

Article

# Conditions de sécurité photobiologique d'acuité visuelle maximum en médecine bucco-dentaire

Jean-Marc KUBLER, Thibault DAVID

Diffusion le 15 mai 2020

## MOTS-CLÉ

acuité visuelle

bleu cyan (480nm)

éclairage rétinien

énergie lumineuse

horloge biologique

sécurité physio et psychobiologique

sensibilité visuelle

sensibilité mélanopique

---

**Résumé** La vision humaine est la construction par le cerveau d'images résultant de stimuli énergétiques lumineux collectés et transformés en impulsions nerveuses par les cônes et les bâtonnets de la rétine.

Le réglage du diamètre de la pupille dosant l'éclairement rétinien est piloté par la réaction à l'énergie lumineuse bleue cyan (longueur d'onde 480nm) des cellules ganglionnaires à mélanopsine de la rétine. Cette réaction détermine la dose de mélatonine qui conditionne la synchronisation de notre horloge biologique.

Le document qui suit met en évidence les conditions qui permettent d'atteindre l'acuité visuelle maximum requise en médecine buccodentaire.

Ces conditions sont celles d'un ECLAIRAGE NATUREL CONFORTABLE parce que notre cerveau a été formaté à la lumière naturelle tout au long de notre évolution. C'est le seul environnement lumineux qu'il sache gérer.

Les processus physiologiques générateurs de la vision et de la synchronisation chronobiologique sont modélisés par les courbes de sensibilité visuelle et mélanopique.

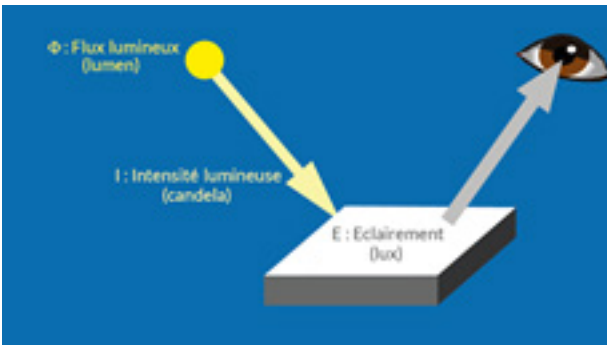
---

# 1. Eclairage nécessaire à l'acuité visuelle

Pour schématiser, la vision détaillée (cônes) et la profondeur de champ s'améliorent avec la réduction du diamètre pupillaire. Une fois le DIAMETRE PUPILLAIRE MINIMUM atteint, tout éclairage complémentaire provoque une surcharge énergétique qui se traduit par un éblouissement.

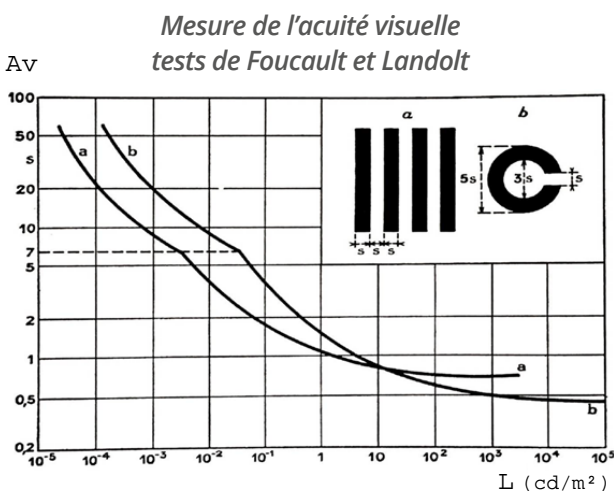
De fait, les cônes et les bâtonnets ne perçoivent que la brillance des objets observés. Les cônes étant spécialisés en rouge, vert ou bleu, les stimuli transmis permettent au cerveau de colorer l'image.

En photométrie, la « brillance » des objets s'appelle la luminance et se mesure en cd/m<sup>2</sup>. Plus l'éclairage de l'objet (lux) est fort, plus la luminance est élevée.



