

*08 Octobre 2020,
Paris*



Rayonnements optiques: les risques pour la santé

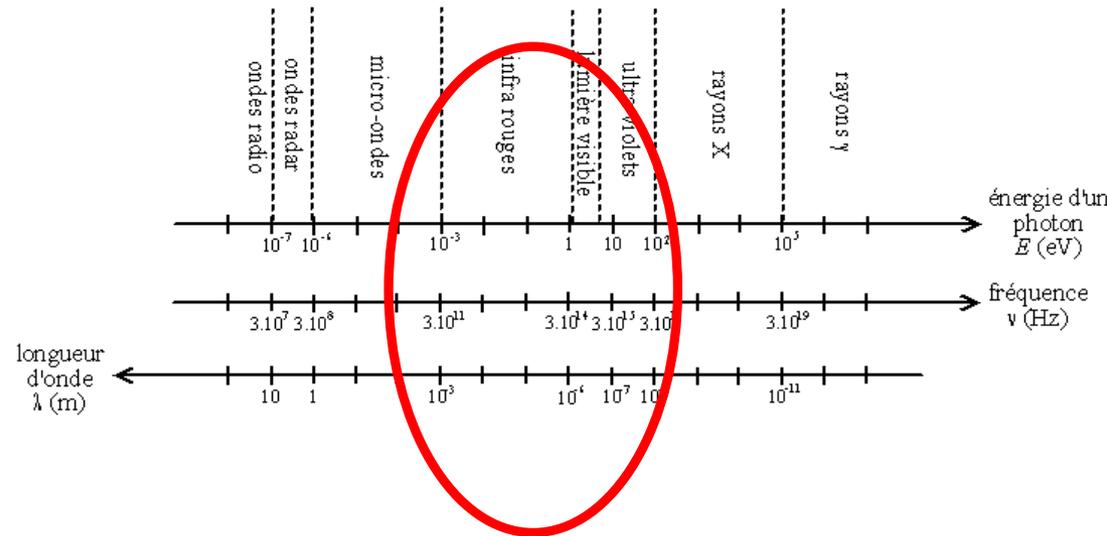
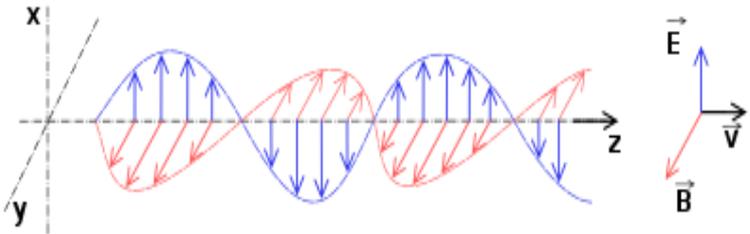
L'importance de la notion de dose

Sébastien Point,
Docteur en physique ,
Ingénieur en optique,
Licencié en psychopathologies.

Président de la section Rayonnements Non-Ionisants de la SFRP
Responsable du service Etudes, Essais & Qualifications, centre d'excellence
éclairage de sécurité, Groupe Eaton (Division Life Safety).
Chargé d'enseignement à l'Université Clermont-Auvergne



Nature des rayonnements optiques



Aspect ondulatoire

$$P = E^2 / \Omega$$

Avec Ω impédance du vide: 377 Ohm.

