre en fonction du temps d'exposition, pour un flux lumineux de 200 lm. La limite d'exposition est représentée par le trait plein de couleur rouge

2.5.4 RÉSULTATS POUR LES LED BLANC CHAUD

Pour les LED blanc chaud émettant un flux lumineux de 100 lm, la limite d'exposition n'est jamais dépassée. La norme NF EN 62471 abouti au groupe de risque 0 : aucun risque. L'analyse montre que le flux lumineux des LED de température de couleur égale à 3400 K devrait atteindre 500 lm pour qu'elles soient classées dans le groupe de risque 1 (risque faible). Le flux lumineux des LED de température de couleur égale à 2600 K devrait atteindre quant à lui une valeur de 1000 lm pour appartenir au groupe de risque 1.

Ces flux lumineux en blanc chaud ne paraissent pas envisageables avec des puces de l'ordre de 1 mm² et les technologies de luminophores actuelles. Tant que les flux lumineux n'auront pas quintuplé, voire décuplé, on peut donc raisonnablement éliminer tout risque photobiologique sur la rétine lié à la lumière bleue émise par les LED blanc chaud.

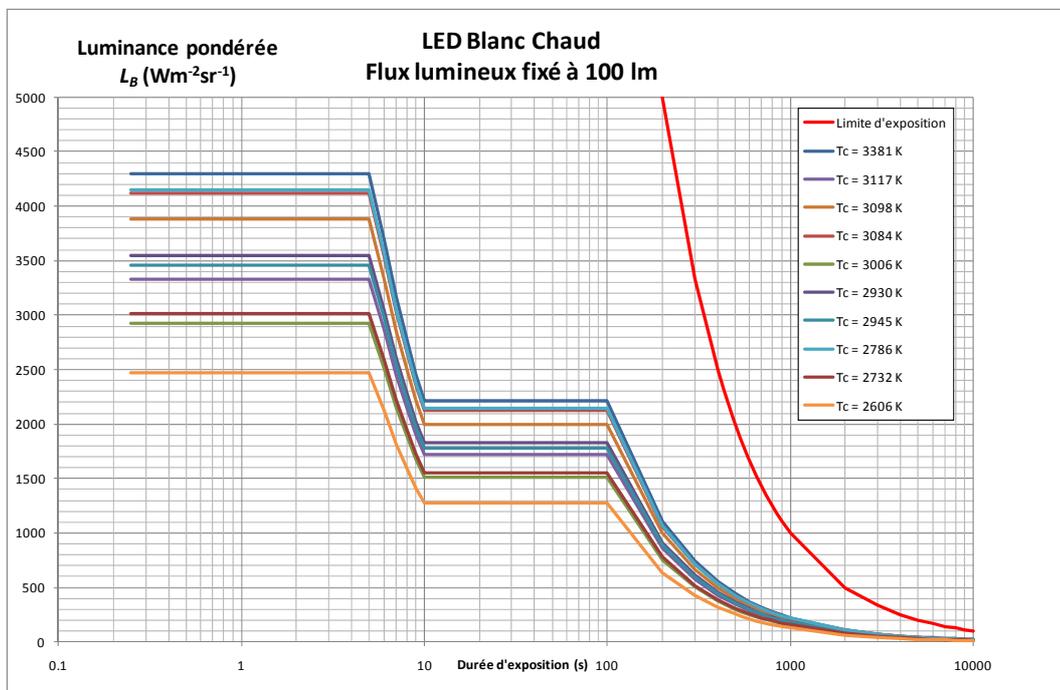


Figure 19 : Graphe indiquant l'évolution de la luminance pondérée L_b des LED blanc chaud en fonction du temps d'exposition, pour un flux lumineux de 200 lm. La limite d'exposition est représentée par le trait plein de couleur rouge

2.5.5 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

Le tableau 7 rassemble les résultats obtenus pour les différents types de LED et les flux considérés.

Tableau 6 : Résultats de l'analyse de risque sur la rétine lié à la lumière bleue émise par des LED au format CMS, substrat céramique, à puce de 1,4 mm x 1,4 mm

Type de LED	Flux	Durée limite d'exposition	Groupe de risque	Recommandation Marquage CEI/TR 62471-2
Bleu roi	0,07 W	100 s à 10 000 s	1 : risque faible	Non exigé
	0,5 W	15 à 20 s	2 : risque modéré	Ne pas regarder la source en utilisation normale. Peut être dangereux pour les yeux
	1 W	3 à 4 s	2 : risque modéré	
Blanc froid	100 lm	non atteinte	0 : sans risque	Non exigé
	200 lm	50 à 100 s	2 : risque modéré	Ne pas regarder la source en utilisation normale. Peut être dangereux pour les yeux
Blanc neutre	100 lm	non atteinte	0 : sans risque	Non exigé
	200 lm	100 s à 10 000 s	1 : risque faible	
Blanc chaud	100 lm	non atteinte	0 : sans risque	Non exigé
	200 lm			

Les LED étudiées ici correspondent aux dernières générations de LED monopuces. Parmi ces LED, aucune ne présente un risque élevé (groupe de risque 3), correspondant à une durée limite d'exposition inférieures à 0,25 s. Par contre, les LED bleu roi et blanc froid peuvent appartenir au groupe de risque 2 (risque modérée) selon leur niveau de flux. Les LED blanc neutres peuvent appartenir au groupe de risque 1 (risque faible) selon leur température de couleur et leur flux lumineux. Les LED blanc chaud étudiées ici ne présentent aucun risque (groupe de risque 0), quels que soient leur température de couleur et leur flux lumineux.