## Luminance d'acuité maximum

La mesure ophtalmologique de l'acuité se fait sous un éclairage confortable (bonne lumière), par un test de lecture. Deux lois expérimentales établies à partir de résultats observés ont été formalisées respectivement par Foucault et Landolt.



Ces tests d'ophtalmologie s'effectuent sur un tableau blanc marqué de caractères noirs. Le contraste de luminance est ainsi maximum. Le tableau blanc reflète +/- 100% de la lumière et les caractères sont noir (réflexion 0%). Dans les deux cas, l'acuité visuelle est maximale sous une luminance de 10<sup>3</sup> cd/m<sup>2</sup> et n'évolue plus ou très peu. La luminance de 10<sup>4</sup> cd/m<sup>2</sup> est considérée comme la limite du risque visuel.

## Eclairage d'acuité maximum

LA LOI DE LAMBERT met en évidence la relation entre l'éclairage (lux) et la luminance (cd/m<sup>2</sup>)

$$E = \pi L / Rd$$

$E = \text{lux} / L = \text{cd/m}^2 / Rd = \% \text{ de réflexion de l'objet}$

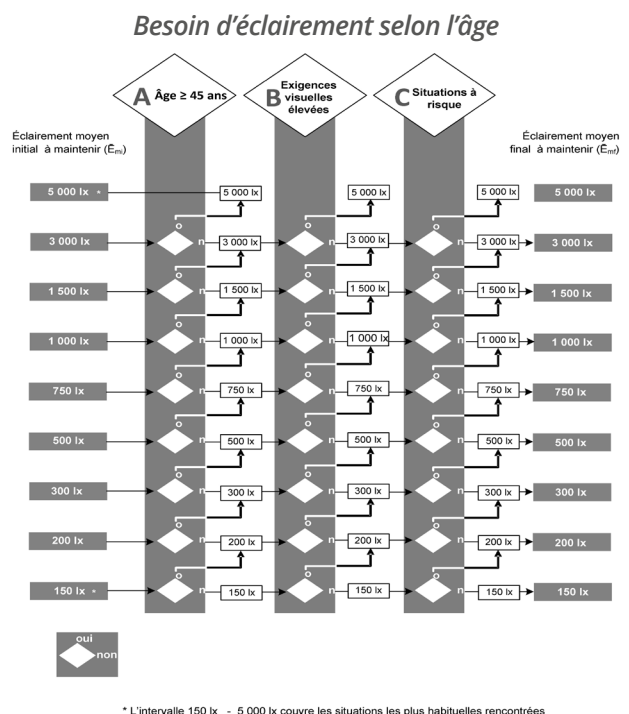
L'Annexe A en page 3 indique, selon ce calcul, que sur un objet blanc,

***l'acuité visuelle est maximum à partir de 3100 lux.***

L'éclairage nécessaire sur une muqueuse est corrigé du facteur de réflexion (0.3).

La luminance de 10<sup>3</sup> cd/m<sup>2</sup> nécessite alors un éclairage d'environ 10 000 lux.

Le vieillissement de l'œil se traduit par une opacification du cristallin et du liquide. Il est admis que l'éclairage doit être majoré de 67% après 45 ans soit environ 5 000 lux au lieu de 3 100lux.



\* L'intervalle 150 lx - 5 000 lx couvre les situations les plus habituelles rencontrées

*Extrait norme NF X35-103 2013  
principe d'ergonomie visuelle*

## Annexe A (informative) Loi de Lambert

La loi de Lambert établit une relation entre l'éclairement, la luminance et le facteur de réflexion pour des surfaces mates selon la formule suivante :

$$L = (E \times \rho) / \pi$$

où

- $L$  luminance
- $E$  éclairement moyen
- $\rho$  facteur de réflexion
- $\pi$  3,14

$$L_{\text{moyen}} = \frac{\rho \cdot E_{\text{moyen}}}{\pi}$$

(Pour des surfaces mates)

**Luminance (cd x m<sup>-2</sup>)** (valeurs arrondies)  
en fonction de l'éclairements  $E$  (lx) et du facteur de réflexion ( $\rho$ )