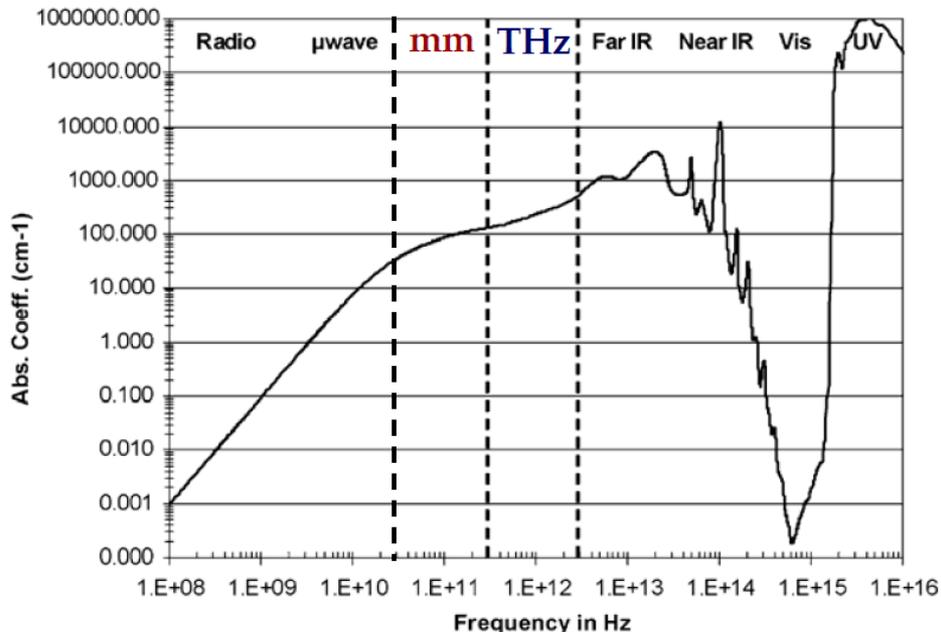
Aspect corpusculaire

$$E = h \cdot c / \lambda$$

Avec h constante de Planck



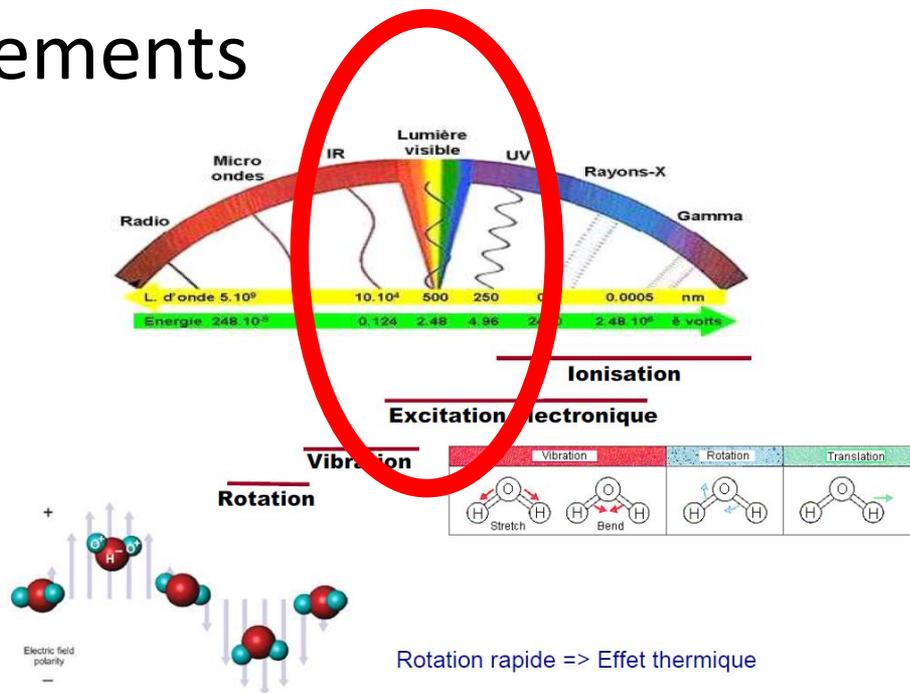
- Absorption du rayonnement par les tissus



Source: P.Siegel. THz Technology in Biology and Medicine, IEEE M-MTT, 52(10), 2438-2447, 2004.



- Différents mécanismes d'action des rayonnements



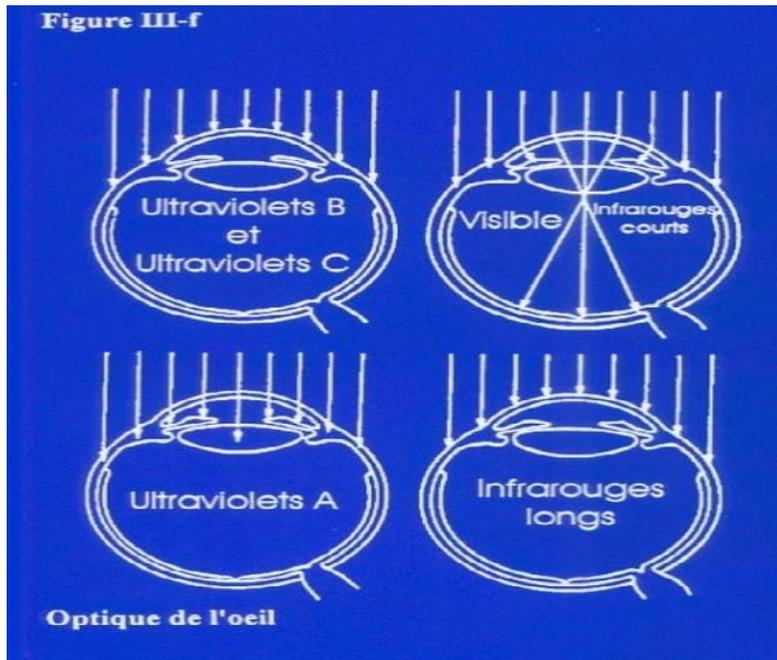
Yves Le Dréan, Interactions Ondes/Vivant, 9^e Symposium Comtech, 2011.



- Différentes cibles
 - La peau (UV, IR)
 - L'œil (UV, Visible, IR)
 - La cornée
 - Le cristallin
 - La rétine

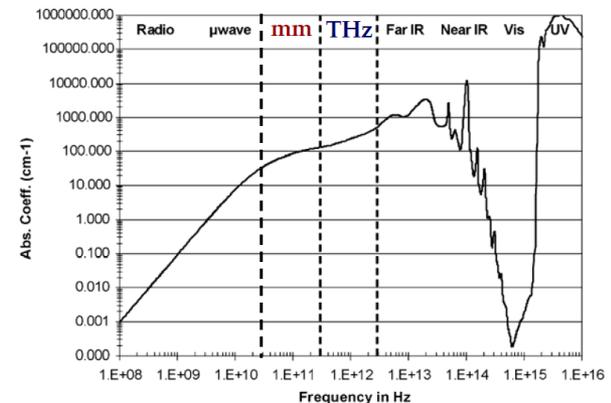


- Transparence de l'œil vs fréquence de la lumière



Transparence de la cornée et du cristallin aux différents rayonnements optiques.

Source: présentation JP Césarini "Éclairage, santé et qualité de vie", colloque éclairage Troyes 2010.



UV: Photokératite, cataracte.

IR: Cataracte "à la chaleur", brûlure de la rétine.

Visible: Photorétinite également appelée "lésion rétinienne par la lumière bleue" (blanchiment de la rétine sous l'action des ROS).