3. EVALUATION DE RISQUE EN PRÉSENCE D'UNE MATRICE DE LED BLANCHES

L'objectif de cette partie est de considérer un ensemble de LED blanches disposées de manière régulière sous la forme d'une matrice de N x N éléments. Cette disposition est un exemple d'utilisation simple de LED dans des lampes et des luminaires d'éclairage intérieur et extérieur. La figure 20 montre l'assemblage de LED considérée. Il s'agit ici d'une matrice carré. L'espacement entre les LED est de 5 mm dans les deux directions.

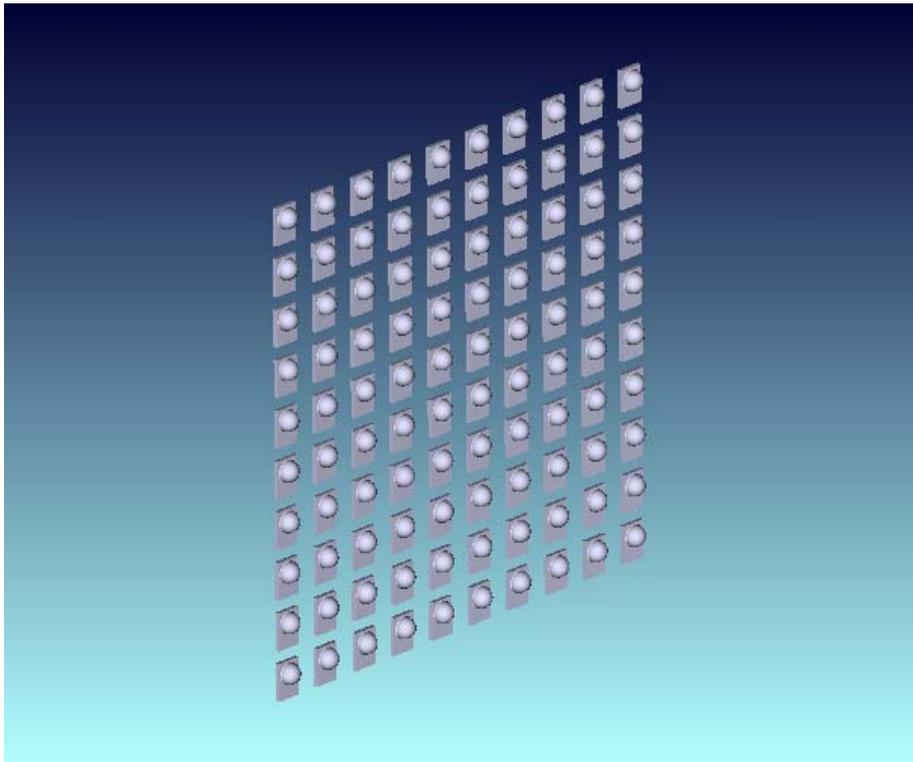


Figure 20 : Exemple d'assemblage régulier de 10 x 10 LED type SMD, de substrat céramique et à simple puce, étudiées dans la partie précédente

Le nombre de LED totale est N^2 . Il n'est pas fixé. En effet, nous déterminerons les durées limites d'exposition en fonction de ce nombre. L'évaluation de risque est faite ici en partant des luminances mesurées dans la partie précédente. Par contre, la distance d'observation est ici déterminée par l'éclairement donné par l'assemblé des LED. Conformément à la norme NF EN 62471, ce niveau d'éclairement est de 500 lux.

3.1 EVALUATION DE LA DISTANCE CORRESPONDANT À 500 LUX EN FONCTION DU NOMBRE DE LED

Si on suppose une observation dans l'axe des LED, la distance d_{500} à laquelle on obtient 500 lux peut s'approximer par la formule suivante :

$$d_{500} = N \sqrt{\frac{I_0}{500}}$$

où I_0 est l'intensité lumineuse de la LED dans son axe optique. En supposant que les LED aient un flux lumineux de 100 lm, l'intensité lumineuse correspondante est approximativement égale à 32 cd. La figure 21 montre l'évolution de la distance d'évaluation en fonction du nombre de LED.

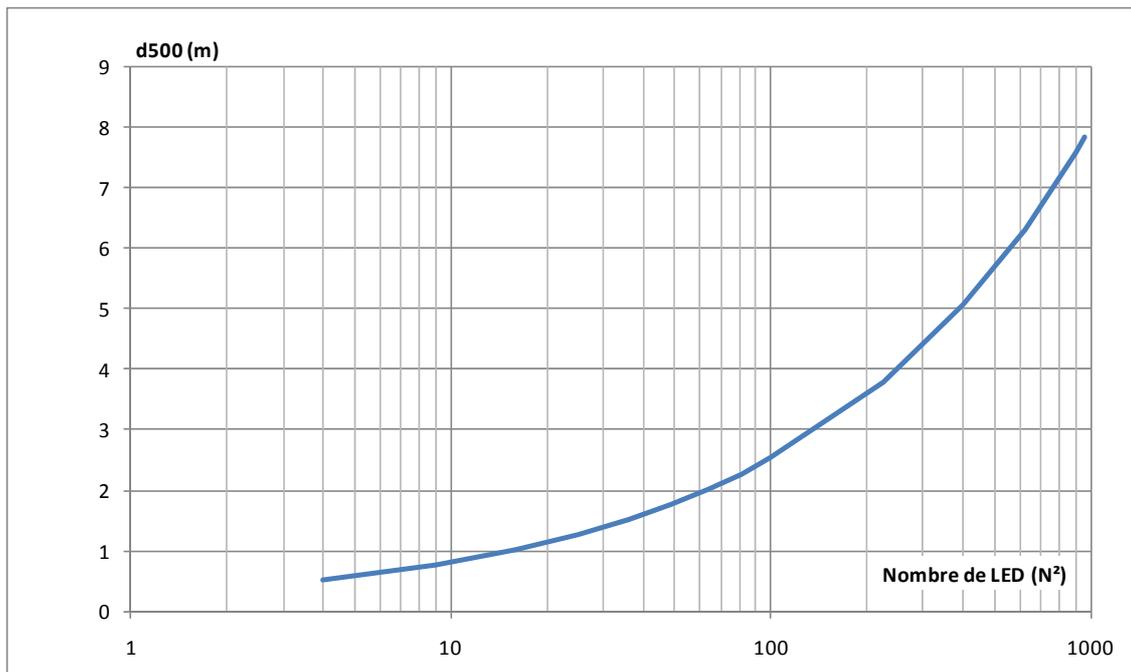


Figure 21 : Distance d'évaluation de risque correspondant à un éclairage de 500 lux