		Éclairement (lux)																			
		5	10	20	50	100	120	150	200	300	500	750	1 000	1 500	2 000	3 000	5 000	10 000	20 000	50 000	100 000
Facteur de réflexion moyen ( $\rho$ )	0,1	0,16	0,32	0,64	1,6	3,2	4	4,8	6,4	10	16	24	32	48	64	95	160	320	640	1 600	3 200
	0,2	0,32	0,64	1,3	3,2	6,4	8	10	13	19	32	48	64	95	130	190	320	640	1 300	3 200	6 400
	0,3	0,48	0,95	1,9	4,8	10	11	14	19	29	48	72	95	140	190	290	480	960	1 900	4 800	9 500
	0,4	0,64	1,3	2,5	6,4	13	15	19	25	38	64	95	130	190	260	380	640	1 300	2 500	6 400	13 000
	0,5	0,80	1,6	3,2	8,0	16	19	24	32	48	80	120	160	240	320	480	800	1 600	3 200	8 000	16 000
	0,6	0,95	1,9	3,8	10	19	23	29	38	57	95	140	190	290	380	570	960	1 900	3 800	9 500	19 000
	0,7	1,1	2,2	4,5	11	22	27	33	45	67	110	170	220	330	450	670	1 100	2 200	4 500	11 000	22 000
	0,8	1,3	2,5	5,1	13	25	31	38	51	75	130	190	260	380	510	750	1 300	2 500	5 100	13 000	25 000
	0,9	1,4	2,9	5,7	14	29	34	43	57	86	140	220	290	430	570	860	1 400	2 900	5 700	14 000	29 000
	1	1,6	3,2	6,4	16	32	38	48	64	95	160	240	320	480	640	960	1 600	3 200	6 400	16 000	32 000

$$E_{\text{moyen}} = \frac{\pi \cdot L_{\text{moyen}}}{\rho}$$

(Pour des surfaces mates)

**Éclairement (lx)** (valeurs arrondies)  
en fonction de la luminance  $L$  (cd x m<sup>-2</sup>) et du facteur de réflexion ( $\rho$ )

		Luminance (cd m <sup>-2</sup> )					
		1	10	100	1 000	10 000	100 000
Facteur de réflexion moyen ( $\rho$ )	0,1	31	310	3 100	31 000	310 000	3 100 000
	0,2	16	160	1 600	16 000	160 000	1 600 000
	0,3	10	110	1 100	10 000	100 000	1 000 000
	0,4	7,9	79	790	7 900	79 000	790 000
	0,5	6,3	63	630	6 300	63 000	630 000
	0,6	5,2	52	520	5 200	52 000	520 000
	0,7	4,5	45	450	4 500	45 000	450 000
	0,8	3,9	39	390	3 900	39 000	390 000
	0,9	3,5	35	350	3 500	35 000	350 000
	1	3,1	31	310	3 100	31 000	310 000

*Extrait norme NF X35-103 2013  
principe d'ergonomie visuelle*

## 2. Spectre et énergie lumineuse requis

Les spectres d'émission des LED blanches sont l'objet de mises en garde très appuyées de la part des autorités de santé (ANSES, INSERM). Il convient de décrire ici les phénomènes et réflexes physiologiques qui sont à l'origine du risque d'accélération du vieillissement des organes visuels et de la désynchronisation de l'horloge chronobiologique.

Nous avons retenu les illuminants D50/D65 de la CIE comme conditions de référence de bon fonctionnement de l'œil humain. Puis nous avons analysé et comparé les réactions visuelles et non-visuelles d'un œil soumis à différents spectres. Il est communément admis que la lumière visible s'étend sur un domaine de 400 à 700 nm en-deçà et au-delà duquel l'œil ne perçoit rien ou presque rien.