Notion d'exposition énergétique

- Exposition énergétique
 H : Eclairement énergétique x temps
 OU
- Dose de luminance D :
 Luminance énergétique x temps

– Exemples:

- H_{UVA} : 10 000 J/m²
- D_b : 10⁶ J/m²/sr

EN 62471:2008

– 19 –

UTE

Tableau 5.4 Résumé des limites d'exposition pour la surface de la peau ou de la cornée (valeur basée sur l'éclairement énergétique)

Identification du risque	Equation spécifique	Extension des longueurs d'ondes nm	Durée des expositions secondes	Ouverture radian (degré)	LE en éclairement énergétique constant W m ⁻²
UV actinique peau et œil	$E_S = \sum E_\lambda \cdot S(\lambda) \cdot \Delta\lambda$	200 – 400	< 30000	1,4 (80)	30/ t
UV-A œil	$E_{UVA} = \sum E_\lambda \cdot \Delta\lambda$	315 – 400	≤1000 >1000	1,4 (80)	10000/ t 10
Lumière bleue - petite source	$E_B = \sum E_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$	300 – 700	≤100 >100	< 0,011	100/ t 1,0
IR œil	$E_{IR} = \sum E_\lambda \cdot \Delta\lambda$	780 – 3000	≤1000 >1000	1,4 (80)	18000/ t ^{0,75} 100
Thermique cutanée	$E_H = \sum E_\lambda \cdot \Delta\lambda$	380 – 3000	< 10	2π sr	20000/ t ^{0,75}

Tableau 5.5 Résumé des limites d'exposition pour la rétine (valeurs basées sur l'éclairement énergétique)

Identification du risque	Equation spécifique	Extension des longueurs d'ondes nm	Durée des expositions secondes	Champ de vision radians	LE en luminance énergétique constant W·m ⁻² ·sr ⁻¹
Lumière bleue	$L_B = \sum L_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$	300 – 700	0,25 – 10 10-100 100-10000 ≥ 10000	0,011·√(t/10) 0,011 0,0011·√t 0,1	10 ⁶ / t 10 ⁶ / t 10 ⁶ / t 100
Thermique rétinien	$L_R = \sum L_\lambda \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda$	380 – 1400	< 0,25 0,25 – 10	0,0017 0,011·√(t/10)	50000/(α · t ^{0,25}) 50000/(α · t ^{0,25})
Thermique rétinien (stimulus visuel faible)	$L_{IR} = \sum L_\lambda \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda$	780 – 1400	> 10	0,011	6000/ α

Source: EN 62471:2008

Radioprotection
© EDP Sciences 2017
DOI: 10.1051/radiopro/2017026



Available online at:
www.radioprotection.org

ARTICLE

Some evidences that white LEDs are toxic for human at domestic radiance?

S. Point^{1,*} and J. Lambrozo²

¹ Emergency Lighting Design and Qualification Department, CS SAS, rue Beethoven, BP 10184, 63204 Riom cedex, France.

² Medical Studies Department, EDF, Levallois, France.

Radioprotection
© EDP Sciences 2019
<https://doi.org/10.1051/radiopro/2019013>



Available online at:
www.radioprotection.org

ARTICLE

Blue light hazard: does rat retina make relevant model for discussing exposure limit values applicable to humans?

S. Point^{*} and M. Beroud

Emergency Lighting Design and Qualification Department, Cooper Sécurité SAS, rue Beethoven, BP 10184, 63204 Riom Cedex, France.

Environmental Research 190 (2020) 109942



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Environmental Research

journal homepage: www.elsevier.com/locate/envres



Review article

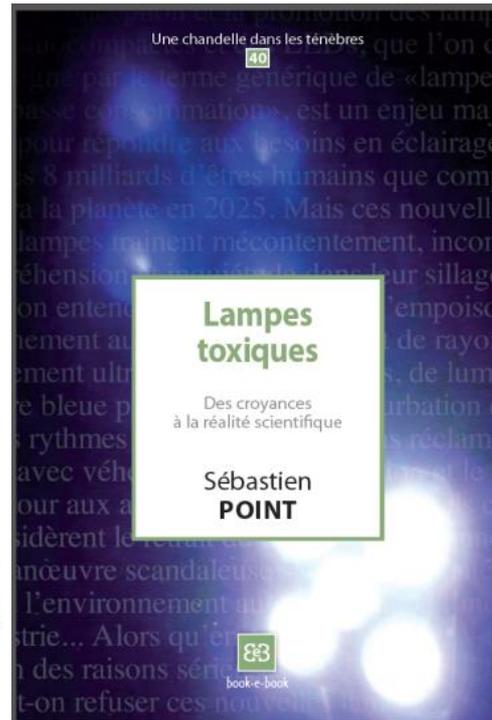
Effects and mechanisms of action of light-emitting diodes on the human retina and internal clock

Yvan Touitou^{a,*}, Sébastien Point^b

^a Unité de Chronobiologie, Fondation A. de Rothschild, 75019, Paris, France

^b Cooper Sécurité SAS, 63200, Riom, France





JANVIER 2012

FICHES TECHNIQUES DE LA SFRP

LAMPES À LED ET RISQUE RÉTINIEN
FICHE RÉDIGÉE PAR SÉBASTIEN POINT ET ANNICK BARLIER-SALSI

Les lampes à incandescence ont pour la plupart été retirées du marché en raison d'un spectre trop riche en lumière infrarouge non visible et, par conséquent, d'un rendement de conversion entre puissance électrique et puissance visible faible. Pour l'éclairage domestique, les nouvelles technologies de remplacement actuellement sont les lampes ou tubes fluorescents et les Diodes Électroluminescentes (LED). Ces dernières, notamment les blanches et les bleues, doivent faire l'objet d'une attention particulière car, dans certaines conditions d'exposition, leur luminance riche en bleu peut être à l'origine de photorétinite. Un rôle dans l'apparition de la DMLA et de possibles perturbations des rythmes circadiens a également été suggéré.

1 - QU'EST-CE QU'UNE LED ?