3.2 TAILLE DE LA SOURCE

Les dimensions d'une LED sont reportées dans la figure 22.

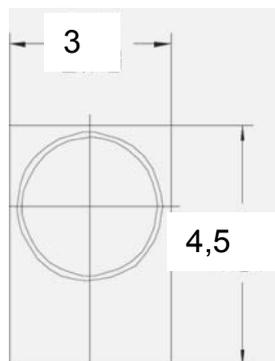


Figure 22 : Taille d'une LED

Sachant que les LED sont espacées de 6 mm selon les deux axes de la matrice, la plus grande distance H entre les zones lumineuses des LED est approximativement égale à $5 \times (N-1)$, exprimée en mm. Cette distance sera considérée comme la dimension linéaire de la source effective.

3.3 EVALUATION DE LA DIMENSION ANGULAIRE DE LA SOURCE EN FONCTION DU NOMBRE DE LED

La dimension angulaire de la source est calculée en fonction de sa taille et de la distance d'évaluation, à l'aide de la formule suivante :

$$\alpha_{\text{source}} = 2 \times \arctan \left(\frac{0,0025 \times (N - 1)}{d_{500}} \right)$$

La figure 23 montre l'évolution de la dimension angulaire de la source vue à la distance d'évaluation en fonction du nombre de LED considéré.

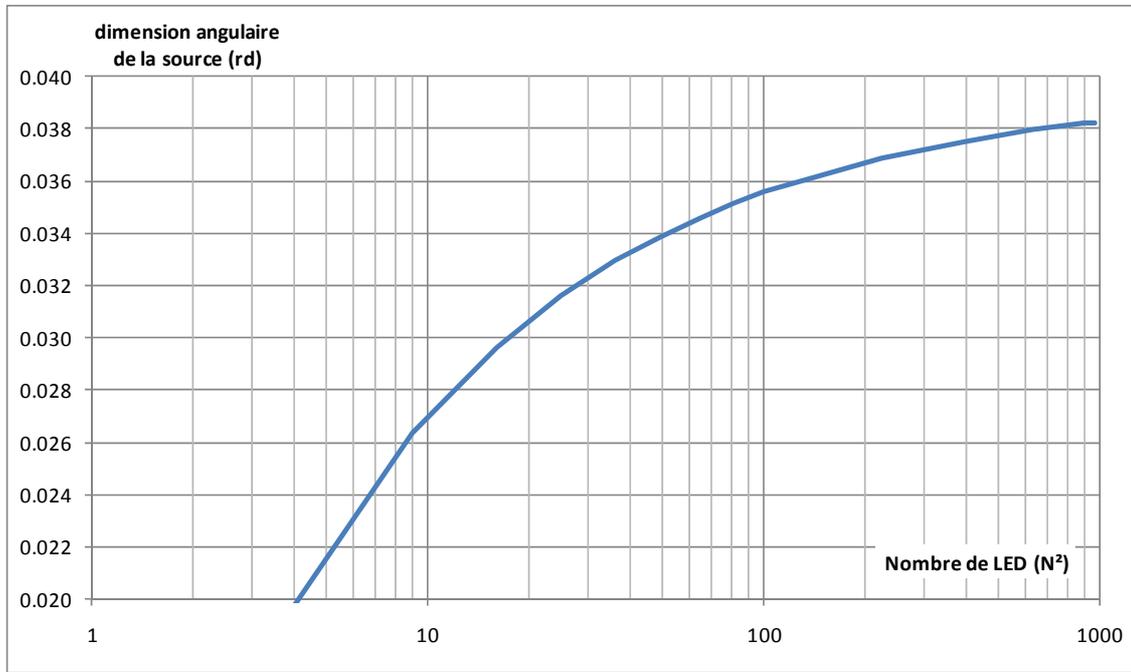


Figure 23 : Dimension angulaire de la matrice de LED vue à la distance d'évaluation d500 en fonction du nombre de LED

3.4 EVALUATION DE LA LUMINANCE PONDÉRÉE EN FONCTION DU NOMBRE DE LED DE LA MATRICE

On suppose que la luminance de la matrice est la luminance de la LED unique, multipliée par le rapport entre la surface effective d'émission de l'ensemble des LED et la surface totale effective de la matrice. Ce rapport q est donné par la formule suivante :

$$q = \frac{N^2 \pi (0,7)^2}{25(N - 1)^2} = 0,061 \left(\frac{N}{N - 1} \right)^2$$

L'évolution du facteur de pondération q est représentée sur la figure 24.