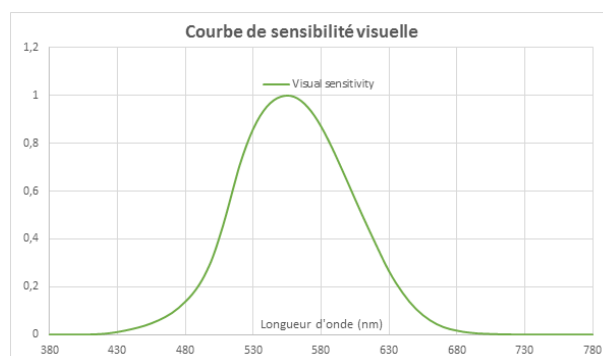
L'œil humain a une sensibilité différenciée selon les couleurs, représentée par une courbe de Gauss centrée à 550 nm. Il ne perçoit qu'une partie de l'énergie lumineuse dite « photométrique » qui est exprimée en lux = lm/m<sup>2</sup>.

Les réactions physiologiques du système visuel sont mesurées par les courbes de sensibilité visuelle et de sensibilité non-visuelle des cellules ganglionnaires à mélanopsine de la rétine.

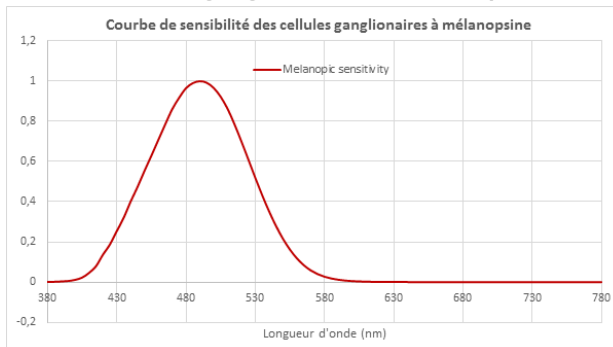
Le rôle des cellules ganglionnaires est d'envoyer des signaux nerveux aux noyaux suprachiasmatiques. Ces derniers les interprètent pour réguler :

- L'ouverture pupillaire, c'est à dire l'éclairement rétinien
- La synchronisation des horloges chronobiologiques. La bonne synchronisation a, entre autres, des effets sur le sommeil, l'humeur et les systèmes cardio-vasculaires et immunitaires.

### *Sensibilité visuelle ou Efficacité lumineuse spectrale*



### Sensibilité non visuelle – Réaction spectrale des cellules ganglionnaires à mélanopsine

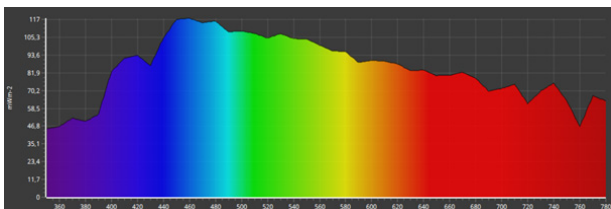


Les lumens et les lux sont des valeurs photométriques c'est à dire représentant l'énergie vue par l'œil alors même que l'énergie de la lumière dans le domaine visible inclut ce que l'œil voit et ce qu'il ne voit pas.

Pour l'énergie de la lumière on parle de mesure radiométrique qui se mesure pour chaque longueur d'onde en mW/m<sup>2</sup>.

### La lumière naturelle du jour

Spectre de l'illuminant normatif D65 de la lumière du jour (6500K)



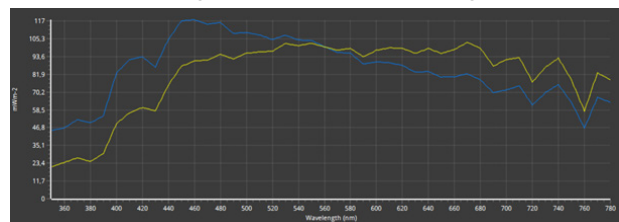
Ce spectre est la mesure de la décomposition de la lumière telle qu'on peut l'observer dans l'arc-en-ciel.

La somme de ces énergies par longueur d'onde constitue la lumière du jour. Sa couleur apparente est mesurée en K (Kelvin). La couleur apparente du spectre D65 est de 6500 K. Cette valeur est à l'origine de l'erreur définissant toute lumière à 6500 K comme lumière du jour. Alors même que c'est le spectre qui définit la répartition énergétique de lumière naturelle du jour et sa température de couleur.

Au cours de la journée, des saisons et suivant la météo, la couleur et le spectre de la lumière du jour changent.

On nomme ces variantes : *phases de la lumière du jour*. Seules deux phases de la lumière du jour sont répertoriées comme normatives par la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage), le D65 (6500K) et le D50 (5000 K).

### Spectres des illuminant normatifs D65 (en bleu) & D50 (en jaune) de la lumière du jour



Le D65 est un peu plus puissant dans les bleus, le D50 dans les jaunes-rouges. La limite étant à 550 nm, longueur d'onde (verte) auquel l'œil est le plus sensible.

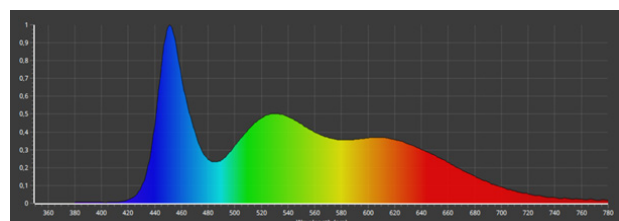
L'apparence de couleur du D50 sera un blanc un peu moins froid que celle du D65.

### L'éclairage artificiel par LED

Nous avons retenu deux types de LED différentes donnant la couleur apparente de la phase de la lumière du jour 6500 K. Ceci afin de les comparer à la référence du D65 de la CIE.

- a. **LED 6500K** : les plus répandues, celles couramment utilisées en médecine buccodentaire, mais aussi pour les écrans des tablettes, smartphones et ordinateurs :

Spectre typique d'une LED 6500K biphosphore

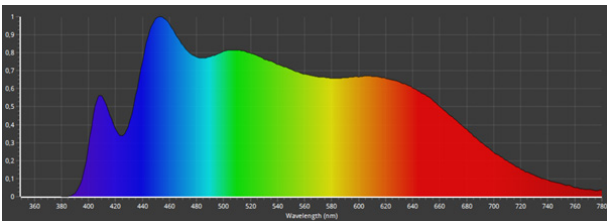


On observe immédiatement une répartition spectrale complètement différente de celle du D65. On peut résumer les différences essentielles en 3 sous-domaines :

- 400-460 nm une très importante pointe de bleu HEV (Haute Energie dans le Visible)
- 465-510 nm un gros déficit énergétique dans le bleu cyan
- 520 -680 nm un net déficit d'énergie dans les rouges

- b. **LED d65 : LED certifiée conforme au D65** dans le domaine du visible par un laboratoire agréé :

### Spectre typique d'une LED certifiée conforme au D65



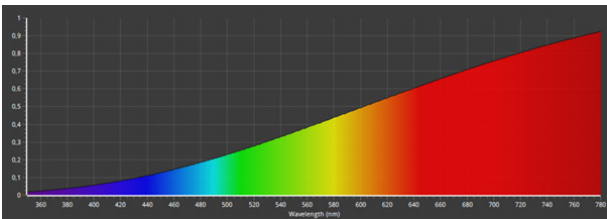
Plafonnier Albédo LEDd65

On observe que sur tout le domaine visible, l'énergie est abondante et plutôt uniformément répartie. Après mesure des écarts avec un D65, cette LED a obtenu sa certification de conformité

Pour bien expliquer ce qui se passe au niveau physiologique, nous avons interpolé les courbes de sensibilité visuelle et mélanopique avec les différents spectres : Lumière naturelle D65, D50 vs lumière LED 6500K et LED d65, le d65 minuscule exprimant la certification dans le domaine du visible.

Nous avons aussi introduit l'illuminant normalisé A qui représente la référence de la lumière à incandescence (2700 K) pour la suite de la démonstration, à propos des anciennes lampes opératoires (scialytiques) à halogène.

### Spectre de l'illuminant normatif A de la lumière incandescente (2700K)



Afin d'avoir des éléments comparables nous avons utilisé des spectres uniformisés à la même valeur d'éclaircement +/- 7200 lux.

Cette valeur a été choisie par la CIE pour les valeurs spectrales des illuminants normalisés, nous l'avons donc reconduite pour les éclaircissements artificiels issus des LED à même température de couleur.

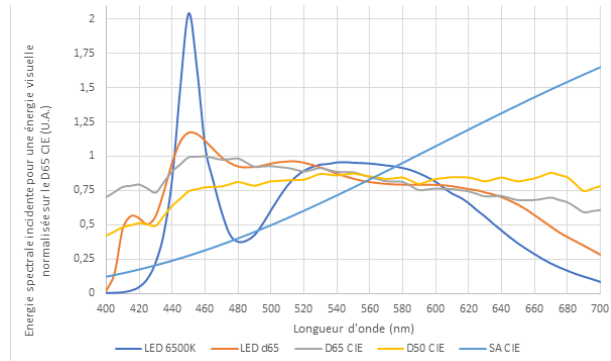
On constate d'emblée qu'à température de couleur égale :

- à 450 nm : l'énergie des bleus HEV - respon-

sables pour l'essentiel du vieillissement de l'œil - est pour la LED 6500K +/- 2 fois plus élevée que pour le D65 et la LED d65

- à 480 nm, l'énergie du bleu cyan pilotant les cellules à mélanopsine est pour la LED 6500K +/- 55% plus faible que pour le D65 et la LED d65

### Spectres isolux D65, D50, A, LED d65, LED 6500K



### Valeurs énergétiques comparées à température de couleur égale

	Ratio Mel 400-700nm	Energie relative incidente pour un éclaircement équivalent lux				
		450nm	460nm	470nm	480nm	490nm
LED 6500K	0,91	2,043	1,070	0,593	0,376	0,426
LED d65	1,12	1,172	1,112	0,993	0,925	0,922
D65 CIE	1,10	0,993	1,000	0,975	0,984	0,924

### Réactions visuelles et non-visuelles :

Au niveau visuel, les résultats sont conformes à ce qu'on pouvait en attendre, à savoir : pour des températures de couleur voisines et à iso-éclairage, l'œil voit quasi identiquement.

Les réponses visuelles (Fig. 1) ne sont que quasiment identiques. Cela est dû au fait que la répartition énergétique est différente pour les 3 sources.

Cependant, seule la vision obtenue avec la LED 6500K marque un pic dans le bleu à 450 nm et un manque dans le cyan à 480nm. Les 2 éclaircissements D65 et LED d65 sont à peine différenciables ce qui valide la conformité dans le domaine visible de la LED d65 à l'illuminant normalisé D65.

L'analyse des réactions mélanopiques (Fig. 2) est par contre totalement différente et très explicative :



La LED 6500K provoque une réponse mélanopique totalement déséquilibrée alors que la LED d65 confirme à aussi sa conformité à la lumière naturelle D65.

Pour la LED 6500K, non seulement le ratio mélanopique est 20% inférieur à celui enregistré pour la lumière naturelle D65 et la LED d65, mais les valeurs à 450 nm et surtout à 480 nm donnent aux noyaux suprachiasmatique des informations erronées qui altèrent la synchronisation des horloges chronobiologique et le réflexe pupillaire.

En d'autres termes, le cerveau perçoit un éclairement 55% plus faible qu'il ne l'est en réalité, laissant la pupille beaucoup trop ouverte pour le flux lumineux existant.

Par ailleurs, l'acuité visuelle et la profondeur de champ recherchées par le chirurgien-dentiste étant atteintes lorsque la pupille est à son diamètre minimum, un praticien travaillant sous un éclairage LED 6500K augmentera l'éclairement (lux) donc l'énergie (mW/cm<sup>2</sup>) jusqu'à atteinte de la valeur de bleu cyan correspondant à ce diamètre minimum.

En conséquence, le praticien utilisant des LED 6500K doublera l'éclairement. L'œil recevra alors +/- 2 fois plus d'énergie que pour la LED d65 ou pour la lumière naturelle.

Cela induira d'une part une accélération du vieillissement de l'œil lié à l'action des bleus HEV sur les tissus oculaires et d'autre part, nuira à la synchronisation des horloges chronobiologiques, comme cela est démontré par les études disponibles.

Fig. 1 : Réponses visuelles à 6500K

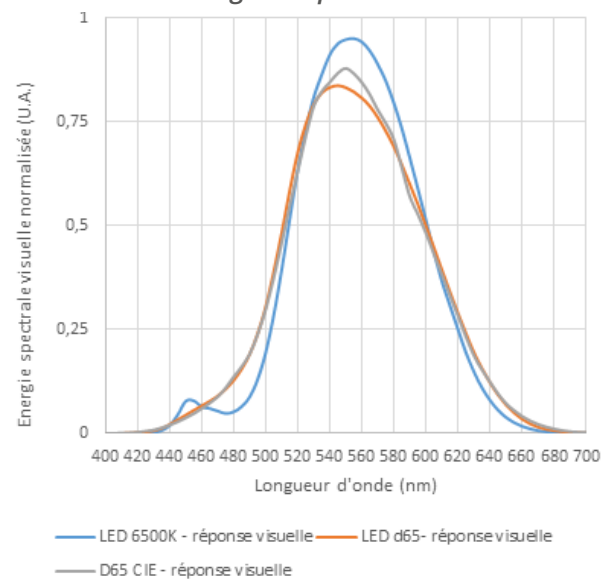
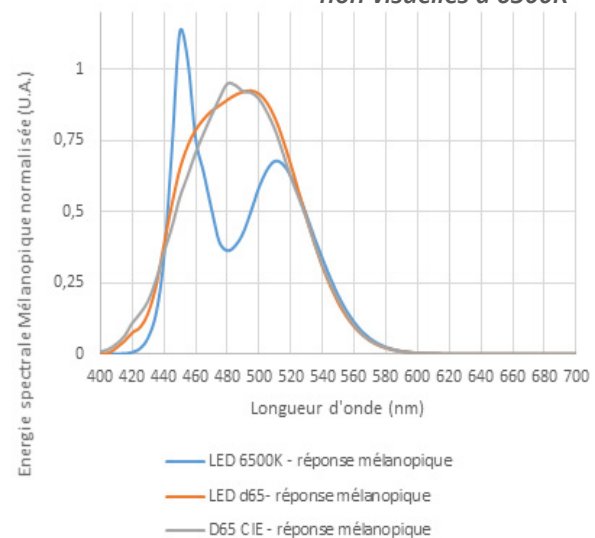


Fig. 2 : Réponses mélanopiques non-visuelles à 6500K



## Conclusion :

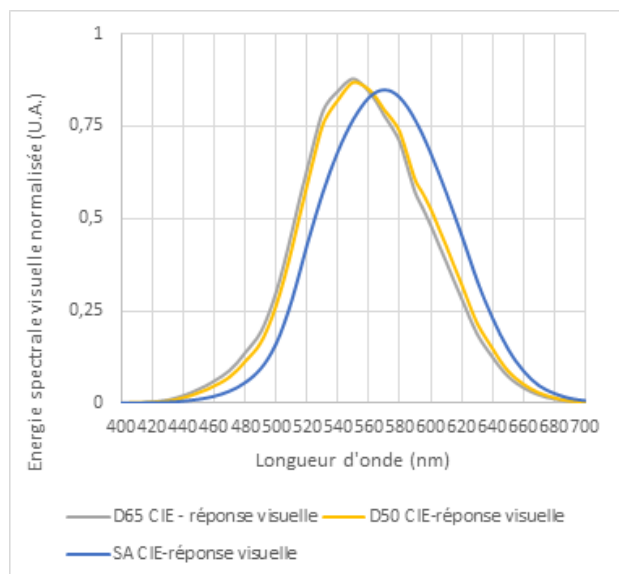
**Le risque de vieillissement accéléré de l'œil, ou de pathologies induites par une surexposition aux bleus HEV est un risque de sur-éclairage rétinien. Ce sur-éclairage est lié à la puissance de l'éclairement et/ou à la dérive de la réponse mélanopique des cellules ganglionnaires de la rétine induite par un spectre de lumière impropre.**

**Le risque est évité par l'utilisation de sources de lumière dont le spectre est certifié conforme à un des illuminants D50 ou D65 de la lumière naturelle, dans la limite de 10<sup>3</sup> cd/m<sup>2</sup> pour la luminance de l'objet observé.**

### Note complémentaire concernant les illuminants D50/D65 et A :

L'observation comparée des réponses visuelles et mélanopiques, permettent de formuler que :

- Les deux illuminants D ont des réponses visuelles très proches, l'illuminant A étant un peu décalé vers les couleurs chaudes et un peu moins performant



- La faiblesse du cyan dans l'illuminant A, induit l'augmentation de l'éclairage afin d'atteindre le diamètre pupillaire recherché. Les lampes opératoires (scialytiques) paraissent ainsi toujours sous-calibrées aux utilisateurs, d'où une recherche de lux contre-productive

### Références bibliographiques et normatives :

**Docteur Claude Gronfier** : <https://www.inserm.fr/information-en-sante/dossiers-information/chronobiologie>

**Docteur Françoise Viénot** : <http://www.asprom.com/leds/Vienot.pdf>

**Docteur Damien Gatinel** : <https://www.gatinel.com/recherche-formation/acute-visuelle-definition/acute-visuelle-resolution-et-pouvoir-separateur-de-loeil/>

**ANSES** : Mme Francine BEHAR-COHEN \_ Mme Annick BARLIER-SALSI \_ M. Jean-Pierre CESARINI \_ M. Olivier ENOUF \_ M. Michel GARCIA \_ M. Christophe

MARTINSONS \_ M. Serge PICAUD \_ Mme Françoise VIENOT \_ M. Georges ZISSIS : « Systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes : des effets sanitaires à prendre en compte » - 25 octobre 2010 -

Francine BEHAR-COHEN – Directrice de Recherche à l'Inserm UMR 1138, physiopathologie des maladies oculaires, Professeur en ophtalmologie, Université Paris-Descartes, Praticienne attachée à l'hôpital Hôtel Dieu.

Membres : Samuel CARRÉ – Olivier ENOUF – Jack FALCÓN – Claude GRONFIER – David HICKS – Christophe MARTINSONS – Arnaud METLAINE – Leena TAHKAMO - Alicia TORRIGLIA – Françoise VIÉNOT : « Effets sur la santé humaine et sur l'environnement (faune et flore) des diodes électroluminescentes (LED) – Avril 2019 / <https://www.anses.fr/fr/content/avis-et-rapport-de-lanses-relatif-aux-effets-sur-la-sante-humaine-et-sur-lenvironnement>

**F. Behar-Cohen, C. Martinsons d, F. Viénot , G. Zissis , A. Barlier-Salsi g, J.P. Cesarini h, O. Enouf** : Progress in Retinal and Eye Research / [www.elsevier.com/](http://www.elsevier.com/)

**Kasun Ratnayake , John L. Payton, O. Harshana Lakmal & Ajith Karunarathne** : "Blue light excited retinal intercepts cellular signaling »: [www.nature.com/scientificreport](http://www.nature.com/scientificreport)

**Sébastien Point** : Risque rétinien en lumière bleue / SFRP <https://www.sfrp.asso.fr/medias/sfrp/documents/1-Sebastien%20POINT.pdf>

**Víctor Javier GARCIA MOLINA** : Blue light: from scientific evidence to patient care / <https://www.pointsdevue.com/article/blue-light-scientific-evidence-patient-care>

### Références normatives :

DIN67505

ISO9680

EN NF 12464-1

ISO\_CIE\_11664-2

ISO\_23603\_2005

BS BS950-1\_1967

NF X35-103 2013

NF EN 62471

### Lien d'intérêt :

*L'auteur déclare un lien d'intérêt en tant que fondateur et président de la société Degré K.*