Les LED blanches du commerce sont pour la plupart constituées d'une diode de niture d'Indium-Gallium (InGaN) et d'un matériau luminescent, généralement du grenat d'aluminium Yttrium enrichi en Cérium (Ce:YAG). La figure 1 propose une vue schématisée de la structure d'une LED blanche à luminescence.



Figure 1 - structure simplifiée d'une LED blanche à luminescence. Source: [1].

Sous tension, par l'intermédiaire d'un phénomène appelé recombinaison radiative, la diode émet un rayonnement incohérent bleu centré sur 450/460 nm de longueur d'onde. Une partie de ce rayonnement bleu est absorbée puis réémise par le luminescent sous forme d'un rayonnement continu couvrant la partie du spectre visible comprise entre 500 nm à 700 nm de longueur d'onde. Le spectre d'une LED blanche à luminescence est donc constitué par la superposition du rayonnement bleu non converti et du rayonnement produit par la désactivation du luminescent (voir figure 2).

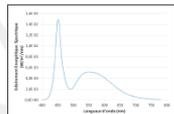


Figure 2 - spectre typique d'une LED blanche à luminescence. Source: [1].

Société Française de Radioprotection
Soc. Française de Radioprotection

• **FIN**

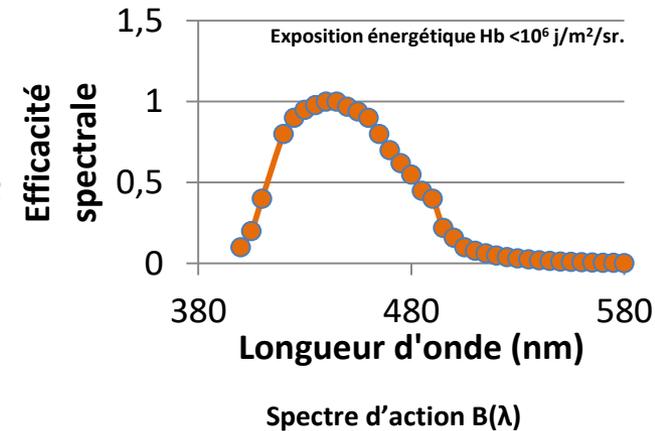
IEC 62471 Visible

- Un spectre d'action $B(\lambda)$ normalisé par ICNIRP
- Une dose de luminance maximale

$$D_b = < 10^6 \text{ j/m}^2/\text{sr} \text{ (} = \mathbf{2,2 \text{ J/cm}^2} \text{ pour } 1 \text{ pupille d'œil de } 3\text{mm} \text{)}$$

dont dérive la luminance efficace en lumière bleue

$$L_b = D_b / t$$



Modèle de rat: des incertitudes impactant la dosimétrie

S. Point and M. Beroud: Radioprotection

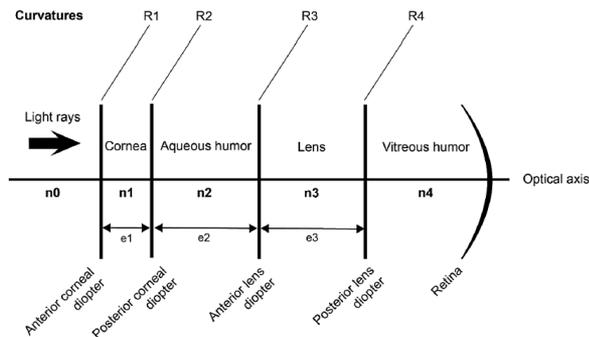
7

Annexe A. Detail of eye image focal length (f) calculation.

$f = n_4/V_0$
 $V_0 = V_c + V_{cr} - H'_{co}H_{cr}.V_c.V_{cr}$
 $V_c = V_{caf} + V_{cprf} - e_1.(V_{caf}.V_{cprf}).n_1$
 $V_{caf} = (n_1 - n_0)/R_1$
 $V_{cprf} = (n_2 - n_1)/R_2$
 $V_{cr} = V_{craf} + V_{crpf} - e_3.(V_{craf}.V_{crpf}).n_3$
 $V_{craf} = (n_3 - n_2)/R_3$
 $V_{crpf} = (n_4 - n_3)/R_4$
 $H'_{co}H_{cr} = -P_3H'_{co} + e_2 - P_3H_{cr}$
 $P_2H'_{co} = -e_2.f'c/f'caf$
 $f'c = n_2/V_c$
 $f'caf = n_1/V_{caf}$
 $P_3H_{cr} = e_3.f_{cr}/f'cprf$
 $f_{cr} = -n_3/V_{cr}$

$f'cprf = n_4/V_{cprf}$
 P_2 Vertices of corneal anterior face
 P_3 Vertices of crystalline anterior face
 H_{cr} Object principal point of crystalline lens
 H'_{co} Image principal point of cornea
 V_0 Vergence of the entire eye
 V_c Vergence of the entire cornea
 V_{cr} Vergence of the entire crystalline lens (homogenous model)
 V_{caf} Vergence of the corneal anterior face
 V_{cprf} Vergence of the corneal posterior face
 V_{craf} Vergence of the crystalline lens anterior face
 V_{crpf} Vergence of the crystalline posterior face
 $f'c$ Image focal length of the cornea
 $f'caf$ Image focal length of the corneal anterior face
 f_{cr} Object focal length of crystalline lens
 $f'cprf$ Image focal length of crystalline lens posterior face

S. Point and M. Beroud: Radioprotection



Radioprotection
© EDP Sciences 2019
<https://doi.org/10.1051/radiopro/2019013>


Available online at:
www.radioprotection.org

ARTICLE

Blue light hazard: does rat retina make relevant model for discussing exposure limit values applicable to humans?

S. Point* and M. Beroud

Emergency Lighting Design and Qualification Department, Cooper Sécurité SAS, rue Beethoven, BP 10184, 63204 Riom Cedex, France.

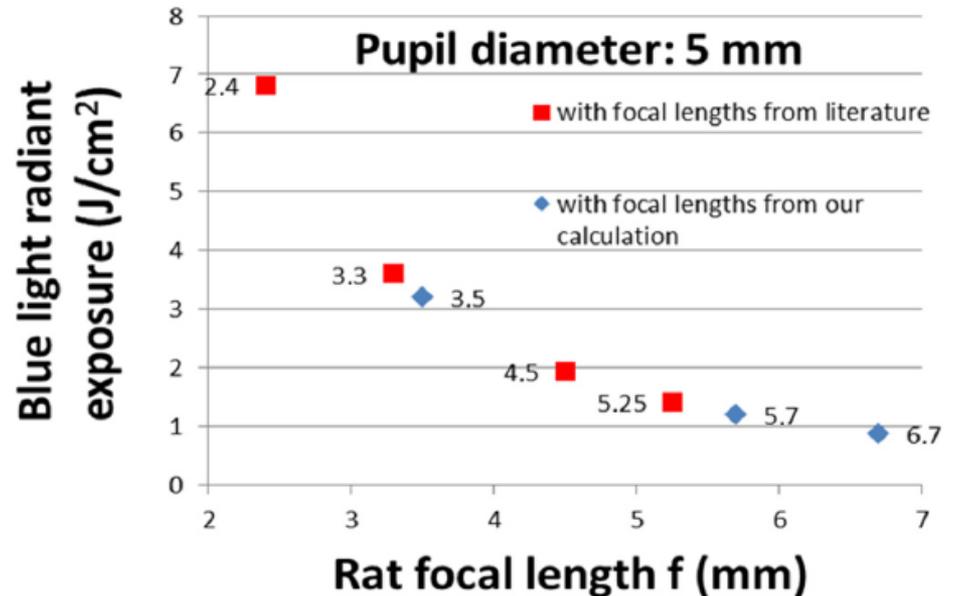


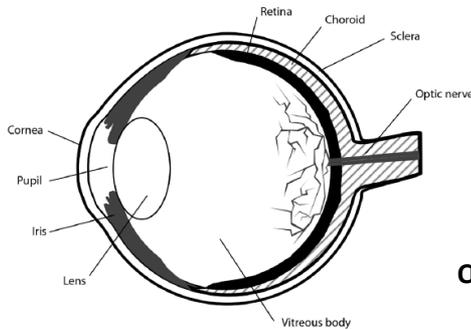
Fig. 6. Calculated values of radiant exposure for values of focal length in Tables 2 and 3 at a 5 mm rat pupil diameter for 20 000 s (≈ 5 h30 min) long exposure to an $8 \text{ W/m}^2/\text{sr}$ LED. Blue light exposure is the product of blue light irradiance by duration.

Des preuves d'effets faible dose chez le rat ... mais pas chez l'Homme

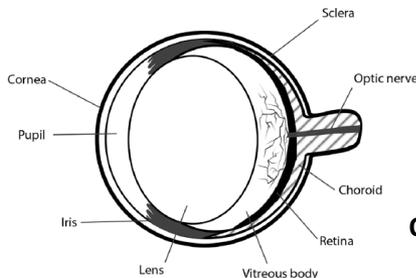
... et des facteurs de correction à prendre en compte...

$$E_{\text{retinal}} = \frac{\pi \cdot L \cdot s \cdot t \cdot d^2}{4 \cdot f^2},$$

where, d is the pupil diameter, f the focal length, and t the eye visible radiation transmission.



Œil humain



Œil du rat

Radioprotection
© EDP Sciences 2019
<https://doi.org/10.1051/radiopro/2019013>



ARTICLE

Blue light hazard: does rat retina make relevant model for discussing exposure limit values applicable to humans?

S. Point* and M. Beroud

Emergency Lighting Design and Qualification Department, Cooper Sécurité SAS, rue Beethoven, BP 10184, 63204 Riom Cedex, France.

Rat pupil size	Rat focal length		
	0.4 mm (extreme contraction under bright light)	2 mm (normal contraction under dim light)	5 mm (atropinized eye)
2.4 mm	$E_{\text{rat}} = 0.9 \cdot E_{\text{human}}$	$E_{\text{rat}} = 22 \cdot E_{\text{human}}$	$E_{\text{rat}} = 139 \cdot E_{\text{human}}$
5.25 mm	$E_{\text{rat}} = 0.2 \cdot E_{\text{human}}$	$E_{\text{rat}} = 5 \cdot E_{\text{human}}$	$E_{\text{rat}} = 29 \cdot E_{\text{human}}$

Relation between rat retinal irradiance and human retinal irradiance for a given radiance, depending on values chosen for d and f for rat model. For human: d = 3 mm; f = 17 mm.

Des preuves d'effets faible dose chez le rat ... mais pas chez l'Homme

Les études faites sur des rats ont une faible validité externe

8,33 W/m²/sr en lumière
blanche (2680 cd/m²)

$$E_{\text{retinal}} = \frac{\pi \cdot L_s \cdot t \cdot d^2}{4 \cdot f^2},$$

where, d is the pupil diameter, f the focal length, and t the eye visible radiation transmission.

Table 2. Calculated exposure values and exposure time involving some retina damages on rat eye (Jaadane *et al.*, 2015) and calculated light source radiance needed to produce same exposure on human retina with $d=3$ mm, $t=0.9$ and $f=17$ mm.

Calculated exposure D (J/cm ²) (Jaadane <i>et al.</i> , 2015)	Exposure time T (h) (Jaadane <i>et al.</i> , 2015)	Calculated E _{retinal} (W/m ²) (this study)	Full spectrum radiance for human eye L _s (W/m ² /sr) (this study)
81	12	18.7	852
125	18	19.3	876
151	24	17.5	794
303	48	17.5	797
453	72	17.5	794

Radioprotection
© EDP Sciences 2017
DOI: 10.1051/radiopro/2017026



Available online at:
www.radioprotection.org

ARTICLE

Some evidences that white LEDs are toxic for human at domestic radiance?

S. Point^{1,*} and J. Lambrozo²

¹ Emergency Lighting Design and Qualification Department, CS SAS, rue Beethoven, BP 10184, 63204 Riom cedex, France.

² Medical Studies Department, EDF, Levallois, France.

Table 3. Calculated Bλ-weighted blue radiance from the knowledge of white light radiance.

L _s (W/m ² /sr)	L _b (W/m ² /sr)
852	107.5
876	110.5
794	100
797	100.5
794	100

- Noell et al., Retinal damage by light in rats, *Investigative Ophthalmology*, Vol 5, N°5, October 1966.
- Ham W.T, Mueller H.A, Sliney D, Retinal sensitivity to damage from short wavelength light, *Nature*, Vol.260, N°5547, pp.153-155, March 11, 1976.
- Van Norren et Schellekens, *Vision Res.* Vol.30, No.10, pp. 1517-1520, 1990.)
- Young RW, 1988, Solar radiation and age-related macular degeneration, *Surv. Ophthalmol.*, 32:253.
- Felix et al, 1978, Melanin photoreactions in aerated media: electron spin resonance evidence for production of superoxide and hydrogen peroxide, *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 84:335.
- Korytowski et al, 1985, Mechanism of dismutation of superoxide produced during autooxidation of melanin pigments, *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 131:659.
- Korytowski et al, 1987, Photoinduced generation of hydrogen peroxide and hydroxyl radicals in melanins, *Photochem. Photobiol.*, 45:185.
- Youssef et al, Retinal light toxicity, *Eye* (2011) 25, 1-14.
- Ratnayake et al., "Blue light excited retinal intercepts cellular signalling", *Scientific reports* (2018) 8:10207.
- JP Césarini, Risques oculaires du rayonnement bleu, *Radioprotection*, Vol.44, N°4 (2009).
- IEC 62471. 2006. Photobiological safety of lamps and lamp systems.
- Sébastien POINT, *LEDs et sécurité oculaire*, *Photoniques* n°45, 2010.
- *Effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (LED)*, *Avis de l'Anses*, Rapport d'expertise collective, Edition scientifique (octobre 2010).
- Shang et al., White Light-Emitting Diodes (LEDs) at Domestic Lighting Levels and Retinal Injury in a Rat Model, *Environmental Health perspectives*, december 2013.
- Jaadane I et al. 2015. Retinal damage induced by commercial light emitting diodes (LEDs). *Free Radic. Biol. Med.* 84: 373–384.
- Krigel A et al. 2016. Light-induced retinal damage using different light sources, protocols and rat strains reveals LED phototoxicity. *Neuroscience* 339: 296–307.
- Shang YM et al. 2017. Light-emitting-diode induced retinal damage and its wavelength dependency in vivo. *Int. J. Ophthalmol.* 10(2): 191–202.
- Jaadane I et al. 2017. Effects of white light-emitting diode (LED) exposure on retinal pigment epithelium in vivo. *J. Cell Mol. Med.* 21(12): 3453–3466.
- Point S, Lambrozo J. 2017. Some evidences that white LEDs are toxic for human at domestic radiance? *Radioprotection* 52(4): 297–299.
- Lotmar W. 1976. A theoretical model for the eye of new-born infants. *Albrecht Von Graefes Arch. Klin. Exp. Ophthalmol.* 198(2): 179–185.
- Roarty JD, Keltner JL. 1990. Normal pupil size and anisocoria in newborn infants. *Arch. Ophthalmol.* 108(1): 94–95.
- Point S. 2018. Blue Light Hazard: are exposure limit values protective enough for newborn infants? *Radioprotection*.
- **Mukai R. et al. (2012) Functional and Morphologic Consequences of Light Exposure in Primate Eyes Investigative Ophthalmology & Visual Science September 2012, Vol.53.**
- **Hunter J. et al. (2012) The susceptibility of the retina to photochemical damage from visible light, Progress in Retinal and Eye Research 31 (2012) 28e42.**

Des preuves d'effets faible dose in vitro... mais pas chez l'Homme

Et les écrans?



Moon's results (2017) should also be discussed: in the experiments previously cited (Moon et al., 2017), the **in vitro** radiance of blue light (449 nm, 458 nm and 470 nm) on retinal cells was as high as **40 $\mu\text{W cm}^{-2}$** during 24 h and 48 h. Moon and colleagues noted that when retinal cells were exposed to blue light for 48 h using a display device with a blue light peak at 449 nm, reactive oxygen species (ROS) production increased about three times more than that of the control "incubated in the dark" and consequently suggested that low light intensity, such as that produced by screens, induces ROS production and damage in retinal cells. However, direct irradiance maintained during 48 h produces a total retinal radiant exposure of approximately **7 J cm^{-2}** , 3 times the limit based on a photobiological standard (2, 2 J cm^{-2} for a 3 mm pupil size). Moreover, considering optical light refraction by the human eye, a blue (449 nm) irradiance reaching **16 $\mu\text{W cm}^{-2}$** on the retina is produced through a typical eye with a 3 mm pupil size and a 17 mm focal length, by a blue (449 nm) radiance around **16 $\text{W/m}^2/\text{sr}$** , which is one order of magnitude above the typical blue radiance produced by screens.

Des effets faible dose?

Mise en évidence d'un effet cumulatif

Duration of each exposure (s)	Number of exposures	Time between each exposure	Radiant exposure value @ 441,6nm (J/cm ²)	Photochemical lesion
10 000	1	-	50	Moderately severe
1000	2	48	15	Minimal lesion
1000	10	48	7,5	No

Rappel:

l'exposition énergétique maximale est de 2,2 J/cm² (pendant 100 s pour RG1, et 10 000 s pour RG0)

Ham et al, 1978

Critique des résultats fondant les conclusions du rapport 2019 de l'Anses



- L'Anses préconise une diminution par un facteur 20 des niveaux d'exposition, fondée sur:
 - des études in vivo faites par exposition de rats à des niveaux d'éclairement dits domestiques (Shang et al, 2014 ; Shang et al, 2017 ; Krigel et al, 2016, Jaadane et al, 2015 ; Jaadane et al, 2017) ;
 - des études in vivo faites par exposition de primates à des niveaux d'éclairement cornéens de 7 000 lux (Mukai et al, 2012) ;
 - les travaux de Hunter et al , 2012 ;
 - des études in vitro.

Critique des résultats fondant les conclusions du rapport 2019 de l'Anses



- Les études in vivo faites par exposition de primates à des niveaux d'éclairement cornéens de 7 000 lux (Mukai et al, 2012):
 - Elles ont été menées sur des primates dont les propriétés physiologiques et biométriques de l'œil sont proches de celles de l'œil humain, mais les éclairagements, de l'ordre de 7 000 lux, ne sont pas représentatifs de situations d'éclairage normales.
- Les études in vitro:
 - Le rapport de l'Anses précise que ces études apportent des éléments contribuant à l'analyse des risques mais ne permettent pas une extrapolation directe sur les effets des LED sur la santé oculaire. Par ailleurs, certains résultats apparaissent contradictoires.

Critique des résultats fondant les conclusions du rapport 2019 de l'Anses



- Etudes in vivo sur les rats: voir partie effets faible dose
- Travaux de Hunter:
 - Hunter a mis en évidence un phénomène jusque-là méconnu, la réduction de l'autofluorescence de la lipofuscine (AF photobleaching en anglais), apparaissant à des niveaux de luminosité effectivement 20 fois inférieurs aux valeurs limite d'exposition. Ces résultats ont cependant été obtenu à 568 nm de longueur d'onde (lumière vert-jaune), région du spectre qui n'entre pas dans le champ du risque rétinien en lumière bleue

Des effets faible dose?

Des verres protecteurs?

Effet des verres "anti-lumière bleue" sur la luminance d'une LED 5180 K

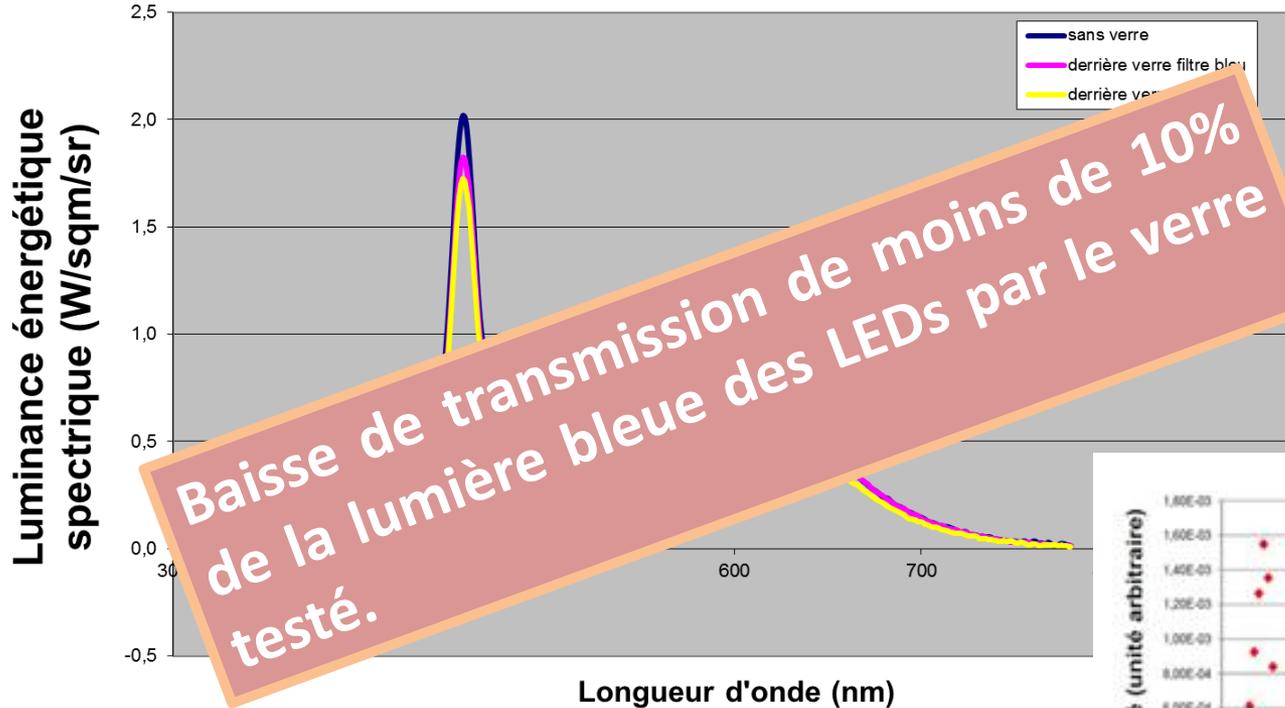
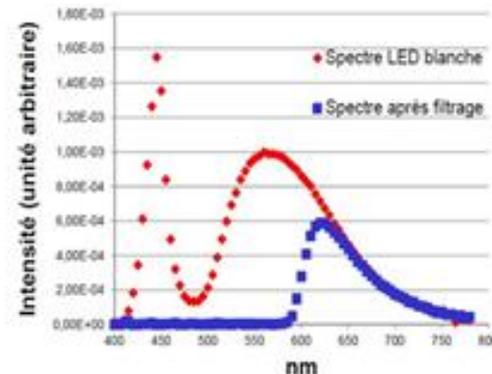


Figure 11: A gauche: spectre d'une LED blanche sans filtrage, après filtrage par un verre "antibleu", et après filtrage dans un verre simple. Source: S.Point. Ci-dessous: effet du filtrage de lunettes "Laser" utilisables comme EPI pour le personnel exposé à de fortes intensités de lumière bleue.

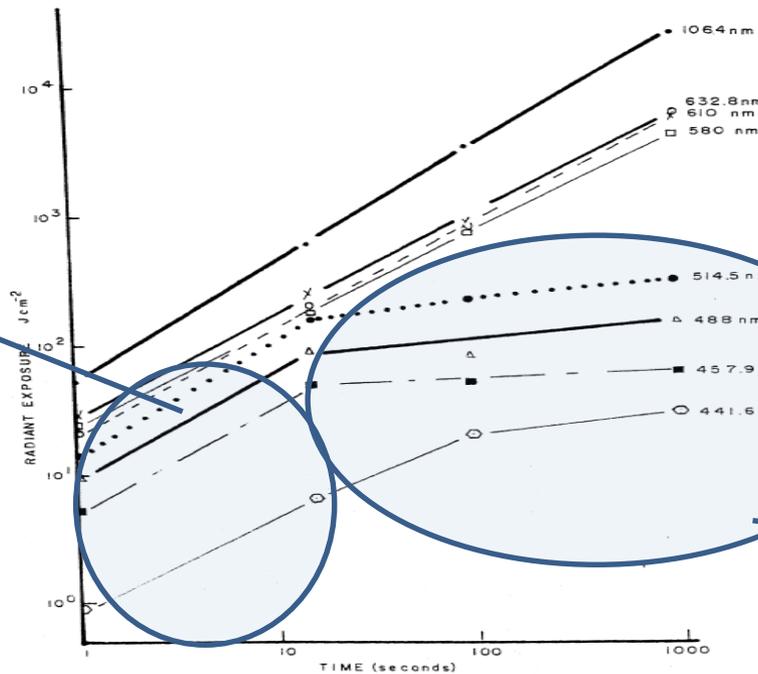


Yamamoto
NdYAG 532 nm OD 10

Des effets faible dose?

Un effet cumulatif?

WILLIAM T. HAM, JR. *et al.*



Domaine thermique

Domaine photochimique

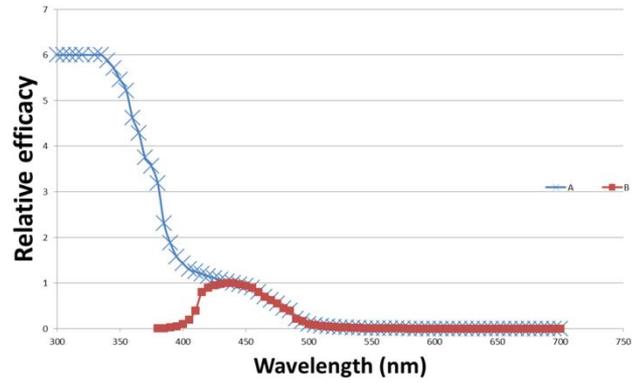
Mécanismes de protection et réparation submergés

Contribution thermique (Ham et al, 1978)?

Translocation de la transducine du segment externe au segment interne (Organisciak and Vaughan, 2010)?

Photostasis?

Figure 12: Radiant exposure required to produce a minimal lesion at various exposure times for eight wavelengths. H_0 in J/cm^2 is plotted on the ordinate vs exposure time in s along the abscissa in a log-log plot.



Énergie transportée par une onde plane

Par exemple, dans le cas d'une onde plane nous avons pris

$$\vec{E} = E_0 \vec{e}_x \cos(kz - \omega t)$$

d'où

$$\vec{B} = \frac{1}{c} E_0 \vec{e}_y \cos(kz - \omega t)$$

et

$$\vec{\Pi} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} = \frac{E_0^2}{\mu_0 c} \vec{e}_z \cos^2(kz - \omega t)$$

La puissance moyenne dans le temps étant égale par définition à

$$\langle \vec{\Pi} \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \vec{\Pi}$$

il vient après linéarisation du \cos^2

$$\langle \vec{\Pi} \rangle = \frac{E_0^2}{2\mu_0 c} \vec{e}_z$$

Mécanismes protecteurs

→ Antioxydants «préventifs»

Superoxide dismutase (neutralise l'ion radicalaire $O_2^{\cdot-}$)

Catalase (neutralise le peroxyde d'hydrogène H_2O_2)

La glutathion peroxidase (neutralise le peroxyde d'hydrogène H_2O_2 et des peroxydes organiques)

→ Fixateurs de radicaux libres

Vitamine C

Glutathion

→ Antioxydants de rupture de chaîne

Vitamine E

→ Pigments maculaires

Zeaxanthine et lutéine

→ Réparation du segment externe des photorécepteurs