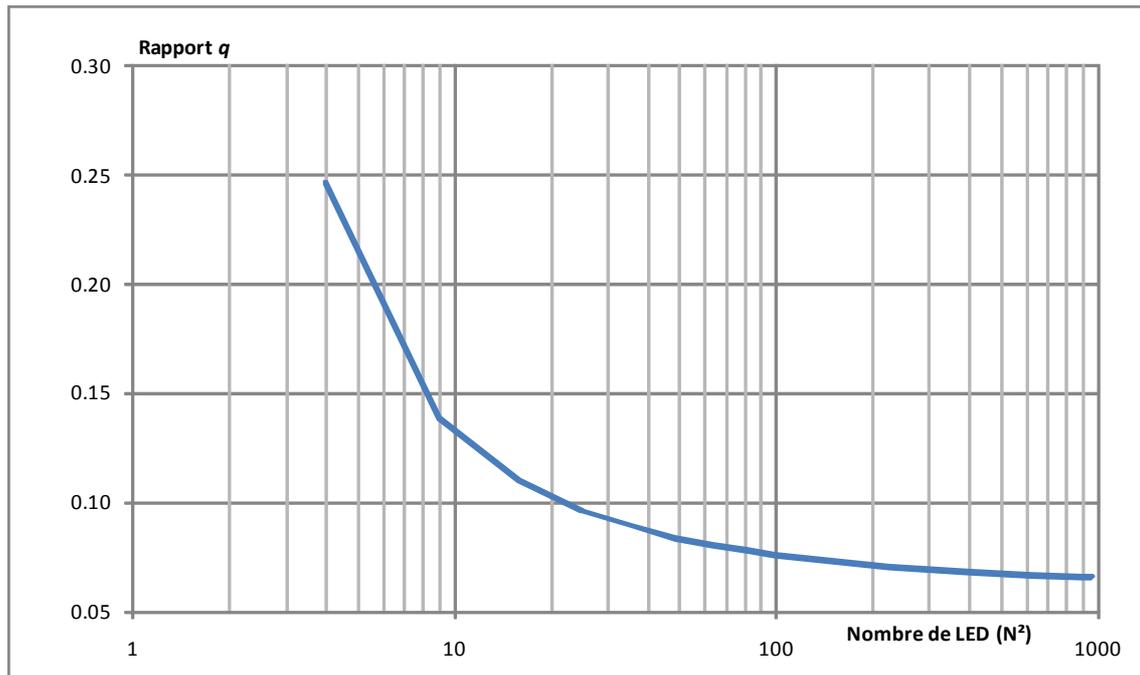


Figure 24 : Rapport entre la surface lumineuse et la surface totale de la matrice de LED

3.5 EVALUATION DE LA DURÉE LIMITE D'EXPOSITION ET DU GROUPE DE RISQUE EN FONCTION DU NOMBRE DE LED DE LA MATRICE

On applique la même méthodologie que dans la partie précédente.

3.5.1 CAS DE 64 LED

Un ensemble de 64 LED de 100 lm produit un flux lumineux de 6400 lm, ce qui est l'ordre de grandeur d'un luminaire 600 mm x 600 mm encastré-plafonnier pour les bureaux. Ce type de matrice de LED peut être utilisé en substitution des luminaires à tube fluorescent.

Pour un ensemble de 64 LED, les paramètres décrivant les conditions d'évaluation de risque sont les suivants :

- Taille de la source : 3,5 cm × 3,5 cm
- Distance d'observation à 500 lux : 2,02 m
- Dimension angulaire de la source à la distance d'observation : 35 mrad
- Rapport q : 0,08

Le calcul de la luminance pondérée LB en fonction du temps d'exposition est représentée sur la figure 25. On constate logiquement que le premier plateau est beaucoup plus long que dans le cas d'une seule LED en raison d'une taille de source plus importante. Cette analyse montre, dans ce cas, que les luminances pondérées LB sont toujours inférieures aux limites d'exposition. La norme NF EN

62471 indique alors que ce type de source est à classer dans le groupe de risque 0 (sans risque).

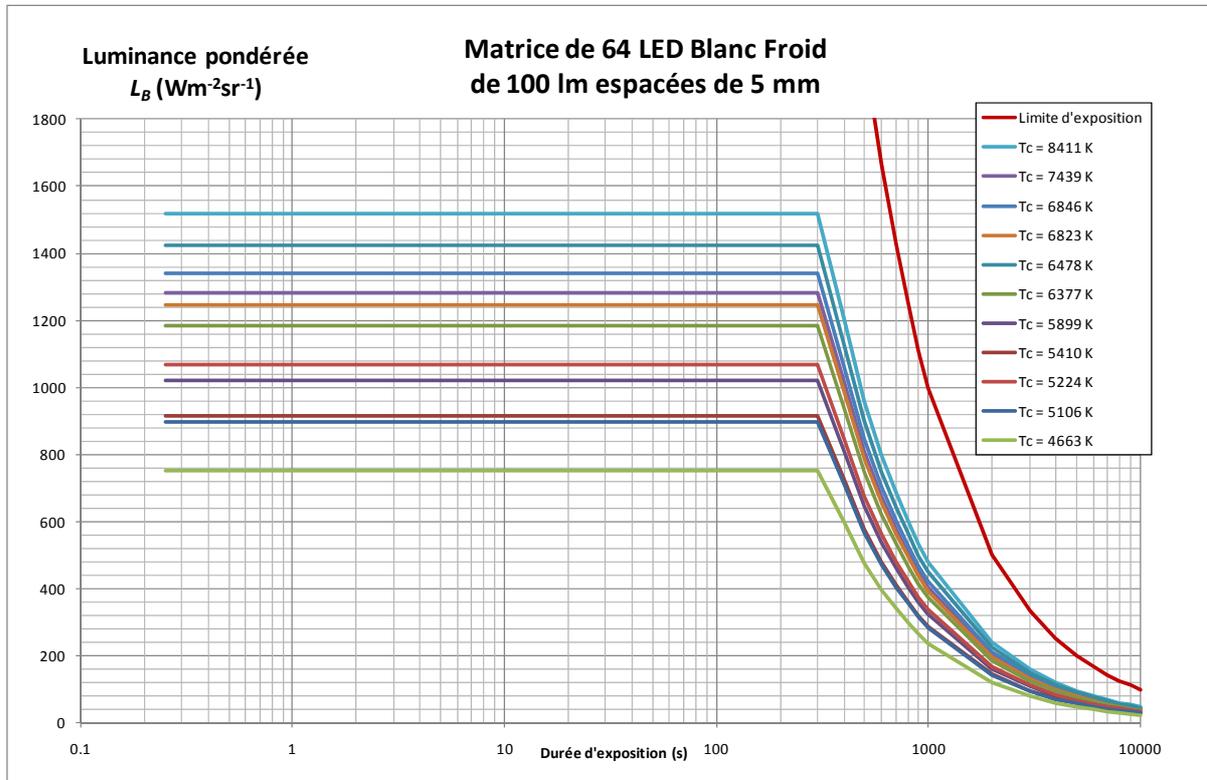


Figure 25 : Luminance pondérée, évaluée à la distance de 2,02 m correspondant à 500 lux, produite par une matrice carrée de 64 LED blanc froid

Il est intéressant de noter que chaque LED prise individuellement et observée à la distance de 200 mm présente un risque (groupe de risque 1 : risque faible). Il est donc nécessaire de différencier l'évaluation de risque dans les conditions normales d'utilisation et dans les conditions d'installation ou de réglages, pouvant conduire à observer les LED à courte distance.

3.6 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS OBTENUS POUR DES MATRICES DE LED

L'évaluation de risque à la distance d'éclairage de 500 lux pour une matrice de LED ne conduit pas à augmenter le groupe de risque par rapport à une LED évaluée individuellement à une distance de 200 mm.

Cependant, lorsque les LED appartiennent au groupe de risque 2 et sont visibles directement dans une lampe ou un luminaire, il est possible d'être exposé à la lumière bleue à plus courte distance, notamment pendant les phases d'installation ou au cours d'une utilisation non-conventionnelle. Ces lampes et luminaires à LED doivent faire l'objet de précautions particulières. Par exemple, une recommandation et un marquage spécifiques devraient être inscrits sur le produit, même si celui-ci est classé dans le groupe risque 0.

4. RÈGLES DE CONCEPTION DE LUMINAIRES À LED NON EBLOUISSANTS

4.1 RECOMMANDATIONS APPLICABLES AUX SYSTÈMES D'ÉCLAIRAGE

La normalisation des produits utilisés en éclairage est de plus en plus une activité mondiale, car les normes nationales tendent à être des copies ou des adaptations des publications internationales. Les normes internationales n'ont généralement pas un caractère contraignant par elles mêmes ; par contre elles servent de modèle aux normes nationales qui peuvent être contraignantes, par exemple par l'interdiction de mettre en vente des produits ne satisfaisant pas à certaines prescriptions de sécurité, ou par les exigences d'utilisateurs importants pour des produits conformes aux normes correspondantes. La conformité aux normes peut être assurée à trois niveaux :

- la déclaration de conformité du fabricant ;
- le certificat de conformité délivré par un laboratoire officiel indépendant ;
- la marque de conformité.

En France, la marque de conformité NF est, pour le matériel électrique, lorsqu'elle existe, délivrée et gérée sur délégation de l'AFNOR par l'Union Technique de l'Electricité (UTE). Le 5 juin 2003, l'AFNOR a publié la norme NF EN 12464-1 "Eclairage des lieux de travail". Etablie par le Comité Européen de normalisation (CEN Tc169/WG2), elle exprime les critères d'éclairage pour chaque type d'activité sur les lieux de travail.

4.1.1 SOLUTIONS D'ÉCLAIRAGE ET MATÉRIELS

Toute installation d'éclairage devrait pouvoir être conçue de manière à répondre à un cahier des charges, s'il existe, ou conformément aux recommandations en usage pour l'activité concernée. Les matériels existants chez les fabricants de luminaires peuvent généralement répondre aux exigences d'une installation en termes de positionnement et d'installation. On distinguera cinq familles principales de luminaires en éclairage intérieur (voir Figure 26).



Figure 26 : Typologie des luminaires les plus employés

Quelle que soit la solution retenue, l'installation d'éclairage doit en tous points respecter des critères de confort visuel. Pour qu'un éclairage soit réalisé correctement et bien accepté par les usagers, il est important qu'en plus du niveau d'éclairement requis (niveau exprimé en lux), les besoins quantitatifs et qualitatifs soient satisfaits. Les trois besoins fondamentaux sont :

- **le confort visuel** : la sensation de bien-être ressentie par les usagers permet la pratique aisée d'activités manuelles usuelles ;
- **la performance visuelle** : les personnes sont en mesure d'exécuter des tâches visuelles de qualité, même dans des circonstances difficiles et pendant de plus longues périodes ;
- **la sécurité.**

Si une lampe nue est utilisée dans un luminaire, elle est susceptible de constituer une source d'éblouissement pour les occupants de la pièce. On doit avoir recours à des systèmes permettant de contrôler la lumière ainsi que sa répartition dans l'espace. Différentes techniques sont utilisées en fonction des applications et des puissances électriques en jeu (voir Figure 27).

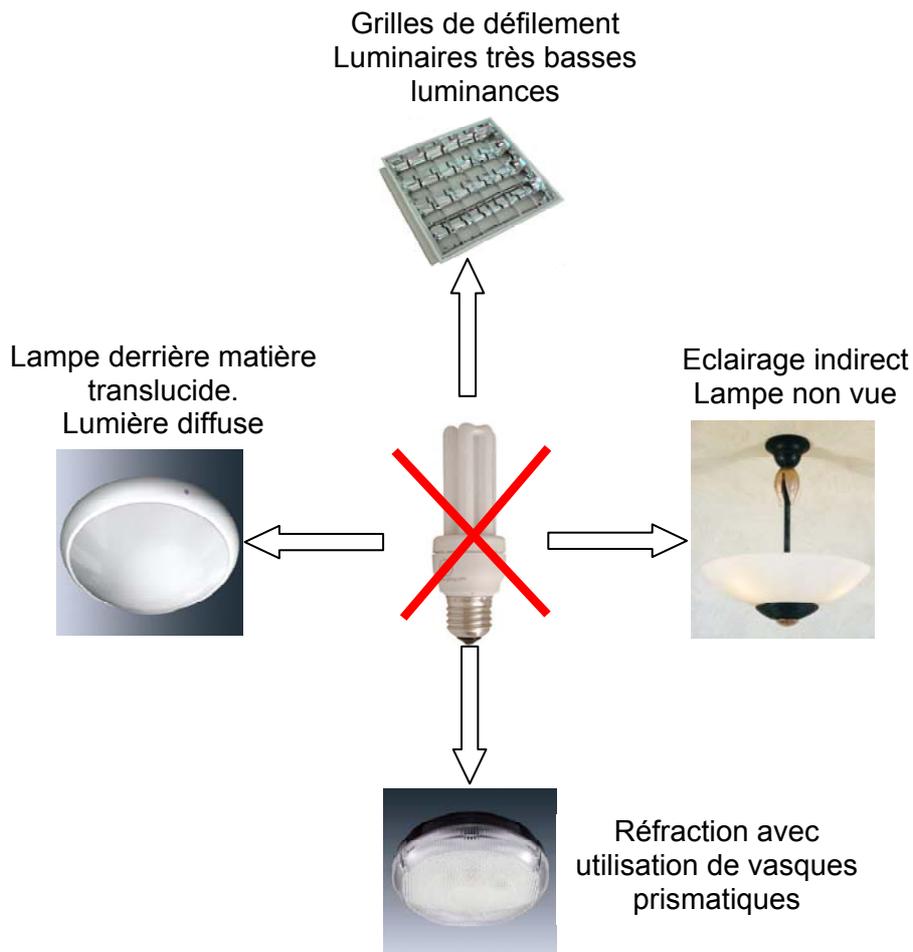


Figure 27 : Eviter l'éblouissement par l'emploi de luminaires adaptés

4.1.2 DISTRIBUTION DES LUMINANCES

La distribution des luminances dans un espace doit être telle que les différences excessives de luminance soient évitées pour permettre aux occupants de voir correctement. Des zones extrêmement sombres ou brillantes donnent naissance à l'inconfort visuel et doivent être évitées.

Les différences de luminance maximales recommandées sont les suivantes :

Tâche visuelle – Plan utile : 3 : 1

Tâche visuelle – Environnement : 10 : 1

Lorsqu'il y a de grandes différences de luminance dans le champ visuel, l'œil doit s'adapter lorsque la direction du regard change. Pendant son adaptation, l'acuité visuelle est diminuée. Pour éviter de telles fatigues inutiles, il convient de ne pas dépasser certaines valeurs de contraste entre les différentes zones du champ visuel. Cependant, si les différences entre les niveaux de luminance sont trop faibles, on crée dans le local une impression de monotonie très désagréable.

La perception des détails d'une tâche visuelle est facilitée par les contrastes de luminance et de couleur entre ces détails et l'arrière-fond. De plus, un contraste suffisant devrait être appliqué pour favoriser la perception du relief des objets. Il s'agit donc de trouver un compromis entre ces exigences.

La luminance maximale acceptable en observation directe est de 10 000 cd/m².

Au-delà de cette valeur, on peut dire que les fonctions visuelles de base sont altérées, telles que l'acuité, la sensibilité aux contrastes et l'accommodation.



Figure 28 : : Valeurs indicatives des luminances (cd/m²) de sources lumineuses

Le contrôle des luminances dans le champ visuel implique que les luminaires ne soient pas éblouissants, c'est à dire que la source de lumière (lampe) ne soit pas vue directement par les usagers. La lampe nue est toujours susceptible de constituer une source d'éblouissement. Pour mémoire une lampe à incandescence claire peut avoir une luminance de 1 000 000 cd/m², alors qu'une lampe dépolie aura une luminance de 50 000 cd/m². Les valeurs de luminances portées en Figure 15, montrent qu'en pratique aucune source d'éclairage artificiel

ne peut être vue directement sans l'utilisation d'un système optique de filtrage ou de défilement.

4.1.3 EBLouisSEMENT

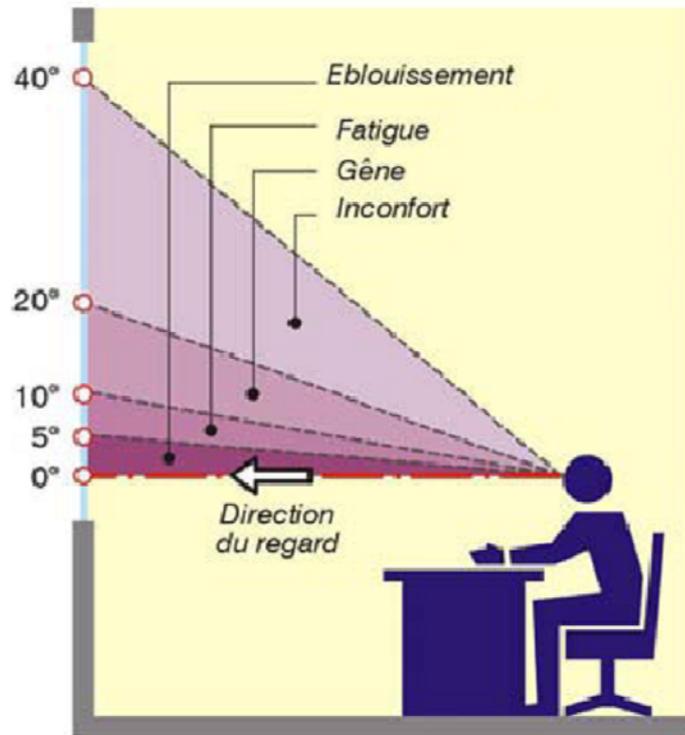


Figure 29 : Angles définissant les zones d'inconfort

Le phénomène d'éblouissement se produit lors de la présence d'une luminance excessive dans le champ de vision (Figure 29). Les effets de l'éblouissement sur la vision peuvent être divisés en deux groupes :

- l'éblouissement d'incapacité : cet éblouissement est provoqué par la vision directe d'une source de lumière de forte luminance qui provoque un effet perturbateur ;
- l'éblouissement d'inconfort : cet éblouissement est provoqué par la vision d'une tâche visuelle dont le contraste est trop élevé.

L'éblouissement d'inconfort est évalué en utilisant la méthode préconisée par la Commission Internationale de l'Eclairage [Publication CIE 117]. :

$$UGR = 8 \log_{10} \left(\frac{0,25}{L_f} \sum \frac{L^2 \omega}{p^2} \right)$$

avec :

L_f : luminance de fond exprimée en cd/m^2 , calculée comme étant le rapport $\frac{L}{p}$, où E_{ind} est l'éclairement vertical indirect au niveau de l'œil de l'observateur,

L : est la luminance des parties lumineuses de chaque luminaire dans la direction de l'œil de l'observateur en cd/m^2

ω : est l'angle solide (stéradian) des parties lumineuses de chaque luminaire au niveau de l'œil de l'observateur

p : est l'indice de position de Guth pour chaque luminaire se rapportant à la position du luminaire par rapport à l'axe visuel [Publication CIE 17].

La figure ci-dessous montre la superposition d'un exemple de spectre de LEDs blanches avec le spectre de sensibilité à l'éblouissement pour un être humain.

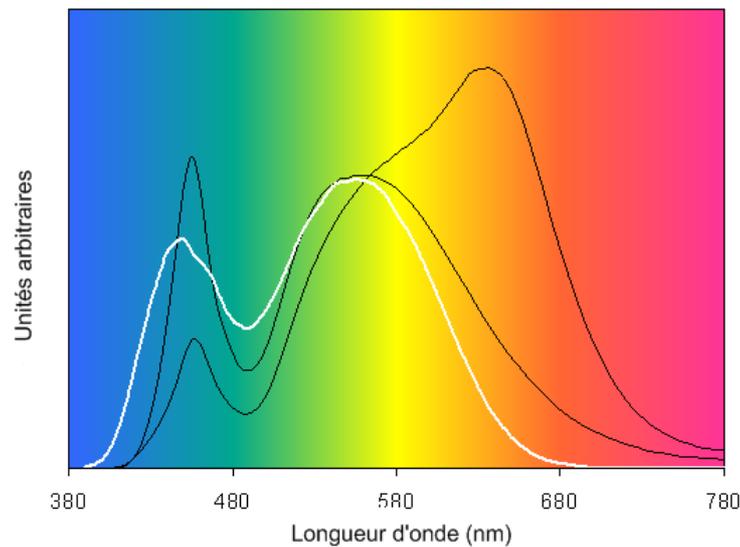


Figure 30 : Spectre de sensibilité de l'œil humain à l'éblouissement (en blanc), superposé à des spectres de LEDs blanches

4.1.4 EXEMPLES DE SITUATIONS ÉBLOUISSANTES

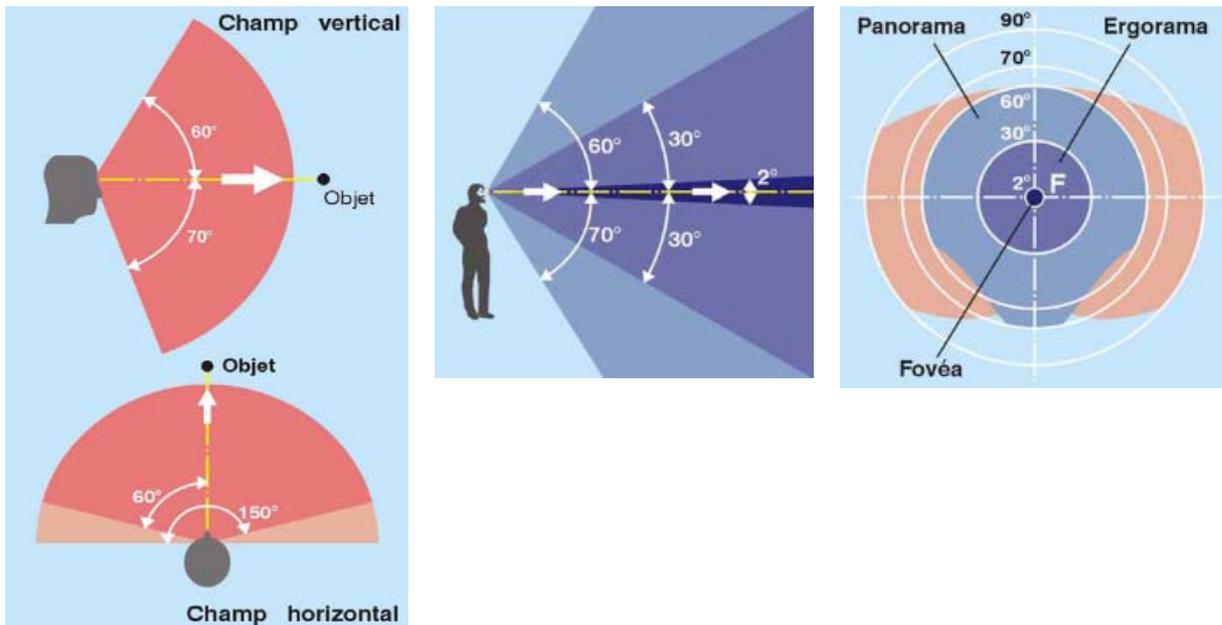
Les images ci-dessous montrent des exemples de situations éblouissantes : reflets sur l'écran d'ordinateur à droite, vision en contre jour à gauche. Quelques exemples de luminances sont données sur l'image de gauche.



Figure 31 : Situations éblouissantes, à gauche le reflet sur l'ordinateur, à droite le contre jour

4.1.5 CHAMP VISUEL

Le champ visuel est l'espace délimité par la perception spatiale de l'œil, sans bouger la tête.



Fovéa (2°) : vision des détails très fins
Ergorama (30°) : vision des formes,
Panorama (60 et 70°) : vision des mouvements

Champ visuel perçu simultanément par les deux yeux (bleu) et par chaque œil séparément (rose)

Figure 32 : Champ visuel

CONCLUSION

Ce travail montre que la durée maximale d'exposition pour certaines LED est inférieure à 100 s. Elle est parfois de l'ordre de 3 ou 4 s pour les LED bleues les plus puissantes. Le groupe de risque correspondant est « Groupe de risque 2 : risque modéré ». Par conséquent, l'exposition de l'œil à cette LED pendant des durées supérieures au temps d'aversion est risquée.

Pour réduire le risque sur la rétine, il faut limiter les niveaux de luminance lumineuse et/ou énergétique dans les systèmes d'éclairage à LED en utilisant des solutions optiques.

Le seuil de sécurité, exprimé en luminance, pour l'éclairage en lumière blanche pourrait être compris entre 104 cd/m² et 105 cd/m², qui est une valeur de luminance atteinte parfois par certaines lampes fluorescentes comme les tubes T5 et les lampes fluocompactes.

Pour l'éclairage en lumière bleue, le seuil de sécurité, exprimé en luminance énergétique, sera égale à 10 000 W/m²/sr, ce qui correspond à une durée limite d'exposition supérieure ou égale à 100 s, quelle que soit la nuance de bleu choisie.

En général, pour l'éclairage à LED en lumière blanche et en lumière colorée, le seuil de sécurité photobiologique sera spécifié en luminance (104 à 105 cd/m²) et, simultanément, en luminance énergétique (105 W/m²/sr).

La recommandation la plus simple serait de préconiser l'interdiction de tout luminaire ou lampe d'éclairage à LED dont les LED seraient directement visibles par les usagers, sauf preuve de conformité à l'appartenance au groupe de risque « sans risque », évaluée selon la norme NF EN 62 471 à la distance de 200 mm, et non à la distance donnant un éclairement de 500 lux.

On pourrait aussi exiger que la conformité des luminaires à LED à la norme NF EN 62 471 (et à la directive européenne de 2005) soit exigée de manière réglementaire dans le cadre du marquage CE des produits.

Pour les produits d'éclairage professionnel (éclairage public et routier, éclairage tertiaire, éclairage architectural, illuminations, etc.), il faudrait préciser les conditions d'exposition au montage (exposition de l'installateur) et les conditions d'exposition des usagers. Exemple en éclairage public :

- distance d'exposition de l'installateur : 50 cm ou 1 m
- distance d'exposition de l'utilisateur : de 3 m à 10 m selon l'application

De manière générale, nos préconisations sont les suivantes :

- Eviter l'utilisation de LED bleues et « blanc froid »
- Favoriser les LED « blanc chaud »

- Empêcher la vision directe des LED dont la luminance dépasse 104 cd/m².
- Utiliser des systèmes optiques pour faire baisser la luminance. Par exemple, des micro-grilles de défilement
- Appliquer des matériaux diffusants : diffuseurs opales, matériaux réfléchissants blancs, diffuseurs holographiques, etc.
- Utiliser des lentilles et des miroirs pour orienter le faisceau en dehors du champ de vision des occupants
- Pour un flux lumineux donné, il faut favoriser l'utilisation d'un plus grand nombre de LED moins lumineuses, plutôt que d'utiliser peu de LED de plus forte luminance.
- La conception doit satisfaire les exigences de limitation de l'éblouissement d'inconfort, exprimé en termes d'indice UGR. Or, cet indice ne peut pas être calculé pour des petites sources (dimension inférieure à 0,0003 stéradian). L'analyse de l'éblouissement doit être effectuée en utilisant les paramètres décrivant l'éblouissement perturbateur (ou d'incapacité). On calcule alors la luminance de voile qui est utilisé pour quantifier la diminution du contraste perçu en présence d'une source éblouissante. L'indice TI peut par exemple être calculé, même s'il n'existe actuellement pas de recommandations sur des valeurs de TI en éclairage intérieur

SIEGE SOCIAL

84, AVENUE JEAN JAURÈS | CHAMPS-SUR-MARNE | 77447 MARNE-LA-VALLÉE CEDEX 2
TÉL. (33) 01 64 68 82 82 | FAX (33) 01 60 05 70 37 | www.cstb.fr

CSTB
le futur en construction

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT | MARNE-LA-VALLÉE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS