
Effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (LED)

Saisine n° « 2008-SA-0408 »

RAPPORT d'expertise collective

« Comité d'Experts Spécialisés (CES) : Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements »

Octobre 2010

Mots clés

Diode électroluminescente (LED), éclairage, énergie, rétine, lumière bleue, éblouissement

Présentation des intervenants

GROUPE DE TRAVAIL

Présidente

Mme Francine BEHAR-COHEN - Directeur de recherche à l'Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale (Inserm), Physiopathologie des maladies oculaires : innovations thérapeutiques

Membres

Mme Annick BARLIER-SALSI - Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), spécialiste des rayonnements optiques sur le lieu de travail

M. Jean-Pierre CESARINI – Anatomo-pathologiste (Ancien Directeur du laboratoire de recherche sur les tumeurs de la peau humaine, fondation A. de Rothschild et Inserm) – Ultra-violet. Membre du CES « agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements »

M. Olivier ENOUF - Ingénieur en charge des essais de conformité des appareils à laser et de produits à LED, Laboratoire National d'Essais (LNE)

M. Michel GARCIA - Ingénieur dans pôle Éclairage, Électricité et Électromagnétisme (3E), Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)

M. Christophe MARTINSONS - Chef du pôle Éclairage, Électricité et Électromagnétisme (3E), Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)

M. Serge PICAUD - Directeur de recherche, Institut de la vision, Inserm, Traitement de l'information visuelle dans la rétine, pharmacologie et pathologies

Mme Françoise VIENOT - Professeur au Muséum National d'Histoire Naturelle, Responsable de l'équipe « Vision, lumière et apparence » au Centre de recherche sur la conservation des collections (CRCC)

M. Georges ZISSIS - Directeur adjoint du Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie, LaPlaCE, Université Toulouse 3

ADOPTION DU RAPPORT PAR LE(S) COMITE(S) D'EXPERTS SPECIALISES

Ce rapport a été soumis pour commentaires au CES : agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagement le 23 mars 2010 et le 3 juin 2010.

Président

M. Jean-François DORÉ – Directeur de Recherche Émérite à l'Institut National de la Santé Et de la Recherche Médicale (Inserm) - Champs électromagnétiques non ionisants – Ultra-violet.

Membres

Fabienne ANFOSSO-LÉDÉE – Ingénieur de recherche au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) – Bruit.

Michel BÉRENGIER – Adjoint au Chef de la division Entretien, Sécurité et Acoustique des Routes au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) – Bruit.

Jean-Pierre CÉSARINI – Retraité (Directeur du laboratoire de recherche sur les tumeurs de la peau humaine, fondation A. de Rothschild et Inserm) – Ultra-violets.

Jean-Claude COHEN – Coordinateur en biométéorologie à Météo France – Météorologie et santé.

Daniel COURANT – Chercheur, chef de projet au Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) – Rayonnements non ionisants (lasers, ultra-violets).

Frédéric COUTURIER – Responsable du département « Études » à l'Agence Nationale des Fréquences (ANFR) – Rayonnements non ionisants.

Jean-Claude DEBOUZY – Directeur du département « effets biologiques des rayonnements-biophysique » de l'institut de recherches biomédicales du service de santé des armées (IRBA-CRSSA) – Champs électromagnétiques non ionisants.

Aïcha EL KHATIB – Chargée de mission à l'Assistance Publique des Hôpitaux de Paris - Hôpital Avicenne – Exposition et pathologies professionnelles.

Emmanuel FLAHAUT – Chargé de recherche au Centre National de Recherche Scientifique (CNRS) – Nanomatériaux.

Eric GAFFET – Directeur de recherche *Nanomaterials research Group* au Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) – Nanomatériaux.

Martine HOURS – Chargée de recherche à l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (Inrets) – Rayonnements non ionisants.

Agnès JOB – Chercheur au Centre de Recherche du Service de Santé des Armées (CRSSA) – Bruit.

Antoine LABEYRIE – Professeur au Collège de France – Environnement et santé.

Jacques LAMBERT – Directeur de recherche à l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (Inrets) – Bruit.

Dominique LAURIER – Adjoint au chef de laboratoire d'épidémiologie à l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) – Épidémiologie.

Olivier LE BIHAN – Ingénieur études et recherche à l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (Ineris) – Hygiène industrielle et nanomatériaux.

Philippe LEPOUTRE – Responsable du pôle technique auprès de l'Autorité de Contrôle des Nuisances Sonores Aéroportuaires (Acnusa) – Bruit.

Didier MARCHAL – Directeur Hygiène Sécurité Environnement (HSE) Europe de la division *Automotive Experience* de Johnson Controls Inc. – Santé au travail.

Annie MOCH – Professeur à l'Université Paris X Nanterre – Bruit.

Philippe PIRARD – Médecin épidémiologiste au Département Santé Environnement à l'Institut national de Veille Sanitaire (IVS) – Épidémiologie.

Serge PLANTON – Ingénieur en chef à Météo France – Météorologie et santé.

Michel RUMEAU – Ingénieur en chef de la section acoustique, adjoint au chef de département de mesures physiques au Laboratoire Central de la Préfecture de Police (LCPP) – Bruit.

René DE SÈZE – Directeur de recherche à l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (Ineris) – Rayonnements non ionisants.

François TARDIF – Chef de laboratoire au Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) – Sécurité au travail et nanomatériaux.

Michel VALLET – Retraité (Directeur de Recherche à l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (Inrets) – Bruit

Paolo VECCHIA – Directeur de recherche à l'*Istituto Superiore di Sanità* (ISS, Rome, Italie) – Rayonnements non ionisants.

Après prise en compte des commentaires, le rapport a été approuvé par les membres du groupe de travail.

Il a été adopté par le CES « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » le 3 juin 2010.

PARTICIPATION ANSES

Coordination scientifique

Mme Dina ATTIA Chef de projets scientifiques dans l'unité « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » – Anses

M. Olivier MERCKEL Chef de l'unité « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » – Anses

Collaboration scientifique

Mme Johanna FITE Chargée de projets scientifiques dans l'unité « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » – Anses

Mme Clara GALLAND Chef de projets scientifiques dans l'unité « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » – Anses

Secrétariat administratif

Mme Sophia SADDOKI Anses

AUDITION DE PERSONNALITES EXTERIEURES

Auditionnés	Organisme	Date
Jaouad Zemmouri	Société Osyris	15/01/2009
Christian Corbé	Association Française de l'Éclairage – Président	25/06/2009
Bernard Duval	Association Française de l'Éclairage – Directeur général	06/07/2009
Frédéric Guiraud	Président du comité technique français TC 34 A (lampes) de la CEI (Commission Électrotechnique Internationale)	06/07/2009
David Sliney	<i>US Army – Center for health promotion and preventive medicine</i>	25/06/2009
Christian Grimm	Université de Zürich – Laboratory of retinal cell biology	16/06/2009
Howard Cooper	Inserm U846 – Département de chronobiologie	16/09/2009
Claude Gronfier	Inserm U846 – Département de chronobiologie	16/09/2009
Gabriel Coscas	Hôpital Intercommunal de Créteil – Service ophtalmologie	06/07/2009
Serge Mordon	Inserm U703	18/03/2010
Michel Jeanmougin	Hôpital Saint Louis - Photodermatologie	18/03/2010

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
Expertise collective : synthèse et conclusions	11
Abréviations	28
Liste des tableaux.....	29
Liste des figures	31
1 Présentation de l'auto-saisine.....	35
1.1 Contexte.....	35
1.2 Objet de l'auto-saisine	35
1.3 Modalités et traitement de l'auto-saisine.....	37
1.3.1 Déroulement de la saisine	37
1.3.2 Critères de qualité de l'expertise	37
2 Généralités sur l'éclairage et les LED.....	38
Résumé du chapitre.....	38
2.1 Rappels physiques.....	40
2.1.1 La radiométrie	41
2.1.2 La photométrie	42
2.1.3 Éclairement énergétique réel sur la rétine	46
2.1.4 La notion de température de couleur	47
2.1.5 Indice de rendu de couleur	47
2.2 Les différents types de sources de lumière	47
2.2.1 Les lampes à incandescence	49
2.2.2 Les lampes à décharge.....	50
2.2.3 Les diodes électroluminescentes (LED)	52
2.2.4 Les spectres émis par différentes sources de lumière	63
2.3 Systèmes d'éclairage et confort visuel des utilisateurs.....	65
2.3.1 Systèmes d'éclairage et matériels	65
2.3.2 Impact de l'équilibre des luminances.....	66
2.3.3 Éblouissement	67
3 Rayonnements optiques et pathologies.....	73
Résumé du chapitre.....	73
3.1 Photodynamie – Interaction de la lumière avec les systèmes biologiques	76
3.1.1 Considérations générales	76
3.1.2 Désactivation des états triplets avec des molécules, réaction photodynamique.....	77
3.1.3 Les espèces oxygénées réactives et leur formation.....	77
3.1.4 Absorption des rayonnements UV et visibles	78
3.1.5 Espèces radicalaires.....	78
3.1.6 Défenses contre le stress oxydant.....	79

3.1.7 Mise en évidence de la formation de radicaux libres dans la peau humaine	80
3.2 Anatomie – spécificités de l'œil	84
3.2.1 Rappels sur l'anatomie de l'œil humain	85
3.2.2 Les photorécepteurs	88
3.2.3 Le réseau neuronal	89
3.2.4 Contrôle rétinien du rythme circadien et de l'ouverture pupillaire	89
3.3 Rayonnements optiques et pathologies oculaires	91
3.3.2 Arguments cliniques pour une toxicité de la lumière sur la rétine	92
3.3.3 Mécanismes généraux de toxicité de la lumière sur la rétine	94
3.4 Anatomie - spécificités de la peau	96
3.4.1 Anatomie de la peau	96
3.4.2 Optique du tégument	97
3.4.3 Optique du stratum corneum et de l'épiderme	98
3.4.4 Optique du derme	98
3.5 Rayonnements optiques et pathologies cutanées.....	99
3.5.1 Les photodermatoses idiopathiques	99
3.5.2 Photosensibilité aux produits chimiques et aux médicaments	100
3.5.3 Photogénodermatoses	100
3.5.4 Les porphyries	100
3.5.5 Les dermatoses photo aggravées	101
3.5.6 Lupus érythémateux	101
3.5.7 Les cancers cutanés	101
3.5.8 Conclusions	101
4 Synthèse de la normalisation européenne relative aux systèmes d'éclairage à LED	102
Résumé du chapitre.....	102
4.1 Introduction	103
4.2 Normalisation, réglementation ou certification ?.....	104
4.2.1 La normalisation, garante des bonnes pratiques.....	104
4.2.2 La réglementation et le marquage CE	105
4.2.3 La certification	105
4.3 Exigences de sécurité matérielle des systèmes d'éclairage à LED.....	106
4.3.1 Terminologie	106
4.3.2 Cas des modules de LED	107
4.3.3 Cas des lampes à LED	108
4.3.4 Cas des luminaires à LED	109
4.3.5 Normes de mesures photométriques des dispositifs d'éclairage à LED	110
4.3.6 Présentation des certifications applicables aux dispositifs d'éclairage à LED	111
4.4 Exigences de sécurité photobiologique des systèmes d'éclairage à LED.....	111
4.4.1 Réglementation	112
4.4.2 Normes.....	113
4.4.3 Recommandations	116
4.4.4 Méthodes utilisées pour déterminer les niveaux d'exposition	119
4.4.5 Commentaires sur les valeurs limites d'exposition	121
4.5 Exigences de sécurité sanitaire liées aux champs électromagnétiques émis par les systèmes d'éclairage à LED	122

4.6 Conclusions.....	123
5 Effets sanitaires liés aux LED.....	124
Résumé du chapitre.....	124
5.1 Effets sur l'œil	128
5.1.1 Danger thermique	128
5.1.2 Danger photochimique : lumière bleue	128
5.1.3 Éblouissement	148
5.2 Autres effets	148
5.2.1 Effet sur les rythmes circadiens.....	148
5.2.2 Effets sur la peau	149
5.2.3 Effets indirects	150
6 Conclusions et recommandations du groupe de travail	151
6.1 Risques liés à une luminance trop élevée.....	151
6.2 Risques liés à la lumière bleue.....	151
6.3 Risque de perturbation de l'horloge biologique et de la contraction pupillaire	152
6.4 Risque lié au papillotement de la lumière émise par les LED	154
6.5 Populations sensibles	154
6.6 Évolution du marché.....	154
6.7 Valeurs limites d'exposition, normes et évaluation du risque.....	154
6.8 Recommandations pour la protection des populations	155
6.9 Recommandation pour des axes de recherche.....	157
Bibliographie.....	158
Annexes du chapitre 2 : « Éclairage et LED ».....	169
A - Le rôle de l'optique de l'œil dans le calcul de l'éclairement énergétique réel sur la rétine	169
B - Analyse de Cycle de Vie	175
C - Le recyclage des lampes	180
D - Le marché de l'éclairage français et européen	183
E - Le futur de l'éclairage	194
F - Les LED produisent une lumière sensiblement monochromatique.....	196
G - Principe de fonctionnement d'une LED à homo-jonction	198
H - Présentation des trois méthodes permettant d'obtenir de la lumière blanche avec des LED.....	200
I - L'efficacité externe des LED	204
J - Facteurs dont dépend l'efficacité des LED	207
K - Méthodes d'extrapolation utilisées pour l'estimation de la durée de vie des LED	210
L - Principaux facteurs influençant la durée de vie des LED	211
M - Le cycle de vie des LED	212
N - Les défis technologiques des LED	215

Annexes du chapitre 3 : « Lumière visible et pathologies »	220
A - Éléments supplémentaires concernant la cornée.....	220
B - Éléments supplémentaires concernant le cristallin.....	221
C - Éléments supplémentaires concernant la rétine.....	222
D - Éléments supplémentaires concernant les photorécepteurs	226
E - Éléments supplémentaire concernant le réseau neuronal rétinien	231
F - Éléments supplémentaires sur les rythmes circadiens et la contraction pupillaire	232
 Annexes du chapitre 4 : « Synthèse de la normalisation européenne relative aux systèmes d'éclairage à LED »	 236
A - Compatibilité électromagnétique (CEM).....	236
B - Réglementation concernant la classe énergétique des lampes	237
C - Normes relatives aux performances lumineuses de l'installation d'éclairage	238
D - Comparaison des normes NF EN 62471 (normes en vigueur pour les LED) et NF EN 60825-1 (norme laser anciennement utilisée pour les LED)	240
 Annexe du chapitre 5 : Effets sanitaires des systèmes d'éclairage à LED.....	 246
 Annexe : Synthèse des déclarations publiques d'intérêts des experts par rapport au champ de la saisine	 276

EXPERTISE COLLECTIVE : SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

Relatives à la saisine « Effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (LED) »

Ce document synthétise les travaux du comité d'experts spécialisés et du groupe de travail

Présentation de la question posée

La Directive européenne pour l'éco-conception (2005/32/CE) dite « EuP » (*Energy using Products*) prévoit l'amélioration des performances énergétiques de certains produits de consommation courante. Cette directive a été transposée en 2007 par les États membres de l'Union européenne et son entrée en vigueur a été planifiée entre 2008 et 2010.

En application de la Directive EuP, la Commission européenne, par décision du 18 mars 2009, a prévu une interdiction progressive de la commercialisation des lampes les plus consommatrices d'énergie, suivant un calendrier s'étalant du 1^{er} septembre 2009 au 1^{er} septembre 2016. Les ampoules fluo-compactes, dites « basse consommation », ou d'autres sources d'éclairage comme les diodes électroluminescentes (LED)¹ plus économes en énergie, ont pour vocation, à terme, à les remplacer.

Les diodes électroluminescentes sont des sources d'éclairage en plein développement technologique et économique. Utilisées depuis de nombreuses années dans l'électronique comme sources de lumières faibles et monochromatiques pour des applications de témoins lumineux, elles trouvent aujourd'hui leur place dans des systèmes d'éclairage à part entière : feux de signalisation, éclairage portable, feux de véhicules et éclairages domestiques d'ambiance, par exemple.

La première LED à spectre visible a été créée en 1962, émettant une intensité lumineuse extrêmement faible. La diode bleue a été inventée en 1990, suivie par la mise au point de la diode blanche, qui a permis de nouvelles applications majeures, notamment dans le domaine de l'éclairage et des écrans de télévisions et d'ordinateurs. Les premières LED blanches sont peu à peu apparues sur le marché et sont maintenant de plus en plus puissantes² (de l'ordre de plusieurs Watts). Pour produire de la lumière blanche, le procédé le plus répandu couple une LED bleue à un phosphore jaune.

La société OSYRIS³ s'est inquiétée, dans un courrier à destination de l'Institut de veille sanitaire (InVS) datant du 27 décembre 2007, des possibles impacts des LED sur la rétine. Dans ce courrier

¹ Nous utiliserons le terme « LED » pour désigner les diodes électroluminescentes, plutôt que l'acronyme français DEL, beaucoup moins usité.

² Source ADEME : « Les LED de faible puissance c'est-à-dire inférieure à 1 Watt sont utilisées comme voyant lumineux sur les appareils électroménagers par exemple. Les LED de forte puissance c'est-à-dire supérieure à 1 Watt supportent des courants plus importants (jusqu'à 1 500 mA) et fournissent d'avantages de lumière (135 lm / W) »

³ Société française spécialisée autour des lasers et leurs applications dans les domaines médical et industriel.

était souligné le lien possible entre l'exposition de l'œil à des rayonnements de longueurs d'ondes courtes, proches des ultraviolets (caractéristiques des spectres lumineux des LED) et le risque d'induire une pathologie oculaire : la dégénérescence maculaire liée à l'âge. L'InVS a transféré la lettre de la société OSYRIS à l'Afsset dans un courrier daté du 14 janvier 2008.

Parallèlement, la question de l'impact des LED sur la santé au travail a été soulevée lors de discussions informelles entre l'Afsset et la Direction générale du travail (DGT), celle-ci étant alertée par les projets récents d'éclairage intérieur de bâtiments au moyen de LED. Il est en effet probable que le développement de ce type de solutions d'éclairage s'accélère, notamment pour des raisons de coût économique.

Contexte scientifique et normatif

L'éclairage représente en France 10 % de la consommation électrique totale, soit 350 kW / h par an et par ménage⁴. Les LED sont des systèmes d'éclairage beaucoup moins consommateurs d'énergie que d'autres types d'éclairage et ont des durées de vie beaucoup plus longues.

Les lampes à incandescence ont une efficacité lumineuse de l'ordre de 10 à 15 lumens⁵ par Watt (lm / W), les lampes halogènes de l'ordre de 15 à 30 lm / W, les lampes fluorescentes compactes de l'ordre de 50 à 100 lm / W. Actuellement, certaines LED atteignent des rendements allant jusqu'à 100 à 150 lm / W, avec des prévisions pour 2020 de l'ordre de 200 lm / W⁶.

La définition de la durée de vie d'une LED n'est pas à ce jour normalisée. Les LED ont actuellement des durées de vie importantes (estimées jusqu'à 50 000 h⁷, soit cinquante fois celles des lampes à incandescence, et 3 à 5 fois celles des lampes fluorescentes compactes).

La technologie des LED, qui présente certains avantages par rapport aux autres types d'éclairage (efficacité énergétique, durée de vie), est en pleine évolution mais la qualité de la lumière (température de couleur⁸, indice de rendu de couleur⁹) émise par ces lampes ne présente pas toujours le même niveau de performances que les autres sources d'éclairage. À l'heure actuelle, l'impact environnemental des LED est nettement moins bon que les autres types d'éclairage.

Des composantes intenses dans la partie bleue du spectre de la lumière émise par les LED, ainsi que des intensités de rayonnement très importantes émises par ces sources quasiment ponctuelles font craindre de nouveaux risques sanitaires liés à ces sources d'éclairage.

⁴ Source ADEME 2010

⁵ Le lumen est l'unité utilisée pour quantifier le flux lumineux

⁶ La limite théorique de l'efficacité lumineuse des sources lumineuses est fixée à 683 lm / W.

⁷ Source ADEME 2010

⁸ La température de couleur d'une lumière blanche permet de définir sa teinte, plus ou moins chaude ou froide ; les lumières de teintes chaudes « tirent » sur le jaune-orangé et ont une température de couleur inférieure à 3 000 K. Plus la température de couleur augmente et plus la teinte est dite « froide ».

⁹ L'Indice de Rendu des Couleurs (IRC) est un indice compris entre 0 et 100 qui définit l'aptitude d'une source lumineuse à restituer les différentes couleurs des objets qu'elle éclaire, par rapport à une source de référence. La lumière solaire a un IRC de 100, tandis que certaines lampes à vapeur de sodium basse pression (utilisées dans les tunnels routiers par exemple) ont un IRC de 20. Dans les magasins, les locaux scolaires ou les bureaux, l'IRC devrait toujours être supérieur à 80.

Quelques travaux scientifiques [Dawson *et al.*, 2001¹⁰, Ueda *et al.*, 2009¹¹] s'appuyant sur des expériences réalisées sur des singes en laboratoire avec des LED bleues laissent en effet suspecter un danger pour la rétine lié à l'exposition à des diodes électroluminescentes.

Pour sa part, Altkorn [Altkorn *et al.*, 2005] s'est intéressé à l'impact sanitaire des LED en décrivant le débat qui existait sur le positionnement des LED dans le contexte normatif : doivent-elles être classées, en termes de risque photobiologique, selon les normes relatives aux lasers ou selon les normes relatives aux sources incohérentes ? Jusqu'en 2008, en effet, les LED étaient traitées de la même manière que les sources laser. Depuis janvier 2008, la norme « lasers » NF EN 60825-1 recommande d'utiliser, pour les dispositifs à LED, la norme de sécurité photobiologique relative aux sources incohérentes CIE¹² S009:2002 « *Photobiological safety of lamps and lamp systems* » transcrite en norme française (NF EN 62471) en décembre 2008.

Organisation de l'expertise

Le sujet de l'impact sanitaire des LED a été discuté par le Comité d'experts spécialisés (CES) « agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » de l'Afsset le 23 septembre 2008. Le CES a jugé cette thématique suffisamment préoccupante et s'est déclaré prêt à traiter cette question sous la forme d'une auto-saisine.

Le Conseil scientifique de l'Afsset a donné un avis favorable, le 29 septembre 2008, à l'auto-saisine de l'Afsset sur la question des impacts sanitaires liés à l'usage des systèmes d'éclairage par diodes électroluminescentes. L'Afsset a confié la réalisation de cette expertise au CES « agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ». Sur avis du CES, l'agence a mandaté un groupe de travail pour instruire cette expertise. Ce groupe de travail a été constitué, à la suite d'un appel à candidatures public ouvert du 12 décembre 2008 au 12 mars 2009, d'experts en ophtalmologie, en dermatologie, en éclairage et en physique des rayonnements optiques.

Le groupe de travail coordonné par l'Afsset s'est réuni à 10 reprises en sessions plénières, du 13 mai 2009 au 26 mars 2010. Le groupe de travail a par ailleurs sollicité l'audition d'experts scientifiques nationaux, internationaux et de représentants de l'Association française de l'éclairage (AFE) afin d'obtenir toutes les informations pertinentes pour répondre à cette auto-saisine. Pour réaliser cette expertise, le groupe de travail s'est appuyé sur une large revue de la littérature scientifique internationale complétée par des auditions de personnalités scientifiques. Une contribution écrite portant sur le marché de l'éclairage français et européen et sur le recyclage des lampes a été sollicitée auprès de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie).

L'analyse bibliographique entreprise par le groupe de travail « LED » a été aussi exhaustive que possible. Les travaux scientifiques pris en compte dans le rapport sont issus de publications écrites dans des revues internationales anglophones à comité de lecture.

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été soumis régulièrement au CES, tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

¹⁰ Dawson, et al, *Local fundus response to blue (LED and laser) and infrared (LED and laser) sources*, Exp. Eye Res., 73(1):137-47 2001

¹¹ Ueda et al, *Eye damage control by reduced blue illumination*, Exp. Eye Res, 89(6):863-8. 2009

¹² CIE : Commission Internationale de l'Eclairage

Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise » avec pour objectif de respecter les critères de compétence, d'indépendance et de transparence tout en assurant la traçabilité.

Résultat de l'expertise collective

L'expertise des membres du groupe de travail s'est articulée autour de différents axes :

- un état des lieux de l'éclairage ;
- une présentation de la technologie des LED ;
- une analyse de l'interaction de la lumière avec les systèmes biologiques (œil, peau) ;
- une synthèse de la normalisation applicable aujourd'hui aux LED ;
- une analyse des effets sanitaires potentiels des LED.

L'originalité de ce travail réside notamment dans les calculs et mesures effectués par les membres du groupe de travail dans leurs laboratoires respectifs (CSTB¹³, INRS¹⁴, LNE¹⁵) pour classer en termes de groupe de risque quelques exemples de systèmes à LED selon la norme de sécurité photobiologique applicable aux LED (NF EN 62471).

Le CES « agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » a adopté les travaux d'expertise collective ainsi que ses conclusions et recommandations, objets du présent rapport, lors de sa séance du 03 juin 2010 et a fait part de cette adoption à la Direction générale de l'Afsset.

Conclusions de l'expertise collective

Le groupe de travail, à l'issue de son travail d'analyse de la littérature scientifique existante et des données recueillies lors d'auditions complémentaires, a identifié des effets sanitaires potentiels liés à l'usage des LED.

Caractéristiques des LED, pertinentes pour l'évaluation des risques

Le principe de fonctionnement des diodes électroluminescentes repose sur la polarisation d'un semi-conducteur par application d'une tension qui provoque l'émission de photons. Un rayonnement quasi-monochromatique est émis, dont la longueur d'onde dépend du semi-conducteur utilisé. Il n'existe pas de semi-conducteur permettant à lui seul d'émettre de la lumière blanche. Il existe néanmoins aujourd'hui trois méthodes différentes pour produire indirectement de la lumière blanche avec une LED. Étant données les limites technologiques et les impératifs de rendement énergétique, la méthode de production de lumière blanche la plus répandue aujourd'hui utilise la transformation d'une partie de la lumière d'une diode bleue par un luminophore jaune.

- **Déséquilibre spectral dans le bleu**

Le spectre des LED blanche présente une forte proportion de lumière bleue (pic bleu dans le spectre). Par ailleurs, le spectre d'émission des LED blanches est composé d'émissions très

¹³ CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

¹⁴ INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles.

¹⁵ LNE : Laboratoire National de Métrologie et d'Essais.

faibles entre le bleu et le jaune. Ces caractéristiques sont très particulières des LED, elles ne sont pas rencontrées pour les autres types d'éclairage conventionnels.

- **Fortes luminances**¹⁶

Les LED sont des sources de lumière ponctuelles que l'on peut agréger dans un luminaire pour atteindre des flux élevés. Du fait de leur caractère ponctuel, la surface émissive des LED possède une forte luminance, au moins 1 000 fois plus élevée (10^7 cd / m²) que celle d'une source d'éclairage traditionnelle.

- **Effet stroboscopique**

Les alimentations électriques des systèmes d'éclairage à LED peuvent, en fonction de leur architecture, fournir une puissance présentant des variations temporelles, ce qui se traduit par des fluctuations de l'intensité de la lumière produite, plus ou moins perceptibles par l'œil. Ces variations d'amplitudes ne sont pas encore caractérisées finement¹⁷. Les fréquences de ces effets peuvent varier de quelques Hertz à quelques centaines de Hertz¹⁸ pour les LED déjà étudiées.

Effets sanitaires identifiés

Les principaux risques sanitaires associés à l'éclairage par LED résultent de leur très grande luminance (c'est-à-dire la densité surfacique d'intensité lumineuse émise par ces sources de taille très faible) associée à un spectre d'émission particulier des LED blanches, riche en lumière bleue (courtes longueurs d'onde). D'autres effets potentiels sont évoqués comme la perturbation des rythmes circadiens et les effets stroboscopiques.

Vis-à-vis des nombreux effets potentiels identifiés (effet photochimique, éblouissement, etc.), il n'existe actuellement que peu de données pour quantifier les risques sanitaires associés. D'autre part, il n'existe actuellement pas de données d'exposition des personnes relatives à un éclairage avec des systèmes utilisant des LED. Il en est de même pour les autres types d'éclairage.

Ainsi, le groupe de travail n'a pu présenter des évaluations chiffrées que dans le cas des risques liés à l'exposition à la lumière bleue, évalués selon la norme NF EN 62471 de sécurité photobiologique. Cependant, cette norme est mal adaptée à des éclairages utilisant des LED. Compte tenu des connaissances actuelles, les valeurs limites d'exposition données dans cette norme ne permettent pas de prendre en compte l'exposition quotidienne aux LED.

¹⁶ La luminance (en cd / m²) quantifie la lumière émise par une source étendue, par unité de surface. Elle définit l'impression lumineuse perçue par un observateur qui regarde la source. Elle permet donc d'évaluer l'éblouissement.

¹⁷ La fréquence ainsi que le taux de modulation (rapport entre l'amplitude de la fluctuation et la valeur moyenne de la lumière) dépendent fortement du mode d'alimentation. Pour une alimentation en courant continu (redressée et filtrée), la fréquence de la fluctuation est de 100 Hz et le taux de modulation peut atteindre des valeurs allant de 2 % à 20 % en fonction de la qualité du filtrage. Pour une alimentation PWM (*Pulse Width Modulation*), la fréquence est de l'ordre de dizaines de kilo-Hertz, le taux de modulation peut être variable, et il peut dépasser 50 %. Enfin, pour la nouvelle technologie des LED alimentées en courant alternatif, la fréquence de fluctuation est de 100 Hz et le taux de modulation peut atteindre 100 %.

¹⁸ A Review of the Literature on Light Flicker: Ergonomics, Biological Attributes, Potential Health Effects, and Methods in Which Some LED Lighting May Introduce Flicker, IEEE Standard P1789 (2010)

Dans la description suivante des risques identifiés par le groupe de travail, les effets sur l'œil, d'origine thermique ou photochimique, ont été séparés des autres effets se rapportant notamment à la perturbation des rythmes circadiens.

Effets sur l'œil

- **Risque lié à un effet thermique de la lumière**

Le risque d'effet thermique est associé à une brûlure de la rétine résultant généralement d'une exposition de courte durée à une lumière très intense. Ce type de danger concerne toutes les longueurs d'onde, de l'ultraviolet à l'infrarouge en passant par le visible. Ce type de risque associé aux lasers est peu probable dans un usage classique des LED.

- **Risques liés aux effets photochimiques de la lumière bleue**

Le risque d'effet photochimique est associé à la lumière bleue et son niveau dépend de la dose cumulée de lumière bleue à laquelle la personne a été exposée. Ainsi, il s'agit généralement d'expositions modérées répétées sur de longues durées.

- o Caractérisation du risque

Des arguments issus d'observations humaines et d'expériences sur des cultures cellulaires et sur différentes espèces animales convergent pour démontrer une toxicité particulière des courtes longueurs d'ondes (bleues) pour la rétine.

La lumière bleue est responsable de dommages photochimiques. Les lésions touchent la rétine externe (photorécepteurs et cellules de l'épithélium pigmentaire) et apparaissent de façon retardée. Ces lésions peuvent ne pas être visibles par l'examen ophtalmoscopique. Deux types de lésions photochimiques ont été décrits : celles résultant d'interaction avec les pigments visuels touchent les photorécepteurs et celles liées à l'interaction avec la lipofuscine touchent les cellules de l'épithélium pigmentaire.

Ces interactions induisent la production de radicaux libres cytotoxiques à forte dose. Les pigments photoréactifs (lipofuscine) dans l'épithélium s'accumulent avec l'âge, augmentant le risque de stress oxydant. La mort cellulaire a des conséquences fonctionnelles d'autant plus marquées qu'elle touche la région maculaire (vision centrale).

La question de savoir si les lésions cumulées résultant de stress oxydant à faibles doses pourraient, au long cours, favoriser un vieillissement prématuré de la rétine et favoriser une dégénérescence maculaire reste posée.

A ce jour, il n'existe pas de modèles animaux pertinents de dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA), car tous les modèles utilisent des rongeurs, or seuls les primates et certains oiseaux ont des *maculae*. Les durées nécessaires aux suivis de ceux-ci sont incompatibles avec les protocoles expérimentaux.

Chez l'homme, des expositions solaires répétées à de fortes luminances peuvent induire des lésions maculaires irréversibles proches de celles observées dans les maculopathies liées à

l'âge, mais les études épidémiologiques réalisées dans ce domaine n'ont pas permis d'identifier de façon unanime l'exposition solaire comme un facteur de risque de DMLA.

Les effets aggravants de la lumière bleue sur la DMLA sont fortement soupçonnés et issus d'observations convergentes sur des modèles expérimentaux. Ces effets n'ont jamais pu être démontrés par des études épidémiologiques chez l'homme, en raison d'une difficulté à évaluer l'exposition et les prédispositions individuelles.

Le cristallin des adultes (qui, du fait de son jaunissement, absorbe en partie les rayonnements bleus) et les pigments maculaires protègent en partie de cette toxicité par leur capacité à absorber la lumière bleue. Ces mécanismes protecteurs sont plus faibles chez l'enfant (dont le cristallin est transparent), le sujet aphake (absence de cristallin) et le sujet pseudophake (cristallin artificiel). Cette protection est également réduite en cas de diminution du pigment maculaire, comme observée au cours de certaines pathologies maculaires (par exemple la DMLA).

o **Exposition aux LED**

Il n'existe actuellement pas de données d'exposition des personnes à un éclairage avec des systèmes utilisant des LED. Il en est de même pour les autres types d'éclairage existants.

o **Normes de sécurité photobiologique**

Présentation de la norme NF EN 62471 et groupes de risques

La norme NF EN 62471 relative à la sécurité photobiologique des lampes et des appareils utilisant des lampes propose des limites d'exposition au rayonnement des sources de lumière utilisées notamment en éclairage, et donne une classification basée sur les luminances et les éclairagements effectifs ainsi qu'une méthode de mesure de ces grandeurs. Cette norme s'intéresse à l'ensemble des dangers photobiologiques pour l'œil (dangers thermiques et photochimiques), pour des longueurs d'ondes allant de l'ultraviolet à l'infrarouge.

La norme définit 4 groupes de risques :

- o groupe de risque 0 (exempt de risque), le produit ne présente aucun risque photobiologique ;
- o groupe de risque 1 (risque faible), le produit ne présente pas un risque lié aux limites d'exposition en condition d'utilisation normale ;
- o groupe de risque 2 (risque modéré), le produit ne présente pas un risque lié à la réponse d'aversion pour les sources à lumière très brillante ou en raison de l'inconfort thermique ;
- o groupe de risque 3 (risque élevé), le produit peut présenter un risque même pour une exposition momentanée ou courte.

Carences et inadaptation de la norme

- *Valeurs limites d'exposition non adaptées pour des expositions répétées à la lumière bleue*

Les valeurs limites d'exposition pour la population générale destinées à éviter des lésions aiguës de la rétine sont proposées par l'Icnirp^{19,20} et reprises dans la Norme NF EN 62 471 et la directive européenne 2006/25/CE relative aux rayonnements optiques artificiels.

Ces valeurs limites d'exposition sont calculées pour une exposition à une source de lumière dans le champ de vision pour une journée de travail de 8 heures. Elles sont issues de données expérimentales et pondérées par un facteur minorant de 5 à 10 fois les énergies nécessaires à produire des lésions observables.

En pratique, des expériences chez l'animal ont déterminé les seuils d'énergie capables d'induire des lésions du fond d'œil observables macroscopiquement par ophtalmoscopie après une exposition unique à la lumière. Ces lésions correspondent à un blanchiment de la rétine neurale, consécutive à un œdème des couches rétinienne superficielles.

Au vu des connaissances actuelles, les valeurs limites d'exposition en vigueur ne permettent pas d'évaluer le risque d'exposition chronique quotidienne à la lumière bleue. La classification des lampes suivant les niveaux ne prend pas en compte les risques au long cours des expositions cumulées. Cela signifie que des expositions répétées et prolongées pourraient induire un risque cumulé potentiellement supérieur à celui évalué par les valeurs limites d'exposition.

- *Ambiguïté dans les distances de mesures*

Pour les lampes d'éclairage courant, la norme NF EN 62 471 prévoit une évaluation du groupe de risque à la distance à laquelle elles produisent un éclairage de 500 lx. Pour les autres types de lampes, la détermination du groupe de risque doit se faire pour le pire cas d'observation, à savoir une distance de 200 mm.

Le groupe de risque d'un système d'éclairage à LED peut être déterminé selon l'un ou l'autre des protocoles de mesure, conduisant à une classification très différente (l'évaluation à 500 lx donne toujours une évaluation minorée par rapport à l'évaluation à 200 mm). Il existe donc une ambiguïté sur la distance à laquelle les mesures doivent être faites.

- *Non prise en compte des populations sensibles à la lumière bleue*

Pour évaluer le risque lié à la lumière bleue, la norme NF EN 62 471 recommande d'utiliser la courbe de phototoxicité de la lumière bleue proposée par l'Icnirp. Cette courbe ne convient que pour les adultes. La norme ne donne pas de recommandations particulières pour les populations dont les mécanismes naturels de

¹⁹ ICNIRP Commission Internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants, « *Guidelines on limits of exposure to broad band incoherent optical radiation (0.38 to 3 µm)* », (1997)

²⁰ ICNIRP Commission Internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants, « *ICNIRP statement on light-emitting diodes (LED) and laser diodes : implication for hazard assessment* », (2000)

filtrage de la lumière bleue sont réduits (enfants, aphakes, pseudophakes), ou plus sensibles car atteintes de maladies rétinienne. Or, une autre courbe de phototoxicité de la lumière bleue est proposée par l'Inirp pour les populations aphakes. La norme actuelle ne permet pas de prendre en compte les populations sensibles à la lumière bleue.

o Les mesures du groupe de travail

Le groupe de travail a conduit des évaluations du risque définies selon la norme NF EN 62 471 pour différents systèmes d'éclairage afin de comparer les LED aux autres types d'éclairage.

Il apparaît que certaines LED très couramment utilisées en éclairage, signalisation et balisage appartiennent au groupe de risque 2, alors que toutes les autres sources d'éclairage disponibles pour le grand public ne dépassent pas les groupes de risque 0 ou 1. Les durées limites d'exposition induites par ce classement dans le groupe 2 varient entre quelques secondes pour certaines LED bleu roi et quelques dizaines de seconde pour certaines LED blanc froid.

Les LED et les systèmes d'éclairage à base de LED peuvent se trouver dans différents groupes de risque selon leur luminance et leur teinte (blanc froid, blanc chaud, etc.), augmentant ainsi la difficulté de maîtriser ce risque.

o Populations sensibles ou particulièrement exposées

Trois populations plus particulièrement sensibles au risque ou particulièrement exposées à la lumière bleue ont été identifiées :

- o les enfants (transparence du cristallin), les personnes aphakes (sans cristallin) ou pseudophakes (cristallin artificiel) qui ne filtrent pas (ou peu) les courtes longueurs d'ondes (notamment la lumière bleue) du fait de leur cristallin ;
- o les populations sensibles à la lumière : patients atteints de certaines maladies oculaires et cutanées, patients consommant des substances photo-sensibilisantes, etc.) pour lesquelles la lumière bleue peut être un facteur aggravant de leur pathologie ;
- o les populations particulièrement exposées aux LED (certaines populations de travailleurs : installateurs éclairagistes, métiers du spectacle, etc.) qui sont soumises à des éclairages de forte intensité, et sont donc susceptibles d'être exposées à de fortes quantités de lumière bleue.

o Conclusions relatives au risque lié à la lumière bleue

Il est important de signaler que d'autres sources très utilisées en éclairage, notamment des lampes à décharge haute pression (lampes à iodures métalliques pour l'éclairage extérieur) sont également classées dans le groupe de risque 2. Cependant, ces lampes sont destinées à des applications bien maîtrisées et ne peuvent être installées que par des professionnels qui sont tenus de limiter le niveau d'exposition de la population.

L'arrivée des LED sur le marché de l'éclairage grand public marque un tournant sans précédent : c'est la première fois que des sources classées dans le groupe de risque 2 sont accessibles au grand public, en vue d'applications domestiques et qui plus est, sans marquage de ce risque.

Une même LED considérée individuellement ou intégrée dans un système d'éclairage pourrait être classée dans des groupes de risques différents selon la distance d'évaluation imposée par la norme NF EN 62 471.

Les évolutions des technologies d'éclairage à LED, d'un point de vue des performances lumineuses, devraient largement se poursuivre dans les prochaines années. Les risques associés à une exposition aux systèmes d'éclairage à LED sont donc susceptibles d'être accentués avec l'augmentation des luminances.

La méthodologie adoptée dans ce rapport a permis d'évaluer les risques photobiologiques liés à des LED dont le flux se situe dans la moyenne de la gamme de flux disponibles au moment de la rédaction de ce document. À ce jour et dans les quelques années qui viennent, les progrès technologiques ne laissent pas présager l'apparition de LED relevant du groupe de risque 3. En revanche, avec l'augmentation des flux et des luminances, il ne fait aucun doute que de plus en plus de LED vont apparaître dans le groupe de risque 2.

• Risques liés à l'éblouissement

Il existe deux types d'éblouissement : l'éblouissement d'inconfort et l'éblouissement d'incapacité.

L'éblouissement d'inconfort produit une sensation désagréable, sans nécessairement troubler la vision des objets. Il est lié à la luminance du luminaire et aux différences de contrastes. Il est associé à une baisse transitoire des performances visuelles.

L'éblouissement d'incapacité trouble la vision des objets (apparition d'une luminance de voile) sans provoquer nécessairement une sensation désagréable. Il est lié à la quantité de lumière incidente sur l'œil et à la luminance du luminaire. Il est susceptible d'entraîner des accidents domestiques (notamment chute de plain-pied ou de hauteur) ou de la route (collision), etc.

En éclairage d'intérieur, il est admis qu'une luminance supérieure à 10 000 cd / m² est visuellement gênante quelle que soit la position du luminaire dans le champ visuel. Cette valeur est couramment citée pour l'éblouissement d'inconfort en éclairage intérieur comme étant une valeur au dessus de laquelle on subit de manière sûre un éblouissement.

La norme d'ergonomie visuelle NF X 35 103 évoque une valeur limite de 2 000 cd / m² pour l'éblouissement d'inconfort, pour le cas d'une petite source située dans la zone centrale du champ visuel.

En raison notamment du caractère ponctuel de leur surface d'émission, les LED ont des luminances au moins 1 000 fois plus élevées que celles d'une source d'éclairage traditionnelle. Le niveau de rayonnement direct de ce type de source dépasse largement le niveau d'inconfort visuel.

Le groupe de travail a mesuré des luminances supérieures à 10 000 000 cd / m² sur certaines LED d'une puissance électrique de 1 W (disponibles dans le commerce pour une utilisation domestique).

Dans les systèmes d'éclairage à LED disponibles sur le marché, les LED sont souvent directement apparentes afin de ne pas atténuer le niveau d'éclairement produit. Ceci conduit à un non respect des exigences normatives (ergonomie visuelle et exigences de sécurité) de l'éclairage relatives à la limitation des luminances élevées dans le champ visuel.

Autres effets

- **Risque de perturbation de l'horloge biologique et de la contraction pupillaire**

L'horloge biologique et la contraction pupillaire sont régulées chez l'homme par des longueurs d'onde situées autour de 480 nm qui suppriment la production de mélatonine (hormone participant à la régulation de l'horloge biologique et donc du cycle circadien).

Les LED présentent un spectre fondamentalement différent de celui de la lumière naturelle, avec une très faible proportion à 480 nm. Ceci pourrait exposer à un risque de dérèglement de l'horloge biologique et, par conséquent, des rythmes circadiens. Ces risques seraient accrus par des températures de couleur élevées (blanc froid et bleu), que l'on rencontre fréquemment dans les systèmes d'éclairage à LED.

Le dérèglement de l'horloge biologique peut induire des conséquences métaboliques, thymiques (dépression, troubles de l'humeur), troubles des cycles veille / sommeil, etc.

Par ailleurs, la contraction pupillaire réflexe en forte luminance est induite par ces mêmes longueurs d'onde. Elle pourrait être réduite en présence d'éclairage à LED, conduisant à un éblouissement rétinien plus important et une augmentation des risques associés à la lumière bleue.

- **Risque lié au papillotement de la lumière émise par les LED**

Conséquence de leur mode d'alimentation électronique, la lumière des LED peut présenter des fluctuations rapides et de grande amplitude. Cette fluctuation de la lumière, liée au fait que les LED ne présentent qu'une très faible rémanence, est le plus souvent imperceptible par le système visuel. En situation de mouvement ou dans des espaces confinés avec des variations périodiques de contraste, elle peut être responsable d'effets stroboscopiques. Ces effets stroboscopiques, qui n'ont cependant jamais été étudiés en profondeur, peuvent avoir une incidence directe sur la santé (crises d'épilepsie pour les sujets à risques), les performances visuelles et la sécurité. Une publication²¹ récente a montré que des LED pouvaient présenter des fluctuations de lumière à des fréquences auxquelles correspondent des effets sanitaires (3 à 60 Hz pour les fluctuations visibles et de 120 à 150 Hz pour les fluctuations non-visibles).

²¹ *A Review of the Literature on Light Flicker: Ergonomics, Biological Attributes, Potential Health Effects, and Methods in Which Some LED Lighting May Introduce Flicker*, IEEE Standard P1789 (2010)

Recommandations

Les recommandations suivantes s'appliquent à la fois aux systèmes d'éclairage utilisant des LED déjà présents sur le marché ainsi qu'aux futurs systèmes à LED.

S'agissant des risques sanitaires liés à l'exposition aux LED,

Considérant :

les risques sanitaires liés à la lumière bleue émise par des éclairages à LED dont les produits sont accessibles au public alors qu'ils appartiennent à des groupes de risques supérieurs à 1 (selon la norme NF EN 62 471) ;

le CES recommande :

- d'interdire que des éclairages appartenant à des groupes de risques supérieurs à 1, évalués à la distance d'observation de 200 mm, soient accessibles au public ;
- de réserver les LED appartenant à des groupes de risques supérieurs à 1 à des applications bien maîtrisées par des professionnels.

Considérant :

les risques sanitaires engendrés par des éclairages à LED, liés à de très fortes luminances et des éblouissements importants ;

le CES recommande aux fabricants et aux intégrateurs :

- pour protéger la population contre des luminances trop fortes des systèmes à LED et de forts éblouissements

- de concevoir des systèmes d'éclairage qui ne permettent pas la vision directe du faisceau émis par les LED. En particulier, le CES recommande d'utiliser des dispositifs optiques pour limiter les luminances perçues directes ou réfléchies et rendre les sources de lumière à LED plus diffuses ;
- de prendre en compte l'usure des couches de phosphores des LED blanches qui peut induire une augmentation du groupe de risque photobiologique.

- pour protéger les conducteurs automobiles, les piétons, les cyclistes et les motards du risque d'éblouissement lié à des luminances trop fortes émises par les éclairages automobiles à LED,

- de n'autoriser que les systèmes d'éclairage à LED des groupes de risques 0 ou 1 pour des phares automobiles de jour et de nuit, étant donné que l'éclairage automobile de jour sera rendu obligatoire à partir de février 2011 pour les nouvelles voitures (Directive européenne sur les feux de jour 2008 / 89 / EC) ;

Considérant :

- o les risques avérés d'une exposition aiguë à la lumière bleue et les incertitudes quant aux effets d'une exposition chronique de faibles doses, ainsi que les incertitudes quant aux effets sur l'horloge biologique et la diminution de la contraction pupillaire ;
- o les populations sensibles à la lumière en général (enfants, aphakes, pseudophakes, patients atteints de certaines maladies oculaires et cutanées, patients consommant des substances photo-sensibilisantes, etc.) ;
- o les populations de travailleurs pouvant être exposés à des éclairages à LED de forte intensité ;

le CES émet les recommandations suivantes :

- pour protéger spécifiquement les populations à risques comme les populations sensibles à la lumière et celles particulièrement exposées aux LED. Ainsi, le CES recommande :

- en ce qui concerne les enfants, d'éviter l'utilisation de sources de lumière émettant une forte lumière froide ou de la lumière bleue dans les lieux qu'ils fréquentent (maternité, crèches, écoles, lieux de loisirs, etc.) ou dans les objets qu'ils utilisent (jouets, afficheur lumineux, console et manette de jeu, veilleuse nocturne, etc.).
- de développer des moyens de protection adéquats (type lunettes de protection optique spécifiques aux LED) pour les travailleurs particulièrement exposés à un éclairage à LED ;
- de prévenir les patients sous médicaments photo-sensibilisant des risques liés à l'exposition à la lumière froide et plus particulièrement issue de LED, même celles classées dans le groupe de risque 0 ; informer les acteurs de la santé de l'existence de ce risque ;
- d'utiliser avec précaution les dispositifs conduisant à augmenter la dimension effective de la LED, même si ces dispositifs n'augmentent pas le niveau de luminance (cas des collimateurs optiques et des assemblages denses de puces LED type « multichip »). En effet, l'utilisation de ces dispositifs conduit à des durées limites d'exposition à la lumière bleue plus courtes que dans le cas de la LED à simple puce sans optique supplémentaire. Le groupe de risque peut alors augmenter.

Considérant :

la présence sur le marché de produits à LED à visée luminothérapeutique, de confort ou de bien être,

le CES recommande d'évaluer la nocivité de ces appareils et de leur conformité avec les normes.

S'agissant des normes relatives à la qualité de l'éclairage et à la sécurité photobiologiques des LED,**Considérant :**

- o que les normes en vigueur pour réaliser des installations d'éclairage ne sont actuellement pas toujours appliquées par les professionnels (électriciens, éclairagistes, concepteurs lumières) dans le cas des systèmes à LED ;
- o que les normes liées à la sécurité photobiologique peuvent paraître mal adaptées aux éclairages à LED ;

le CES émet les recommandations suivantes :

- Faire appliquer par les professionnels réalisant des installations d'éclairage à LED, l'ensemble des normes relatives à la qualité de l'éclairage :

- NF X 35-103 « Ergonomie : Principes d'ergonomie visuelle applicables à l'éclairage des lieux de travail » ;
- NF EN 12464-1 « Éclairage des lieux de travail – Partie 1 : Lieux de travail intérieurs » ;
- NF EN 12464-2 « Éclairage des lieux de travail – Partie 2 : Lieux de travail extérieurs » ;
- série de normes NF EN 13201 « Éclairage public » ;
- NF EN 12193 « Éclairage des installations sportives ».

- Adapter la norme NF EN 62 471 « Sécurité photobiologique des lampes et appareils utilisant des lampes » aux systèmes à LED. Il est nécessaire de faciliter la prise en compte de cette norme par les fabricants et de lever tout doute quant à la façon dont elle doit être appliquée aux systèmes à LED. Le CES recommande ainsi :

- de préciser les conditions de mesure et d'évaluation des systèmes à LED dans la norme NF EN 62 471 ;
- d'éditer un guide d'application de cette norme exclusivement dédié aux systèmes à LED ;
- de déterminer le groupe de risque pour le pire cas d'observation : à une distance de 200 mm du système, on obtient ainsi le groupe de risque le plus défavorable ;
- d'adapter la norme aux enfants, personnes aphakes ou pseudophakes, en prenant en compte la courbe de phototoxicité de la lumière pertinente proposée par l'Inirp ;
- de proposer pour chaque groupe de risque des sous-groupes de risque qui permettraient d'affiner l'évaluation du risque en fonction des temps d'exposition ;
- dans le cas de groupes de risque supérieurs à 0, d'évaluer les distances de sécurité (distance à laquelle l'observation correspond au groupe de risque 0), et de le notifier de manière lisible au consommateur (cas des dispositifs grand public) ou au professionnel en charge de la réalisation de l'installation d'éclairage.

- Pour renforcer l'aspect de la sécurité photobiologique dans la mise en conformité des installations d'éclairage :

- d'introduire les exigences de sécurité photobiologique dans toutes les normes de sécurité relatives aux lampes à LED, modules de LED et luminaires à LED. On peut citer les normes suivantes qui sont particulièrement concernées :
 - o série de normes NF EN 60 598 « Luminaires » ;
 - o NF EN 62 031 : « Modules de LED pour l'éclairage général : spécifications de sécurité » ;
 - o CEI 62 560 : « Lampes à LED auto-ballastées pour l'éclairage général fonctionnant à des tensions > 50 V - Spécifications de sécurité » ;
 - o le projet de norme Pr CEI 62 663-1 « *Non ballasted single capped LED lamps for general lighting – safety requirements* ».

S'agissant de l'information des consommateurs, de la traçabilité, de la qualité et du marquage des LED,**Considérant :**

- le manque d'information dont dispose le public concernant les produits à LED ;

le CES émet les recommandations suivantes :

- Informer les consommateurs sur la qualité et la performance de l'éclairage qu'il choisit. Donner au consommateur la possibilité de s'informer facilement des caractéristiques du produit qu'il achète ; le CES recommande de :

- veiller à ce que les fabricants et intégrateurs de LED réalisent des contrôles de qualité et de traçabilité des LED ; outre la qualité de l'éclairage, il est nécessaire qu'ils s'assurent de la conformité de leurs produits vis-à-vis de leur groupe de risque ;
- envisager un étiquetage compréhensible par le consommateur et pertinent (puissance, tension d'alimentation, température de couleur, flux lumineux, etc.) ;
- rendre obligatoire le marquage du groupe de risque de sécurité photobiologique évalué à la distance de 200 mm sur l'emballage des produits à LED. Pour les sources appartenant au groupe de risque 1, il faut imposer de faire figurer sur le marquage la distance de sécurité, au-delà de laquelle le groupe de risque redescend à 0.
- rendre obligatoire le marquage du groupe de risque de sécurité photobiologique pour tous les types d'éclairage
- envisager la création d'un label de qualité (reproductibilité, éco-marquage, etc.).

Recommandations d'études et d'axes de recherche

Considérant le manque de données sur l'exposition de la population à la lumière artificielle, **le CES émet les recommandations suivantes :**

- Caractériser et étudier l'exposition de la population à la lumière artificielle.
- Définir un indice permettant d'estimer le niveau d'éblouissement d'une source à LED. L'UGR (*Unified Glaring Rate* – taux d'éblouissement unifié) utilisé pour les autres types d'éclairage n'est pas pertinent pour les LED, il ne convient pas aux sources de faible dimension angulaire.

S'agissant des études et recherches sur les effets sanitaires des systèmes d'éclairage à LED, le CES recommande de :

- Mener des recherches cliniques afin d'obtenir des éléments de décision permettant de définir les valeurs limites d'exposition à la lumière bleue. Ainsi, le CES recommande :
 - d'étudier les effets cumulatifs à moyen et long terme d'une exposition à la lumière bleue ;

- de réaliser des études prospectives et rétrospectives sur les populations traitées par luminothérapie avec des LED bleues ;
- de mettre en œuvre des protocoles expérimentaux évaluant les conséquences d'exposition prolongées et cumulées à des niveaux inférieurs aux valeurs limites d'exposition.

- Mener des recherches afin de mieux caractériser les effets de la lumière artificielle et en particulier sur la lumière issue de systèmes à LED sur les rythmes biologiques. Le CES recommande ainsi :

- d'approfondir les études permettant de mieux caractériser les spectres d'action des mécanismes de régulation de l'horloge biologique par la lumière ;
- de quantifier les conséquences d'une exposition à des lumières artificielles froides sur les rythmes circadiens et la contraction pupillaire ;
- de manière générale, d'étudier l'incidence sur la santé et sur les pathologies de la pollution lumineuse (en lien avec de possibles dérèglements de l'horloge biologique) et de la systématisation d'un éclairage à LED.

- Étudier systématiquement le déclenchement et / ou l'aggravation des photo-dermatoses par un éclairage à LED

S'agissant des études et recherches à mener sur la technologie des LED pour en limiter les risques sanitaires, le CES émet les recommandations suivantes ;

- Améliorer la technologie des LED, ainsi le CES recommande :

- d'encourager des recherches pour développer des nouveaux matériaux émissifs couplés avec des luminophores optimisés pour obtenir une lumière blanche de bonne qualité avec une efficacité lumineuse aussi élevée que possible ;
- de développer la recherche sur la conception de luminaires adaptés aux LED (petite taille, flux lumineux important) afin d'en limiter la luminance, en utilisant des solutions optiques ;
- d'étudier les mécanismes de dégradation des LED blanches pouvant conduire à une dérive bleue (bleuissement) de la lumière émise.

Maisons-Alfort, le 03/06/2010

Au nom des experts du CES « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements »,

le président du CES, Jean-François Doré



Abréviations

ACV : analyse du cycle de vie

ADN : acide désoxyribonucléique

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

AFE : Association française de l'éclairage

AFNOR : Association française de normalisation

CEI : Commission Électrotechnique Internationale

CELMA : Fédération européenne des associations de fabricants de luminaires et de composants électrotechniques

CEN : Comité européen de normalisation

CIE : Commission internationale de l'éclairage

CMHL : *Ceramic Metal Halide Lamp* – Lampes aux iodures métalliques à tubes à décharge en céramique

CMS : Composant Monté en Surface

CSTB : Centre scientifique et technique du bâtiment

CVD : *Chemical vapor deposition* – dépôt chimique en phase vapeur

DEEE : déchets d'équipements électriques et électroniques

DoE : *Department of Energy* (USA) – ministère américain de l'énergie

ELC : *European Lamp Companies Federation* – Fédération européenne des fabricants de lampes

EQI : efficacité quantique interne

FCD : Fédération des entreprises du commerce et de la distribution

FGME : Fédération des grossistes en matériel électrique

FMB : Fédérations des magasins de bricolage

IR : infrarouge

IRC : indice de rendu des couleurs

LED : *Light emitting diode* - Diode électroluminescente (DEL)²²

MEEDDM : Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer

OLED : *Organic light emitting diode* - Diode électroluminescente organique

PWM : *Pulse width modulation* – Modulation par largeur d'impulsions

SI : système international

UGR : *unified glaring rate* – Taux d'éblouissement unifié

UTE : Union technique de l'électricité

UV : ultraviolet

²² L'acronyme LED est très couramment usité en France.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Quelques ordres de grandeurs d'éclairages exprimés en lux	45
Tableau 2 : Correspondances entre grandeurs radiométriques et grandeurs photométriques	45
Tableau 3 : Tableau comparatif de différents types d'éclairage.....	48
Tableau 4 : Comparaison des différentes méthodes pour obtenir de la lumière blanche par les LED	55
Tableau 5 : Efficacité lumineuse de LED blanc froid parmi les plus performantes relevées dans les documentations des fabricants leaders début 2009	57
Tableau 6 : Ordres de grandeurs de quelques luminances en cd / m ²	69
Tableau 7 : Tableau récapitulatif des différents résultats expérimentaux ayant pour objectif de déterminer le pic maximum de sensibilité de différents processus	91
Tableau 8 : Différentes formes chimiques du pigment visuel 11 cis retinal et pic d'absorption associé [Young, 1988]	92
Tableau 9 : Absorption intraépidermique, absorption dermique et pourcentage atteignant l'hypoderme.....	99
Tableau 10 : Critères à examiner pour les systèmes d'éclairage dans le bâtiment.....	104
Tableau 11 : Les organismes en charge de la normalisation en éclairage	105
Tableau 12 : Classement en groupe de risque lié à la lumière bleue pour le domaine visible (L _B , E _b) d'après la norme NF EN 62471	115
Tableau 13 : Limites d'Exposition à la lumière bleue, fixées par la directive 2006/25, les normes et autres organisations.....	120
Tableau 14 : Résultats de l'analyse de risque pour la rétine lié à la lumière bleue émise par des LED au format CMS, substrat céramique, à puce de 1 mm ² (taille apparente 1,4 mm x 1,4 mm).....	134
Tableau 15 : Calcul des durées limites d'exposition pour des assemblages de puces LED type « <i>multichip</i> » formant une surface uniforme de luminance donnée.	136
Tableau 16 : Calcul des durées limites d'exposition pour deux LED de type « <i>multichip</i> » composées de 100 puces, émettant un flux total de 7000 lm. Ces composants sont disponibles commercialement.	137
Tableau 17 : Calcul des durées limites d'exposition pour deux LED « <i>multichip</i> » composées de 100 puces, émettant un flux total de 7 000 lm. Ces composants sont disponibles commercialement	138
Tableau 18 : Calcul des durées limites d'exposition pour deux assemblages de LED de type « module » composés de 100 LED, émettant un flux total de 10 000 lm	139
Tableau 19 : Évaluation des risques selon la norme NF EN 62471, de 3 types de LED [CSTB, INRS] à une distance qui produit un éclairage de 500 lx et une distance de 200 mm.....	141
Tableau 20 : Évaluation des risques selon la norme NF EN 62471, de 2 lampes d'utilisation courante [CSTB, INRS] à une distance qui produit un éclairage de 500 lx.....	142
Tableau 21 : Evaluation des risques selon la norme CEI 62471 dans tous les cas d'exposition	143
Tableau 22 : Evaluation des risques selon la Directive et la norme – NF EN 62471 (cas d'un œil stabilisé pour la chirurgie)	144
Tableau 23 : Evaluation des risques selon la Directive et la norme NF EN 62471 (cas général).....	144
Tableau 24 : Quelques exemples de luminance de LED au format CMS, substrat céramique, dont la puce a une taille apparente de 1,4 mm x 1,4 mm	148
Tableau 25 : Marché en EU-27 pour ELC (en milliers de lampes).....	187
Tableau 26 : Valeurs typiques des rendements intervenants dans le rendement global en 2005, 2008 et l'objectif visé en 2015 pour un luminaire à LED (Blanc à 4 100 K – CRI 80)	206
Tableau 27 : L'impact environnemental de systèmes à LED ayant une efficacité lumineuse de 6 lm / W comparée à celle d'une lampe à iodures métalliques céramique standard.....	213
Tableau 28 : Tableau récapitulatif des mesures	242
Tableau 29 : Les groupes de risques	243
Tableau 30 : Facteur B (part de la luminance énergétique contribuant au risque à la lumière bleue) pour les LED bleu roi	252

Tableau 31 : Facteur B (part de la luminance énergétique contribuant au risque à la lumière bleue) pour les LED blanches.....	253
Tableau 32 : Estimation de la luminance énergétique des LED bleu roi en fonction des valeurs mesurées de luminance et de flux lumineux.....	257
Tableau 33 : Estimation de la luminance énergétique des LED blanc froid et blanc neutre en fonction des valeurs mesurées de luminance et de flux lumineux.....	259
Tableau 34 : Estimation de la luminance énergétique des LED blanc chaud en fonction des valeurs mesurées de luminance et de flux lumineux.....	261
Tableaux 35 : Valeurs du champ de vision effectif, du rayon effectif et du rapport k en fonction des durées d'exposition	262
Tableau 36 : 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 mm ²	270

Liste des figures

Figure 1 : Exemple d'un spectre de LED blanche	39
Figure 2 : La source, l'objet et le système visuel	40
Figure 3 : Schéma représentant l'intensité lumineuse (à gauche), la luminance (au centre) et l'éclairement (à droite)	42
Figure 4 : Courbes de sensibilité spectrale	43
Figure 5 : Les différentes familles de lampes	48
Figure 6 : Principe de fonctionnement d'une lampe à incandescence et son spectre	49
Figure 7 : Lampes halogènes haute efficacité avec et sans ballast électronique intégré	50
Figure 8 : Lampe fluocompacte avec son ballast électronique intégré	52
Figure 9 : Illustration d'une « homo-jonction »	53
Figure 10 : Énergie de gap et longueur d'onde d'émission pour quelques semi-conducteurs élémentaires et systèmes binaires	54
Figure 11 : Variation de l'efficacité quantique externe en fonction de la longueur d'onde pour deux technologies de LED	56
Figure 12 : Évolution et limitation des efficacités lumineuses de LED blanches forte puissance	58
Figure 13 : Dépréciation dans le temps du flux lumineux des LED blanches de haute puissance nominale identiques provenant de différents fabricants (lettres A à E)	59
Figure 14 : Variation des performances de 260 LED blanches (provenant de 26 lots) de 5 mm fonctionnant sous 20 mA [fabrication asiatique]	60
Figure 15 : Dépréciation du flux mesuré pour un spot à LED de 24 W dans différents luminaires	61
Figure 16 : Distribution spectrale de la lumière naturelle dans différentes directions du ciel	63
Figure 17 : Spectres des différentes sources de lumière artificielle mesurés au CSTB	64
Figure 18 : Spectre d'émission (valeur normalisée) de quelques semi-conducteurs (à 25°C)	65
Figure 19 : Typologie des luminaires les plus employés	65
Figure 20 : Champ visuel	67
Figure 21 : Valeurs indicatives des luminances de sources lumineuses	67
Figure 22 : Zones angulaires définissant les notions d'éblouissement	68
Figure 23 : Géométrie de la situation avec source éblouissante	69
Figure 24 : Spectre de sensibilité de l'œil humain à l'éblouissement d'inconfort (en blanc), superposé à des spectres de LED blanches (en noir) [Bullough, 2009]	71
Figure 25 : Situations éblouissantes, à gauche le reflet sur l'ordinateur, à droite le contre-jour	71
Figure 26 : Éviter l'éblouissement par l'emploi de luminaires adaptés	72
Figure 27 : Spectre d'action de la production de radicaux libres ($\times 10^{12}$ radicaux / mg par mJ / cm ² et par nm.	81
Figure 28 : Spectre d'action de la production de radicaux libres dans les régions UV et visible proche, normalisé à 355 nm comparé au spectre d'action de la production de l'érythème cutané	82
Figure 29 : Relation entre la distance (m) d'une source commerciale spot HMI 575 W et la production radicalaire	83
Figure 30 : Production radicalaire et spectre d'émission solaire (éclairage énergétique spectrique) en fonction des longueurs d'onde comprises entre 300 et 700 nm	84
Figure 31 : Anatomie de l'œil humain	85
Figure 32 : Facteur d'absorption de la lumière par la cornée	86
Figure 33 : Absorption de la lumière par le cristallin en fonction de l'âge	86
Figure 34 : Sensibilité spectrale de la contraction pupillaire chez l'homme	90
Figure 35 : Spectre des rayonnements électromagnétiques et sensibilité des milieux oculaires	91
Figure 36 : Schéma d'une coupe de la peau représentant l'épiderme, le derme et l'hypoderme	97

Figure 37 : Pénétration des différentes longueurs d'onde dans la peau.....	98
Figure 38 : LED, lampes, modules et luminaires.....	107
Figure 39 : Conditions d'observation pour l'évaluation de la luminance énergétique selon la norme NF EN 62471 (2008).....	115
Figure 40 : Fonctions de pondération spectrale B_λ et A_λ (cas de personnes aphaques) du risque « Lumière bleue »	121
Figure 41 : Densité spectrale de flux normalisée pour les LED bleu roi. La courbe noire représente la fonction $B(\lambda)$	131
Figure 42: Densité spectrale de flux normalisée pour les LED blanc froid. La courbe noire représente la fonction $B(\lambda)$	131
Figure 43 : Densité spectrale de flux normalisée pour les LED blanc neutre. La courbe noire représente la fonction $B(\lambda)$	132
Figure 44 : Densité spectrale de flux normalisée pour les LED blanc chaud. La courbe noire représente la fonction $B(\lambda)$	133
Figure 45 : Exemple d'assemblage régulier puce LED type « multichip »	135
Figure 46 : Exemple de LED <i>multichip</i> de flux élevé (7000 lm), disponible commercialement.....	137
Figure 47 : Exemple d'assemblage régulier de 10 x 10 LED type SMD, de substrat céramique et à simple puce, étudiées dans la partie précédente.....	139
Figure 48 : Composant à LED sur lequel les mesures du LNE ont été effectuées.....	142
Figure 49 : Schéma de principe d'un collimateur pour LED. Photographie d'un collimateur de LED disponible commercialement.....	146
Figure 50 : Spectre de différents types de LED blanches	149
Figure 51 : Distribution spectrale de la lumière naturelle pour différentes directions dans le ciel	153
Figure 52 : Exemple d'un spectre de LED blanche	153
Figure 53: Données d'entrée et de sortie (modifié d'après Le Grand, 1972).	169
Figure 54: Analyse du cycle de vie d'un produit.....	175
Figure 55: Les 5 étapes d'une analyse de cycle de vie.....	177
Figure 56: Inventaire du cycle de vie.....	178
Figure 57 : Description du cycle de vie.....	178
Figure 58: Répartition de la consommation d'énergie pour l'éclairage dans le secteur tertiaire.....	183
Figure 59 : Taux de possession d'ampoules à économie d'énergie dans les ménages, 2008 (ADEME/SOFRES)	184
Figure 60 : Taux d'exportation (exportation comparée à la production), 2003-2008	185
Figure 61 : Taux d'importation (importation comparée à la consommation apparente).....	186
Figure 62 : Répartition des ventes par type de source, 2006.....	187
Figure 63 : Évolution du marché à partir de 2004	188
Figure 64 : Lampes à incandescence non halogènes pour l'éclairage général en 2006	188
Figure 65 : Lampes à incandescence non halogènes avec réflecteur pour l'éclairage général en 2006	189
Figure 66 : Répartition des lampes halogène TBT - (R) signifie avec réflecteur.....	189
Figure 67: Evolution du marché à partir de 2004 – R signifie avec réflecteur.....	190
Figure 68: Répartition des lampes halogène 230 V en 2006 – R signifie avec réflecteur	190
Figure 69 : Evolution du marché à partir de 2004	191
Figure 70 : Répartition des lampes dites à économie d'énergie en 2006	191
Figure 71 : Évolution du marché à partir de 2004	192
Figure 72 : Évolution des ventes en fonction de l'usage.....	192
Figure 73 : Stock des lampes par foyer.....	193
Figure 74 : Évolution d'efficacité des différentes technologies (source ADEME)	195

Figure 75 : Structure énergétique d'un semi-conducteur à « gap direct » dans l'espace des phases.....	196
Figure 76 : Formation du spectre d'une diode électroluminescente	196
Figure 77 : Une LED produit une lumière sensiblement monochromatique, mais son intensité et sa largeur spectrale dépendent fortement de la température de la jonction	197
Figure 78 : Principe de fonctionnement d'une diode électroluminescente à homo-jonction	198
Figure 79 : Tension de polarisation (pour un courant de circuit de 20 mA) d'une jonction en fonction de l'énergie du gap entre les bandes de valence et de conductivité (E_g)	199
Figure 80 : En mélangeant une longueur d'onde λ_1 avec sa complémentaire λ_2 , on obtient de la lumière blanche. Ainsi, une jonction bleue avec un phosphore jaune donne du blanc.....	200
Figure 81 : « Blanc chaud » obtenu à partir du mélange de deux phosphores.....	201
Figure 82 : Gamme de températures de couleur avec les technologies « simple » et « double phosphore »	201
Figure 83 : En utilisant de la lumière ultra-violette la teinte du blanc obtenu dépend du phosphore utilisé .	202
Figure 84 : Production de la lumière blanche grâce au mélange de plusieurs couleurs.....	203
Figure 85 : Influence de la température de jonction sur l'efficacité lumineuse des systèmes LED pour la génération de la lumière blanche.....	207
Figure 86 : Influence du courant sur l'efficacité lumineuse et le flux d'une LED blanche. La ligne pointillée correspond aux prévisions théoriques pour le flux	208
Figure 87 : Variation de l'efficacité globale en fonction de la longueur d'onde principale.....	208
Figure 88 : Méthodes d'extrapolation utilisées pour l'estimation de la durée de vie des LED	210
Figure 89 : Dépendance de la durée de vie d'une LED en fonction du courant et de la température de la jonction (B50, L70 signifient que 50 % des LED de l'échantillon testé atteignent 70 % du flux initial)	211
Figure 90 : Dépréciation typique du flux lumineux des LED forte puissance et 5 mm (la lampe à incandescence est donnée comme référence).....	211
Figure 91 : Évolution du prix de l'indium.....	215
Figure 92 : Efficacité quantique interne d'une jonction LED en fonction de la densité du courant	216
Figure 93 : Impact environnemental des systèmes à éclairage	218
Figure 94 : Anatomie de la cornée	221
Figure 95 : Transmission du cristallin humain en fonction de l'âge.....	221
Figure 96 : Image en microscopie optique d'une coupe semi-fine de rétine de souris adulte	223
Figure 97 : Fonds d'yeux montrant la papille optique et la région maculaire	223
Figure 98 : Coupe verticale de la région maculaire montrant les différentes épaisseurs de la rétine	224
Figure 99 : Coupe verticale de la région maculaire montrant les différentes épaisseurs de la rétine	225
Figure 100 : Spectre d'absorption des pigments maculaires : lutéine et zéaxanthine	225
Figure 101 : Rayonnements transmis et absorbés au niveau du fond de l'œil	226
Figure 102 : Les photorécepteurs : cônes (C) et bâtonnets (B)	227
Figure 103 : (A) Répartition numérique et (B) gamme de sensibilité des photorécepteurs de type cônes et bâtonnets	228
Figure 104 : Sensibilités spectrales des différents types de photorécepteurs	229
Figure 105 : Spectre des composés de la lipofuscine.....	230
Figure 106 : Contrôle de la pupille chez la souris	234
Figure 107 : Le composant à LED. Diamètre support 24 mm.....	241
Figure 108 : Répartition spectrale relative du rayonnement.....	242
Figure 109 : Conditions d'observation pour l'évaluation de la luminance énergétique selon la norme NF EN 62471:2008	248
Figure 110 : Démarche schématique de l'évaluation de risque lié à la lumière bleue effectué dans cette partie en respectant la norme NF EN 62471	250

Figure 111 : 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	251
Figure 112 : Graphe montrant les valeurs du facteur B en fonction de la longueur d'onde d'émission maximale des LED bleu roi	253
Figure 113 : Graphe montrant les valeurs du facteur B en fonction de la température de couleur proximale des LED blanches	255
Figure 114 : Carte de luminance mesurée sur une LED bleu roi	256
Figure 115 : Carte de luminance mesurée sur une LED blanc froid	258
Figure 116 : Carte de luminance mesurée sur une LED blanc chaud	260
Figure 117 : 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	265
Figure 118 : 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	265
Figure 119 : 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	266
Figure 120 : 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	267
Figure 121 : 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	268
Figure 122 : 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	268
Figure 123 : 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 100 lm	269
Figure 124 : Extrapolation de la durée limite d'exposition pour un assemblage dense de type « multichip » de LEDs blanc neutre émettant chacune 100 lm	271
Figure 125 : Cartes de luminance mesurées sur une puce de 1 mm ² émettant un flux de 212 lm. Ce type de composant est destiné à l'éclairage automobile de jour. La luminance maximale est de 7.8 10 ⁷ cd / m ²	272
Figure 126 : Niveaux de luminance par couleur	272
Figure 127 : Détermination des durées limites d'exposition pour des LED de haute luminance utilisées pour l'éclairage automobile de jour.	273
Figure 128 : Schéma de principe d'un collimateur pour LED. Photographie d'un collimateur de LED disponible commercialement.	274
Figure 129 : Détermination des durées limites d'exposition pour deux LED identiques blanc froid, avec et sans collimateur. Sans collimateur, les limites d'exposition ne sont jamais dépassées. Avec un collimateur idéal de 10 mm de diamètre, les limites d'exposition sont dépassées au-delà de 60 s, ce qui conduit à classer le dispositif dans le groupe de risque 2.	275

1 Présentation de l'auto-saisine

1.1 Contexte

La directive européenne pour l'éco-conception (2005/32/CE) dite « EuP » (*Energy using Products*) prévoit l'amélioration des performances énergétiques pour certains produits de consommation courante. Cette directive incite les fabricants et importateurs à prendre en compte les aspects environnementaux pour leurs produits tout au long du cycle de vie, et sur cette base, d'évaluer des solutions de conception alternatives, dans le but d'améliorer les performances environnementales de ces produits. La directive européenne EuP a été transposée en 2007 par les états membres de l'union européenne et l'entrée en vigueur des mesures d'exécution EuP planifiée entre 2008 et 2010.

L'éclairage électrique est concerné par la directive EuP. Ainsi, la troisième mesure d'exécution adoptée par la commission européenne le 18 mars 2009 (règlement n° 244/2009 relatif à l'éco-conception des lampes à usage domestique non dirigées) prévoit une interdiction progressive de la commercialisation des lampes les plus énergétiques, suivant un calendrier s'étalant du 1^{er} septembre 2009 au 1^{er} septembre 2016. Les ampoules fluo-compactes, dites « basse consommation », ou d'autres sources d'éclairage comme les diodes électroluminescentes (LED)²³ plus économes en énergie ont pour vocation, à terme, de les remplacer.

Les diodes électroluminescentes sont des sources d'éclairage en plein développement technologique et économique. Utilisées depuis de nombreuses années dans l'électronique comme sources de lumières faibles et monochromatiques pour des applications de témoins lumineux, elles trouvent aujourd'hui leur place dans des systèmes d'éclairage à part entière : feux de signalisation, éclairage portatif, feux de véhicules et éclairages domestiques d'ambiance, éclairage public par exemple.

La première LED à spectre visible a été créée en 1962 par l'américain Nick Holonyak Jr, émettant à l'époque une intensité lumineuse extrêmement faible. La diode bleue a été inventée en 1990 par le Dr. Shuji Nakamura. Cette innovation a été suivie par la mise au point de la diode blanche, qui a permis de nouvelles applications majeures, notamment dans le domaine de l'éclairage et des écrans de télévisions et d'ordinateurs. Les premières LED blanches sont peu à peu apparues sur le marché et les fabricants ont proposé des diodes de plus en plus puissantes. Cependant, le moyen le plus économique actuellement et donc le plus utilisé pour produire de la lumière blanche avec des LED est de coupler une LED bleue à un phosphore jaune.

1.2 Objet de l'auto-saisine

La société OSYRIS, par l'intermédiaire de son président, le Pr. Zemmouri, s'est inquiétée, dans un courrier à destination de l'Institut de veille sanitaire (InVS), des possibles impacts des LED sur la rétine. Dans ce courrier est souligné le lien possible entre l'exposition de l'œil à des rayonnements de longueurs d'ondes courtes, proches des ultraviolets (caractéristiques des spectres lumineux des LED) et le risque de développement d'une pathologie de l'œil : la dégénérescence maculaire liée à l'âge. L'InVS a transféré la lettre de la société OSYRIS à l'Afsset dans un courrier daté du 14 janvier 2008.

Parallèlement, la question de l'impact des LED sur la santé au travail a été soulevée lors de discussions informelles entre l'Afsset et la Direction générale du travail (DGT), celle-ci étant alertée

²³ Nous utiliserons le terme « LED » pour désigner les diodes électroluminescentes, plutôt que l'acronyme français DEL, beaucoup moins usité.

par les projets récents d'éclairage intérieur de bâtiments au moyen de LED. Il est en effet probable que le développement de ce type de solutions d'éclairage (notamment pour des raisons de coût économique) s'accélère.

Quelques travaux scientifiques [Dawson *et al.*, 2001] s'appuyant sur des expériences sur des singes en laboratoire laissent suspecter un danger pour la rétine lié à l'usage des diodes électroluminescentes sous certaines conditions. Ces expériences ont été réalisées avec des LED bleues.

Pour sa part, Altkorn [Altkorn *et al.*, 2005] s'est intéressé pour la première fois à l'impact sanitaire des LEDs en décrivant le débat qui existait sur le positionnement des LEDs dans le contexte normatif : doivent-elles être classées en termes de risque photobiologique selon les normes relatives aux lasers (NF EN 60825-1) ou selon les normes relatives aux sources incohérentes (NF EN 62471). Jusqu'en 2008, les LED étaient traitées de la même manière que les sources laser. Depuis la publication de la norme NF EN 60825-1 de janvier 2008, il est recommandé d'utiliser pour les dispositifs à LED, la norme NF EN 62471 de décembre 2008.

Le sujet de l'impact sanitaire des LED a été discuté par le CES « agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » le 23 septembre 2008. Le CES a jugé cette problématique suffisamment préoccupante, et s'est déclaré intéressé pour traiter cette question sous forme d'une auto-saisine.

Sur conseil du CES « agents physiques », le conseil scientifique de l'Afsset s'est auto-saisi le 29 septembre 2008 de la question des impacts sanitaires liés à l'usage des systèmes d'éclairage par diodes électroluminescentes, et a chargé l'Afsset de conduire cette expertise, s'appuyant sur le CES.

L'objectif de cette auto-saisine était de réaliser une évaluation des risques liés à l'impact sanitaire potentiel du rayonnement des diodes électroluminescentes sur la population générale et professionnelle.

L'expertise des membres du groupe de travail s'est articulée autour de différents axes :

- un état des lieux de l'éclairage ;
- une présentation de la technologie des LED ;
- une analyse de l'interaction de la lumière avec les systèmes biologiques (œil, peau) ;
- une synthèse de la normalisation applicable aujourd'hui aux LED ;
- une analyse des effets sanitaires des LED.

Le groupe de travail ne s'est pas restreint à étudier que les effets de la lumière artificielle sur la vision, il a aussi étudié les effets de la lumière artificielle sur la peau et sur l'horloge biologique.

L'originalité de ce travail réside en particulier dans les calculs et mesures effectués par les membres du groupe de travail dans leur laboratoire respectif (CSTB²⁴, INRS²⁵, LNE²⁶) pour classer en termes de groupe de risque quelques exemples de systèmes à LED selon la norme de sécurité photobiologique applicable aux LED (NF EN 62471).

²⁴ CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

²⁵ INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles

²⁶ LNE : Laboratoire Nationale de Métrologie et d'Essais

1.3 Modalités et traitement de l'auto-saisine

1.3.1 Déroulement de la saisine

L'Afsset a décidé, sur proposition du CES « Évaluation des risques liés aux agents physiques, aux nouvelles technologies et aux grands aménagements » (proposition du 28 janvier 2009), de constituer un groupe de travail formel rattaché à ce CES et composé d'experts sélectionnés suite à un appel à candidature public. Cet appel à candidatures d'experts scientifiques a été ouvert sur le site internet de l'Afsset du 12 décembre 2008 au 12 mars 2009.

Neuf experts ont été sélectionnés pour constituer le groupe de travail (GT) « LED », à qui l'instruction de cette auto-saisine a été confiée. Le groupe de travail a réuni des experts possédant des compétences en physique des rayonnements optiques, en éclairage, dans le domaine de la métrologie optique et en médecine (ophtalmologie et dermatologie notamment). La présidence du groupe de travail a été confiée au Pr. Francine Behar-Cohen, spécialiste des maladies oculaires et notamment de la DMLA (Dégénérescence Maculaire Liée à l'Age).

Le groupe de travail « LED » coordonné par l'Afsset s'est réuni à 10 reprises en sessions plénières entre le 13 mai 2009 et le 26 mars 2010.

Pour réaliser cette expertise, le groupe de travail s'est appuyé sur une large revue de la littérature scientifique internationale complétée par de nombreuses auditions de personnalités scientifiques. De plus, une contribution écrite portant sur le marché de l'éclairage français et européen et sur le recyclage des lampes a été sollicitée auprès de l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie).

L'analyse bibliographique effectuée par le GT « LED » a été aussi exhaustive que possible. Les travaux scientifiques pris en compte dans le rapport sont issus de publications écrites dans des revues internationales anglophones à comité de lecture.

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été soumis régulièrement au CES (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques). Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

1.3.2 Critères de qualité de l'expertise

Les travaux d'expertise sont issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise » avec pour objectif de respecter les points suivants : compétence, indépendance, transparence, traçabilité.

Pour être pris en compte dans ce rapport, les travaux scientifiques doivent avoir fait l'objet d'une publication écrite dans une revue internationale après avis d'un comité scientifique de lecture. La recherche bibliographique a été réalisée par consultation de la bibliographie des rapports internationaux sur le sujet et par consultation des bases de données bibliographiques habituellement utilisées par les scientifiques. Les rapports d'études ou de synthèse rendus publics ont également été analysés. Les communications faites à l'occasion de congrès et colloques ne donnant pas lieu à publication n'ont pas été prises en compte.

Chaque article a été examiné à partir de critères de qualité correspondant au champ d'expertise : par exemple, la qualité du recueil d'informations, la qualité de l'analyse statistique, la cohérence, la réplicabilité, etc.

2 Généralités sur l'éclairage et les LED

Résumé du chapitre

Rappels physiques

La lumière, comme tout rayonnement, transporte de l'énergie. La radiométrie définit des grandeurs énergétiques dans le domaine des rayonnements optiques. La photométrie, elle, prend en compte l'effet visuel de la lumière, on y définit des grandeurs lumineuses. Pour caractériser et comparer les rayonnements optiques, il est nécessaire de définir les termes d'intensité, d'éclairement et de luminance :

- l'intensité lumineuse (en candela) est la quantité de flux lumineux émis par unité d'angle solide pour une source ponctuelle.
- l'éclairement (en lux) permet de quantifier la lumière reçue par une surface (il est indépendant de la nature de celle-ci).
- la luminance lumineuse (en cd / m^2) quantifie la lumière émise par une source étendue, par unité de surface. Elle définit l'impression lumineuse perçue par un observateur qui regarde la source. Elle permet donc d'évaluer l'éblouissement.

La sensibilité de l'œil n'est pas la même de jour et de nuit. On différencie ainsi la vision de jour, appelée vision photopique, de la vision de nuit, désignée vision scotopique.

La température de couleur d'une lumière blanche permet de définir sa teinte, plus ou moins chaude ou froide ; elle s'exprime en Kelvin. Les lumières de teintes chaudes tirent sur le jaune-orangé et ont une température de couleur inférieure à 3 000 K (2 700 à 2 900 K pour les lumières des sources à incandescence). Les lumières de teintes froides tirent sur le bleu et ont une température de couleur comprise entre 5 000 et 10 000 K (6 500 K pour des luminaires de teinte « lumière du jour »). Plus la température de couleur augmente et plus la teinte est dite « froide ».

L'Indice de Rendu des Couleurs (IRC) est un indice compris entre 0 et 100 qui définit l'aptitude d'une source lumineuse à restituer les différentes couleurs des objets qu'elle éclaire, par rapport à une source de référence. La lumière solaire a un IRC de 100, tandis que certaines lampes à vapeur de sodium basse pression (utilisées dans les tunnels routiers par exemple) ont un IRC de 20. Dans les magasins, les locaux scolaires ou les bureaux, l'IRC devrait toujours être supérieur à 80.

États des lieux de l'éclairage

Les sources de lumière artificielle utilisent toujours un des deux procédés suivants : l'incandescence ou la luminescence. Pour les sources incandescentes, un filament est chauffé et émet un rayonnement. Pour les sources luminescentes, qui incluent les lampes à décharge (lampes fluorescentes compactes, tubes fluorescents) et les LED, les atomes d'un gaz ou d'un semi-conducteur (cas des LED) sont excités via une décharge (lampe à décharge) ou une recombinaison des porteurs (LEDs) provoquant l'émission d'un rayonnement lumineux.

Les solutions d'éclairage doivent répondre à trois critères de qualité : le confort visuel, la performance visuelle et la sécurité.

Alors que les lampes à incandescence et à décharges électriques (hors LED) ont dominé le 20^e siècle, la technologie de l'éclairage est en pleine mutation et des LED blanches de haute

puissance apparaissent maintenant sur le marché.

Les LED

Le principe de fonctionnement des diodes électroluminescentes repose sur la polarisation d'un semi-conducteur par application d'une tension qui provoque l'émission de photons. Un rayonnement quasi-monochromatique est émis, dont la longueur d'onde dépend du semi-conducteur utilisé. Il n'existe pas de semi-conducteur permettant à lui seul d'émettre de la lumière blanche. Actuellement, il existe néanmoins trois méthodes pour produire de la lumière blanche avec une LED. Le moyen le plus utilisé consiste à coupler une LED bleue à un phosphore jaune. Le spectre des LED (cf. Figure 1 ci-dessous) présente ainsi une forte proportion de lumière bleue (pic bleu dans le spectre), qui a pour conséquence un déséquilibre spectral.

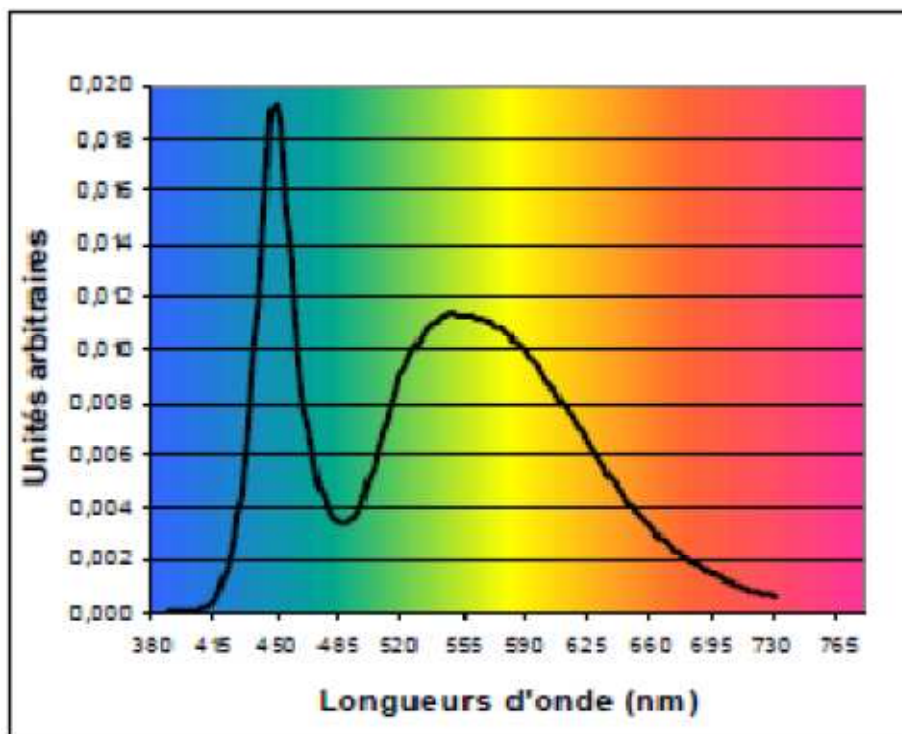


Figure 1 : Exemple d'un spectre de LED blanche

La technologie des LED présente des atouts majeurs notamment du point de vue de l'efficacité énergétique escomptée. Cependant, la technologie commence juste à être mature pour pénétrer le secteur de l'éclairage général.

Les LED sont des sources de lumière ponctuelles que l'on peut agréger dans un luminaire pour atteindre des intensités élevées. Du fait de leur caractère ponctuel, la surface émissive des LED possède une forte luminance, au moins 1 000 fois plus élevée que celle d'une source d'éclairage traditionnelle.

L'efficacité des LED dépend de plusieurs paramètres : température de la jonction entre les semi-conducteurs qui la composent, courant qui la traverse, surface de la jonction et géométrie de la puce, longueur d'onde d'émission. Le facteur le plus crucial est la température de la jonction, les performances des LED diminuant rapidement avec l'augmentation de la température, ce qui influe

également sur d'autres paramètres comme leur couleur. En 2010, l'efficacité lumineuse d'une LED prototype isolée peut atteindre en laboratoire jusqu'à 200 lumens²⁷ par watt, (pour comparaison, l'efficacité lumineuse d'une lampe à incandescence est d'environ 10 à 15 lm / W).

Les fabricants des diodes électroluminescentes annoncent des durées de vie de LED blanches allant jusqu'à 50 000 heures mesurées sous conditions de laboratoire (température de jonction maintenue à 25°C et courant défini); mais dans un système d'éclairage courant, des mesures montrent que, dans des cas extrêmes, elles peuvent perdre plus de 70 % de leur luminosité après 1 000 heures de fonctionnement. La durée de vie des LED dépend de la température de la jonction ainsi que de l'intensité du courant, sans oublier la qualité de fabrication et d'intégration. À l'heure actuelle, la définition de la durée de vie d'une LED et sa méthode de mesure ne sont pas normalisées.

Les alimentations électriques des systèmes d'éclairage à LED peuvent, en fonction de leur architecture, fournir une puissance présentant des variations temporelles plus ou moins rapides, ce qui se traduit par des fluctuations de l'intensité de la lumière produite, plus ou moins perceptibles par l'œil.

Introduction du chapitre

L'environnement visuel résulte de l'interaction de trois éléments (Figure 2) : la source lumineuse, l'objet visualisé et le système visuel intégrant les informations (photorécepteurs).

Pour pouvoir caractériser cet environnement visuel, nous allons décrire dans ce chapitre les différentes grandeurs physiques pertinentes en physique de l'éclairage. Dans un second temps, nous introduirons les différents types d'éclairage puis nous aborderons plus en détail les LED.

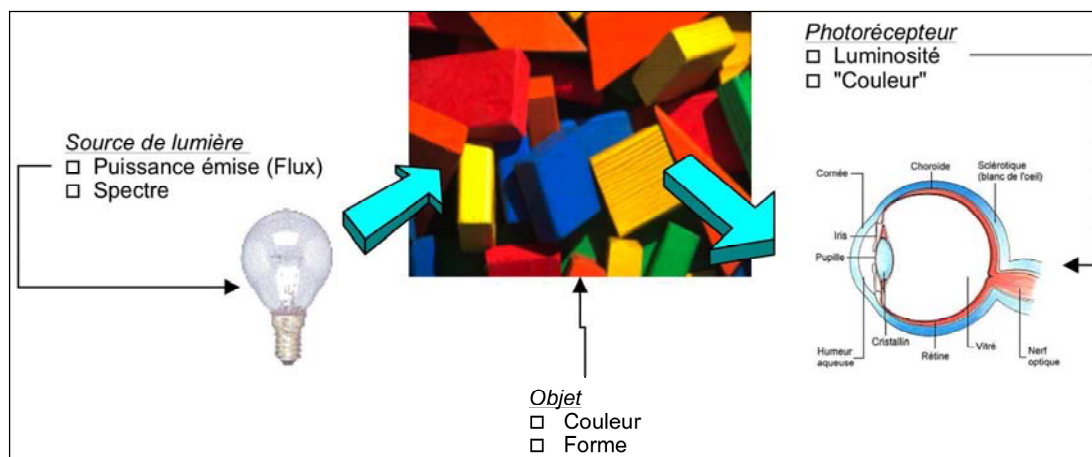


Figure 2 : La source, l'objet et le système visuel

2.1 Rappels physiques

Les publications scientifiques relatives au domaine de la vision suivent des pratiques très variées pour quantifier la lumière reçue par la rétine, d'où de grandes difficultés à comparer les résultats des mesures.

Ces difficultés sont dues notamment à l'optique de l'œil et à sa sensibilité spectrale.

Il est donc nécessaire de se poser les questions suivantes : quelles grandeurs utiliser ? Quelles unités ? Quand ? Comment mesurer ?

²⁷ Le lumen (lm) est l'unité utilisée pour quantifier le flux lumineux.

L'objectif est de connaître l'éclairement énergétique réel sur la rétine. C'est pourquoi, après des rappels de radiométrie et de photométrie, les formules permettant de calculer l'éclairement énergétique réel sur la rétine seront présentées.

2.1.1 La radiométrie

2.1.1.1 La lumière

La lumière est un rayonnement qui transporte de l'énergie.

On la considère

- soit comme une onde électromagnétique caractérisée par sa longueur d'onde λ ;
- soit comme un flux de photons caractérisé par sa fréquence ν .

Un rayonnement caractérisé par une seule longueur d'onde ou par une seule fréquence est appelé rayonnement monochromatique. Dans la pratique, un rayonnement monochromatique s'étend sur un petit domaine de longueurs d'onde $d\lambda$ ou $\Delta\lambda$ centré autour de la longueur d'onde λ .

Dans la réalité, la plupart des lumières sont cependant complexes ou à spectre étendu. Elles sont composées de plusieurs rayonnements monochromatiques.

L'œil humain est capable de percevoir uniquement les radiations du spectre comprises entre 700 nm (Rouge) et 400 nm (Violet).

Au delà, on entre dans le domaine des rayonnements IR (> 700 nm) ou UV (< 400 nm). On peut encore distinguer parmi les UV trois catégories :

- UVA : 320 – 400 nm,
- UVB : 290 – 320 nm,
- UVC : < 280 nm

2.1.1.2 Le flux énergétique

La radiométrie couvre la mesure de la lumière des rayonnements optiques dans le domaine physique. On y définit des grandeurs énergétiques.

En radiométrie, l'énergie transportée par unité de temps s'appelle le **flux énergétique** Φ_e , qui se mesure en watt (W) ou en nombre de photons par seconde.

Étant donné un rayonnement complexe constitué d'une somme de rayonnements monochromatiques, la **densité spectrale du flux énergétique** $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ est définie comme suit :

$$\Phi_{e,\lambda}(\lambda) = \frac{d\Phi_e}{d\lambda}$$

Le flux énergétique Φ_e est donné par l'intégrale de la densité spectrale de flux énergétique $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ sur l'ensemble du domaine électromagnétique considéré :

$$\Phi_e = \int_{\lambda} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda$$

En pratique, on utilise la formule ci-dessous :

$$\Phi_e = \sum_{\lambda} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \Delta\lambda$$

2.1.1.3 Les grandeurs énergétiques

L'intensité énergétique et la luminance énergétique des sources, ainsi que l'éclairement énergétique des surfaces éclairées (Figure 3) sont définies à partir du flux énergétique.

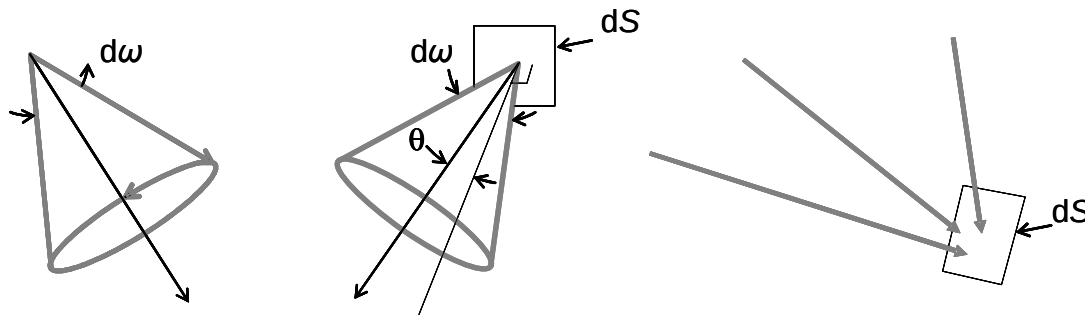


Figure 3 : Schéma représentant l'intensité lumineuse (à gauche), la luminance (au centre) et l'éclairement (à droite)

- L'**intensité énergétique** I_e dans une direction donnée mesure le flux énergétique émis par une **source ponctuelle** ramené à l'angle solide unité centré sur cette direction. L'unité est le watt par stéradian (W/sr). L'intensité énergétique s'écrit :

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega_{\text{emis}}}$$

- La **luminance énergétique** L_e d'un élément d'une **source étendue** dans une direction donnée mesure le **flux énergétique émis** par cet élément, ramené à l'angle solide unité et à l'aire apparente unité dans cette direction ($dS \cdot \cos\theta$, θ étant l'angle entre la normale à la surface et la direction de mesure, que l'on écrit aussi $dS_{\perp}$). L'unité est le watt par stéradian par mètre carré (W/sr/m²). La luminance énergétique s'écrit :

$$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{d\omega_{\text{emis}} dS_{\perp \text{source}}}$$

- L'**éclairement énergétique** E_e sur une **surface** est donné par le **flux lumineux reçu** par la surface, d'où qu'il vienne, ramené à l'aire unité. L'unité est le watt par mètre carré (W / m²) :

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS_{\text{récepteur}}}$$

2.1.2 La photométrie

Alors que la radiométrie couvre la mesure de la lumière dans le domaine physique, la photométrie, quant à elle, prend en compte l'effet visuel de la lumière. On y définit des grandeurs lumineuses.

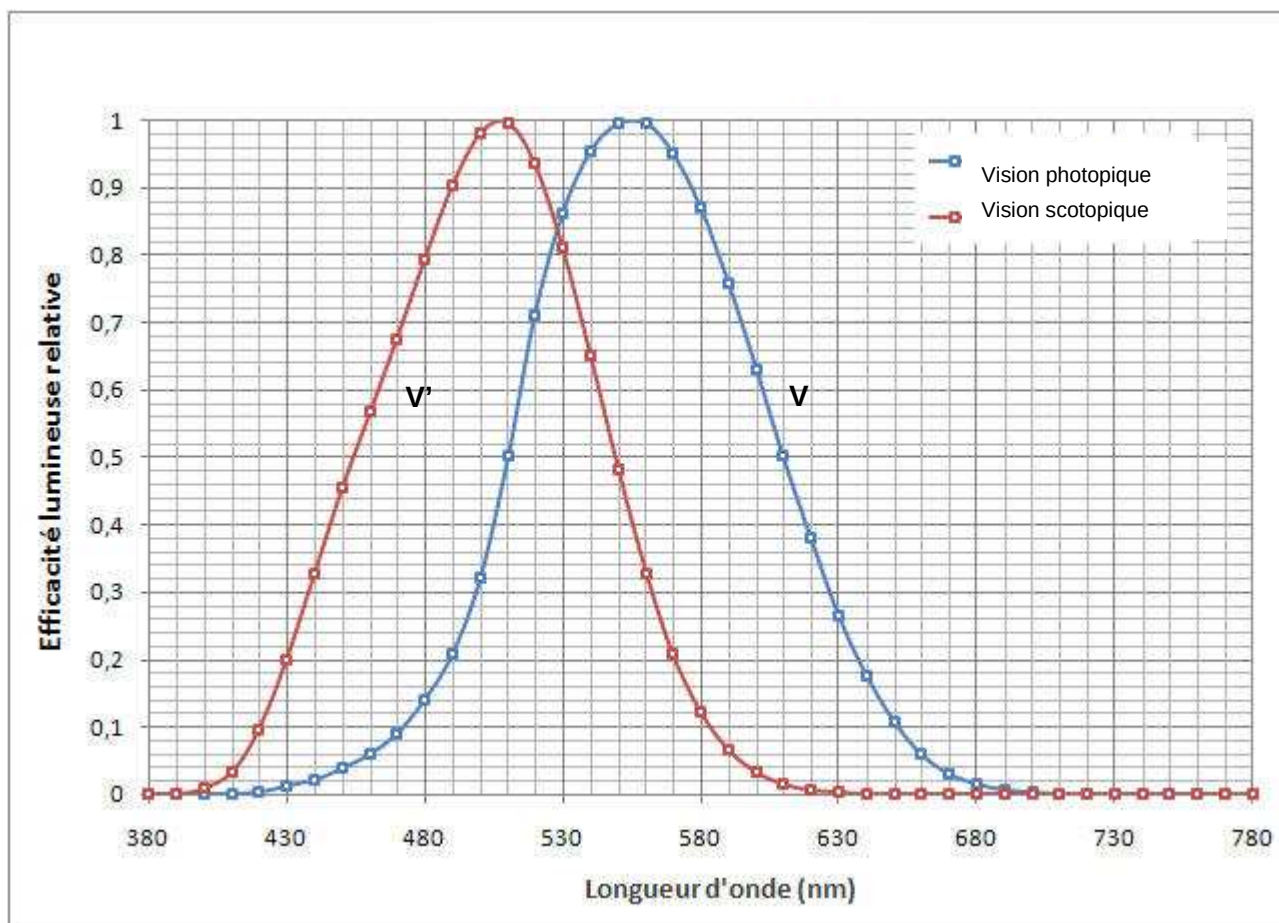
2.1.2.1 L'effet visuel de la lumière

Lorsqu'il s'agit de vision, de lumière visible, on considère souvent l'effet lumineux de la lumière dans son ensemble, sans se préoccuper de la distribution spectrale de la lumière qui impacte l'œil ou la rétine. Or, tous les rayonnements monochromatiques ne produisent pas le même effet sur l'œil.

Pour la vision, l'œil est sensible aux rayonnements monochromatiques compris entre 380 et 780 nm environ. Cette sensibilité est variable d'un individu à l'autre. La Commission internationale

de l'éclairage (CIE) a normalisé une fonction de sensibilité spectrale ou fonction d'efficacité²⁸ lumineuse relative spectrale des rayonnements pour la vision de jour (vision photopique) $V(\lambda)$ qui traduit l'efficacité des rayonnements monochromatiques à évoquer une réponse visuelle (Figure 4).

Cette courbe de réponse $V(\lambda)$ est différente en vision de jour (photopique) et en condition de faible luminosité de nuit (vision scotopique). L'observateur présente en effet une réponse maximale à 555 nm, à la limite du « jaune » et du « vert » pour la vision de jour et à 507 nm, à la limite du « bleu » et du « vert » pour la vision de nuit.



Source : www.led-fr.net, auteur : Benjamin Monteil

Figure 4 : Courbes de sensibilité spectrale

2.1.2.2 Transposition des grandeurs énergétiques en grandeurs lumineuses

Pour passer des grandeurs énergétiques aux grandeurs lumineuses :

- d'une part, on tient compte de l'efficacité lumineuse $V(\lambda)$ (grandeur sans unité) des rayonnements monochromatiques et de la définition conventionnelle de la candela (cd), unité d'intensité lumineuse du système international (SI) ;
- d'autre part, on applique la loi d'additivité qui énonce que l'effet d'une lumière est égal à la somme des effets des rayonnements qui la constituent.

²⁸ Ici, le terme « efficacité », traduction du terme anglais « efficiency », désigne le rapport du flux lumineux au flux énergétique du rayonnement ou puissance rayonnée, à ne pas confondre avec le terme « efficacité », traduction du terme anglais « efficacy », qui désigne parfois le rapport du flux lumineux émis par une source à la puissance électrique consommée.

Pour convertir le flux énergétique Φ_e en flux lumineux Φ_v ou Φ (l'indice v est facultatif), on pondère la densité spectrale de flux énergétique $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ par la fonction d'efficacité lumineuse relative spectrale $V(\lambda)$:

$$\Phi_v = 683 \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

Tandis que le flux énergétique Φ_e est exprimé en watt (W), le flux lumineux Φ_v est exprimé en lumen (lm) (1 lm = 1 cd.sr). Le facteur 683 lm / W permet le raccordement de la *candéla* à la *bougie*, unité photométrique historique pour l'intensité lumineuse.

Toutes les grandeurs lumineuses dérivent des grandeurs énergétiques sur le même schéma. La géométrie associée à chaque grandeur est conservée. Ainsi, la luminance L_v (en cd / m²) est donnée par la formule :

$$L_v = 683 \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} L_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

où $[L_{e,\lambda}]$ est en W / sr / m² / nm.

2.1.2.3 Définitions des grandeurs lumineuses

À partir du flux lumineux, nous définissons, comme dans le cas des grandeurs énergétiques, l'intensité lumineuse et la **luminance des sources**, puis l'**éclairage des surfaces éclairées**. L'emploi de l'adjectif « lumineux » et de l'indice « v » est facultatif.

- L'**intensité** (lumineuse) I_v ou I dans une direction donnée mesure le flux lumineux **émis** par une **source ponctuelle** ramené à l'angle solide unité centré sur cette direction. L'unité est la candela (cd). L'intensité lumineuse s'écrit :

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\omega_{\text{émis}}}$$

- La **luminance** (lumineuse) L_v ou L d'un élément d'une **source étendue** dans une direction donnée mesure le flux lumineux **émis** par cet élément, ramené à l'angle solide unité et à l'aire apparente ($\cos\theta$) dans cette direction. L'unité est la candela par mètre carré (cd/m²). La luminance s'écrit :

$$L_v = \frac{d^2 \Phi_v}{d\omega_{\text{émis}} dS_{\perp \text{source}}}$$

- L'**éclairage** (lumineux) E_v ou E sur une **surface** est donné par le flux lumineux **reçu** par la surface, d'où qu'il vienne, ramené à l'aire unité. L'unité est le lux (lx). L'éclairage s'écrit :

$$E_v = \frac{d\Phi_{v,\text{reçu}}}{dS_{\text{récepteur}}}$$

Tableau 1 : Quelques ordres de grandeurs d'éclairements exprimés en lux

ciel nocturne	0,0003
pleine Lune	0,2
lampe de 75 W à 4 m	10
lampe de 75 W à 2 m	40
éclairage public	50
éclairage artificiel correct	100
très bon éclairage artificiel (travail fin)	500
extérieur, temps nuageux	15 000
rue par temps clair	25 000
plein Soleil, en été, à midi	100 000
valeurs conseillées en éclairagisme	
chambre à coucher, tableau, sculpture	150
salle à manger ou cuisine	200
plan de travail écriture ou cuisine, salle de bains	300
travaux d'aiguille	500

Source : http://fr.wikibooks.org/wiki/Photographie/Photom%C3%A9trie/Grandeurs_lumineuses_et_unit%C3%A9s_photom%C3%A9triques

Tableau 2 : Correspondances entre grandeurs radiométriques et grandeurs photométriques

Grandeur énergétique	Unité	Terme anglais	Grandeur lumineuse	Unité	Terme anglais
Flux énergétique Φ_e	W	<i>Radiant flux</i>	Flux lumineux Φ_v	lumen (lm)	<i>Luminous flux</i>
Intensité énergétique I_e	W / sr	<i>Radiant intensity</i>	Intensité (lumineuse) I_v	candela (cd)	<i>Luminous intensity</i>
Luminance énergétique L_e	W / sr / m ²	<i>Radiance</i>	Luminance (lumineuse) L_v	candela par mètre carré (cd / m ²)	<i>Luminance</i>
Éclairement énergétique E_e	W / m ²	<i>Irradiance</i>	Éclairement (lumineux) E_v	lux (lx)	<i>Illuminance</i>

2.1.2.4 Vision scotopique

En vision de nuit (vision scotopique) la sensibilité relative de l'œil à la lumière est décalée vers les courtes longueurs d'onde (cf. Figure 4). La Commission internationale de l'éclairage (CIE) a normalisé une fonction d'efficacité lumineuse relative spectrale des rayonnements pour la vision de nuit $V'(\lambda)$. Cette fonction permet de calculer des grandeurs lumineuses scotopiques. La luminance s'écrit alors :

$$L_v = 1700 \int_{vis} L_{e,\lambda}(\lambda) V'(\lambda) d\lambda$$

Ici, l'intervalle noté *vis* correspond aux longueurs d'onde du spectre visible de nuit

2.1.3 Éclairement énergétique réel sur la rétine

La quantification du risque photochimique rétinien s'appuie sur le calcul de l'éclairement énergétique réel reçu par la rétine. Nous donnons ici une formule permettant de calculer l'éclairement énergétique réel sur la rétine en fonction de la source de lumière. La démonstration de cette formule se trouve dans l'annexe A du chapitre 2.

Pour une source étendue, étant donnée l'optique géométrique de l'œil, l'éclairement rétinien est proportionnel à la luminance de la source et à la surface pupillaire.

Précisément, l'éclairement énergétique réel sur la rétine s'écrit :

$$E_{e,rétine} = \frac{\pi d_{pupille}^2}{4 u'^2} \int L_{e,\lambda,source}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda$$

avec :

$E_{e,rétine}$: éclairement énergétique réel sur la rétine ;

$L_{e,\lambda,source}$: luminance énergétique spectrique en $W / m^2 / sr / nm$;

$d_{pupille}$: diamètre de la pupille en m ;

$\tau(\lambda)$: facteur de transmission spectral du milieu oculaire ;

u' : longueur de l'œil égale à 0,017 m environ.

La formule s'applique pour une source étendue de diamètre angulaire supérieur à 11 mrad ou 38 minutes d'arc. La distance entre la source et la pupille ne joue pas de rôle direct pour le calcul de l'éclairement rétinien.

Pour une source ponctuelle, il existe des réflexes naturels qui influent sur la surface rétinienne effectivement éclairée.

Le réflexe de contraction pupillaire à une lumière éblouissante dure environ 0,25 seconde (s). En l'absence de ce réflexe, jusqu'à 1 s, on estime que l'œil ne bouge pas et que la lumière issue d'une source ponctuelle recouvre 25 μm (1,5 mrad) sur la rétine.

Au-delà de 1 s, les mouvements des yeux contribuent à élargir la tache de lumière sur la rétine. En 100 s, la lumière issue de la source ponctuelle couvre environ 190 μm sur la rétine (11 mrad).

Pour les durées plus longues, les mouvements des yeux et de la tête répartissent encore plus largement la tache de lumière jusqu'à 1,7 mm (100 mrad ou 5°).

Ainsi, le diamètre apparent ou diamètre effectif d'une source ponctuelle est déterminé par la durée d'exposition. Étant donné l'optique géométrique de l'œil, l'éclairement sur la rétine est directement lié à l'éclairement dans le plan de la cornée, et donc à la distance entre la source et la pupille.

2.1.4 La notion de température de couleur

La lumière peut paraître dorée ou rosée et, dans ce cas, nous la jugeons « chaude », ou bien neutre. Lorsqu'elle apparaît très légèrement bleutée, nous la jugeons « froide ». Pour caractériser précisément la coloration d'une lumière blanche, les éclairagistes ont introduit l'échelle de « température de couleur ». Cette échelle reflète uniquement la couleur de la lumière, et n'informe en rien sur son spectre ou sur sa qualité.

Il s'avère que les variations de couleur de la lumière du jour sont pratiquement identiques aux variations de couleur du « corps noir », appelé aussi « radiateur de Planck ». Le corps noir est une source de rayonnement théorique qui a pour propriété d'émettre sous forme de rayonnement toute l'énergie qu'il reçoit. Les lois physiques qui régissent son rayonnement sont connues. Ainsi, son rayonnement ne dépend que de sa température, si bien que la connaissance de sa température permet de connaître son spectre d'émission, et, par là, d'accéder à sa couleur. En établissant le parallèle entre la couleur de la lumière naturelle et la couleur que prendrait théoriquement le « corps noir » à différentes températures, il a été possible de construire une échelle de couleur, ou de blancheur, des sources de lumière blanche.

La température de couleur proximale T_{cp} d'une source de lumière blanche, exprimée en kelvins²⁹ (K), est la température du radiateur de Planck dont le rayonnement possède la chromaticité la plus voisine de celle de la source considérée.

Attention, la terminologie « couleur blanc chaud » ou « couleur blanc froid » prête facilement à confusion. Plus la température de couleur augmente et plus la teinte est dite « froide ».

2.1.5 Indice de rendu de couleur

L'indice de rendu de couleur (IRC) définit la capacité d'une source lumineuse à restituer la couleur d'un objet sans en modifier la teinte. Il est compris entre 0 et 100. La lumière du jour a un IRC de 100, une lampe à incandescence a aussi un IRC proche de 100 (supérieur à 90).

Pour évaluer l'IRC d'une source, on place un observateur face à un objet d'une certaine couleur, puis on illumine cet objet avec cette source. L'IRC sera évalué en fonction de la teinte que l'observateur aura perçue. Une bonne source lumineuse (IRC >90) restituera parfaitement la couleur, alors qu'une source de mauvaise qualité donnera à l'objet un aspect plus foncé ou plus clair. En pratique, il existe 8 couleurs normalisées et une source de référence. On juge la qualité de la source par rapport à la source de référence.

2.2 Les différents types de sources de lumière

Toutes les sources produisant de la lumière artificielle à partir de l'électricité utilisent l'un des deux procédés de base connus aujourd'hui : l'incandescence et la luminescence (qui inclut les lampes à décharge et les LED). La Figure 5 présente de façon synthétique les différentes familles de sources susceptibles d'être utilisées pour produire de la lumière.

Les sources lumineuses sont caractérisées par deux critères : l'efficacité lumineuse, qui définit la quantité de lumière produite par watt électrique consommé et le rendu des couleurs, c'est-à-dire la capacité de produire une lumière qui puisse être considérée comme capable de restituer aux objets un aspect coloré identique à celui qu'ils ont dans leurs conditions habituelles d'environnement lumineux.

²⁹ Echelle de température absolue, décalée par rapport à l'échelle de température Celsius (°C), telle que 0 °C = 273 K.



Source : <http://labo-energetic.eu/fr/labo/images/luxmetre24.jpg>

Figure 5 : Les différentes familles de lampes

Le Tableau 3 donne des ordres grandeurs sur le coût, la durée de vie, l'efficacité énergétique et l'indice de rendu de couleur de différents types d'éclairage.

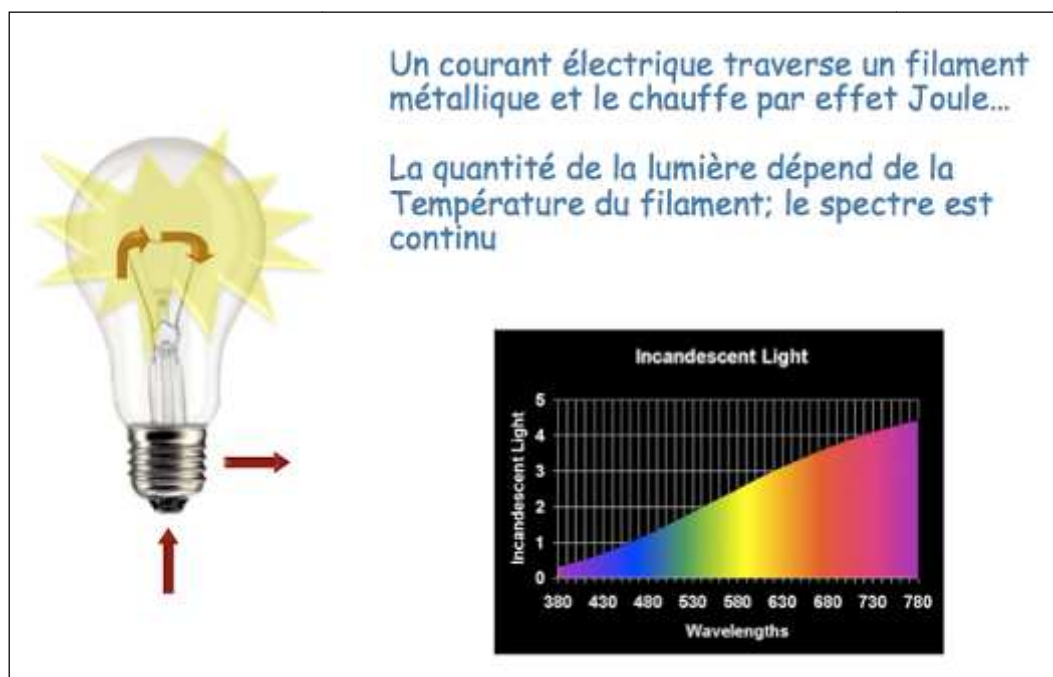
Tableau 3 : Tableau comparatif de différents types d'éclairage

	Prix (€)	Rendement (lm / W)	Durée de vie (heures)	IRC
Incandescence	0,5 à 1	11 à 15	1 000	100
Halogène	5 à 20	15 à 30	2 000 à 4 000	100
Tubes fluorescents	5 à 35	50 à 100	10 000 à 20 000	> 90
Vapeur de mercure	10 à 40	50 à 70	15 000 à 20 000	≅ 50
Vapeur de sodium (basse pression)	30 à 80	140 à 200	15 000	< 30
Vapeur de sodium (haute pression)	25 à 45	100 à 130	12 000 à 20 000	< 50
Iodures métalliques	50 à 60	70 à 90	5 000 à 10 000	60 à 95
Lampes à induction	30 à 60	70	6 000	85

Source : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)

2.2.1 Les lampes à incandescence

Dans les lampes à incandescence actuelles, le radiateur (filament) en tungstène est chauffé par effet Joule³⁰. L'intérieur de la lampe est un milieu très dense, la densité de puissance y est élevée et l'émission (de surface) présente une forte luminance. Son rayonnement est continu et suit approximativement (dans le visible) la loi des corps « gris »³¹ à la température du filament. La Figure 6 montre schématiquement le principe de fonctionnement de ce type de lampe.



Source : Georges ZISSIS, cours d'éclairage, M1 Physique de l'habitat

Figure 6 : Principe de fonctionnement d'une lampe à incandescence et son spectre

Il n'est pas possible d'augmenter de beaucoup la température de la lampe, car l'évaporation ponctuelle du filament et sa recristallisation réduisent très vite sa durée de vie par rupture du filament. Celle-ci dépend essentiellement, à travers ces deux phénomènes (évaporation et recristallisation), de la tension, du nombre des allumages, des vibrations, du champ des températures autour de la lampe, etc.

L'autre conséquence de l'évaporation est le noircissement de l'ampoule. Elle est limitée par la présence d'un gaz rare (souvent du krypton ou de l'argon) qui diminue la vitesse d'évaporation³².

³⁰ L'effet Joule est la manifestation thermique de la résistance électrique. Il se produit lors du passage d'un courant électrique dans tout matériau conducteur de l'électricité.

³¹ Un corps naturel peut en général être assimilé à un corps gris. A la différence du corps noir, un corps gris n'absorbe pas tout le rayonnement reçu, une partie est réfléchi ou transmise. De même, à température égale, un corps gris n'émet pas autant qu'un corps noir.

³² Le cycle tungstène-halogène permet, dans les lampes halogènes, de supprimer le dépôt de tungstène sur la paroi. Près de l'ampoule où la température est « modérée », les molécules comportant des halogènes prennent en charge les atomes de tungstène isolés. La réussite de l'opération tient au fait que cette réaction chimique est réversible à haute température. Ainsi, près du filament, zone beaucoup plus chaude, la molécule relâche l'atome de tungstène qui peut regagner le filament. Cette solution permet d'augmenter la durée de vie et / ou d'améliorer l'efficacité lumineuse et d'obtenir une lumière plus blanche en portant le filament à une plus haute température (jusqu'à 3 000°C contre 2 700°C pour une lampe à incandescence).

Pour les lampes halogènes d'éclairage général, la température de couleur (T_{cp}) est de l'ordre de 3 000 K pour une durée de vie de 2 000 h. Dans ces conditions, l'efficacité lumineuse est limitée à 20 à 25 lm / W ce qui est bien supérieur aux 12 à 14 lm / W des lampes à incandescence ordinaires. Aujourd'hui, en incorporant une alimentation électronique dans le culot (cf. Figure 7) de la lampe on arrive à des efficacités de l'ordre de 20 - 25 lm / W.



Source : Catalogues Philips et Osram

Figure 7 : Lampes halogènes haute efficacité avec et sans ballast électronique intégré

Compte tenu de leur facilité d'emploi, de leur faible coût et de leur excellent indice de rendu de couleurs (IRC) (on leur attribue par définition l'indice de rendu des couleurs maximum IRC $\approx$ 100), les lampes à incandescence ont dominé le marché des sources de lumière depuis leur apparition à la fin du XIX^e siècle³³ jusqu'à maintenant.

2.2.2 Les lampes à décharge

Une lampe à décharge³⁴ est constituée d'une enceinte étanche et transparente (ou translucide) qui confine le support gazeux de la décharge tout en laissant échapper le rayonnement que l'on veut utiliser. Cette enceinte, de forme et de dimensions très variables, contient un mélange de gaz et/ou de vapeurs métalliques, susceptibles de rayonner dans le domaine des longueurs d'onde désiré.

La pression de l'élément actif peut être comprise entre quelques et plusieurs millions de pascals (Pa). On a l'habitude de parler de lampe basse ou haute pression (BP et HP respectivement). Il s'agit en réalité d'un abus de langage, car la pression résulte de la température et de la densité, il serait plus judicieux de parler de lampes hautes ou basses densités.

L'excitation du mélange gazeux est assurée soit par la circulation d'un courant électrique entre deux électrodes, soit par l'injection dans l'ampoule d'un rayonnement électromagnétique haute fréquence (radiofréquences par exemple). Enfin, la caractéristique courant-tension d'une décharge

classique). L'enveloppe de l'ampoule n'est alors plus en verre mais en quartz, afin de supporter de telles températures.

On peut réduire la dimension des ampoules et augmenter considérablement la pression du gaz rare ce qui limite l'évaporation.

³³ La lampe à incandescence a été inventée en 1879 par Joseph Swan et améliorée par les travaux de Thomas Edison.

³⁴ La lampe à décharge électrique, a été réalisée pour la première fois en 1814 par Sir H. Davy et M. Faraday (ce fût la première application des plasmas).

étant négative ou très faiblement positive (cas des lampes haute pression en régime permanent), une adaptation d'impédance³⁵ est nécessaire pour stabiliser le courant de décharge.

La création d'un arc électrique dans un gaz ne va pas de soi. Un gaz est isolant, c'est-à-dire qu'il empêche la circulation d'un courant d'électrons. Pour que le gaz devienne conducteur d'électricité, il faut en quelque sorte introduire de force des électrons. Les deux électrodes ont donc pour but d'injecter des électrons dans le gaz pour la première, de les collecter pour la seconde. Un électron, accéléré par le champ électrique entre les deux électrodes, peut rencontrer un atome et produire une « ionisation ». L'énergie acquise par l'accélération de l'électron permet dans ce cas de dissocier l'atome en un autre électron et un ion (c'est-à-dire un atome ayant perdu un électron). L'électron libéré peut lui-même ioniser un autre atome et multiplier ainsi le nombre d'électrons présents dans le gaz par effet « boule de neige ». Il ne s'agit alors plus d'un « gaz » mais d'un « plasma ».

Les lampes « haute pression » fonctionnent à des pressions allant de 1 à plusieurs centaines de bars (200 bars pour la lampe ultra haute pression (UHP) utilisée pour les vidéoprojecteurs). La plupart des lampes HP actuelles utilisent du mercure pour contrôler la mobilité électronique dans leur plasma.

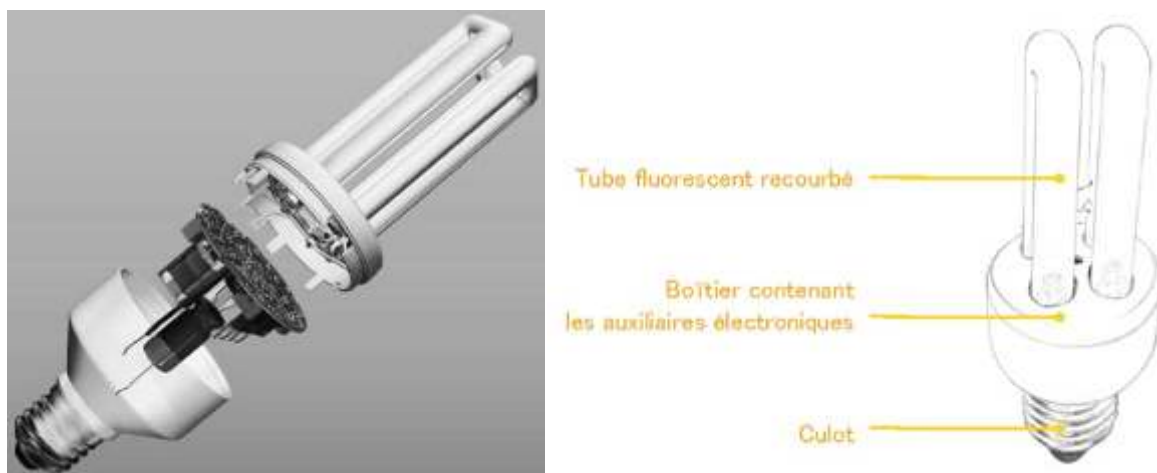
Parmi la famille des lampes basse pression, les lampes fluorescentes sont les plus connues. Appelées abusivement « néons » (elles contiennent aujourd'hui d'autres gaz), elles sont à présent des produits technologiquement matures. C'est le type de lampes à décharge le plus répandu sur le marché mondial.

Les tubes fluorescents sont des lampes à décharge utilisant un mélange de mercure à basse pression et d'argon. La majeure partie de la lumière émise est située dans l'ultraviolet (UV), invisible à l'œil, et est ensuite convertie en lumière blanche, visible, grâce à la photoluminescence³⁶.

Parallèlement à la réduction des tubes fluorescents, les lampes fluorescentes compactes, appelées aussi « lampes à économie d'énergie » (cf. Figure 8), sont apparues. Pour la même quantité de lumière émise, une lampe fluorescente compacte consomme environ 5 fois moins d'électricité qu'une lampe à incandescence. Cela signifie qu'une lampe traditionnelle de 100 W peut être remplacée par une lampe « fluocompacte » de 20 W.

³⁵ L'impédance électrique mesure l'opposition d'un circuit électrique au passage d'un courant alternatif sinusoïdal. La définition d'impédance est une généralisation de la loi d'Ohm dans l'étude des circuits en courant alternatif.

³⁶ Principe de la photoluminescence : Les parois intérieures du tube sont recouvertes de poudres fluorescentes, appelées luminophores, qui absorbent les rayonnements ultraviolets. Les molécules de ces luminophores passent alors à un état excité. Par désexcitation radiative, elles peuvent dégager de l'énergie sous la forme de rayonnement. La lumière émise est nécessairement de moindre énergie que la lumière absorbée mais cette propriété est ici intéressante puisqu'elle permet de convertir l'ultraviolet en visible. La lumière émise par fluorescence dépend beaucoup des poudres utilisées. Pour obtenir une lumière blanche, il est nécessaire d'utiliser un mélange de luminophores. Il est d'ailleurs habituel d'utiliser trois types de poudres qui, à partir de l'excitation ultraviolette de la décharge du mercure, produisent respectivement de la lumière bleue, verte et rouge. Les concentrations relatives du mélange permettent d'obtenir une lumière blanche plus ou moins chaude.



Source : Photographie reproduite avec l'aimable autorisation d'Osram GmbH

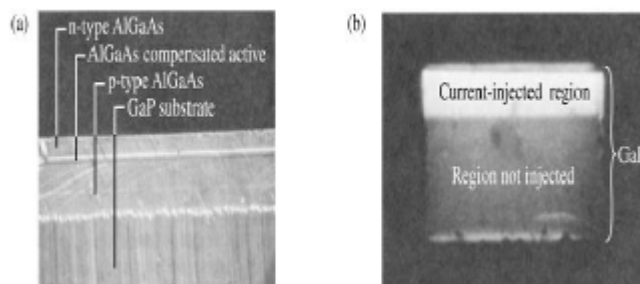
Figure 8 : Lampe fluocompacte avec son ballast électronique intégré

2.2.3 Les diodes électroluminescentes (LED)

2.2.3.1 Principe de fonctionnement des LED

Une LED est avant tout, comme son nom l'indique, une diode. Alors que les diodes bien connues des électroniciens sont fabriquées avec du silicium, les LED sont à base de semi-conducteurs moins connus, à savoir du nitrure de gallium (GaN) pour les LED vertes et bleues ou du phosphore (GaP) ou arséniure de gallium (GaAs) pour les LED ambre ou rouges. Les LED fonctionnent grâce à des tensions de quelques volts et émettent de la lumière lorsqu'elles sont polarisées en direct, c'est-à-dire lorsque le courant circule dans le sens passant de la diode. Leur tension de seuil typique, c'est-à-dire la tension nécessaire pour déclencher le passage du courant et donc l'illumination de la diode, à courant nominal, est de 3,2 V pour les LED nitrures et de 2,1 V pour les LED phosphures ou arséniures.

L'élément de base de toute diode électroluminescente est un semi-conducteur ayant deux régions de conductivité différentes (de type « p » c'est-à-dire positivement chargée par un déficit global d'électrons et de type « n » signifiant négativement chargée par un excès global d'électrons) et une région de recombinaison radiative des porteurs « n » (électrons) et « p » (trous). Dans son expression la plus simple, une LED se réduit à la jonction d'un semi-conducteur dopé de type « p » avec le même semi-conducteur dopé « n ». Il s'agit d'une diode électroluminescente dite « homo-jonction » (cf. Figure 9). Les LED classiques utilisent encore aujourd'hui cette structure mais, comme nous le verrons plus loin, les nouvelles diodes de forte intensité utilisent des jonctions bien plus complexes (appelées « hétéro-jonction »).



(a) Diode électroluminescente AlGaAs implantée sur un substrat transparent de GaP.

(b) L'électroluminescence vue à travers le substrat transparent provient de la région de l'injection du courant sous un contact métallique qui se situe sur la face arrière du substrat transparent.

Figure 9 : Illustration d'une « homo-jonction »

Les LED blanches conjuguent de nombreux avantages techniques et pratiques par rapport aux lampes traditionnelles :

- plus grande efficacité énergétique des systèmes d'éclairage, qui s'avère bien supérieure à celle des lampes à incandescence et s'approche désormais de celle des lampes fluorescentes compactes ;
- plus longue durée de vie et donc moins de maintenance ;
- compacité et robustesse ;
- miniaturisation des équipements ;
- bien adaptées aux chaînes d'assemblage automatique ;
- variation d'ambiance à volonté (facilité de gradation et changement de couleur offrant une gestion spatiale et temporelle de l'éclairage) ;
- alimentation en basse tension (systèmes autonomes alimentés sur batterie, application où la sécurité est importante) ;
- bon fonctionnement à basse température.

Cette technologie présente des atouts très importants, notamment du point de vue de l'efficacité énergétique. Cependant, la technologie commence juste à être mature pour pénétrer le secteur de l'éclairage général.

2.2.3.2 La couleur des LED : d'une couleur quasi monochromatique à une lumière blanche

Toute diode électroluminescente est par nature quasi monochromatique, la longueur d'onde principale dépendant de l'énergie du *gap* E_g . La Figure 10 montre la corrélation entre l'énergie de *gap*³⁷ et la longueur d'onde d'émission pour quelques semi-conducteurs élémentaires et systèmes binaires. Nous constatons que toutes les longueurs d'onde allant de l'infrarouge à l'ultraviolet proche peuvent être obtenues. Cependant, pour des raisons technologiques, seuls les semi-conducteurs à « *gap* direct » (barres vertes) conviennent pour la réalisation des LED de forte intensité. L'utilisation des semi-conducteurs à *gap* indirect (barres rouges) est très limitée aujourd'hui. La courbe violette représente la sensibilité de l'œil humain.

³⁷ Schématiquement, l'énergie de *gap* est l'énergie nécessaire pour changer l'état du semi-conducteur d'isolant à conducteur de courant.

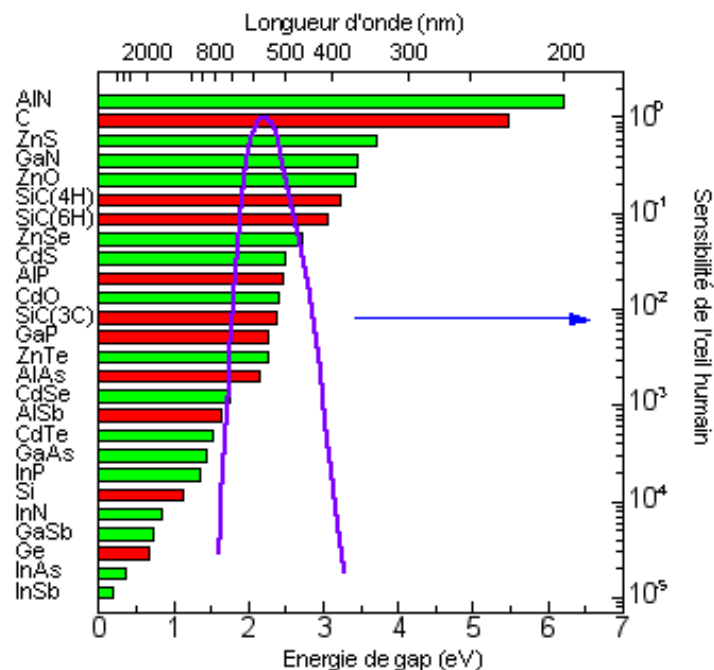


Figure 10 : Énergie de gap et longueur d'onde d'émission pour quelques semi-conducteurs élémentaires et systèmes binaires

Une LED produit une lumière sensiblement monochromatique, mais son intensité et sa largeur spectrale dépendent fortement de la température de la jonction. Si la température de la jonction évolue, la couleur de la LED peut dériver dans le temps. À température croissante, le spectre se décale vers les plus grandes longueurs d'onde (par exemple, l'ambre vire au rouge).

Il existe actuellement trois méthodes pour réaliser une diode électroluminescente émettant de la lumière blanche :

- *méthode 1* : combiner une diode émettant une longueur d'onde courte λ_1 avec un luminophore émettant une longueur d'onde complémentaire λ_2 (longue) ;
- *méthode 2* : utiliser une diode, émettant dans l'ultraviolet proche, couplée à un ou plusieurs luminophores ;
- *méthode 3* : utiliser trois diodes (au moins) émettant des longueurs d'ondes visibles qui se combinent pour donner une lumière blanche.

Chacune de ces trois méthodes présente des avantages et des inconvénients, comme le montre le Tableau 4 :

Tableau 4 : Comparaison des différentes méthodes pour obtenir de la lumière blanche par les LED

	Avantages	Inconvénients	Émission de « lumière bleue »
Méthode 1	■ Bonne efficacité lumineuse ■ Technologie maîtrisée ■ Différentes Températures de couleur (Teintes chaudes ou froides)	■ Variations de teintes très limitées ■ Tris nécessaires pour obtenir un lot de même couleur à la sortie de la chaîne de fabrication ■ Phénomène de « halo » coloré	Oui, diffuse
Méthode 2	■ Bonne uniformité de couleur ■ Large gamme de blancs ■ Bon indice de rendu de couleur (IRC de 70-90)	■ Efficacité lumineuse moindre ■ Faible puissances ■ Solarisation UV du boîtier	Non
Méthode 3	■ Contrôle dynamique des couleurs ■ Possibilité de générer des millions de couleurs et teintes	■ Électronique de contrôle plus complexe ■ Variations de couleurs dues à l'échauffement ■ Nécessite d'homogénéiser le flux ■ Mauvais Indice de Rendu de Couleurs	Oui, directionnelle et intense

A l'heure actuelle, la méthode la plus économiquement rentable et la plus couramment utilisée est la méthode 1. En pratique, on couple une LED bleue à un phosphore jaune pour produire de la lumière blanche. Ce point est essentiel, car nous verrons par la suite que la lumière bleue est phototoxique pour l'œil, de ce fait l'éclairage à LED se démarque réellement des autres types d'éclairage d'un point de vue sanitaire.

2.2.3.3 L'efficacité des LED

Nous allons faire la distinction entre l'efficacité énergétique³⁸, exprimée en pourcentage, et l'efficacité lumineuse, exprimée en lm / W.

Efficacité énergétique

L'efficacité énergétique η_e d'une LED est définie comme le rapport entre la puissance rayonnée P_{rad} , et la puissance électrique P_{el} injectée. Elle est la résultante de plusieurs facteurs :

$$\eta_e = \frac{P_{rad}}{P_{el}} = \eta_{ext} \eta_f$$

où η_f est le rapport entre l'énergie moyenne du photon produit sur l'énergie totale que la paire électron-trou ³⁹acquiert de la source d'énergie externe :

³⁸ Attention à ne pas confondre avec la définition des classes énergétiques (A, B, ..., F) de la directive Européenne 98 / 11.

$$\eta_f = \frac{h\nu}{eV}$$

η_{ext} , l'efficacité quantique externe, est le rapport du nombre de photons émis sur le nombre d'électrons qui transitent par la diode. Elle dépend fortement du matériau émissif, de la longueur d'onde et de la température de la jonction. La Figure 11 illustre cette dépendance à la longueur d'onde pour les deux principales technologies utilisées aujourd'hui.

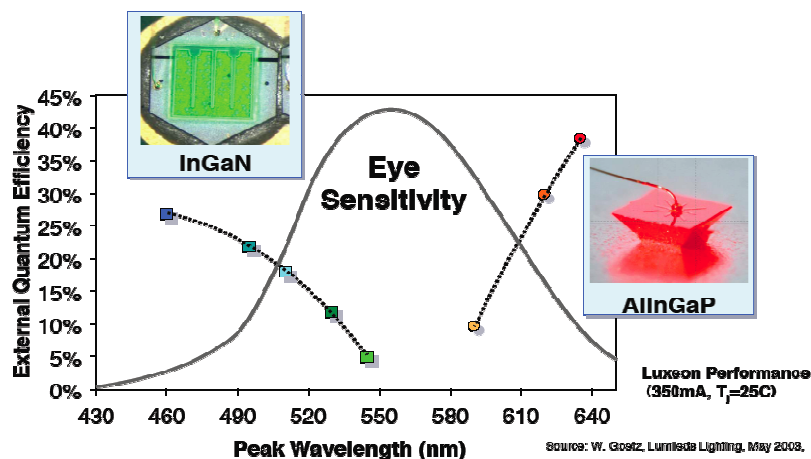


Figure 11 : Variation de l'efficacité quantique externe en fonction de la longueur d'onde pour deux technologies de LED

Nous constatons que les LED à nitrures sont très efficaces dans la partie bleue du spectre. Cependant, leur efficacité diminue lorsqu'on se déplace vers la partie rouge du spectre. A *contrario*, les LED à base de phosphures ou arséniures sont efficaces dans les rouges et l'ambre mais sont incapables de produire du bleu. Finalement, on constate que les LED vertes, entre ces deux zones extrêmes, sont d'une efficacité médiocre et ce quel que soit le matériau de base. C'est ce que l'on appelle le « *green gap* ».

Efficacité Lumineuse

L'efficacité lumineuse η (en lm / W) est définie de la façon suivante :

$$\eta = 683 \frac{\int_{380nm}^{780nm} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{P_{el}}$$

où

$V(\lambda)$ est la réponse normalisée de l'œil humain définie par la CIE pour des conditions photopiques (cf. Figure 4) et qui présente un maximum à 555 nm ;

$\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ est densité spectrale de puissance en W / nm ;

P_{el} la puissance électrique injectée en W.

En 1968, la première diode électroluminescente commercialisée produisait une lumière rouge d'à peine 0,001 lm. Aujourd'hui, des LED blanches de haute puissance, voire de très haute puissance, sont disponibles sur le marché et produisent plus d'une centaine de lumens. Il s'agit d'une vraie révolution. En effet, le flux lumineux produit double tous les 18 à 24 mois et ceci depuis presque 30 ans. De plus, l'efficacité lumineuse des meilleures LED a doublé en 4 ans et elle va encore probablement doubler d'ici à 2015. L'évolution des LED blanches est très soutenue depuis 10 ans.

³⁹ En physique des semi-conducteurs, un trou est la place laissée par un électron qui s'est déplacé

On trouve maintenant des composants qui sont conçus pour des applications d'éclairage général qui émettent des flux supérieurs à 100 lm et dépassant parfois 1 000 lm. Pas un mois ne s'écoule sans une nouvelle annonce de record d'efficacité lumineuse.

Pour les lampes plus classiques, comme les lampes à incandescence, le flux est indépendant des conditions de fonctionnement (à l'exception des lampes fluorescentes). La situation est totalement différente avec les LED et leur efficacité varie avec la température interne de la diode appelée généralement température de jonction (T_j) et avec le courant qui y circule. Désormais, les fabricants de LED annoncent des performances à courant nominal (350 mA, 1 A, etc.). Ce n'était pas le cas dans un passé récent où les performances étaient données à un courant d'utilisation de l'ordre de 20 mA, très loin des conditions d'utilisation, mais plus favorable au fabricant. Le Tableau 5 donne les valeurs maximales d'efficacité lumineuse annoncées récemment par les fabricants pour quelques produits commerciaux.

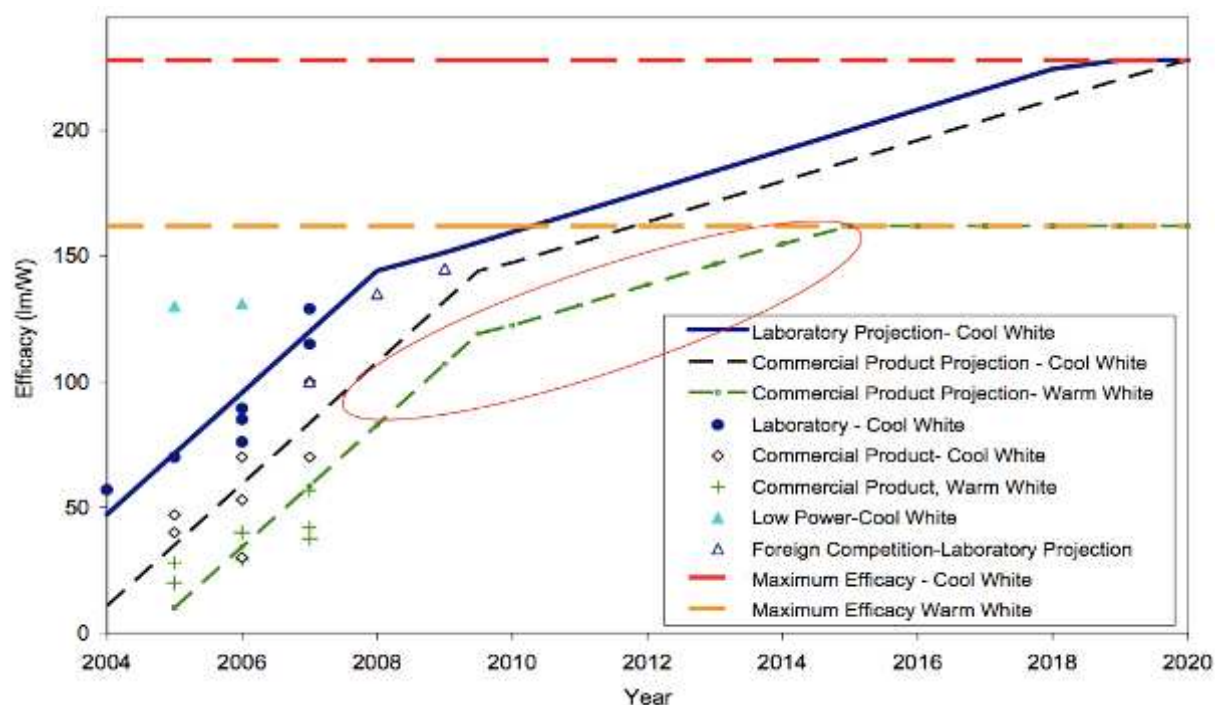
Tableau 5 : Efficacité lumineuse de LED blanc froid parmi les plus performantes relevées dans les documentations des fabricants leaders début 2009

Fabricant	Modèle	Efficacité lumineuse @ 350 mA – T_j 25°C
Cree	XLamp XR-E	107 lm / W
Nichia	NS3W183	98 lm / W
Osram Opto Semiconductors	Advanced Power TopLED Plus	90 lm / W
Philips LumiLED	Rebel ES	100 lm / W

Remarque : Les efficacités lumineuses des LED ont été mesurées dans des conditions de laboratoire garantissant une température de la jonction semi-conductrice à 25°C.

Pour des prototypes de laboratoire, en 2008, des efficacités lumineuses de 249 lm / W avaient été obtenues pour une LED « visuellement » blanche faible puissance et de 145 lm / W pour une LED blanche forte puissance.

Pour prévoir la valeur plafond de l'efficacité lumineuse, il faut regarder séparément les LED de faible et de forte puissance. Comme nous l'avons vu au préalable pour les applications éclairagistes, les LED forte puissance/forte brillance sont aujourd'hui utilisées largement. Même dans cette sous-famille, il faut distinguer entre LED blanches « froides » et « chaudes ». La Figure 12 donne une première estimation des plafonds attendus par le Département d'Énergie des États-Unis (DoE).



Source : DoE (SSL R&D MYPP, Mar 2008, Fig. 4-7)

Figure 12 : Évolution et limitation des efficacités lumineuses de LED blanches forte puissance

Nous constatons que :

- l'efficacité lumineuse maximale pour les LED produisant du blanc chaud est de l'ordre de 160 lm / W tandis que celle pour le blanc froid est estimée aux alentours de 230 - 240 lm / W (différence de l'ordre de 20 %). Ceci est dû à l'efficacité de conversion du phosphore ;
- les LED de laboratoire (prototypes) sont bien plus efficaces que les LED produites en série.

Si les LED blanches atteignaient 200 lm / W d'ici 2025, elles seraient susceptibles de remplacer les lampes fluorescentes.

Les facteurs dont dépend l'efficacité des LED

La vigilance s'impose dans les annonces d'efficacité lumineuse lorsque cette seule donnée est annoncée pour des LED blanches, sans indication de l'IRC. Pour illustrer le propos, on considérera 2 cas extrêmes (et fictifs) : une LED verte émettant à 555 nm qui aurait une efficacité énergétique de 100 % produirait 683 lm / W ; à l'opposé, une diode blanche produisant le spectre visible d'un corps noir à 3 000 K avec le même rendement de 100 % produirait 150 lm / W. En revanche, l'IRC de la première serait nul, signifiant qu'il n'y a alors aucun rendu de couleur, alors que celui de la seconde atteindrait 100. Une efficacité lumineuse élevée oblige à sacrifier l'IRC et réciproquement.

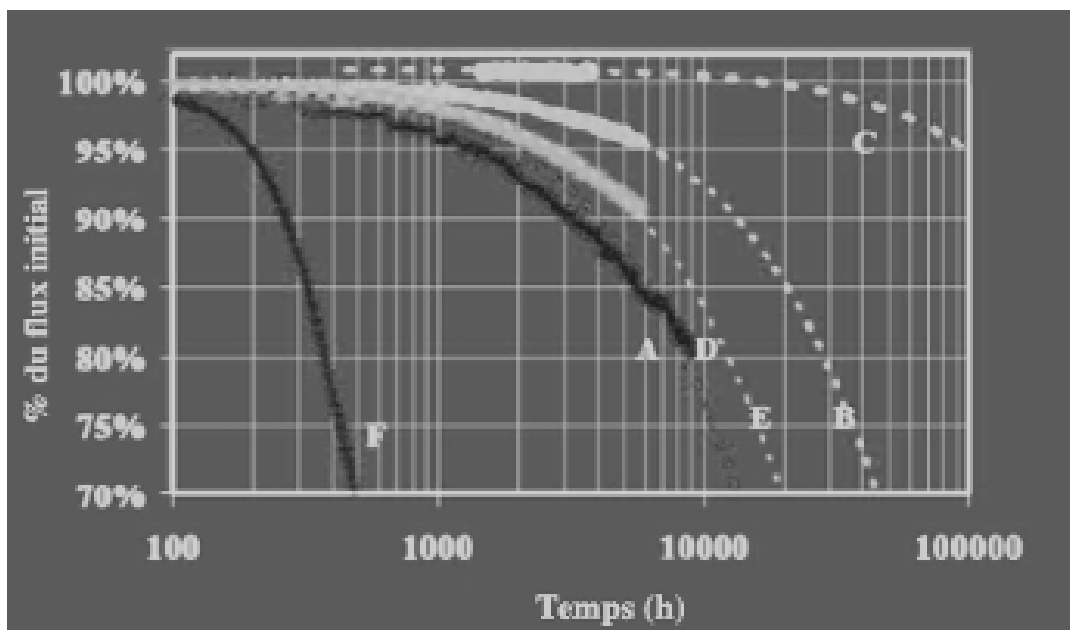
En effet, l'efficacité des LED (énergétique et lumineuse) est directement influencée par plusieurs paramètres :

- la température de la jonction ;
- le courant qui traverse la jonction ;
- la longueur d'onde ;
- la surface de la jonction ;
- la géométrie de la puce.

2.2.3.4 La qualité des LED

La qualité des LED est le paramètre très souvent négligé dans la discussion sur les vertus des LED. Cependant, il s'agit d'un paramètre primordial qui conditionne la fiabilité d'un système d'éclairage et qui assure l'acceptabilité par l'utilisateur final.

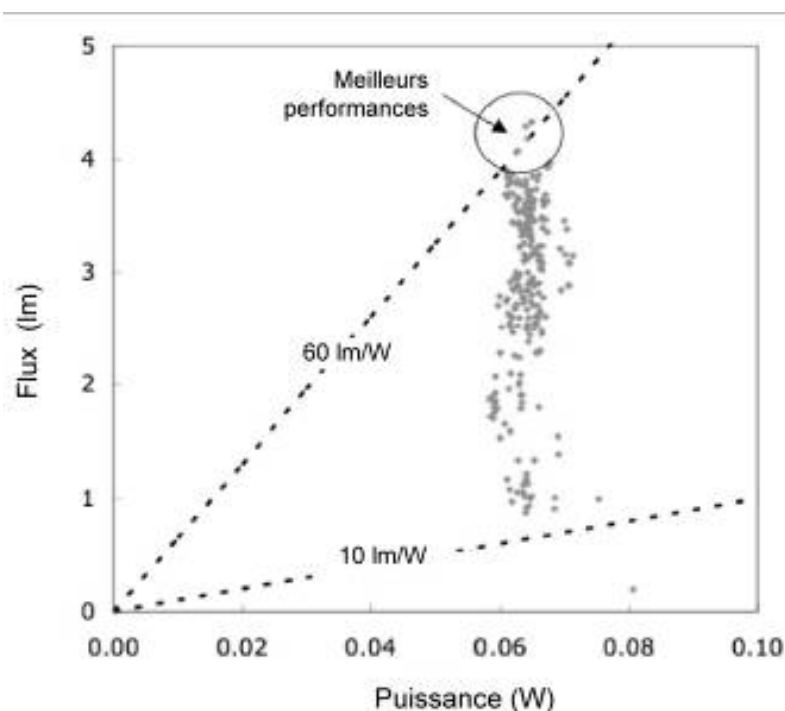
La Figure 13 illustre ce problème : la maintenance du flux des LED « identiques » en provenance des différents fabricants montrent de très grandes disparités, bien que le vieillissement ait lieu dans les mêmes conditions (courant, température de jonction).



Source : *Les diodes électroluminescentes pour l'éclairage*, Patrick Mottier,
ISBN : 978-2-7462-2097-3

Figure 13 : Dépréciation dans le temps du flux lumineux des LED blanches de haute puissance nominalement identiques provenant de différents fabricants (lettres A à E)

Par ailleurs, des problèmes de reproductibilité de production en grande série se posent également. Une étude récente menée par Mills [Mills and Jacobson, 2007] a mis au jour des produits en provenance d'Asie dont la qualité est complètement aléatoire. La Figure 14 montre la variation des performances entre 26 lots constitués de 10 LED « identiques » chacun. L'efficacité varie entre 12 et 60 lm / W.

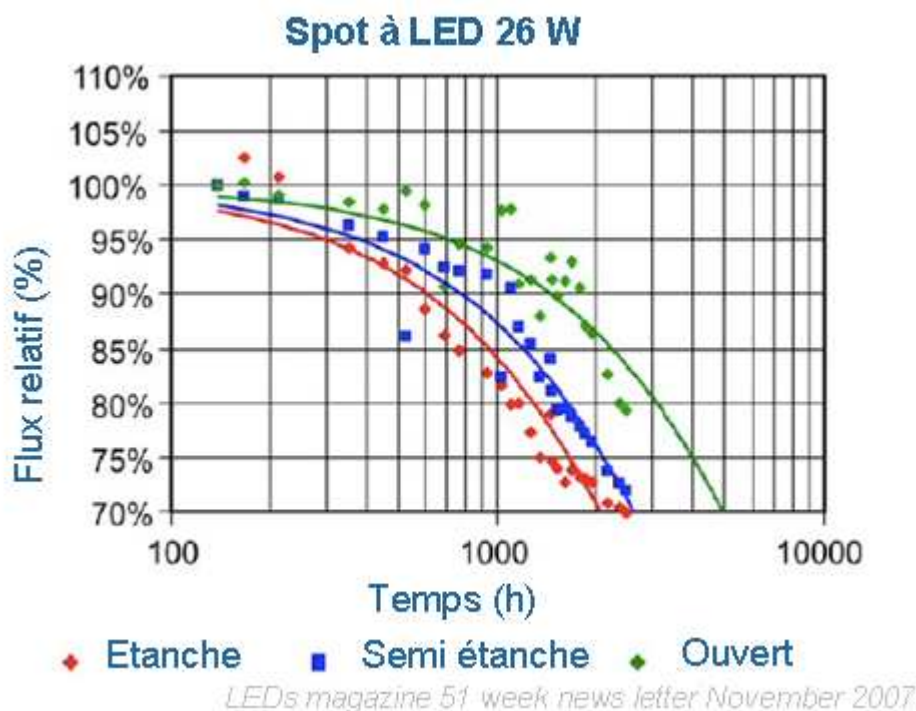


Source : *Les diodes électroluminescentes pour l'éclairage*, Patrick Mottier,
ISBN : 978-2-7462-2097-3

Figure 14 : Variation des performances de 260 LED blanches (provenant de 26 lots) de 5 mm fonctionnant sous 20 mA [fabrication asiatique]

2.2.3.5 La durée de vie des LED

Voici quelques années, les constructeurs avançaient pour leurs produits une durée de vie de 100 000 heures. Toutefois, ils ne précisait pas la définition qu'ils utilisaient pour définir cette valeur. S'agissait-il d'une durée de vie moyenne, médiane, économique, celle de la jonction nue, ou celle dans un luminaire quelconque ? La Figure 15 donne un exemple de la durée de vie de la même lampe à LED placée dans un luminaire ouvert, semi-clos et clos (classe IP65).



Source : [LED magazine, 51 week news letter, Novembre 2007]

Figure 15 : Dépréciation du flux mesuré pour un spot à LED de 24 W dans différents luminaires

La définition de la durée de vie d'une LED n'est pas, à l'heure actuelle, normalisée. En effet, c'est encore une notion assez floue, mais des travaux de normalisation sont en cours et les industriels réalisent de plus en plus de campagnes de tests, plus rigoureuses et réalistes. Généralement, la définition utilisée pour définir la durée de vie d'une LED est « le temps au bout duquel B % des LED émettent un flux lumineux inférieur à L % du flux initial ». Cela correspond à peu près à la définition de la durée de vie utilisée pour les autres sources de lumière, mais les conditions du test ne sont pas encore spécifiées. À noter que le flux lumineux initial est généralement mesuré après 24 heures de fonctionnement de la LED, tandis que pour une source de lumière classique cette mesure se fait après 100 h de fonctionnement contrôlé. Cependant, les choix de la valeur du flux initial et de la méthode d'extrapolation sont d'une importance primordiale. L'adoption par les constructeurs de cette définition plus proche de la réalité du monde de l'éclairage explique pourquoi les valeurs des constructeurs ont été revues à la baisse.

La durée de vie d'une LED est liée aux conditions d'utilisations. Les principaux facteurs qui influent sur sa durée de vie sont :

- la température de jonction ;
- la valeur du courant.

De plus, le vieillissement des LED est erratique, la couleur « dérive avec le temps ».

Des informations complémentaires sur les LED, notamment, sur leur écobilan et les questions technologiques posées dans ce domaine sont disponibles dans les annexes B et K relatives au chapitre 2.

2.2.3.6 Aspects techniques importants pour l'évaluation des risques sanitaires potentiels des LED

Composition :

L'indium est utilisé comme dopant de type « p » dans la fabrication des LED bleues, qui ensuite servent pour la production de la lumière blanche. En effet, l'Indium gallium nitride (InGaN) émet du rayonnement dans le bleu (450 nm) mais aussi dans d'autres longueurs d'onde allant jusqu'à 425 nm en fonction de la stœchiométrie du semi-conducteur. Par ailleurs, l'Aluminium gallium indium phosphide (AlInGaP) émet dans la zone rouge-ambre du spectre. Il est souvent utilisé conjointement avec de l'Aluminium, du Gallium mais aussi d'autres matériaux comme le Phosphore ou l'Azote. Parmi les différents sous-produits utilisés ou issus de la chaîne de production des LED, nous rencontrons le phosphore d'indium (InP) ou d'autres composés de l'Indium.

Alimentation :

Une LED est une diode, électriquement parlant, et à ce titre elle doit être alimentée en courant continu ou avec des impulsions positives de courant (créneaux de courant). Aujourd'hui, les systèmes d'éclairage à LED utilisent un circuit électronique pour assurer leur alimentation. Ce circuit comporte un redresseur courants alternatif / continu suivi d'un filtre qui « lisse » la tension. En fonction de la qualité de filtrage, le signal d'alimentation comporte une composante continue et une « fluctuation ». Le rapport entre la valeur crête-à-crête de la fluctuation sur la valeur de la composante continue est appelé le « taux de fluctuation ». Étant donné que la lumière de la LED est directement proportionnelle à la puissance électrique absorbée, elle présentera une fluctuation (papillotement) dont l'amplitude est directement liée à ce taux de fluctuation.

Lorsque le système à LED est alimenté avec des créneaux de courant, la méthode la plus souvent utilisée par les systèmes bon marché ou par des systèmes qui permettent la gradation de la lumière consiste à moduler la largeur des impulsions de courant (*Pulse Width Modulation* - PWM). Cette technique a pour conséquence d'augmenter la fluctuation de la lumière, ce papillotement pouvant même devenir dominant dans des situations de gradation profonde.

Enfin, depuis quelques années, une nouvelle technologie dite des LED-AC, alimentées directement en courant alternatif, émerge. La fluctuation de lumière, qui dépend de la fréquence d'alimentation (le plus souvent 50 - 60 Hz), est alors très importante, puisque les LED ne présentent qu'une très faible rémanence.

En situation statique, ces fluctuations ne sont perceptibles que si leur fréquence est inférieure à 100 Hz et que leur amplitude dépasse 5 à 10 % de la valeur moyenne du signal. En situation dynamique (mouvement, périodicité spatiale), ce papillotement peut devenir perceptible même à haute fréquence (phénomènes stroboscopiques). Le papillotement ou le phénomène stroboscopique peuvent interférer avec la tâche exécutée par une personne et ainsi la rendre plus difficile ou même induire un danger (travail avec des machines rotatives ou tournantes).

2.2.4 Les spectres émis par différentes sources de lumière

La Figure 16 présente la distribution spectrale de la lumière naturelle dans différentes directions du ciel.

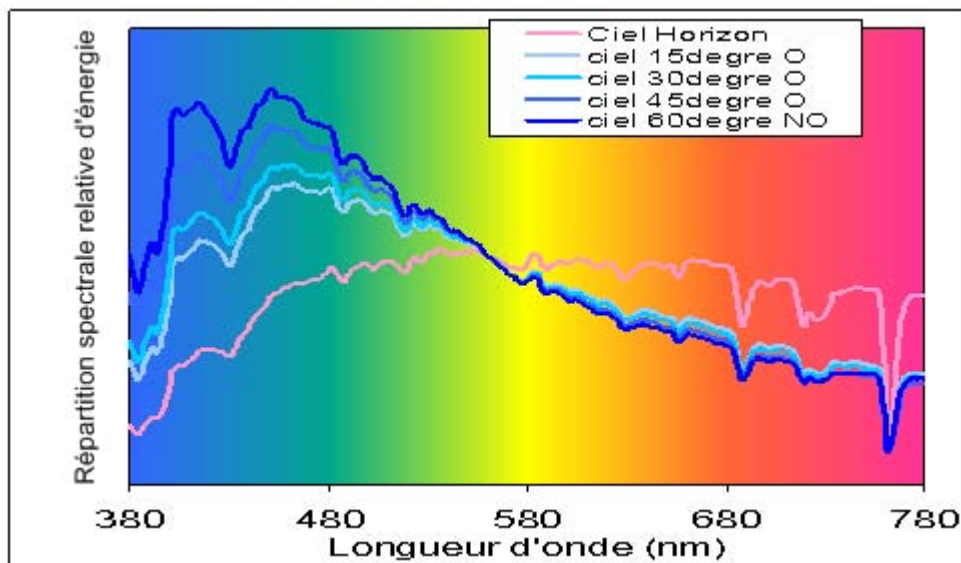
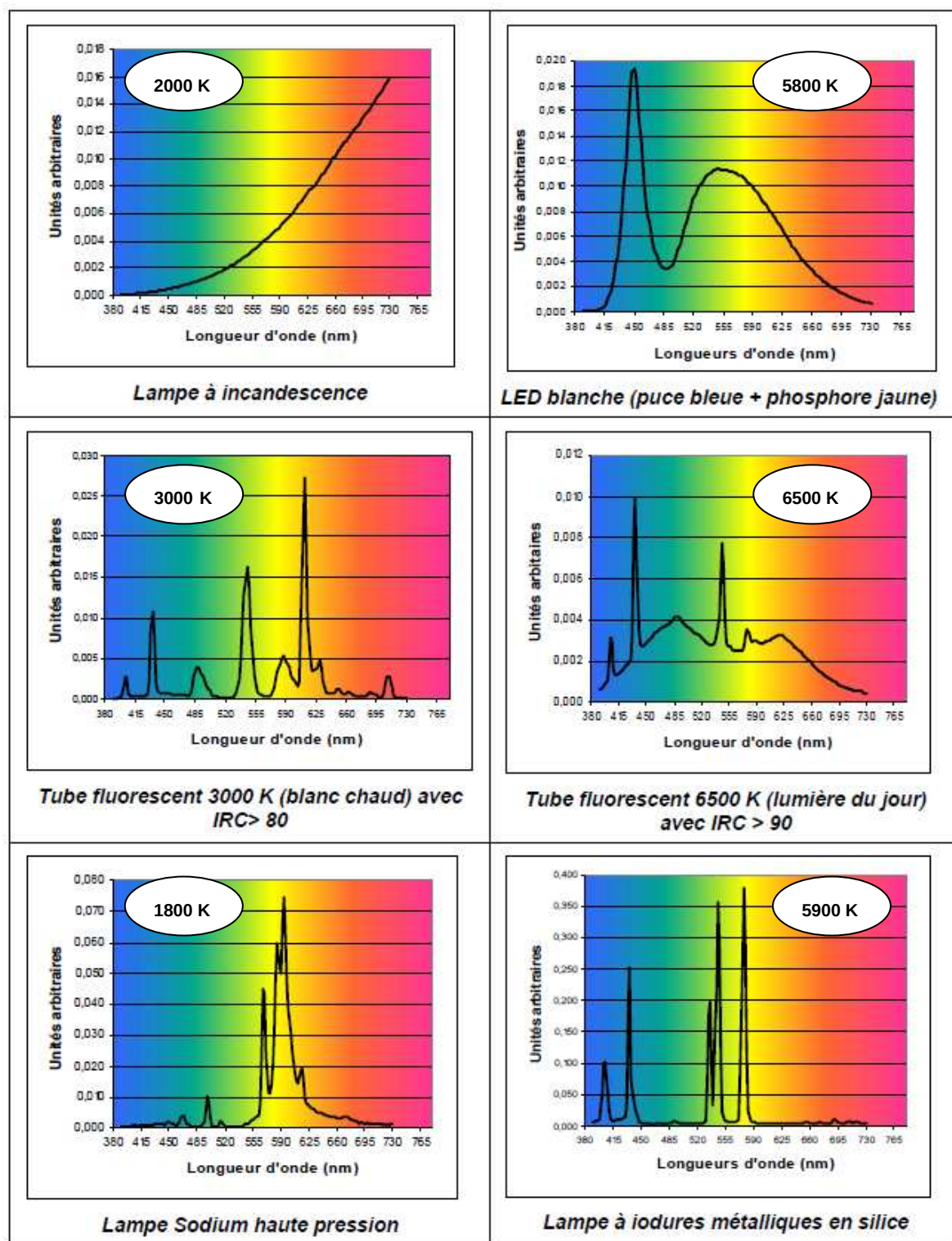


Figure 16 : Distribution spectrale de la lumière naturelle dans différentes directions du ciel

La Figure 17 présente les spectres d'émissions « typiques » émises par les différentes sources de lumière artificielle.



Source : Spectres mesurés par M. Garcia du CSTB

Figure 17 : Spectres des différentes sources de lumière artificielle mesurés au CSTB

Le spectre de LED blanche montre un déséquilibre spectral dans le bleu (pic bleu d'intensité importante), or la lumière bleue est une lumière particulièrement phototoxique pour l'œil. Les autres types d'éclairage peuvent aussi posséder des pics dans leur spectre, mais le bleu n'est pas systématiquement prédominant. Nous verrons par la suite que le spectre des LED n'est pas le seul point remarquable par rapport aux autres éclairages ; en effet, les LED présentent des luminances beaucoup plus fortes du fait de leur caractère ponctuel.

La Figure 18 montre le spectre émis (normalisé) par certains types de semi-conducteurs utilisés pour la fabrication des LED.

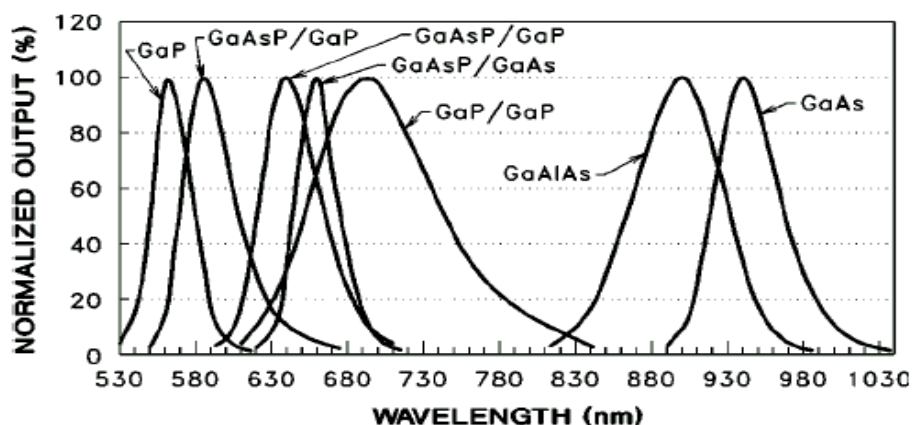


Figure 18 : Spectre d'émission (valeur normalisée) de quelques semi-conducteurs (à 25°C)

2.3 Systèmes d'éclairage et confort visuel des utilisateurs

Les exigences concernant l'ergonomie et le confort visuels en éclairage intérieur sont décrites dans la norme européenne NF EN 12464-1 « Éclairage des lieux de travail – Partie 1 : lieux de travail intérieur. Ainsi, toute installation d'éclairage devrait être conçue de manière à satisfaire les prescriptions données par cette norme selon le type d'activité concernée. Des prescriptions très précises de confort visuel figurent également dans la norme française d'ergonomie visuelle NF X 35-103.

2.3.1 Systèmes d'éclairage et matériels

Les matériels existant chez les fabricants de luminaires peuvent généralement répondre aux exigences d'une installation en termes de positionnement et de montage. On distinguera cinq familles principales de luminaires en éclairage intérieur (voir Figure 19).



Figure 19 : Typologie des luminaires les plus employés

Quelle que soit la solution retenue, l'installation d'éclairage doit en tous les 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 à maintenir sur le plan de travail (niveau exprimé en lux), les besoins quantitatifs et qualitatifs soient satisfaits. Les trois critères de qualité de l'installation d'éclairage 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.

2.3.2 Impact de l'équilibre des luminances

La distribution des luminances dans un espace doit être suffisamment régulière de manière à éviter la présence de zones extrêmement sombres ou brillantes. En effet, lorsqu'il y a de grandes variations de luminance dans le champ visuel (voir l'encadré ci-après pour la définition de « 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.

Les rapports de luminance maximaux recommandés sont les suivants :

Tâche visuelle – Plan utile :	3 : 1
Tâche visuelle – Environnement :	10 : 1

La norme française d'ergonomie visuelle NF X 35-103 recommande que les contrastes entre les sources et le fond sur lequel elles sont vues doivent rester limités. La luminance moyenne du luminaire ne doit pas dépasser 20 fois celle du plafond, pour le plus grand degré de confort recherché et 50 dans le cas d'exigences moindres.

La perception des détails d'une tâche visuelle est toutefois 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.

Définition du champ visuel

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

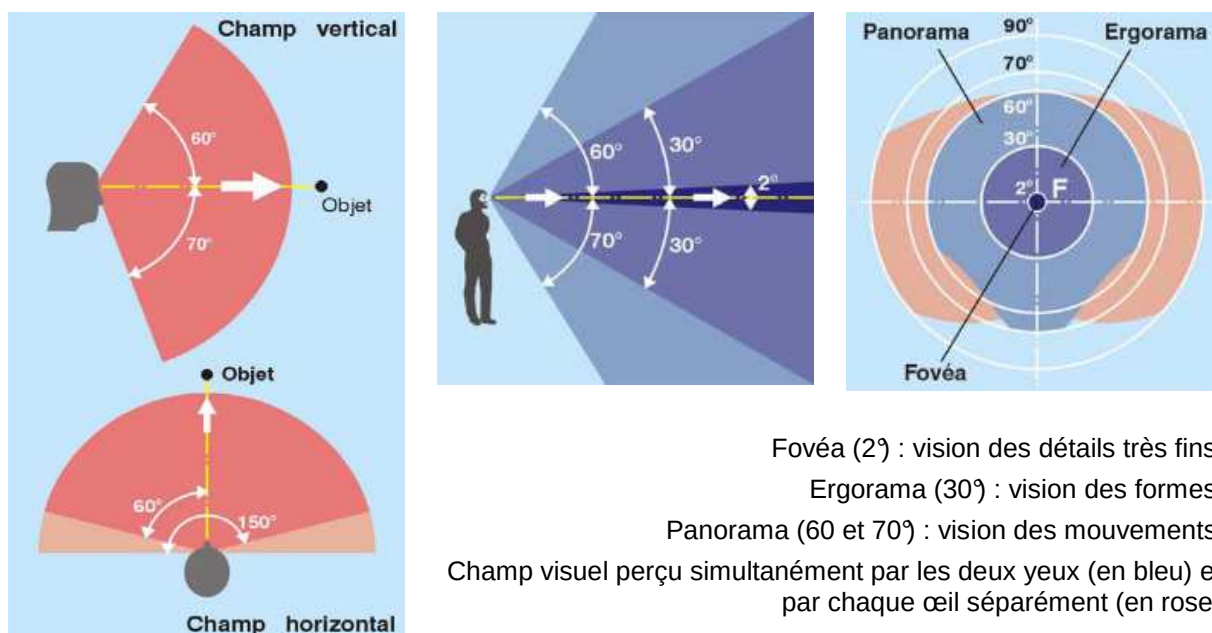


Figure 20 : Champ visuel

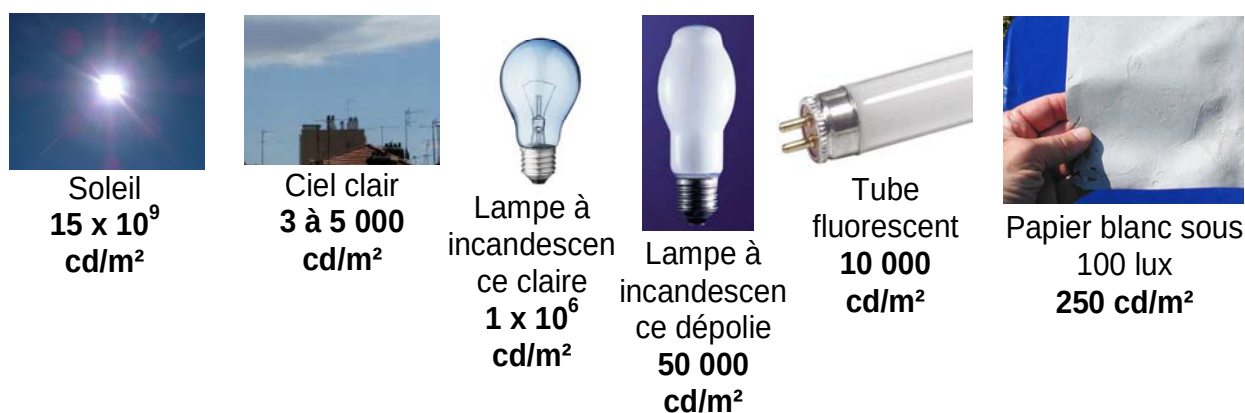


Figure 21 : Valeurs indicatives des luminances de sources lumineuses

2.3.3 Éblouissement

2.3.3.1 Définition de l'éblouissement

Le terme « éblouissement » recouvre des phénomènes très divers ressentis dans la vie courante. S'il fallait en dresser une liste, on pourrait dire que la situation est trop lumineuse, aveuglante, irritante, gênante, perturbatrice, inconfortable, que les contrastes sont trop violents ou que les objets sont recouverts d'un voile. La CIE, suivant les recommandations de Stiles (1929) formulées il y a déjà plus de 80 ans, a établi la distinction entre l'éblouissement d'incapacité qui provoque une dégradation des performances visuelles, et l'éblouissement d'inconfort qui provoque un

désagrément, le premier étant quantifiable, le second étant complexe et mal défini (CIE, 1978, Vocabulaire 845-02-56 et 57).

La Figure 22 présente les zones angulaires définissant les notions d'éblouissement pour différentes positions de la source lumineuse (à 0, 5, 10, 20 et 40 degrés par rapport à l'horizontale). Comme la partie fovéale de l'œil humain est très sensible à des hauts niveaux de luminance, il existe une différence considérable entre les luminances maximales acceptées par l'œil au centre du champ de vision et en périphérie. À 40 degrés, la luminance au-delà de laquelle l'éblouissement d'inconfort se manifeste est de l'ordre de 7 000 cd / m² alors qu'à l'horizontale, cette luminance est de 1 500 cd / m².

Notons que la norme française d'ergonomie visuelle NF X 35-103 stipule que lorsqu'une source présente une surface apparente très réduite dans la zone de travail du champ visuel, sa luminance ne doit pas dépasser 2 000 cd / m².

En éclairage intérieur, on admet généralement que des luminances supérieures à 10 000 cd / m² conduisent toujours à un éblouissement d'inconfort.

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. En effet, 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 de la Figure 21, montrent qu'en pratique aucune source d'éclairage artificiel ne peut être vue directement de manière confortable sans l'utilisation d'un système optique de filtrage ou de défilement.

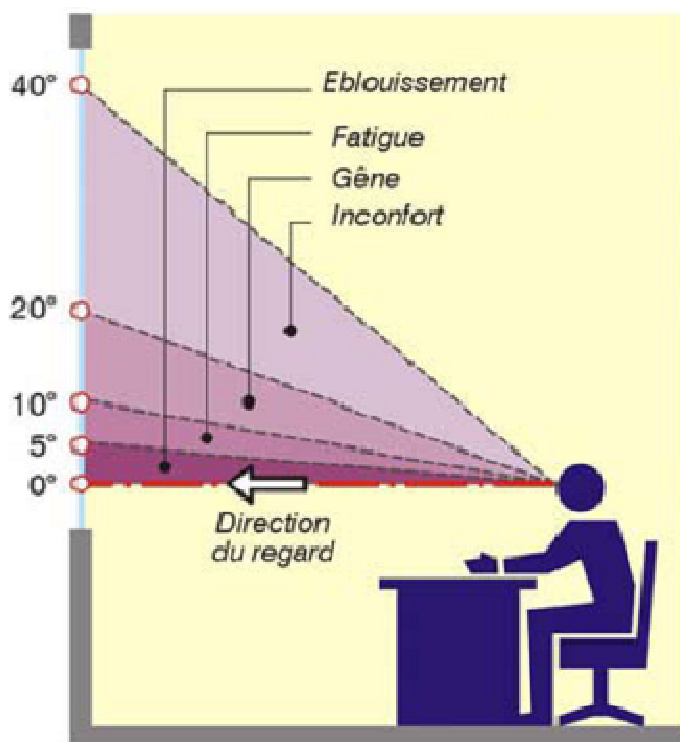


Figure 22 : Zones angulaires définissant les notions d'éblouissement

Le Tableau 6 donne des exemples de luminance pour différentes situations.

Tableau 6 : Ordres de grandeurs de quelques luminances en cd / m^2

seuil de perception de l'œil	0,000001
ciel nocturne	0,0001
pleine Lune, temps clair	2 000
tubes fluorescents	5 000
ciel bleu ⁴⁰	5 000
flammes éclairantes	15 000
papier blanc en plein Soleil, en été à midi	30 000
filament de carbone	700 000
filament de tungstène ordinaire	10 000 000
filament de lampe de projection	20 000 000
cratère positif, arc électrique au charbon	160 000 000
arc au xénon	400 000 000
lampes à vapeur de mercure à haute pression	500 000 000
soleil à travers l'atmosphère	1 600 000 000
lampes-éclair (flashes, pendant quelques μs)	10 000 000 000

Source : http://fr.wikibooks.org/wiki/Photographie/Photom%C3%A9trie/Grandeurs_lumineuses_et_unit%C3%A9s_photom%C3%A9triques

Éblouissement d'incapacité

Cet éblouissement est provoqué par la vision directe d'une source de lumière de forte luminance qui provoque un effet perturbateur. La source éblouissante crée autour d'elle comme un voile qui amoindrit le contraste dans son environnement.

Pour estimer l'éblouissement d'incapacité, on évalue le rapport de la luminance équivalente $L_{\text{équivalente}}$ du voile à l'éclairement dans le plan de l'œil E_{pupille} (Figure 23).

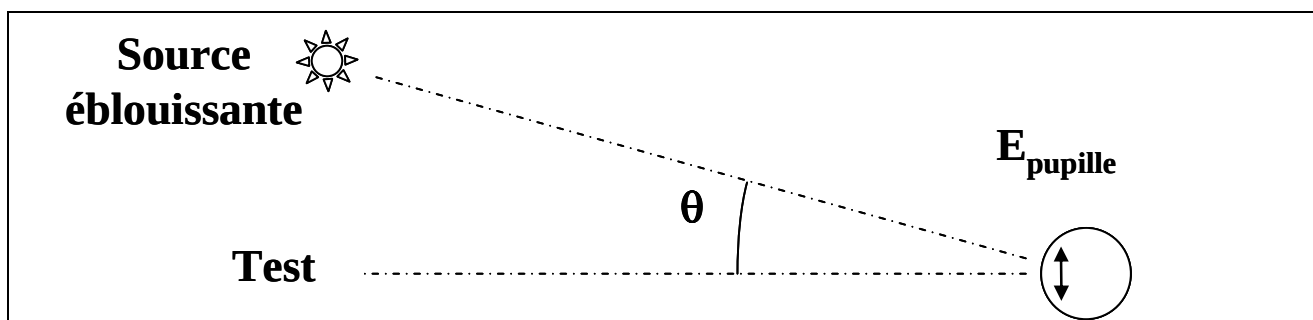


Figure 23 : Géométrie de la situation avec source éblouissante

La luminance équivalente du voile est très élevée au voisinage immédiat de la source, et décroît à mesure que le regard s'en éloigne. Il est admis que la dégradation des performances visuelles due à l'éblouissement a pour origine la diffusion de lumière parasite dans les milieux oculaires : à la

⁴⁰ Référence : http://docinsa.insa-lyon.fr/these/2004/chain/06_chapitre_2.pdf

surface de la cornée, dans le cristallin et dans la rétine. La diffusion de la lumière par le cristallin augmente notablement avec l'âge, d'où l'intérêt d'apporter une correction pour l'âge qui devient effective au-delà de 60 ans.

Il convient de prendre en compte la pigmentation de l'iris de l'observateur, en introduisant un paramètre p valant 0 pour les yeux noirs, 0,5 pour les yeux marrons et 1,2 pour les yeux bleus. J.J.Vos [Vos JJ, 1999] propose une formule, valable pour des valeurs de θ entre $0,1^\circ$ et 100° .

$$\frac{L_{\text{équivalente}}}{E_{\text{pupille}}} = \frac{10}{\theta^3} + \left[\frac{5}{\theta^2} + \frac{0,1p}{\theta} \right] \left[1 + \left(\frac{\text{Age}}{62,5} \right)^4 \right] + 2,5 \cdot 10^{-3} p$$

La luminance de voile permet de calculer les indices TI et GR, très utilisés pour qualifier les situations d'éblouissement en éclairage extérieur.

Éblouissement d'inconfort

Cet éblouissement est provoqué par la vision d'une tache dont le contraste est trop élevé, compte tenu de l'état d'adaptation à la lumière de l'observateur.

L'indice d'éblouissement d'inconfort UGR (*unified glaring rate*) est évalué en utilisant la méthode préconisée par la Commission Internationale de l'Éclairage [CIE 117, 1995] :

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

avec :

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

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

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

p : indice de position de Guth pour chaque luminaire se rapportant à la position du luminaire par rapport à l'axe visuel. Variant entre 1 pour la direction face au sujet et 16 pour l'extérieur du champ visuel, l'indice de position de Guth restreint l'influence de l'éblouissement d'inconfort au champ visuel $[0^\circ, 40^\circ]$.

Il est important de préciser que l'UGR n'est pas adapté pour les sources lumineuses de faibles dimensions angulaires (angle solide inférieur à $0,0003 \text{ sr}$), il n'est donc pas utilisé pour des LED nues.

La Figure 24 montre la superposition d'un exemple de spectre de deux LED blanches avec le spectre de sensibilité à l'éblouissement d'inconfort pour un être humain. La similitude entre les spectres est importante, montrant l'importance sur le plan du confort visuel du problème de l'éblouissement avec des systèmes d'éclairage à LED.

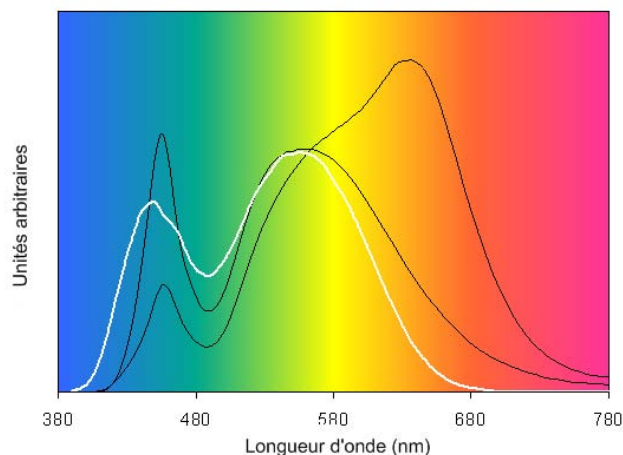


Figure 24 : Spectre de sensibilité de l'œil humain à l'éblouissement d'inconfort (en blanc), superposé à des spectres de LED blanches (en noir) [Bullough, 2009]

2.3.3.2 Exemples de situations éblouissantes

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



Figure 25 : Situations éblouissantes, à gauche le reflet sur l'ordinateur, à droite le contre-jour

2.3.3.3 Solutions pour éviter l'éblouissement

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 devrait 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 26).

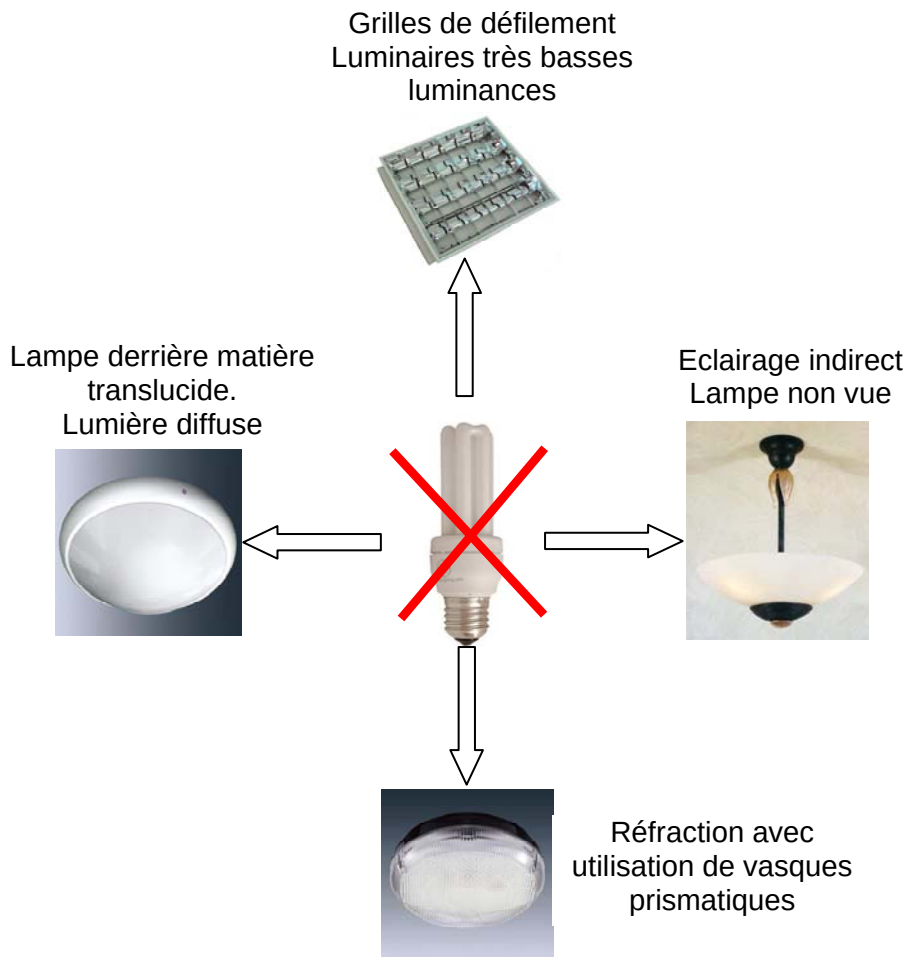


Figure 26 : Éviter l'éblouissement par l'emploi de luminaires adaptés

3 Rayonnements optiques et pathologies

Résumé du chapitre

L'objectif de ce chapitre est de présenter les effets potentiellement toxiques de la lumière sur les tissus biologiques et plus précisément la peau et l'œil. Après une rapide présentation des mécanismes cytotoxiques, le chapitre aborde successivement la peau puis l'œil pour décrire à chaque fois 1) les différents types cellulaires et leur éventuelle sensibilité à la lumière, 2) les différentes lésions ou pathologies produites par la lumière.

Interaction de la lumière avec les systèmes biologiques

L'interaction de la lumière avec des molécules spécifiques contenues dans les tissus biologiques peut conduire à la formation d'espèces réactives de l'oxygène (EROs). Les EROs sont des espèces très réactives parmi lesquelles on trouve des radicaux libres (comme OH^* , O_2^{*-} , RO_2), ainsi que des produits non radicalaires (comme H_2O_2 , RO_2H). Ces espèces, et en particulier les espèces radicalaires, créent des dommages oxydatifs au niveau des macromolécules biologiques (ADN, lipides, protéines), qui peuvent perturber les fonctions cellulaires, induire des lésions génomiques conduisant à la formation de cancers, stimuler un micro-environnement inflammatoire et conduire à la mort cellulaire. Les phénomènes de stress oxydant sont impliqués dans de nombreuses pathologies, en particulier les pathologies neuro-dégénératives, ainsi que dans les processus de vieillissement.

Plus particulièrement, dans la rétine, de nombreuses molécules telles que les photopigments (rhodopsine, opsine), la lipofuscine, *etc.* peuvent être excitées par les photons et entraîner des dommages photochimiques. La phototransduction est par elle-même génératrice d'un stress oxydatif physiologique. Avec l'âge, l'accumulation de débris non digérés de la phototransduction forme des granules hautement photoréactives capables d'augmenter les risques de lésions photochimiques d'autant qu'elles sont stimulées par de la lumière bleue. Avec l'âge, l'accumulation de débris non digérés de la phototransduction forme des granules hautement photoréactifs capables d'augmenter les risques des lésions photochimiques.

L'organisme possède des systèmes antioxydants pour lutter contre les effets néfastes des EROs. Ils mettent en jeu des enzymes comme les superoxyde dismutases, les catalases, la glutathion peroxydase et la glutathion réductase ou de petites molécules telles que les vitamines E, C, A, les pigments caroténoïdes et certains polyphénols. Ces systèmes sont particulièrement importants dans la rétine, siège d'un stress oxydatif physiologique important. Quand les énergies reçues, particulièrement dans le spectre de la lumière bleue, sont trop importantes ou quand les modifications tissulaires secondaires à un état pathologique ou à l'âge augmentent la sensibilité, ou quand les mécanismes de défense sont dépassés, on observe des lésions photochimiques ou photodynamiques qui peuvent être irréversibles et conduire à la mort des neurones visuels et donc altérer la vision.

Œil et rayonnement optique

► Anatomie de l'œil

La cornée est la surface transparente de l'œil ; son spectre d'absorption se restreint aux infrarouges lointains et aux ultraviolets. Pour atteindre la rétine, la lumière traverse la pupille, orifice situé dans l'iris qui donne la coloration de l'œil. Après le passage par ce véritable diaphragme contrôlant le flux lumineux entrant dans l'œil, le faisceau incident est focalisé sur la rétine par le cristallin dont la déformation permet l'accommodation visuelle. Le spectre d'absorption du cristallin se situe dans les ultraviolets proches et les infrarouges lointains ; il change avec l'âge. Chez le jeune (avant 10 ans), le cristallin laisse passer pratiquement toute la lumière bleue (80 %). et particulièrement les ondes comprises entre 430 et 440 nm,

les plus dangereuses pour la rétine. Avec l'âge, le cristallin devient jaune et absorbe des longueurs d'onde plus courtes (le seuil se déplaçant de 360 nm à 400 nm). Ce changement de transmission dépendant de l'âge protège la rétine de la lumière bleue et réduit la vision scotopique de façon importante (environ 33 % à 50 ans par rapport à 5 ans). A 50 ans, la protection contre les UVA, UVB et la lumière bleue a progressé de 80 %.

La rétine, qui tapisse le fond de l'œil, transforme la lumière en information visuelle. Elle comporte deux régions différenciées :

- la papille, d'un diamètre de 1,5 mm où prend naissance le nerf optique, lui-même constitué des fibres nerveuses transférant l'information visuelle au cerveau. C'est de cette papille qu'émerge également l'artère centrale de la rétine et où convergent les veines rétinienues.
- la macula, à 1,5 mm de la papille, qui présente une dépression en son centre et une coloration jaune produite par les pigments maculaires filtrant principalement la lumière bleue. Cette zone comportant des photorécepteurs de type cônes en densité très élevée est responsable de notre grande acuité visuelle centrale. Le pigment maculaire est particulièrement dense chez les enfants, compensant l'absence de filtre cristallinien à la lumière bleue à cet âge.

Dans la rétine, l'absorption de la lumière (350 à 660 nm) est assurée principalement par les photorécepteurs, cônes et bâtonnets. Les bâtonnets sont responsables de la vision nocturne et sont exclus de la zone centrale de la rétine. Les cônes sont répartis en trois types possédant chacun une sensibilité spectrale différente, permettant ainsi la vision des couleurs. Bien que ces derniers soient en densité bien plus élevée en région centrale, ils se répartissent jusqu'à la périphérie de la rétine. L'épithélium pigmentaire rétinien sous la rétine assure le renouvellement du pigment visuel et l'élimination quotidienne d'une partie de la zone photosensible des photorécepteurs. Avec l'âge, cette élimination du segment externe des photorécepteurs conduit à l'accumulation de dépôts photosensibilisateurs à la lumière bleue, la lipofuscine. En dehors des photorécepteurs, les autres neurones ont pour rôle d'extraire l'information visuelle à transmettre au cerveau par les cellules ganglionnaires de la rétine dont les axones forment le nerf optique.

Ces dernières années, il a été montré qu'un sous-groupe de cellules ganglionnaires rétinienues, les cellules ganglionnaires à mélanopsine (1 %), est intrinsèquement sensible à la lumière avec un pic d'absorption vers 480 nm. Ces cellules sont responsables du contrôle des rythmes circadiens ou de la dilatation pupillaire. Par conséquent, ce système va donc non seulement contrôler l'intensité du flux lumineux entrant dans l'œil mais aussi les rythmes veille / sommeil. La mélanopsine activée serait régénérée par l'absorption d'un photon dans des longueurs d'onde plus élevées que pour l'activation (aux alentours de 580 nm).

Les LED blanches dont le spectre spécifique comporte un déséquilibre entre les longueurs d'onde 460 et 480 nm pourraient perturber l'horloge biologique et modifier la réponse pupillaire.

Lumière visible et pathologies oculaires

Différents tissus oculaires peuvent subir des lésions résultant d'une exposition excessive à des rayonnements lumineux. Les tissus cibles dépendent de la longueur d'onde et les lésions de l'intensité énergétique du rayonnement. Chaque tissu présente un seuil de sensibilité qui dépend de ses capacités intrinsèques de résistance au stress photique et de ses défenses anti-oxydantes.

La cornée est sensible aux ultra-violets (180 à 400 nm) et doit être protégée en cas d'exposition contre le risque d'apparition d'une kératite. Les lésions touchent l'épithélium cornéen et sont douloureuses, mais sans conséquence à long terme du fait des capacités de prolifération de l'épithélium qui retrouve son intégrité en quelques jours. De véritables brûlures thermiques de la cornée peuvent apparaître avec des longueurs d'onde de 1 400 nm à 1 mm).

Le cristallin absorbe les UVA et UVB ainsi que les longueurs d'onde courtes. L'exposition de courte durée aux UVA et B induit des lésions mineures et réversibles, tandis que des expositions prolongées peuvent induire des dommages permanents. La lumière bleue peut induire des lésions cristalliniennes par effet photodynamique du fait de l'activation de produits accumulés dans le cristallin et dont l'illumination produit des radicaux libres oxygénés.

La rétine peut également souffrir d'une illumination aux longueurs d'onde entre 400 et 1 400 nm avec une sensibilité accrue pour les longueurs d'onde courtes, les plus énergétiques dans le violet et le bleu (380 à 500 nm). La lumière peut en effet produire des dommages photomécaniques résultant d'une énergie délivrée forte (de l'ordre du mégawatt / cm²) sur une période courte (nano ou picosecondes) et non de la longueur d'onde. Les dommages photothermiques surviennent après exposition à des longueurs d'onde entre 600 et 1 400 nm et des temps d'exposition de la microseconde à quelques secondes. Enfin, les dommages photochimiques résultent quant à eux de l'interaction d'un photon avec les pigments visuels conduisant à la formation d'espèces réactives de l'oxygène ou de radicaux libres oxygénés ou nitrogènes toxiques pour la rétine. Il s'agit de l'effet photodynamique. Les mécanismes réparateurs permettent de protéger la rétine en dessous d'un certain seuil d'éclairement énergétique ; cependant, l'éventualité de lésions résultant d'une exposition très longue sur des mois ou des années à des niveaux d'énergie lumineuse modérée n'a pas été explorée.

L'effet toxique de l'exposition excessive à la lumière est bien caractérisé au cours d'accidents survenus suite à l'observation d'éclipses solaires, à l'exposition prolongée à des microscopes opératoires ou des appareils d'observation de la rétine. Ces risques sont accrus sur des rétines pathologiques.

En ce qui concerne la dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA), l'exposition solaire et / ou à la lumière bleue n'est pas reconnue de façon unanime comme un facteur de risque. Cependant, l'exposition solaire de certaines populations (jeune, peau très claire, faible teneur en anti oxydants) favorise l'apparition de la DMLA et il est donc recommandé de se protéger des expositions prolongées en fort ensoleillement. Aucune étude n'a pu montrer que l'exposition solaire aggrave les formes avancées de la DMLA sauf dans les populations dont les taux d'anti oxydants sont faibles, où elle pourrait favoriser l'apparition des formes exsudatives. Il faut toutefois remarquer que la probabilité d'une exposition solaire forte et prolongée est faible dans des populations âgées déjà atteintes de DMLA.

Les études sur les risques de dommages rétinien induits par l'exposition à la lumière des yeux aphakes (sans cristallin) ou pseudophakes (cristallin artificiel) remontent à plus de 25 ans. Les études les plus récentes ne révèlent pas d'augmentation du risque de développer une DMLA ou d'aggraver une DMLA par une extraction du cristallin. Cependant, des suivis à très long terme sont requis pour évaluer ce risque. Afin de limiter la transmission de la lumière bleue, des implants intraoculaires jaunes sont actuellement préconisés, d'autant plus si le patient présente des signes de maculopathie débutante.

Si les corrélations cliniques entre le niveau d'exposition à la lumière et les pathologies de la rétine sont rendues difficiles par la complexité et la durée des études observationnelles, il faut remarquer que des lésions photochimiques sont induites de façon très reproductibles et calibrées sur des modèles animaux, démontrant que l'exposition à la lumière peut induire des lésions.

Peau et rayonnement optique

Par convention, le rayonnement visible s'étend de 380 à 800 nm et le rayonnement ultraviolet de 100 à 400 nm. La partie bleue du rayonnement visible (410 à 460 nm) véhicule donc une énergie proche du rayonnement ultraviolet et s'avère capable d'induire, comme l'UVA, un stress oxydatif. Par conséquent, la profondeur de pénétration et la nature moléculaire des milieux traversés déterminent la nature, le site et les conséquences de

l'agression.

Le tégument constitue une enveloppe barrière qui protège l'organisme des agressions extérieures. L'épiderme, en constant renouvellement, absorbe 90 % du rayonnement ultraviolet B et laisse pénétrer plus profondément 50 % du rayonnement UVA et la quasi-totalité du rayonnement visible. Le derme sous-jacent, constitué d'un tissu conjonctif et élastique, flexible et résistant, est riche en récepteurs sensoriels, vaisseaux sanguins et lymphatiques. Il absorbe la totalité du rayonnement visible. La lumière a des propriétés de pénétration différentes dans la peau lorsque sa couleur varie. Pour simplifier, plus la longueur d'onde de la lumière est grande, plus la lumière pénètre profondément dans la peau. Les molécules structurantes du derme et certaines molécules exogènes ou endogènes photoréactives absorbent le rayonnement visible.

Lumière visible et pathologies cutanées

Différentes pathologies dermatologiques peuvent survenir à la suite de l'exposition de la peau à la lumière. On a pu identifier 5 classes de pathologies dermatologiques liées aux expositions à la lumière solaire : les érythèmes actiniques (coups de soleil), les lucites, les photosensibilisations médicamenteuses, les génophotodermatoses et les cancers cutanés. En outre, certaines dermatoses sont aggravées par les expositions (lupus érythémateux, herpès facial).

Selon les cas, les longueurs d'ondes qui entrent en jeu sont les UVB et les UVA, mais également la lumière visible.

3.1 Photodynamie – Interaction de la lumière avec les systèmes biologiques

3.1.1 Considérations générales

La lumière, comme toute onde électromagnétique, transporte de l'énergie. En mécanique ondulatoire, ondes et photons sont deux aspects complémentaires, le photon transporte une énergie proportionnelle à la fréquence de l'onde dans une relation $E = h c / \lambda$ où h est une constante égale à $6,626 \times 10^{-34}$ J.s (constante de Planck), E l'énergie exprimée en joules (J) ou en électronvolts (eV) et c la vitesse de la lumière. La longueur d'onde λ et la fréquence ν sont liées entre elles par la relation $\lambda \nu = c$.

Lors de l'interaction de la lumière avec un système biologique, le photon, absorbé par une molécule, cède son énergie à la molécule qui change alors d'état vibrationnel, rotationnel ou de forme. À la suite de cette interaction, un champ électrique apparaît, correspondant au changement d'orbite des électrons de la molécule. Selon les éléments chimiques du milieu rencontré et selon la fréquence du photon, il y aura absorption de cette énergie par le milieu, on définit ainsi un spectre d'absorption du milieu. La molécule initialement au stade énergétique E_0 , est portée à un état excité E_1 , tel que $E_1 - E_0 = h \nu = h c / \lambda$. Après le passage de l'état fondamental stable à un état singulet instable, la molécule excitée tend à retourner à son état fondamental stable 1S_0 par un ensemble de processus mono moléculaires. L'exposant à gauche indique la nature de l'état excité : 1 pour singulet, 3 pour triplet. Le nombre indiqué en indice représente le niveau électronique atteint (0 pour le fondamental, 1 pour le premier état excité, etc.). Cette désactivation est illustrée sur le diagramme de Jablonski et peut se faire de quatre façons :

- par dissociation de la molécule (photochimie directe) ;

- par émission de radiations à partir de l'état 1S_1 : c'est la fluorescence⁴¹ ;
- par processus non radiatif, sous forme de chaleur par échange avec les molécules du solvant ;
- via la formation de l'état triplet 3T_1 par un processus appelé « inter combinaison singulet-triplet ». Dans l'état triplet 3T_1 la molécule se désactive beaucoup plus lentement qu'à partir d'un état singulet. Cela constitue un effet photodynamique : $^3T_1 + ^3(O_2)_0 \rightarrow ^1T_0 + ^1(O_2)_1$. La désactivation à partir de 3T_1 s'opère soit non-radiativement, soit radiativement : c'est la phosphorescence⁴².

3.1.2 Désactivation des états triplets avec des molécules, réaction photodynamique

La désactivation de l'état triplet (3T_1) d'une molécule se produit par collision avec un certain nombre de composés. Ces collisions peuvent engendrer des réactions chimiques ou des réactions de transfert d'énergie comme dans le cas des états singulets.

- La réaction se produit avec l'oxygène dont l'état fondamental est un état triplet : $^3(O_2)_0$.
- Le transfert d'énergie constitue ce que l'on appelle un effet photodynamique de type II : $^3T_1 + ^3(O_2)_0 \rightarrow ^1T_0 + ^1(O_2)_1$. On obtient une molécule d'oxygène singulet dont la réactivité est très grande avec des biomolécules possédant des doubles liaisons telles que les lipides, certains acides aminés (méthionine, méthionine, tryptophane, lysine), la guanine, les vitamines E et C, etc. L'oxygène singulet, communément noté 1O_2 , est la cytotoxine majeure dans les réactions photodynamiques induites par les porphyrines. Ce processus est utilisé par la photothérapie photodynamique.
- L'interaction d'une molécule à l'état triplet (3T_1) lors de la collision avec une autre molécule appelée substrat, bon donneur d'électrons ou d'atomes d'hydrogène mais n'absorbant pas les photons ayant donné naissance à 3T_1 peut aussi produire des réactions photodynamiques de type I. Le substrat est semi-oxydé et forme un radical qui peut évoluer par réaction avec l'oxygène vers un produit d'oxydation : c'est le cas de la cystéine, du tryptophane et des vitamines C et E. On dit que la molécule est un photosensibilisateur puisqu'elle est capable de provoquer la destruction d'une substance qui n'absorbe pas la lumière responsable de sa disparition. Par exemple, les porphyrines responsables des porphyries cutanées, les flavines, certains médicaments comme les antibiotiques dérivés des quinolones, des tétracyclines ou de certains neuroleptiques sont des photosensibilisateurs.

3.1.3 Les espèces oxygénées réactives et leur formation

L'absorption des photons par un chromophore⁴³ génère la formation d'états électroniquement excités, engendrant des processus photophysiques. Les réactions de transfert de charge (type I) ou de transfert d'énergie (type II) peuvent conduire à l'activation de l'oxygène. Dans le mécanisme

⁴¹ Définition « vocabulaire international de l'éclairage » : fluorescence : photoluminescence dans laquelle le rayonnement optique émis résulte des transitions directes du niveau énergétique photoexcité à un niveau inférieur, ces transitions se produisant généralement dans les 10 ns qui suivent l'excitation.

⁴² Définition « vocabulaire international de l'éclairage » : phosphorescence : photoluminescence retardée par l'accumulation d'énergie dans un niveau énergétique intermédiaire. Notes 1 – Pour les substances organiques, le terme phosphorescence s'applique généralement aux transitions triplet-singulet.

⁴³ Un chromophore est un groupement d'atomes au sein d'une molécule qui est responsable de sa couleur. Cette propriété optique résulte d'une capacité à absorber l'énergie de photons dans une gamme du spectre visible tandis que les autres longueurs d'onde sont transmises ou diffusées.

de type I, le photosensibilisateur à l'état excité triplet (P^*) peut réagir avec un substrat (RH) donneur d'hydrogène. Ce transfert conduit aux espèces radicalaires PH^* et R^* ($P^* + RH \Rightarrow PH^* + R^*$). Le radical R^* réagit alors avec l'oxygène moléculaire pour former des produits d'oxydation ($R^* + O_2 \Rightarrow RH$ oxydé). Des radicaux intermédiaires RO_2^* peuvent être formés. Le radical PH^* ou P^* forme l'anion radical superoxyde O_2^{*-} ($P^* + O_2 \Rightarrow P + O_2^{*-}$).

La molécule d'oxygène singulet est très réactive notamment avec des biomolécules possédant des doubles liaisons : lipides, acides aminés, guanine, vitamines E et C etc. L'oxygène singulet est un agent cytotoxique majeur.

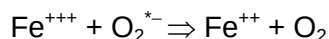
3.1.4 Absorption des rayonnements UV et visibles

Le domaine spectral des rayonnements ultraviolets est composé des UVA (320 à 400 nm), des UVB (280 à 320 nm) et des UVC (100 à 280 nm). L'absorption du rayonnement UVB par l'ADN induit des dommages directs : modifications des bases, induits covalents (formation de liaisons chimiques anormales), ruptures de chaînes (les brins d'ADN s'écartent). Le rayonnement UVA et la lumière visible ne sont pas absorbés par l'ADN mais par des chromophores exogènes ou endogènes qui peuvent, dans une forme excitée, dégrader le génome. Dans la peau, les chromophores sont présents et absorbent le rayonnement UV et visible et plus particulièrement la partie bleue du spectre : hémoglobine (360 - 450 nm), bilirubine (300 - 550 nm), flavine (225 - 510 nm), caroténoïdes (300 - 500 nm), mélanine (250 - 700 nm).

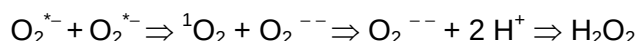
3.1.5 Espèces radicalaires

Les molécules photosensibilisantes endogènes ou chromophores, après absorption de l'énergie fournie par le rayonnement UV ou visible, se trouvent dans un état excité (triplet) et participent alors au transfert de charge (réaction type I) ou au transfert d'énergie (réaction type II) conduisant à l'activation de l'oxygène (espèces réactives de l'oxygène ou EROs). Dans les réactions de type I, l'anion superoxyde est formé. Il est peu réactif biologiquement mais permet l'oxydation en formant d'autres espèces très réactives par différentes voies :

- par abstraction d'hydrogène et formation du très réactif hydroperoxyde HO_2^{*-} : $H_2O + O_2^{*-} \Rightarrow OH^- + HO_2^{*-}$;
- en prenant un 2^e électron, conduisant à O_2^{--} et ensuite au peroxyde d'hydrogène H_2O_2 : $2 O_2^{*-} + 2 H^+ \Rightarrow H_2O_2 + O_2$;
- H_2O_2 peut réagir avec le fer ferreux Fe^{++} conduisant alors à la réaction de Fenton. H_2O_2 se décompose en OH^- (ion hydroxyde) et OH^* (radical hydroxyl). OH^* est une espèce oxygénée extrêmement réactive capable d'attaquer les structures organiques les plus stables. La réaction de Fenton est entretenue par l'anion O_2^{*-}



- l'ensemble de ces réactions, de la dismutation de O_2^{*-} (qui peut être spontanée ou enzymatiquement accélérée par la superoxyde-dismutase) à la régénération de Fe^{++} , constitue le cycle d'Haber-Weiss ;
- il est à noter que l'oxygène singulet 1O_2 peut se former également à partir de l'anion superoxyde



L'oxygène exerce son action toxique en empêchant la recombinaison des radicaux. En effet, les radicaux libres apparus après rupture de liaisons covalentes se recombinaient aisément tandis que les peroxydes formés avec l'oxygène, sont, à l'inverse, à l'origine de cascades de réactions radicalaires.

Les EROs ont trois cibles biologiques :

- la première cible est constituée par les membranes cellulaires (nucléaires, mitochondriales ou lisosomiales) dont les acides gras polyinsaturés sont des constituants fondamentaux. Ceux-ci favorisent l'apparition de radicaux libres par la présence de leur double liaison qui peut se rompre sous l'action de $^1\text{O}_2$ et $\text{OH}^\bullet$ surtout : c'est la lipoperoxydation. Le déclenchement de la réaction en chaîne se fait au niveau de la structure divinyl-méthane et se propage par l'apparition de radicaux peroxy ($\text{ROO}^\bullet$) et alkoxy ($\text{RO}^\bullet$). Les lipides peroxydés sont des molécules instables qui se décomposent spontanément en dérivés aldéhydiques. Parmi ceux-ci, le dialdéhyde malonique forme des liaisons stables avec les groupes amines des protéines telles que les bases azotées des acides nucléiques et le groupe SH des composés sulfhydrique. Le dialdéhyde malonique sert de marqueur de la peroxydation lipidique (réaction avec l'acide thiobarbiturique) et s'avère mutagène ;
- la deuxième cible des EROs est formée par les protéines et les enzymes en modifiant leur structure et leur activité fonctionnelle ;
- la troisième cible est constituée par les acides nucléiques où les EROs entraînent des cassures de chaînes, des pontages nucléobases ou l'oxydation des bases. Les lésions ainsi créées au niveau du matériel génétique, si elles ne sont pas excisées et réparées, entraînent l'activation de certains oncogènes ou des mutations. Quand ces mutations intéressent le système de contrôle de la multiplication cellulaire, le processus de cancérogenèse est enclenché. Ces modifications génétiques entraînent également la perturbation de la synthèse des protéines.

3.1.6 Défenses contre le stress oxydant

La défense antioxydante est assurée par trois types de systèmes de protection :

- les molécules non enzymatiques

Les composés thiols et plus particulièrement le glutathion ont un rôle central dans la défense antioxydante endogène et dans la régulation du potentiel redox de la cellule. Ils piègent les EROs et sont les co-facteurs enzymatiques de la glutathion-peroxydase.

Les vitamines jouent également un rôle clé. La vitamine E désactive l'oxygène singulet et intercepte le radical hydroxyl. Elle est également « donneuse » d'hydrogène et permet d'interrompre la propagation radicalaire dans les membranes. La vitamine C réagit avec l'anion superoxyde et assure la régénération de la vitamine E. Les caroténoïdes désactivent l'oxygène singulet ;

- Le piégeage des ions métalliques ;
- la protection par les enzymes :

Les superoxyde-dismutases (SOD) éliminent l'anion radical superoxyde et contribuent par conséquent à empêcher l'activation des ions métalliques (réaction de Fenton). Ces enzymes catalysent la dismutation de l'anion superoxyde en peroxyde d'hydrogène. Ces enzymes fonctionnent grâce aux oligo-éléments Zn^{++} et Mn^{++} .

La catalase : le rôle catalytique est assuré par l'ion Cu^{++} . La réaction aboutit à la production d'eau et d'oxygène. La désactivation de l'eau oxygénée est assurée en première intention par des catalases mais celles-ci disparaissent rapidement, laissant le rôle majeur aux glutathion-peroxydases.

Les glutathion-peroxydases désactivent l'eau oxygénée en utilisant le glutathion comme donneur d'hydrogène. Cet enzyme fonctionne grâce à un atome de sélénium.

Tous ces enzymes fonctionnent grâce à la présence d'oligo-éléments liés à la protéine. La capacité de défense de ces systèmes n'est cependant pas illimitée. Elle se trouve rapidement dépassée par une surproduction des EROs telle que celle déclenchée par une exposition excessive au rayonnement UV. La capacité de défense suffit à contrôler les EROs produites par la respiration cellulaire et par quelques heures d'exposition au rayonnement visible.

3.1.7 Mise en évidence de la formation de radicaux libres dans la peau humaine

En raison de l'augmentation pratiquement épidémique des cancers cutanés dans les dernières décennies, les recherches sur l'interaction de la lumière solaire avec la peau se sont intensifiées. Les réactions de la peau à l'agression solaire sont aujourd'hui bien connues et sont représentées essentiellement par l'érythème, la pigmentation et l'immunosuppression. Les réactions spécifiques de la peau au rayonnement UVB, responsable de l'érythème, ont conduit à une surestimation de leur importance biologique. La portion visible du spectre solaire a reçu moins d'attention, notamment dans sa contribution au vieillissement accéléré de la peau ou aux cancers de la peau, en dépit de son utilisation en thérapeutique. Expérimentalement, la plupart des effets de la lumière (280 - 1 600 nm) sur la peau ont été obtenus en utilisant la portion ultraviolette du spectre. Jusqu'à récemment, la portion visible (400 - 700 nm) a été considérée comme quantitativement négligeable d'un point de vue photobiologique. Néanmoins, les développements récents en thérapeutique photodynamique et par les lasers ont justifié des recherches plus précises sur les effets de la portion visible. Parmi les travaux les plus récents, ceux de deux équipes ont pu nettement mettre en évidence une production radicalaire dans la peau humaine après irradiation par le rayonnement visible. C'est ainsi qu'il a été montré :

- que la lumière visible peut induire des dommages indirects à l'ADN par génération d'espèces réactives de l'oxygène. L'oxydation de la guanine a été obtenue par un rayonnement à 434 nm ;
- qu'un grand nombre de photodermatoses présente un spectre d'action dans le domaine du visible. Leur déclenchement n'est pas prévenu par l'usage de produits antisolaires actuellement commercialisés [Bassel *et al.*, 2008 ; SCENIHR, 2008] ;
- que la production radicalaire peut être objectivée en spectroscopie (bande ESR-X) utilisée pour détecter et quantifier directement les radicaux produits en excès sur un modèle de peau *ex vivo*. Le signal ESR détecte l'accumulation des espèces activées de l'oxygène (radicaux hydroxyl et anion superoxyde) après exposition à un simulateur solaire équipé de filtres *cut-off* [Zastrow *et al.*, 2009]. Un spectre d'action dépendant de la longueur d'onde, pour la production de radicaux libres, a été obtenu (Figure 27). Les traits horizontaux représentent la largeur de la bande spectrale des paires de filtres *cut-off*. Les traits verticaux représentent l'erreur standard associée aux mesures de radicaux.

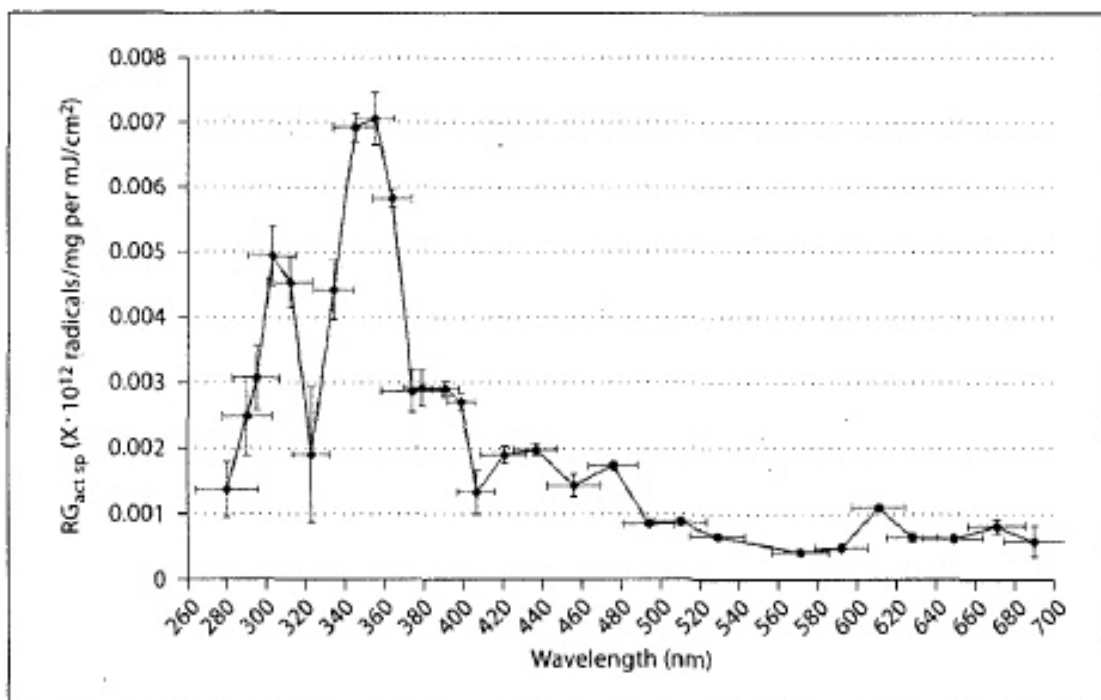


Figure 27 : Spectre d'action de la production de radicaux libres ($\times 10^{12}$ radicaux / mg par mJ / cm² et par nm).

À 350 nm, $7,0 \cdot 10^9$ radicaux / mg par mJ / cm² ont été détectés sur les tissus entiers excisés (*ex vivo*). Cette valeur tombe à $3,0 \cdot 10^9$ radicaux / mg par mJ / cm² pour 380 nm, elle est de $2,0 \cdot 10^9$ radicaux / mg par mJ / cm² à 430 nm et chute définitivement à $1,0 \cdot 10^9$ radicaux / mg par mJ / cm² à partir de 500 nm. On sait que le spectre d'efficacité érythémale chute d'un facteur 1 000 entre 300 et 340 nm. La production radicalaire à 355 nm s'avère 3 fois supérieure à celle produite par la longueur d'onde 323 nm. À partir de la quantité de radicaux libres produits à 355 nm, $1/5^e$ est encore observé à 407 nm. Par conséquent, la production radicalaire dans la peau humaine est d'égale importance, qu'elle soit générée par les UVA dans la gamme des 320 - 340 nm ou par la portion visible 380 - 440 nm (Figure 28).

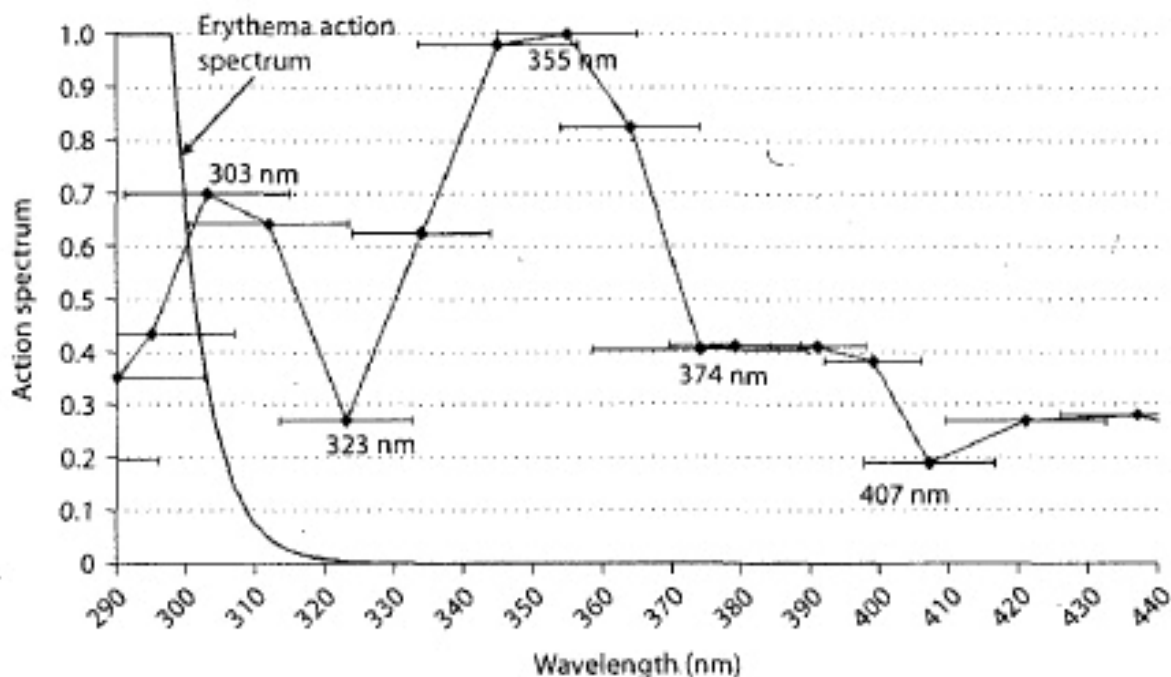


Figure 28 : Spectre d'action de la production de radicaux libres dans les régions UV et visible proche, normalisé à 355 nm comparé au spectre d'action de la production de l'érythème cutané

L'absorption directe spécifique du rayonnement UV par les acides nucléiques est responsable de l'efficacité carcinogène supérieure du rayonnement UVB dans la cancérogénicité du rayonnement solaire.

Afin de mimer une situation de lumière du jour, les expérimentateurs ont utilisé une source spot émettant à haute intensité (*Eurolight Spot 575 W*) entre 400 et 700 nm (Figure 29). L'éclairement lumineux est exprimé en lux et a été évalué par un radiomètre dans une biopsie cutanée pour une exposition de 1 600 secondes.

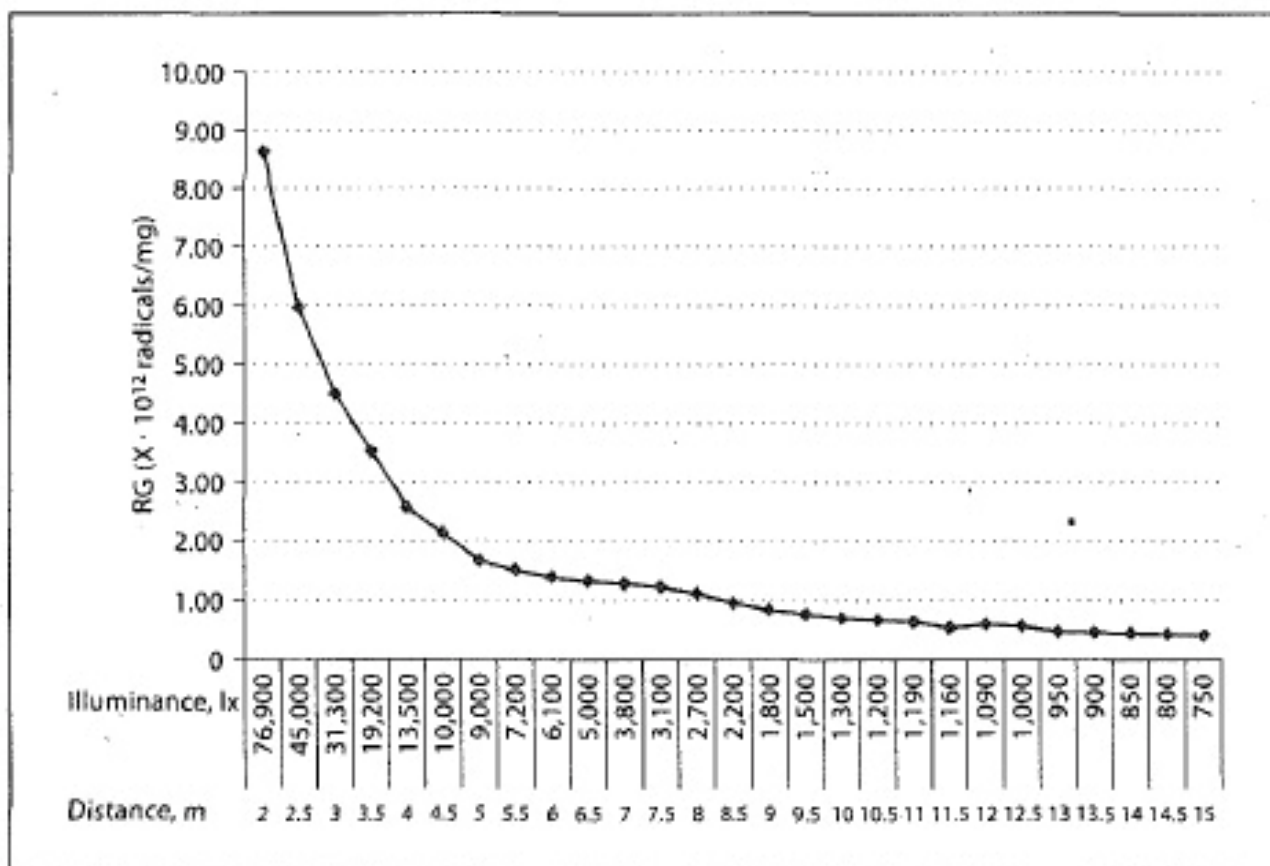


Figure 29 : Relation entre la distance (m) d'une source commerciale spot HMI 575 W et la production radicalaire

La distance minimum de la source à la biopsie cutanée est de 2 mètres et la durée d'exposition de 1 600 secondes (26,7 minutes). Une bonne corrélation a été trouvée entre la quantité de radicaux produite et la distance de la source de rayonnement visible.

Exprimé en lux, l'éclairement lumineux a permis de quantifier et de comparer l'intensité des sources visibles. Des niveaux faibles de lumière visible créent des quantités mesurables de radicaux libres (cf. Figure 30).

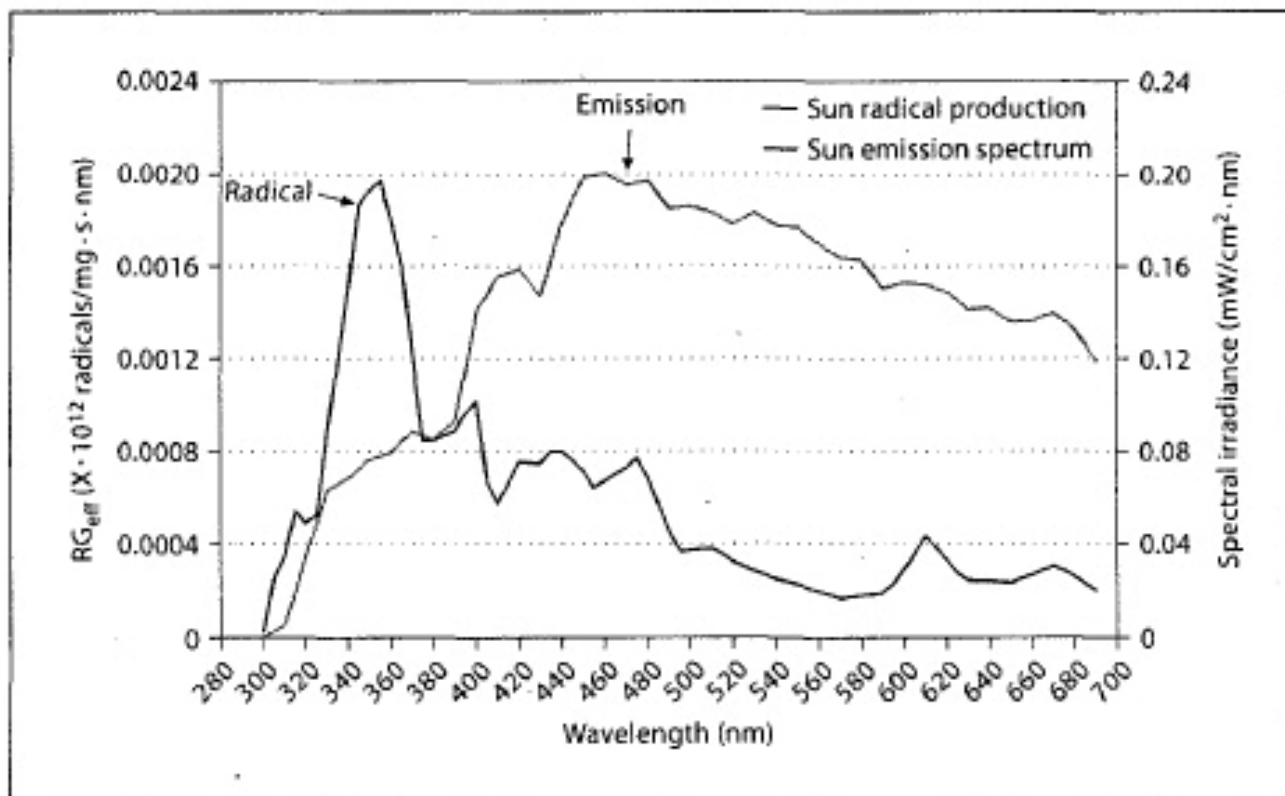


Figure 30 : Production radicalaire et spectre d'émission solaire (éclairage énergétique spectrique) en fonction des longueurs d'onde comprises entre 300 et 700 nm

On peut représenter le spectre d'émission du soleil [CIE, 1985] et le spectre de production de radicaux libres dans le tégument humain. Avec des valeurs comprises entre 10 000 et 20 000 lx, typiques d'un jour clair (sans rayonnement solaire direct), 2 à $3 \cdot 10^{12}$ radicaux libres sont générés en une heure et demie, ce qui est juste inférieur à la quantité de radicaux libres produits par la combinaison UVB + UVA nécessaire à induire un coup de soleil. Par conséquent, la production radicalaire est plus importante dans le domaine du rayonnement visible que dans le domaine UV terrestre.

Un éclairage lumineux de 60 000 lx est équivalent à 4 doses « coup de soleil ». Sachant que, par temps clair, ensoleillé, à 50° de latitude comme dans un site opératoire habituel (sous le scialytique), on peut atteindre la valeur de 100 000 lx, des dommages importants sont prévisibles lors d'un éclairage intense tel que celui généré par certaines LED. Ravanat *et al.* [Ravanat *et al.*, 2000] ont calculé que $5,4 \cdot 10^6$ molécules de $^1\text{O}_2$ étaient nécessaires à la formation d'une molécule de 8-oxo-dGuo (oxoguanine), lésion de l'ADN produite par oxydation. Les radicaux générés par 100 000 lx seraient de l'ordre de 10^{12} par milligramme, générant de nombreuses lésions oxoguanine.

3.2 Anatomie – spécificités de l'œil

L'œil est souvent comparé à un appareil photo ou, plus précisément, à une caméra. Cette comparaison serait correcte si l'on associait la caméra à un système de traitement d'images. La rétine réalise en effet un véritable traitement d'images pour augmenter les contrastes ou détecter des objets en mouvement latéraux, verticaux ou frontaux. Cependant, comme dans un appareil photo ou une caméra, on retrouve 1) un objectif et une lentille, la cornée et le cristallin, 2) un diaphragme, la pupille et 3) une matrice de capteurs ou film photosensible, la rétine. Dans le cadre de cette étude de l'influence des LED sur le système visuel, nous nous intéresserons plus particulièrement à ces différents éléments d'un point de vue de leur transmission/absorption de la lumière ou de leur contrôle par la lumière, notamment pour la pupille (voir section 3.2.4). La

transmission de la lumière par le cristallin en fonction de l'âge sera aussi discutée. Ce chapitre va plus spécifiquement être concentré sur la sensibilité à la lumière des photorécepteurs et le traitement de l'information visuelle par la rétine.

3.2.1 Rappels sur l'anatomie de l'œil humain

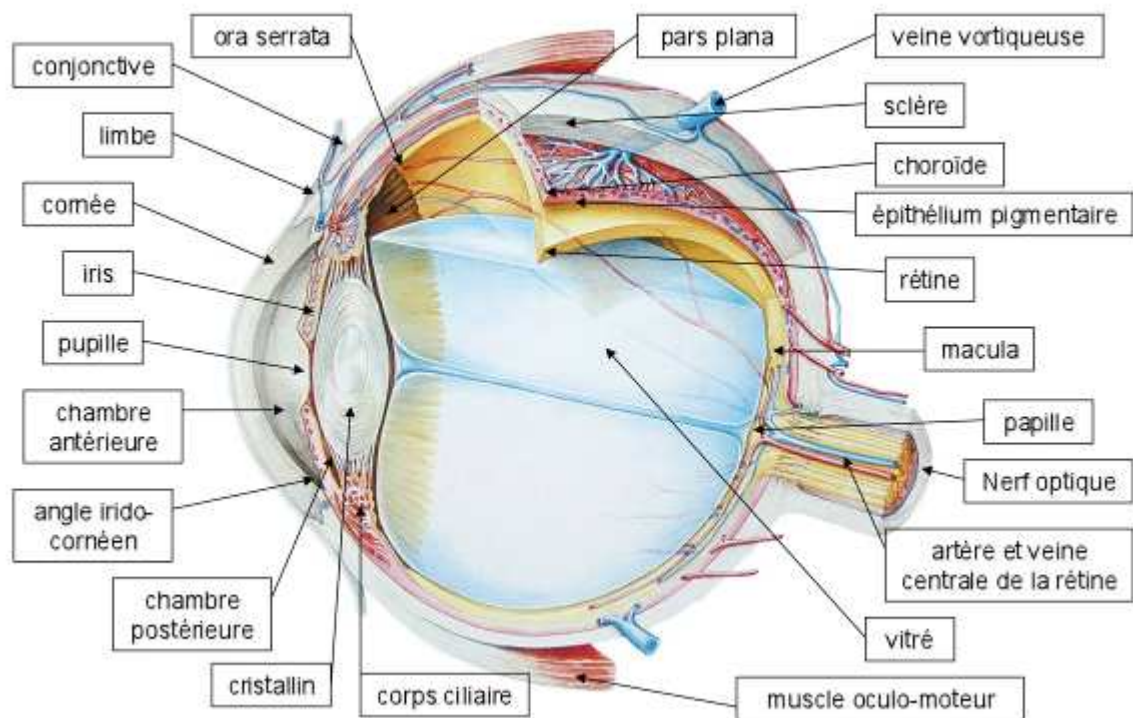


Figure 31 : Anatomie de l'œil humain

La paroi du globe oculaire est formée de trois tuniques (cf. Figure 31) avec, de l'extérieur vers l'intérieur : 1) la tunique fibreuse externe qui se compose de la sclère, ou sclérotique, en périphérie et de la cornée en avant, 2) la tunique uvéale ou uvée qui se compose de l'iris en avant et du corps ciliaire et de la choroïde en arrière et 3) la tunique nerveuse interne formée par la rétine qui reçoit les rayons lumineux. Ces tuniques enferment trois milieux transparents différents localisés au centre de l'œil, qui garantissent l'acheminement des rayons lumineux jusqu'à la rétine : 1) l'humeur aqueuse, un liquide transparent qui remplit l'espace entre la cornée et le cristallin, 2) le cristallin qui joue le rôle de lentille centrale et 3) le vitré, corps vitré ou humeur vitrée (60 % du volume oculaire) qui est une masse gélatineuse et transparente maintenant la rétine sur les parois de l'œil et contenant 99 % d'eau.

3.2.1.1 La cornée

La cornée est un tissu résistant transparent qui constitue la partie antérieure et axiale de la paroi du globe oculaire. Elle couvre la pupille et l'iris. Son diamètre moyen horizontal est de 12 mm et son diamètre vertical de 11,5 mm, lui conférant une forme d'hémisphère elliptique. Elle contribue à la focalisation de l'image sur le plan rétinien grâce à son épaisseur et à sa courbure et permet de focaliser l'image de façon homogène en tout point sur une rétine dont la surface est hémisphérique et distante de la cornée d'environ 24 mm.

La cornée possède un indice de réfraction de 1,377 et un spectre d'absorption situé dans les infrarouges lointains (> 800 nm - > 2 400 nm) et les ultraviolets (< 300 nm – 400 nm) (Figure 32).

Des détails concernant la cornée sont donnés dans l'annexe A du chapitre 3.

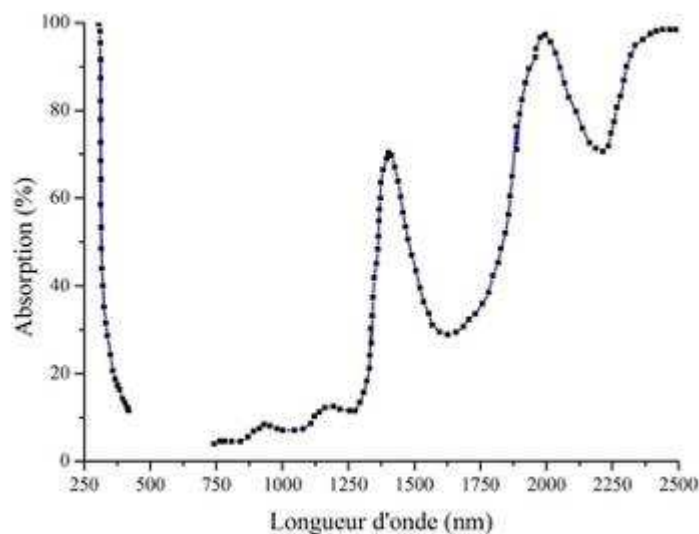


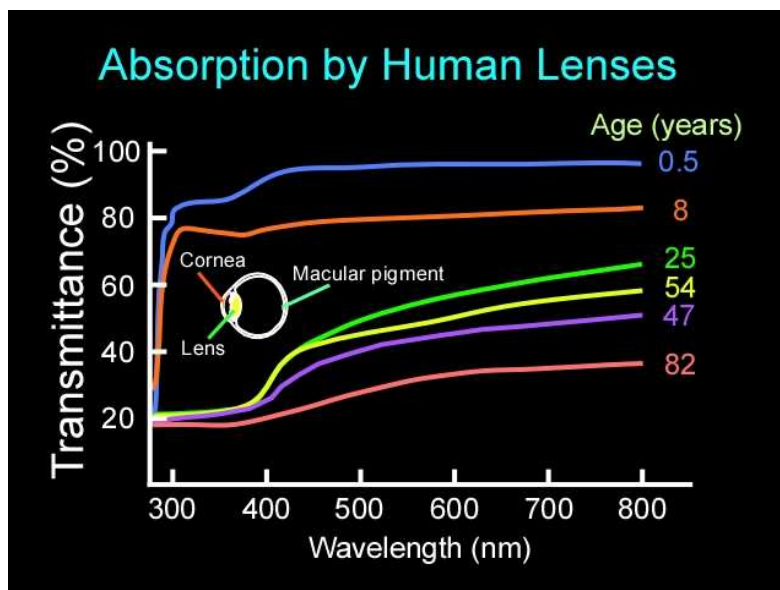
Figure 32 : Facteur d'absorption de la lumière par la cornée

3.2.1.2 L'iris

L'iris pigmenté donne sa couleur à l'œil, il ménage en son centre un trou appelé pupille. Il se situe dans l'humeur aqueuse qui remplit l'espace entre la cornée et le cristallin. L'iris est innervé par des fibres du système nerveux qui activent les muscles dilatateurs et sphincters responsables de la dilatation et de la constriction pupillaire. Ces mécanismes réflexes règlent la quantité de lumière pénétrant dans l'œil. Leur contrôle sera présenté dans le paragraphe 3.2.4. L'ouverture de l'iris dépend aussi de la longueur d'onde du rayonnement. Ainsi, pour un rayonnement UV, le diamètre de la pupille est de l'ordre de 1 mm, pour un rayonnement visible et proche infrarouge, le diamètre de celle-ci est de 7 mm. Pour des longueurs d'onde plus grandes, l'ouverture de la pupille peut atteindre 11 mm.

3.2.1.3 Le cristallin

Le cristallin joue le rôle d'une lentille ronde transparente biconvexe. Il permet par son pouvoir d'accommodation de focaliser les rayons lumineux provenant de l'objet observé sur la rétine. De forme biconvexe, flexible et transparente, il est situé à l'intérieur du globe oculaire juste en arrière de l'iris.



Le spectre d'absorption du cristallin se situe dans les ultraviolets proches et infrarouges lointains. L'absorption dans la partie visible du spectre est négligeable

Le spectre d'absorption du cristallin change avec l'âge. Chez le jeune, le pic d'absorption du cristallin est à 365 nm et pratiquement toute la lumière bleue est transmise à la rétine (voir Figure 33). À 60 ans, le pic d'absorption se déplace à 400 nm et seuls 20 % de la lumière bleue transmise par un cristallin d'enfant atteint la rétine. La Figure 33 montre la transmission du cristallin en fonction de l'âge.

Plus de détails concernant le cristallin sont donnés dans l'annexe B du chapitre 3.

3.2.1.4 La rétine

La rétine mature de mammifère est composée de deux tissus : la rétine neurale (RN) et l'épithélium pigmentaire rétinien (EPR).

Au niveau macroscopique, deux régions se distinguent plus particulièrement sur la rétine visualisée au fond d'œil : la papille optique et la région maculaire. La papille optique correspond à la tête du nerf optique visible sous forme d'un disque d'où émergent également les artères et veines rétiniennes. Le diamètre de la papille est variable, en moyenne de 1,9 mm (1 à 3 mm) dans son axe vertical, et 1,7 (0,9 à 2,6 mm) dans son axe horizontal, de sorte qu'elle peut être légèrement allongée verticalement.

La région maculaire qui nous procure notre grande acuité visuelle du fait de la haute densité de photorécepteurs de type cône, présente une zone avasculaire en son centre. Dans cette région maculaire, la rétine humaine est la plus épaisse, mesurant jusqu'à 400 - 500 μm alors que son épaisseur se restreint à 100 μm en grande périphérie pour une valeur moyenne de 180- 240 μm . L'épaisseur de la rétine se réduit aussi à 130 μm au centre de la macula au niveau de la fovéa. Cet amincissement correspond à une zone où la rétine est uniquement constituée de photorécepteurs de type cônes. La macula, qui mesure 5,5 mm de diamètre, se caractérise par la présence d'un pigment jaunâtre, plus visible chez le sujet jeune.

En dehors de la zone maculaire, les longueurs d'ondes transmises ou absorbées au niveau de la rétine sont dans le spectre d'ondes visibles et infrarouges. L'absorption est maximale entre 400 et

600 nm. Les rayonnements visibles et infrarouges (IRA)⁴⁴ sont susceptibles de provoquer le maximum de dommages sur la rétine.

Des détails complémentaires concernant la rétine se trouvent dans l'annexe C du chapitre 3.

3.2.2 Les photorécepteurs

La rétine tapisse le fond de l'œil et c'est dans ce tissu neuronal que la lumière est transformée en activité neuronale. La lumière doit traverser l'ensemble du tissu neuronal avant d'atteindre les photorécepteurs et leur segment externe où se trouvent les pigments visuels. C'est seulement dans la partie très centrale de la macula, la fovea, qui nous assure notre très grande acuité visuelle, que la structure du tissu permet de projeter directement la lumière sur les photorécepteurs (cf. annexe D du chapitre 3).

3.2.2.1 Les bâtonnets (120 millions dans la rétine humaine adulte)

Ces photorécepteurs sont responsables de la vision nocturne. Ils sont exclus de la zone très centrale de la rétine et demeurent par contre à très haute densité dans la partie périphérique, mais il serait impropre de leur attribuer la vision périphérique. Ces bâtonnets ont une très grande sensibilité, à tel point que des études suggèrent qu'ils pourraient faire la détection d'un unique photon. Dans la vie quotidienne, leur gamme de sensibilité est comprise entre 10^{-6} et 1 cd/m^2 ce qui correspond à la lumière de la pénombre et/ou du clair de lune.

3.2.2.2 Les cônes (7 millions dans la rétine adulte humaine)

Les cônes sont très nombreux dans la partie très centrale de la rétine, la macula. Cependant, bien que leur densité décroisse en périphérie, ils sont présents jusque dans la très grande périphérie, ils peuvent notamment détecter le mouvement d'objets arrivant dans le champ visuel. Les cônes assurent la vision diurne. Leur sensibilité s'étend dans une gamme de luminance de 10^{-3} à 10^8 cd/m^2 . En réalité, leur plage de sensibilité s'ajuste en permanence dans cette gamme de luminance sur trois unités logarithmiques par des phénomènes d'adaptation. Ces phénomènes d'adaptation peuvent être mis en évidence dans la vie quotidienne par l'éblouissement transitoire lors de la transition d'une zone faiblement éclairée (intérieur) à une zone fortement éclairée (extérieur ensoleillé), ou la période d'aveuglement produite par la transition inverse. Dans les deux cas, l'adaptation aura lieu en moins d'une minute.

Les différents cônes ont des pics d'absorption compris entre 450 et 570 nm et les bâtonnets ont un pic d'absorption à 500nm.

3.2.2.3 La phototransduction

Les photorécepteurs transforment les photons en une activité électrique au niveau de leur segment externe. Cette phototransduction intervient dans les photorécepteurs selon des mécanismes très semblables même si des différences peuvent être mises en évidence entre cônes et bâtonnets. Le pigment visuel est constitué d'une protéine, la rhodopsine pour les bâtonnets, les iodopsines pour les cônes et d'un chromophore ou molécule associée, le 11-cis-rétinal. L'absorption d'un photon par le pigment visuel va aboutir à la transformation du 11-cis-rétinal en trans-retinal produisant un changement de conformation de la protéine. C'est la structure de la protéine qui va conférer au pigment visuel sa sensibilité spectrale spécifique. Le changement de conformation du pigment visuel induit une cascade de réactions enzymatiques très consommatrices en énergie, qui assurent la transformation de l'énergie du photon en un signal électrique.

⁴⁴ Le domaine spectral des infrarouges (IR) est composé des IRA (780 – 1 400 nm), des IRB (1 400 – 3 000 nm) et des IRC (3 000 nm – 1 mm).

3.2.2.4 Les cellules de l'épithélium pigmentaire

La phototransduction aboutit à une transformation du chromophore 11-cis-rétinal en trans rétinal ce qui implique un renouvellement de ce chromophore. Ce renouvellement est l'une des principales tâches de l'épithélium pigmentaire rétinien. En effet, de nombreuses mutations sur des gènes des protéines impliquées dans le transport ou le renouvellement du pigment visuel sont responsables de pathologies visuelles, puisque l'absence du 11-cis-rétinal résulte en une dégénérescence des photorécepteurs.

L'épithélium pigmentaire contient la lipofuscine et la mélanine.

Contrairement à la mélanine, qui absorbe les photons et joue un rôle protecteur, la lipofuscine une fois excitée en particulier par de la lumière bleue génère des radicaux libres capables de léser les cellules elles-mêmes et les cellules avoisinantes.

3.2.3 Le réseau neuronal

Le signal lumineux produit par les photorécepteurs subit un traitement de l'information avant son transfert au cerveau. En effet, les photorécepteurs répondent par une hyperpolarisation graduée en fonction de l'intensité lumineuse. Cette réponse est souvent comparée aux signaux analogiques des composants électroniques. Par contre, lorsque l'information visuelle est transmise au cerveau via le nerf optique sous la forme de potentiels d'action dont l'amplitude est fixe tout au long de la fibre nerveuse, l'information est en réalité contenue dans la fréquence de ces potentiels d'action produits par les cellules ganglionnaires. Le traitement de l'information permet une compression des données visuelles. Plus de détails concernant le réseau neuronal peuvent être consultés dans l'annexe E du chapitre 3.

3.2.4 Contrôle rétinien du rythme circadien et de l'ouverture pupillaire

La présence d'un troisième système de photoréception différent des photorécepteurs classiques (bâtonnets et cônes) implique de se poser la question de la façon dont le spectre des LED pourrait influencer ce système. En effet, ce système de photoréception contrôle des fonctions aussi importantes que les rythmes circadiens ou la dilatation pupillaire⁴⁵. Par conséquent, il va donc non seulement contrôler l'intensité du flux lumineux entrant dans l'œil mais aussi les rythmes de veille/sommeil.

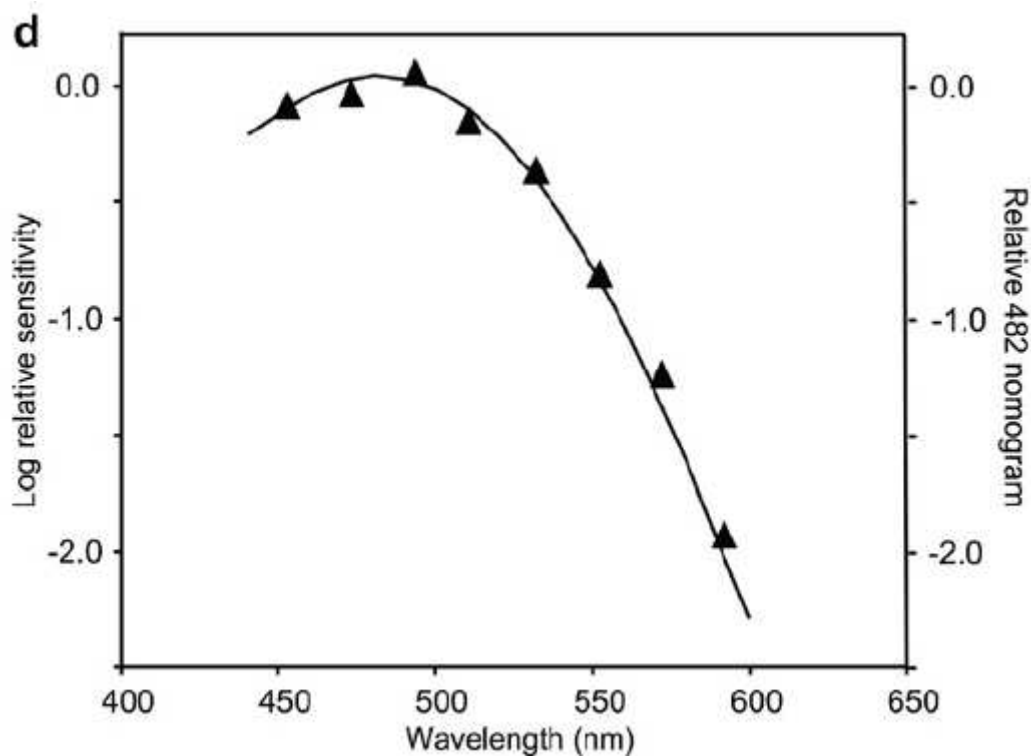
Ce troisième système de photoréception est constitué de cellules ganglionnaires rétiniennes sensibles à la lumière. Ces cellules expriment un pigment visuel appelé mélanopsine [Provencio *et al.*, 2000; Hattar *et al.*, 2002; Provencio *et al.*, 2002]. Cependant, il faut noter que ces cellules ganglionnaires rétiniennes reçoivent également des informations visuelles provenant des photorécepteurs classiques [Jusuf *et al.*, 2007 ; Ostergaard *et al.*, 2007].

L'importance de ces cellules à mélanopsine et de ce nouveau pigment visuel dans le contrôle des rythmes circadiens avait été suggérée par le travail sur des animaux ayant perdu leurs photorécepteurs de types bâtonnet et cône. Bien que la présence de mélanopsine ne soit pas indispensable pour la genèse de rythmes circadiens, son absence diminue les réponses de 40 % [Panda *et al.*, 2002 ; Ruby *et al.*, 2002]. La mélanopsine intervient non seulement dans la régulation des rythmes circadiens mais aussi dans le contrôle du réflexe pupillaire. Pour ces effets de la lumière sur les rythmes circadiens et sur la contraction pupillaire, le spectre d'activité montre un pic vers 480 nm ([Hattar *et al.*, 2003]) identique à celui de la réponse à la lumière des cellules ganglionnaires rétiniennes isolées exprimant la mélanopsine [Berson *et al.*, 2002].

Chez l'homme et, plus généralement, chez les primates, une fraction de cellules ganglionnaires exprime également la mélanopsine [Hannibal *et al.*, 2004 ; Dacey *et al.*, 2005]. Ces cellules

⁴⁵ Selon les études, le temps de contraction pupillaire peut varier de 0.1 à 1 seconde [Barbur *et al.*, 1998]

présentent une densité quatre fois plus élevée à proximité de la fovea que dans les parties périphériques [Dacey *et al.*, 2005]. Elles répondent à la lumière avec un pic de sensibilité estimé à 482 nm [Dacey *et al.*, 2005]. Une analyse de la réponse pupillaire chez le singe après blocage de la transmission visuelle dans la rétine montre un maximum de sensibilité vers 482 nm [Gamlin *et al.*, 2007]. De même, chez l'homme, Le calcul de l'éclairement énergétique rétinien pour obtenir une contraction pupillaire donnée est en accord avec un pic de sensibilité entre 480 et 485 nm, vers 482 nm (Figure 34) [Gamlin *et al.*, 2007]. Ces résultats sont en accord avec des mesures plus anciennes de la contraction pupillaire qui avaient statué sur un maximum près de 490 nm [Bouma, 1962].



Source : [Gamlin *et al.*, 2007]

Figure 34 : Sensibilité spectrale de la contraction pupillaire chez l'homme

Le Tableau 7 présente un récapitulatif des différents résultats expérimentaux ayant pour objectif de déterminer le pic maximum de sensibilité à la lumière de différents processus : décalage des rythmes circadiens, suppression de la mélatonine, réflexe pupillaire, dépolarisation des cellules ganglionnaires, *etc.*

En 2009, Mure *et al.* [Mure *et al.*, 2009] ont montré que la mélanopsine possédait un système de photo-régénération indépendant de l'épithélium rétinien pigmentaire. Il en découle que deux longueurs d'ondes deviennent pertinentes pour comprendre le cycle de vie de la mélanopsine. La lumière active la mélanopsine qui subit une transformation et devient la méta-mélanopsine. Cette dernière se régénère en mélanopsine via la lumière mais avec une longueur d'onde différente.

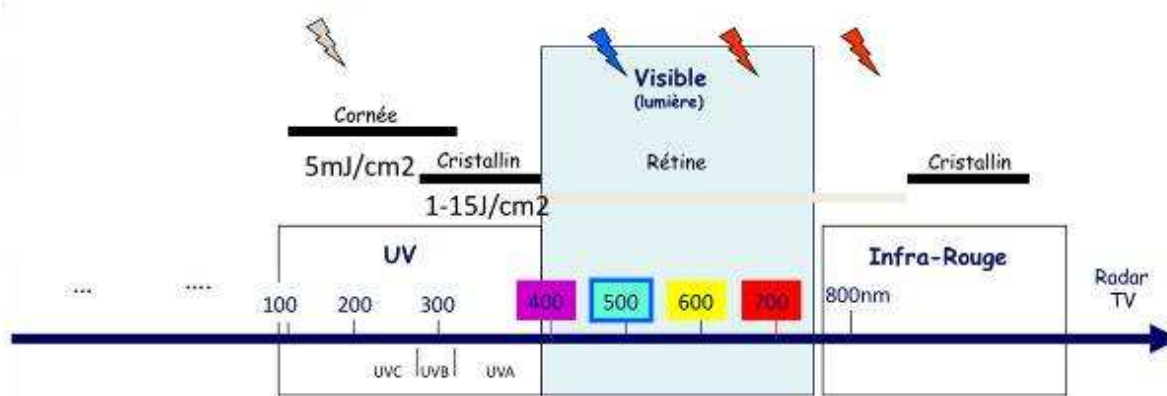
Tableau 7 : Tableau récapitulatif des différents résultats expérimentaux ayant pour objectif de déterminer le pic maximum de sensibilité de différents processus

$\lambda_{\max}$ (nm)	Espèce	Réponse	Publication
480	Souris (rd/rd)	Décalage des rythmes circadiens	[Yoshimura et Ebihara, 1996]
464	Homme	Suppression de la mélatonine	[Brainard <i>et al.</i> , 2001]
459	Homme	Suppression de la mélatonine	[Thapan <i>et al.</i> , 2001]
479	Souris (rd/rd)	Reflexe pupillaire	[Lucas <i>et al.</i> , 2001]
483	Homme	Cellule de cônes	[Hankins et Lucas, 2002]
483	Rat	Dépolarisation des cellules ganglionnaires	[Berson <i>et al.</i> , 2002]
481	Souris (rd/rd cl)	Décalage des rythmes circadiens	[Hattar <i>et al.</i> , 2003]
482	Singe	Dépolarisation des cellules ganglionnaires	[Dacey <i>et al.</i> , 2005]
---	Homme	Mélanopsine (Reflexe pupillaire)	[Mure <i>et al.</i> , 2009]
---	Homme	Meta-mélanopsine (Reflexe pupillaire)	[Mure <i>et al.</i> , 2009]

Plus de détails concernant les rythmes circadiens et la contraction pupillaires peuvent être consultés dans l'annexe F du chapitre 3.

3.3 Rayonnements optiques et pathologies oculaires

Différents tissus oculaires peuvent subir des lésions consécutives à une exposition excessive à des rayonnements lumineux. Les tissus cibles dépendent de la longueur d'onde et les lésions de l'intensité énergétique du rayonnement. Chaque tissu présente un seuil de résistance qui dépend de ses capacités intrinsèques de résistance au stress photique et en particulier de ses défenses anti-oxydantes (*cf.* Figure 35).

**Figure 35 : Spectre des rayonnements électromagnétiques et sensibilité des milieux oculaires**

La cornée est sensible aux ultra-violets (180 à 400 nm) et doit être protégée en cas d'exposition du fait du risque de voir survenir une kératite. Les lésions touchent l'épithélium cornéen et sont

douloureuses, mais sans conséquences à long terme du fait des capacités de prolifération de l'épithélium qui retrouve son intégrité en quelques jours.

De véritables brûlures thermiques de la cornée peuvent apparaître avec des longueurs d'onde de 1,4 µm à 1 mm.

Le cristallin absorbe les UVA et UVB ainsi que les longueurs d'onde courtes. L'exposition courte aux UVA et B induit des lésions mineures et réversibles, tandis que des expositions prolongées peuvent induire des dommages permanents. La lumière bleue peut induire des lésions cristalliniennes par effet photodynamique du fait de l'activation de produits accumulés dans le cristallin et dont l'illumination produit des radicaux libres oxygénés. D'autres produits accumulés avec l'âge dans le cristallin jouent au contraire un rôle anti oxydant [Balasubramanian, 2000]. Des études épidémiologiques ont montré que le risque de cataracte est lié au degré d'exposition aux ultraviolets en milieu naturel ou professionnel et que des taux d'ultraviolets faibles cumulés sont cataractogène en eux-mêmes ou cumulés à d'autres risques environnementaux ou endogènes [Hockwin *et al.*, 1999]. Les rayonnements dans l'infrarouge (de 800 à 3 000 nm) sont également susceptibles d'induire des cataractes [Roh et Weiter, 1994].

L'exposition solaire prolongée est également associée à des lésions de la surface oculaire, telles que des ptérygions et des mélanoses conjonctivales [Roh et Weiter, 1994].

La rétine est sensible aux longueurs d'onde dans le spectre visible avec une sensibilité accrue pour les longueurs d'ondes courtes, les plus énergétiques dans le violet et le bleu (380 à 500 nm).

Le pigment visuel, le 11 cis retinal a un pic d'absorption maximal de la lumière variable en fonction de ces différentes formes chimiques. Le tableau ci dessous récapitule les pics d'absorption des différentes formes, compris entre 370 et 498 nm.

Tableau 8 : Différentes formes chimiques du pigment visuel 11 cis retinal et pic d'absorption associé [Young, 1988]

3.3.1.1	Nom du pigment	3.3.1.2	$\lambda_{\max}$ – Pic d'absorption (nm)
	Rhodopsin		498 nm
	Bathorhodopsin		543 nm
	Lumirhodopsin		497 nm
	Metarhodopsin I		487 nm
	Metarhodopsin II		380 nm
	<i>trans</i> -Retinal (libre)		370 nm

La toxicité des rayonnements optiques dépend de leurs longueurs d'onde et la lumière « bleue » est reconnue comme risque maximal.

Nous développerons plus spécifiquement les connaissances actuelles sur les risques rétinien d'exposition à la lumière dans le paragraphe suivant.

3.3.2 Arguments cliniques pour une toxicité de la lumière sur la rétine

S'il ne fait aucun doute que des expositions aiguës et intenses à des rayonnements visibles peuvent causer des lésions rétinien irréversibles (visualisation d'éclipses, accident par source laser ou microscope opératoire), la question du lien entre pathologies de la rétine et exposition à la lumière n'a cessé d'être débattu. Des conclusions contradictoires ressortent des différentes études épidémiologiques du fait de la difficulté d'évaluer de façon précise le niveau d'exposition à la lumière d'un individu sur une période longue et de l'intégrer aux autres facteurs génétiques et / ou environnementaux associés qui interviennent dans la pathologie.

3.3.2.1 Arguments cliniques de lésions rétinienne induites par l'exposition à la lumière :

3.3.2.2 Par exposition à des éclipses

La fixation directe du soleil induit une photorétinite solaire qui s'accompagne d'un scotome plus ou moins réversible en fonction de la durée et de l'intensité de l'exposition.

Des lésions irréversibles peuvent apparaître au centre de la macula en moins d'une minute d'exposition. Elles concernent la rétine externe (les cellules de l'épithélium pigmentaire et les segments des photorécepteurs puis les noyaux des photorécepteurs).

Des lésions suffisantes à altérer la vision centrale peuvent être induites sans traduction ophtalmoscopique bien que des altérations pigmentaires soient souvent observables au fond d'œil.

3.3.2.3 Par exposition au soleil

Des rétinites solaires ont été rapportées chez des individus exposés tels que des pilotes d'avion ou des soldats postés dans le désert. Dans la majorité des cas, les modifications irréversibles de la vision maculaire ont résulté non pas d'une exposition aiguë mais du cumul d'expositions répétées sur des périodes de plusieurs mois ou années.

Ainsi, les effets délétères photochimiques peuvent être additifs.

3.3.2.4 Par exposition à des instruments ophtalmologiques

L'exposition maculaire à un microscope opératoire pendant une durée prolongée induit des lésions photochimiques paramaculaires, d'autant que les patients sont anesthésiés et présentent une dilatation pharmacologique de la pupille. Habituellement, ces lésions n'entraînent pas de baisse de l'acuité visuelle.

3.3.2.5 Dystrophies rétinienne héréditaires

Ce sont un groupe hétérogène de dégénérescences rétinienne héréditaires touchant environ 30 000 personnes en France et conduisant le plus souvent à la cécité, lié à la perte de photorécepteurs consécutive à des mutations dans des gènes impliqués dans la phototransduction.

De même, l'effet de la lumière sur les rétinites pigmentaires est discuté. Des études ont montré que le port de verres teintés, chez des patients souffrant de rétinite pigmentaire, ne ralentissait pas la progression de la maladie [Berson, 1971 ; Berson, 1980]. Une autre étude mentionne au contraire que le port d'une lentille de contact teintée sur un œil, pendant une durée de 1 à 3 ans, a permis de ralentir la perte du champ visuel de l'œil protégé de la lumière chez 8 patients atteints de rétinite pigmentaire sur les 13 patients suivis. Cependant, cette étude est limitée au champ visuel et ne comporte pas d'autres critères d'évaluation de la fonction rétinienne [Stone *et al.*, 1999]. Un des défauts des études menées jusqu'à maintenant sur les rétinites pigmentaires est l'absence de prise en compte du contexte génétique.

3.3.2.6 Dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA)

La dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA) est une atteinte progressive et sélective de la macula débutant en général après 60 ans et aboutissant à une perte de la vision centrale (cécité sociale). La maculopathie débute par l'apparition de dépôts sous-rétiens (drusens) et de modification des pigments de l'EPR. Deux formes évolutives de la maladie sont décrites. Une forme lentement évolutive « sèche » qui aboutit à une atrophie de la macula et une forme dite « humide » au cours de laquelle des épisodes brutaux de baisse visuelle sont dus à des vaisseaux anormaux (néo-vascularisation) poussant sous la rétine.

La DMLA est une maladie liée à l'âge, multifactorielle, associant de façon clairement établie par des liens statistiques des facteurs génétiques (polymorphismes dans des gènes codant pour des protéines impliquées dans la cascade de l'inflammation, en particulier l'activation du complément

et le recrutement de macrophages ou de microglie) et des facteurs environnementaux (tabac en particulier).

En résumé, l'exposition solaire et / ou à la lumière bleue n'est pas reconnue de façon unanime comme un facteur de causal de DMLA, mais il constitue un facteur de risque de DMLA. De façon plus évidente, l'exposition solaire de certaines populations (jeune, peau très claire, faible teneur en anti oxydants) favorise l'apparition de la DMLA et il est donc recommandé de se protéger des expositions prolongées en fort ensoleillement. Aucune étude n'a pu montrer que l'exposition solaire aggrave les formes avancées de la DMLA, sauf dans les populations dont les taux d'anti oxydants sont faibles, où elle pourrait favoriser l'apparition des formes exsudatives (DMLA « humide »). Il faut toutefois remarquer que la probabilité d'une exposition solaire forte et prolongée est faible dans des populations âgées déjà atteintes de DMLA.

Les études épidémiologiques, difficiles à réaliser car essentiellement basées sur des questionnaires d'exposition solaire, parviennent aux mêmes conclusions que les études sur des modèles expérimentaux. L'exposition solaire et particulièrement les longueurs d'onde courtes induisent un stress oxydatif responsable de lésions rétinienne sur un terrain sensibilisé par des facteurs génétiques, nutritionnels, d'âge et environnementaux. Une exposition prolongée dans un environnement plus ou moins éclairé pourrait par ailleurs avoir des effets protecteurs ou aggravants face au risque d'une exposition aiguë de plus forte intensité et pourrait dépendre de l'âge du sujet et de son statut anti-oxydant. Enfin, aucune étude n'a analysé les capacités d'adaptation du métabolisme rétinien face à des expositions cumulées sur plusieurs mois à des longueurs d'onde définies, ni sur l'apparition de signes pathologiques, ni sur l'aggravation de pathologies pré existantes.

3.3.2.7 Aphakie et pseudophakie (absence de cristallin ou implantation d'un cristallin artificiel)

Les études sur les risques de dommages rétiens induits par l'exposition à la lumière des yeux aphakes (sans cristallin) ou pseudophakes (cristallin artificiel) remonte à plus de 25 ans. Afin de réduire les risques potentiels de la toxicité de la lumière bleue sur la rétine, des implants jaunes filtrant les longueurs d'ondes courtes et les UV ont été conçus. Les études pré cliniques sur les modèles animaux de dégénérescence rétinienne induite par la lumière ont montré que ces implants protègent des lésions rétiennes induites par des longueurs d'onde comprises entre 380 et 500 nm [Tanito *et al.*, 2006 ; Nilsson *et al.*, 1989]. Les implants jaunes semblent améliorer la sensibilité aux contrastes mais modifient la vision des couleurs et l'implantation unilatérale peut gêner le patient. Il n'a cependant pas été démontré à ce jour que ces implants réduisent la progression ou le risque d'apparition d'une maculopathie [Algvere *et al.*, 2006].

3.3.3 Mécanismes généraux de toxicité de la lumière sur la rétine

Du fait de la difficulté à réaliser des études épidémiologiques, car mesurer l'exposition solaire ou la lumière artificielle d'une population, voire d'un individu est complexe et sujet à caution, des modèles expérimentaux ont été utilisés d'une part pour mieux analyser le potentiel toxique de la lumière sur la rétine et d'autre part pour en comprendre les mécanismes cellulaires et moléculaires et tenter de définir des seuils de toxicité.

La première description de lésion rétinienne induite par une exposition à la lumière a été faite en 1965 par Noell [Noell *et al.*, 1965]. Un an plus tard, Noell *et al.* publièrent la première étude électrorétinographique et histologique des lésions rétiennes induites par la lumière chez le rat [Noell *et al.*, 1966]. Depuis, de nombreux travaux ont montré les effets néfastes de la lumière sur des modèles animaux de dégénérescence rétinienne d'origine génétique. La plupart de ces modèles correspond à des maladies identifiées chez l'homme [Paskowitz *et al.*, 2006].

3.3.3.1 Altérations des photorécepteurs et des cellules de l'EPR induites par la lumière

Les dommages induits par la lumière conduisent à la mort par apoptose des photorécepteurs et des cellules de l'épithélium pigmentaire [Portera-Cailliau *et al.*, 1994 ; Wenzel *et al.*, 2005]. Les modèles de dégénérescence induite par la lumière sont très étudiés et utilisés pour évaluer des

agents protecteurs. Nous discuterons ultérieurement de leur pertinence pour évaluer la toxicité potentielle de la lumière chez l'homme.

D'une manière générale, les longueurs d'onde entre 400 et 1 400 nm peuvent causer des dommages rétinien. On reconnaît des dommages par mécanisme photomécanique résultant d'une énergie délivrée forte (de l'ordre du MW/cm²) sur une période courte (nano ou picosecondes) et non de la longueur d'onde. Une rupture mécanique est due essentiellement à l'accumulation rapide d'énergie dans les mélanosomes des cellules de l'épithélium pigmentaire de la rétine (EPR), ce qui génère des ondes de choc et entraîne des lésions irréversibles des cellules EPR et des photorécepteurs. Les tensions mécaniques sont à l'origine de la formation de micro-bulles létales pour les cellules de la rétine. Ce phénomène est utilisé pour créer une irridotomie thérapeutique (trou dans l'iris) pour traiter le glaucome

Des dommages photothermiques surviennent après exposition à des longueurs d'onde entre 600 et 1 400 nm et des temps d'exposition de la microseconde à quelques secondes. L'éclairement énergétique et la durée d'exposition requis pour causer un dommage thermique ne sont cependant pas inversement proportionnels. La quantité d'énergie nécessaire à causer un effet thermique augmente avec la durée d'exposition du fait de la dissipation de la chaleur pendant l'exposition.

Les dommages photochimiques résultent quant à eux de l'interaction d'un photon avec les pigments visuels conduisant à la formation de radicaux libres toxiques pour la rétine. Les lésions dépendent de la dose totale d'énergie reçue et il existe une relation réciproque théorique entre l'éclairement énergétique et la durée d'exposition, jusqu'à un certain délai d'exposition au-delà duquel des mécanismes réparateurs se mettent en place. Il n'y a aucune lésion en dessous d'un certain seuil d'éclairement énergétique et les lésions résultant d'une exposition très longue sur des mois ou des années à des niveaux d'énergie lumineuse élevée peuvent être également régies par d'autres mécanismes.

Les espèces animales utilisées sont, dans la grande majorité des études, des petits rongeurs de laboratoire (souris et rat). Des travaux ont cependant été décrits dans d'autres espèces animales de plus grand format comme le chien [Cideciyan *et al.*, 2005]. Des travaux ont également été réalisés chez le singe : des expositions intermittentes à la lumière verte ou bleue modérément intense entraînaient des lésions plus ou moins réversibles des cônes [Sperling, 1980 ; Sperling, 1986].

Chez les rongeurs, les modèles de dégénérescence rétinienne induite par la lumière varient en fonction de différents paramètres : sexe, phénotype, fond génétique, protocole d'exposition à la lumière.

Les lésions induites par la lumière ne résultent pas d'un mécanisme unique et dépendent de nombreux facteurs. Il apparaît cependant clairement que les lésions photochimiques sont plus importantes dans les couches externes de la rétine la plus centrale, ce qui chez l'homme correspond à la macula [Lohr *et al.*, 2006].

3.3.3.2 Autres altérations rétinien induites par la lumière

En dehors des lésions des photorécepteurs et des cellules de l'EPR qui dépendent des longueurs d'onde et de l'énergie reçue par la rétine, d'autres lésions sont observées dans les cellules de la rétine interne (cellules ganglionnaires) et dans les cellules gliales de Müller après exposition à la lumière bleue. Des rats pigmentés sont en effet soumis après adaptation de 30 minutes à l'obscurité, à une lumière bleue (405 ± 10 nm) pendant 30 minutes à 8 mW/cm² (mesuré au niveau de la cornée). Dans les deux à trois jours qui suivent l'illumination, des altérations importantes des cellules gliales de Müller sont observées. Ces cellules responsables de l'équilibre hydro ionique et particulièrement potassique dans la rétine présentent des altérations osmotiques témoignant de la dérégulation des systèmes des contrôles ioniques, avec des conséquences électrophysiologiques [Iandiev *et al.*, 2008]. Le remodelage rétinien massif touchant également la choriocapillaire et qui survient dans les 60 jours qui suivent les phototraumatismes peut évoquer les remaniements ultimes observés chez les patients atteints de dégénérescence maculaire (DMLA) atrophique,

suggérant ici le rôle potentiellement toxique de la lumière dans la survenue de la DMLA [Marc et al., 2008].

3.3.3.3 Pertinence des modèles animaux pour l'homme

Une dégénérescence de la rétine d'animaux exposés à la lumière peut être induite. Ces modèles sont largement utilisés pour comprendre les mécanismes de la mort cellulaire photochimique et pour tester des agents protecteurs.

Pour autant, ces modèles ne permettent pas d'affirmer que la lumière est un facteur de risque de dégénérescence rétinienne en conditions physiologiques.

Cependant, si un humain fixe directement le soleil, des lésions rétinienne apparaissent et sont identiques à celles observées dans les modèles animaux. Des analyses histologiques ont été réalisées chez des patients volontaires qui ont accepté de fixer le soleil avant énucléation. Des lésions des cellules EPR sont apparues dans les 38 à 48 heures qui ont suivi l'éblouissement sans atteinte immédiate des photorécepteurs, semblables aux lésions des cellules EPR observées chez des singes soumis à des lumières bleues. La capacité de récupération des cellules EPR explique que pour la plupart des patients le scotome est transitoire. Cependant des lésions retardées des photorécepteurs peuvent apparaître, compromettant la récupération fonctionnelle. Il est reconnu que les mécanismes responsables de la rétinite solaire sont directement liés aux dommages induits par la lumière bleue [Tso et La Piana, 1975]. Cela ne signifie pas que la lumière solaire est toxique pour l'œil humain, car en dehors d'expériences de ce genre à laquelle des sujets ont accepté de se prêter, personne ne regarde le soleil de face.

Pour l'exposition solaire de la peau, il a été clairement établi que le cumul des expositions solaires augmente le risque de nævus et de mélanomes et plus largement les épithéliomes spino- et basocellulaires, établissant un lien entre une dose cumulée d'exposition et le risque pathologique.

Pour ce qui concerne l'exposition de la rétine à la lumière, aucune corrélation n'a pu être établie, à ce jour chez l'homme, entre une dose cumulée d'exposition à la lumière bleue et la survenue de pathologies rétinienne dégénératives ou néo-vasculaires. Reste à savoir si l'exposition répétée à des lumières de fortes intensités, particulièrement dans le spectre bleu, ne risque pas d'aggraver des pathologies rétinienne préexistantes en particulier liées à l'âge.

3.4 Anatomie - spécificités de la peau

3.4.1 Anatomie de la peau

Sur le plan anatomique, la peau comprend deux parties principales. La partie superficielle mince s'appelle l'épiderme, rattachée à une partie interne plus épaisse, le derme. Une troisième couche, plus profonde, constitue l'hypoderme mais n'est classiquement pas assimilée à une couche de peau. La Figure 36 représente de manière schématique une coupe de la peau.

L'ensemble peau et phanères (ongles, cheveux, poils) se nomme le tégument. Le tégument est composé d'une portion externe, l'épiderme, et d'une portion sous-jacente appelée derme, qui repose sur du tissu riche en graisse, ou hypoderme. L'ensemble mesure entre 1 et 4 mm selon les zones du corps humain.

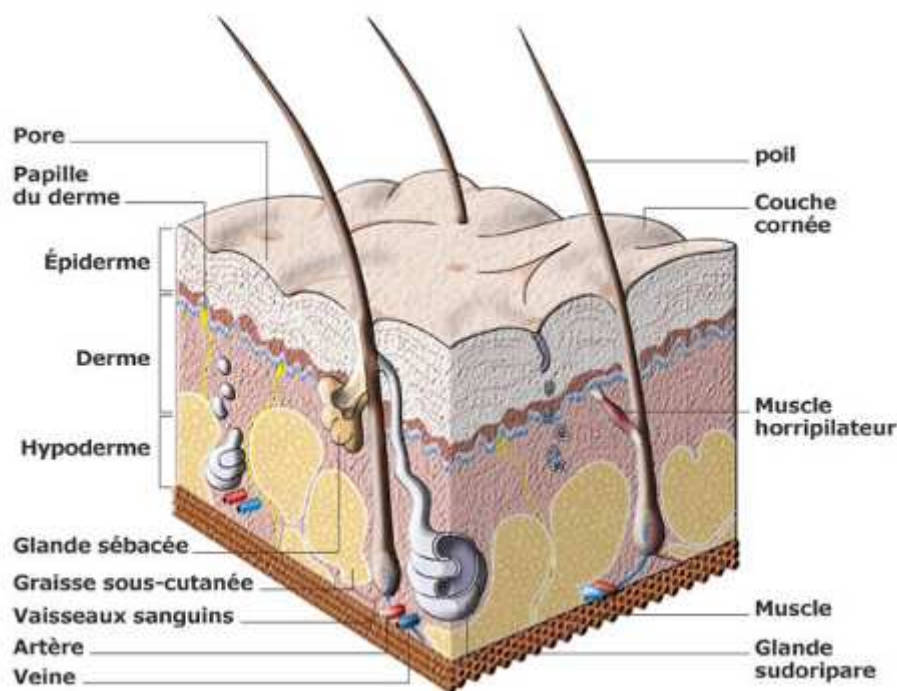


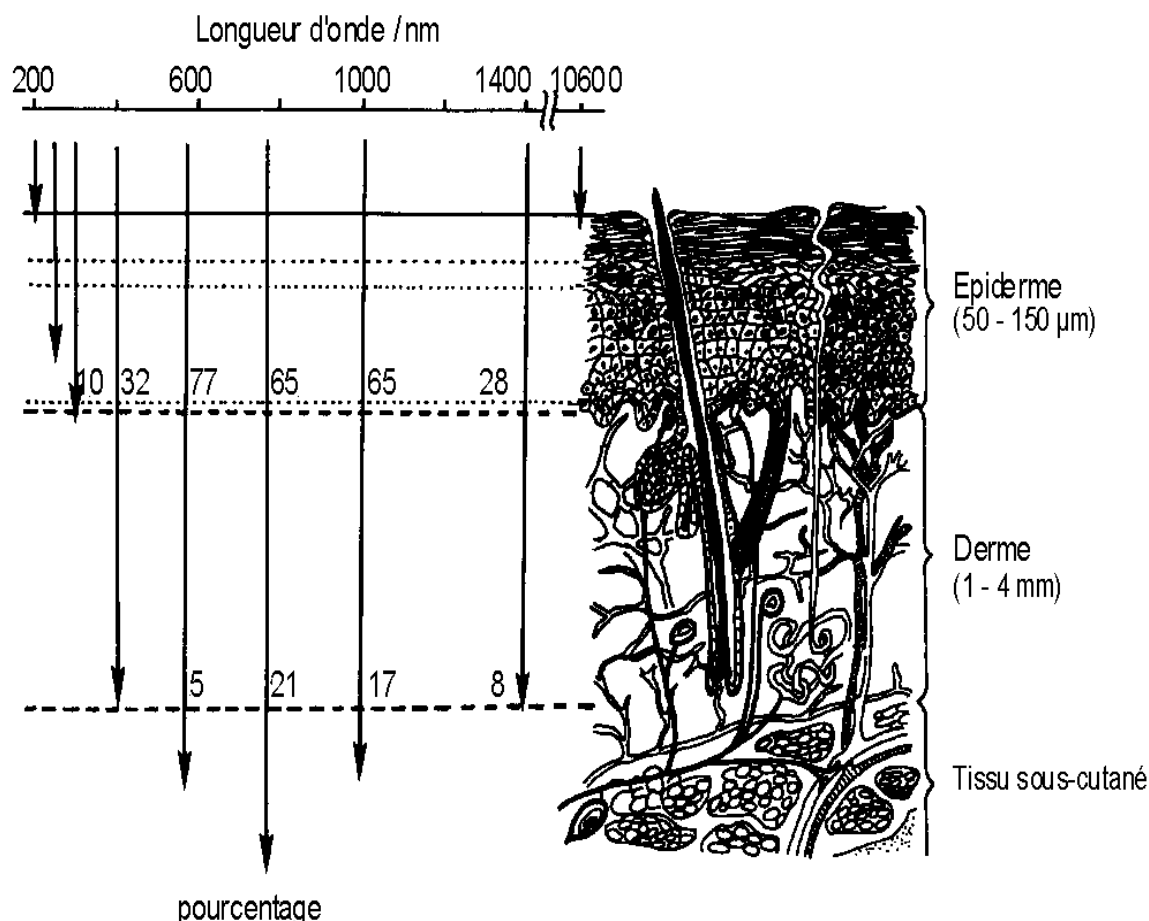
Figure 36 : Schéma d'une coupe de la peau représentant l'épiderme, le derme et l'hypoderme

L'épiderme est la couche superficielle de la peau dont la surface est formée de cellules mortes kératinisées, qui desquament. Il est composé de trois couches, la plus externe ou stratum corneum, desquamante, une couche intermédiaire faite d'empilements de 5 à 10 cellules et la couche basale faite de cellules se divisant activement et de mélanocytes produisant la mélanine responsable de la couleur de la peau. Cette dernière couche est plus ou moins ondulée selon l'âge et la localisation, particulièrement ondulée chez l'enfant, expliquant l'exposition plus intense des couches basales au sommet des crêtes épidermiques.

Le derme est situé entre l'épiderme au-dessus et l'hypoderme en dessous. Il est constitué d'un tissu conjonctif (tissus de soutien), à la fois flexible et résistant. Il est riche en récepteurs sensoriels, vaisseaux sanguins, et lymphatiques.

3.4.2 Optique du tégument

Les données exposées ci-dessous sont empruntées à Anderson et Parrish [Anderson et Parrish, 1981]. Le rayonnement incident subit des réflexions, des diffusions et une absorption à chaque passage à travers les différentes structures du tégument. Le rayonnement incident subit une première réflexion sur le stratum corneum à l'interface air-tissu (5 %). A chaque interface, 4 à 7 % du rayonnement incident sont réfléchis, le reste étant absorbé ou diffracté. Pour les molécules ou les particules dont les dimensions sont grossièrement d'un dixième de la longueur d'onde incidente, la diffusion est généralement faible et son intensité varie en $1/\lambda^4$ (diffusion de Rayleigh). Pour les particules dont les dimensions sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde, la diffusion est plus importante, dirigée vers la profondeur. Quand la taille de la particule excède largement la longueur d'onde, la diffusion diminue. En particulier, la diffusion par les fibres de collagène détermine largement la pénétration des rayonnements optiques dans le derme (cf. Figure 37).



Source : Adapté de Ippen in « The biologic effect of Ultraviolet radiation », F. Urbach ed, Pergamon Press New-York, Oxford, 1969

Figure 37 : Pénétration des différentes longueurs d'onde dans la peau

3.4.3 Optique du stratum corneum et de l'épiderme

La transmission du rayonnement UV et visible à travers le stratum corneum ou l'épiderme d'une peau blanche caucasienne ressemble à celle obtenue dans un mélange d'acides aminés aromatiques avec un minimum de transmission vers 275 nm. Les acides nucléiques dont l'absorption maximum est près de 260 nm ainsi que de nombreuses petites molécules aromatiques contribuent à la bande d'absorption globale de 275 nm. Le contenu en mélanine et sa distribution à travers les différentes couches de l'épiderme joue néanmoins un rôle majeur. Les mesures du facteur transmission épidermique sont compliquées en raison d'une bande d'excitation fluorescente centrée près de 280 nm. La mélanine n'est pas un filtre de densité neutre. Son absorption augmente vers les longueurs d'onde les plus courtes entre 200 et 250 nm. Au-delà, l'absorption par les mélanines est négligeable. Cinq pour cent de la radiation incidente entre 350 et 3 000 nm sont dispersés par réfraction dans un épiderme de peau blanche. On peut donc légitimement estimer que 90 % de la lumière incidente est absorbée par l'épiderme jusqu'à 320 nm.

3.4.4 Optique du derme

Le derme a des propriétés optiques bien différentes de l'épiderme, ce qui reflète ses différences de structure et de composition. En particulier, la transmission est plus élevée pour les longueurs d'onde les plus grandes entre 500 et 1 200 nm. La diffusion semble d'une importance capitale dans le derme. L'hémoglobine d'origine sanguine, l'oxyhémoglobine, le β -carotène et la bilirubine sont les absorbants majeurs du derme. Seuls les vaisseaux les plus superficiels

(capillaires et plexus veineux) peuvent être exposés à des quantités significatives de rayonnements UV ou bleus. A l'inverse, on peut dire qu'une fenêtre optique existe dans la peau ainsi que dans tous les tissus mous dans la région 600 - 1 300 nm. Néanmoins, il est possible d'utiliser une portion des longueurs d'onde de 600 à 1 300 nm pour induire une phototoxicité, le volume et la profondeur des tissus atteints étant importants.

Le Tableau 9 illustre les pourcentages de longueurs d'onde « typiques » atteignant les différentes couches du tégument.

Tableau 9 : Absorption intra épidermique, absorption dermique et pourcentage atteignant l'hypoderme

Longueur d'onde (nm)	Absorption intra épidermique	Absorption dermique	% atteignant l'hypoderme
200	100 % (stratum corneum)	0	0
290	95 %	5 %	0
320	90 %	10 %	0
365	80 %	20 %	0
400	67 %	32 %	1 %
550	72 %	23 %	5 %
750	65 %	14 %	21 %
1000	65 %	18 %	17 %
1400	28 %	64 %	8 %

Source : [Ippen H, 1969]

3.5 Rayonnements optiques et pathologies cutanées

Les photodermatoses constituent un groupe de maladies cutanées induites par la lumière. Ce groupe inclut les photodermatoses idiopathiques (mécanismes inconnus), les photosensibilités induites par les médicaments ou les produits chimiques, les porphyries et les photosensibilités cutanées déterminées génétiquement (photogéno-dermatoses). Les sources de lumière fluorescentes ont été identifiées formellement comme un facteur de risque, soit de déclenchement, soit d'aggravation.

3.5.1 Les photodermatoses idiopathiques

Ce groupe de lésions a une origine vraisemblablement immunologique.

Éruption polymorphe à la lumière (PLE) : cette pathologie est la plus commune des photodermatoses. Elle apparaît au printemps et au début de l'été comme une éruption papulo-érythémateuse, prurigineuse sur les zones exposées à la lumière solaire. Cette éruption cutanée apparaît dans les quelques heures suivant l'exposition. Ce type de réaction disparaît pendant les mois d'hiver. On estime que 10 à 20 % des européens peuvent être atteints dès les premières trois décennies avec une prévalence féminine. On estime que cette réponse à l'agression par les UVA, essentiellement solaires, sans coup de soleil, dépend de la production de protéines anormales dans l'épiderme et le derme. Cette photodermatose peut être provoquée par l'exposition à des sources artificielles intenses, riches en lumière bleue et avec une composante UVA.

La dermatite actinique chronique : la plupart des patients ont une longue histoire d'allergies de contact récidivantes et leur épiderme est anormalement sensible aux UVA et au rayonnement

visible. Cette situation pathologique affecte de manière prédominante les hommes âgés de plus de 50 ans (en Écosse, 17 sujets par 100 000 habitants). Ce type de lésion s'associe parfois chez les jeunes adultes à une dermatite atopique. La photosensibilité peut être très sévère.

Prurigo actinique : cette condition atteint rarement les populations européennes d'origine caucasienne ou asiatique. Les sujets sont atteints dès la première décennie. Les sujets atteints soulignent la détérioration de l'état cutané survenant au printemps et en été. Le prurigo solaire se présente comme un érythème œdémateux en plaques renforcé par des papules dès l'exposition solaire. On peut déclencher ce type de lésion en répétant le test de provocation aux UVA.

L'urticaire solaire : c'est un désordre cutané rare qui affecte également hommes et femmes, particulièrement dans les 4 premières décennies de la vie. Cette condition est persistante et l'on ne connaît pas de traitement pour 1/3 des sujets. Elle résulte des expositions aux UVA s'étendant dans le visible. La provocation de ce type de lésion se fait simplement à l'aide d'un projecteur de diapositives.

3.5.2 Photosensibilité aux produits chimiques et aux médicaments

De nombreux médicaments sont connus pour leur capacité à induire des photo-réactions cutanées. Pour la plupart une phototoxicité est déclenchée pourvu qu'une dose appropriée de lumière soit appliquée.

Parmi les produits les plus fréquemment photosensibilisants, l'amiodarone (agent antidysrhythmique cardiaque), les dérivés de la phénothiasine et les antibiotiques du groupe des fluoroquinolones sont responsables de réactions essentiellement aux UVA. Il est à noter que ces patients ne présentaient pas de réactions anormales aux sources incandescentes.

Phototoxicité des psoralènes dans les plantes et l'alimentation : ce type de phototoxicité est lié essentiellement à l'exposition aux UVA ; seule une absorption anormalement importante de céleri, de carottes sauvages ou de citron vert pourrait éventuellement induire des réactions phototoxiques.

Dermatites de contact : c'est un type rare de réaction d'hypersensibilité retardée déclenchée par de très faibles doses d'ultraviolet chez les individus très sensibles aux UVA. Les substances présentes dans l'environnement sont essentiellement des produits chimiques présents dans les écrans solaires et les anti-inflammatoires non stéroïdiens.

3.5.3 Photogénodermatoses

Ce groupe (250 000 personnes en Europe) comprend les xeroderma pigmentosum (XP) et les syndromes de Bloom et de Rothmund-Thomson. Ces pathologies sont la conséquence d'un système de réparation par excision de l'ADN déficient avec une sensibilité très marquée aux UVB, avec pour conséquence l'apparition précoce de cancers cutanés.

3.5.4 Les porphyries

Ces pathologies sont liées à la présence dans la peau de porphyrines et ont pour symptôme dénominateur l'intolérance à quelques minutes d'exposition à la lumière visible.

La protoporphyrie érythropoïétique se développe dès l'enfance. Il faut noter que les porphyries cutanées sont particulièrement sensibles dans la région bleue du visible. Cette pathologie touche 2 sujets sur 1 000 habitants.

La porphyrie cutanée tardive qui touche une personne sur 5 000 est la conséquence d'une imprégnation alcoolique accompagnée d'une hépatite chronique. Elle produit des phlyctènes, une fragilité cutanée et de l'hypertrichose. Ces lésions sont induites essentiellement par la portion visible du spectre solaire.

3.5.5 Les dermatoses photo aggravées

Dix pour cent des patients atteints de dermatite atopique (dartres, plaques érythémato-squameuses) voient leurs lésions exacerbées pendant les périodes estivales, sans que l'on puisse préciser si les expositions au rayonnement infrarouge ou l'hyperhidration soit en cause.

3.5.6 Lupus érythémateux

Il s'agit d'une pathologie chronique auto-immune très souvent exacerbée par les expositions solaires. Cette pathologie touche 30 sujets sur 100 000 habitants. Certains patients ont impliqué la lumière artificielle comme agent provocateur. Il s'agit d'un rash érythémateux affectant le visage formant un aspect d'aile de papillon sur les joues et les pommettes. Les UVA longs (360 – 400 nm) seraient l'élément causal.

3.5.7 Les cancers cutanés

Les rayonnements ultraviolets sont un facteur de risque reconnu. En conséquence, le rayonnement UV, associé à toute source de lumière artificielle, doit être réduit au minimum. Bien que les doses cancérogènes émises par des sources fluorescentes utilisées dans l'habitat ou comme source d'éclairage au travail soient mineures (moins de 1 %), il a été calculé qu'elles pouvaient représenter jusqu'à 30 % de l'exposition totale des travailleurs d'intérieur. Ces doses ne représentent plus que 3 ou 4 % pour les travailleurs d'extérieur. Il a été démontré définitivement qu'il n'y avait pas d'augmentation du risque de mélanome lors des expositions aux sources de lumière fluorescente.

3.5.8 Conclusions

Les progrès dans la connaissance de la pénétration du rayonnement visible dans la peau, les études concernant le spectre d'absorption de chromophores endogènes et exogènes dans la peau ont conclu à l'existence d'effets biologiques variés exercés par la portion visible du spectre des rayonnements non ionisants. Outre la possibilité d'induire un érythème ou une pigmentation et des dommages thermiques, la production d'espèces radicalaires de l'oxygène dans le tégument s'avère une réalité. À travers la génération de radicaux libres, la lumière visible peut induire des dommages indirects à l'ADN, contribuant ainsi à une possible photo cancérogénicité par addition aux effets du rayonnement ultraviolet présent lors des expositions solaires.

4 Synthèse de la normalisation européenne relative aux systèmes d'éclairage à LED

Résumé du chapitre

La normalisation européenne relative à l'éclairage à LED rassemble les normes électrotechniques propres à chaque type de produit. Il existe également des normes décrivant leur méthode de mesurage (photométrie, colorimétrie, etc.) et leur installation (normes d'éclairagisme et normes d'installation électrique). De plus, l'éclairage à LED est soumis, comme tout dispositif rayonnant, aux normes décrivant les limites d'expositions des personnes aux rayonnements optiques (risque photobiologiques) et électromagnétiques.

Les normes électrotechniques « produits » sont élaborées par la CEI⁴⁶ et transposées en Europe par le CENELEC⁴⁷. Pour chaque type de dispositif, il existe une norme de sécurité matérielle rassemblant les exigences de sécurité électrique, mécanique et thermique, ainsi qu'une norme de performance, rassemblant des exigences de performance photométrique, colorimétrique, de durabilité, etc.

Le marquage CE, obligatoire sur tout dispositif électrique vendu en Europe, est un marquage auto-déclaratif qui atteste la conformité du dispositif à la directive basse tension, à la directive de compatibilité électromagnétique, à la directive d'éco-conception « EuP » (*Energy-using Products*) et à la directive sur la santé et la sécurité des travailleurs. Pour l'éclairage à LED, les exigences de sécurité rendues obligatoires par le marquage CE sont décrites dans les normes électrotechniques de sécurité matérielle, les normes de compatibilité électromagnétiques (CEM), et les normes d'exposition des personnes aux rayonnements optiques et électromagnétiques.

Sécurité matérielle liée à l'usage des LED

Les normes électrotechniques de sécurité portent sur les dispositifs suivants :

- le module de LED (Norme NF EN 62031) : en complément à une ou plusieurs LED, il comprend d'autres composants (optique, mécanique, thermique, électronique) ;
- le luminaire à LED (Normes « luminaires » série NF EN 60598), qui est constitué au moins d'un module de LED, de connecteurs et de parties assurant la fixation mécanique et la protection de l'ensemble ;
- les lampes à LED (Projets de norme PR CEI 62560 et PR-CEI 62663-1) : il s'agit d'un module de LED comprenant une partie électronique et un culot de lampe normalisé destiné à être utilisé dans un luminaire, en remplacement des lampes standards à incandescence ou fluorescentes compactes.

Les normes de sécurité relatives aux lampes à LED sont à l'état de projet ou d'avant-projet et ne seront finalisées qu'en 2011.

Mesures photométriques des dispositifs d'éclairage à LED

La norme européenne en vigueur sur le mesurage photométrique des luminaires (NF EN 13032) décrit des conditions expérimentales difficilement applicables à la plupart des luminaires à LED. La norme américaine de photométrie LM-79 paraît pour l'instant mieux adaptée aux dispositifs

⁴⁶ CEI : Commission Electrotechnique Internationale

⁴⁷ CENELEC : Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

d'éclairage à LED.

Certifications applicables aux dispositifs d'éclairage à LED

Il n'existe actuellement en France qu'une seule certification portant sur les luminaires. Il s'agit de la certification NF-Luminaire relatives aux luminaires professionnels uniquement. Elle délivre une marque de qualité portant sur la sécurité des produits mais les points faibles des luminaires à LED comme la durée de vie, la maintenance du flux lumineux et les dérives colorimétriques ne sont pas couvertes par cette certification.

Sécurité photobiologique liée à l'usage des LED

Les normes de sécurité photobiologiques qui s'appliquent à tous les luminaires et toutes les lampes, dont les dispositifs à LED, sont la norme *NF EN 62471* – décembre 2008 et la norme internationale *CEI 62471* – juillet 2006 : « *Sécurité photobiologique des lampes et des appareils utilisant des lampes* ».

Ces 2 normes sont identiques, exception faites des valeurs limites d'exposition (VLE). La norme internationale *CEI 62471* fixe des valeurs limites d'exposition aux rayonnements optiques, alors que la norme *NF EN 62471* se réfère aux valeurs limites d'exposition de la directive européenne 2009/25/CE. Les valeurs limites d'exposition (VLE) sont calculées pour une exposition à une source pour une journée de travail de 8 heures. Elles sont issues de données expérimentales et en pratique pondérées par un facteur minorant de 5 à 10 fois les énergies nécessaires qui produiraient des lésions observables. Cependant, les VLE en vigueur, relatives au risque de la lumière bleue, ne permettent pas d'évaluer le risque d'exposition chronique quotidienne, notamment, car elles ne prennent pas en compte les risques à long terme et les expositions cumulées.

Outre les valeurs limites d'exposition, ces normes spécifient les conditions et procédures de mesure du rayonnement émis par les lampes et proposent une classification des lampes en termes de risque. Quatre groupes de risques sont identifiés : Groupe 0 : sans risque, Groupe 1 : faible risque, Groupe 2 : risque modéré, Groupe 3 : risque élevé.

Le classement d'une source dans un groupe de risque est établi en fonction des durées d'exposition maximales admissibles.

Par ailleurs, la CEI a produit en août 2009 un rapport technique (*CEI TR 62471-2*) détaillant les modalités d'évaluation des risques photobiologiques destiné aux fabricants de lampes et d'appareils incorporant des lampes. Il précise notamment les conditions (distance et niveau d'éclairement) dans lesquelles la luminance doit être évaluée et définit la notion de distance minimale de sécurité photobiologique. En effet, dans ce rapport, il est précisé que des luminaires d'éclairage général incorporant des sources non exemptes de risque photobiologique doivent être associés à une distance de sécurité minimale et / ou un accès contrôlé de manière à ce que, dans ces conditions, le groupe de risque du luminaire soit le groupe 0 (sans risque). Enfin, ce rapport propose des critères pour l'étiquetage des lampes vis-à-vis des risques photobiologiques.

Exposition des personnes aux champs électromagnétiques

Les dispositifs d'éclairage à LED ne doivent pas exposer les usagers à des niveaux de champs électromagnétiques qui présentent des risques pour la santé. Les valeurs limites de champs sont définies au niveau international par l'Icnirp. La norme récente *NF EN 62493* propose une méthode physique d'évaluation de l'exposition produite par les équipements d'éclairage.

4.1 Introduction

La garantie d'une bonne utilisation des LED sur le marché de l'éclairage passe par la maîtrise d'un ensemble de critères très différents. Ces critères sont d'abord liés à la sécurité des produits et à leurs performances. Mais, au-delà des caractéristiques des seuls produits, la qualité de l'installation d'éclairage est fondamentale pour offrir aux usagers de bonnes conditions de confort visuel et la quantité de lumière suffisante selon les usages. Par ailleurs, l'installation électrique des

produits à LED doit être effectuée de manière à garantir l'intégrité des composants du bâtiment et ne pas compromettre la sécurité des occupants.

Le Tableau 10 donne la liste des critères à examiner pour tout système d'éclairage installé dans un bâtiment.

Tableau 10 : Critères à examiner pour les systèmes d'éclairage dans le bâtiment

Sécurité des produits	Performances des produits	Performances de l'installation	Sécurité de l'installation
Sécurité électrique Sécurité thermique Sécurité mécanique Exposition des personnes aux rayonnements optique et électromagnétiques	Consommation énergétique Caractéristiques électriques Compatibilité électromagnétique Caractéristiques photométriques et colorimétriques Durée de vie et maintien des performances dans le temps.	Performance visuelle Confort visuel Qualité de la lumière Performance énergétique	Sécurité thermique Sécurité électrique

Ce chapitre présente une synthèse des normes françaises et européennes applicables aux dispositifs d'éclairage à LED et couvrant ces différents aspects. Les réglementations et les certifications existantes seront également présentées.

4.2 Normalisation, réglementation ou certification ?

4.2.1 La normalisation, garante des bonnes pratiques

Avant de décrire les normes relatives à l'éclairage à LED, il est utile de préciser la nature de ces documents. En effet, il existe souvent une confusion entre la normalisation, la réglementation et la certification.

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

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

La normalisation en éclairage rassemble deux « filières » différentes : la filière électrotechnique et la filière éclairagisme. Le Tableau 11 donne la liste des organisations internationales, européennes et françaises de ces deux filières.

La normalisation électrotechnique concerne les aspects liés aux performances et à la sécurité des produits ainsi qu'à l'installation électrique. Les normes d'éclairagisme portent sur les spécifications des projets d'éclairage en termes de confort, d'ergonomie et d'efficacité énergétique. Elles expriment un ensemble de valeurs photométriques à maintenir selon les activités des usagers et des locaux à éclairer et permettent d'aboutir à un éclairage de qualité.

Tableau 11 : Les organismes en charge de la normalisation en éclairage

	International	Europe	France
Filière électrotechnique	Commission électrotechnique internationale (CEI) ISO (International Standard Organisation)	Comité européen de normalisation électrotechnique (CENELEC)	Union Technique de l'Électricité (UTE) Association Française de Normalisation (AFNOR)
Filière « lumière, éclairage et éclairagisme »	Commission internationale de l'éclairage (CIE) ISO (International Standard Organisation)	Comité européen de normalisation (CEN) Association Française de l'Éclairage (AFE) CIE-France	AFNOR AFE CIE-France

La Commission internationale de l'éclairage (CIE) n'est pas un organisme normalisateur, mais publie régulièrement des recommandations qui peuvent être reprises dans des normes.

Au niveau international, l'organisation internationale de normalisation (ISO) collabore avec la CEI et la CIE pour l'établissement de normes internationales qui sont des transpositions de recommandations CIE et/ou de normes CEI.

4.2.2 La réglementation et le marquage CE

Au contraire de la normalisation, la réglementation est imposée par la législation. Dans le contexte européen, certains décrets nationaux relatifs à l'éclairage sont les transpositions directes de directives européennes. Les réglementations en éclairage touchent essentiellement aux domaines de la santé, de la sécurité, de l'environnement et de l'énergie. Il est intéressant de noter que les directives européennes et leurs décrets applicatifs s'appuient sur la normalisation pour fixer des exigences de conformité.

La conformité réglementaire des produits électriques vendus en Europe est attestée par le marquage CE. Le marquage CE est un marquage auto-déclaratif qui atteste de la conformité du dispositif à la directive basse tension, à la directive de compatibilité électromagnétique, à la directive EuP et à la directive sur la santé et la sécurité des travailleurs. Pour l'éclairage à LED, les exigences de sécurité rendues obligatoires par le marquage CE sont décrites dans les normes électrotechniques de sécurité matérielle, les normes CEM, et les normes d'exposition des personnes aux rayonnements optiques et électromagnétiques. Le marquage CE implique donc que les produits respectent la directive européenne 2006/25/EC (présentée plus loin dans ce chapitre) sur les rayonnements optiques. Les états membres de l'Union Européenne doivent implémenter cette dernière disposition depuis le 27 avril 2010.

4.2.3 La certification

La certification est, quant à elle, une démarche volontaire de promotion de la qualité des produits, des processus ou des services, menée par un ensemble d'acteurs économiques et de laboratoires indépendants dit « certificateurs ». La certification donne lieu à une marque de qualité, délivrée après un ensemble de mesures de contrôle. Ces mesures sont décrites dans un référentiel de certification, élaboré conjointement par les industriels et les laboratoires. La conformité à certaines normes est très souvent pré-requise dans le référentiel de certification, celui-ci fixant généralement

des critères plus exigeants que les normes. Il existe quelques certifications en éclairage que nous présenterons également dans ce chapitre.

4.3 Exigences de sécurité matérielle des systèmes d'éclairage à LED

4.3.1 Terminologie

Il est nécessaire de préciser ce que revêt la notion de dispositifs d'éclairage à LED. Dans le domaine de l'éclairage, la norme NF EN 12665 [NF EN 126665, 2002] donne la définition des termes de base : la lampe est le dispositif source tandis que le luminaire est un appareil servant à « répartir, filtrer ou transformer la lumière émise d'une ou de plusieurs lampes » et comprenant les circuits auxiliaires et la connectique, à l'exclusion des lampes elles-mêmes et de l'alimentation. Or, la plupart des luminaires à LED sont « intégrés » : la lampe et le luminaire ne sont pas toujours dissociables, la notion de lampes et de luminaires au sens de cette norme n'est donc pas adaptée. Une nouvelle norme spécifique à la terminologie de l'éclairage à LED est en préparation. Il s'agit de la future norme CEI TS 62504 [CEI TS 62504, à paraître] qui précise les définitions applicables aux LED et aux modules de LED. Selon cette norme, on distingue les éléments suivants (cf. Figure 38) :

- la diode électroluminescente (LED) ;
- le module de LED : en complément à une ou plusieurs LED, il comprend d'autres composants (optique, mécanique, thermique, électronique) ;
- le luminaire à LED, qui est constitué au moins d'un module de LED, de connecteurs et de parties assurant la fixation mécanique et la protection de l'ensemble. Il ne comporte pas nécessairement son appareillage d'alimentation ;
- lampes à LED : il s'agit d'un module de LED comprenant une partie électronique et muni d'un culot de lampe normalisé (Edison, baïonnette, GU10, etc.) destiné à être utilisé dans un luminaire. De nombreuses lampes à LED apparaissent sur le marché en vue d'offrir une alternative aux lampes à incandescence et aux lampes fluorescentes compactes.

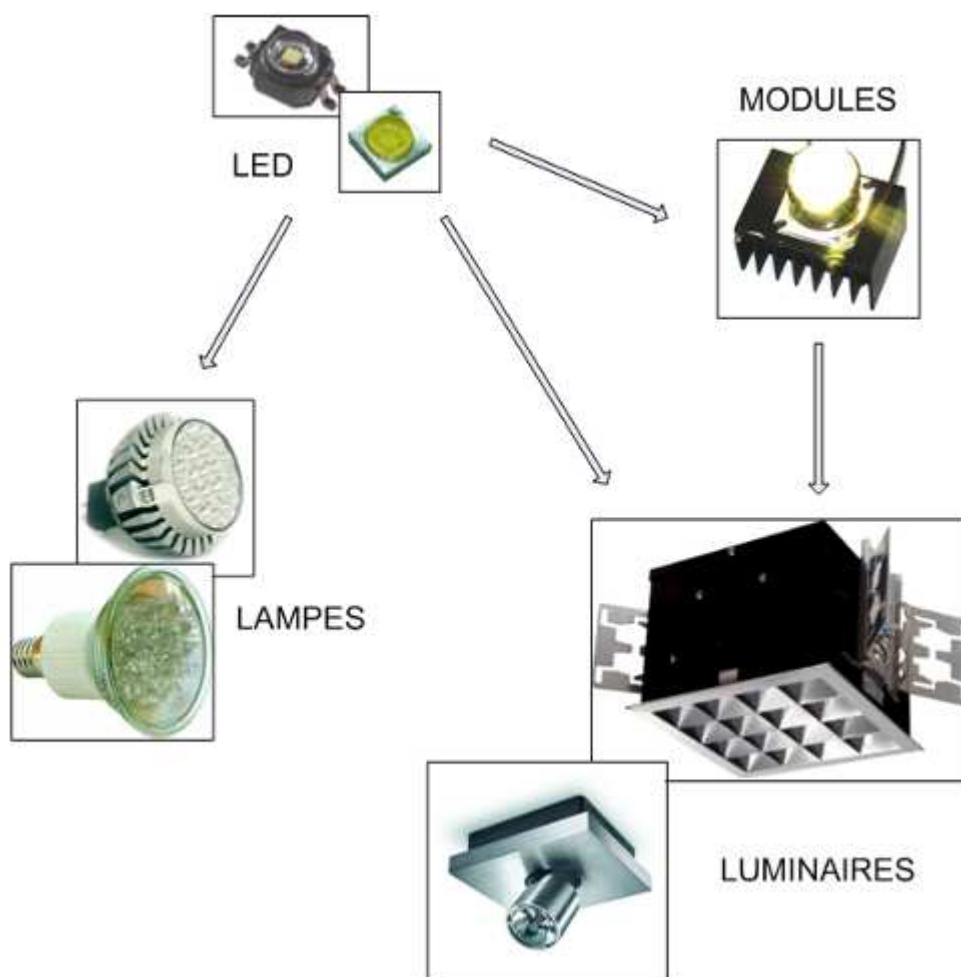


Figure 38 : LED, lampes, modules et luminaires

4.3.2 Cas des modules de LED

4.3.2.1 Exigences de sécurité des modules de LED

Les exigences de sécurité des modules de LED sont décrites dans la norme NF EN 62031 [NF EN62031, 2008]. La norme s'applique aux modules de LED s'alimentant en courant continu jusqu'à 250 V ou en courant alternatif 50 ou 60 Hz jusqu'à 1 000 V. En revanche, elle ne s'applique pas aux modules indépendants qui sont traités comme des luminaires.

Les contrôles correspondant à cette norme reprennent certaines exigences de la norme NF EN 61347-1 [NF EN 61347-1, 2008] : mise à la terre, protection contre le contact accidentel avec des parties actives, résistance à l'humidité et isolement, rigidité diélectrique, résistance à la chaleur, au feu et aux courants de cheminement, résistance à la corrosion. Comme dans la norme NF EN 61347-1, le module de LED doit répondre aux exigences de sécurité dans des conditions normales d'utilisation.

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

4.3.2.2 Exigences de performance des modules de LED

Les exigences de performance des modules de LED ne font l'objet d'aucune norme et d'aucun projet de norme à l'heure où ce texte est rédigé.

4.3.3 Cas des lampes à LED

4.3.3.1 Prise en compte des lampes à LED dans la classification internationale ILCOS des lampes

Le système international de classification des lampes ILCOS est décrit dans la spécification technique CEI TS 61231 [CEI TS 61231, 1999]. Il fait actuellement l'objet du récent projet de norme européenne PR NF EN 61231 [PR NFEN 61231, 2009] qui doit inclure les lampes à LED.

Le code colorimétrique d'une lampe est défini dans le nouveau système ILCOS. Le code colorimétrique 830/4A correspond par exemple à :

« 8 » : indice de rendu des couleurs compris entre 77 et 86 ;

« 30 » : température de couleur proximale de 3 000 K ;

« 4 » : une dispersion de la température de couleur proximale comprise dans une ellipse de 4 unités MacAdam⁴⁸ ;

« A » : une diminution du flux lumineux inférieure ou égale à 10 % du flux initial, évaluée à 25 % de la durée de vie nominale de la lampe.

4.3.3.2 Exigences de sécurité des lampes à LED de substitution

Cette norme est en chantier à la CEI. Il s'agit pour l'instant d'un « *Circulated Committee Draft With Vote* » (CCDV). La future norme sera référencée CEI 62560 [CEI 62560, à paraître]. La date de publication de la norme est prévue pour la fin de l'année 2010. Elle remplacera, pour les lampes de substitution à LED, la norme NF EN 60968 [NF EN 60968, 2001] valable pour les lampes à culot de types baïonnette et Edison (culot à vis).

La nouvelle norme ne s'appliquera pas aux lampes fonctionnant en très basse tension (TBT), correspondant à une tension d'alimentation inférieure à 50 V efficace en courant alternatif et inférieure à 120 V en courant continu. Les lampes à LED de substitution destinées à remplacer les lampes halogènes dichroïques, à culot GU 5,3 par exemple, ne sont pas couvertes. Pour ce type de lampe, très répandu dans les bâtiments (secteur résidentiel, hôtels, magasins, etc.), un avant-projet de norme est en cours d'élaboration à la CEI. Il s'agit du document PR CEI 62663-1 « *Non ballasted single capped LED lamps for general lighting – safety requirements* », dont la version définitive devrait être finalisée en 2011.

4.3.3.3 Exigences de performances des lampes à LED de substitution

La norme correspondante n'a pas été finalisée mais, confrontés à l'arrivée massive de lampes à LED à destination du secteur résidentiel, les acteurs économiques impliqués dans la normalisation ont souhaité rendre accessible un premier document. Il s'agit d'un pré-standard PAS (*public available specification*) dont la référence est CEI PAS 62612 [CEI PAS62612, 2009]. Comme pour la future norme de sécurité des lampes à LED de substitution, cette spécification ne couvre pas les lampes à LED de substitution alimentées en TBT. Ces dernières font l'objet de l'avant-projet de norme PR CEI 62663-2 « *Non ballasted single capped LED lamps for general lighting – performance requirements* », dont la version définitive devrait être finalisée en 2011.

⁴⁸ Une unité MacAdam correspond à une différence de couleur juste perceptible à l'œil nu

La spécification CEI PAS 62612 propose des exigences de performance beaucoup plus strictes et bien plus adaptées aux lampes à LED que la norme en vigueur pour les performances des lampes auto ballastées en général (norme NF EN 60969 [NF EN 60969, 1993]). Les notions de maintenance du flux lumineux, de fin de vie, de dérives colorimétriques sont ici traitées de manière adaptée à la technologie LED. Par ailleurs, la spécification CEI PAS 62612 propose un marquage spécifique lié aux performances du produit. Ce marquage comprend les informations suivantes :

- flux lumineux nominal en lumen ;
- code colorimétrique de la lampe ;
- durée de vie nominale avec le facteur de maintenance du flux lumineux L_x correspondant ;
- taux de lampes défectueuses F_x correspondant à la durée de vie nominale ;
- catégorie de maintenance du flux lumineux ;
- température de couleur nominale ;
- catégorie de tolérance sur la température de couleur nominale ;
- indice de rendu de couleur.

4.3.3.4 Tolérance en température de couleur dans la spécification CEI PAS 62612

La spécification CEI PAS 62612 recommande que les lampes aient une température de couleur proximale choisie parmi six valeurs: 2 700 K, 3 000 K, 3 500 K, 4 000 K, 5 000 K et 6 500 K. Ce paramètre doit être mesuré initialement puis au bout de 25 % de la durée de vie nominale, avec un maximum de 6 000 h. La catégorie de tolérance en température de couleur est définie par la taille de l'ellipse de MacAdam qui inclut les valeurs mesurées de températures de couleur. Ainsi la catégorie 3 correspond à des points de couleur inclus dans une ellipse à 3 unités MacAdam.

4.3.4 Cas des luminaires à LED

4.3.4.1 Exigences de sécurité des luminaires à LED

Les luminaires à LED sont couverts par la norme « luminaires » NF EN 60598-1 ainsi que par la série de normes NF EN 60598-2 [NF EN 60598-1, 2009]. Ces normes sont applicables à tous les types de luminaires, selon leur usage et indépendamment de la technologie des lampes. Les luminaires à LED ne font donc pas l'objet d'un traitement spécifique. Cependant, ils sont couverts au même titre que d'autres luminaires comportant des lampes intégrées et non remplaçables.

Ces normes décrivent les exigences, les essais et les marquages relatifs à la sécurité électrique, thermique et mécanique des luminaires. La partie 2-22 de la norme spécifique sur l'éclairage de secours comprend également des exigences de performance visuelle, quantifiée avec des mesures de luminances.

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

Pour garantir la sécurité des usagers qui sont susceptibles de manipuler le luminaire, la norme NF EN 60598-1 donne des prescriptions de températures de surface maximales admissibles des luminaires. Des protocoles d'essais d'échauffements, normal et anormal, sont proposés à cette fin. Les températures de surfaces maximales admissibles sont spécifiées selon la partie du luminaire considérée, l'accessibilité de ses parties à l'utilisateur, la nature des matériaux utilisés. Par exemple, en fonctionnement normal, les parties destinées à être saisies fréquemment à la main ne doivent pas dépasser 70°C si elles sont métalliques et 85°C si elles sont non métalliques. Pour les luminaires à LED qui dissipent un flux thermique important, il est essentiel que ces critères soient attentivement examinés.

4.3.4.2 Exigences de performances des luminaires à LED

À l'exception des luminaires d'éclairage de secours, il n'existe pas de normes de performances des luminaires, quelle que soit la source qu'ils intègrent (LED ou non). À l'instar des modules de LED, les exigences photométriques et colorimétriques des luminaires à LED ne font donc l'objet d'aucune norme française ou européenne.

4.3.5 Normes de mesures photométriques des dispositifs d'éclairage à LED

4.3.5.1 Recommandations de la CIE

La commission internationale de l'éclairage (CIE) élabore depuis sa création des recommandations sur les mesures photométriques et colorimétriques des lampes et des luminaires. Bien que ces publications ne soient pas des normes, ce sont des documents de référence qu'il convient de citer ici car elles constituent les bases scientifiques des travaux normatifs européens et internationaux.

Dans le domaine de la photométrie des LED, la publication de référence est la recommandation CIE-127 [CIE-127, 2007]. Ce travail ne porte que sur la caractérisation des composants LED et non celle des modules et des luminaires à LED. La publication introduit des géométries standards pour les mesures d'intensité et de flux lumineux. Elle donne également des recommandations sur l'usage de spectroradiomètres pour les caractérisations des LED.

Pour les dispositifs à LED, la publication CIE-177 [CIE-177, 2007] suggère de redéfinir un nouvel indice de rendu des couleurs. En effet, la détermination de l'indice actuel (IRC) est en général mal adaptée aux spectres des LED. D'autres publications de la CIE sont en cours d'élaboration pour préciser les conditions de mesure des caractéristiques photométriques des modules, lampes et luminaires à LED.

4.3.5.2 Norme européenne de mesure des luminaires

La norme NF EN 13032-1 [NF EN 13032-1, 2004] s'appuie sur les travaux de la CIE pour décrire les méthodes de mesures de l'intensité, de la luminance et du flux lumineux des lampes et des luminaires. Les instruments autorisés (goniophotomètres, sphères d'intégration, etc.) sont listés ainsi qu'une structure normalisée de fichiers de données (format CEN).

La méthode de caractérisation des luminaires proposée dans la norme NF EN 13032-1 a été élaborée pour caractériser les luminaires munis de lampes démontables. Cette méthode est une méthode relative (photométrie relative) qui repose sur la connaissance des caractéristiques photométriques intrinsèques des lampes. Les données de mesures sont ainsi exprimées pour 1000 lm de flux de lampe. La mesure permet de connaître le rendement du luminaire, rapport entre le flux lumineux émis par le luminaire muni de sa lampe et le flux lumineux émis par la lampe nue.

On conçoit facilement l'impossibilité de caractériser un luminaire à LED dans ces conditions, puisque ce sont généralement des produits intégrés. Il serait donc nécessaire de disposer d'une norme européenne de photométrie absolue pour les modules et les luminaires à LED.

4.3.5.3 Normes américaines en photométrie et colorimétrie applicables aux LED

Bien que non-applicables en France et sur le territoire de l'Union Européenne, les normes américaines de photométrie des LED méritent d'être consultées car elles définissent des méthodes de mesure très pertinentes, sur lesquelles reposent de nombreux autres travaux, comme les référentiels de certification américaine *Energy Star*, que nous évoquerons plus loin.

On peut citer la norme IESNA LM-79-08 [IESNA LM-79-08, 2008] qui présente notamment des méthodes de photométrie absolue applicables aux luminaires et aux lampes de substitution.

La norme ANSI_NEMA_ANSLG C78.377 [ANSI_NEMA_ANSLG C78.377, 2008] définit les spécifications et les exigences colorimétriques des dispositifs d'éclairage à LED.

La norme IESNA LM-80-08 [IESNA LM-80-08, 2008] décrit une méthode de mesure de la maintenance du flux lumineux des LED et des modules de LED. Elle ne s'applique toutefois pas aux luminaires.

Le projet de norme américaine IESNA TM-21 [IESNA TM-21, à paraître] traite quant à lui de l'extrapolation de la durée de vie des luminaires à LED à partir de mesures effectuées sur des durées plus courtes.

4.3.6 Présentation des certifications applicables aux dispositifs d'éclairage à LED

Il n'existe actuellement en France qu'une seule certification portant sur les luminaires. Il s'agit de la certification NF-Luminaire, étendue en Europe avec la marque ENEC-Luminaire, sous l'impulsion du syndicat français de l'éclairage et du syndicat européen des fabricants de luminaires et de composants électrotechniques associés (CELMA). Ces deux marques sont applicables aux produits dit « professionnels » et ne concernent pas les applications domestiques ou pour le grand public. Cette certification délivre une marque de qualité portant sur la sécurité des produits. Le référentiel de certification repose sur la série de normes luminaires NF EN 60598. Ce référentiel n'inclut pas de critère relatif à la lumière émise. Les luminaires à LED peuvent être certifiés mais les points sensibles comme la durée de vie, la maintenance du flux lumineux et les dérives colorimétriques ne sont pas abordés.

Le référentiel de certification ENEC a récemment été modifié pour inclure les exigences de sécurité photobiologique données par la norme EN 62471 et le rapport technique CEI TR 62471-2.

La certification nord-américaine *Energy Star* couvre quant à elle les luminaires à LED de manière très précise, dans plusieurs référentiels de certification élaborés initialement par le ministère américain de l'énergie (DoE) et à présent par l'agence américaine de protection de l'environnement (EPA). Ces documents présentent des critères de certification qui reposent sur des essais conformes à des normes américaines. Bien que ces normes ne soient pas applicables en France, les référentiels de certification *Energy Star* méritent de retenir notre attention car ils couvrent les points les plus critiques des systèmes d'éclairage à LED :

- efficacité lumineuse en lm / W ;
- flux lumineux, température de couleur, indice de rendu des couleurs ;
- maintenance du flux lumineux et dérives colorimétriques ;
- uniformité spatiale de la couleur ;
- facteur de puissance ;
- températures de surface.

Il existe une initiative comparable au Royaume-Uni menée sous l'égide de l'organisation indépendante *Energy Saving Trust*, subventionnée par le gouvernement britannique. Le référentiel de certification est applicable aux lampes et luminaires de substitution à LED. Il repose sur les normes en vigueur en Europe, tout en mentionnant que la plupart des normes pertinentes dans ce domaine sont encore à l'état de projet ou d'avant projet.

4.4 Exigences de sécurité photobiologique des systèmes d'éclairage à LED

Les rayonnements optiques couvrent les rayonnements ultraviolet, visible et infrarouge; leurs longueurs d'onde sont comprises entre 100 nm et 1 mm. Les différentes normes, directives ou recommandations traitent de la mesure et/ou de l'évaluation des risques sur le domaine spectral compris entre 180 et 3 000 nm. Elles concernent soit l'exposition du public et des travailleurs, soit exclusivement l'exposition des personnes sur les lieux de travail.

Les LED émettent essentiellement un rayonnement visible, c'est pourquoi seules les prescriptions relatives à ce domaine spectral sont prises en compte dans ce qui suit.

4.4.1 Réglementation

4.4.1.1 Directive 2006/25/CE

4.4.1.1.1 Description

La directive 2006/25/CE du parlement européen et du conseil du 5 avril 2006, relative aux prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (rayonnements optiques artificiels) (dix-neuvième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/891/CEE) porte sur les risques qu'entraînent, pour la santé et la sécurité des travailleurs, les effets nocifs sur les yeux et sur la peau de l'exposition à des rayonnements optiques artificiels. Par rayonnement optique artificiel, elle comprend les rayonnements cohérents (lasers) et les rayonnements incohérents émis par toutes les sources autres que les lasers.

Elle fixe notamment :

- Les obligations des employeurs en ce qui concerne :
 - la détermination de l'exposition et l'évaluation des risques (article 4) ;
 - les dispositions visant à éviter ou à réduire les risques (article 5) ;
 - l'information et la formation des travailleurs (article 6) ;
 - la consultation et la participation des travailleurs (article 7).
- Les mesures mises en place pour la surveillance de la santé des travailleurs.

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

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

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

Ces données, limitées au domaine spectral concerné par les LED, sont résumées dans le Tableau 13.

4.4.1.1.2 Guide pratique

L'article 13 de la directive prévoit d'établir un guide pratique relatif aux dispositions des articles 4 et 5 et des annexes I et II.

À la fin de l'année 2007, la Commission européenne a lancé un appel d'offre pour l'élaboration d'un guide des bonnes pratiques non contraignant en vue de la mise en œuvre de la directive 2006/25/CE. Ce guide devrait paraître dans le courant de l'année 2010.

4.4.1.1.3 Transposition

Les états membres doivent mettre en vigueur les dispositions législatives, réglementaires et administratives nécessaires pour se conformer à la présente directive au plus tard le 27 avril 2010.

Au niveau français, cette directive a été transposée le 2 juillet 2010 : décret n°2010-750 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements optiques artificiels.

4.4.2 Normes

4.4.2.1 Norme NF EN 14255

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

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

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

Norme NF EN 14255 – 2

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

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

- le classement en termes de risque, selon des normes telles que EN 12 198 pour les appareils, EN 62471 pour les lampes, etc.
- L'évaluation de l'exposition des personnes déterminée par calcul (à l'aide d'un logiciel) à partir de données telles que le spectre, la géométrie, la durée d'exposition.

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

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

Norme NF EN 14255 – 4

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

4.4.2.2 Norme NF EN 62471 – décembre 2008 et norme internationale CEI 62471 – juillet 2006 : sécurité photobiologique des lampes et des appareils utilisant des lampes.

Ces 2 normes sont identiques, exceptions faites des valeurs limites d'exposition. La norme internationale CEI 62471 fixe des valeurs limites d'exposition aux rayonnements optiques (cf. Tableau 13), alors que la norme NF EN 62471 se réfère aux valeurs limites d'exposition de la directive européenne 2009/25/CE.

Ces normes sont des guides pour l'évaluation de la sécurité photobiologique des lampes et des appareils utilisant des lampes. Elles s'appliquent aux sources de radiations optiques, alimentées électriquement, incohérentes, à spectre large, y compris les LED, à l'exclusion des lasers dans un domaine de longueur d'onde de 200 à 3 000 nm.

Une distinction est faite entre les lampes d'utilisation courante (LUC) destinées à l'éclairage général et les autres lampes à usage plus spécifiques utilisées dans les projecteurs de lumière, les traitements médicaux, processus industriels, etc.

Outre les valeurs limites d'exposition, ces normes spécifient les conditions et procédures de mesure du rayonnement émis par les lampes. Un élément important de ces normes est la classification des lampes en termes de risque. Quatre groupes de risques sont identifiés :

- **Groupe de risque 0 (RG 0)** : sans risque ; aucun danger optique n'est considéré comme raisonnablement probable, même pour des usages continus ou sans restriction ; les exemples les plus typiques sont la plupart des lampes incandescentes et des lampes fluorescentes utilisées pour des applications domestiques ;
- **Groupe de risque 1 (RG 1)** : faible risque ; ces produits sont sans dangers dans la plupart des applications, excepté pour des expositions prolongées ; un exemple de ce type de produit sont les petites lampes torches d'usage domestique ;
- **Groupe de risque 2 (RG 2)** : risque modéré ; ces produits ne posent généralement pas de danger optique réalistes si le réflexe d'évitement limite la durée d'exposition ou si de longues durées d'exposition ne sont pas réalistes ;
- **Groupe de risque 3 (RG 3)** : risque élevé ; ces produits posent un danger potentiel même pour des expositions momentanées et des règles de sécurité pour ces systèmes sont généralement essentielles.

Le classement d'une source dans un groupe de risque est fonction des durées d'exposition maximales admissibles déterminées à partir de l'émission énergétique de cette source dans les différents domaines spectraux et des valeurs limites d'exposition correspondantes.

Les risques photobiologiques correspondant aux éléments de risque de cette norme sont les risques associés aux ultraviolets, à la lumière visible et aux infrarouges. Dans le domaine visible, les risques pour la vision sont les risques liés à la lumière bleue, la norme évoque un risque de lésion rétinienne. La norme précise que pour la lumière bleue, « la réaction photochimique initie une chaîne de réactions biologiques apparemment centrées sur l'épithélium pigmentaire rétinien » et que ce sont des « mécanismes physiopathologiques mal compris ».

Des marquages non-normatifs sont préconisés en fonction du groupe de risque. Une commission à la CEI (Commission Électronique Internationale) travaille actuellement sur la question de la classification, des exigences et du marquage des produits à LED. Il est notamment suggéré que les modules LED classés dans le groupe de risque 2 soient marqué d'un logo alertant de ne pas observer la source de lumière directement. De plus, à la suite du travail de la CEI, un chapitre supplémentaire sera ajouté aux normes NF EN 60598-1 (norme concernant les luminaires), NF EN 62031 (norme concernant les modules à LED), ainsi qu'aux projets de norme CEI 62560 et prCEI 62663-1 (normes de sécurité concernant les lampes à LED).

Méthode de classement des sources en termes de risque par la norme NF EN 62471

Le classement d'une source dans un groupe de risque est fonction des durées d'exposition maximales admissibles. Cette dernière correspond au rapport de la valeur limite d'exposition à la grandeur énergétique déterminée (Tableau 13) dans le domaine spectral considéré. Pour le domaine visible (L_B , E_B), les critères de classement en groupes de risque sont donnés dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Classement en groupe de risque lié à la lumière bleue pour le domaine visible (L_B , E_b) d'après la norme NF EN 62471

Groupe	Durée d'exposition maximale admissible t
Groupe de risque 0	$t \geq 10\,000\text{ s}$
Groupe de risque 1 (faible risque)	$100\text{ s} \leq t < 10\,000\text{ s}$
Groupe de risque 2 (risque modéré)	$0,25\text{ s} \leq t < 100\text{ s}$
Groupe de risque 3 (risque élevé)	$t < 0,25\text{ s}$

Pour la norme NF EN 62471, pour des lampes d'usages courants il faut caractériser le rayonnement accessible dans un plan où l'éclairement est égal à 500 lx. Toutefois, cette distance ne sera pas inférieure à 200 mm de la source lumineuse même si les 500 lx ne sont pas atteints à cette distance. Pour les lampes d'usage spécifiques, il faut caractériser le rayonnement à 200 mm. Dans ce plan, l'éclairement énergétique spectrique ($\text{W} / \text{m}^2 / \text{nm}$) ou la luminance énergétique spectrique ($\text{W} / \text{m}^2 / \text{sr} / \text{nm}$) sont mesurés sur tout le domaine spectral d'émission de la source dans des conditions spécifiques de mesures.

Pour la mesure d'éclairement, l'angle d'acceptance est inférieur à 11 mrad. Pour la luminance spectrique, on doit mesurer une luminance « moyenne » dans un angle d'acceptance de 1,7 à 100 mrad.

La Figure 39 présente les principaux paramètres décrivant les conditions d'observation pour l'évaluation de la luminance énergétique selon la norme NF EN 62471, pour l'évaluation du risque lié à la lumière bleue.

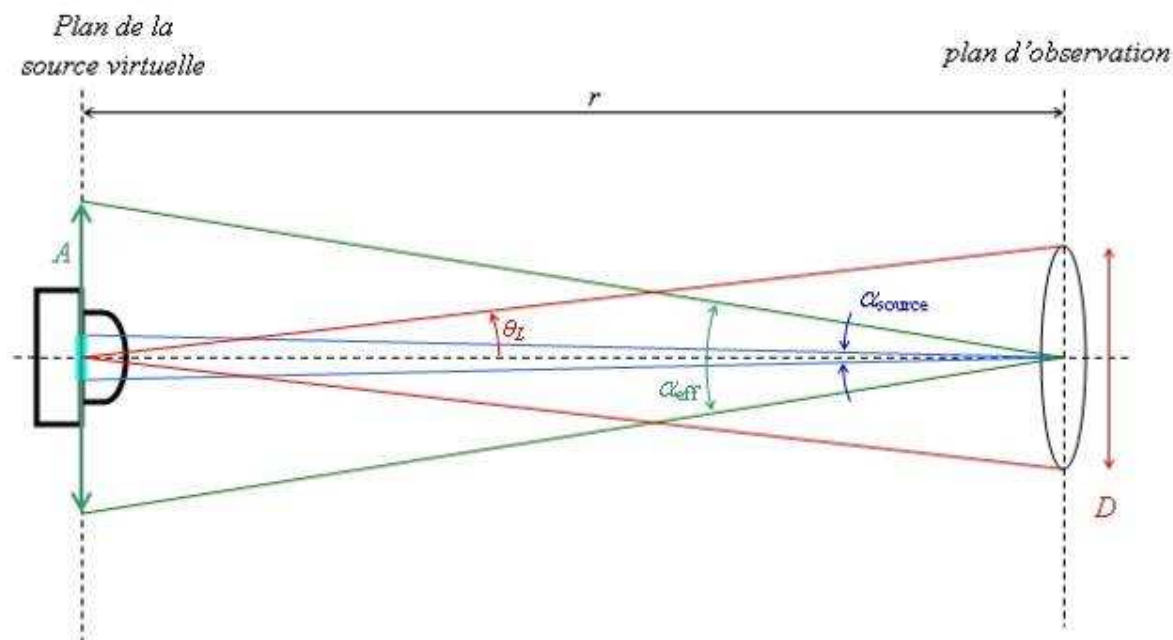


Figure 39 : Conditions d'observation pour l'évaluation de la luminance énergétique selon la norme NF EN 62471 (2008)

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

- D : diamètre pupillaire ;
- r : distance d'observation ;
- 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 α_{eff} 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 $0,011 \cdot (t/10)^{1/2}$ rad ;
- pour t compris entre 10 s et 100 s, le champ de vision effectif est égal à 0,011 rad ;
- pour t compris entre 100 s et 10 000 s, le champ de vision effectif est égal à $0,0011 \cdot t^{1/2}$ rad ;
- pour $t \geq 10\,000$ s, le champ de vision effectif est égal à 0,1 rad.

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

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

Dans le cas où la source a une dimension apparente plus petite que l'angle d'acceptance applicable, la luminance spectrique moyenne mesurée sera inférieure à la luminance spectrique réelle de la source (cf. CEI TR 62471-2 août 2009).

En fonction des risques définis par bande spectrale, des fonctions de pondérations sont appliquées avant intégration sur le domaine spectral considéré. Ces valeurs d'éclairement et de luminance intégrés sont comparées aux limites d'exposition des différents groupes de risque.

4.4.3 Recommandations

4.4.3.1 Icnirp

L'Icnirp (*Commission internationale sur la radioprotection non ionisante*) est un groupe d'experts indépendants, non affiliés à des entreprises commerciales ou industrielles, constitué pour évaluer l'état des connaissances des effets des rayonnements non ionisants (RNI) sur la santé. C'est une organisation non gouvernementale officiellement reconnue par l'OMS (organisation mondiale de la santé), l'ILO (organisation internationale du travail) et l'Union européenne, dans le domaine des rayonnements non ionisants.

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

Dans le domaine des rayonnements optiques incohérents, L'Icnirp a publié en avril 1997 un article intitulé « *GuideLines on limits of exposure to broad-band incoherent optical radiation (0.38 to 3 μm)* », qui propose, entre autre dans le domaine visible, des limites d'exposition. Ces limites

s'appuient sur les études de Ham *et al.* 1976 [Ham *et al.*, 1976] qui montrent qu'une exposition aux courtes longueurs d'onde (violet-bleu) du spectre visible peut entraîner des lésions rétinienne dues à des réactions photochimiques. Ce risque est couramment nommé « lésion rétinienne due à la lumière bleue » [Sliney and Wolbarsht, 1980]. Les grandeurs déterminées dans ce domaine spectral ainsi que les limites d'exposition correspondantes sont données dans le Tableau 13.

Remarque : Un groupe d'expert travaille actuellement sur une révision du guide de l'Icnirp.

De point de vue protection, les LED ont souvent été traitées de 2 manières, soit comme des lasers (sur la base par exemple de la norme NF EN 60 825 - 1) soit comme des lampes (à l'aide par exemple de la norme NF EN 62471). Devant cette confusion sur la méthode d'évaluation des risques présentés par les LED, l'Icnirp a réuni un groupe d'experts qui a rendu son rapport en janvier 2000, dans une publication intitulée « *Icnirp statement on light-emitting diodes (LED) and laser diodes: implication for hazard assessment* », L'Icnirp a fait le point sur les méthodes de détermination des risques à utiliser selon qu'il s'agit de LED ou de diodes laser. Il en ressort que, compte tenu de la bande spectrale des LED plus large que celle des lasers, les LED doivent être traitées comme des sources de rayonnement optique incohérent. De ce fait, l'évaluation des risques doit s'effectuer sur la base du guide cité ci-dessus. Pour les LED courantes émettant dans le visible, seul le risque « lumière bleue » est à prendre en compte.

4.4.3.2 ACGIH

L'ACGIH (*American Conference of governmental industrial Hygienist*) est une organisation professionnelle. Ses membres sont des hygiénistes du travail et des spécialistes de la sécurité et de la santé au travail. L'ACGIH n'est pas un organisme de normalisation, mais édite des limites d'exposition aux substances chimiques et aux agents physiques ainsi que des indices d'exposition biologiques. Ces valeurs limites d'exposition s'appuient sur des documents scientifiques publiés et sont mises à jour chaque année. Les grandeurs énergétiques se rapportant à la lumière bleue et les valeurs limites associées proposées par l'ACGIH dans le guide de 2008 sont résumées dans le Tableau 13.

4.4.3.3 Rapport technique de la CEI

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

Le paragraphe 5.2.2. de ce rapport technique précise que les fabricants de lampes et de LED doivent évaluer la luminance de la source en utilisant un champ de vision de 1,7 mrad. Pour les LED, la mesure doit être faite dans des conditions « maximales » (par exemple, un courant d'alimentation pris à sa valeur maximale). Pour les lampes d'éclairage général, la distance à laquelle le risque doit être évalué est donnée par un niveau d'éclairement de 500 lx. Lorsqu'il s'agit de lampes à usages multiples, ou de lampes pour lesquelles il n'existe pas d'exigences normatives liées à leur application spécifique, la distance d'évaluation de risque doit être égale à 200 mm. Ce cas est supposé correspondre au pire cas d'observation. Les composants LED ainsi que les modules de LED étant des sources à usages multiples, la distance d'évaluation du groupe de risque doit être prise sans ambiguïté à 200 mm.

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

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

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

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

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

Pour remarque, aucune base de temps n'est donnée pour évaluer dans quelle catégorie se situe une application particulière.

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

Par exemple, si une lampe de groupe de risque 3 est incorporée dans un afficheur (exposition à long terme intentionnelle), l'afficheur est acceptable si son groupe de risque est 0, ce qui peut être atteint en garantissant la distance minimale de risque 0 (distance de sécurité).

Le tableau 3 de la page 19 de ce guide précise que des luminaires d'éclairage général incorporant des sources non exemptes de risque photobiologique doivent être associés à une distance de sécurité minimale et/ou un accès contrôlé de manière à ce que, dans ces conditions, le groupe de risque du luminaire soit le groupe 0 (sans risque).

Ce rapport technique propose également des critères pour le marquage des lampes pour la sécurité photobiologique. Vis-à-vis du risque lié à la lumière bleue, il est proposé que le marquage ne soit pas requis pour les groupes de risque 0 et 1. Par contre, pour les lampes appartenant au groupe de risque 2, le marquage suivant est proposé :

CAUTION⁴⁹ : Possibly hazardous optical radiation emitted from this product.

Pour le groupe de risque 3, toujours vis-à-vis de la lumière bleue, le marquage proposé est le suivant :

WARNING⁵⁰ : Possibly hazardous optical radiation emitted from this product.

Les marquages devraient être apposés sur les produits et devraient figurer dans la notice d'utilisation. Des symboles d'avertissement décrits dans la norme CEI 60417-1 devraient être utilisés.

Pour toutes les lampes, ainsi que les systèmes utilisant des lampes, qui n'appartiennent pas au groupe de risque 0, le rapport technique CEI TR 62471-2 indique que les informations suivantes devraient être données à l'utilisateur :

- une déclaration que la lampe ou le système de lampe n'est pas exempt de risque et que le risque de l'observateur dépend du mode d'installation et d'utilisation du produit ; Le détail des types de risque qui conduisent à un groupe de risque supérieur à 0 ;
- les valeurs d'exposition et les distances de risque, avec un graphique optionnel présentant l'exposition en fonction de la distance ;
- les distances de risques pour tous les groupes de risques inférieurs au groupe de risque nominal ;

⁴⁹ « CAUTION » : « AVERTISSEMENT » en français

⁵⁰ « WARNING » : « DANGER » en français

- une liste d'instructions adéquates pour l'assemblage, la manipulation, l'installation, la maintenance et l'utilisation dans des conditions de sécurité. Des avertissements clairs doivent être donnés pour éviter l'exposition potentielle aux rayonnements présentant des risques ;
- des conseils et des avertissements sur les risques prévisibles dus à de mauvaises pratiques, défauts de fonctionnement et certains modes de défaillance spécifiques ;

En particulier, l'explication du marquage photobiologique concernant le groupe de risque 2 pour la lumière bleue est la suivante :

Do not stare⁵¹ at operating lamp. Maybe harmful to the eyes

Pour le groupe de risque 3, l'explication du marquage est la suivante :

Do not look⁵² at operating lamp. Eye injury may result

Il est important de noter que les exigences de sécurité photobiologique devront être intégrées par la CEI et le CENELEC dans les normes de sécurité relatives aux produits. En l'occurrence, pour les systèmes de LED, les révisions des normes CEI 62560 (lampes LED auto ballastées), prCEI 62663-1 (lampes LED non ballastées fonctionnant en TBT), CEI 62531 (modules de LED) et CEI 60598 (Luminaires) sont attendues à court terme.

4.4.4 Méthodes utilisées pour déterminer les niveaux d'exposition

Les grandeurs énergétiques et valeurs limites d'exposition associées, proposées par les normes, directives et autres organisations, pour évaluer les risques engendrés par les LED sont résumées dans le Tableau 13. Il est à noter que ces valeurs limites sont toujours fixées pour des journées de travail de 8 heures. En outre, étant issues de données expérimentales, elles servent de guide pour évaluer l'exposition aux rayonnements optiques mais ne constituent pas une limite absolue entre une zone de danger et une zone de sécurité.

L'évaluation des risques dus à la lumière bleue s'effectue en déterminant la luminance énergétique de la lumière bleue L_B de la source ou encore l'éclairement énergétique E_B de la lumière bleue dans le cas des sources de petites dimensions (angle sous tendu par la source inférieur à 0,011 rad). Ces 2 grandeurs sont calculées à partir de :

- L_λ ($W / m^2 / sr / nm$) : luminance énergétique spectrique de la source,
- E_λ ($W / m^2 / nm$) : éclairement énergétique spectrique produit par la source,
- $\Delta\lambda$ (nm) : largeur de bande
- t (s) : durée pendant laquelle la personne fixe la source.
- B_λ : Fonction de pondération spectrale de la lumière bleue, présentée à la Figure 40.

Remarque : L'Inirp et l'ACGIH prévoient de remplacer la fonction B_λ par la fonction A_λ dans le cas de personnes aphakes.

⁵¹ « Do not stare » : « ne pas fixer » en français, « Do not look » : « Ne pas regarder » en français

⁵² « Do not look » : « Ne pas regarder » en français

Tableau 13 : Limites d'Exposition à la lumière bleue, fixées par la directive 2006/25, les normes et autres organisations

Domaine spectral	Grandeurs énergétiques	Limite d'Exposition	
		Directive, Icnirp, NF EN 62471 (2008)	CEI 62471 (2006), ACGIH
300 - 700 nm	Luminance énergétique $L_B = \sum_{300}^{700} L_{\lambda} \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$ W / m ² / sr pour $\alpha \geq 0,011\text{rad}$	$L_B \leq \frac{10^6}{t}$ pour $t \leq 10000\text{s}$	$L_B \leq \frac{10^6}{t}$ pour $t \leq 10000\text{s}$
		$L_B \leq 100$ pour $t > 10000\text{s}$	$L_B \leq 100$ pour $t > 10000\text{s}$
	Éclairement énergétique $E_B = \sum_{300}^{700} E_{\lambda} \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$ W / m ² pour $\alpha \leq 0,011\text{rad}$ (1) (2)	$E_B \leq \frac{100}{t}$ pour $t \leq 10000\text{s}$	$E_B \leq \frac{100}{t}$ pour $t \leq 100\text{s}$
		$E_B \leq 10^{-2}$ pour $t > 10000\text{s}$	$E_B \leq 1$ pour $t > 100\text{s}$

- (1) Directive : « Pour la fixation du regard sur de très petites sources d'une amplitude inférieure à 11 mrad, L_B peut être converti en E_B . Normalement, cela ne s'applique qu'aux instruments ophtalmologiques ou à un œil stabilisé lors de l'anesthésie. La durée maximale pendant laquelle on peut fixer une source se détermine en appliquant la formule suivante : $t_{\max} = 100 / E_B$, E_B s'exprimant en W / m². Du fait des mouvements des yeux lors de taches visuelles normales, cette durée n'excède pas 100 s. »
- (2) Icnirp : Le critère d'évaluation des très petites sources pour des durées d'exposition supérieures à 100 s est normalement utilisé pour les instruments ophtalmologiques ou pour un œil stabilisé lors de l'anesthésie. Pour les autres sources, l'utilisation de la mesure de la luminance énergétique avec un angle d'admission (champs de vision) limité à $\alpha_{\min} = 0,011\text{ rad}$ quand $t > 100\text{ s}$ lequel augmente linéairement avec le temps, jusqu'à $\alpha = 0,2\text{ rad}$ à 10 000 s, est l'analyse la plus appropriée. En effet, à cause des mouvements des yeux lors de taches visuelles normales, la valeur maximale du temps pendant lequel une source brillante de dimension correspondant à l'angle sous tendu minimal, est de 100 s.

Le tableau ci-dessus semble montrer des différences dans les limites d'exposition pour le risque à la lumière bleue. L'analyse des notes accompagnant ces limites montre qu'elles sont identiques.

La norme CEI 62471, dans le cas du risque de la lumière bleue, exprime les limites pour le cas général et précise dans une note de nouvelles limites pour le cas particulier d'un œil stabilisé lors d'une anesthésie.

La norme NF EN 62471, en faisant référence aux limites de la directive, exprime les limites pour le cas particulier d'un œil stabilisé lors d'une anesthésie et, dans une note, précise les limites pour le cas général.

Remarques :

- Mettre dans le tableau principal des limites pour un cas particulier pourrait conduire à des erreurs dans l'estimation des risques.
- La directive concerne l'exposition des travailleurs. Il ne paraît pas logique de présenter dans le tableau des valeurs pour un œil stabilisé lors d'une anesthésie.

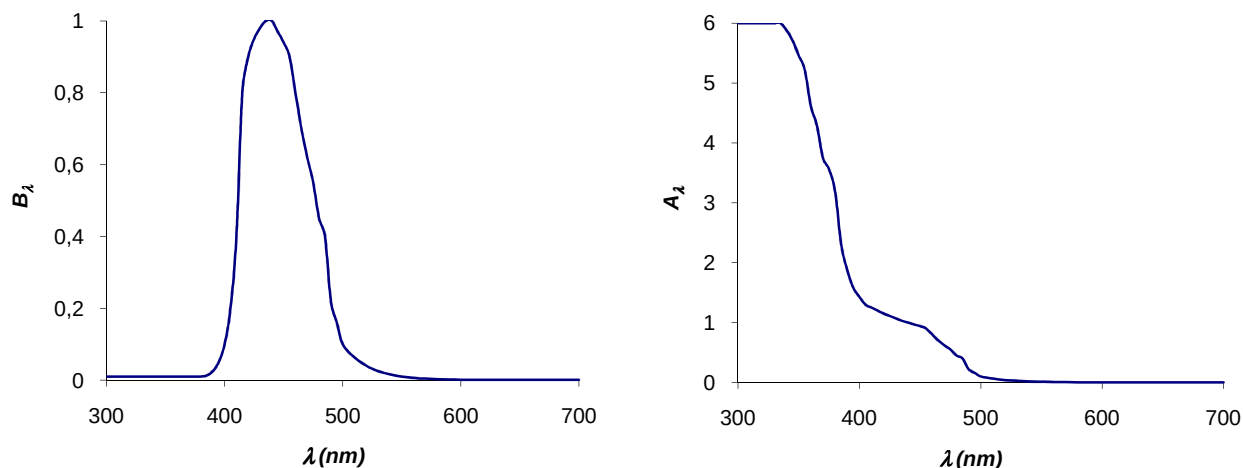


Figure 40 : Fonctions de pondération spectrale B_λ et A_λ (cas de personnes aphakes) du risque « Lumière bleue »

4.4.5 Commentaires sur les valeurs limites d'exposition

Les valeurs limites d'exposition (VLE) sont calculées pour une exposition à une source de lumière dans le champ de vision pour une journée de travail de 8 heures. Elles sont issues de données expérimentales et en pratique pondérées par un facteur minorant de 5 à 10 fois les énergies nécessaires à produire des lésions observables.

En pratique, ces expériences ont déterminé les valeurs limites d'énergie capables d'induire des lésions du fond d'œil observables macroscopiquement par fundoscopie après une exposition unique à la lumière. Ces lésions correspondent à un blanchiment de la neurorétine, secondaire à un œdème des couches rétinienne superficielles. Cet œdème survient en réponse à des modifications thermiques entraînant une rupture des barrières oculaires ou lors de lésions neuronales conduisant à un gonflement cellulaire.

Deux remarques doivent être prises en compte dans l'interprétation de ces valeurs limites :

Ces expériences n'ont pas été menées de sorte à évaluer des lésions non visibles macroscopiquement. Les effets de stress oxydatifs (modification de protéines cellulaires, lésions de l'ADN, accumulation de produits de dégradation), les altérations des couches profondes de la rétine (en particulier de l'épithélium pigmentaire de la rétine) n'ont pas été évaluées. Ces lésions au niveau cellulaire ne se traduisent pas par une anomalie cliniquement observable au fond d'œil. Ainsi, des lésions en dessous du seuil macroscopique peuvent subsister et se cumuler en fonction d'expositions répétées.

Les travaux de Ham [Wolbarsht, 1989], réalisés sur des singes (très faible nombre d'animaux) ont clairement montré que des expositions répétées à des énergies lumineuses en dessous des seuils capables d'induire des lésions observables macroscopiquement (10-30% de ces énergies), induisent des lésions irréversibles après 14 à 21 jours d'exposition. Ces lésions sont strictement dépendantes des courtes longueurs d'onde (440 – 460 nm) et apparaissent par dépassement des mécanismes de réparation endogènes.

Les VLE sont essentielles pour déterminer des seuils d'exposition à ne pas dépasser pour éviter des « brûlures » de la rétine.

Les VLE ne sont pas calculées pour l'évaluation des effets qui, cumulés, peuvent induire des lésions rétinienne irréversibles à long terme. Les lésions photochimiques seront d'autant plus dangereuses que le cristallin ne filtre pas les courtes longueurs d'onde (enfants) ou que les pigments photosensibles sont plus nombreux (âges et maculopathies liées à l'âge par exemple) ou que les mécanismes de réparation sont altérés.

L'évaluation des risques dus à la lumière bleue s'effectue en déterminant la luminance énergétique de la lumière bleue L_b de la source, calculée à partir de la fonction $B(\lambda)$.

Cette fonction est essentielle car elle va intégrer le risque relatif en fonction de l'exposition à des courtes longueurs d'onde, plus dangereuses pour la rétine.

Cependant, les mêmes remarques que précédemment s'appliquent pour le calcul de cette fonction.

Au vu des connaissances actuelles, les VLE en vigueur ne permettent pas d'évaluer le risque d'exposition chronique quotidienne. La classification des lampes suivant les niveaux ne prend pas en compte les risques au long cours des expositions cumulées. Cela signifie que des expositions répétées et prolongées pourraient induire un risque cumulé potentiellement supérieur à celui évalué par les VLE.

4.5 Exigences de sécurité sanitaire liées aux champs électromagnétiques émis par les systèmes d'éclairage à LED

Comme tous les dispositifs rayonnants, les dispositifs d'éclairage à LED ne doivent pas exposer les usagers à des niveaux de champs électromagnétiques qui présentent des risques pour la santé. À l'inverse des exigences de compatibilité électromagnétique, les valeurs limites de champs ne dépendent pas de l'équipement considéré. Elles ont été définies au niveau international par l'Icnirp (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) [Icnirp, 1998]. Ces valeurs limites sont données pour les composantes électrique et magnétique du champ. Elles dépendent de la bande de fréquence considérée et ont été établies sur la base des effets sanitaires provoqués par l'interaction des champs avec les tissus humains.

La norme récemment adoptée NF EN 62493 [NF EN 62493, 2008] propose une méthode physique d'évaluation de l'exposition produite par les équipements d'éclairage : conditions de mesure, protocole, analyse des résultats, critères de conformité aux recommandations de l'Icnirp. Ces critères concernent les densités de courant induit respectivement par les composantes électriques et magnétiques pour des fréquences allant de 20 kHz à 10 MHz. De plus, le débit d'absorption spécifique (DAS) est évalué pour les fréquences comprises entre 100 kHz et 300 MHz. Le protocole d'essai repose sur l'utilisation d'un modèle de tête de Van der Hoofden⁵³ au-dessus duquel est placé le luminaire ou la lampe à tester. Les distances entre le luminaire et la sphère conductrice représentant la tête sont spécifiées en fonction de l'application typique du matériel à tester.

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

⁵³ Modèle de tête de Van der Hoofden : sphère métallique de dimension comparable à celle de la tête, utilisée pour des mesures de densité de courants induits par des champs électromagnétiques.

4.6 Conclusions

Dans cette partie, nous avons dressé le panorama des normes en vigueur relatives aux dispositifs d'éclairage général à LED. Nous avons également évoqué les réglementations et les certifications applicables, qui sont basées essentiellement sur ces normes.

Le défi de la normalisation dans le domaine de l'éclairage à LED est de réussir à accompagner les développements très rapides de cette technologie. En effet, établir des normes est un processus généralement long qui nécessite une connaissance approfondie des produits. Il existe à l'heure actuelle un net décalage entre les nouveaux produits disponibles sur le marché et les normes destinées à garantir leurs performances et leur sécurité ainsi que la conformité de leur installation.

Ainsi, il n'existe pas de normes de performances sur les modules de LED et sur les luminaires à LED. Les normes relatives aux lampes à LED sont à l'état de projet ou d'avant projet, alors que le marché est inondé de produits de ce type. Certains manques sont à déplorer, comme l'absence de norme sur les dispositifs à barrettes de LED visant à remplacer les tubes fluorescents, qui peuvent poser des problèmes de sécurité lors de la substitution. Dans le domaine des performances colorimétriques des lampes, on spécifie des tolérances sur la température de couleur proximale, mais pas sur la déviation du point de couleur par rapport à la courbe du corps noir. Ces déviations font apparaître des teintes de lumière souvent jugées indésirables. On rappelle également que la plupart des lampes à LED que l'on trouve actuellement dans le segment domestique échappent à la classification et au marquage énergétique, ainsi qu'au règlement européen EuP en vigueur.

Les normes de sécurité photobiologique, quant à elles, ne définissent pas encore d'exigence en ce qui concerne le marquage et les préconisations d'emploi. Elles définissent seulement des recommandations ou conseils à l'intention des fabricants de systèmes incorporant des LED notamment.

La normalisation européenne est quelque peu en retard par rapport à la normalisation nord-américaine qui a notamment déjà produit les documents concernant les mesures photométriques et colorimétriques des dispositifs à LED.

Le retard de la normalisation électrotechnique européenne concernant la sécurité des dispositifs utilisant des LED a ouvert le marché à des produits possédant le marquage CE mais dont il n'est pas possible de vérifier que toutes les exigences de sécurité soient respectées. Cette situation devrait toutefois se régulariser, puisque l'ensemble des normes concernées sera finalisé en 2011.

Le marquage CE implique également que les produits respectent la directive européenne sur les rayonnements optiques. Or, cette disposition n'est implémentée que depuis le 27 avril 2010, ce qui implique une grande vigilance vis-à-vis des produits actuellement disponibles sur le marché.

Le développement de l'éclairage à LED étant une problématique mondiale dont les industries sont des multinationales, il semble aujourd'hui primordial d'harmoniser les normes au niveau international afin de promouvoir la qualité et la sécurité des produits de manière coordonnée dans chaque continent.

5 Effets sanitaires liés aux LED

Résumé du chapitre

Différents risques et dangers potentiels ont été identifiés :

- risques oculaires liés à l'intensité des LED et de la composante bleue de la lumière émise par les LED ;
- l'éblouissement avec des risques de perte du contrôle visuel (conduite, activité professionnelle) ;
- la perturbation des rythmes circadiens et de la contraction pupillaire (perturbation thymique et des rythmes veille / sommeil et éclairage accru de la rétine) ;
- risques pour la peau ;
- effet stroboscopique de la lumière issue des LED (risque epileptogène) ;
- dangers environnementaux liés aux composés d'indium utilisés dans la fabrication des LED ;

L'évaluation et la quantification des risques énumérés doit s'appuyer sur des normes et des méthodes validées. Ces dernières ne sont disponibles que pour l'évaluation du risque de la lumière bleue, réalisé selon la norme NF EN 62471 de sécurité photobiologique. Néanmoins, le groupe de travail souligne que cette norme est mal adaptée aux luminaires à LED. En effet, selon leur usage, les risques présentés par les LED peuvent être évalués selon les deux méthodes proposées par la norme (distance de 0,20 m ou qui produit un éclairage de 500 lux). Or, les mesures effectuées par le groupe de travail montrent que le classement dans un groupe de risque d'un même produit peut varier selon la méthode de mesure choisie.

De plus, compte tenu des connaissances actuelles, les valeurs limites d'exposition ne permettent pas de prendre en compte l'exposition chronique quotidienne, en ce qui concerne les risques liés à la lumière bleue. L'objectif ici est donc simplement de situer les LED par rapport aux autres types de lampes.

Risques liés à la lumière bleue

Dans son évaluation du risque lié à la lumière bleue, le groupe de travail s'est intéressé à deux cas de figures :

- des **LED ou assemblages de LED nues**
- des **LED intégrées dans un luminaire**.
- **Cas des LED nues**

Des LED bleu roi (*maxima* d'émission compris entre 435 et 460 nm), des LED blanc froid (5 100 à 8 400 K), des LED blanc neutre (3 800 à 4000 K) et des LED blanc chaud (2 600 à 3 400 K) ont été évaluées.

- **LED nues isolées**

Les LED étudiées correspondent aux dernières générations de LED monopuces. Les risques ont été évalués à la distance d'observation de 200 mm. Parmi ces LED, aucune ne présente un risque élevé (groupe de risque 3), correspondant à une durée limite d'exposition inférieure à 0,25 s. En revanche, les LED bleu roi et blanc froid peuvent appartenir au groupe de risque 1 (risque faible) ou 2 (risque

modéré), selon leur niveau de flux, les VLE pouvant dans certaines conditions être dépassées au delà de quelques secondes d'observations. Les LED blanc neutre 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.

- **Assemblages de LED nues**

On a considéré ici un ensemble de LED disposées régulièrement sous la forme d'une matrice rectangulaire. Deux types d'assemblage ont été étudiés :

- un assemblage dense de type « *multichip* » dans lequel les puces sont disposées côte à côte, avec très peu d'espacement entre elles ;
- un assemblage peu dense de type « module de LED » dans lequel les LED sont bien espacées entre elles.

- Assemblage dense de type « *multichip* »

On constate qu'une LED *multichip* bleu roi de faible luminance est susceptible d'être classée dans le groupe de risque 2. De même, les LED *multichip* blanc froid et blanc neutre sont également susceptibles d'être classées dans le groupe de risque 2.

En revanche, les LED *multichip* en blanc chaud, dont la luminance ne dépasse pas 2.10^7 cd / m², n'atteindront jamais le groupe de risque 2, quelles que soient leur taille et la distance d'observation considérée. Dans les pires cas, ces LED seront donc classées dans le groupe de risque 1.

- Assemblage peu dense de type « module de LED »

On constate que des matrices de 10 x 10 LED peuvent être classées dans des groupes de risque de niveau inférieur au groupe de risque d'une LED prise individuellement. En effet, lorsque l'évaluation de risque est effectuée selon la norme NF EN 62471, la distance d'observation à considérer (lampe d'usage courant) n'est plus de 200 mm. Celle-ci doit correspondre à un éclairage fourni de 500 lx. Pour un assemblage d'un grand nombre de LED, cette distance est donc beaucoup plus grande que 200 mm (elle est typiquement égale à quelques mètres). Par conséquent, il est fondamental que le groupe de risque donné par la norme NF EN 62471 soit toujours associé à une distance d'observation précisée explicitement, de manière à éviter qu'une observation à plus courte distance n'augmente le groupe de risque (notion de distances minimales de sécurité).

Quel que soit le type d'assemblage de LED ou de puces, les ensembles de LED émettant un rayonnement de type « blanc chaud » ($2\,600\text{ K} \leq T_c \leq 3\,400\text{ K}$) et dont la luminance ne dépasse pas $2,2.10^7$ cd / m² sont associées à des durées limites d'exposition supérieures à 100 s, correspondant au groupe de risque 0 (sans risque) ou 1 (faible risque).

- **Cas de LED intégrées dans un luminaire**

Le groupe de travail s'est intéressé à 3 types de lampes à LED de 3, 10 et 15 W ainsi qu'à 2 autres systèmes d'éclairage : une lampe fluorescente compacte de 20 W et une lampe halogène dichroïque de 50 W ayant un angle d'ouverture de 38°.

Dans le cas présent, les LED peuvent être classées indifféremment dans la catégorie des lampes d'usage courant et dans la catégorie des lampes d'usage spécifique.

Il apparaît que la LED de puissance 3 W mesurée appartient au groupe de risque 1 (faible risque) quelle que soit la distance de mesure. En revanche, la LED 10 W mesurée est classée faible

risque (groupe de risque 1) à une distance qui produit 500 lx et risque modéré (groupe de risque 2) à une distance de 200 mm. De même, le luminaire 15 W est classé sans risque à une distance qui produit 500 lx et faible risque (groupe de risque 1) à la distance de 200 mm.

On retrouve ici l'ambiguïté qui peut exister dans l'évaluation de risque selon la norme NF EN 62471, en fonction de la distance d'observation considérée (200 mm ou distance d'éclairement de 500 lx).

Comparativement, les lampes fluorescentes et halogènes dichroïques d'utilisation courante sont classées sans risque (groupe 0).

Éblouissement

Tout luminaire doit pouvoir être observé dans des conditions qui ne procurent ni incapacité, ni gêne visuelle. L'incapacité est due à l'apparition d'un voile lumineux diffus aux alentours immédiats de la source, qui diminue les contrastes. La gêne se manifeste la plupart du temps par une sensation d'éblouissement que l'on doit à la luminance de l'objet « luminaire ». Pour l'éclairage général, on utilise l'indice UGR (*Unified Glaring Rate*) pour estimer le niveau d'éblouissement gênant dans une pièce. Cet indice est mal adapté pour des sources de lumière de petite taille, qui sont vues sous un angle inférieur à 1,2° (un diamètre de 2 cm observé à 1 m de distance, par exemple).

Pour tenter d'estimer le niveau d'éblouissement d'un système d'éclairage à LED, on peut s'appuyer sur sa luminance. Si l'on considère qu'une luminance supérieure à 10 000 cd / m² commence à poser des problèmes dans des conditions typiques d'éclairage intérieur, il a été mesuré des luminances supérieures à 10 000 000 cd / m² sur certaines LED d'une puissance de 1 W. Ces valeurs particulièrement élevées peuvent, sous certaines conditions d'observation, avoir des conséquences indirectes sur la sécurité de l'observateur. Citons par exemple la conduite automobile, l'utilisation de machines-outils ou chutes de hauteur ou de plain-pied consécutives à l'éblouissement provoqué par l'utilisation de projecteurs scéniques.

Rythmes circadiens et contraction pupillaire

L'horloge biologique et la contraction pupillaire sont régulées par des longueurs d'ondes situées dans le bleu. Ce sont en effet les longueurs d'onde comprises aux alentours de 480 nm qui, chez l'homme, induisent la suppression de la production de mélatonine (hormone de l'horloge biologique). Le recyclage de la mélanopsine s'effectuerait par stimulation à des longueurs d'onde d'environ 580 nm.

Les LED présentent un spectre fondamentalement différent de celui de la lumière naturelle, avec un déséquilibre entre 460 nm et 480 nm. Ceci expose à un risque de dérèglement de l'horloge biologique et par conséquent des rythmes circadiens. Ces risques sont accrus par des LED de températures de couleur élevées (blanc froid).

Le dérèglement de l'horloge peut induire des conséquences métaboliques, thymique (dépression, troubles de l'humeur), des troubles du sommeil, etc.

Par ailleurs, l'activation de la contraction pupillaire pourrait également être réduite par la déficience de rayonnements vers 480 nm, conduisant à un éclairage rétinien total plus important et une augmentation des risques associés de la lumière bleue.

Effet stroboscopique

La lumière des LED peut présenter des fluctuations rapides et de grande amplitude liées à leur mode d'alimentation.

Cette fluctuation de la lumière, liée au fait que les LED ne présentent qu'une très faible rémanence, est le plus souvent imperceptible par le système visuel. En situation de mouvement

ou dans des espaces confinés avec des variations périodiques de contraste, elle peut être responsable d'effets stroboscopiques. Ces effets stroboscopiques peuvent avoir une incidence directe sur la performance visuelle et la sécurité mais ils n'ont jamais été étudiés en profondeur.

Dangers liés à l'Indium

L'indium lui-même ne semble pas poser de problème de toxicité, mais ses composés, utilisés souvent pour la fabrication des LED, peuvent présenter une certaine dangerosité. Ainsi, la toxicité du phosphore d'indium (InP) est évaluée à 3 sur une échelle de 4 selon le standard américain NFPA 704 [NFPA, 2007] : « produit pouvant provoquer après une exposition de courte durée, des séquelles graves temporaires ou bien des séquelles modérées résiduelles ». Le phosphore d'indium est cancérogène. Une étude publiée en 2002 [Tanaka *et al.*, 2002] a évalué la toxicité pulmonaire du phosphore d'indium sur des hamsters.

Effet sur la peau

Le Scenihhr [SCENIHR, 2009] a évalué à environ 250 000 personnes (0,05 % de la population) le nombre de personnes hyper photosensibles en Europe.

Les effets sur la peau ne peuvent pas à ce jour être clairement établis. Cependant, des publications récentes associant les épithéliomas et l'exposition à la lumière visible n'excluent pas un risque d'augmentation de ces cancers de la peau chez les personnes exposées de façon prolongée à des LED émettant des rayonnements entre 380 et 500 nm [Zastrow *et al.*, 2009].

Les pathologies cutanées susceptibles d'être déclenchées ou aggravées par les fortes intensités de rayonnement artificiel émis par les LED sont d'origines diverses et représentent une fraction non négligeable de la population. La réalisation de LED de forte puissance étant prévisible et leurs utilisations diverses étant escomptées, on peut estimer que les sujets porteurs de pathologies « solaires » y seront exposés et pourraient potentiellement voir leurs pathologies déclenchées et / ou aggravées.

Populations sensibles

Deux populations sont à citer : populations hypersensibles à la lumière (enfants, aphakes, pseudophakes, patients atteints de certaines maladies oculaires et cutanées, patients consommant des substances photo-sensibilisantes, *etc.*) et populations particulièrement exposées aux LED (certaines populations de travailleurs : installateurs éclairagistes, métiers du spectacle, *etc.*)

Introduction du chapitre

L'objectif de ce chapitre est de présenter les différents effets sanitaires potentiels identifiés par le groupe de travail. Les effets prédominants sont les effets sur l'œil (phototoxicité de la lumière bleue, éblouissement), d'autres effets directs ont été soulevés (effets sur la peau, effets sur l'horloge biologique et la contraction pupillaire) et des effets indirects ont été suggérés (effets stroboscopiques, dangers liés aux composés d'indium).

Pour les nombreux risques potentiels soulevés, il n'existe actuellement que peu de méthode pour quantifier le risque associé. D'autre part, Il n'existe actuellement pas de données d'exposition relatives à un éclairage avec des systèmes utilisant des LED. Il en est de même pour les autres types d'éclairage.

Le groupe de travail ne peut ainsi présenter des évaluations chiffrées que dans le cas du risque lié à la lumière bleue, évalué selon la norme NF EN 62471 de sécurité photobiologique. Néanmoins, le groupe de travail souligne que cette norme est mal adaptée à des éclairages utilisant des LED et repose sur des valeurs limites d'exposition qui ne prennent pas en compte l'exposition chronique quotidienne. L'objectif ici est donc simplement de situer les LED par rapport aux autres types de lampes.

5.1 Effets sur l'œil

5.1.1 Danger thermique

Le danger thermique est associé à une brûlure de la rétine résultant généralement d'une exposition de courte durée à une lumière très intense. Ce type de danger concerne toutes les longueurs d'onde, de l'ultraviolet à l'infrarouge en passant par le visible. Il est généralement admis⁵⁴ que les LED ne présentent pas ce type de danger, qui est plus fréquemment associé aux lasers.

5.1.2 Danger photochimique : lumière bleue

5.1.2.1 Caractérisation du danger

Les LED blanches utilisées pour l'éclairage présentent des caractéristiques spectrales différentes de la lumière solaire et des autres sources lumineuses utilisées jusqu'à présent pour l'éclairage domestique, présentant un risque accru d'exposition à la lumière bleue. Par ailleurs, la luminance de certains systèmes d'éclairage à LED peut être très élevée, exposant à un dépassement des limites d'exposition tolérées.

Les risques pour l'œil concernent différentes structures :

- le cristallin avec un risque accru de cataracte ;
- la rétine.

La rétine a pour fonction la phototransduction et est donc équipée pour recevoir des ondes lumineuses. Comme nous l'avons vu au chapitre 2, l'intégrité de la rétine est plus sensible à la lumière violette-bleue (380 – 495 nm) du fait des différents pigments présents dans les cellules rétinienne, dont certains s'accumulent avec l'âge (lipofuscine). L'interaction entre la lumière et le pigment peut induire une réaction photodynamique à l'origine de lésions par stress oxydatif. La macula est particulièrement exposée du fait de la focalisation des rayonnements à ce niveau. L'effet protecteur est réalisé par le pigment maculaire⁵⁵ qui absorbe une partie de la lumière bleue (pic d'absorption à 460 nm). Le cristallin joue aussi ce rôle en absorbant les rayonnements en dessous de 400 nm et d'avantage de rayonnements bleus au fur et à mesure que le cristallin jaunit, c'est-à-dire avec l'âge. Avant 25 ans, mais plus encore avant l'âge de 8 ans, le cristallin laisse passer la lumière bleue sans la filtrer.

La forte composante bleue du spectre d'émission des LED expose à des risques de lésions maculaires aiguës en cas d'exposition à des luminances fortes, en particulier chez les enfants, les sujets sans cristallin et les personnes présentant soit une maculopathie liée à l'âge soit des anomalies pré existantes de la rétine. Les phares à LED de véhicule risquent notamment d'entraîner des lésions rétinienne chez les jeunes enfants qui se trouveront à hauteur des sources émettrices.

En cas d'exposition directe, le risque serait de voir se multiplier des accidents de type « éclipses » (phototoxiques) avec une perte irréversible et plus ou moins importante de la vision centrale. Des scotomes (tâches noires) pourraient également gêner la vision centrale c'est-à-dire la capacité de lecture ou la reconnaissance des visages. Ce risque est cependant limité par les réactions habituelles d'évitement à l'éblouissement.

Ce risque est encore accru par une réduction des mécanismes protecteurs liés à la constriction pupillaire, directement liée au spectre d'émission des LED (voir section 5.2.1).

⁵⁴ Altkorn *et al*, Light emitting diode safety and safety standards, IEEE Symposium on product safety engineering (2005)

⁵⁵ Le pigment maculaire est « xanthophylle » (lutéine et zeaxanthine)

En cas d'exposition prolongée et/ou cumulée à des LED, on pourrait voir apparaître des lésions retardées de la rétine en rapport avec des stress oxydatifs cumulés et ce d'autant que le cristallin ne filtre pas ou peu les rayonnements de faible longueur d'onde ou que le substrat de la réaction photodynamique augmente (comme c'est le cas quand la lipofuscine s'accumule dans les cellules EPR avec l'âge ou encore sur des terrains prédisposés (génétique, tabagisme). Certaines études [Wolbarsht, 1989] ont montré que, des expositions répétées pourraient causer des dommages plus importants que le cas où la même quantité d'énergie était reçue par la rétine en une exposition unique.

Les risques à moyen ou long terme seraient de voir apparaître une augmentation du nombre de patients atteints de maculopathie liée à l'âge, une diminution de l'âge d'apparition et par ailleurs d'augmenter la gravité de pathologies rétinienne pré existantes (rétinopathies, myopie). De plus, les maculopathies induites par la myopie se voient exacerbées par le stress oxydatif.

Enfin, la phagocytose des segments externes des photorécepteurs, c'est-à-dire le recyclage des systèmes nécessaires à la phototransduction, est régulé selon un rythme circadien. L'exposition à la lumière semble plus dangereuse quand les cycles sont perturbés, ce qui pourrait être induit par les LED (cf. 3.2.4).

Ainsi, s'il est relativement possible d'anticiper des lésions aiguës en mesurant des seuils de luminance tenant compte de la composante bleue du faisceau émis, il est impossible de faire la même approximation pour ce qui concerne les expositions cumulées, qui vont représenter la situation réelle des individus éclairés par des systèmes à LED.

Études in-vivo

Deux études menées par Dawson et ses collaborateurs rapportent des lésions rétinienne après exposition de signes à des LED bleues.

La première étude menée sur des primates pour évaluer les effets toxiques potentiels des LED a utilisé une exposition directe à la rétine de macaques adultes. L'objectif étant de comparer les lésions rétinienne obtenues après illumination rétinienne avec un laser argon 458 nm ou une LED bleue ayant un pic d'émission à 460 nm et 10 % d'émission à 436 et 491 nm. Les animaux ont été soumis à des expositions énergétiques de 5 à 54 J / cm² pour le laser et entre 9 et 62 J / cm² pour la LED. Un suivi clinique et angiographique a été réalisé à 2 jours et 30 jours après exposition. Les lésions sont identiques pour l'exposition au laser argon ou à la LED avec un seuil de toxicité de 10 J / cm². Au dessus de ce seuil, des lésions apparaissent et se majorent avec l'augmentation de l'exposition énergétique jusqu'à atteindre un plateau à partir de 30 J / cm² [Dawson *et al.*, 2001].

La deuxième étude [Ueda *et al.*, 2009] est plus récente et porte sur deux singes adultes Rhésus et six singes macaques soumis à une exposition rétinienne directe à une LED bleue émettant des rayonnements entre 410 et 540 nm avec un pic à 465 nm. Un œil était exposé à la LED, l'autre œil à la LED associée à un filtre réduisant d'environ 30% la transmission entre 420 nm et 540 nm.

Un examen était réalisé à 2 et 30 jours après l'exposition. À 35 J / cm², des lésions sont clairement identifiables à 2 et 30 jours, mais elles sont absentes quand le filtre est interposé. À 60 J / cm², des lésions majeures sont identifiées en absence du filtre, elles sont considérablement réduites par le filtre.

Ces expériences démontrent que la composante bleue de la LED est spécifiquement responsable des lésions rétinienne aiguës observées sur la macula du singe.

Histologiquement, les lésions touchent la rétine externe comme au cours des rétinites solaires.

5.1.2.2 Estimation du risque

Le groupe de travail présente ici quelques résultats chiffrés permettant de classer quelques systèmes à LED disponibles sur le marché selon la norme de sécurité photobiologique NF EN 62471. Le groupe de travail souligne néanmoins que cette norme est mal adaptée à des éclairages utilisant des LED et repose sur des valeurs limites d'exposition qui ne prennent pas en compte l'exposition chronique quotidienne. L'objectif ici est donc simplement de situer les LED par rapport aux autres types de lampes.

Le détail des résultats présentés dans cette partie se trouve dans l'annexe A du chapitre 5.

5.1.2.2.1 Pour des LED isolées

Principe de la méthode d'évaluation utilisée

Dans cette partie, 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 / m^2 mesurée au moyen d'une caméra CCD étalonnée (vidéoluminancemètre).

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

À 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 5 100 K et 8 400 K ;
- blanc neutre : sept références correspondant à des températures de couleurs proximales comprises entre 3 800 K et 4 000 K ;
- blanc chaud : dix références correspondant à des températures de couleurs proximales comprises entre 2 600 K et 3 400 K.

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 Figure 41, Figure 42, Figure 43 et Figure 44. 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.

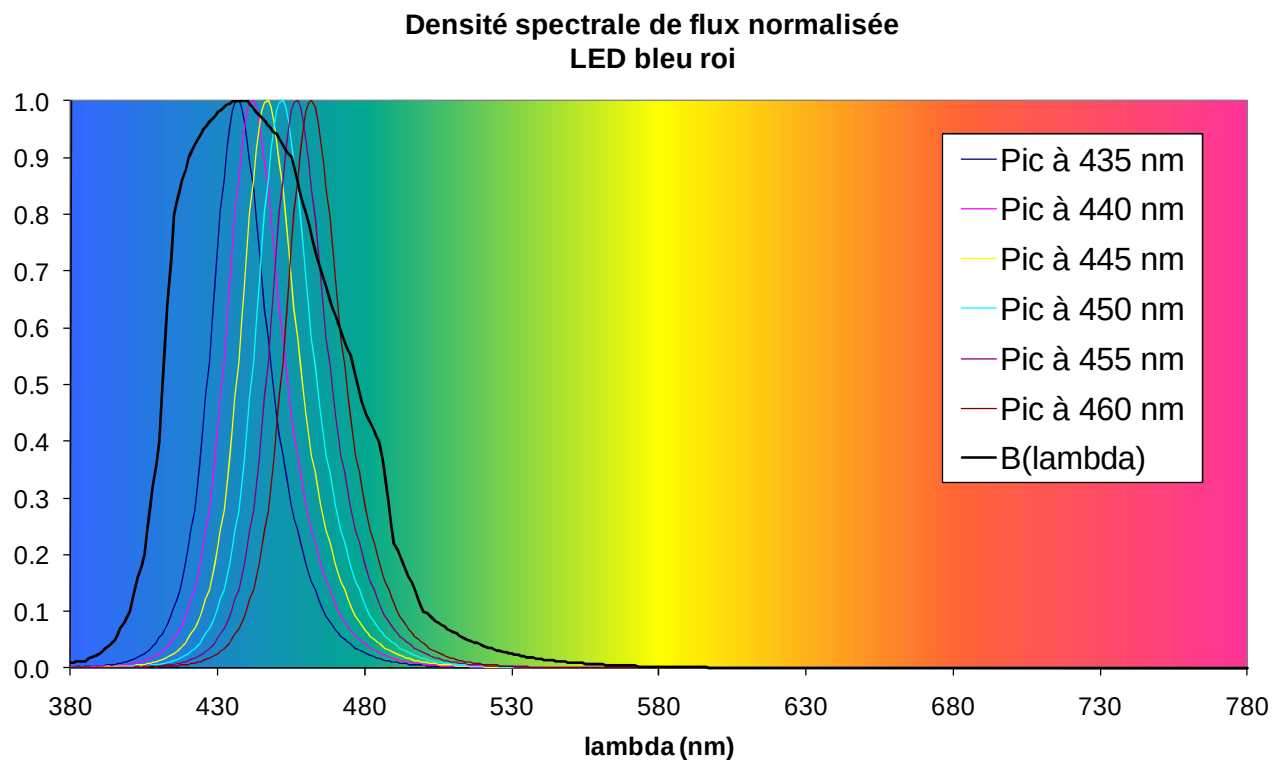


Figure 41 : Densité spectrale de flux normalisée pour les LED bleu roi. La courbe noire représente la fonction $B(\lambda)$.

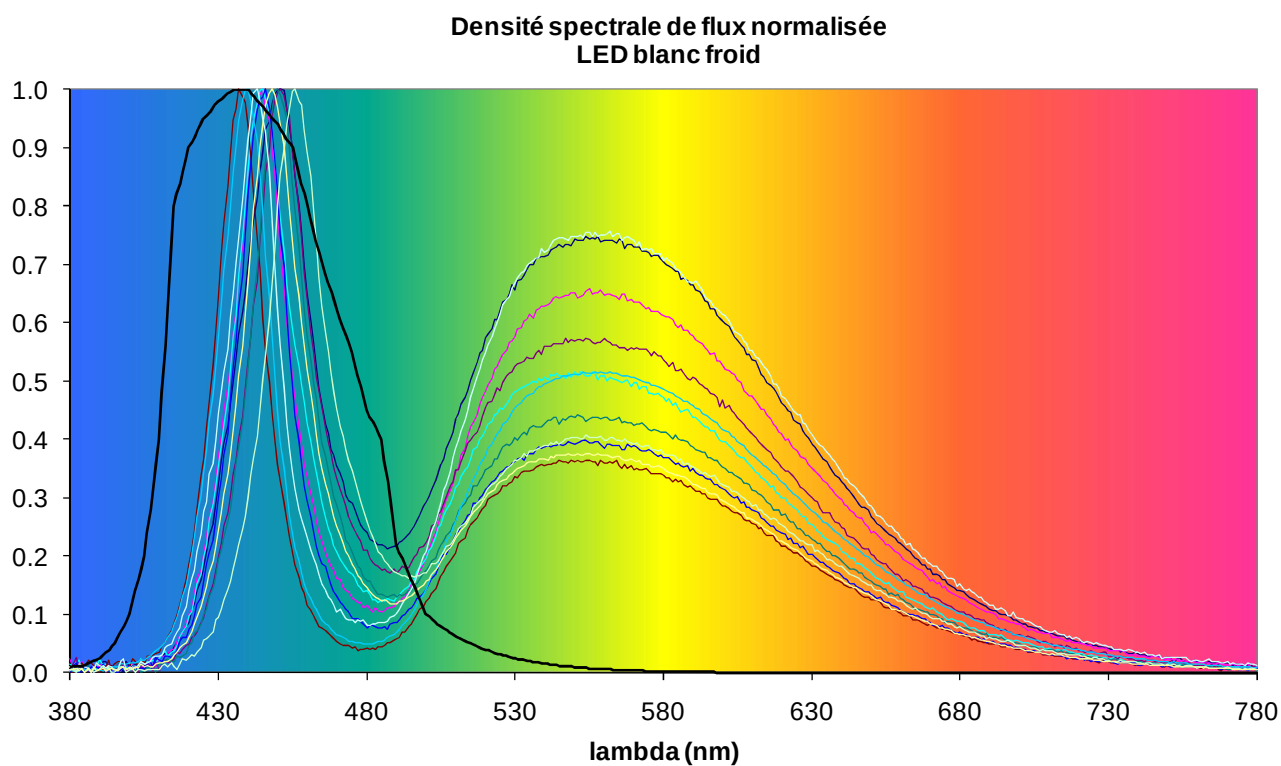


Figure 42: Densité spectrale de flux normalisée pour les LED blanc froid. La courbe noire représente la fonction $B(\lambda)$.

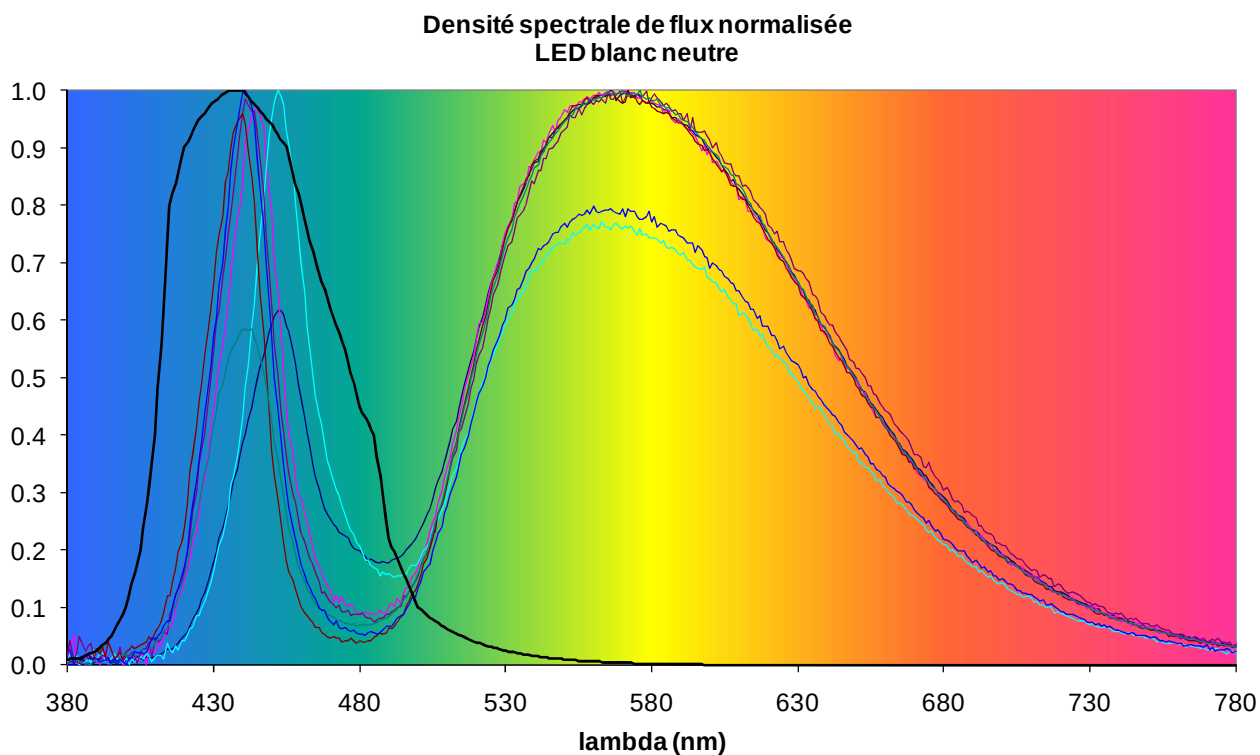


Figure 43 : Densité spectrale de flux normalisée pour les LED blanc neutre. La courbe noire représente la fonction $B(\lambda)$.

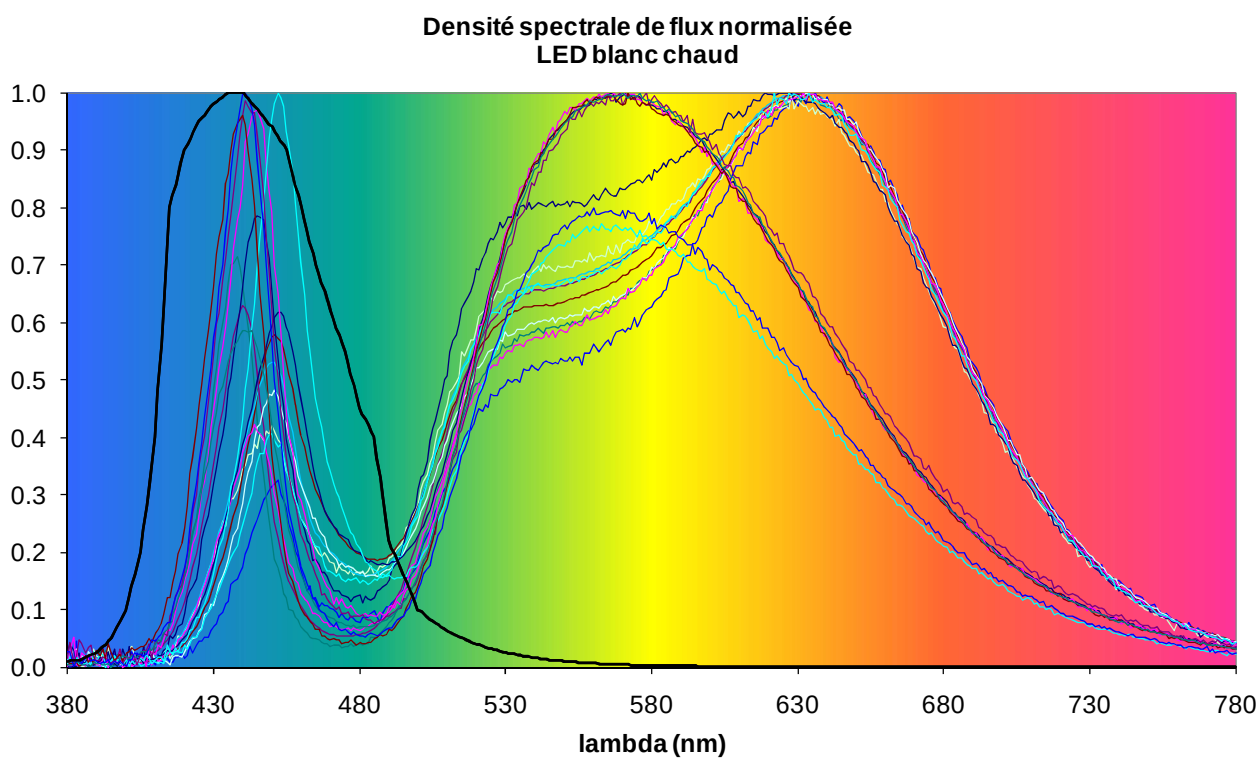


Figure 44 : Densité spectrale de flux normalisée pour les LED blanc chaud. La courbe noire représente la fonction $B(\lambda)$

Résultats et analyse

Le Tableau 14 rassemble les résultats obtenus pour les différents types de LED et les flux considérés.

Tableau 14 : Résultats de l'analyse de risque pour la rétine lié à la lumière bleue émise par des LED au format CMS, substrat céramique, à puce de 1 mm² (taille apparente 1,4 mm x 1,4 mm)

Type de LED	Flux	Luminance énergétique ou lumineuse	Durée limite d'exposition à une distance de 200 mm	Groupe de risque	Recommandation Marquage CEI/TR 62471-2
Bleu roi	0,07 W	21 000 W / m ² / sr	100 s à 10 000 s	1 : risque faible	Non exigé
	0,5 W	150 000 W / m ² / sr	15 à 20 s	2 : risque modéré	Ne pas regarder la source en utilisation normale. Peut être dangereux pour les yeux
	1 W	300 000 W / m ² / sr	3 à 4 s	2 : risque modéré	
Blanc froid	100 lm	1,6.10 ⁷ cd / m ²	VLE ⁵⁶ non atteinte	0 : sans risque	Non exigé
	200 lm	3,2.10 ⁷ cd / m ²	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	1,6.10 ⁷ cd / m ²	VLE non atteinte	0 : sans risque	Non exigé
	200 lm	3,2.10 ⁷ cd / m ²	100 s à 10 000 s	1 : risque faible	
Blanc chaud	100 lm	1,1.10 ⁷ cd / m ²	VLE non atteinte	0 : sans risque	Non exigé
	200 lm	2,2.10 ⁷ cd / m ²			

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. En revanche, les LED bleu roi et blanc froid peuvent appartenir au groupe de risque 2 (risque modérée) selon leur niveau de flux. Les LED blanc neutre 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.

5.1.2.2.2 Pour des assemblages de LED

L'objectif de cette partie est de considérer un ensemble de LED disposées régulièrement sous la forme d'une matrice rectangulaire. Deux types d'assemblage sont considérés ici :

- un assemblage dense de type « *multichip* » dans lequel les puces sont disposées côte à côte, sans espacement entre elles ;
- un assemblage peu dense de type « module de LED » dans lequel les LED sont bien espacées entre elles.

⁵⁶ VLE : Valeur Limite d'Exposition

À une distance d'observation donnée, les durées limites d'exposition ne peuvent pas être supérieures à celles observées sur des LED uniques car l'observateur est soumis à la lumière émise par chaque LED individuellement.

En revanche, lorsque le champ de vision effectif de l'observateur est suffisamment large, celui-ci inclut un grand nombre de zones émissives et de zones de séparation. La luminance effective de l'assemblage est alors plus faible car elle résulte d'une moyenne prise entre les zones émissives et les zones de séparation.

5.1.2.2.1 Assemblage dense de type « multichip »

Dans ce type d'assemblage, on considère que les surfaces émissives des LED sont contiguës et ne forment qu'une seule surface dont la luminance est égale à la luminance d'une seule puce (cf. Figure 45).

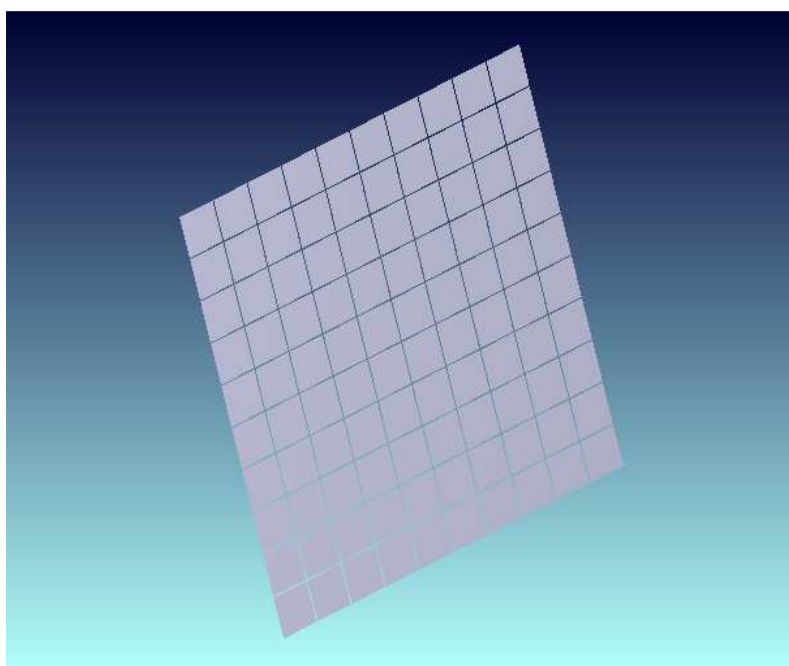


Figure 45 : Exemple d'assemblage régulier puce LED type « multichip »

La durée limite d'exposition la plus défavorable (la plus courte) correspond à un champ de vision effectif entièrement rempli par la source lumineuse. Cette durée permet de déterminer le groupe de risque le plus défavorable correspondant à l'assemblage de LED considéré, quelle que soit la taille de cet assemblage.

Les résultats sont donnés dans le Tableau 15. Le calcul est effectué dans le pire cas, correspondant à une source qui remplit le champ de vision effectif, quelle que soit la distance d'observation.

Tableau 15 : Calcul des durées limites d'exposition pour des assemblages de puces LED type « multichip » formant une surface uniforme de luminance donnée.

Type de LED	Luminance énergétique ou lumineuse	Durée limite d'exposition la plus défavorable	Groupe de risque le plus défavorable
Multichip Bleu roi	21 000 W / m ² / sr	52 s à 68 s	2 : risque modéré
	150 000 W / m ² / sr	7 à 9 s	2 : risque modéré
	300 000 W / m ² / sr	3 à 5 s	2 : risque modéré
Multichip Blanc froid T_c ≥ 4 700 K	1,6.10 ⁷ cd / m ²	52 s à 100 s	2 : risque modéré
	3,2.10 ⁷ cd / m ²	26 s et 45 s	2 : risque modéré
Multichip Blanc neutre 3 600 K ≤ T_c ≤ 4 050 K	1,6.10 ⁷ cd / m ²	106 s à 179 s	1 : risque faible
	3,2.10 ⁷ cd / m ²	53 s à 88 s	2 : risque modéré
Multichip Blanc chaud 2 600 K ≤ T_c ≤ 3 400 K	1,1.10 ⁷ cd / m ²	232 s à 400 s	1 : risque faible
	2,2.10 ⁷ cd / m ²	116 s à 203 s	

On constate qu'une LED *multichip* bleu roi, même de faible luminance, est susceptible d'être classée dans le groupe de risque 2. De même, les LED *multichip* blanc froid et blanc neutre sont également susceptibles d'être classées dans le groupe de risque 2.

En revanche, les LED *multichip* en blanc chaud et dont la luminance ne dépasse pas 2.10⁷ cd / m², n'atteindront jamais le groupe de risque 2, quelle que soit leur taille et la distance d'observation. Dans les pires cas, ces LED seront donc classées dans le groupe de risque 1.

À titre d'exemple, considérons une LED *multichip* disponible commercialement et composée de 100 puces. Sa puissance électrique est de 100 W et elle émet un flux lumineux de 7 000 lm. La luminance moyenne de la surface émettrice est de 3.10⁶ cd / m². A la distance d'observation de 200 mm, la durée limite d'exposition est comprise entre 200 et 300 s pour des températures de couleur d'environ 7 000 K (blanc froid). Pour des températures de couleur de l'ordre de 3 000 K (blanc chaud), la durée limite d'exposition est de l'ordre de 1 300 s.

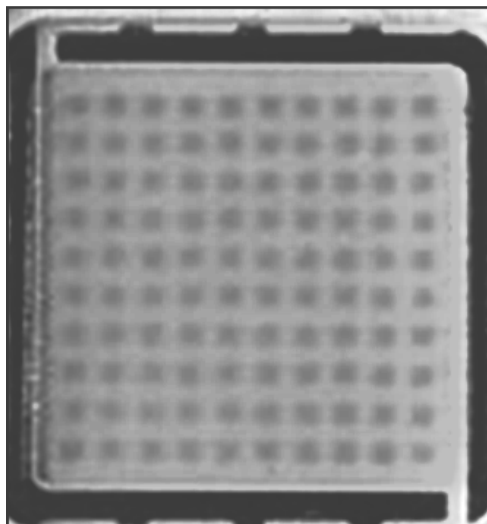


Figure 46 : Exemple de LED *multichip* de flux élevé (7000 lm), disponible commercialement

Tableau 16 : Calcul des durées limites d'exposition pour deux LED de type « *multichip* » composées de 100 puces, émettant un flux total de 7000 lm. Ces composants sont disponibles commercialement.

Type de LED	Luminance	Durée limite d'exposition à 200 mm	Groupe de risque
Multichip 10 x 10 7 000 lm Blanc froid (Tc ≈ 7 000 K)	$2,8 \cdot 10^6$ cd / m ²	200 s à 300 s	1 : risque faible
Multichip 10 x 10 7000 lm Blanc chaud (Tc ≈ 3 000 K)	$2,8 \cdot 10^6$ cd / m ²	1000 s à 1300 s	1 : risque faible

Conformément à la norme NF EN 62471, nous pouvons également évaluer les durées limites d'exposition à la distance à laquelle l'éclairement produit est égale à 500 lx.

Pour la LED « *multichip* » considérée ici comme exemple, les paramètres décrivant les conditions d'évaluation de risque sont les suivants :

- taille de la source : 2,7 cm x 2,7 cm ;
- distance d'observation à 500 lx : 2,1 m.

Le calcul des durées limites d'exposition (voir Tableau 17) indique alors que ce type de source est à classer dans le groupe de risque 0 (sans risque).

Tableau 17 : Calcul des durées limites d'exposition pour deux LED « multichip » composées de 100 puces, émettant un flux total de 7 000 lm. Ces composants sont disponibles commercialement

Type de LED	Luminance	Durée limite d'exposition à 2.1 m (distance correspondant à 500 lx)	Groupe de risque
Multichip 10 x 10 7 000 lm Blanc froid (Tc ≈ 7 000 K)	$2,8 \cdot 10^6$ cd / m ²	VLE non atteinte	0 : sans risque
Multichip 10 x 10 7 000 lm Blanc chaud (Tc ≈ 3 000 K)	$2,8 \cdot 10^6$ cd / m ²	VLE non atteinte	0 : sans risque

De manière générale, les LED *multichip* permettent d'obtenir des flux lumineux bien plus élevés que des LED monopuces. Cependant, on constate que l'utilisation d'un grand nombre de puces ne conduit pas forcément à des luminances plus grandes, car le flux lumineux peut être réparti sur une surface émissive plus grande, chaque puce émettant un flux unitaire inférieur à ce que pourrait émettre une puce seule. Dans l'exemple considéré, chaque puce émet un flux unitaire de 70 lm. Il convient toutefois de tenir compte de l'évolution rapide de ces composants, qui pourront certainement atteindre des luminances plus élevées à très court terme.

5.1.2.2.2 Assemblage peu dense de type « module de LED »

Dans cette partie, on considère un ensemble de LED blanches disposées de manière régulière sous la forme d'une matrice. Cette disposition est un exemple d'utilisation simple de LED dans des lampes et des luminaires d'éclairage intérieur et extérieur. A titre d'exemple, on considère un ensemble de 100 LED de 100 lm, produisant un flux lumineux total de 10 000 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 pourrait être utilisé en substitution des luminaires à tube fluorescent.

La Figure 47 montre le type d'assemblage de LED considéré. Il s'agit ici d'une matrice carrée pour laquelle l'espacement entre les LED est de 5 mm dans les deux directions.

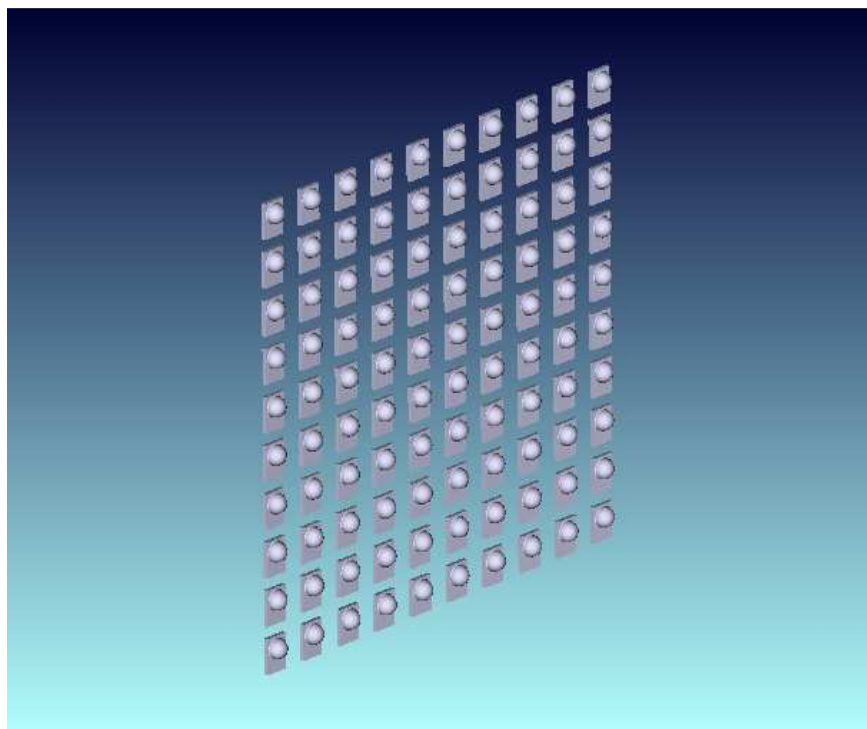


Figure 47 : Exemple d'assemblage régulier de 10 x 10 LED type CMS, de substrat céramique et à simple puce, étudiées dans la partie précédente

Conformément à la norme NF EN 62471, nous pouvons évaluer les durées limites d'exposition à la distance à laquelle l'éclairement produit est égal à 500 lx.

Pour l'ensemble de 100 LED de 100 lm considéré, les paramètres décrivant les conditions d'évaluation de risque sont les suivants :

- taille de la source : 5,4 cm x 5,4 cm ;
- distance d'observation à 500 lx : 2,5 m.

Tableau 18 : Calcul des durées limites d'exposition pour deux assemblages de LED de type « module » composés de 100 LED, émettant un flux total de 10 000 lm

Type de module de LED	Luminance moyenne	Durée limite d'exposition à 2.5 m (distance correspondant à 500 lx)	Groupe de risque
Matrice 10 x 10 10 000 lm Blanc froid	$1,2 \cdot 10^6 \text{ cd / m}^2$	VLE non atteinte	0 : sans risque
Matrice 10 x 10 10 000 lm Blanc chaud	$0,83 \cdot 10^6 \text{ cd / m}^2$	VLE non atteinte	0 : sans risque

Le Tableau 18 donne les résultats de l'évaluation de risque. D'après la norme NF EN 62471, cette source est exempte de risque à la lumière bleue. 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.

5.1.2.2.3 Synthèse des résultats obtenus pour des assemblages de LED

Quel que soit le type d'assemblage de LED ou de puces, les ensembles de LED émettant un rayonnement de type « blanc chaud » ($2\,600\text{ K} \leq T_c \leq 3\,400\text{ K}$) et dont la luminance ne dépasse pas $2,2 \cdot 10^7\text{ cd/m}^2$ sont associées à des durées limites d'exposition supérieures à 100 s, correspondant au groupe de risque 0 (sans risque) ou 1 (faible risque).

L'évaluation de risque à la distance d'éclairement de 500 lx pour un assemblage 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 à la distance d'éclairement de 500 lx.

Ces conclusions sont également valables pour les assemblages linéaires de LED (barrettes de LED).

Si à l'avenir, une norme proposait un nouveau protocole adapté à la géométrie particulière des LED, le protocole d'évaluation du groupe de risque effectué à la distance d'éclairement de 500 lx pourrait se révéler trop clément, au regard des risques présentés réellement par ce type de système.

L'évaluation de risque pourrait s'effectuer de manière beaucoup plus simple en considérant la luminance propre de la source, sans effet d'élargissement du champ de vision effectif avec le temps d'exposition, de manière à trouver la valeur la plus défavorable de la durée limite d'exposition. On s'affranchirait ainsi du choix de la distance d'évaluation.

5.1.2.2.3 Pour des LED intégrés dans des systèmes lumineux

D'autres données, issues de mesures réalisées par le CSTB⁵⁷, de l'INRS⁵⁸ et du LNE⁵⁹ sont présentées dans le Tableau 19 et le Tableau 20.

La luminance pondérée L_B a été mesurée sur 3 types de lampes à LED de 3, 10 et 15 W ainsi que sur 2 systèmes d'éclairage d'usage courant : une lampe fluorescente compacte de 20 W et une lampe dichroïque de 50 W ayant un angle d'ouverture de 38°. Les mesures de luminance ont été réalisées conformément à la Norme NF EN 62471, c'est-à-dire avec les 3 angles de visée (100, 11 et 1,7 mrad) correspondant aux limites des groupes de risque. En ce qui concerne la distance de mesure, la Norme NF EN 62471 distingue les lampes d'utilisation courante (LUC) destinées à l'éclairage d'espaces (bureaux, écoles, domiciles, usines, routes, automobiles) et les autres lampes plus spécifiques utilisées pour la projection cinématographique, les processus de reproduction, le bronzage, les processus industriels, les traitements médicaux ou les projecteurs de lumière). Les LUC doivent être mesurées à une distance qui produit un éclairement de 500 lx et les autres types de lampe à une distance de 200 mm. Dans le cas présent, les LED peuvent être

⁵⁷ CSTB : Centre scientifique et technique du bâtiment (Antennes de Nantes et Grenoble)

⁵⁸ INRS : Institut national de recherche et de sécurité (Antenne de Nancy)

⁵⁹ LNE : Laboratoire national de métrologie et d'essais (Antenne de Trappes)

classées indifféremment dans l'une ou l'autre des catégories selon leur usage, c'est pourquoi les mesures ont été réalisées dans les 2 configurations.

Tableau 19 : Évaluation des risques selon la norme NF EN 62471, de 3 types de LED [CSTB, INRS] à une distance qui produit un éclairement de 500 lx et une distance de 200 mm.

	Limites des groupes du risque lumière bleue de la Norme NF EN et CEI 62471			
Groupe de risque	0	1	2	3
Limite inférieure de la durée d'exposition maximale admissible correspondant groupe de risque considéré (cf. tableau 10) : t (s)	10 000	100	0,25	< 0,25
Angle de mesure de la luminance énergétique spectrique correspondant à la durée d'exposition t (rad)	0,1000	0,0110	0,0017	
VLE ⁶⁰ de L _B (W / m ² / sr) = 10 ⁶ /t	100	10 000	4,00E+06	

Configuration 1 : Risques évalués à une distance qui produit un éclairement de 500 lx	L _B (W / m ² / sr)			Groupe de risque
Lampe (forme lampe dichroïque) - 1 LED 3 W	115	2 180	4 021	1
Luminaire - 1 LED 10 W	119	2 088	2 3715	1
Luminaire à 6 LED - puissance totale 15 W	56	752	3 806	0
Groupe de risque	0	1	2	

Configuration 2 : Risques évalués à une distance de 200 mm	L _B (W / m ² / sr)			Groupe de risque
Lampe (forme lampe dichroïque) - 1 LED 3 W	831	4 716	5 763	1
Luminaire - 1 LED 10 W	521	25 056	26 705	2
Luminaire à 6 LED - puissance totale 15 W	1 567	7 047	9 106	1
Groupe de risque	0	1	2	

⁶⁰ VLE : Valeur limite d'exposition

Tableau 20 : Évaluation des risques selon la norme NF EN 62471, de 2 lampes d'utilisation courante [CSTB, INRS] à une distance qui produit un éclairement de 500 lx

Risques évalués à une distance qui produit un éclairement de 500 lx	L_B (W / m ² / sr)			Groupe de risque
Lampe fluocompacte 20 W	13,0	12,7	12,9	0
Lampe dichroïque	37	2 133	1 046	0
Groupe de risque	0	1	2	

Au vu de ces résultats, il apparaît que la LED de puissance 3 W appartient au groupe de risque 1 (faible risque) quelle que soit la distance de mesure. En revanche, la LED 10 W est classée faible risque (classe 1) à une distance qui produit 500 lx et risque moyen (classe 2) à une distance de 200 mm. De même, le luminaire 15 W est classé sans risque dans la configuration 1 (distance à 500 lx) et faible risque dans la seconde configuration (distance de 200 mm). Comparativement les lampes fluorescentes et dichroïques d'utilisation courante sont classées sans risque.

On observe que dans la configuration 1 le luminaire 15 W composé de 6 LED (de puissance unitaire 2,5 W) est classé sans risque du fait que la distance qui produit 500 lx est de l'ordre de 2,40 m, alors qu'elle est de 0,58 m et 1,20 m pour les 2 autres LED. De ce fait, la surface visée est plus étendue et par conséquent la luminance mesurée plus faible. En revanche, dans la configuration 1, ce même luminaire serait classé faible risque (classe 1) s'il n'était équipé que d'une seule LED, puisqu'à distance identique (0,20 m) les luminances L_B mesurées sur le luminaire 15 W sont supérieures aux luminances L_B mesurées sur la lampe à LED 3 W.

Compte tenu de cette dernière observation, et du fait que le groupe de risque d'un même produit varie selon la méthode de mesure choisie, il apparaît que la méthode décrite dans la norme NF EN 62471 n'est pas adaptée aux LED notamment lorsqu'elles sont intégrées à des appareils d'éclairage d'utilisation courante. Il serait alors préférable de classer tous les systèmes à LED à des distances identiques.

On peut donc conclure à la nécessité de définir une méthode de mesure et de classification du risque spécifique aux LED.

Cas d'une petite source :

Le laboratoire du LNE a mesuré selon les normes NF EN 62471 et CEI 62471 l'éclairement d'un éclairage portatif de type lampe de poche, pondéré par la fonction de risque lié à la lumière bleue. Dans ce système, la LED est située derrière une lentille de mise en forme du faisceau.

**Figure 48 : Composant à LED sur lequel les mesures du LNE ont été effectuées**

Dans le cas de petites sources (angle d'observation inférieur à 11 mrad), les risques peuvent aussi être évalués à partir de l'éclairement énergétique efficace E_B . Dans ce cas, comme décrit dans le tableau 11, les VLE correspondant à E_B diffèrent selon les normes utilisées:

- Norme CEI 62471, la VLE prend en compte la durée d'exposition jusqu'à 100 s dans tous les cas d'exposition,
- Norme NF EN 62471 (qui renvoie aux VLE de la directive), la VLE prend en compte la durée d'exposition jusqu'à 100 s dans le cas général et jusqu'à 10 000 s dans le cas d'un œil stabilisé pour la chirurgie.

Les résultats des mesures présentées dans les tableaux suivant (Tableau 21, Tableau 22, Tableau 23) montrent le cas d'une petite source dont les risques sont évalués à partir de E_B selon les normes et cas de figure cités précédemment.

On peut noter ici une autre incohérence de ces normes lors de l'évaluation des risques à partir de E_B . Lorsque la durée d'exposition est limitée à 100 s, il n'est plus possible de faire la distinction entre le groupe de risque 0 et le groupe de risque 1, puisque la VLE est identique pour ces 2 groupes.

Tableau 21 : Évaluation des risques selon la norme CEI 62471 dans tous les cas d'exposition

	Limites des groupes du risque lumière bleue de la Norme CEI 62471		
Groupe de risque	0	1	2
Durée d'exposition : t (s)	10 000	100	0,25
VLE de E_B (W / m ²)	1	1	400

Configuration 1 : Risques évalués à une distance qui produit un éclairement de 500 lx	E_B (W / m ²)	Groupe de risque
Lampe torche à Led (distance de mesure 2,95 m)	0,86	0 ou 1

Remarque : la limite du groupe de risque 0 et 1 est la même.

Tableau 22 : Évaluation des risques selon la Directive et la norme – NF EN 62471 (cas d'un œil stabilisé pour la chirurgie)

	Limites des groupes du risque lumière bleue de la Norme NF EN 62471 (directive)		
Groupe de risque	0	1	2
Durée d'exposition : t (s)	10 000	100	0,25
VLE de E_B (W / m ²)	0,01	1	400

Configuration 1 : Risques évalués à une distance qui produit un éclairement de 500 lx	E_B (W / m ²)	Groupe de risque
Lampe torche à Led	0,85	1

Attention : la directive précise (note 2) que les valeurs limites pour le risque de la lumière bleue indiquées dans le tableau sont celles pour un œil stabilisé lors d'une anesthésie. Les limites ci-dessus correspondent à ce cas.

La lampe torche à LED observée par un œil stabilisé est dans le groupe de risque 1

Dans le cas général, la durée maximale est de 100 s et dans ces conditions, les limites sont les suivantes :

Tableau 23 : Évaluation des risques selon la Directive et la norme NF EN 62471 (cas général)

	Limites des groupes du risque lumière bleue de la Norme NF EN 62471 (directive)		
Groupe de risque	0	1	2
Durée d'exposition : t (s)	10 000	100	0,25
VLE de E_B (W / m ²)	1	1	400

Configuration 1 : Risques évalués à une distance qui produit un éclairement de 500 lx	E_B (W / m ²)	Groupe de risque
Lampe torche à Led	0,85	0 ou 1

Les limites d'exposition sont identiques à celles de la norme CEI 62471.

Pour la norme de sécurité photobiologique NF EN 62471, le dispositif est classé dans le groupe de risque 1 dit « faible ». Le document CEI TR 62471-2 août 2009, ne recommande pas de marquage spécifique pour le groupe de risque faible, lorsque le risque lié à la lumière bleue est le seul présent.

À titre de comparaison, des mesures ont été effectuées en prenant en compte la norme NF EN 60825-1/A2 de janvier 2006, qui était la norme de référence pour les LED jusqu'en janvier

2008. Pour la norme de sécurité laser, le dispositif étudié est de classe 1M, soit potentiellement dangereux si observé en utilisant un instrument d'optique. Le détail de ces mesures se trouve dans l'annexe D du chapitre 4.

Si on se limite strictement au cadre des valeurs limites d'exposition en cours et aux normes qui en découlent, on constate que des LED sont classées dans des groupes de faible risque (comme certains types de lampe incandescence dont le filament est visible) alors que les lampes d'éclairage courantes dépolies sont classées sans risque. De plus, les LED de forte puissance sont dans un groupe de risque 2 : risque modéré. Ceci conduit donc à recommander d'éviter la vision directe de la LED.

5.1.2.2.4 Pour des LED de haute luminance destinées à l'éclairage automobile de jour

En vertu de la directive européenne sur les feux de jour (2008/89/EC), les dispositifs d'éclairage automobile diurne vont être obligatoires pour toutes les voitures particulières immatriculées à partir de février 2011, ainsi que pour les camions et les autobus à partir de 2012.

L'objectif visé est d'assurer une meilleure visibilité des véhicules en condition diurne. La technologie LED est particulièrement bien adaptée car elle permet de produire de forts niveaux de luminance avec une consommation énergétique inférieure à celle des autres technologies de lampes utilisées dans l'automobile.

Les luminances annoncées par les fabricants de ce type d'éclairage à LED sont de l'ordre de 6.10^7 cd / m², avec des spectres lumineux de type blanc froid ($5\,200\text{ K} \leq T_c \leq 6\,000\text{ K}$). Il est intéressant d'étudier les durées limites d'exposition pour ce type d'éclairage, qui est a priori défavorable à la sécurité photobiologique en raison du spectre à forte dominante bleue et des valeurs de luminance très élevées.

Les LED utilisées pour cette application comportent plusieurs puces. Sur un des dispositifs évalué dans ce rapport, une puce possède une luminance moyenne de $6,2.10^7$ cd / m² (avec des valeurs maximales de $7,8.10^7$ cd / m²). Le flux émis par cette puce est d'environ 212 lm.

La durée limite d'exposition correspondante est comprise entre 65 et 90 s. Cette analyse conduit à classer ces LED dans le groupe de risque 2 (risque modéré). Les résultats détaillés figurent dans l'annexe au chapitre 5.

5.1.2.2.5 Pour des LED utilisés avec des collimateurs optiques

Les collimateurs sont des systèmes optiques destinés à focaliser le rayonnement émis par les LED de manière à produire un faisceau de lumière plus étroit. Un schéma de principe est donné dans la Figure 49. Les collimateurs sont très utilisés dans les applications d'éclairage directif : lampes à LED grand public de type GU5.3 (remplacement des lampes halogènes dichroïques), projecteurs pour l'éclairage scénographique ou architectural.

Il est important de noter que la luminance perçue par l'œil dans le faisceau collimaté n'est pas augmentée par rapport à la luminance de la source. En effet, l'effet de focalisation est compensé par l'augmentation de la taille apparente de la source (conservation de l'étendue géométrique du faisceau). L'utilisation de collimateurs, ou plus généralement de systèmes optiques (miroirs, lentilles, etc.) ne peut donc pas conduire à l'augmentation de la luminance de la LED.

En revanche, l'effet de grandissement géométrique conduit à une taille de source effective plus grande. La taille de source effective maximale correspond au diamètre du collimateur lui-même (cas où la LED serait placée au foyer d'une lentille convergente idéale).

Par conséquent, la luminance pondérée L_B décroîtra moins vite en fonction du temps d'exposition et la durée limite d'exposition pourra être sensiblement plus courte. Ces dispositifs optiques peuvent donc être critiques du point de vue de la sécurité photobiologique.

A titre d'exemple, l'utilisation d'un collimateur idéal de 10 mm (faisceau de sortie parallèle et diamètre effectif de source égal à 10 mm) peut faire passer une LED du groupe de risque 0 au groupe de risque 2, comme l'illustre la Figure 129 de l'annexe du chapitre 5 (p. 276).

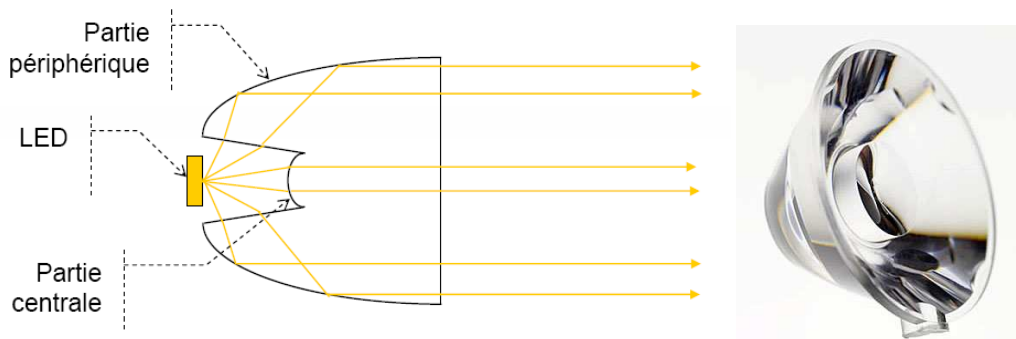


Figure 49 : Schéma de principe d'un collimateur pour LED. Photographie d'un collimateur de LED disponible commercialement.

5.1.2.3 Définition de populations sensibles ou particulièrement exposées

Deux types de populations sont à considérer, les populations qui peuvent présenter une particularité ophtalmologique et les populations qui peuvent être amenées à être plus exposées que la population générale.

5.1.2.3.1 Enfants

Les enfants sont considérés comme population à risque vis-à-vis de la lumière bleue, car leur cristallin ne filtre pas les rayonnements bleus (voir 3.2.1) Particulièrement avant 8 ans, le risque est important.

Cependant, chez l'enfant les pigments maculaires sont abondants et s'opposent aux effets toxiques de rayonnements aux courtes longueurs d'onde sur la macula.

Les prématurés sont également particulièrement sensibles à la lumière bleue car ils combinent l'absence de filtre cristallinien, l'immaturité de la rétine et un déficit en mécanismes anti oxydants.

5.1.2.3.2 Aphakes

Les personnes sans cristallin ou équipées d'un cristallin artificiel seront plus sensibles à la lumière bleue pour les mêmes raisons que les enfants.

Cependant, les études récentes n'ont pas confirmé le lien entre pseudophakie et DMLA.

Actuellement, des implants « jaunes » sont préconisés chez les patients présentant des signes de maculopathie et plus largement chez tous les patients opérés de phako-exérèse (retrait du cristallin).

5.1.2.3.3 Pathologies rétinienne

Les sujets présentant des lésions rétiniennes héréditaires à type de dystrophie rétinienne héréditaire ou de neuropathie optique congénitales ont une sensibilité accrue aux lésions induites par la lumière.

Les patients atteints de glaucome et de neuropathie optique seraient également plus sensibles du fait de lésions mitochondriales induites par la lumière bleue sur les cellules ganglionnaires (800 000 personnes en France) [Osborne *et al.*, 2006 ; Osborne *et al.*, 2008].

Les sujets présentant des accumulations de lipofuscine et des altérations de l'épithélium pigmentaire présentent un risque accru de lésions photochimiques induites par la lumière bleue. Il en est de même pour les patients atteints de DMLA (un million en France).

Les patients atteints de rétinopathie diabétique ont une sensibilité particulière des cônes bleus et pourraient également être plus sensibles aux lésions photochimiques du fait d'un stress métabolique préexistant (plus d'un million en France).

5.1.2.3.4 Consommateurs de médicaments photosensibilisants

Certains médicaments sont susceptibles de potentialiser les effets phototoxiques de la lumière (liste non exhaustives) : les aminoquinolines, certains antibiotiques, les phénothiazines, le tamoxifène, certains anti inflammatoires non stéroïdiens, les anti-paludéens de synthèse, certains anti-épileptiques, l'hypericine, etc.).

L'intoxication érolique (alcoolisme chronique) est également un facteur de risque.

5.1.2.3.5 Travailleurs

Les secteurs d'activités dans lesquels les travailleurs sont exposés à des éclairages susceptibles de présenter des risques dus à la lumière bleue sont nombreux. Il ne s'agit donc pas là d'être exhaustif mais plutôt de citer quelques situations caractéristiques, compte tenu soit des niveaux d'éclairement intenses produits, soit des distances d'utilisation très courtes.

Installateur éclairagiste

Les personnes travaillant à l'installation des éclairages sont, bien sûr, des populations concernées par les effets sanitaires des LED.

Éclairage scénique

Dans l'industrie du spectacle, la puissance des éclairages mis en jeu représente plusieurs dizaines de milliers de watts. Les personnes les plus exposées sont les choristes et figurants qui ont souvent un rôle très statique. La durée de ces expositions en position statique peut être supérieure à 30 min. La gêne est fortement ressentie lorsque les projecteurs sont à hauteur des yeux ou disposés de face ou de côté à de courtes distances des personnes. L'exposition des techniciens est également importante lors des répétitions. Selon le rapport de la Commission permanente sur l'emploi du Conseil national des professions du spectacle (CNPS), sur 134 000 professionnels du spectacle, 45 000 artistes (musique, chant, danse, cirque et spectacles divers) sont susceptibles d'être exposés de façon systématique aux dispositifs d'éclairage scénique et 70 000 personnes (ouvriers et techniciens des spectacles vivants et audiovisuels, responsables de programmation, cadres artistiques, assistants techniques...) de façon discontinue [Ministère Communication Culture, 2006].

Contrôle qualité

Les postes de travail de contrôle qualité sont présents dans des secteurs d'activités très variés tels que la métallurgie, la maroquinerie, la papeterie, la verrerie, etc. Les contrôles s'effectuent le plus souvent à l'aide d'un éclairage localisé équipé de lampes à spectre large (à distinguer des postes de contrôle par fluorescence sous UV). Ce type d'éclairage présente l'inconvénient d'être placé à proximité des yeux des opérateurs (20 à 30 cm). Parmi ces contrôles, il faut également citer les postes destinés à tester le bon fonctionnement de tous les dispositifs qui contiennent des lampes, LED, etc. avant leur mise sur le marché.

Scialytiques (lampe d'éclairage des champs opératoires)

Les niveaux d'éclairement observés sous les systèmes d'éclairage de type scialytiques, installés dans les blocs opératoires et les fauteuils dentaires, peuvent atteindre 150 000 lx. De plus, la lumière émise par ces appareils est de type « blanc froid » et donc à dominante bleue. L'exposition quotidienne à ce type d'éclairage est donc susceptible de présenter des risques pour le personnel et les patients.

Professionnels de la photothérapie et du domaine esthétique

Des sources de plus en plus puissantes et dans des spectres de plus en plus variés sont utilisées soit pour de la photothérapie soit pour d'autres indications esthétiques. Aucune réglementation ne limite l'exposition à ce type de lampes qui sont en vente libre.

5.1.3 Éblouissement

5.1.3.1 Caractérisation du danger

Tout luminaire doit pouvoir être observé dans des conditions qui ne procurent aucune gêne visuelle. Cette gêne se manifeste la plupart du temps par une sensation d'éblouissement que l'on doit à la luminance de l'objet « luminaire ». En effet, si l'on considère qu'une luminance supérieure à 10 000 cd / m² commence à poser des problèmes de confort visuel selon la position dans l'espace du luminaire, il a été mesuré des luminances supérieures à 10 000 000 cd / m² sur certaines LED d'une puissance de 1 W. Ces valeurs particulièrement élevées sont à proscrire car elles peuvent sous certaines conditions d'observation avoir des conséquences indirectes sur la sécurité de l'observateur. Citons par exemple la conduite automobile, l'utilisation de machines-outils ou l'utilisation de projecteurs scéniques.

5.1.3.2 Estimation du risque

Comme nous l'avons vu précédemment, l'UGR (*unified glaring rate*) utilisé par la Commission internationale de l'éclairage pour juger du niveau d'éblouissement d'une source d'éclairage n'est pas adapté aux sources de faibles dimensions angulaires, et ne peut donc pas être ainsi pertinent pour les LED.

Le groupe de travail s'est proposé de lister quelques niveaux de luminance de quelques LED que l'on peut trouver sur le marché, ce sont ces mêmes LED dont on a estimé le risque lié à la lumière bleue dans la partie précédente.

	Flux lumineux (lm)	Luminance (cd/m ²)
Blanc froid	100 lm	1,6.10 ⁷ cd / m ²
	200 lm	3,2.10 ⁷ cd / m ²
Blanc neutre	100 lm	1,6.10 ⁷ cd / m ²
	200 lm	3,2.10 ⁷ cd / m ²
Blanc chaud	100 lm	1,1.10 ⁷ cd / m ²
	200 lm	2,2.10 ⁷ cd / m ²

Tableau 24: Quelques exemples de luminance de LED au format CMS, substrat céramique, dont la puce a une taille apparente de 1,4 mm x 1,4 mm

Toutes les luminances présentées ici sont supérieures à 10 000 cd / m², valeur au-dessus de laquelle on considère qu'un problème d'éblouissement peut se poser pour l'observateur.

5.2 Autres effets

5.2.1 Effet sur les rythmes circadiens

Dans le cadre de l'évaluation des effets des LED sur la physiologie et la physiopathologie humaine, il est important de considérer comment elles vont activer ce système secondaire de photoréception.

La Figure 50 montre le spectre de différents types de LED blanches. Les spectres ont été normalisés pour un éclairage à 500 lx. On note bien que dans la bande spectrale 460 - 480 nm (bande pertinente pour les rythmes circadiens, en gris sur la figure), il existe globalement un creux dans le spectre.

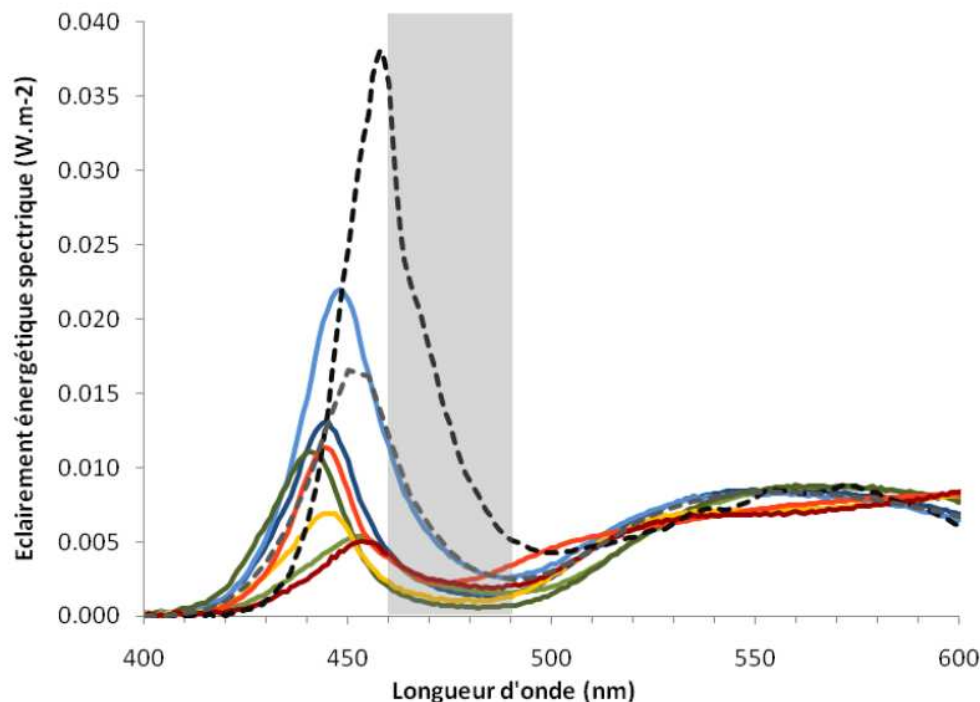


Figure 50 : Spectre de différents types de LED blanches

La dépression dans le spectre des LED correspond exactement au maximum du spectre de la mélanopsine. Cette correspondance suggère que les LED pourraient conduire à une moindre contraction pupillaire par rapport à une lumière équivalente en intensité lumineuse d'une lampe à incandescence. Le flux lumineux des LED étant proportionnellement bien plus important en lumière bleue, cette combinaison d'une intensité plus importante dans le bleu et d'une contraction pupillaire réduite pourrait donc conduire à un flux lumineux entrant dans l'œil plus important pour des intensités lumineuses équivalentes. La possibilité de contraction pupillaire en cas d'éblouissement ou photo blanchiment des photorécepteurs à cônes et bâtonnets sans stimulation du système à mélanopsine [Zhu *et al.*, 2007] pourrait renforcer ce risque de surexposition de la rétine à la lumière bleue produite par les LED. Par conséquent, il apparaît important de contrôler, notamment pour les dispositifs à LED de très forte luminance, que le flux lumineux dans le bleu, entrant dans l'œil, ne dépasse pas les seuils de toxicité cellulaire.

Certains personnels ont des horaires de travail ou des conditions environnementales qui les contraignent à rester en continu sous lumière artificielle. Il est donc important de se poser la question de l'adéquation des LED pour l'éclairage de ces zones de travail. L'importante dépression dans le spectre lumineux au niveau du pic d'action de la mélanopsine suggère que les LED pourraient ne pas activer pleinement ce système de photoréception d'autant qu'il nécessite une stimulation plus forte que les photorécepteurs classiques à cônes et à bâtonnets [Berson *et al.*, 2002 ; Zhu *et al.*, 2007]. Un défaut d'activation pourrait avoir des répercussions importantes sur la physiopathologie des personnes concernées puisque ce système de photoréception contrôle les rythmes circadiens importants pour les rythmes veille/sommeil mais aussi l'humeur. En effet, la dépression automnale dans certains pays du nord est attribuée à un défaut d'activation de ce système de photoréception.

Dans l'état actuel des connaissances, il paraît difficile d'évaluer de manière quantitative l'effet du rayonnement d'un éclairage quelconque sur les rythmes circadiens.

5.2.2 Effets sur la peau

Le Scenihir [SCENIHR, 2009] a évalué à environ 250 000 personnes le nombre de personnes hyperphotosensibles.

Les effets sur la peau ne peuvent pas à ce jour être clairement établis. Cependant, des publications récentes associant les épithéliomas et l'exposition à la lumière visible n'excluent pas un risque d'augmentation de ces cancers de la peau chez les personnes exposées de façon prolongée à des LED émettant des rayonnements entre 380 et 500 nm [Zastrow *et al.*, 2009].

Les pathologies cutanées susceptibles d'être déclenchées ou aggravées par les fortes intensités de rayonnement artificiel émis par les LED sont d'origines diverses et représentent une fraction non négligeable de la population. La réalisation de LED de forte puissance étant prévisible et leurs utilisations diverses étant escomptées, on peut estimer que les sujets porteurs de pathologies « solaires » y seront exposés et pourraient potentiellement voir leurs pathologies déclenchées et/ou aggravées (voir section 3.5).

Les sources d'éclairage basées sur la technologie des LED émettent des quantités significatives de rayonnement bleu et pourraient émettre à terme des rayonnements UVA. Ce rayonnement produit des radicaux libres en quantité importante dans le tégument, radicaux dont on a démontré récemment la toxicité et le rôle potentiel dans le déclenchement de photodermatoses et de cancers cutanés. En outre, des effets systémiques ne sont pas à exclure : immunotolérance, immunosuppression, *etc.*

Il paraît logique de recommander l'élimination de cette portion du spectre par tout moyen adéquat dans les sources d'éclairage quotidien et au travail. Selon l'intensité des sources, des distances minimum d'utilisation pourraient être recommandées.

Pour en savoir plus, il conviendrait de procéder à des tests cutanés de déclenchement sur des sujets sains mais également sur des sujets déjà photosensibilisés comme cela est de pratique courante en explorations photobiologiques.

5.2.3 Effets indirects

5.2.3.1 Danger liés aux fluctuations non perceptibles de la lumière

Un autre aspect de la dangerosité du rayonnement des LED peut être lié à la fluctuation rapide, voire très rapide, de la lumière. Cette fluctuation de la lumière, liée au fait que les LED ne présentent aucune inertie thermique, peut être imperceptible par le système visuel mais, en situation de mouvement ou dans des espaces confinés avec variations périodiques du contraste, elle peut être responsable d'effets stroboscopiques. Ces effets stroboscopiques peuvent avoir une incidence directe sur la santé et la sécurité [IEEE, 2010] (l'épilepsie, les migraines, une aggravation des crises de vertiges, la dyslexie ou les fibromyalgies et les syndromes de fatigue chronique mais ils n'ont jamais été étudiés en profondeur.

5.2.3.2 Dangers liés aux composés de l'Indium utilisés dans la fabrication des LED

L'indium lui-même ne semble pas poser de problème de toxicité, mais ses composés utilisés souvent pour la fabrication des LED peuvent présenter une certaine dangerosité. Ainsi, la toxicité du phosphore d'indium (InP) est classé 3 sur une échelle de 4 selon le standard américain NFPA 704 [NFPA, 2007] : « produit pouvant provoquer après une exposition de courte durée, des séquelles graves temporaires ou bien des séquelles modérées résiduelles ». Le phosphore d'indium est cancérigène. Une étude publiée en 2002 [Tanaka *et al.*, 2002] évalue la toxicité pulmonaire sur des hamsters du phosphore d'indium.

L'utilisation des matériaux alternatifs comme le carbure de silicium (SiC) ou l'oxyde de zinc (ZnO) semble être de bonnes alternatives mais la technologie est encore au stade de balbutiements.

Ainsi, seules les personnes qui interviennent dans les processus de fabrication et de destruction des LED pourraient être exposées.

6 Conclusions et recommandations du groupe de travail

Le Conseil européen du printemps 2007 a requis de la Commission européenne qu'elle adopte en 2009 les exigences en matière d'économie d'énergie, avec pour conséquence l'élimination du marché des lampes à incandescence courant 2010. Dans ce contexte, la Commission a adopté début 2009 des mesures d'exécution de la directive « *Ecodesign of Energy Using Products* (2005/32/EC). C'est dans ce contexte que les systèmes d'éclairage utilisant des LED se développent. Le groupe de travail a examiné les risques potentiels associés à l'utilisation de LED en éclairage public et privé.

Les risques associés à l'éclairage par LED résultent de leur trop forte luminance associée à un spectre d'émission particulier des LED blanches riche en lumière bleue (courtes longueurs d'onde de forte énergie).

En effet, actuellement, étant donnés les limites technologiques et les impératifs de rendement énergétique, la lumière blanche des LED est obtenue par transformation d'une partie de la lumière d'une diode bleue par un luminophore jaune.

6.1 Risques liés à une luminance trop élevée

Description du risque

Du fait du caractère ponctuel de leur surface d'émission, la densité de lumière (« brillance ») émise par des LED est au moins 1 000 fois plus élevée que celle d'une source traditionnelle.

Ainsi, la vision directe d'une source de lumière (quelle que soit sa longueur d'onde) de forte luminance peut entraîner des lésions de la rétine.

Dans les systèmes d'éclairage à LED disponibles sur le marché, les LED sont souvent directement apparentes afin de ne pas atténuer le niveau d'éclairage produit. Ceci conduit à un non respect des exigences normatives (ergonomie visuelle et exigences de sécurité) appliquées à l'éclairage, établies pour limiter les luminances élevées dans le champ visuel.

En outre, les sources de luminance élevée situées dans le champ de vision induisent un éblouissement susceptible d'entraîner une baisse des performances visuelles, des accidents domestiques (notamment chute de plain-pied ou de hauteur) ou de la route (collision,) etc. Enfin, le niveau de rayonnement accessible en direct de ce type de source dépasse largement le niveau d'inconfort visuel.

Estimation du risque

On constate la commercialisation de dispositifs à base de LED qui ne masquent pas les LEDs à la vue directe des utilisateurs, ce qui n'est pas acceptable pour l'éclairage domestique.

Il est admis qu'une luminance supérieure à 10 000 cd / m² est visuellement gênante quelle que soit la position du luminaire dans le champ visuel. Le groupe de travail a mesuré des luminances supérieures à 10 000 000 cd / m² sur certaines LED d'une puissance électrique de 1 W (disponibles dans le commerce pour utilisation domestique).

6.2 Risques liés à la lumière bleue

Description du risque

Des arguments issus d'observations humaines et d'expériences sur des cultures cellulaires et sur différentes espèces animales convergent pour démontrer une toxicité particulière des courtes longueurs d'ondes (bleues) pour la rétine.

Le cristallin des adultes et les pigments maculaires protègent en partie de cette toxicité par leur capacité à absorber ces longueurs d'onde. Ces protections sont plus faibles chez l'enfant, le sujet aphake (absence de cristallin) et le sujet pseudophake (cristallin artificiel).

Cette protection est également réduite en cas de diminution du pigment maculaire, comme observé au cours de certaines pathologies maculaires (par exemple la DMLA⁶¹).

La partie bleue du spectre est aussi soupçonnée de constituer un facteur de risque important dans certains cancers cutanés, certaines tumeurs de l'œil et le vieillissement de la peau.

Évaluation du risque lié à la lumière bleue

La norme NF EN 62471 relative à la sécurité photobiologique des lampes et des appareils utilisant des lampes recommande des limites d'exposition au rayonnement des sources de lumière utilisées notamment en éclairage ; elle donne une classification basée sur les luminances et les éclairagements effectifs, ainsi qu'une méthode de mesures de ces grandeurs.

La norme définit 4 groupes de risques : groupe 0 (exempt de risque), groupe 1 (risque faible), groupe 2 (risque modéré), groupe 3 (risque élevé).

Suite aux évaluations de risque effectuées selon cette norme, il apparaît que certaines LED très couramment utilisées en éclairage, signalisation et balisage appartiennent au groupe de risque 2. Les durées limites d'exposition varient entre quelques secondes pour les LED bleu roi et quelques dizaines de seconde pour les LED blanc froid. De manière générale, les LED et les systèmes d'éclairage à base de LED peuvent se trouver dans différents groupes de risque selon leur luminance et leur teinte (blanc froid, blanc chaud, etc.).

Il est important de signaler que d'autres sources très utilisées en éclairage, notamment des lampes à décharge haute pression (lampes à iodures métalliques pour l'éclairage extérieur) sont également classées dans des groupes de risque 2. Cependant, ces lampes sont destinées à des applications bien maîtrisées et ne peuvent être installées que par des professionnels qui sont tenus de limiter le risque pour la population.

L'arrivée des LED en éclairage sur le marché marque un tournant sans précédent : c'est la première fois que des sources classées dans le groupe de risque 2 sont accessibles au grand public, en vue d'applications domestiques et qui plus est, sans marquage de ce risque.

6.3 Risque de perturbation de l'horloge biologique et de la contraction pupillaire

L'horloge biologique et la contraction pupillaire sont régulées par des longueurs d'ondes situées dans le bleu (480 nm chez l'homme) ; qui induisent la suppression de la production de mélatonine (hormone de l'horloge biologique).

⁶¹ Dégénérescence maculaire liée à l'âge

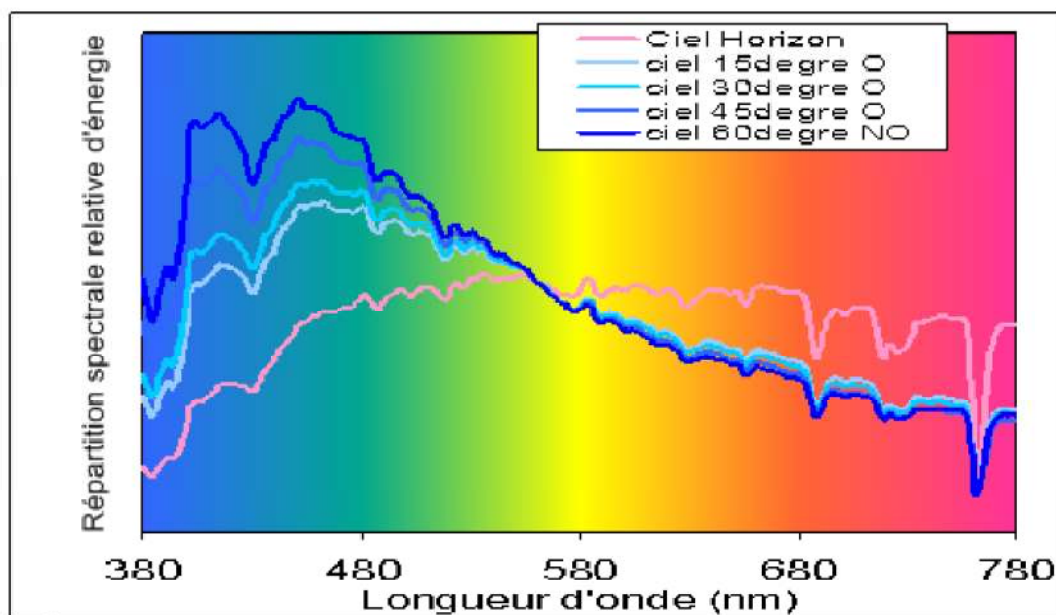


Figure 51 : Distribution spectrale de la lumière naturelle pour différentes directions dans le ciel

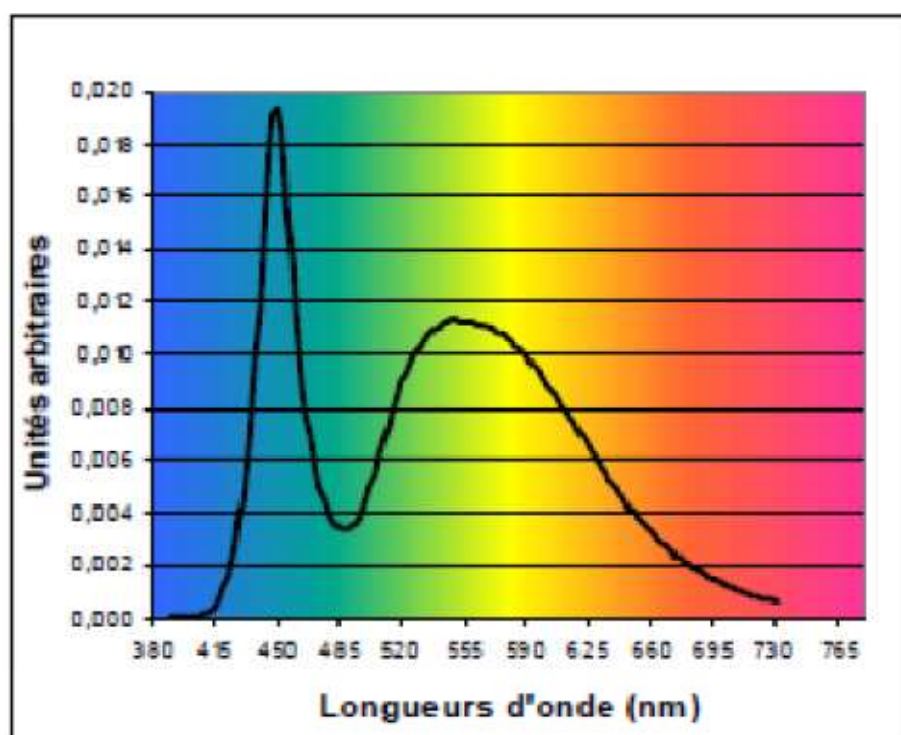


Figure 52 : Exemple d'un spectre de LED blanche

La figure ci-dessus montre que les LED présentent un spectre fondamentalement différent de celui de la lumière naturelle, avec un déséquilibre entre 460 nm et 480 nm. Ceci expose à un risque de dérèglement de l'horloge biologique et par conséquent des rythmes circadiens. Ces risques sont accrus avec des températures de couleur élevées (blanc froid et bleu).

Le dérèglement de l'horloge peut induire des conséquences métaboliques, thymiques (dépression, troubles de l'humeur), etc.

Par ailleurs, la contraction pupillaire pourrait également être réduite, conduisant à un éclairage rétinien plus important et une augmentation des risques associés à la lumière en général.

6.4 Risque lié au papillotement de la lumière émise par les LED

La lumière des LED peut présenter des fluctuations rapides et de grande amplitude liées à leur mode d'alimentation.

Cette fluctuation de la lumière, liée au fait que les LED ne présentent qu'une très faible rémanence, est le plus souvent imperceptible par le système visuel. En situation de mouvement ou dans des espaces confinés avec des variations périodiques de contraste, elle peut être responsable d'effets stroboscopiques. Ces effets stroboscopiques peuvent avoir une incidence directe sur la performance visuelle et la sécurité mais ces effets n'ont jamais été étudiés en profondeur.

6.5 Populations sensibles

Deux populations sensibles ont été identifiées :

- les populations hypersensibles à la lumière en général (enfants, aphakes, pseudophakes, patients atteints de certaines maladies oculaires et cutanées, patients consommant des substances photo-sensibilisantes, etc.)
- les populations particulièrement exposées aux LED (certaines populations de travailleurs : installateurs éclairagistes, métiers du spectacle, etc.)

6.6 Évolution du marché

Les évolutions de ces technologies, d'un point de vue des performances lumineuses, devraient largement se poursuivre dans les prochaines années. Les risques associés à une exposition aux systèmes d'éclairage à LED sont susceptibles d'être accrus avec l'augmentation des luminances.

La méthodologie adoptée dans ce rapport a permis d'évaluer les risques liés à des LED dont le flux se situe dans la moyenne de la gamme de flux disponibles au moment de la rédaction de ce document. A ce jour, et dans les quelques années qui viennent, les progrès technologiques ne présagent pas de l'apparition de LED relevant du groupe de risque 3. Par contre, avec l'augmentation des flux et des luminances, il ne fait aucun doute que de plus en plus de LED vont apparaître dans le groupe de risque 2.

6.7 Valeurs limites d'exposition, normes et évaluation du risque

Valeurs limites d'exposition

Les valeurs limites d'exposition (VLE), relatives au risque lié à la lumière bleue, sont définies pour déterminer des seuils d'exposition à ne pas dépasser pour éviter des lésions aiguës de la rétine.

Ces VLE sont calculées pour une exposition à une source de lumière dans le champ de vision pour une journée de travail de 8 heures. Elles sont issues de données expérimentales et pondérées par un facteur minorant de 5 à 10 fois les énergies nécessaires à produire des lésions observables.

En pratique, ces expériences ont déterminé les seuils d'énergie capables d'induire des lésions du fond d'œil observables macroscopiquement par fundoscopie après une exposition unique à la lumière. Ces lésions correspondent à un blanchiment de la neurorétine, secondaire à un œdème des couches rétinienne superficielles.

Ces VLE ne sont pas adaptées pour protéger les populations des effets sanitaires liés à des expositions répétées et sur de longues périodes.

Par ailleurs, les effets attendus liés à ces expositions (lésions photochimiques) sont d'autant plus graves que le cristallin ne filtre pas les courtes longueurs d'onde (enfants) ou que les pigments photosensibilisants sont plus nombreux (vieillesse et maculopathies liées à l'âge par exemple) ou que les mécanismes de réparation sont altérés.

Normes

Une même LED considérée individuellement ou intégrée dans un système d'éclairage pourrait être classée dans des groupes de risques différents selon la distance d'évaluation imposée par la norme NF EN 62471.

En effet, pour les lampes d'éclairage courant, cette norme prévoit une évaluation du risque à la distance à laquelle elles produisent un éclairage de 500 lx. Pour les autres types de lampes, la détermination du groupe de risque doit se faire pour le pire cas d'observation à savoir une distance de 200 mm.

Le groupe de risque d'un système d'éclairage LED peut être déterminé selon l'un ou l'autre des protocoles de mesure, conduisant à une classification très différente (l'évaluation à 500 lx donne toujours une évaluation minorée par rapport à l'évaluation à 200 mm).

6.8 Recommandations pour la protection des populations

Le groupe de travail estime qu'il y a urgence à prendre des mesures d'information et de protection de la population, sachant que des produits d'éclairage dépassant manifestement les valeurs limites d'exposition sont actuellement commercialisés sans marquage du risque encouru.

Recommandations liées à une luminance trop forte et un éblouissement trop important

- Concevoir des systèmes qui ne permettent pas la vision directe du faisceau émis par les LED. En ce qui concerne, les travailleurs, le GT recommande d'utiliser des dispositifs optiques de protection pour les travailleurs limitant les luminances perçues directes ou réfléchies.
- Prendre en compte la dégradation des LED blanches en usage qui peut induire un passage dans un groupe de risque photobiologique supérieur. En particulier, il est recommandé de tenir compte du vieillissement des luminophores qui, en association avec une régulation du flux lumineux à éclairage constant, peut provoquer l'augmentation de la proportion de lumière bleue dans le spectre d'émission au cours de la durée de vie des LED blanches.
- Appliquer des limites de luminance aux phares automobiles de jour et de nuit.

Recommandations relatives à l'information du consommateur

Imposer aux fabricants et aux intégrateurs de LED des contrôles de qualité et de traçabilité des LED authentifiés par un étiquetage des caractéristiques des LED (puissance, tension d'alimentation, température de couleur, flux lumineux, etc.), du groupe de risque et d'un label de qualité (reproductibilité, éco-marquage, etc.).

Recommandations au sujet des normes relatives à la qualité de l'éclairage

- Appliquer aux systèmes d'éclairage à LED, les recommandations concernant la conformité des installations d'éclairage aux normes :
 - NF X 35-103 Ergonomie : Principes d'ergonomie visuelle applicables à l'éclairage des lieux de travail.
 - NF EN 12464-1 Éclairage des lieux de travail – Partie 1 : Lieux de travail intérieurs.

- NF EN 12464-2 Éclairage des lieux de travail – Partie 2 : Lieux de travail extérieurs.
 - Série de normes NF EN 13201 : Éclairage public.
 - NF EN 12193 : Éclairage des installations sportives.
- Introduire les exigences de sécurité photobiologique dans toutes les normes de sécurité relatives aux LED, lampes à LED, modules de LED et luminaires à LED. Sont particulièrement concernées :
 - o la série de normes NF EN 60598 : Luminaires.
 - o la norme NF EN 62031 : Modules de DEL pour l'éclairage général : spécifications de sécurité
 - o la future norme CEI 62560 : Lampes à LED auto-ballastées pour l'éclairage général fonctionnant à des tensions > 50 V - Spécifications de sécurité
 - o le projet de norme PR CEI 62663-1 « *Non ballasted single capped LED lamps for general lighting – safety requirements* »,
 - Préciser les conditions de mesure et d'évaluation des systèmes à LED dans la norme NF EN 62471 de sécurité photobiologique. La détermination du groupe de risque devrait se faire pour le pire cas d'observation : distance de 200 mm qui permet d'obtenir le groupe de risque le plus défavorable.
 - Dans le cas de groupe de risque supérieur à 0, évaluer des distances de sécurité (distance à laquelle l'observation correspond à un groupe de risque 0), et le notifier de manière lisible au consommateur.
 - Éditer un guide d'application de cette norme exclusivement dédié aux systèmes à LED.
 - Proposer pour chaque groupe de risque des sous-groupes de risque qui permettraient d'affiner l'évaluation du risque.

Recommandations relatives aux effets sanitaires

- Protéger plus spécifiquement les jeunes enfants, les sujets aphakes (sans cristallin), les sujets pseudophakes (cristallin artificiel) et les personnes présentant des maladies de la rétine et du nerf optique notamment en interdisant les sources de lumière émettant une forte lumière froide ou de la lumière bleue dans les lieux qu'ils fréquentent (maternité, crèches, écoles, lieux de loisirs, etc.) ou dans les objets qu'ils utilisent (jouets, afficheur lumineux, veilleuse nocturne, etc.).
- Interdire l'utilisation des sources de lumière à base de LED ou autre émettant un rayonnement de type « blanc froid » intense dans des lieux de repos et à proximité des lieux de sommeil.
- Dans le cas d'exposition particulière (travailleurs), développer des moyens de protection adéquats (type lunette de protection optique spécifique aux LED).
- Prévenir les patients sous médicaments photosensibilisants des risques liés à l'exposition à la lumière froide et plus particulièrement issue de LED, même de groupe de risque 0.
- Limiter les papillotements de la lumière, quelle que soit sa fréquence à un niveau qui reste à déterminer par des études scientifiques et ceci pour chaque mode de fonctionnement (régime nominal ou gradation).

- Étudier la dangerosité des LED utilisées dans des applications non éclairagistes (systèmes (para)-médicaux, esthétiques, etc.)
- Utiliser avec précaution les dispositifs conduisant à augmenter la dimension effective de la LED, même si ces dispositifs n'augmentent pas le niveau de luminance (cas des collimateurs optiques et des assemblages denses de puces LED type « multichip »). En effet, l'utilisation de ces dispositifs conduit à des durées limites d'exposition à la lumière bleue plus courtes que dans le cas de la LED à simple puce sans optique supplémentaire. Le groupe de risque peut alors augmenter.

6.9 Recommandation pour des axes de recherche

Recherches relatives aux effets sanitaires

- Les limites d'exposition sont définies dans les normes pour des durées d'exposition limitées. Il serait nécessaire d'avoir des informations sur les effets liés à des expositions cumulées et de longues durées. Il serait ainsi pertinent de réaliser des études prospectives et rétrospectives sur les populations traitées par luminothérapie avec des LED bleues et de réaliser des protocoles expérimentaux évaluant les conséquences d'exposition prolongées et cumulées à des niveaux de luminance inférieures aux VLE.
- Des études seraient également nécessaires pour mesurer les conséquences des expositions à des LED blanc froid sur les rythmes circadiens et la contraction pupillaire. Il faudrait dans ce sens approfondir les études pour mieux caractériser les spectres d'action des mécanismes de régulation de l'horloge biologique par la lumière.
- Étudier l'incidence sur la santé (en lien avec de possibles dérèglements de l'horloge biologique) de la systématisation d'un éclairage à LED.
- Étudier systématiquement le déclenchement et ou l'aggravation des photo-dermatoses par un éclairage à LED.

Recherches relatives à la technologie des LED

- Améliorer la technologie des LED, en déplaçant la longueur d'onde d'excitation vers des longueurs d'onde moins critiques pour la sécurité photobiologique, ce qui passe par le développement de nouvelles générations de matériaux pour les LED et de luminophores.
- Aujourd'hui, la méthode numérique de calcul de l'éblouissement, traitée dans la Norme NF-EN 12464-1 (Éclairage des lieux de travail) et dans la publication 117 de la CIE, considère que l'on peut attribuer une surface apparente au luminaire, même dans le cas de sources de petite taille (lampes à incandescence). Or, dans le cas des LED, la plupart du temps cela est impossible. Il conviendrait d'étudier dans quelle mesure ou comment cette formule pourrait se généraliser aux LED et aux autres sources de petites tailles.
- Pour limiter les niveaux de luminance dans les systèmes d'éclairage à LED, il faudrait développer la recherche sur la conception de luminaires adaptés aux LED (petite taille, flux lumineux important) en utilisant des solutions optiques plus ou moins complexes (matériaux diffusants, films microstructurés, éléments holographiques, systèmes de lentilles et de miroirs, etc.)
- Étudier les mécanismes de dégradation des LED blanches pouvant conduire à une dérive bleue (bleuissement) de la lumière émise.

Bibliographie

Algvere P.V., Marshall J., Seregard S., Age-related maculopathy and the impact of blue light hazard. *Acta Ophthalmol Scand.* 2006 Feb;84(1):4-15. Review.

ANSI_NEMA_ANSLG C78.377 (2008) : Specifications for the chromaticity of solid state lighting products

Balasubramanian D., Ultraviolet radiation and cataract. *J Ocul Pharmacol Ther.* 2000 Jun;16(3):285-97

Bassel H.M., C.L. Hexsel, I.H. Hamzavi, H.W. Lim. Effects of visible light on the skin. *Photochem Photobiol* 84: 450-462, 2008.

Barbur J. L., Wolf J., and Lennie P. (1998), Visual processing levels revealed by response latencies to changes in different visual attributes. *Proc Biol Sci.* 1998 December 7; 265(1412): 2321–2325.

Berson E.L. (1971), Light deprivation for early retinitis pigmentosa. A hypothesis. *Archives in Ophthalmology*, 85, 521-529.

Berson E.L. (1980) Light deprivation and retinitis pigmentosa. *Vision Research*, 20, 1179-1184.

Berson D.M., Dunn F.A., Takao M., Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science* (New York, NY. 2002 Feb 8;295(5557):1070-3.

Boldrey E.E., Ho B.T., Griffith R.D., Retinal burns occurring at cataract extraction. *Ophthalmology.* 1984 Nov;91(11):1297-302.

Bullough, J. D. 2009. Spectral sensitivity for extrafoveal discomfort glare. *Journal of Modern Optics* 56(13): 1518-1522.

CEI TS 62504 (à paraître) : Termes et définitions pour les DEL et les modules DEL en éclairage général

CEI TS 61231 (1999) : Système international de codification des lampes (ILCOS)

CEI 62560 (à paraître) : Lampes à DEL autoballastées pour l'éclairage général fonctionnant à des tensions > 50 V - Spécifications de sécurité

CEI PAS 62612 (2009) : Lampes à DEL autoballastées pour l'éclairage général fonctionnant à des tensions > 50 V – Exigences de performances

CEI 61341 (1994) : Méthode de mesure de l'intensité dans l'axe et de l'angle (ou des angles) d'ouverture des lampes à réflecteur

CEI TR 61341 Ed.2 (à paraître) : Method of measurement of centre beam intensity and beam angle(s) of reflector lamps

CEI TR 62471-2 (à paraître) : Photobiological safety of lamps and lamp systems - Part 2: Guidance on manufacturing requirements relating to non-laser optical radiation safety

Cideciyan A.V., Jacobson S.G., Aleman T.S., Gu D., Pearce-Kelling S.E., Sumaroka A., Acland, G.M., Aguirre G.D. (2005) *In vivo* dynamics of retinal injury and repair in the *rhodopsin* mutant dog model of human retinitis pigmentosa. Proceedings of the National Academy of Science of the United State of America, 102, 5233-5238.

CIE S009 (2002) : Photobiological safety of lamps and lamp systems

CIE 85 (1989) : Solar Spectral Irradiance

CIE 117 (1995) : Technical Report Discomfort Glare in Interior Lighting

CIE-127 (2007) : Measurements of LED

CIE-177 (2007) : Colour rendering of white LED light sources

Chakravarthy U., Augood C., Bentham G.C., de Jong P.T., Rahu M., Seland J., Soubrane G., Tomazzoli L., Topouzis F., Vingerling J.R., Vioque J., Young I.S., Fletcher A.E., Cigarette smoking and age-related macular degeneration in the EUREYE Study. Ophthalmology. 2007 Jun;114(6):1157-63.

Chew EY, Sperduto RD, Milton RC, Clemons TE, Gensler GR, Bressler SB, Klein R, Klein BE, Ferris FL 3rd. Risk of advanced age-related macular degeneration after cataract surgery in the Age-Related Eye Disease Study: AREDS report 25. Ophthalmology. 2009 Feb;116(2):297-303.

Cruickshanks KJ, Klein R, Klein BE, Nondahl DM. Sunlight and the 5-year incidence of early age-related maculopathy: the beaver dam eye study. Arch Ophthalmol. 2001 Feb;119(2):246-50.

Dawson W, Nakanishi-Ueda T, Armstrong D, Reitze D, Samuelson D, Hope M, Fukuda S, Matsuishi M, Ozawa T, Ueda T, Koide R. Local fundus response to blue (LED and laser) and infrared (LED and laser) sources. Exp Eye Res. 2001 Jul;73(1):137-47.

Eden, "La technologie des diodes électroluminescentes blanches pour l'éclairage", Synthèse de la journée nationale d'études sur la révolution de l'éclairage par les diodes électroluminescentes, Sophia Antipolis, p. 26-29, 29 juin 2006.

Fletcher AE, Bentham GC, Agnew M, Young IS, Augood C, Chakravarthy U, de Jong PT, Rahu M, Seland J, Soubrane G, Tomazzoli L, Topouzis F, Vingerling JR, Vioque J. Sunlight exposure, antioxidants, and age-related macular degeneration. Arch Ophthalmol. 2008 Oct;126(10):1396-403

Forooghian F, Agrón E, Clemons TE, Ferris FL 3rd, Chew EY; AREDS Research Group. Visual Acuity Outcomes after Cataract Surgery in Patients with Age-Related Macular Degeneration: Age-Related Eye Disease Study Report No. 27. Ophthalmology. 2009 Aug 21.

Fujihara M, Nagai N, Sussan TE, Biswal S, Handa JT. Chronic cigarette smoke causes oxidative damage and apoptosis to retinal pigmented epithelial cells in mice. PLoS One. 2008 Sep 1;3(9):e3119.

Gu D, Beltran WA, Li Z, Acland GM, Aguirre GD. Clinical light exposure, photoreceptor degeneration, and AP-1 activation: a cell death or cell survival signal in the rhodopsin mutant retina? *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2007 Nov;48(11):4907-18

Gulkilik G, Taskapili M, Kocabora S, Demirci G, Muftuoglu GI. Association between visual acuity loss and optical coherence tomography findings in patients with late solar retinopathy. *Retina*. 2009 Feb;29(2):257-61.

Haitz R., Kish F., Tsao J., Nelson J., « Another semiconductor revolution : This time it's lighting », *Comp. Semiconductor Magazine*, March 2002.

Ham, W.T., Jr.; Mueller, H. A.; Sliney, D. H. Retinal sensitivity to damage from short wavelength light. *Nature* 206:153-155;1976

Hirakawa M, Tanaka M, Tanaka Y, Okubo A, Koriyama C, Tsuji M, Akiba S, Miyamoto K, Hillebrand G, Yamashita T, Sakamoto T. Age-related maculopathy and sunlight exposure evaluated by objective measurement. : *Br J Ophthalmol*. 2008 May;92(5):630-4

Hockwin O, Kojima M, Sakamoto Y, Wegener A, Shui YB, Sasaki K. UV damage to the eye lens: further results from animal model studies: a review. *J Epidemiol*. 1999 Dec;9(6 Suppl):S39-47.

Holonyak N., Bevacqua SF., « Coherent (Visible) Light Emission from Ga(As₁-XP_x) Junctions », *Appl. Phys. Lett.*, **1**(4), pp. 82-83, 1962.

Hooper CY, Lamoureux EL, Lim L, Fraser-Bell S, Yeoh J, Harper CA, Keeffe JE, Guymer RH. Cataract surgery in high-risk age-related macular degeneration: a randomized controlled trial. *Clin Experiment Ophthalmol*. 2009 Aug;37(6):570-6.

Iandiev I *et al.* Müller cell response to blue light injury of the rat retina. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2008 Aug;49(8):3559-67.

ICNIRP, « Guidelines on limits of exposure to broadband incoherent optical radiation (0.38 µm to 3 µm) », *Health Physics* **49**, 331-340 (1985) and **56**, 971-972 (1989)

ICNIRP, « Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz) », *Health Physics* **41**, 449-522 (1998)

ICNIRP, « ICNIRP statement on light-emitting diodes (LED) and laser diodes : implication for hazard assessment », (2000)

IEEE Standard P1789, A Review of the Literature on Light Flicker: 1 Ergonomics, Biological Attributes, Potential 2 Health Effects, and Methods in Which Some LED 3 Lighting May Introduce Flicker, IEEE 2010

IESNA LM-79-08 (2008) : Approved method for the electrical and photometric testing of solid-state lighting devices

IESNA LM-80-08 (2008) : approved method for measuring lumen maintenance of LED light sources

IESNA TM-21 (à paraître) : Predicting lumen maintenance of LED sources

Jorgenson JD., George MW., « Mineral Commodity Profiles—Indium », Open-File Report 2004-1300, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia 2005

Khan JC, Thurlby DA, Shahid H, Clayton DG, Yates JR, Bradley M, Moore AT, Bird AC; Genetic Factors in AMD Study. Smoking and age related macular degeneration: the number of pack years of cigarette smoking is a major determinant of risk for both geographic atrophy and choroidal neovascularisation. *Br J Ophthalmol*. 2006 Jan;90(1):75-80.

Khan JC, Shahid H, Thurlby DA, Bradley M, Clayton DG, Moore AT, Bird AC, Yates JR; Age related macular degeneration and sun exposure, iris colour, and skin sensitivity to sunlight. Genetic Factors in AMD Study. *Br J Ophthalmol*. 2006 Jan;90(1):29-32.

Klein R, Klein BE, Jensen SC, Cruickshanks KJ. The relationship of ocular factors to the incidence and progression of age-related maculopathy. *Arch Ophthalmol*. 1998 Apr;116(4):506-13.

Klein R, Knudtson MD, Cruickshanks KJ, Klein BE. Further observations on the association between smoking and the long-term incidence and progression of age-related macular degeneration: the Beaver Dam Eye Study. *Arch Ophthalmol*. 2008 Jan;126(1):115-21

Lang D., Blaulicht ist nicht gleich Blaulicht – Leserbrief , München, LICHT 7-8/2008

LaVail, M.M., Gorrin, G.M., Repaci, M.A. (1987) Strain differences in sensitivity to light-induced photoreceptor degeneration in albino mice. *Current Eye Research*, 6, 825-834.

Lawwill, T. (1973) Effects of prolonged exposure of rabbit retina to low intensity light. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 12, 45-51.

LED MAGAZINE, « Laservision LED lamps illuminate Canon building in HK », <http://www.LEDmagazine.com/news/4/3/6>, 1 mars 2007.

Le Grand Y (1972) *Optique physiologique*, tome II: lumière et couleurs. 3^{ed.}, Masson, Paris. English translation (1968) *Light, Colour and Vision*. Chapman & Hall, London. Chapitre 5, formule 5-4.

Li ZL, Tso MO, Jampol LM, Miller SA, Waxler M. Retinal injury induced by near-ultraviolet radiation in aphakic and pseudophakic monkey eyes. A preliminary report. *Retina*. 1990;10(4):301-14

Lohr, H.R., Kunchithapautham, K., Sharma, A.K., Rohrer, B. (2006) Multiple, parallel cellular suicide mechanisms participate in photoreceptor cell death. *Experimental Eye Research*, 83, 380-389.

Losev O. V. Soviet patent 12191 (1929).

Lu L. Stress-induced corneal epithelial apoptosis mediated by K⁺ channel activation. *Prog Retin Eye Res*. 2006 Nov;25(6):515-38.

Mills E., Jacobson A., « The Need for Independent Quality and Performance Testing of Emerging Off-grid White-LED Illumination Systems for Developing Countries », the Lumina Project, Techn. Report #1, 2 août 2007.

Ministère « Communication Culture » - Les Notes de l'Observatoire de l'Emploi culturel – N°47 - Emploi et spectacle. Synthèse des travaux de la Commission permanente sur l'emploi du Conseil National des Professions du Spectacle. site WEB <http://www.irma.asso.fr/IMG/pdf/noec47.pdf>. Octobre 2006. 86p

Mitchell P, Wang JJ, Foran S, Smith W. Five-year incidence of age-related maculopathy lesions: the Blue Mountains Eye Study. *Ophthalmology*. 2002 Jun;109(6):1092-7.

Nakamura S., Mukai T., Sengh M. 1994 *Appl. Phys. Lett.*, **64**(13):1687-9.

Narukawa Y., Narita J., Sakamoto T., Yamada T., Narimatsu H., Sani M., Mukai T. 2007 *Physica Status Solidi (a)*, **204**(6), 10.1002/pssa.200674782, pp. 2087-2093

NAVIGANT Consulting Europe, Life Cycle Assessment of Ultra-Efficient Lamps, research report completed for the Department for Environment, Food and Rural Affairs UK, May 5th, 2009

NF EN 12464-1 (2003) : Eclairage des lieux de travail – partie 1 : lieux de travail intérieurs

NF EN 12665 (2002) : Termes de base et critères pour la spécification des exigences en éclairage

NF EN 13032-1 (2004) : Mesure et présentation des données photométriques des lampes et des luminaires – partie 1 : mesurage

NF EN 60598-1 (2009) : Luminaires : partie 1 – prescriptions générales et essais, Normes NF EN 60598-2 : Luminaires : parties 1 à 25 : règles particulières

NF EN 60968 (2001) : Lampes à ballast intégré pour l'éclairage général : prescriptions de sécurité

NF EN 50285 (2000) : Efficience énergétique des lampes électriques à usage domestique - Méthodes de mesure

NF EN 55015 (2007) : Limites et méthodes de mesure des perturbations radioélectriques produites par les appareils électriques d'éclairage et les appareils analogues.

NF EN 60064 (2008) : lampes à filament de tungstène pour usage domestique et éclairage général similaire

NF EN 60825-1 (1994) : Sécurité des appareils à laser

NF EN 60838-2-2 (2006) : prescriptions particulières des connecteurs pour modules de LED

NF EN 60969 (1993) : lampes à ballast intégré pour l'éclairage général : prescriptions de performances

NF EN 61000-3-2 (2006) Compatibilité électromagnétique (CEM) - Partie 3-2 : limites - Limites pour les émissions de courant harmonique (courant appelé par les appareils inférieur ou égal à 16 A par phase

NF EN 61000-3-3 (2005) : Compatibilité électromagnétique (CEM) - Partie 3-3 : limites - Limitation des variations de tension, des fluctuations de tension et du papillotement dans les réseaux publics

d'alimentation basse tension pour les matériels ayant un courant assigné inférieur ou égal à 16 A par phase et non soumis à un raccordement conditionnel

NF EN 61347-1 (2008) : Appareillages de lampes – partie 1 : exigences générales et exigences de sécurité)

NF EN 61547 (1996) : Equipements d'éclairage général : prescriptions d'immunité EMC.

NF EN 61347-2-13 (2006) : Appareillage de lampes – partie 2-13 : exigences particulières pour les appareillages électroniques alimentés en courant continu ou alternatif pour les modules de LED

NF EN 62031 (2008) : Modules de DEL pour l'éclairage général : spécifications de sécurité

NF EN 62384 (2006) : Appareillages électroniques alimentés en courant continu ou alternatif pour modules de DEL : exigences de performances

NF EN 62386-207 (2007) : Interface d'éclairage adressable numérique - Partie 207 : exigences particulières pour les appareillages de commande - Modules de DEL

NF EN 62471 (2008) : Sécurité photobiologique des lampes et des appareils utilisant des lampes

NF EN 62493 (2008) : Evaluation d'un équipement d'éclairage relativement à l'exposition humaine aux champs magnétiques

NF X 35-103 (1990) : Principes d'ergonomie visuelle applicables à l'éclairage des lieux de travail

NFPA 704: Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response, 2007 Edition

Nilsson SE, Textorius O, Andersson BE, Swenson B. Clear PMMA versus yellow intraocular lens material. An electrophysiologic study on pigmented rabbits regarding « the blue light hazard ». Prog Clin Biol Res. 1989;314:539-53.

Noell, W.K., Walker, V.S., Kang, B.S., and Berman, S. (1966) Retinal damage by light in rats. Investigative Ophthalmology and Visual Science, 5, 450-473.

OIDA, « Light Emitting Diodes (LED) for General Illumination », White LED Road Map (Update), OIDA, 2002

Organisciak, D.T., Winkler, B.S. (1994) Retinal light damage : practical and theoretical considerations. Progress in Retina and Eye Research, 13, 1-29.

Paskowitz DM, LaVail MM, Duncan JL. Light and inherited retinal degeneration. Br J Ophthalmol. 2006 Aug;90(8):1060-6. Epub 2006 May 17

Photonics 21, « Towards a Bright Future for Europe - Strategic Research Agenda in photonics », Photonics21 EU Joint Technology Platform Roadmap, avril 2006

Portera-Cailliau, C., Sung, C.H., Nathans, J., Adler, R. (1994) Apoptotic photoreceptor cell death in mouse models of retinitis pigmentosa. *Proceedings of the National Academy of Science of the United State of America*, 91, 974-8.

PR CEI 62663-1 « Non ballasted single capped LED lamps for general lighting – safety requirements »

PR CEI 62663-2 « Non ballasted single capped LED lamps for general lighting – performance requirements »

PR NF EN 61231 (2009) : Système international de codification des lampes (ILCOS)

Rapp, L., Smith, S.C. (1992) Evidence against melanin as the mediator of retinal toxicity by short-wavelength light. *Experimental Eye Research*, 54, 55-62.

Remé, C.E., Grimm, C., Hafezi, F., Marti, A. Wenzel, A. (1998) Apoptotic Cell Death in Retinal degenerations. *Progress in Retinal and Eye Research*, 17, 443-464.

Remé, C.E. (2005) The dark side of light : Rhodopsin and the silent death of vision. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 46, 2672-2682.

Robert E. Marc, *et al.* Extreme retinal remodeling triggered by light damage: implications for age related macular degeneration. *Mol Vis*. 2008; 14: 782–805.

Roh S, Weiter JJ. Light damage to the eye. : *J Fla Med Assoc*. 1994 Apr;81(4):248-51

Codenotti M, Patelli F, Brancato R. OCT findings in patients with retinopathy after watching a solar eclipse. *Ophthalmologica*. 2002;216:463–466.

Rodieck, R.W. (1998) The first steps in seeing. *Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts*. Pp 462-469;.513-521. Voir particulièrement la page 467.

Round HJ., « Note on Carborandum », *Electrical World*, vol. 49, p. 309, 1907

Seko Y, Pang J, Tokoro T, Ichinose S, Mochizuki M. Blue light induced apoptosis in cultured retinal pigment epithelium cells of the rat. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. 2001 Jan; 239(1):47-52.

Sharma A, Neekhra A, Gramajo AL, Patil J, Chwa M, Kuppermann BD, Kenney MC. Effects of Benzo(e)Pyrene, a toxic component of cigarette smoke, on human retinal pigment epithelial cells in vitro. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2008 Nov;49(11):5111-7. Epub 2008 Jun 27.

Sliney D.H., Wolbarsht, M.L., *Safety with lasers and other optical sources. Plenum, New York* (1980)

Sliney D H; Wolbarsht M L. Safety standards and measurement techniques for high intensity light sources. *Vision research* 1980;20(12):1133-41.

Sperling, H.G. (1980) Prolonged intense spectral light effects on Rhesus retina. *In* The effects of constant light on visual processes. Williams, T.P., and Baker, B.N. editors, *Plenum Press, New York*, 195-214.

Sperling, H.G. (1986) Spectral sensitivity, intense spectral light studies, and the color receptor mosaic of primates. *Vision Research*, 26, 1557-1572.

Steele R., Conference introductive, *Strategies in Light*, San Jose, 20-23 février 2007.

Stockman A, Sharpe LT, Fach C (1999) The spectral sensitivity of the human short-wavelength sensitive cones derived from thresholds and color matches. *Vision Res* 39: 2901-2927.

Stone, J., Maslim, J., Valter-Kocsi, K. Mervin, K., Bowers, F., Chu, Y., Barnett, N., Provis, J., Lewis, G., Fisher, S.K., Bisti, S., Gargini, C., Cervetto, L., Merin, S., Peér, J. (1999) Mechanisms of photoreceptor death and survival in mammalian retina. *Progress in Retina and Eye Research*, 18, 689-735.

Sze S.M., *Future Trends in Microelectronics: The Nano Millennium*, New York, Editeur S. Luryi, John Wiley & Sons, 2002.

Takana A, Hirata M, Omura M, Inoue N, Ueno T, Homma T, Sekizawa K, J. *Occup. Health* 2002, 44 : 99-102, Pulmonary toxicity of Indium-Tin Oxide and Indium phosphide after intratracheal instillations into the lung of hamsters.

Tanito M, Kaidzu S, Anderson RE Protective effects of soft acrylic yellow filter against blue light-induced retinal damage in rats. *Exp Eye Res.* 2006 Dec;83(6):1493-504

The US Senate, « To establish the Next Generation Lighting Initiative at the Department of Energy, and for other purposes. », US Senate Bill S.1166, 11 août 2001.

Tomany SC, Klein R, Klein BE; Beaver Dam Eye Study. The relationship between iris color, hair color, and skin sun sensitivity and the 10-year incidence of age-related maculopathy: the Beaver Dam Eye Study. *Ophthalmology*. 2003 Aug;110(8):1526-33

Tomany SC, Cruickshanks KJ, Klein R, Klein BE, Knudtson MD. Sunlight and the 10-year incidence of age-related maculopathy: the Beaver Dam Eye Study. *Arch Ophthalmol*. 2005 Mar;123(3):362.

Tomany SC, Cruickshanks KJ, Klein R, Klein BE, Knudtson MD. Sunlight and the 10-year incidence of age-related maculopathy: the Beaver Dam Eye Study. *Arch Ophthalmol*. 2005 Mar;123(3):362.

Thanos S, Heiduschka P, Romann I. Exposure to a solar eclipse causes neuronal death in the retina. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. 2001;239:794–800

Tso MO, La Piana FG: The human fovea after sungazing. *Trans Sect Ophthalmol Am Acad Ophthalmol Otolaryngol* 79:OP788--95, 1975.

Ueda T, Nakanishi-Ueda T, Yasuhara H, Koide R, Dawson WW, .Eye damage control by reduced blue illumination. *Exp Eye Res.* 2009 Dec;89(6):863-8

Vos JJ, Glare today in historical perspective : towards a new CIE glare observer and a new glare nomenclature. CIE 24th session, Warsaw 1999, vol. 1, pp.38-42

Wang JJ, Klein R, Smith W, Klein BE, Tomany S, Mitchell Cataract surgery and the 5-year incidence of late-stage age-related maculopathy: pooled findings from the Beaver Dam and Blue Mountains eye studies. *Ophthalmology*. 2003 Oct;110(10):1960-7.

Wang AL, Lukas TJ, Yuan M, Du N, Handa JT, Neufeld AH. Changes in retinal pigment epithelium related to cigarette smoke: possible relevance to smoking as a risk factor for age-related macular degeneration. PLoS One. 2009;4(4):e5304. Epub 2009 Apr 24

Wenzel, A., Grimm, C., Samardzija, M., Remé, C.E. (2005) Molecular mechanisms of light-induced photoreceptor apoptosis and neuroprotection for retinal degeneration. Progress in Retina and Eye Research, 24, 275-306.

Wolbarsht, ed. Laser applications in medicine and biology, New York, Plenum Press, 1989

Wood JP, Lascaratos G, Bron AJ, Osborne NN. The influence of visible light exposure on cultured RGC-5 cells. Mol Vis. 2007 Feb 11;14:334-44.

Wu L., "National SSL program in China", Proceedings 11th International Symposium on the Science and Technology of Light Sources, Shanghai, p. 479-485, 20-24 mai 2007.

Wyszecki, G., & Stiles, W. S. (1982). Color Science (2nd ed.). New York: Wiley. Paragraphe 2.4.4.

Youn HY, Chou BR, Cullen AP, Sivak JG. Effects of 400 nm, 420 nm, and 435.8 nm radiations on cultured human retinal pigment epithelial cells. J Photochem Photobiol B. 2009 Apr 2;95(1):64-70

Young RW, Solar radiation and Age Related Macular dégénération. 1988 ; 32(4) : 252-269)

Zastrow L., N. Groth, F. Klein, D. Lockott, J ladermann, R; Renneberg, L. Ferrero. The Missing Link – Light-induced (280-1,600 nm) free radical formation in human skin. Skin Pharmacol Physiol 22 : 31-44, 2009

Zhu, T., Life Cycle Assessment in Designing Greener Semiconductor. Thesis. Department of Chemical and Environmental Engineering, University of Arizona, Arizona, 2004.

Zhu Y, Tu DC, Denner D, Shane T, Fitzgerald CM, Van Gelder RN. Melanopsin-dependent persistence and photopotential of murine pupillary light responses. Investigative ophthalmology & visual science. 2007 Mar;48(3):1268-7

ANNEXES

DU RAPPORT « LED »

Annexes du chapitre 2 : « Éclairage et LED »

A - Le rôle de l'optique de l'œil dans le calcul de l'éclairement énergétique réel sur la rétine

Éclairement énergétique $E_{e, \text{cornée}}$ sur la cornée

Le premier pas consiste à mesurer l'éclairement énergétique sur la cornée $E_{e, \text{cornée}}$ produit par une surface émettrice de luminance énergétique $L_{e, \text{source}}$. (Figure 53)

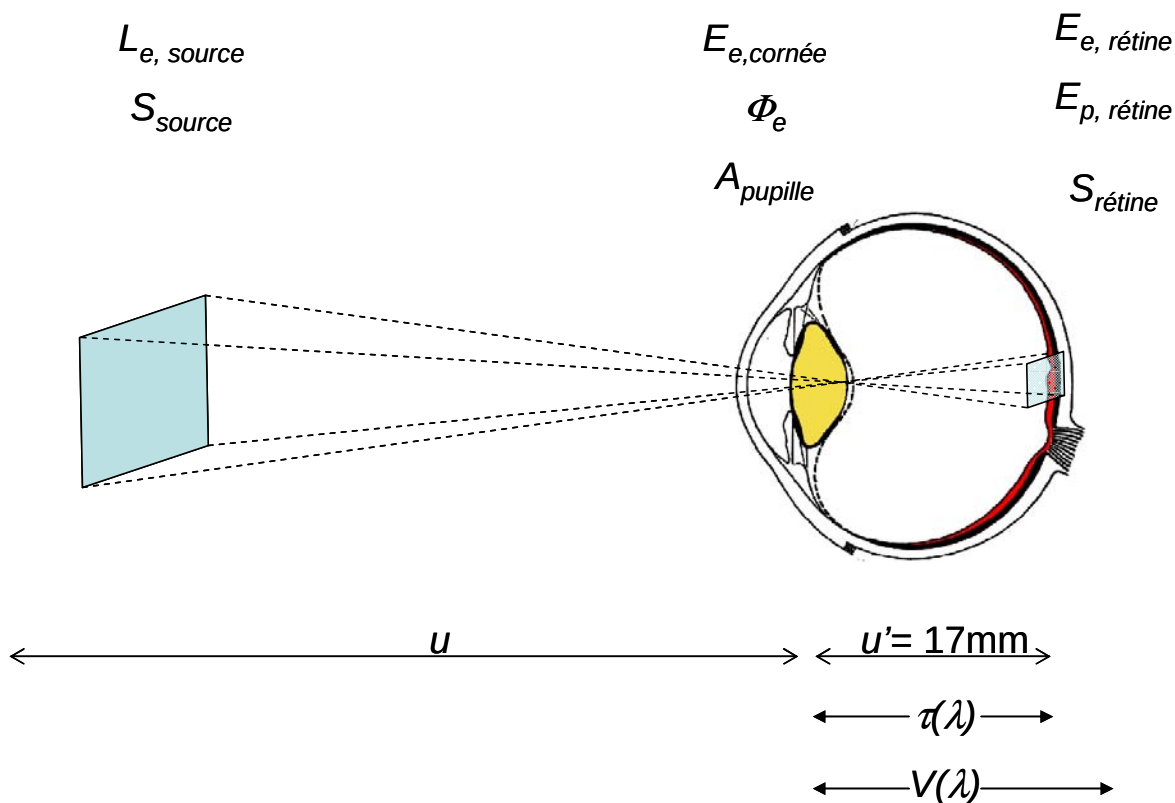


Figure 53: Données d'entrée et de sortie (modifié d'après Le Grand, 1972).

On considère la source comme ponctuelle en regard de la distance source-cornée, et l'observateur regardant dans la direction de la source.

Soit $L_{e, \text{source}}$ la luminance énergétique ou radiance de la source en $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, mesurée dans la direction de la pupille

S_{source} la surface de la source en m^2 , considérée comme petite vis-à-vis de la distance source-cornée

u la distance de la source à la cornée en m.

alors

$$E_{e, \text{cornée}} = \frac{L_{e, \text{source}} S_{\text{source}}}{u^2}$$

$$E_{e, \text{cornée}} = \frac{S_{\text{source}}}{u^2} \int L_{e, \lambda, \text{source}}(\lambda) d\lambda$$

L'éclairement énergétique sur la cornée s'exprime en W / m².

Note : L'éclairement énergétique sur la cornée peut aussi être exprimé en W ./ cm².

Flux énergétique $\Phi_{e,pupille}$ entrant dans la pupille

Pour calculer l'éclairement énergétique $E_{e,rétine}$ de la rétine produit par la source, considérons le flux $\Phi_{e,pupille}$ entrant dans la pupille.

Soit $L_{e,source}$ la luminance énergétique de la source en W /sr / m²
 S_{source} la surface de la source en m²,
 $A_{pupille}$ la surface de la pupille en m²,
 u la distance de la source à la pupille en m,

alors

$$\Phi_{e,pupille} = E_{e,cornée} A_{pupille} = \frac{L_{e,source} S_{source} A_{pupille}}{u^2}$$

$$\Phi_{e,pupille} = \frac{S_{source} A_{pupille}}{u^2} \int L_{e,\lambda,source}(\lambda) d\lambda$$

Le flux entrant dans la pupille s'exprime en W.

Note : la formule s'applique sans changement si la luminance énergétique L_e de la source est en W / sr/ cm² et la surface de la pupille $A_{pupille}$ en cm².

Éclairement énergétique réel sur la rétine

Le flux $\Phi_{e,pupille}$ pénétrant par la pupille est d'abord atténué légèrement par les milieux oculaires de transmission $\tau(\lambda)$, puis il tombe sur la rétine.

L'étendue $S_{rétine}$ de la surface rétinienne éclairée est proportionnelle à la surface de la source S_{source} .

Soit u la distance de la source à la pupille en m,
 u' la longueur de l'œil, égale à 0.017 m environ

on obtient

$$\frac{S_{rétine}}{u'^2} = \frac{S_{source}}{u^2}$$

Note. On admet que le plan de la cornée, le plan de la pupille et les plans nodaux sont confondus.

L'éclairement énergétique réel $E_{e,rétine}$ sur la rétine est donc égal au flux $\Phi_{e,pupille}$ entrant dans la pupille multiplié par le facteur de transmission T des milieux oculaires divisé par la surface rétinienne éclairée $S_{rétine}$. Comme la transmission des milieux oculaires n'est pas uniforme sur tout le spectre visible, on utilisera la formulation intégrée des grandeurs énergétiques.

$$E_{e,rétine} = \frac{\Phi_{e,pupille} T}{S_{rétine}}$$

$$E_{e,rétine} = \frac{S_{source} A_{pupille}}{S_{rétine} u^2} \int L_{e,\lambda,source}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda = \frac{A_{pupille}}{u'^2} \int L_{e,\lambda,source}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda$$

On constate que la distance u entre la source et l'objet n'entre pas en ligne de compte.

Si le diamètre pupillaire est d_{pupille}

$$E_{e,\text{rétine}} = \frac{\pi d_{\text{pupille}}^2}{4 u'^2} \int L_{e,\lambda,\text{source}}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda$$

L'éclairement énergétique réel sur la rétine s'exprime en W / m^2 .

$$u'^2 = 0.0002783 \text{ m}^2$$

Note : d_{pupille} et u' doivent être exprimés dans la même unité, m ou cm.

Note : Si d_{pupille} et u' sont exprimés en cm

$$u'^2 = 2.783 \text{ cm}^2$$

$$\frac{\pi}{4u'^2} = 0.27 \text{ cm}^{-2}$$

Si la luminance énergétique L_e de la source est en $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, l'éclairement énergétique réel sur la rétine s'exprime alors en W / cm^2 .

$$E_{e,\text{rétine}, \text{W/cm}^2} = 0.27 \times d_{\text{pupille}, \text{cm}^2}^2 \int L_{e,\lambda,\text{source}, \text{W/cm}^2}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda$$

Note : Si l'on ne dispose pas des données spectrales, on écrit la formule sous une forme simple

$$E_{e,\text{rétine}, \text{W/cm}^2} = 0.27 \times d_{\text{pupille}, \text{cm}^2}^2 \times \tau \times L_{e,\text{source}, \text{W/(sr.cm}^2\text{)}}$$

En conclusion, l'éclairement énergétique réel sur la rétine $E_{e,\text{rétine}}$ est proportionnel à la luminance énergétique de la source et à la surface de la pupille.

En conclusion, l'éclairement énergétique réel sur la rétine $E_{e,\text{rétine}}$ est proportionnel à la luminance énergétique de la source et à la surface de la pupille.

Exposition énergétique réelle de la rétine

On calculera l'exposition énergétique $H_{e,\text{rétine}}$ dans le cas où l'éclairement $E_{e,\text{rétine}}$ reçu par la rétine doit être cumulé dans la durée.

La même formule peut être appliquée.

Soit $Q_{e,\lambda,\text{source}}$ l'énergie émise par la source pendant le temps d'exposition en $\text{J} / \text{sr} / \text{m}^2$,

$$Q_{e,\lambda,\text{source}} = \int_{\Delta t} L_{e,\lambda,\text{source}} dt$$

alors l'exposition $H_{e,\text{rétine}}$ reçue par la rétine accumulée pendant l'irradiation est donnée par

$$H_{e,\text{rétine}} = \frac{\pi d_{\text{pupille}}^2}{4 u'^2} \int Q_{e,\lambda,\text{source}}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda$$

exprimée en J / m^2 .

Note : d_{pupille} et u' doivent être exprimés dans la même unité, m ou cm.

Note : Si d_{pupille} et u' sont exprimés en cm, et si la luminance énergétique L_e de la source est en $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, l'éclairement énergétique sur la rétine étendu à la durée s'exprime alors en $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$.

$$H_{e,rétine} = 0.27 \times d_{pupille}^2 \int Q_{e,\lambda,source}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda$$

Éclairement photonique sur une surface (cornée ou rétine). Conversion des unités de mesure

Flux

Tout flux pénétrant dans la pupille peut être considéré comme un **flux énergétique** Φ_e (une puissance) exprimé en watt (W) ou comme un **flux photonique** Φ_p exprimé en nombre de photons par seconde. Les deux expressions sont liées par l'énergie du photon $h\nu$ ou hc / λ . Si on note $\Phi_e(\lambda)$ le flux contenu dans un petit intervalle de longueur d'onde $\Delta\lambda$, soit

$$\Phi_e(\lambda) = \int_{\Delta\lambda} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda$$

alors

$$\Phi_p(\lambda) = \frac{\Phi_e(\lambda)}{h\nu} = \frac{\lambda}{hc} \Phi_e(\lambda)$$

avec

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m / s}$$

$$h = 6.626176 \times 10^{-34} \text{ J s}$$

$$\frac{1}{hc} = 5.034 \times 10^{24} / \text{J / m}$$

$$\Phi_p(\lambda) = 5.034 \times 10^{24} \lambda \Phi_e(\lambda)$$

où λ est en mètre.

Le flux photonique est exprimé en nombre de photons par seconde (photons.s⁻¹), dans l'intervalle de longueur d'onde considéré.

Note : Attention, les formules ne sont valables que sur un petit intervalle de longueur d'onde $d\lambda$ ou $\Delta\lambda$.

Si l'on considère un **petit intervalle de fréquence** $d\nu$ ou $\Delta\nu$, il faut écrire

$$\Phi_p(\nu) = \frac{\lambda^3}{hc^2} \Phi_e(\lambda)$$

Éclairement

De même, l'**éclairement photonique** $E_{p,rétine}(\lambda)$ réel sur une surface devient

$$E_p(\lambda) = \frac{E_e(\lambda)}{h\nu} = \frac{\lambda}{hc} E_e(\lambda)$$

$$E_p(\lambda) = 5.034 \times 10^{24} \times \lambda_{\text{mètre}} E_e(\lambda) \quad (\text{WS})$$

La longueur d'onde λ est en mètre.

L'éclairement énergétique est exprimé en watt par unité de surface (W / m²),

L'éclairement photonique s'exprime en nombre de photons par seconde par unité de surface dans l'intervalle de longueur d'onde considéré (photons.s⁻¹ / m²).

Si la longueur d'onde λ est en nanomètre (nm)

$$E_p(\lambda) = 5.034 \times 10^{15} \times \lambda_{\text{nanometre}} E_e(\lambda)$$

La formule s'applique tant à l'éclairement de la cornée qu'à l'éclairement de la rétine.

Pour le raccordement de l'éclairement énergétique sur la rétine à la luminance énergétique spectrale de la source émettrice, donné par la formule

$$E_{e,\text{rétine}} = \frac{\pi d_{\text{pupille}}^2}{4 u'^2} \int L_{e,\lambda,\text{source}}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda$$

on écrit, sur un petit intervalle de longueur d'onde $\Delta\lambda$,

$$E_{e,\text{rétine}}(\lambda) = \frac{\pi d_{\text{pupille}}^2}{4 u'^2} \tau(\lambda) L_{e,\text{source}}(\lambda) \Delta\lambda$$

on obtient

$$E_{p,\text{rétine}}(\lambda) = 5.034 \times 10^{24} \times \frac{\pi d_{\text{pupille}}^2}{4 u'^2} \lambda \tau(\lambda) L_{e,\text{source}}(\lambda) \Delta\lambda$$

La longueur d'onde λ est en mètre.

d_{pupille} et u' doivent être exprimés dans la même unité, m ou cm.

La luminance énergétique est exprimée en watt par unité d'angle solide par unité de surface (W / sr / m²).

L'éclairement photonique s'exprime en nombre de photons par seconde par unité de surface dans l'intervalle de longueur d'onde considéré (photons/ s / m²).

Note : Si d_{pupille} et u' sont en cm, si la longueur d'onde λ est en nm, et si la luminance énergétique L_e de la source est en W.sr⁻¹.cm⁻², l'éclairement photonique réel sur la rétine s'exprime alors en photons.s⁻¹.cm⁻².

$$\frac{\pi d_{\text{pupille}}^2}{4 u'^2} = 0.27 \times d_{\text{pupille,cm}}^2$$

$$E_{p,\text{rétine}}(\lambda) = 3.95 \times 10^{15} \times d_{\text{pupille,cm}}^2 \lambda_{\text{nm}} \tau(\lambda) L_{e,\text{source}}(\lambda) \Delta\lambda$$

Éclairement lumineux réel sur la rétine

Il faut reprendre la définition des grandeurs visuelles qui intègre la contribution de tous les rayonnements monochromatiques composant la lumière

$$L_v = 683 \int_{\text{vis}} L_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

$$E_v = 683 \int_{\text{vis}} E_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

Pour un rayonnement monochromatique, nous avons

$$E_{e,\text{rétine}} = \frac{A_{\text{pupille}}}{u'^2} \int L_{e,\lambda,\text{source}}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda \quad \text{équation déjà citée}$$

Pour la transposition de la formule dans le domaine photométrique, on doit tenir compte du fait que la fonction $V(\lambda)$ inclut le facteur de transmission $\tau(\lambda)$, ce qui donne

$$E_{v,rétine} = \frac{L_{v,source}(\lambda) A_{pupille}}{u'^2}$$

$$E_{v,rétine} = \frac{\pi d_{pupille}^2}{4 u'^2} L_{v,source}$$

Note : $d_{pupille}$ et u' doivent être exprimés dans la même unité.

Note : Si $d_{pupille}$ et u' sont en cm

$$E_{v,rétine} = 0.27 \times d_{pupille,cm}^2 L_{v,source}$$

Note : Soulignons cette difficulté. Il convient d'expliquer que l'efficacité lumineuse traduit la sensibilité spectrale à la lumière visible de la rétine, en incluant la transmission des milieux oculaires. De ce fait, lorsqu'il s'agit de transposer des grandeurs énergétiques en grandeurs lumineuses, selon qu'elles sont mesurées à l'extérieur ou à l'intérieur de l'œil, on inclut ou non le facteur de transmission des milieux oculaires $\tau(\lambda)$.

Lien entre la luminance (lumineuse) de la source et l'éclairement énergétique sur la rétine

Si l'on souhaite exprimer l'éclairement sur la rétine en termes énergétiques, d'une part, et la luminance de la source en termes lumineux, d'autre part, on écrit

$$683 \int_{vis} E_{e,rétine} V(\lambda) d\lambda = \frac{L_{v,source} A_{pupille}}{u'^2}$$

Il n'est pas possible de simplifier l'expression de l'intégrale parce qu'elle n'inclut aucun terme constant. Toutefois, pour toute source dont on connaît la répartition spectrale relative d'énergie, il est possible de calculer le **facteur d'efficacité lumineuse L_v / L_e adapté** à cette source. Ce facteur peut être transposé à l'éclairement.

$$E_{v,rétine} = (L_v / L_e) E_{e,\lambda,rétine}$$

L'éclairement énergétique sur la rétine est estimé par la formule

$$E_{e,rétine} = \frac{\pi d_{pupille}^2}{4 u'^2} \left(\frac{L_v}{L_e} \right) L_{v,source}$$

A titre d'exemple, le facteur L_v / L_e pour la lumière du jour est voisin de 200.

Le troland, unité de niveau rétinien

La grandeur utile pour la vision est bien l'éclairement reçu par la rétine. Pour éviter des calculs fastidieux, on utilise parfois une grandeur analogue : le **niveau rétinien T** égal à

$$T = L_v A_{pupille,mm^2}$$

L'unité est le troland (Td).

Dans la définition du niveau rétinien, l'aire de la pupille est exprimée en mm².

A titre d'exemple, pour une luminance de 10 cd / m², l'aire de la pupille est voisine de 10 mm², le niveau rétinien est égal à 100 Td.

B - Analyse de Cycle de Vie

Considérations générales

L'analyse du cycle de vie (ACV) - ou écobilan - est principalement une méthode servant à mesurer les impacts environnementaux des différentes activités économiques et ce, sur tout le cycle de vie du produit ou du processus.

Une ACV d'un produit typique tient compte de l'approvisionnement en matières premières nécessaires pour fabriquer le produit, de la fabrication des produits intermédiaires et finalement du produit lui-même, y compris le conditionnement, le transport des matières premières, des produits intermédiaires, du produit lui-même, l'utilisation du produit et son élimination après utilisation. C'est tout le cycle de vie du produit, du « berceau à la tombe » (*cradle-to-grave*) : de l'extraction des ressources à la fin de vie du produit y compris le traitement des déchets créés (mise en décharge, incinération, recyclage) qu'il va falloir prendre en compte.

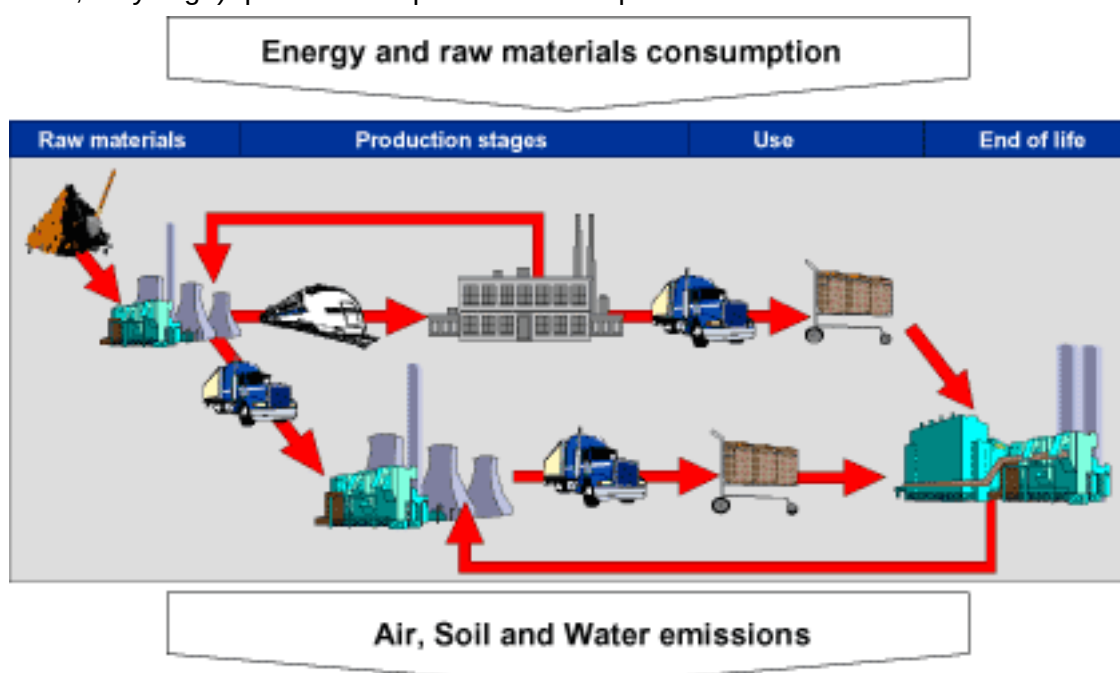


Figure 54: Analyse du cycle de vie d'un produit

Le calcul d'une ACV ou d'un bilan carbone repose sur une approche très similaire. La différence fondamentale est que le bilan carbone ne prend en compte que les émissions de gaz à effet de serre alors que l'ACV va calculer en plus l'impact sur d'autres catégories toutes aussi importantes pour la planète comme : la toxicité humaine, l'écotoxicité, la diminution des ressources, l'occupation de l'espace, l'acidification, etc. Plus d'une douzaine de catégories d'impacts sont utilisées dans une ACV contre un seul critère pour le bilan carbone.

Une ACV permet d'identifier les points sur lesquels un produit peut être amélioré et vise à prévenir les impacts liés aux activités humaines. Le but fondamental, suivant la logique de pensée cycle de vie, est de réduire la pression d'un produit sur les ressources et l'environnement tout au long de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières jusqu'à son traitement en fin de vie (mise en décharge, incinération, recyclage, etc.). Un effet secondaire est qu'en limitant les besoins en ressources et en énergie, la chaîne de valeur du produit peut s'en trouver améliorée. L'analyse du cycle de vie est à la fois :

- une procédure, c'est à dire une suite d'étapes standardisées ;
- un modèle de transformations mathématiques permettant de transformer des flux en impacts environnementaux potentiels.

Il est important de savoir que cette analyse s'occupe d'étudier les fonctions du produit contrairement à ce que ferait penser le nom. En effet, en n'étudiant que le produit en lui-même, il deviendrait difficile de comparer des produits remplissant la même fonction mais de manière différente comme la voiture et le transport en commun dont la fonction commune est de déplacer des personnes. L'aspect économique n'est pas réellement intégré dans cette méthode, sauf parfois lorsqu'on fait usage des valeurs économiques en guise d'unités fonctionnelles ou pour pondérer les inventaires et les impacts.

Un bilan carbone est intéressant à calculer parce que rapide et simple à interpréter (critère unique), par contre, dans le cadre d'une amélioration environnementale du produit, l'ACV permet d'éviter des conclusions hâtives et surtout des transferts d'impact. Seule une analyse critique et détaillée de tous les impacts permet de conclure si le produit ou service proposé est vraiment plus intéressant pour l'environnement.

L'approche par ACV est adoptée le plus souvent au niveau international pour répondre au problème de l'évaluation des impacts environnementaux des produits. Une ACV obéit à la série des normes ISO 14040 et 14044.⁶²

Il est important à chaque fois que l'on réalise une Analyse de Cycle de Vie de déterminer les objectifs et la problématique qui conduisent à avoir besoin de la méthode. La plupart des auteurs s'entendent pour décomposer l'ACV en quatre grandes étapes, décrites dans la norme ISO 14044, soit :

- 1) Définition des frontières du système, produit ou processus étudié et des unités fonctionnelles : il s'agit dans un premier temps de définir les objectifs et le champ de l'étude. Idéalement, une analyse du cycle de vie doit porter sur la totalité du cycle de vie d'un produit et sur tous les types d'impacts sur l'environnement, y compris la consommation d'énergie et l'extraction des matières premières. Toutefois, comme il est rarement possible de réaliser une étude aussi complète, l'objectif de l'analyse doit se limiter à l'identification de zones spécifiques supposées exercer un impact significatif sur le résultat final.
- 2) Compilation des données (inventaire) : lorsque les objectifs ont été définis, les données sont réunies pour quantifier les intrants - les ressources employées - et les différentes substances rejetées dans l'environnement (par ex., la consommation d'énergie et de matières premières et les émissions dans l'atmosphère, l'eau et le sol).
- 3) Évaluation des impacts : il s'agit d'une procédure en trois phases qui analyse l'inventaire des intrants et des rejets en termes d'impact sur l'environnement.
 - Classification : les données de l'inventaire sont classées en type d'impact (ex : réchauffement de l'atmosphère, acidification, etc.)
 - Caractérisation : les paramètres de chaque type d'impact doivent être condensés en un seul paramètre dominant (par ex., le CO₂ pour le réchauffement de l'atmosphère).
 - Évaluation : les différents types d'impacts sont pondérés entre eux de façon à pouvoir comparer les impacts d'un groupe et ceux des autres groupes.
- 4) Interprétation et évaluation des améliorations possibles : au stade final, des conclusions sont tirées des résultats de l'analyse de l'inventaire ou du bilan de l'impact, ou des deux, suivant l'objectif et le champ de l'analyse du cycle de vie envisagés. Ces conclusions peuvent prendre la forme de recommandations et inclure l'identification d'améliorations possibles des performances écologiques du produit. C'est également le stade où le

⁶² NF EN ISO 14040 : Management environnemental – Analyse du cycle de vie – principes et cadre". Cette norme spécifie le cadre et les principes généraux ainsi que les exigences générales pour la réalisation d'ACV et la communication sur ses études. NF EN ISO 14044 : "Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices". Cette norme révisé et remplace les normes ISO 14041, 14042, et 14043.

fabricant du produit examine les options techniques de réduction des principaux impacts identifiés.

Actuellement une 5^e étape apparaît très souvent aux ACV : Les interventions à la destination du marché. La Figure 55 ci-dessous montre de façon synthétique ces 5 étapes.

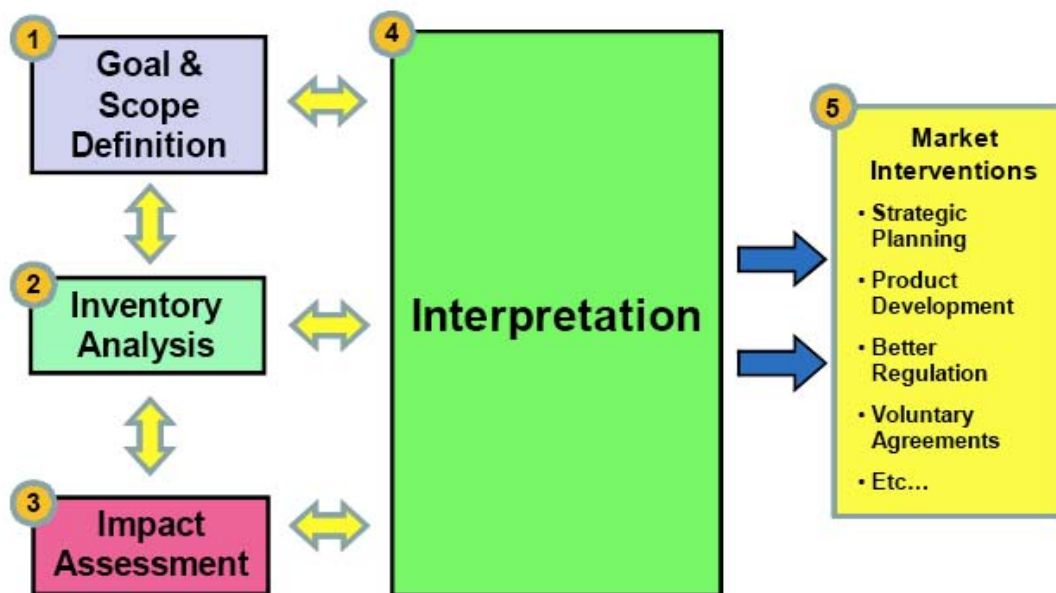


Figure 55: Les 5 étapes d'une analyse de cycle de vie

Une ACV a toutefois un caractère subjectif associé à la définition des objectifs de départ, des frontières du système à l'étude et du mode d'allocation des ressources utilisées et des impacts environnementaux. La subjectivité dans la définition des objectifs se constate dès le moment où on sélectionne les impacts environnementaux à mesurer et, possiblement, à contrôler. Par ailleurs, le résultat de l'ACV dépend d'un grand nombre de paramètres. Et il suffit de modifier un paramètre pour changer significativement les résultats.

Une analyse de cycle de vie peut être un exercice long et coûteux et pour éviter les déceptions, il est fortement recommandé d'effectuer les AVC en deux temps :

- Première étape: Une évaluation préliminaire qui consiste à réaliser l'ACV de manière rapide et simplifiée en évaluant l'ordre de grandeur des contributions de différentes étapes du cycle de vie. Cette étape permet d'identifier rapidement les zones à fortes contributions qu'il va falloir mieux renseigner dans la seconde étape. Elle permet généralement de connaître avec suffisamment de précision l'impact de son produit et de pouvoir décider, en toute connaissance de cause, du niveau de ressources à consacrer à la seconde étape.
- Deuxième étape: Une évaluation détaillée va reprendre l'ensemble des calculs en approfondissant les points ayant les plus grands impacts environnementaux. Généralement cette étape est effectuée lorsque le mandataire souhaite publier ses résultats et les utiliser dans le cadre de programme de communication à forte dominante marketing.

Dans la plupart des cas, une ACV simplifiée est suffisante. L'analyse du cycle de vie simplifiée est une méthode quantitative mais dont on a réduit le champ des aspects environnementaux. On la limite aux phases de cycle de vie les plus pertinentes. Ce que nous avons fait dans notre cas.

Les indicateurs et la méthode

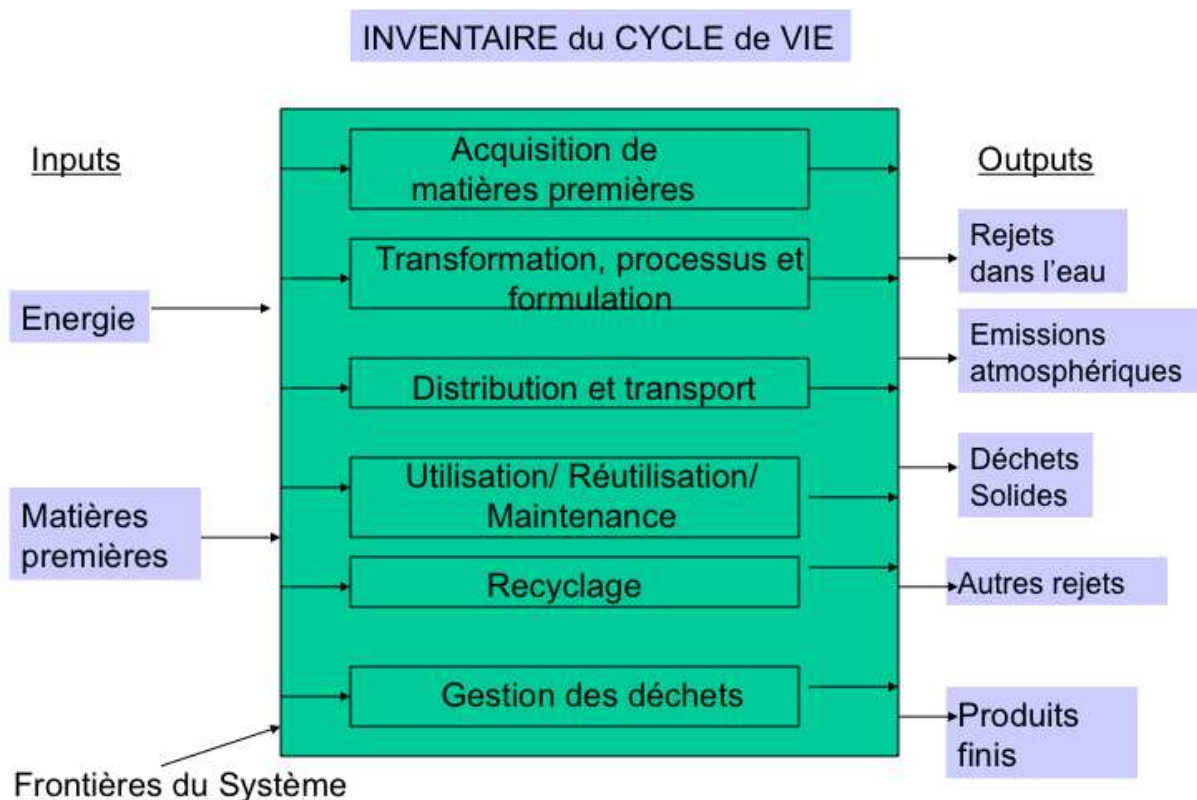


Figure 56: Inventaire du cycle de vie

Dans notre cas la Figure 56 ci-dessus résume les données dont nous avons besoin pour faire l'inventaire (étape 2). Ces données doivent être aussi précises, objectives et actualisées que possible.

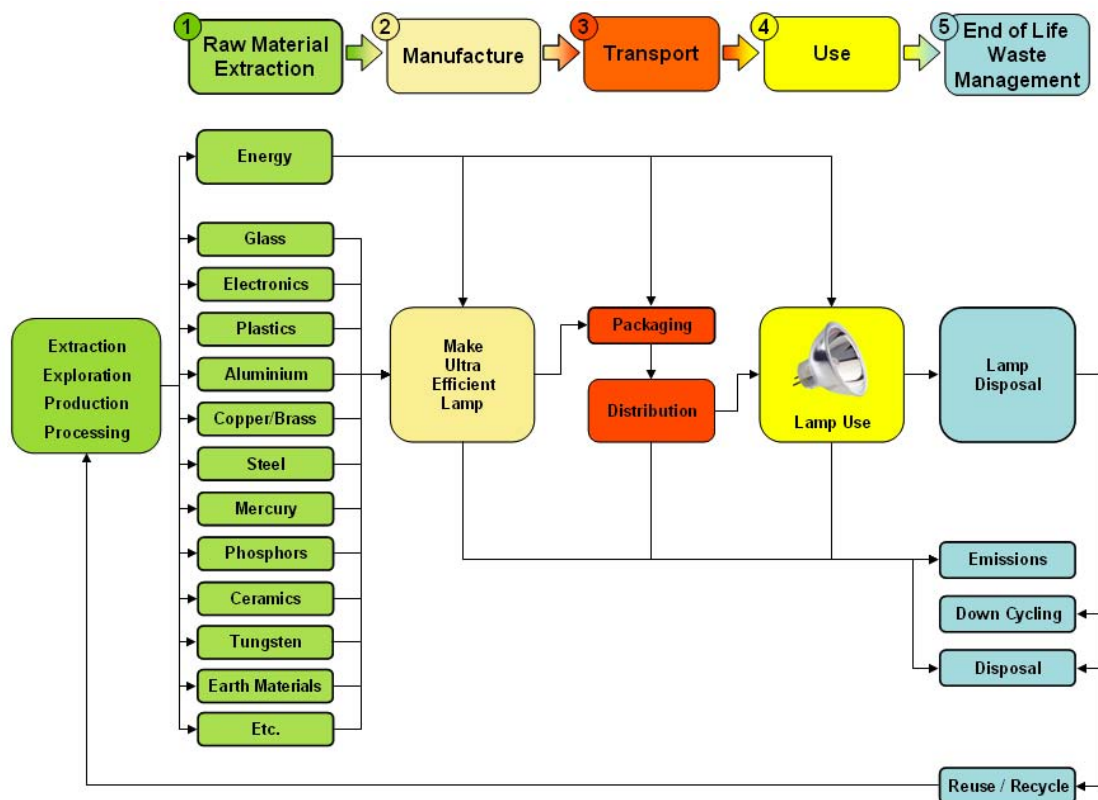


Figure 57 : Description du cycle de vie

Cette collecte de renseignements est la plus compliquée. Elle implique la possession des données confidentielles qui ne sont qu'à la disposition du fabricant du produit (à condition qu'il maîtrise toute la filière). Il nous a été impossible de se procurer ces données et donc nous sommes ainsi amenés à utiliser des données existantes dans la littérature.⁶³ Pour un système d'éclairage, en général, la Figure 57 ci-dessus montre l'évolution de la procédure ACV.

Pour mesurer les différents impacts sur l'environnement, on utilise des indicateurs. Pour pouvoir effectuer des comparaisons et observer des améliorations, il faut que ces indicateurs soient des grandeurs mesurables. Voici la liste de ces indicateurs (DERFA en liste 15 au total) :

- augmentation de l'effet de serre ;
- pollution de l'air y compris la formation d'oxydants photochimiques et l'acidification atmosphérique ;
- pollution de l'eau, l'eutrophisation et la toxicité sur l'écosystème (marin et eaux douces) ;
- pollution des sols (y compris la radioactivité) ;
- épuisement des ressources naturelles non-renouvelables ;
- consommation des ressources naturelles renouvelables ;
- diminution de la biodiversité ;
- production de déchets ;
- toxicité vis-à-vis de l'homme.

Certaines pollutions sont difficiles à mesurer, c'est le cas de la pollution sonore, de la pollution visuelle (l'impact sur le paysage) et des mauvaises odeurs. Il existe des indicateurs pour la pollution sonore (le bruit se mesure en décibels) mais souvent ils ne sont pas pris en compte.

Il faut noter que pour tout système d'éclairage (quelle que soit la nature de source de lumière) la phase d'utilisation représente 54 % ou plus des répercussions dans tous les quinze catégories listées ci-dessus cependant si l'on enlève du bilan les indicateurs concernant la toxicité vis-à-vis de l'homme et de l'écosystème des eaux douces, la production des déchets et la pollution des sols associées, alors l'énergie consommée pendant la phase de l'utilisation du système représente 85 % de son impact sur les autres indicateurs. La production du conditionnement et la distribution par route et par mer, ne contribuent qu'à moins de 1 % à l'impact total.

⁶³ Nous avons essentiellement utilisé le rapport Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA, UK) n° SPMT08_069 Life Cycle Assessment of Ultra-Efficient Lamps (May 2009) et les travaux de H. Scott Matthews (Life Cycle Assessment of Solid State Lighting Applications, Carnegie Mellon University)

C - Le recyclage des lampes

Le recyclage des lampes concerne pour diverses raisons certaines lampes à décharge et les LED. Les lampes à incandescence, donc les halogènes, ne sont pas concernées car leur composition ne nécessite pas de traitement particulier, ce qui permet leur élimination avec les déchets banals. De plus, la collecte sélective a un coût environnemental important dû notamment aux camions utilisés pour le transport qui ne serait pas compensé par les gains écologiques issus de leur recyclage.

Le cadre réglementaire

Les lampes usagées sont des déchets et le principe du pollueur-payeur s'applique.

Depuis la promulgation de la **loi n°75-633 du 15 juillet 1975**, le détenteur de déchets est responsable de l'élimination de ses déchets et doit le faire dans des conditions respectueuses de l'environnement conformes à la réglementation. **Code de l'environnement, Livre V, Titre IV, déchets.**

Mais en plus les lampes sont des déchets spéciaux.

Le décret n°2002-540 du 18 avril 2002, relatif à la classification des déchets, classe les lampes parmi les Déchets Dangereux (DD). Les DD sont les déchets qui présentent un risque particulier pour l'homme et l'environnement. D'après le Code de l'environnement, les DD ne doivent pas être mélangés aux déchets banals mais doivent être traités séparément, dans des filières appropriées.

Les lampes sont classées comme des **déchets d'équipements électriques et électroniques (dEEE) ménagers.**

Le décret n°2005-829 du 20 juillet 2005 - ou **décret dEEE** - est la transposition en droit français des directives européennes DEEE - **directive n°2002/96/CE** - et RoHS – **directive n°2002/95/CE**. Le décret fixe le cadre de la mise en œuvre d'une filière de collecte et de recyclage pour les DEEE, en imposant notamment pour les DEEE ménagers :

- aux producteurs d'équipements électriques et électroniques (EEE) de prendre en charge l'enlèvement et le traitement des déchets issus de ces équipements.
- aux distributeurs de reprendre gratuitement les équipements usagés de leurs clients lors de l'achat d'équipements neufs (principe du "1 pour 1") et de mentionner le montant de l'Éco-contribution sur leurs factures.

Par **arrêté du 13 juillet 2006**, toutes les lampes usagées, que leurs détenteurs soient des particuliers ou des professionnels, **sont considérées comme des dEEE ménagers**. Ainsi, toutes les lampes, quelles soient vendues à des particuliers ou des professionnels, supportent l'Éco-contribution qui permet de financer une unique filière de recyclage.

Sanctions

article 25 du décret dEEE

- Un producteur ne remplissant pas ses obligations légales est passible d'une amende de 450 à 7.500 € par lampe en infraction.
- Un distributeur de lampes ne remplissant pas ses obligations légales est passible d'une amende de 450 à 2.250 € par lampe en infraction.

article L 541-46 du Code de l'environnement

Un détenteur de déchets ne respectant pas ses obligations légales est passible d'une peine pouvant aller jusqu'à 2 ans d'emprisonnement et 75.000 € d'amende.

Les lampes concernées

Les lampes concernées sont identifiables grâce au marquage « poubelle barrée ».

Toutes les lampes sont recyclables à l'exception des lampes à incandescences (classique et halogènes) :

- Les tubes fluorescents (T5, T8 ...).
- Les lampes fluo-compactes dites à économie d'énergie avec et sans ballast.
- Les lampes aux iodures métalliques.
- Les lampes au sodium, haute et basse pression.
- Les lampes à vapeur de mercure.
- Les lampes à LED.

La filière de recyclage

La filière commence par l'utilisateur qui a trois solutions de recyclage :

Soit ramener sa lampe usagée chez son revendeur qui a obligation de la reprendre (principe du "1 pour 1"). Soit, dans de nombreuses collectivités locales où une filière de collecte est mise en place, déposer la lampe en déchetterie. Ou enfin, toujours dans la limite du "1 pour 1", confier la lampe usagée à un électricien lors de sa venue.

Récylum est l'éco-organisme qui, par arrêté ministériel, est responsable de l'élimination des lampes usagées en France, de leur collecte jusqu'à leur recyclage. Cet organisme a été créé en mai 2005 par 4 fabricants de lampes qui ont souhaité intensifier leurs efforts en faveur de la protection de l'environnement. Ils ont depuis été rejoints par quelques 500 autres entreprises de tous les secteurs concernés (fabricants de lampes, enseignes de la grande distribution, équipementiers intégrateurs de lampes...). Récylum est une entreprise privée à but non lucratif dont l'activité est exclusivement financée par l'Éco-contribution perçue sur la vente de chaque lampe neuve. L'Éco-contribution représente le coût d'élimination des lampes en fin de vie. Elle finance la livraison et l'enlèvement des conteneurs, le recyclage des lampes collectées et l'information des détenteurs de lampes usagées. Elle est répercutée obligatoirement et du producteur jusqu'à l'utilisateur final sans prise de marge ni réfaction (réduction de prix). L'Éco-contribution est de 0,15 € ht/lampe (0,18 € TTC) depuis le 1er janvier 2009. Son montant est régulièrement révisé.

Récylum a passé un accord avec les Fédérations des entreprises du Commerce et de la distribution (FCD) et des Magasins de Bricolage (FMB), et la plupart des enseignes de la grande distribution, dans le cadre de la convention sur la promotion des lampes à économie d'énergie et de leur recyclage signée au ministère de l'écologie (MEEDDAT) le 23 octobre 2008. A noter que dans le cadre d'un accord de partenariat entre Récylum et la FGME (Fédération des Grossistes en Matériel Électrique), de nombreux distributeurs professionnels vont au-delà de leur obligation de "1 pour 1". De même, par la mise en place de meubles de collecte en libre accès, certains magasins de grande distribution vont également au-delà du "1 pour 1".

Le recyclage

Les lampes fluocompactes par exemple sont recyclées à 93 % de leur poids et valorisées à 97 % :

• Le verre (88 % du poids)

C'est la matière recyclable la plus notable. C'est le matériau de choix pour la fabrication des tubes fluorescents. Il permet aussi de fabriquer des abrasifs, des isolants...

• Les métaux (5 % du poids)

Les métaux tels que le fer, l'aluminium, le cuivre composent notamment les contacts et culots de lampes. Ils sont réintégrés dans les filières de fabrication de divers produits neufs.

• Les poudres fluorescentes (3 % du poids)

Elles recouvrant l'intérieur des tubes et de certaines lampes sont constituées de terres rares. Actuellement, elles ne sont pas recyclables dans des conditions acceptables. Elles sont neutralisées dans des centres de stockage des déchets ultimes de classe 1.

- **Les plastiques et divers (4 % du poids)**

Les plastiques ne sont pas recyclés à ce jour. Les volumes en jeu sont actuellement insuffisants pour la mise en place d'une filière économiquement viable. Ils font souvent l'objet d'une valorisation thermique par incinération.

- **Le mercure (0,005 % du poids)**

Il est présent en infime quantité, est neutralisé en centre de stockage des déchets ultimes de classe 1, conformément au règlement (CE) n°1102/2008.

D - Le marché de l'éclairage français et européen

Le marché français

En France, l'éclairage dans le secteur résidentiel représente 9 % de la facture d'électricité des ménages avec une consommation moyenne de 350 kWh par an. Si on considère les 32,2 millions de foyers, on a une consommation globale de 11,3 TWh.

L'éclairage dans le secteur tertiaire représente une consommation d'environ 32 TWh dont la répartition est donnée ci-dessous :

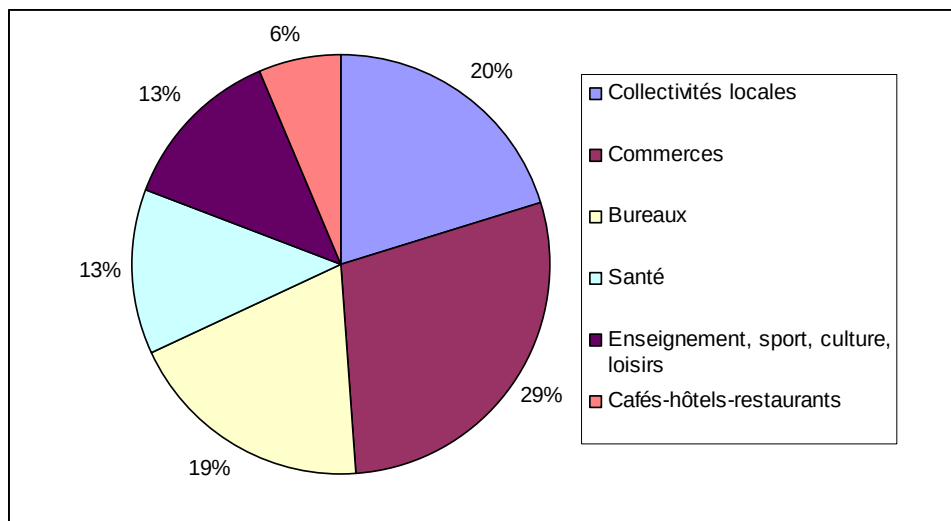


Figure 58: Répartition de la consommation d'énergie pour l'éclairage dans le secteur tertiaire

Les lampes basse consommation

- Contexte

La directive européenne EuP 2005/32 et la convention suite au Grenelle sur le retrait de la vente des ampoules à incandescence et la promotion des lampes basse consommation devrait contribuer à maintenir le taux de croissance du marché.

En 2008, 52 millions de lampes fluo compactes, tout usage confondu (domestique ou professionnel) ont été déclarées mises sur le marché. C'est un marché en pleine progression avec un taux de croissance entre 2007 et 2008 de 30 %. Aujourd'hui, les deux tiers des ménages français (68,3 %) possèdent au moins une LBC.

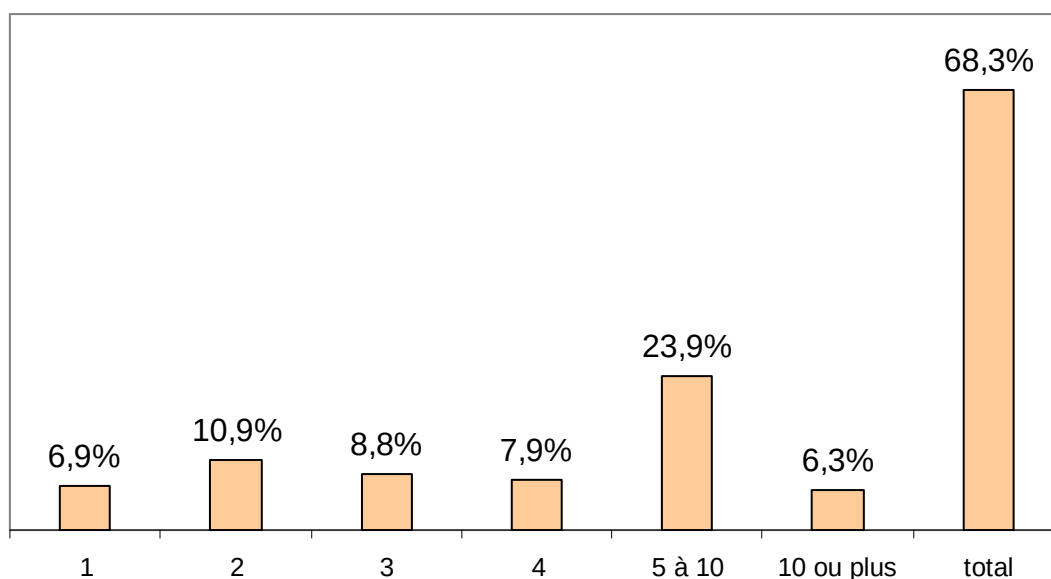


Figure 59 : Taux de possession d'ampoules à économie d'énergie dans les ménages, 2008 (ADEME/SOFRES)

Les tubes fluorescents

En 2008, 51 millions de tubes fluorescents, tout usage confondu (domestique ou professionnel) ont été déclarées mises sur le marché.

Les ballasts

En moyenne, un système d'éclairage fluorescent équipé de ballasts électroniques consomme **20 à 25 % de moins** qu'une installation en luminaire ferromagnétique.

Une enquête du CEREN réalisée en 2007 sur l'éclairage des immeubles de bureaux a montré **que près de 90 % du parc installé** de luminaires fluorescents est équipé de ballasts ferromagnétiques d'ancienne génération, encore plus énergivores.

En 2008, les luminaires équipés de ballasts ferromagnétiques représentaient plus de **55 % des ventes** de luminaires fluorescents.

Les LED

Aucune donnée n'est disponible à ce jour

Le marché européen (EU-27) : évolution du marché de 2003 à 2007

La consommation annuelle d'électricité des lampes à usage domestique non dirigées est dans la Communauté estimée à 112 TWh en 2007 soit 45 millions de tonnes de CO₂

- Consommation apparente

La consommation apparente est définie par la formule :

Consommation apparente = Production + Importation - Exportation

Lampes à incandescence non halogènes, elle a diminué de 21 % de 2005 à 2007 pour passer de 1271 millions en 2005 à 1001 millions d'unités en 2007.

Dans ces chiffres sont incluses des lampes généralement non destinées à l'éclairage domestique (feux tricolores, éclairage d'urgence, bar, discothèques...)

Le nombre de lampes halogènes non dichroïques et spots, elle a augmenté de 16 % de 2004 à 2006 pour se stabiliser à environ 300 millions d'unités en 2006 et 2007.

Ces lampes sont en général destinées au secteur commercial.

Le nombre de tubes fluorescents, elle a augmenté de 160 % de 2003 à 2007 en passant de 250 millions à 400 millions en 2007.

Les tubes fluorescents sont en général destinés au secteur commercial.

Le nombre de lampes fluorescentes compactes, elle a augmenté de 340 de 2003 à 2007 en passant de 145 millions à 493 millions en 2007 voir 628 millions en 2008 (chiffre à consolider).

- L'import-export

L'Union Européenne est exportatrice nette de lampes à incandescences non halogène de puissance moyenne et de tubes fluorescents mais une importatrice nette de lampes à incandescences non halogène de forte puissance (>200 W), de spots à halogène et de lampes fluo-compactes :

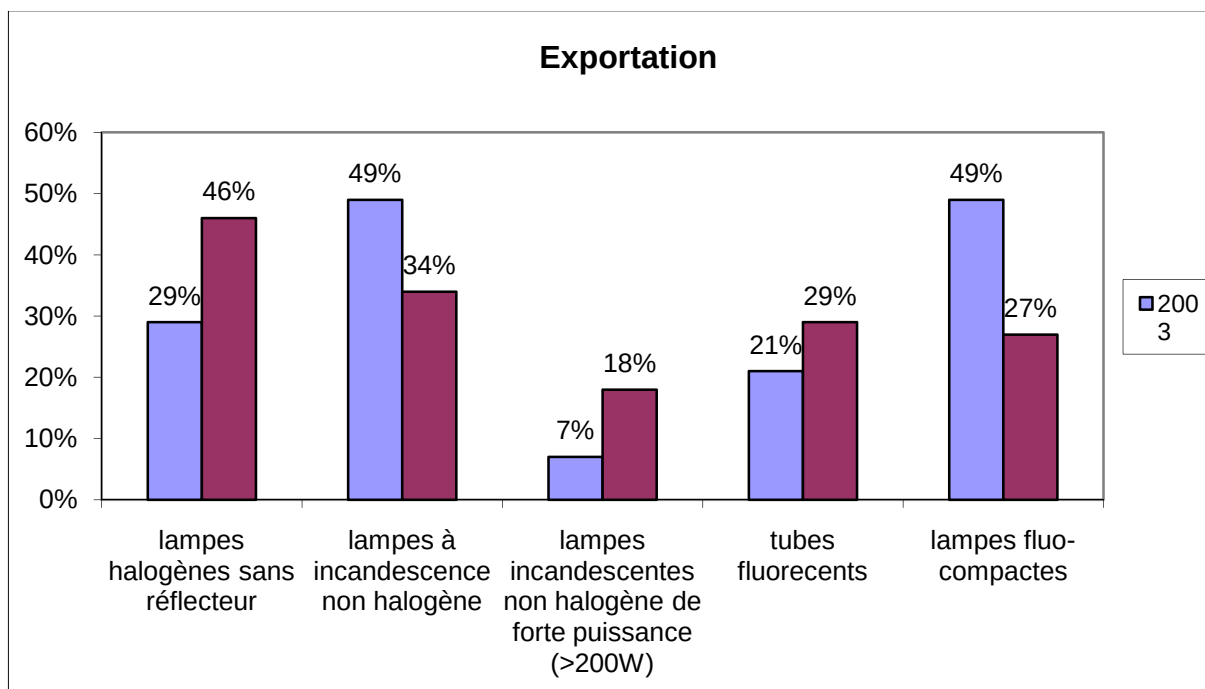


Figure 60 : Taux d'exportation (exportation comparée à la production), 2003-2008

- Pour l'exportation

Les lampes à incandescence de forte puissance, le nombre d'unités s'est considérablement réduit et n'est plus important.

Pour les lampes fluo-compactes, un nombre plus important de la production est effectivement utilisé en EU-27 et l'exportation a automatiquement baissé.

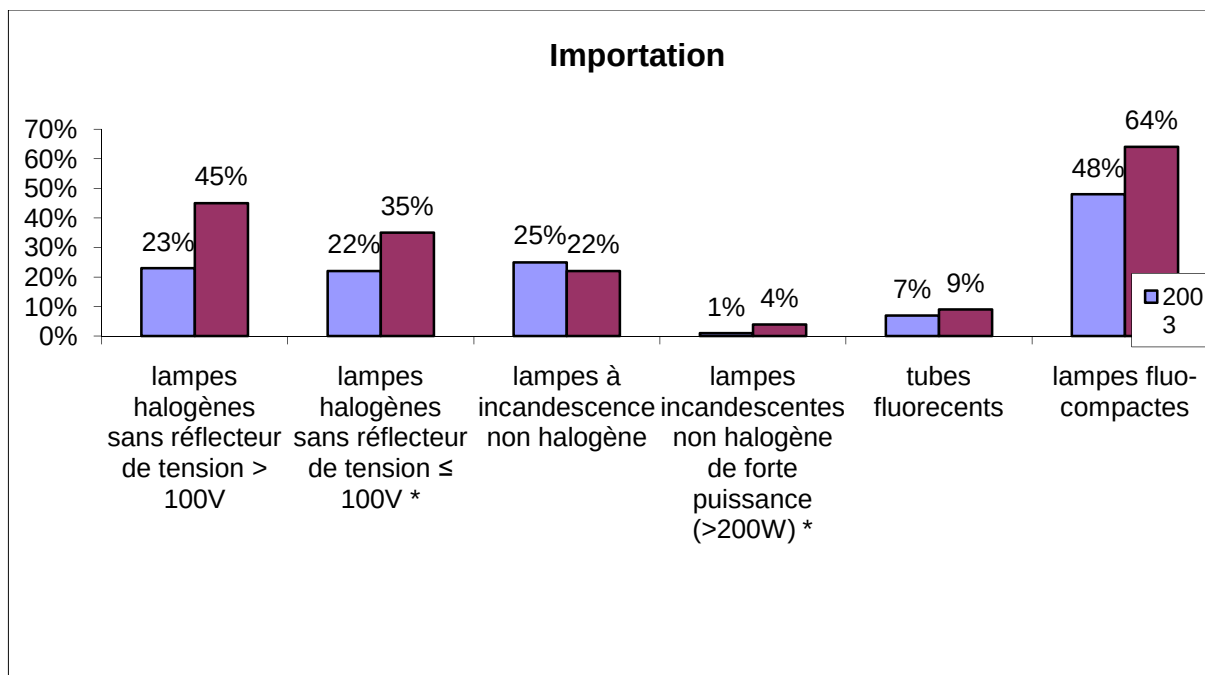


Figure 61 : Taux d'importation (importation comparée à la consommation apparente)

- Pour l'importation

Le taux d'importation est assez faible pour les lampes à incandescence, de même pour les tubes fluorescents.

Pour les lampes fluo-compactes, l'augmentation de l'importation a eu lieu principalement en 2007 et représente maintenant un poids économique important.

Dans les données ci-dessous sont incluses les lampes utilisées dans tout secteur d'activité, pas seulement pour le secteur domestique.

- Indicateur et répartition du marché

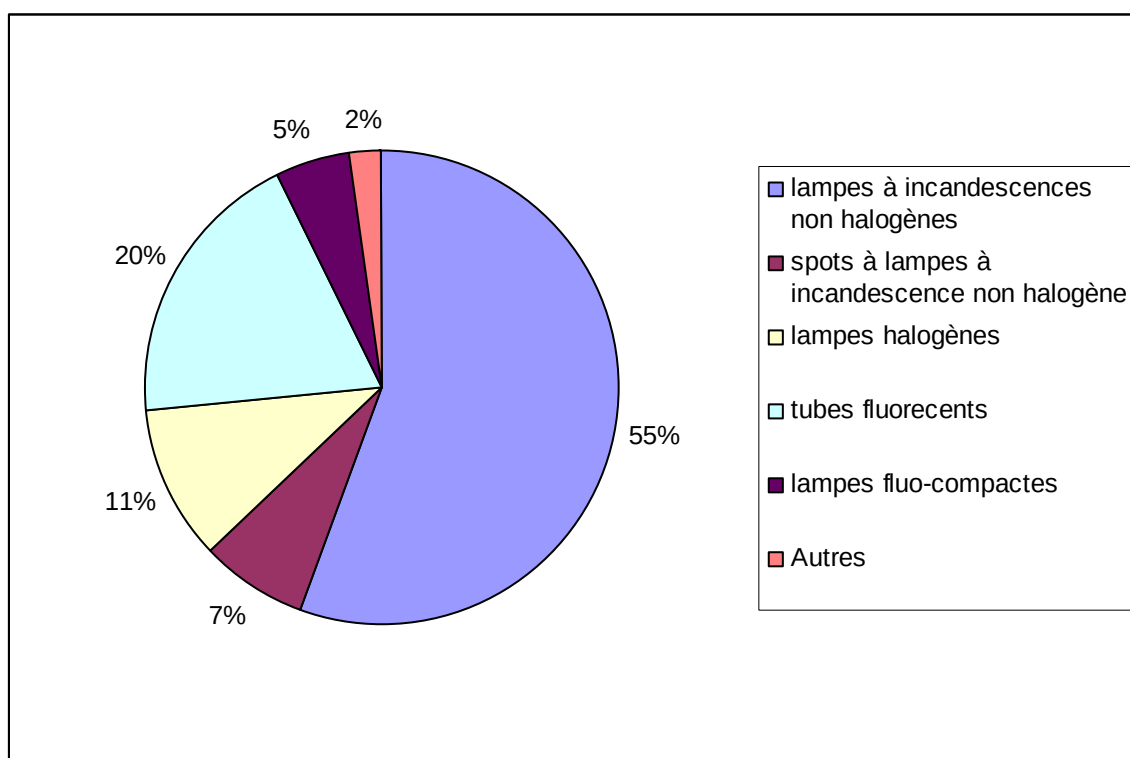
Le volume des ventes pour la fédération européenne des industries des lampes (*European Lamp Companies federation*) plus les estimations faites à partir de données relatives à l'EuP lot 8 et d'informations informelles (données utilisées dans la partie sur la consommation apparente) permettent de réaliser le tableau suivant :

Tableau 25 : Marché en EU-27 pour ELC (en milliers de lampes)

type de lampe	2004	2005	2006	évolution 2004-2006	données estimées
lampes à incandescences non halogènes	1231	1121	1096	-11%	1350
spots à lampes à incandescence non halogène	164	145	138	-16%	
lampes halogènes sans réflecteur de tension ≤ 100V	53	58	60	14%	300
spots à halogènes de tension ≤ 100V	67	71	73	9%	
lampes halogènes sans réflecteur de tension > 100V	37	40	44	18%	330
spots à halogènes de tension > 100V et de couleur	29	30	32	10%	
tubes fluorescents	378	395	386	2%	390
lampes fluo-compactes à usage domestique	73	93	97	33%	316
Autres	50	43	44	-11%	
TOTAL	2081	1996	1971	-5%	

Le Tableau 25 doit être considéré comme un indicateur des tendances du marché et de la répartition des sources lumineuses en fonction de la puissance. Les différences les plus notables entre les données sont pour les halogènes et les lampes fluo-compactes à usage domestique. Ceci s'explique notamment par l'existence de 2 importants revendeurs européens de lampes pour les fluo-compactes.

Tirons-en néanmoins quelques enseignements :

**Figure 62 : Répartition des ventes par type de source, 2006**

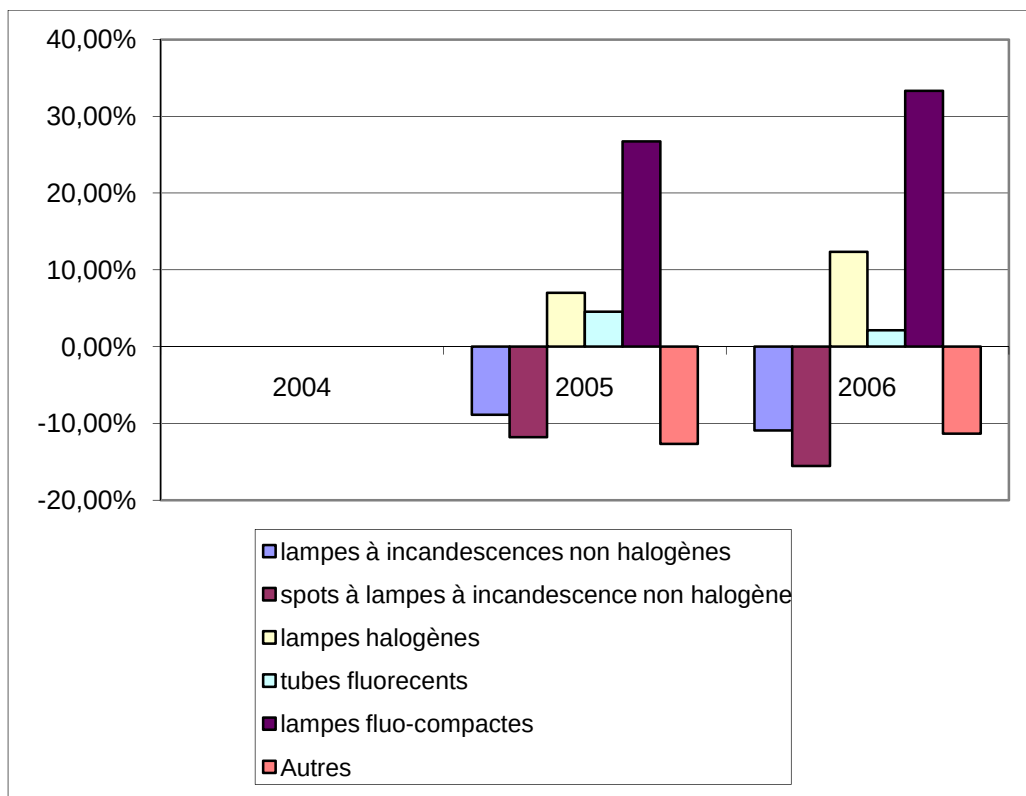


Figure 63 : Évolution du marché à partir de 2004

Les ventes de lampes à incandescence non halogènes ont baissées mais représentent toujours 55 % du volume de ventes en 2006.

Les lampes fluo compactes progressent de 33 % dans les ventes mais ne représentent que 5 % des ventes en 2006.

Lampes à incandescence non halogène

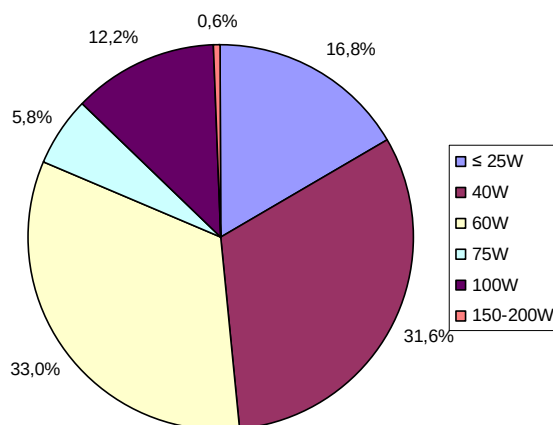


Figure 64 : Lampes à incandescence non halogènes pour l'éclairage général en 2006

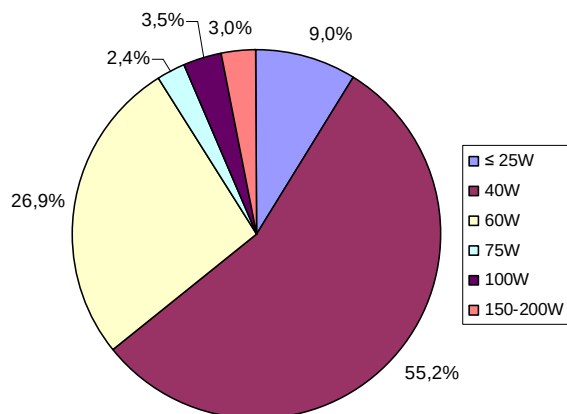


Figure 65 : Lampes à incandescence non halogènes avec réflecteur pour l'éclairage général en 2006

Un tiers des ventes concerne les 60 W (environ 385 million / an) et un peu moins d'un tiers les 40 W tandis que les ventes de lampes supérieures à 100W sont très faibles à 0,6 % (environ 7 millions / an).

Pour les lampes avec réflecteur, plus de la moitié sont des 40 W (plus de 76 millions / an) et plus du quart des 60 W alors que seulement 6.5 % sont supérieures à 100 W (environ 9 millions / an).

Lampes à halogène TBT (12V)

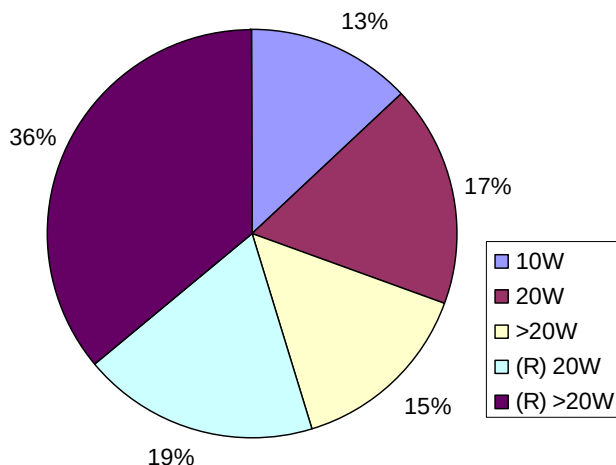


Figure 66 : Répartition des lampes halogène TBT - (R) signifie avec réflecteur

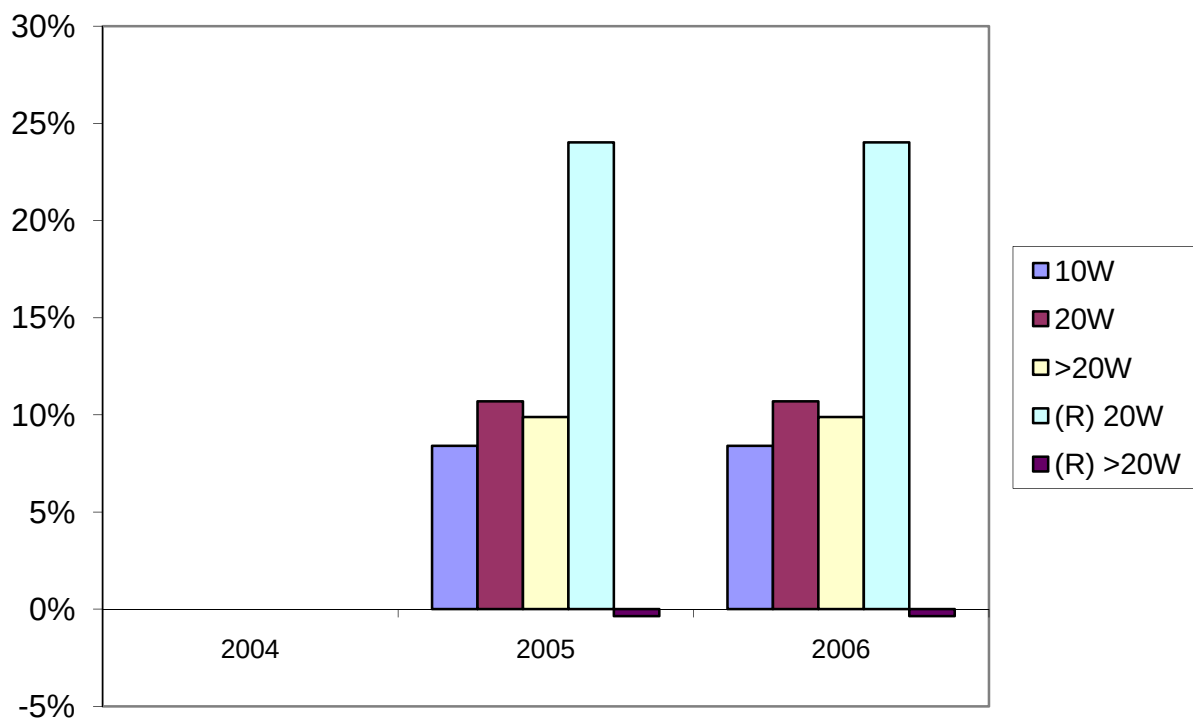


Figure 67: Evolution du marché à partir de 2004 – R signifie avec réflecteur

Plus du tiers des ventes de lampes halogènes TBT, 36 % soit plus de 489 millions d'unités, est réalisé par les lampes halogènes avec réflecteur de puissance supérieure à 20 W.

Cependant, la plus forte progression est pour les lampes halogènes avec réflecteur de puissance égale à 20 W.

Lampes à halogène 230V

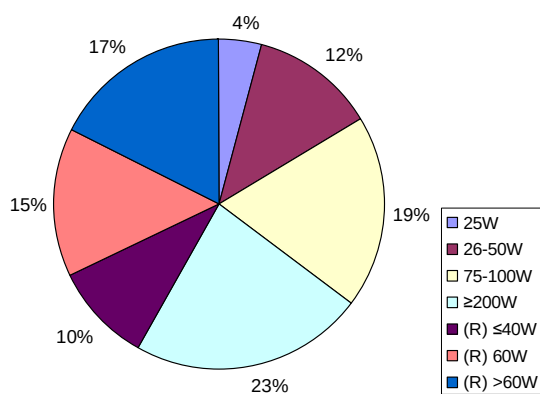


Figure 68: Répartition des lampes halogène 230 V en 2006 – R signifie avec réflecteur

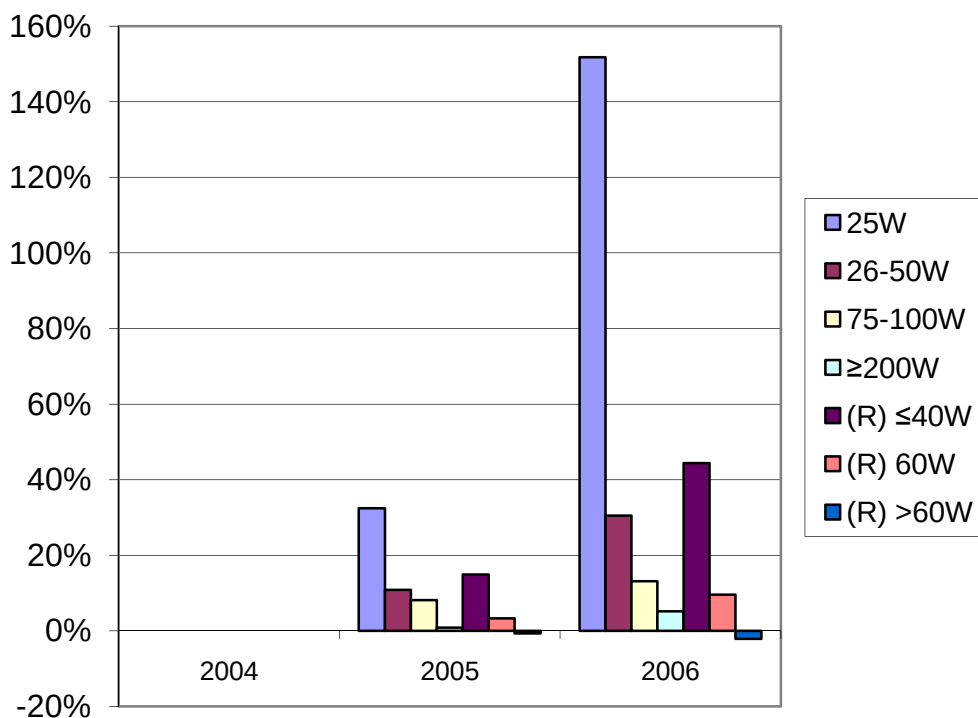


Figure 69 : Evolution du marché à partir de 2004

Les lampes de 25 W progressent très rapidement mais leur volume reste relativement faible (4 % des ventes en 2006, soit un peu plus de 3 millions).

Les lampes ≤40 W avec réflecteur augmente de 44 % de 2004 à 2006 et représente 12 % des ventes en 2006 avec un volume de plus de 7 millions d'unités).

Lampes fluo-compactes à économie d'énergie

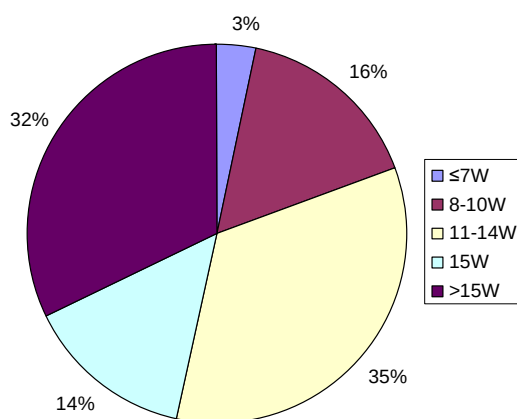


Figure 70 : Répartition des lampes dites à économie d'énergie en 2006

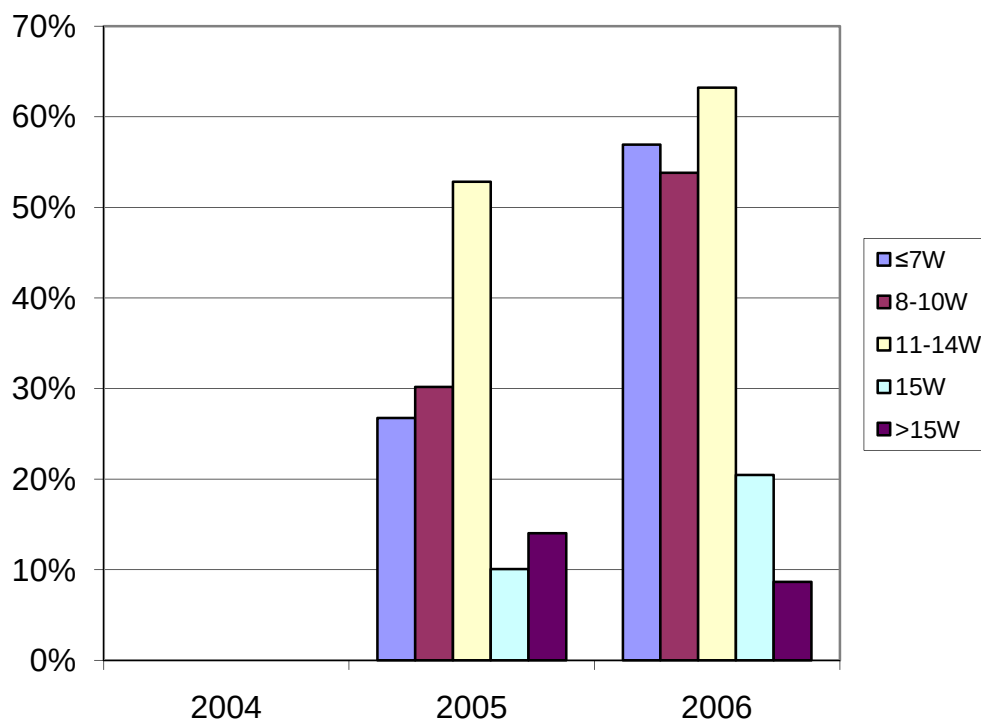


Figure 71 : Évolution du marché à partir de 2004

Les puissances privilégiées sont 11-14 W pour plus du tiers des ventes avec près de 33 millions d'unités vendues en 2006. Cette tendance est donnée pour les lampes à usage domestique qui deviennent prépondérante par rapport à celles à usage professionnel (magasins, bureau, hôtels, industries, etc.).

:

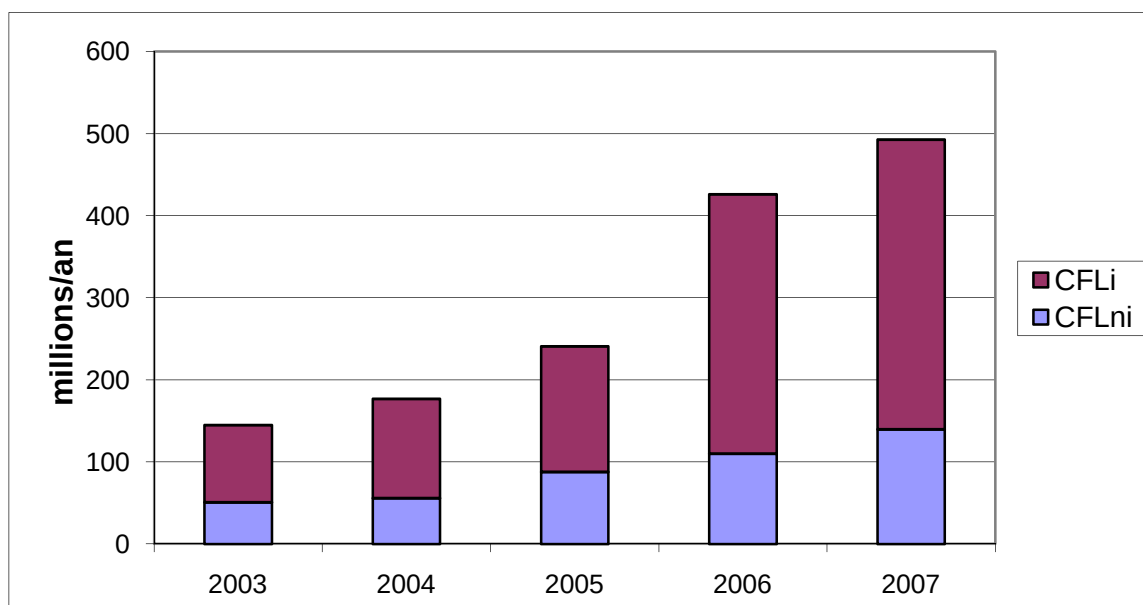


Figure 72 : Évolution des ventes en fonction de l'usage

CFLi : usage domestique ; CFLni : usage industriel

Stock des lampes par foyer

En moyenne, on compte 24.29 points lumineux par ménage en 2007:

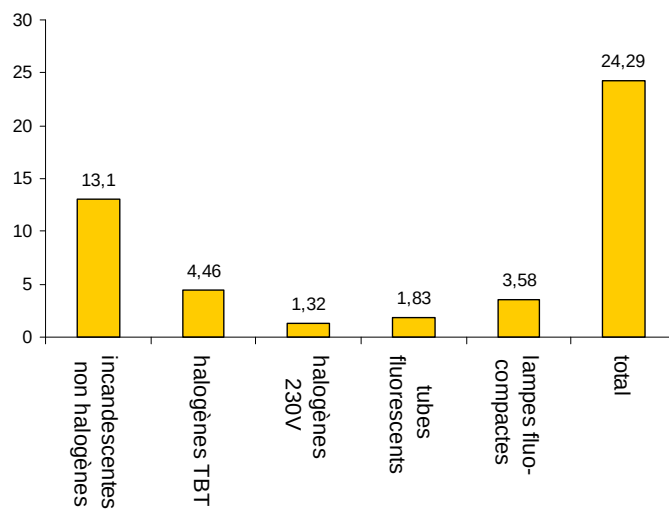


Figure 73 : Stock des lampes par foyer

E - Le futur de l'éclairage

S'il est assez aisé de situer des objectifs et de faire le point sur l'existant, faire des prévisions sur le devenir de la production de lumière est beaucoup plus aléatoire. Compte tenu de l'augmentation de la population terrestre, l'amélioration des conditions de vie et la diminution de la fraction de population n'ayant pas accès à l'électricité, les besoins en éclairage de l'humanité ne font qu'augmenter. Ainsi, nos estimations⁶⁴ actuelles prévoient que la quantité de l'énergie utilisée pour l'éclairage pourrait être multipliée par 2 d'ici 2030. Des mesures concrètes s'imposent donc rapidement. Remarquons cependant que des estimations diverses, tenant compte de l'augmentation de la demande de l'humanité en éclairage, montrent qu'en utilisant simplement de façon plus raisonnée les sources existantes, nous pourrions économiser entre 10 et 15 % de l'énergie consommée pour l'éclairage dans les 10 années à venir.

Un objectif primordial est l'augmentation de l'efficacité lumineuse des sources. Ceci n'a cependant de sens que pour une qualité donnée de lumière et pour une durée de vie acceptable de la source. L'enjeu est énergétique, mais aussi environnemental puisque l'augmentation de l'efficacité entraînerait une diminution de la production d'énergie nécessaire à l'éclairage et donc de la pollution. Mais, est-ce que nous utilisons les technologies les plus efficaces énergétiquement ? La réponse est négative. En effet, 46 % de l'énergie globale utilisée pour l'éclairage est consommée par des lampes à incandescence qui ne transforment que 2 à 5 % de l'électricité en lumière. En France par exemple, dans le secteur résidentiel l'efficacité moyenne des sources utilisées est plus que médiocre : une maison possède en moyenne 22 lampes parmi lesquelles seulement 5 sont des lampes à économie d'énergie. Cette situation est similaire dans tous les pays⁶⁵.

⁶⁴ Zissis G., Les sources de lumière artificielle facteurs du développement durable et de la qualité de vie, Techniques de l'Ingénieur, Cahiers Innovation IN-42, pp 1-10 (2-2006)

⁶⁵ Light's labour's lost Policies for Energy-Efficient Lighting, Ed. International Energy Agency, ISBN: 9789264109513 (2006)

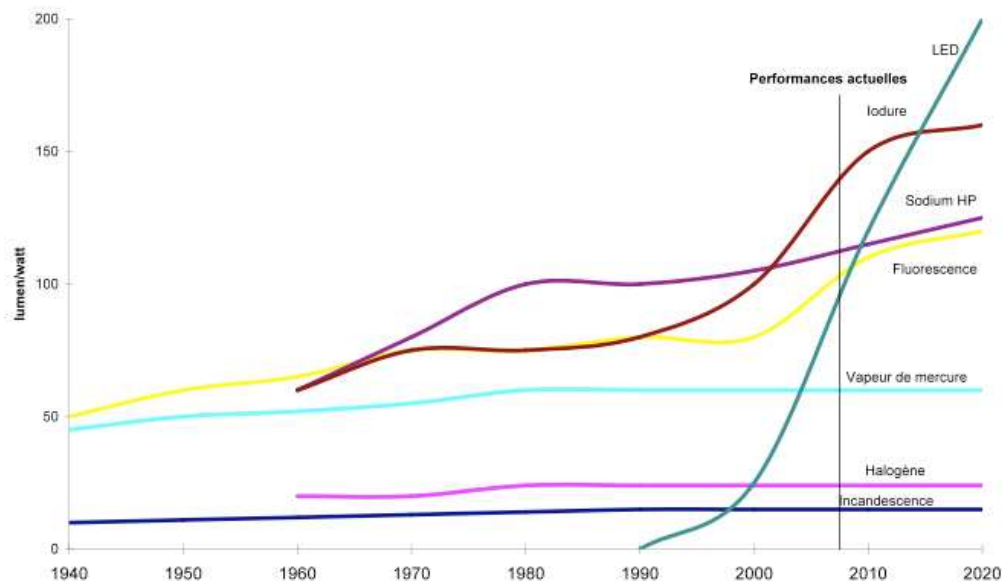


Figure 74 : Évolution d'efficacité des différentes technologies (source ADEME)

Depuis les années 70, malgré tous les progrès de la science et de la technologie dans le domaine des lampes, l'efficacité maximale des lampes classiques stagne autour de 110 -130 lm/W (pour la lumière « blanche ») et, comme le montre la Figure 74, nous espérons raisonnablement atteindre, pour certaines technologies comme les lampes à iodures métalliques 160 – 170 lm/W d'ici 10 ans.

Cependant, si les sources de lumière à incandescence et à décharge électrique ont dominé le XX^e siècle, une importante révolution technologique se profile à l'aube du XXI^e siècle : le « *solid state lighting* » (SSL). Ainsi, la technologie des sources de lumière est en pleine mutation, des diodes électroluminescentes blanches de haute puissance sont arrivées sur le marché ; les LED Organiques (OLED) font des progrès spectaculaires et les nouvelles lampes à décharge à radiateurs moléculaires deviennent une réalité. Tout compte fait, seule une meilleure compréhension du fonctionnement des sources de lumière électriques permettra d'atténuer les inconvénients liés à la croissance de la consommation. L'objectif ultime de ces efforts est de montrer comment le développement des systèmes d'éclairage innovants qui nous aideront à réaliser d'importantes économies d'énergie et à contribuer ainsi au développement durable, mais sans négliger les aspects de confort, santé et sécurité intimement liés à la lumière.

F - Les LED produisent une lumière sensiblement monochromatique

La Figure 75 montre la structure énergétique d'un semi-conducteur dans l'espace des phases. Lors de la recombinaison radiative d'un électron qui se trouve au minimum de la bande de conduction avec un trou situé au maximum de la bande de valence ($k=0$), un photon sera émis ;

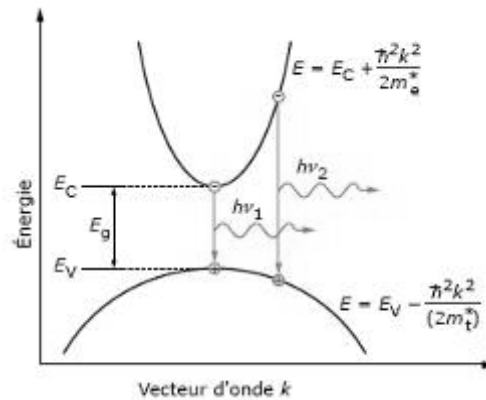


Figure 75 : Structure énergétique d'un semi-conducteur à « gap direct » dans l'espace des phases

Comme le montre la Figure 75, pour des $k \neq 0$, le photon issu de la recombinaison aura une fréquence ν_2 légèrement différente de ν_1 . Par conséquent, la diode électroluminescente produira une « raie » avec une fréquence centrale ν_1 et une certaine largeur à mi-hauteur $\Delta\nu_{FWHM}$. Nous pouvons estimer cette largeur à mi-hauteur car elle dépend, d'une part de la densité d'électrons disponibles dans un intervalle d'énergie $E \pm \Delta E$, d'autre part de la densité des états énergétiques du semi-conducteur dans ce même intervalle. Pour une jonction fonctionnant à une température T_j et ayant une énergie de gap E_g , la densité électronique est donnée par la loi de Boltzmann et elle est proportionnelle à $\exp(-E/k_B T_j)$. Dans les mêmes conditions, la densité de niveaux énergétiques est proportionnelle à $(E-E_g)^{1/2}$.

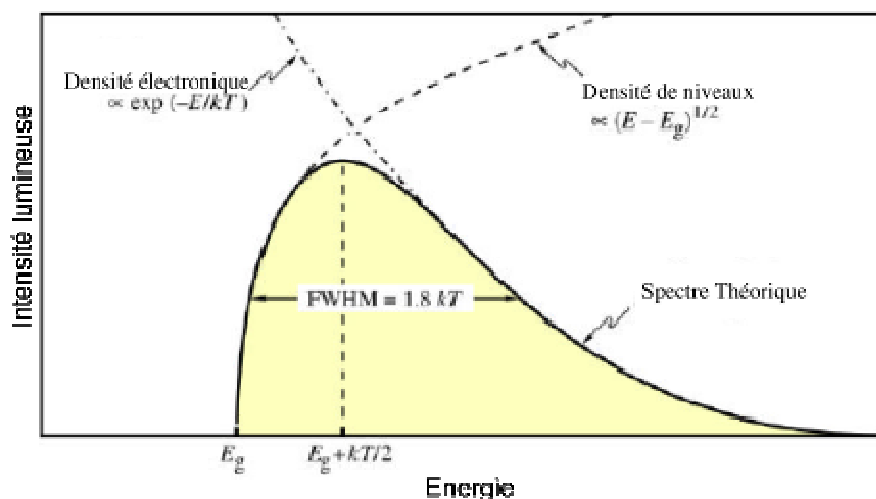


Figure 76 : Formation du spectre d'une diode électroluminescente

En traçant ces deux fonctions (Figure 76), nous pouvons déduire immédiatement que la largeur à mi-hauteur théorique est donnée par la relation :

$$\Delta E_{FWHM} = h\Delta\nu_{FWHM} = 1,8k_B T_j$$

tandis que l'intensité maximale est obtenue à une fréquence $\nu_{\max} \neq \nu_1$:

$$\nu_{\max} = \frac{E_g}{h} + \frac{k_B T_j}{2h} = \frac{c}{\lambda_{\max}}$$

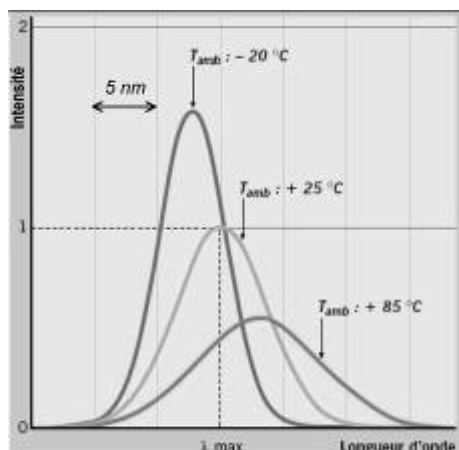


Figure 77 : Une LED produit une lumière sensiblement monochromatique, mais son intensité et sa largeur spectrale dépendent fortement de la température de la jonction

Pour une jonction avec $E_g = 2,5$ eV fonctionnant à une température de 25°C on trouve $\lambda_{\max} \approx 493$ nm et $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} \approx 9$ nm, donc la lumière est bien quasi monochromatique. Notons également que les deux valeurs dépendent de la température du fonctionnement (Figure 77). Par conséquent, si la température de la jonction évolue, la couleur de la LED peut dériver dans le temps. À température croissante, le spectre se décale vers les plus grandes longueurs d'onde (par exemple, l'ambre vire au rouge). Ce décalage est de l'ordre de $0,1$ nm/ $^\circ\text{C}$. Ainsi, pour la même jonction, à 100°C on trouvera $\lambda_{\max} \approx 490$ nm et $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} \approx 11,3$ nm.

G - Principe de fonctionnement d'une LED à homo-jonction

La Figure 78 illustre le principe de fonctionnement d'une homo-jonction.

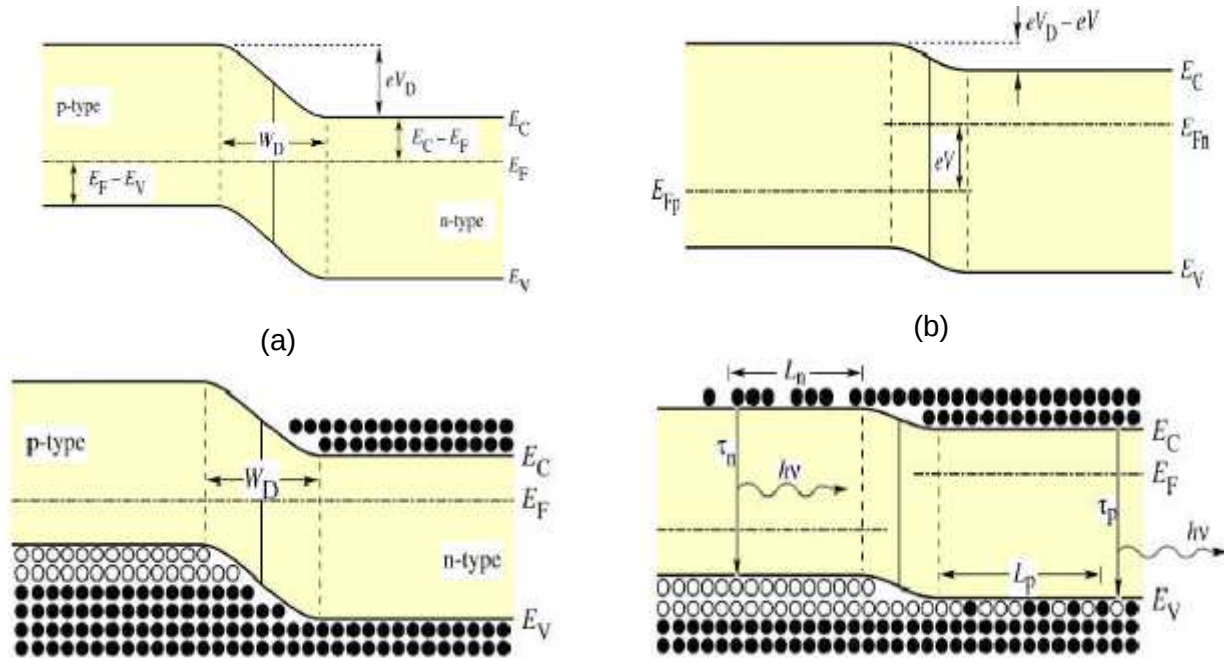


Figure 78 : Principe de fonctionnement d'une diode électroluminescente à homo-jonction

Les schémas illustrent l'état de la jonction et la distribution de porteurs (rond plein : trou, rond vide : électron) à l'équilibre (a) et sous une tension de polarisation directe, V (b). Sur cette Figure 78, E_C et E_V sont les énergies de la bande de conduction et de valence ; E_F , E_{Fn} et E_{Fp} représentent l'énergie de Fermi à l'équilibre, et pendant la polarisation dans les zones n et p du semi-conducteur ; L_p et L_n sont les longueurs de « pénétration » des porteurs dans les zones opposées sous l'effet de la polarisation directe ; τ_p et τ_n représentent les durées de vie de porteurs dans les zones opposées ; $h\nu$ correspond aux photons produits par recombinaison radiative.

À l'état d'équilibre, les porteurs majoritaires de chaque zone diffusent vers l'autre zone : les électrons de la zone « n » ont tendance à diffuser vers la zone « p », les trous suivent le chemin opposé. Ces mouvements spontanés perturbent la neutralité électrique locale du système et sont à l'origine de l'apparition d'un champ de charge espace qui s'oppose, à son tour, à ces mouvements et le système s'équilibre. Par conséquent le nombre de porteurs minoritaires dans chaque zone (électrons dans la zone « p » et trous dans la zone « n ») reste extrêmement faible et la probabilité de recombinaison radiative est quasi nulle. Dans le cas d'une jonction idéale avec de longues zones neutres, les densités des courants inverses liées à la diffusion, j_{n0} et j_{p0} de chaque type de porteur peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{cases} j_{n0} = \frac{eD_n n_i^2}{L_n N_A} \\ j_{p0} = \frac{eD_p n_i^2}{L_p N_D} \end{cases} \quad \text{où} \quad L_x = \sqrt{D_x \tau_x}, \quad x = \{n, p\}$$

avec L_n et L_p les longueurs de pénétration des porteurs minoritaires. Ces valeurs sont intimement liées aux coefficients de diffusion D_n et D_p de chaque type de porteur dans le matériau et la « durée de vie » des porteurs minoritaires (τ_n et τ_p). N_A et N_D sont les densités des « récepteurs » et des « émetteurs » dans les zones « p » et « n » respectivement. e est la charge élémentaire ($1,6 \times 10^{-19}$ C).

En appliquant maintenant à la jonction une tension de polarisation directe V , la barrière de potentiel s'abaisse d'une valeur égale à eV . Par conséquent, le courant de diffusion des porteurs majoritaires de chaque côté de la barrière vers la zone opposée augmente par un facteur proportionnel à $\exp(eV/k_B T_j)$, où T_j est la température de la jonction et k_B la constante de Boltzmann. Dans ce cas, la densité de courant de chaque type de porteur s'écrit sous la forme :

$$j_x = j_{x0} [\exp\{V/V_T\} - 1]$$

avec $x = \{n, p\}$ et $V_T = k_B T_j / e$

Cette augmentation du courant de diffusion déséquilibre le système et aboutit à une croissance de la population des porteurs minoritaires dans chaque zone. Si la tension de polarisation directe est suffisante, la probabilité de recombinaison radiative n'est plus négligeable et des photons sont produits par la jonction. La Figure 79, montre la valeur de la tension de polarisation que l'on doit appliquer à une jonction ayant un gap énergétique donné. Les points indiquent quelques LED déjà existantes.

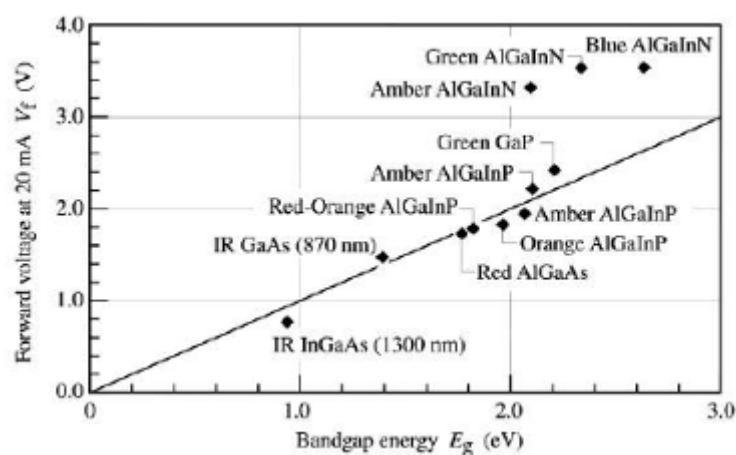


Figure 79 : Tension de polarisation (pour un courant de circuit de 20 mA) d'une jonction en fonction de l'énergie du gap entre les bandes de valence et de conductivité (E_g)

H - Présentation des trois méthodes permettant d'obtenir de la lumière blanche avec des LED

Méthode n°1

Elle est basée sur le fait que deux photons de longueurs d'onde complémentaires (λ_1 « court » et λ_2 « long ») arrivant simultanément sur l'œil humain provoquent une sensation de lumière blanche (Figure 80).

L'idée principale est donc d'utiliser une diode produisant la longueur d'onde courte, recouverte par un phosphore qui absorbe quelques photons de courte longueur d'onde pour les convertir en une autre longueur d'onde plus longue. En principe une infinité de combinaisons est possible. En pratique, plusieurs constructeurs (Nishia, CREE, LumiLED, etc.) produisent en série des diodes blanches de forte puissance (allant jusqu'à 5 W aujourd'hui) en utilisant une diode bleue autour de 450 nm (InGaN) combinée avec un phosphore jaune (YAG-Ce). Cette combinaison permet d'obtenir des LED d'une température de couleur de l'ordre de 5 500 K mais l'indice de rendu de couleur n'est pas très bon.

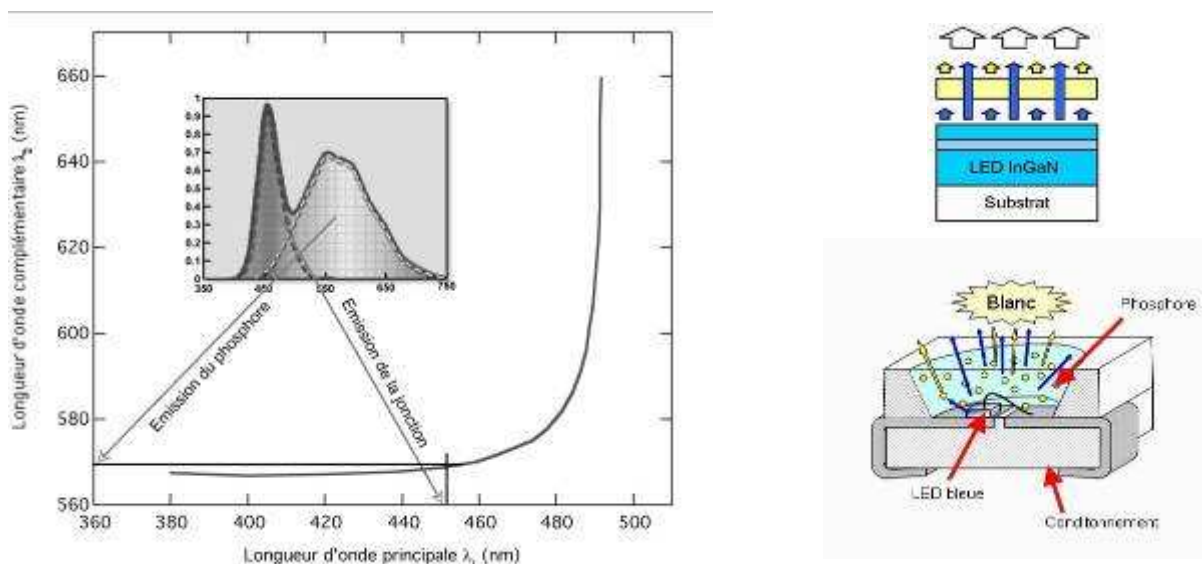


Figure 80 : En mélangeant une longueur d'onde λ_1 avec sa complémentaire λ_2 , on obtient de la lumière blanche. Ainsi, une jonction bleue avec un phosphore jaune donne du blanc

À court terme, cette technologie dominera probablement le marché de la diode blanche. Elle présente néanmoins deux inconvénients :

- la diode a un effet de halo qui peut être gênant pour certaines applications. Ceci est dû à la production de lumière directionnelle par la diode bleue tandis que le phosphore a un comportement « lambertien » (émission diffuse) ;
- le phosphore jaune n'absorbe pas facilement les photons bleus à cause des terres rares utilisées comme éléments dopants. La solution du problème semble être complexe et nécessite une recherche fondamentale de longue durée. Une importante quantité de « lumière bleue » n'est pas convertie en lumière jaune et échappe donc au système.

Pour produire du « blanc chaud », on ajoute une couche de phosphore qui produit un rayonnement rouge (Figure 81). Ceci réduit tangiblement le rendement lumineux de la LED.

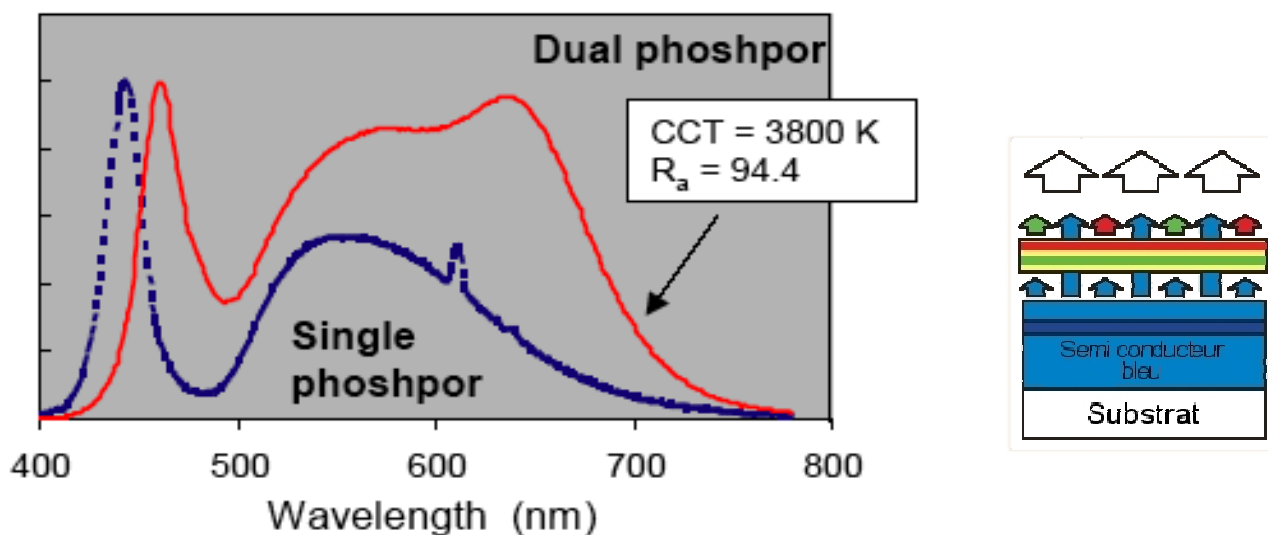


Figure 81 : « Blanc chaud » obtenu à partir du mélange de deux phosphores

La Figure 82 montre la gamme de températures de couleur que les deux variantes de cette méthode peuvent couvrir.

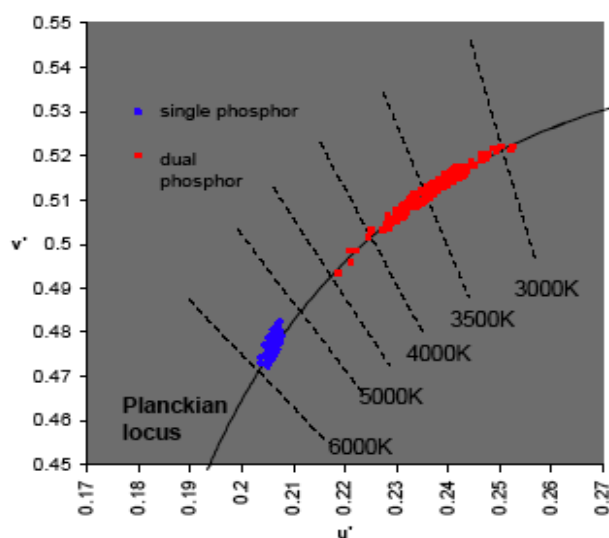


Figure 82 : Gamme de températures de couleur avec les technologies « simple » et « double phosphore »

Méthode n°2

Elle consiste à utiliser une diode produisant une longueur d'onde courte (dans l'ultraviolet proche ou dans le violet) couplée à un (ou plusieurs) phosphore(s) qui transforme la lumière UV en visible. Cette même technique est utilisée aujourd'hui par les lampes fluorescentes. Elle présente l'avantage de pouvoir créer de la lumière blanche au spectre complet de très bonne qualité (bon indice de rendu des couleurs). Le développement des diodes UV efficaces avec une longue durée de vie et une puissance suffisante représente un défi important. Si cette technologie fait ses preuves et si, dans le futur, les recherches sur les luminophores amènent sur le marché des phosphores blancs de bonne qualité et fiables, alors cette technique risque de devenir la technologie dominante pour la production de la lumière blanche par les LED. En même temps, cette méthode permettra de mettre sur le marché des LED sans « lumière bleue ». La teinte de la lumière blanche et l'indice de rendu de couleur dépendent fortement du phosphore utilisé (Figure 83).

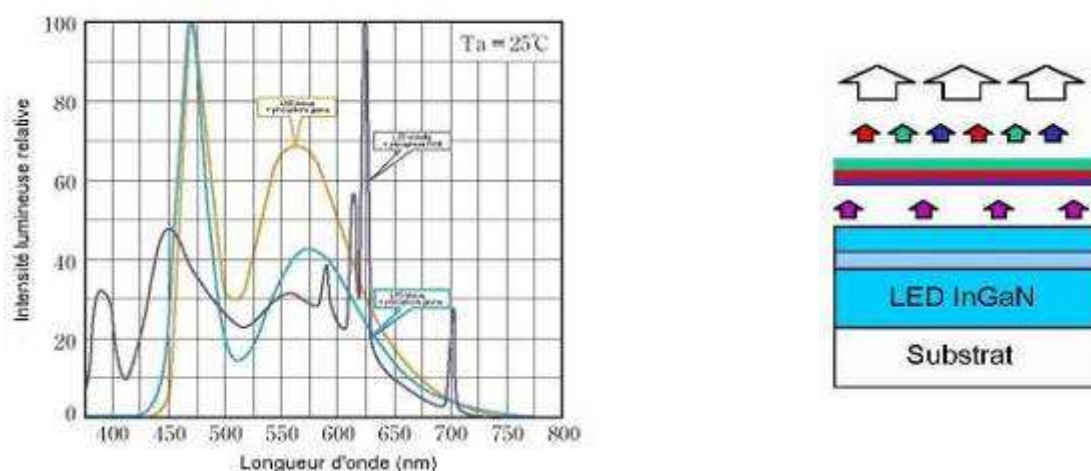


Figure 83 : En utilisant de la lumière ultra-violette la teinte du blanc obtenu dépend du phosphore utilisé

Méthode n°3

Elle consiste à utiliser trois diodes électroluminescentes, une pour chaque couleur principale (rouge, vert et bleu). La synthèse de trois couleurs mène à la production de la lumière blanche dont la température de couleur (et donc la teinte) dépend de la proportion de chacune des trois composantes. Bien que cette méthode permette de régler finement la température de couleur l'indice de rendu de couleur reste mauvais (Figure 84). Cette méthode est inadaptée à l'éclairage.

Aujourd'hui, il est courant d'utiliser plus de trois sources. Ceci permet de pouvoir obtenir plus de nuances de couleurs ou encore d'être plus précis sur la couleur obtenue. On peut alors adjoindre du cyan, de l'ambre ou du rouge orangé, l'enjeu de cette multiplication de sources est d'améliorer l'indice de rendu de couleur, mais l'homogénéité du faisceau reste délicate à obtenir.

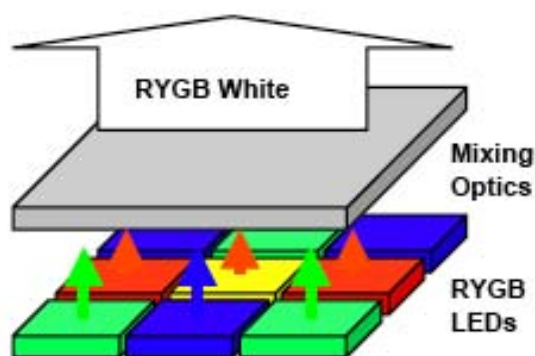
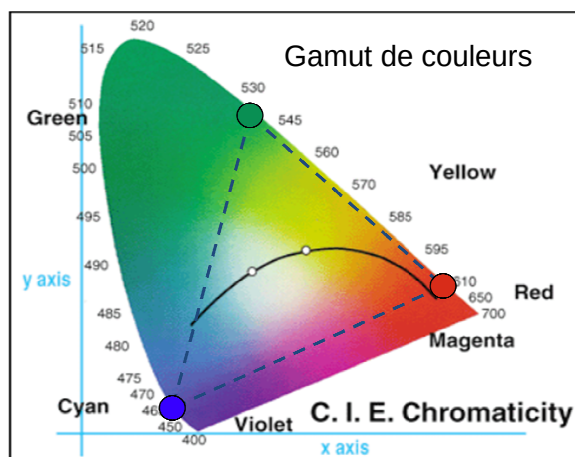


Figure 84 : Production de la lumière blanche grâce au mélange de plusieurs couleurs

Étant donné que les dimensions d'une diode sont faibles, nous pouvons envisager la création de sources de lumière blanches « composites » auxquelles l'adjonction d'un diffuseur permettrait d'améliorer considérablement l'homogénéité de la source. Cette méthode présente plusieurs avantages : éviter l'utilisation des luminophores, permettre un bon contrôle dynamique de la couleur.

Cependant, cette technologie a un défaut majeur : il faut contrôler « individuellement » chaque diode élémentaire parmi les plusieurs dizaines (voire dans certains cas centaines) de LED qui constituent la source composite. Il faut aussi prendre en compte le fait que les diodes de chaque couleur élémentaire nécessitent une tension d'alimentation différente. Une conséquence directe de ces défauts est l'augmentation du prix de la source de lumière. Par ailleurs, L'émission directe de la « lumière bleue » est inévitable (elle peut être atténuée si l'on utilise un diffuseur pour le mixage des couleurs).

I - L'efficacité externe des LED

L'efficacité quantique externe peut se décomposer en trois termes : l'efficacité d'injection (η_{inj}), l'efficacité quantique interne (η_q) et enfin l'efficacité d'extraction optique (η_{extr}).

$$\eta_{ext} = \eta_{inj} \eta_q \eta_{extr}$$

En effet, l'efficacité d'injection traduit la qualité électrique des contacts. Une partie de l'énergie est dissipée par effet Joule. Plus le gap des semi-conducteurs est élevé, plus il est difficile d'obtenir des contacts de bonne qualité. Ainsi, l'efficacité η_{inj} de la LED dépend de ces deux phénomènes concurrents. En effet, la recombinaison radiative dans la jonction est concurrencée par la recombinaison non-radiative ce qui implique que le courant total I qui circule dans la diode est supérieur à la somme des I_n et I_p . Ainsi η_{inj} est définie par la relation suivante :

$$\eta_{inj} = \frac{I_n + I_p}{I}$$

Pour des raisons technologiques, le centre luminescent est limité à une seule zone (typiquement la zone « p ») ainsi l'injection dans l'autre zone est limitée ($I_p \ll I_n$). Ceci se réalise en imposant un profil de dopage avec $N_D \gg N_A$ ⁶⁶. Dans cette configuration, l'efficacité d'injection, $\eta_{inj} \approx I_n/I$, prend des valeurs entre 0,3 et 0,8. Pour faire mieux, il faut augmenter le niveau de dopage (N_D) du semi-conducteur. Cependant la technologie d'homo-jonction atteint vite ses limites, car en augmentant le niveau de dopage pour améliorer l'efficacité d'injection, on augmente simultanément les impuretés qui constituent à leur tour des centres additionnels de recombinaison non-radiative. Par ailleurs, nous verrons plus loin que, dans une diode, les photons générés par le centre luminescent peuvent être réabsorbés plus loin dans la zone de conduction. Ce piégeage du rayonnement augmente rapidement avec le niveau du dopage. Obtenir des diodes produisant plusieurs centaines de lumens nécessite la mise en place d'une autre technologie, celle « d'hétéro-jonction ». L'idée principale de la technologie d'hétéro-jonction repose sur la variation spatiale de la composition du semi-conducteur. Ces structures, appelées hétéro-structures, sont des assemblages des semi-conducteurs de différentes compositions chimiques ayant également des différents « gaps » énergétiques. Aujourd'hui, nous utilisons des hétéro-structures simples (SH) ou doubles (DH). Dans le cas d'une hétéro-structure simple la zone p correspondant à la région de conduction est constituée d'un semi-conducteur ayant un gap énergétique E_{g2} d'une valeur inférieure à celle du gap de la zone n, E_{g1} . La discontinuité entre les deux structures énergétiques va amplifier la barrière de potentiel visible par les porteurs p (trous) désirant diffuser vers la région n. Ce décalage est égal à ΔE_v . De leur côté, les électrons (porteurs n) voient une diminution de la barrière de potentiel égale à ΔE_c . Si la valeur de ΔE_v est fixée par les caractéristiques du système, ΔE_c peut varier de zéro jusqu'à une valeur maximale en fonction de la soudaineté de la jonction. Dans cette configuration, le rapport entre les courants I_n/I_p augmente d'un facteur proportionnel à $\exp(\Delta E/k_B T)$, où $\Delta E_v < \Delta E < \Delta E_v + \Delta E_c$. Il est donc possible d'agir sur l'efficacité d'injection sans être obligé d'augmenter indéfiniment le niveau de dopage. L'utilisation d'hétéro-structures (DH dans la majorité de cas aujourd'hui) combinées à des régions émissives très fines (de l'ordre de la longueur d'onde de Broglie pour les électrons dans le cristal) induit des phénomènes quantiques qui modifient le spectre de l'énergie des porteurs (confinement quantique) et favorisent l'augmentation de l'efficacité de la diode. Nous parlons donc de LED à puits quantiques simples (QW) ou multiples (MQWs).

L'efficacité interne quantique η_q est le rendement quantique interne. Il traduit la qualité du matériau et de la conception et réalisation de la LED elle-même.

⁶⁶ Il s'agit de la densité de récepteurs et d'émetteurs dans le semi-conducteur.

L'efficacité d'extraction optique, η_{extr} , est le rapport entre le nombre de photons sortant de la diode et le nombre de photons créés dans la jonction. Une partie de ces derniers reste piégée par les indices de réfraction élevés des semi-conducteurs et finit par être réabsorbée.

Nous pouvons donc calculer l'efficacité énergétique de la diode en utilisant la relation suivante :

$$\eta_e = \left(\frac{I_n + I_p}{I} \right) \eta_q \eta_{\text{opt}} \left(\frac{h\nu}{eV} \right)$$

Dans un processus idéal, on pourrait imaginer un rendement η_e de 100 % pour les LED, alors que le rendement théorique du Corps Noir thermodynamique, modèle physique de la lampe à incandescence, se situe aux alentours des 10 à 15 % pour des températures typiques de filament de 2 800 à 3 200 K. Cependant cela reste pour le moment impossible à réaliser. Dans le meilleur des cas connus aujourd'hui certaines LED s'approchent d'un rendement de 60 %.

Cependant cette relation ne concerne que la diode monochromatique. Quand la diode est intégrée dans un système d'éclairage nous parlerons plutôt de l'efficacité globale (*wall plug efficacy*), η_{WP} , définie comme suit :

$$\eta_{\text{WP}} = \eta_e \left[\eta_{\text{driver}} \eta_{\text{conversion}} \eta_{\text{diffusion}} (\eta_{\text{thermique}} \eta_{\text{lum}}) \right]$$

où

η_{driver} est le rendement du circuit d'alimentation et de contrôle de la LED, c'est-à-dire le rapport entre la puissance électrique délivrée à la diode et la puissance électrique consommée « à la prise » ;

$\eta_{\text{conversion}}$ est le rendement de transformation en lumière blanche et traduit l'efficacité des luminophores ; $\eta_{\text{diffusion}}$ traduit les pertes subies par diffusion optique ;

$\eta_{\text{thermique}}$ traduit la perte d'efficacité liée à la température de la jonction. Cette approche permet de décorrélérer les pertes liées aux performances des LED (prises à une température de jonction de 25°C) des aspects thermiques qui sont généralement traités au niveau du luminaire ;

η_{lum} décrit le rendement du luminaire, c'est-à-dire l'efficacité avec laquelle il conduit les photons sur la zone à éclairer. Une partie de ces derniers peut en effet soit se perdre dans le luminaire, soit partir dans une mauvaise direction et être ainsi « gaspillée ».

Le Tableau 26 donne des valeurs typiques pour chacun d'eux en 2005 et 2008 montrant ainsi les progrès réalisés. Il précise également les objectifs de rendements pour 2015 du Département de l'Énergie (DoE) américain.

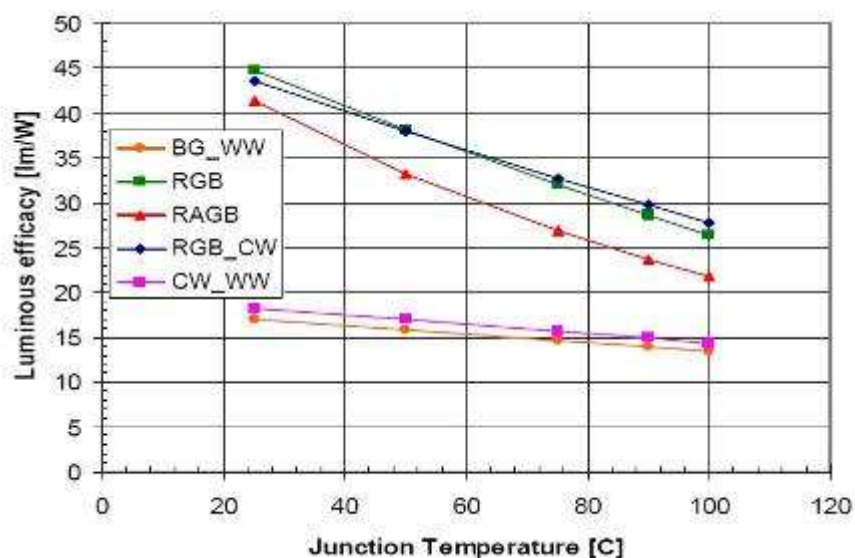
Tableau 26 : Valeurs typiques des rendements intervenants dans le rendement global en 2005, 2008 et l'objectif visé en 2015 pour un luminaire à LED (Blanc à 4 100 K – CRI 80)

	Rendements	2005	2008	Objectif DoE (2015)
Alimentation	Driver	85 %	85 %	92 %
LED Tj : 25°C Température de couleur : 4100K CRI : 80	Injection électrique	80 %	90 %	95 %
	Quantique Interne	60 %	80 %	90 %
	Extraction	50 %	80 %	90 %
	Conversion longueur d'onde	70 %	65 %	73 %
	Diffusion	80 %	80 %	90 %
Luminaire	Thermique	?	85 %	95 %
	Optique	70 %	80 %	92 %
Global		8 %	17 %	41 %

J - Facteurs dont dépend l'efficacité des LED

La température de la jonction

La chaleur est « l'ennemi n°1 » des LED, notamment des LED blanches. Un fonctionnement des LED à trop haute température ambiante (et donc haute température de jonction du semi conducteur) a des conséquences dramatiques sur l'efficacité mais aussi sur d'autres performances et caractéristiques des LED tels que le flux, le spectre (et donc la couleur), la tension de polarisation et la durée de vie. Pour bénéficier des propriétés intéressantes des LED (flux, efficacité, durée de vie, qualité de la lumière émise), les intégrateurs doivent impérativement tenir compte de la chaleur dégagée par les LED et des qualités propres à ce composant à évacuer cette chaleur. Néanmoins, même avec une excellente gestion thermique des LED dans l'application finale, la température résultante au niveau de la jonction du semi conducteur est bien loin des 25°C, température référence de la plupart des fabricants. La Figure 85 donne des efficacités de systèmes utilisant différentes technologies en fonction de la température de jonction T_j .



RGB : Mélange de 3 couleurs (Rouge, Vert et Bleu) et RGB_CW pour blanc froid
 RAGB : Mélange de 4 couleurs (Rouge, Ambre, Vert et Bleu)
 BG_WW : LED blanches couplées à des LED bleues et vertes
 CW_WW : LED blanche à phosphore (banc froid)

Source : LED Engineering Development

Figure 85 : Influence de la température de jonction sur l'efficacité lumineuse des systèmes LED pour la génération de la lumière blanche

Le courant qui traverse la jonction

La Figure 86 montre l'influence du courant qui traverse la jonction sur le flux lumineux et l'efficacité lumineuse d'une LED blanche.

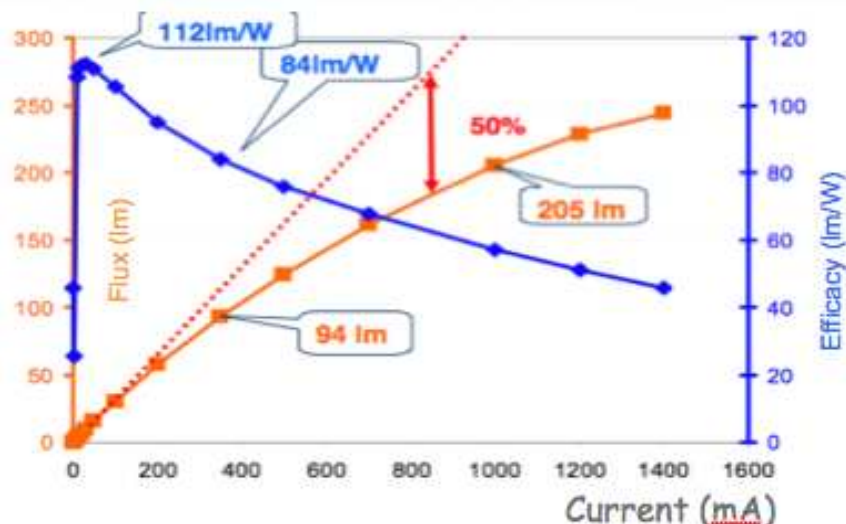
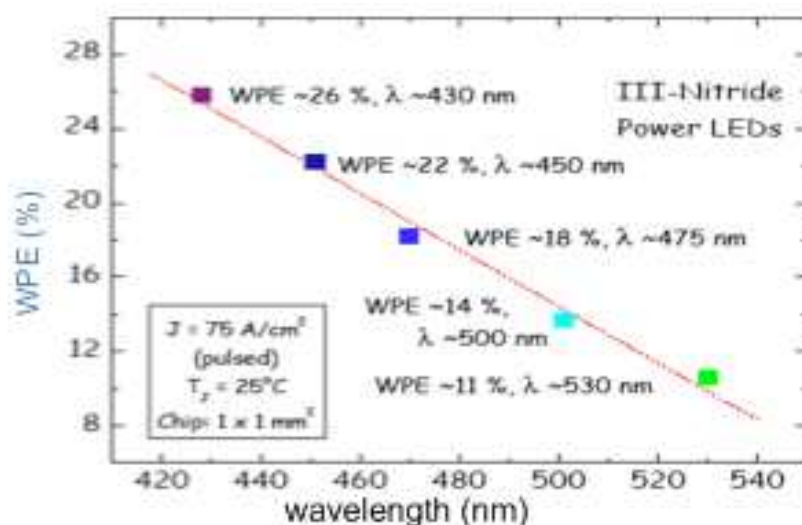


Figure 86 : Influence du courant sur l'efficacité lumineuse et le flux d'une LED blanche. La ligne pointillée correspond aux prévisions théoriques pour le flux

La longueur d'onde

L'efficacité de la LED dépend de la longueur d'onde principale. La Figure 87 montre la dépendance de l'efficacité globale en fonction de la longueur d'onde pour la famille des LED utilisant la technologie des nitrides.



WPE : Wall Plug Efficacy

Figure 87 : Variation de l'efficacité globale en fonction de la longueur d'onde principale

La surface de la jonction

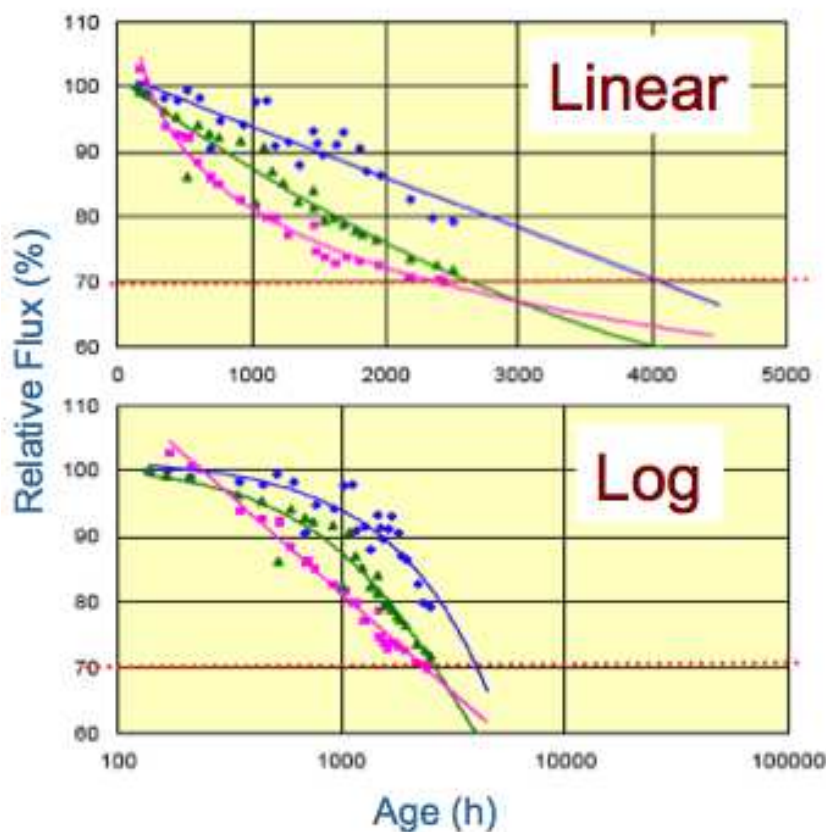
La dépendance de la surface émettrice est assez complexe car il faut prendre en compte d'autres facteurs comme la densité de courant surfacique et la surface de dissipation thermique. Aujourd'hui, il est préférable d'utiliser plusieurs LED de moindre puissance (configuration multipuce) qu'une seule LED de forte puissance.

La géométrie de la puce

La géométrie de la puce influence directement l'extraction de la lumière et par conséquent a une incidence directe sur l'efficacité du système. Cependant cela dépasse les objectifs du présent rapport.

K - Méthodes d'extrapolation utilisées pour l'estimation de la durée de vie des LED

La Figure 88 montre la différence entre une méthode linéaire et logarithmique. On constate que l'extrapolation linéaire est mieux adaptée aux LED colorées tandis que la méthode logarithmique conviendrait mieux aux LED blanches.



Source : JELMA journal No.495, April 2008

Les courbes bleue et verte correspondent aux LED colorées, la courbe violette correspond aux LED blanches 5 mm

Figure 88 : Méthodes d'extrapolation utilisées pour l'estimation de la durée de vie des LED

L – Principaux facteurs influençant la durée de vie des LED

La température de la jonction joue un rôle primordial sur la fiabilité des LED. Les valeurs annoncées sont souvent données à une température de 25°C. Alors, en plaçant les LED dans un système d'éclairage, sans prendre garde de la gestion thermique, la durée de vie peut diminuer de façon dramatique.

Le graphique de la Figure 89 montre le lien entre durée de vie d'une LED et la température de jonction ainsi que l'intensité du courant.

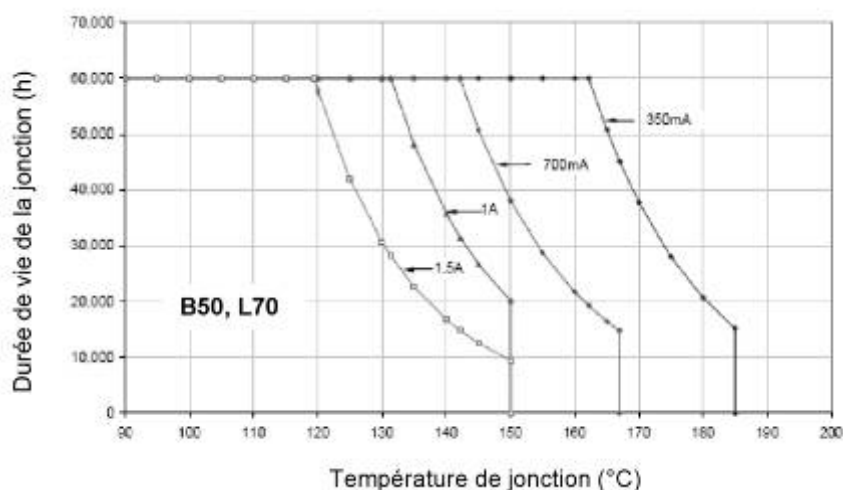


Figure 89 : Dépendance de la durée de vie d'une LED en fonction du courant et de la température de la jonction (B50, L70 signifient que 50 % des LED de l'échantillon testé atteignent 70 % du flux initial)

Il faut souligner ici les énormes progrès accomplis pour le maintien du flux lumineux surtout dans le domaine des LED de haute puissance. La Figure 90 montre la dépréciation du flux pour les deux technologies dominantes (5 mm et haute puissance).

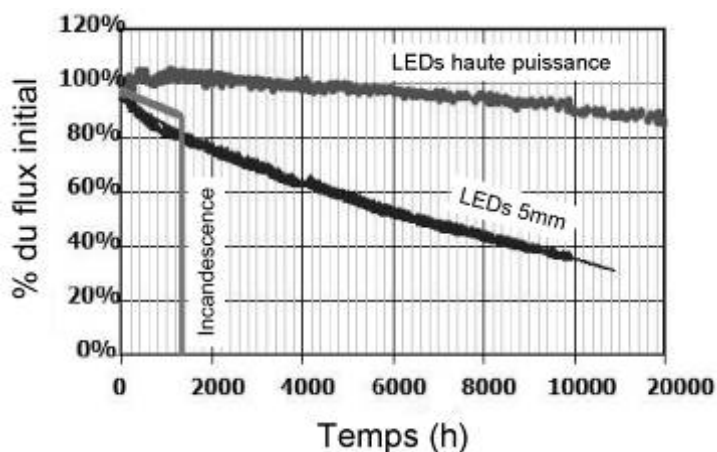


Figure 90 : Dépréciation typique du flux lumineux des LED forte puissance et de format 5 mm (la lampe à incandescence est donnée comme référence)

M - Le cycle de vie des LED

L'analyse du cycle de vie (ACV) - ou écobilan - est principalement une méthode servant à mesurer les impacts environnementaux des différentes activités économiques et ce, sur tout le cycle de vie du produit ou du processus.

La production des systèmes à LED pour l'éclairage est très complexe et difficile à tracer car il faut plus de 4 000 opérations et processus élémentaires pour arriver au produit fini. Les travaux de H. Scott Matthews ont montré que nous pouvions prendre en compte cette phase en utilisant le concept de l'énergie grise. L'énergie grise, entendue comme concept utilisé dans l'écologie des systèmes s'attache à mesurer le « vrai » coût énergétique d'un produit, et tente d'étendre ceci au concept de « vraie valeur » de ce produit. De manière classique, l'énergie « grise » se définit comme la somme totale de l'énergie nécessaire à assurer l'élaboration d'un produit, et ceci de l'extraction du ou des matériau(x) brut(s), le traitement, la transformation, la mise en œuvre du produit, ainsi que les transports successifs qu'aura nécessité la mise en œuvre. Pour donner un exemple, la production d'1 kg d'aluminium équivaut à une énergie de 170 MJ et celle d'1 kg de cuivre à 100 MJ. Sont également incluses les dépenses énergétiques des matériels et engins ayant contribué à son élaboration. Il a été ainsi estimé que pour un module d'une LED la consommation est de 80 kWh. Enfin, selon P. Neri *et al.* l'assemblage des composants d'une seule lampe nécessite un temps de travail direct de 3 minutes et la consommation énergétique pour ce procès est de 1,2 kWh par lampe.⁶⁷ L'assemblage final du système luminaire-module-alimentation n'a pas pu être pris en compte car nous n'avons pas des données le concernant.

Nous pouvons calculer l'impact du transport en faisant l'hypothèse que la plupart des systèmes LED sont produits en Asie et transportés de leur lieu de fabrication par voie terrestre et maritime jusqu'à la destination finale. On estime que le pre- et post- acheminement par voie terrestre en utilisant des camions de 16 / 32 tonnes couvre une distance de 700 km (500 en pré acheminement et 200 en post acheminement) et que selon Ecoinvent l'acheminement par voie maritime représente 0,0107 kg CO₂ par tonne de matériel acheminé et par kilomètre parcouru. Le transport local est ensuite négligeable.

La présence d'une importante quantité d'aluminium surtout dans le dissipateur thermique (plusieurs dizaines, voire des centaines de grammes) est responsable d'une toxicité élevée vis-à-vis de l'homme. Par ailleurs le fait que les LED nécessitent pour leur fonctionnement des circuits électroniques (ballast) qui ont une durée de vie de l'ordre de 20 000 h (quand la durée de la LED est de l'ordre de 50 000 h, si elle est correctement gérée) grève sérieusement l'impact du système vis-à-vis de la production des déchets.

Le tableau suivant résume l'impact environnemental de systèmes à LED ayant une efficacité lumineuse de 65 lm/W comparée à celle d'une lampe à iodures métalliques céramique standard⁶⁸. Dans les deux cas nous n'avons pas inclus le ballast. La durée de vie de la LED a été considérée égale à 50 000 h et celle de la CMHL⁶⁹ (lampe à iodures métalliques céramique) égale à 12 000 h (avec une durée de vie du système global de 36 000 h). Nous n'avons pas montré ici la quantité de CO₂ car elle a été donnée dans le paragraphe qui traite du bilan carbone de l'installation.

⁶⁷ Ces travaux ont été réalisés pour une lampe d'éclairage d'urgence, mais ces valeurs sont réalistes pour le cas de l'assemblage d'un module LED.

⁶⁸ Ces valeurs proviennent du rapport DERFA et la lampe CMHL « standard » de 70 W n'a qu'une efficacité de 77 lm / W.

⁶⁹ CMHL : Ceramic Metal Halide Lamp.

Tableau 27 : L'impact environnemental de systèmes à LED ayant une efficacité lumineuse de 65 lm / W comparée à celle d'une lampe à iodures métalliques céramique standard

Impact	Unité de mesure	LED	CMHL
Acidification de l'air	kg SO ₂ par Mlm h	0,032	0,026
Oxydation Photochimique	kg O ₃ formé par Mlm h	0,00051	0,00042
Destruction stratosphérique d'Ozone	kg CFC-11 par Mlm h	2,75x10 ⁻⁷	2,23x10 ⁻⁷
Toxicité humaine	kg 1,4-dichlorobenzene par Mlm h	1 ,10	0,81
Toxicité pour l'écosystème aquatique (eau douce)	kg 1,4-dichlorobenzene par Mlm h	0,22	0,16
Toxicité pour l'écosystème aquatique (marin)	kg 1,4-dichlorobenzene par Mlm h	1,69	1,34
Eutrophisation	kg PO ₄ par Mlm h	0,0024	0,0020
Utilisation des sols (usines, stockage, déchets)	m ² par an et Mlm h	0,21	0,18
Effets négatifs sur la biodiversité ⁷⁰	Points par Mlm h	0,16	0,13
Toxicité pour l'écosystème terrestre	kg 1,4-dichlorobenzene par Mlm h	0,0011	0,0009
Destruction des ressources abiotiques	kg d'antimoine par Mlm h ⁷¹	0,071	0,059
Production des déchets (non dangereux)	kg des déchets par Mlm h	104,81	87,48
Production des déchets radioactifs ⁷²	kg des déchets par Mlm h	0,00032	0,00024
Production des déchets dangereux (non-radioactifs)	kg des déchets par Mlm h	0,17	0,15

Tous les indicateurs montrent clairement que les systèmes à LED ont potentiellement un impact environnemental plus négatif que les systèmes utilisant des lampes à décharge. Malheureusement, ce bilan peut être aggravé par le fait que les valeurs présentées dans ce tableau ont été pondérées par la durée de vie théorique de la source de lumière. En effet nous savons très bien que pour les LED la valeur théorique de 50 000 h est donnée dans le cas d'une utilisation « idéale » (température de jonction de 25°C) et qu'en situation réelle cette valeur peut être facilement divisée par un facteur 2. Le jour où l'efficacité globale du système à LED sera de

⁷⁰ La biodiversité est négativement influencée par l'agriculture intensive, la sylviculture et l'augmentation des zones urbaines et les infrastructures. Cet indicateur tente de fournir une mesure de cet impact. Il combine l'utilisation des terres et leur transformation (vers et depuis utilisations industrielles).

⁷¹ Ecoinvent data base utilise l'antimoine (Sb) comme indicateur pour la destruction des ressources abiotiques. L'antimoine est un élément rare mais pour le cas de LED, l'utilisation comme indicateur de l'indium (In) serait mieux adaptée, cependant nous n'avons pas d'informations quantitatives sur son utilisation par l'industrie du semi-conducteur.

⁷² Cette valeur a été calculée par DEFRA en se basant sur les données pour le Royaume-Uni et peut être supérieure pour la France.

143 lm / W pour une vraie durée de vie de 50 000h alors l'écobilan des LED deviendra positif (par rapport aux autres solutions classiques).

N - Les défis technologiques des LED

Aujourd'hui la recherche dans le monde des LED est très intense, les différentes directions jugées pertinentes sont listées ci-après.

Recherche fondamentale sur les matériaux et la génération de la lumière

Il est nécessaire de mieux comprendre les mécanismes de génération de lumière par les semi-conducteurs. Pour cela, il faut développer de nouvelles techniques de diagnostic adaptées aux LED et des modèles mathématiques plus sophistiqués que ceux dont nous disposons aujourd'hui. Dans l'immédiat, la compréhension des problèmes liés aux défauts de dopage de type p et à l'incorporation de fortes concentrations d'indium (InGaN) et d'aluminium (AlGaInN) dans les diodes vertes, nous conduisent à la création de diodes vertes plus efficaces. L'étude du confinement des porteurs dans les LED à base de phosphures semble, quant à elle, être la clef pour la réalisation de diodes rouges beaucoup plus efficaces. Par ailleurs, l'indium, matériau de base pour la majorité des LED actuelles est un élément rare : 61^e en abondance sur la croûte terrestre (0,24 ppm en poids). L'indium n'est pas exploité en produit principal (il n'y a pas de mines d'indium). L'indium est un sous-produit du zinc, mais aussi de l'étain. En effet, il est classé second sur la liste des matériaux stratégiques les plus rares. Bien qu'une jonction LED utilise une quantité infime de cet élément, il est impossible de le recycler après utilisation. Aujourd'hui les réserves mondiales s'élèvent à 5 600 tonnes et sont donc suffisantes pour les années à venir mais, elles ne sont pas inépuisables. Aujourd'hui, plus de 75 % de l'indium est utilisé par l'industrie des écrans plats pour la fabrication d'électrodes transparentes en ITO (Indium Tin Oxyde). Comme le montre la Figure 91 le prix de ce métal ne cesse d'augmenter depuis des années. Selon les analystes, le scénario le plus probable est que l'industrie aura à faire face à une situation de « crise » périodique à court terme (2 - 3 ans). Notons aussi que l'indium lui-même ne semble pas poser des problèmes de toxicité mais ses composés utilisés souvent pour la fabrication des LED peuvent présenter une certaine dangerosité.

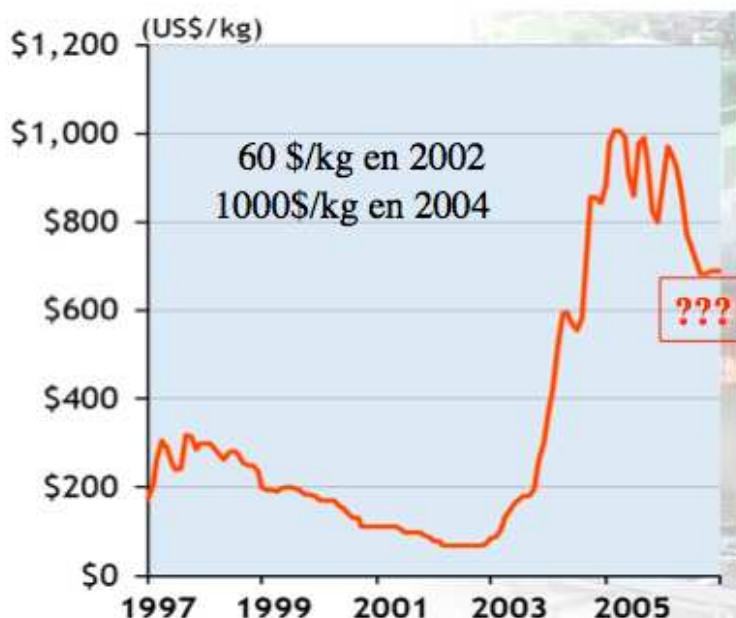
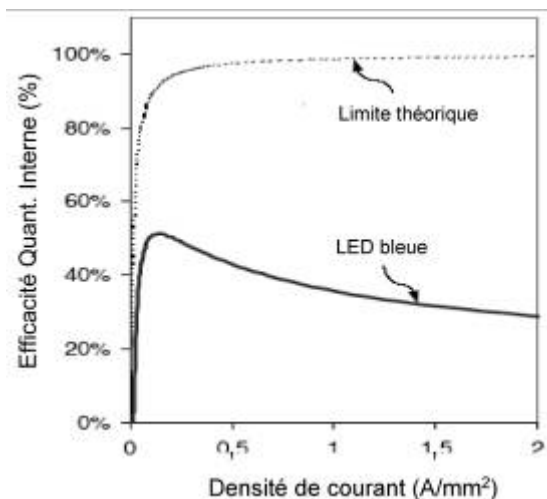


Figure 91 : Évolution du prix de l'indium

Augmentation de l'efficacité quantique interne (EQI)

Ceci reste un défi majeur et d'actualité surtout dans un contexte technologique où tous les autres facteurs qui limitent l'efficacité globale d'une LED commencent à être maîtrisés. La Figure 92 montre l'EQI théorique et celle d'une LED bleue de bonne qualité. L'écart est remarquable surtout à fort courants (et donc à puissance élevée). L'objectif actuel est d'arriver, dans la décennie suivante, à une valeur d'EQI de l'ordre de 90 %.



Ligne pointillée : valeurs théoriques
Ligne continue : valeurs réelles obtenues pour une LED bleue de bonne qualité

Figure 92 : Efficacité quantique interne d'une jonction LED en fonction de la densité du courant

Matériaux pour les substrats

Aujourd'hui pour la création des diodes de la famille GaN (nitrure de gallium), qui semblent être parmi les plus prometteuses, il faut utiliser des substrats en saphir, SiC (carbure de silicium) ou bien GaN. Chacun de ces matériaux présente des avantages et des inconvénients. Toutefois, nous ne savons pas produire des grandes surfaces sans défaut avec ces matériaux. Trouver la solution de ce problème doit être considéré comme une priorité dans ce domaine. Par ailleurs, il serait souhaitable de pouvoir diminuer le coût de production du substrat.

Technologie des réacteurs pour la création des diodes par épitaxie

Les réacteurs utilisés pour la production en série des diodes électroluminescentes de la famille GaN ne sont que des machines créées pour la production des diodes en GaAs (arséniure de gallium). Si leur fiabilité est bonne pour la production des diodes en GaAs, elle est déplorable pour la réalisation des diodes modernes en GaN. Ainsi, les diodes produites en série par ces machines présentent quasi systématiquement des efficacités 1,5 à 2 fois inférieures à celles constatées sur les prototypes. Par ailleurs, dans la même série produite par une machine, on peut constater d'importantes dispersions de caractéristiques. L'exemple caricatural est le tri manuel en fonction de la « couleur » effectué à la fin de la ligne de production des diodes blanches de forte intensité. Pour avancer dans ce domaine, il est nécessaire de mieux comprendre la chimie du processus et les mécanismes de croissance des nitrures afin d'optimiser les réacteurs.

Luminophores

Les problèmes liés à la faible absorption de la lumière bleue par les phosphores jaunes ont déjà été évoqués. Dans un premier temps, il convient de développer des luminophores capables d'absorber et de convertir efficacement des photons de longueurs d'onde comprises entre 370 et 470 nm. Dans un second temps, il sera nécessaire d'étudier d'autres combinaisons possibles de couleurs complémentaires et de développer des phosphores

adéquats. Par ailleurs, comme pour les lampes fluorescentes, le développement des « *quantum-splitting phosphors* » marquera une étape décisive pour les LED.

Extraction de la lumière et packaging

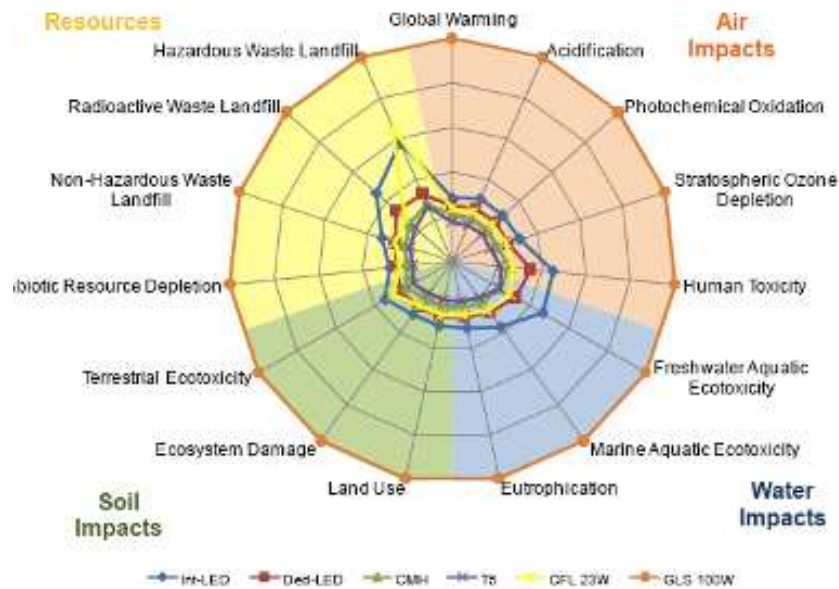
L'amélioration des caractéristiques optiques des substrats, des contacts transparents et des couches réfléchissantes constitue un axe de recherche important dans un futur proche. Améliorer la géométrie des jonctions afin d'augmenter l'efficacité de l'extraction de la lumière, ou même faire appel à des structures complexes comme les cristaux photoniques sont des défis à plus long terme. Enfin, il ne faut pas oublier que la jonction n'est qu'une petite partie de la diode, et que le packaging joue un rôle primordial pour son efficacité et sa fiabilité. Des défis d'ordre technologique sont à prévoir dans ce domaine. Par exemple, pour une diode de forte intensité, il faudrait un matériau transparent et facilement usinable ayant un indice de réfraction supérieur à 1,6 et une transmittance de 80 % de 440 à 650 nm susceptible de bloquer complètement des photons courts ($\lambda < 440$ nm). Ce matériau doit pouvoir conserver ses caractéristiques pendant au moins 50 000 heures tout en étant soumis à une température de 150°C. Enfin, il faut que la concentration d'eau dans ce matériau reste de l'ordre de quelques parties par million (ppm) pour éviter une rapide dégradation des performances et que ses caractéristiques mécaniques soient compatibles avec l'application envisagée.

Luminaires et électronique

Pour que les LED puissent pénétrer le marché de l'éclairage, il faut développer des luminaires spécifiques qui prennent en compte la forte directivité de la lumière, les faibles dimensions de la source de lumière et surtout sa sensibilité à la température, l'humidité et tout autre facteur corrosif rencontré dans son environnement. Enfin, compte tenu du fait que la production d'une quantité de lumière suffisante pour l'éclairage général implique un nombre important de LED, une électronique de commande sophistiquée est nécessaire. Notons ici que la couleur d'une LED est très sensible à la fois à la tension et au courant de l'alimentation. Une faible variation sur l'une ou l'autre de ces grandeurs provoque une importante dérive de la couleur. Par ailleurs, le comportement de chaque diode se modifie avec le temps (le flux baisse, la couleur dérive) plus ou moins lentement, mais, à cause des lacunes au niveau de la production (voir précédemment) cette variation est différente d'une diode à l'autre. Il faut donc les contrôler une à une.

Améliorer l'impact environnemental de la filière en général

La Figure 93 montre les résultats d'une étude récente sur l'analyse du cycle de vie des LED de la production au recyclage en incluant bien entendu l'énergie utilisée pour produire leur lumière pendant leur durée de vie. Elle la compare à celle d'autres types de systèmes d'éclairage « ultra-efficaces » : les lampes à iodures métalliques, les lampes fluo compactes et les tubes fluorescent T5. La conclusion est que les LED peuvent devenir la solution la plus acceptable sur le plan du bilan environnemental si les systèmes d'éclairage à LED passent d'une efficacité globale (y compris le ballast et le luminaire) en fonctionnement de 65 à 102 lm / W et si celle des systèmes à LED pour les applications spécifiques augmente de 65 à 143 lm / W. Plus on s'éloigne du centre du diagramme plus grand est l'impact environnemental : Les LED sont encore loin d'être des sources « vertes ».



Int-LED : systèmes à LED pour l'éclairage général (avec ballast) ; ded-LED : systèmes à LED pour des applications spécifiques ; CMH : systèmes à iodures métalliques (avec ballast) basse puissance ; T5 : Tube fluorescent T5 avec ballast électronique ; CFL : lampe fluo compacte intégrale de 23 W ; GLS : lampe à incandescence 100 W (donnée pour référence uniquement). Plus on s'éloigne du centre du diagramme plus grand est l'impact environnemental.

Figure 93 : Impact environnemental des systèmes à éclairage

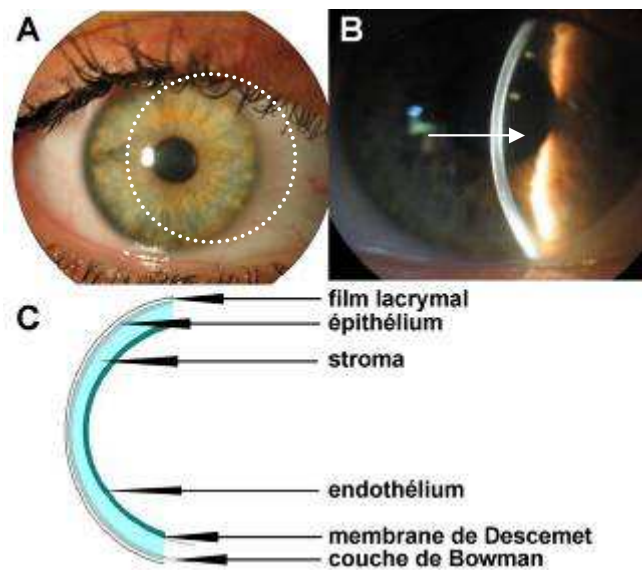
Annexes du chapitre 3 : « Lumière visible et pathologies »

A - Éléments supplémentaires concernant la cornée

La cornée est agencée en six couches qui sont de l'extérieur vers l'intérieur de l'œil :

- le film lacrymal (7 μm) : ses trois couches (lipidique, aqueuse et mucinique) assurent la lubrification, la protection et l'élimination des impuretés de la surface cornéenne. Il est intimement lié aux microvillosités des cellules épithéliales par sa couche mucinique interne ;
- l'épithélium (50 – 70 μm) : c'est un épithélium pavimenteux, pluristratifié, non kératinisé, composé de 5 à 8 assises cellulaires, jointes par des jonctions serrées, étanches au passage de fluides intercellulaires passifs. Sa couche cellulaire basale de type cuboïde, élaborant une membrane basale à la surface de la couche de Bowman permet le renouvellement constant par desquamation des strates cellulaires les plus externes. Elle semble être elle-même renouvelée par un stock de cellules souches (adultes) limbiques ;
- la couche de Bowman (8 – 15 μm) : cette couche semble être la correspondance cornéenne de l'épiscière, dans laquelle cheminent les vaisseaux épiscléraux. La cornée étant avasculaire, la fonction de cette couche de collagène V, VI, VII et IV n'est pas connue après la naissance. Elle représente néanmoins une barrière à la pénétration stromale de micro-organismes, tels que les virus ;
- le stroma (440 – 470 μm) : il est plus épais en périphérie et plus fin au centre. Il héberge une population cellulaire peu dense majoritairement constituée de kératocytes en réseau qui produisent les lamelles de collagène I de 200 à 250 μm qui le composent. Toute altération dans l'agencement ou dans l'homogénéité de taille de ses lamelles collagéniques (cicatrice, pathologie kératocytaire, œdème) compromet sa transparence. À sa périphérie se trouvent des cellules de Langhérans immunocompétentes ;
- la membrane de Descemet (10 – 12 μm) : c'est la membrane basale de l'endothélium qui la produit en permanence tout au long de la vie. Elle est constituée de collagène VIII embryonnaire dans sa partie striée externe et de collagène IV au contact de l'endothélium mature. Elle est extrêmement résistante aux collagénases ;
- l'endothélium (5 – 7 μm) : il tapisse la face interne de la cornée, au contact direct de l'humeur aqueuse, jusqu'au trabéculum sur les mailles duquel il s'étend. La fonction endothéliale consiste à maintenir constant le taux d'hydratation cornéen (cf. paragraphe 1.2). Ces cellules ne se renouvellent pas après la naissance.

La cornée possède un indice de réfraction de 1,377 et un spectre d'absorption situé dans les infrarouges lointains ($> 800 \text{ nm}$ - $> 2\,400 \text{ nm}$) et les ultraviolets ($< 300 \text{ nm}$ – 400 nm) (Figure 94). L'absorption de ces longueurs d'ondes pourra produire des lésions de la cornée. Ces dommages seront de différentes natures suivant les longueurs d'ondes absorbées. Les ultraviolets UVB, UVC faibles vont provoquer des lésions superficielles spontanément réversibles en 48 – 72 heures. Les ultraviolets, UVB, UVC élevés provoquent principalement des lésions du stroma cornéen et de la membrane de Bowman, qui peuvent être définitives, s'accompagner de néo-vascularisations et d'une perte de la transparence cornéenne. Les infrarouges de faibles énergies provoquent des lésions de la surface épithéliale cornéenne et conjonctivales sans gravité. Des énergies plus fortes ($\approx 30 \text{ J/cm}^2$) peuvent induire des lésions stromales allant jusqu'à la perforation. L'absorption de la cornée dans la partie visible du spectre est négligeable.



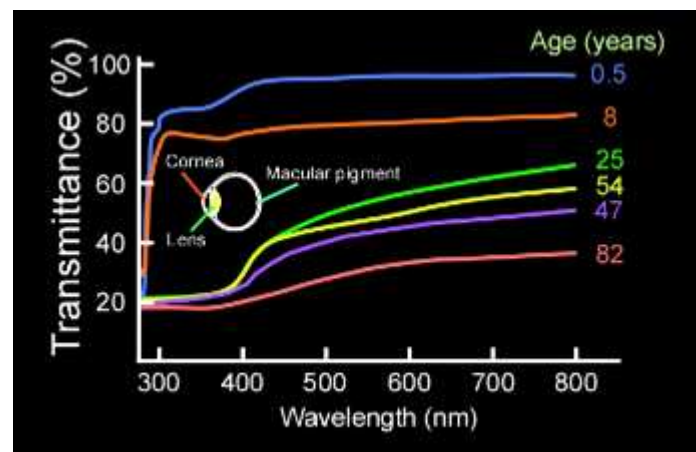
A : partie de la paroi antérieure du globe oculaire transparente vue de face et avec une lumière diffuse (A, cercle pointillé). Ses six couches sont individualisées grâce à une lampe à fente ou biomicroscope (B) par une fente lumineuse (B, flèche) orientée selon une angulation latérale et observées de face. De l'extérieur vers l'intérieur, on distingue le film lacrymal, l'épithélium, la couche de Bowman, le stroma, la membrane de Descemet et l'endothélium (C).

Figure 94 : Anatomie de la cornée

B - Éléments supplémentaires concernant le cristallin

Sa partie antérieure est en contact avec l'humeur aqueuse et sa partie postérieure avec le corps vitré. Il est suspendu par des ligaments attachés au corps ciliaire. Le corps ciliaire est représenté par un épaississement de l'uvée situé en couronne derrière l'iris. C'est un anneau de tissu musculaire recouvert d'un double épithélium pigmenté et non pigmenté lequel produit une humeur aqueuse, ultra filtrat plasmatique. Le muscle ciliaire permet la déformation du cristallin assurant l'accommodation.

L'implantation d'un cristallin artificiel non coloré multiplie par 5 la transmission de la lumière bleue sur la rétine.



l'âge

C - Éléments supplémentaires concernant la rétine

La rétine

Anatomie générale de la rétine

La rétine mature de mammifère est composée de deux tissus : la rétine neurale (RN) et l'épithélium pigmentaire rétinien (EPR). Ce dernier est constitué d'une monocouche de cellules épithéliales et se caractérise par la présence de mélanosomes impliqués dans la synthèse et le stockage des pigments de mélanine. La neurorétine est organisée en couches de noyaux cellulaires alternant avec des couches de synapses et de prolongements de cellules gliales (Figure 96).

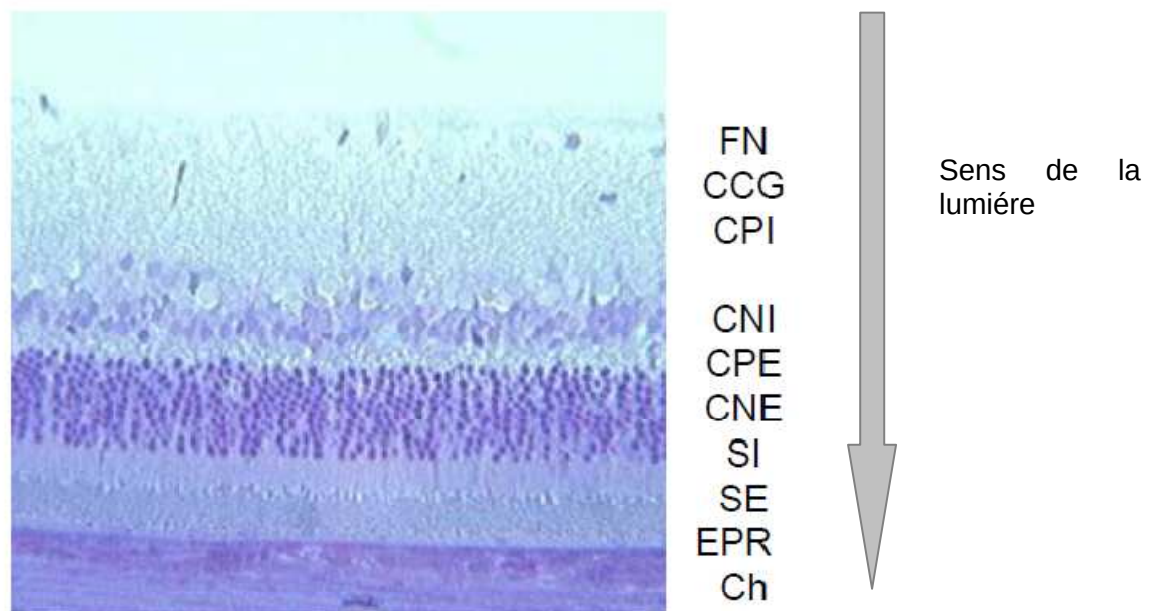
La **couche nucléaire externe (CNE)** est exclusivement composée des corps cellulaires des photorécepteurs (cônes et bâtonnets).

La **couche plexiforme externe (CPE)** est le lieu de formation des connexions synaptiques entre les photorécepteurs et leurs cellules postsynaptiques, cellules bipolaires et horizontales.

La **couche nucléaire interne (CNI)** est composée des noyaux de trois types de neurones, les cellules horizontales, les cellules bipolaires et les cellules amacrines, et des noyaux de cellules gliales de Müller.

La **couche plexiforme interne (CPI)** est le lieu de formation des connexions synaptiques entre les axones des cellules bipolaires et les dendrites des cellules ganglionnaires et amacrines.

La **couche des cellules ganglionnaires (CCG)**, la plus interne, contient les noyaux des cellules ganglionnaires et des cellules amacrines déplacées ainsi que d'astrocytes. Le prolongement forme la couche des fibres nerveuses.



Source : Cliché du à la courtoisie de E. Picard (Inserm U598, Paris).

Inclusion en historésine. Coloration au bleu de Toluidine. Ch, choroïde; CCG, couche des cellules ganglionnaires; CNE, couche nucléaire interne; CNI, couche nucléaire interne; CPE, couche plexiforme externe; CPI, couche plexiforme interne; EPR, épithélium pigmenté de la rétine; FN, fibres

nerveuses; S, sclère; SE, segments externes des photorécepteurs; SI, segments internes des photorécepteurs.

Figure 96 : Image en microscopie optique d'une coupe semi-fine de rétine de souris adulte

La macula

Au niveau macroscopique, deux régions se distinguent plus particulièrement sur la rétine visualisée au fond d'œil : la papille optique et la région maculaire. La papille optique correspond à la tête du nerf optique visible sous forme d'un disque d'où émergent également les artères et veines rétiniennes. Le diamètre de la papille est variable, en moyenne de 1,9 mm (1 à 3 mm) dans son axe vertical, et 1,7 (0,9 à 2,6 mm) dans son axe horizontal, de sorte qu'elle peut être légèrement allongée verticalement (La papille optique de diamètre 1,9 mm et 1,7 mm correspond à la tête du nerf optique. La région maculaire se distingue par la macula (M : 5,5mm de diamètre, F : la fovéa 0,8 m. La région maculaire centrale de 1,5 mm contient la fovéa).

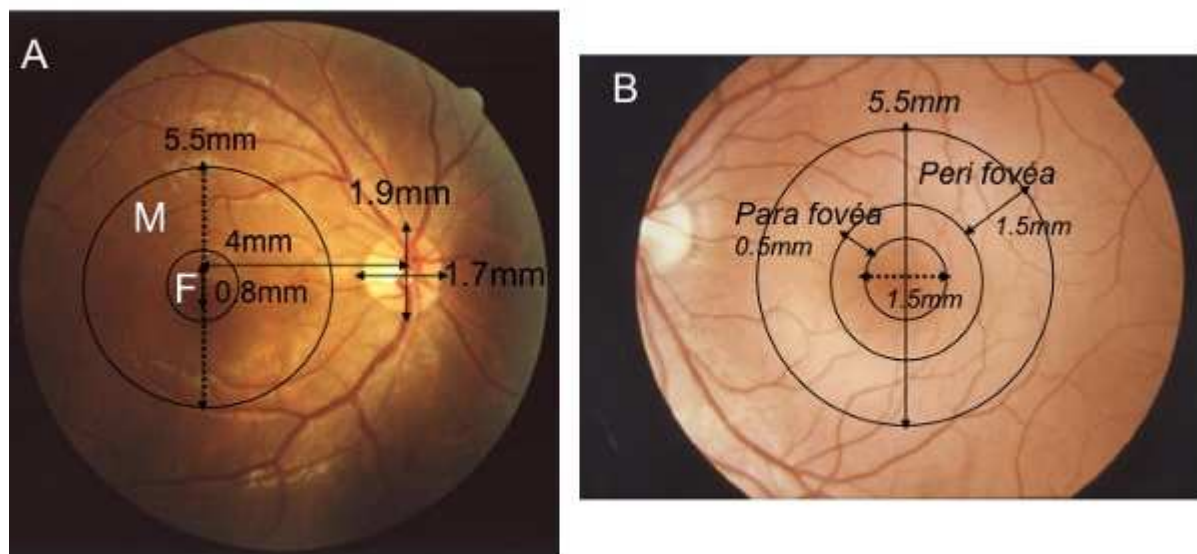


Figure 97 : Fonds d'yeux montrant la papille optique et la région maculaire

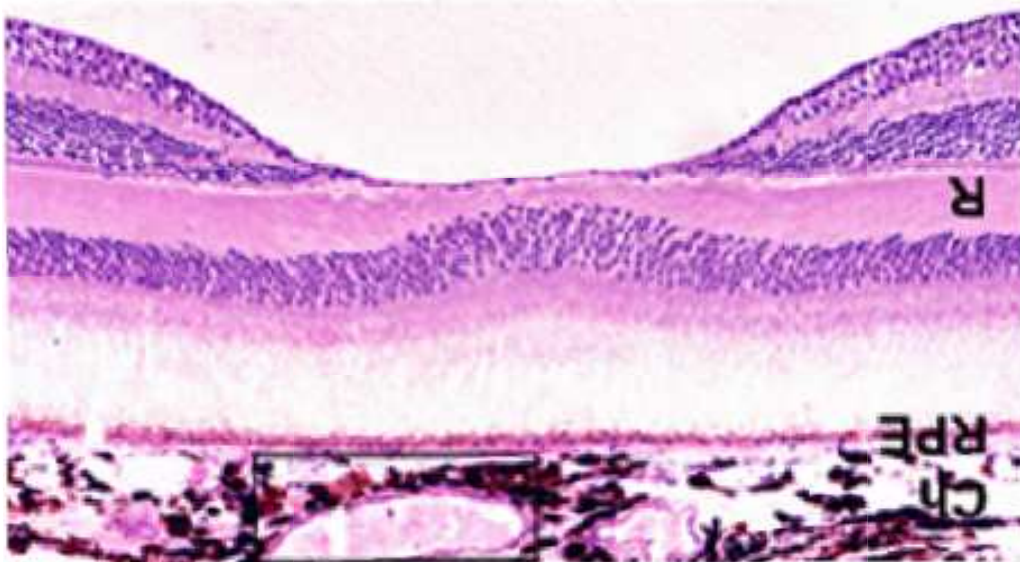


Figure 98 : Coupe verticale de la région maculaire montrant les différentes épaisseurs de la rétine

La région maculaire qui nous procure notre grande acuité visuelle du fait de la haute densité de photorécepteurs de type cône, présente une zone avasculaire en son centre (Figure 98). Dans cette région maculaire, la rétine humaine est la plus épaisse mesurant jusqu'à 400 - 500 μm alors que son épaisseur se restreint à 100 μm en grande périphérie pour une valeur moyenne de 180- 240 μm . L'épaisseur de la rétine se réduit aussi à 130 μm au centre de la macula au niveau de la fovéa (Figure 98). Cet amincissement correspond à une zone où la rétine est uniquement constituée de photorécepteurs de type cônes. La macula qui mesure 5,5 mm de diamètre se caractérise par la présence d'un pigment jaunâtre, plus visible chez le sujet jeune (Figure 99). Les pigments maculaires, la lutéine et la zéaxanthine, sont des pigments spécifiquement localisés au niveau des couches internes de la rétine maculaire avec une concentration fovéolaire. Ils appartiennent à la famille des caroténoïdes mais n'ont pas d'activité provitaminique A et contiennent des groupes oxygénés. Ces pigments xanthophylle sont d'origine alimentaire exclusivement et ne sont pas synthétisés par l'homme.

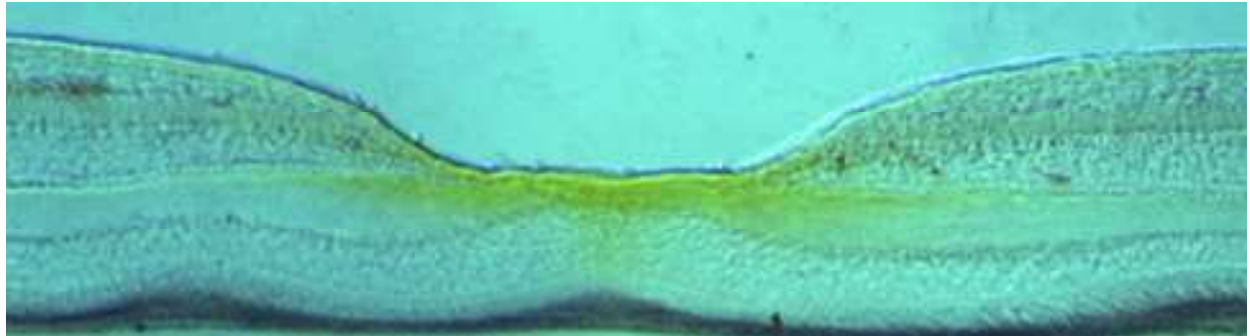


Figure 99 : Coupe verticale de la région maculaire montrant les différentes épaisseurs de la rétine

Les pigments xanthophylles jouent le rôle de filtres protecteurs contre la lumière bleue. Ils absorbent les rayonnements entre 400 et 500 nm.

Le spectre d'absorption de la lutéine et de la zéaxanthine est représenté ci-dessous (Figure 100). Le spectre d'absorption de la lutéine présente un pic principal à 445 nm et une absorption répartie dans le bleu.

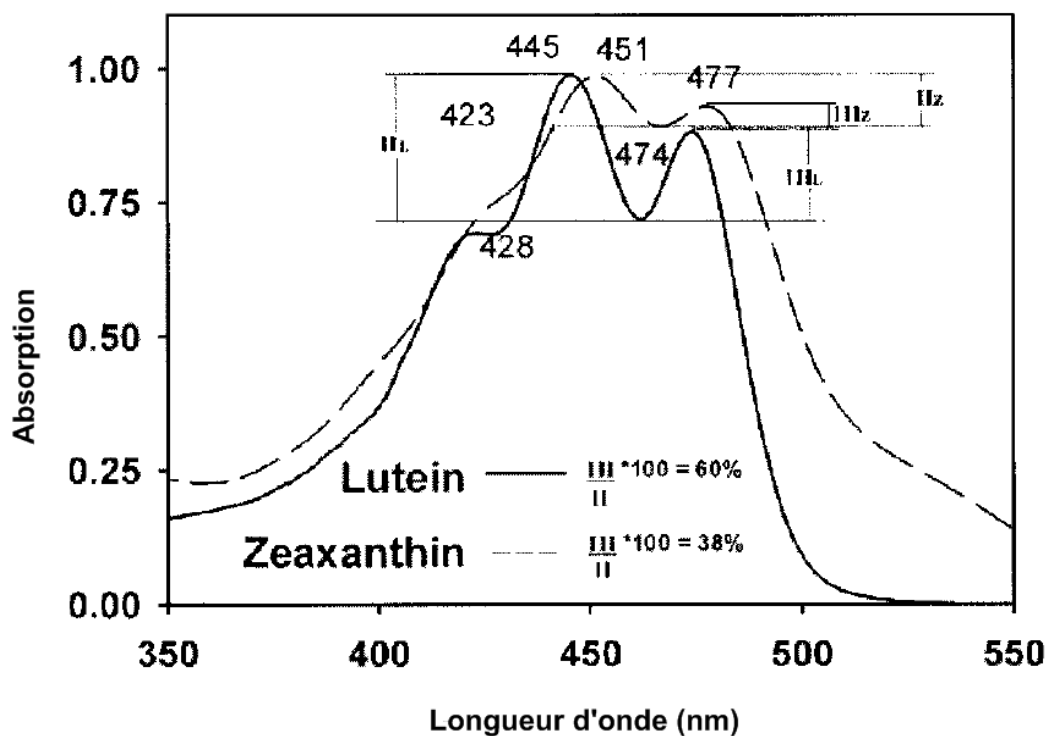


Figure 100 : Spectre d'absorption des pigments maculaires : lutéine et zéaxanthine

En dehors de la zone maculaire, les longueurs d'ondes transmises ou absorbées au niveau de la rétine sont dans le spectre d'ondes visibles et infrarouges (Figure 101). L'absorption est

maximale entre 400 et 600 nm. Les rayonnements visibles et infrarouges (IRA)⁷³ sont susceptibles de provoquer le maximum de dommages sur la rétine.

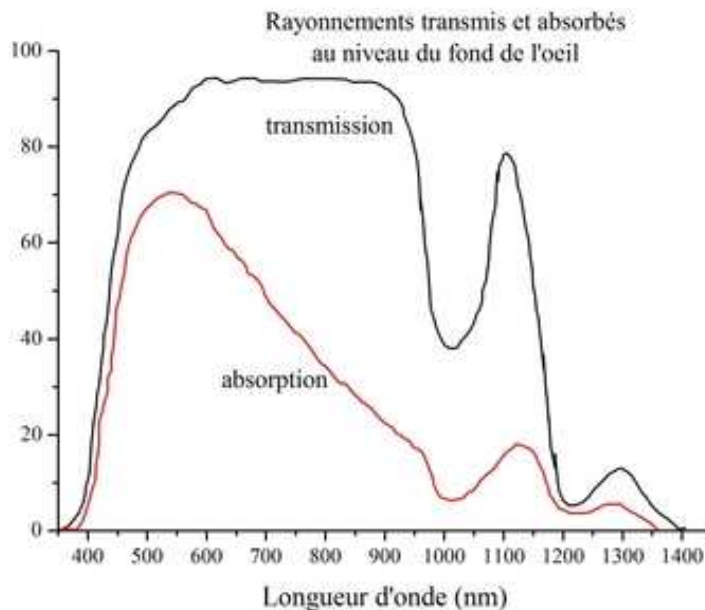


Figure 101 : Rayonnements transmis et absorbés au niveau du fond de l'œil

D - Éléments supplémentaires concernant les photorécepteurs

La rétine tapisse le fond de l'œil et c'est dans ce tissu neuronal que la lumière est transformée en activité neuronale. La lumière doit traverser l'ensemble du tissu neuronal avant d'atteindre les photorécepteurs et leur segment externe où se trouvent les pigments visuels. Cette structure peut apparaître surprenante mais certains suggèrent qu'elle permet aux cellules gliales verticales de produire un guide d'onde lumineux focalisant la lumière sur les photorécepteurs à cônes. C'est seulement dans la partie très centrale de la macula, la fovea, qui nous assure notre très grande acuité visuelle, que la structure du tissu permet de projeter directement la lumière sur les photorécepteurs (Figure 102).

⁷³ Le domaine spectral des infrarouges (IR) est composé des IRA (780 – 1 400 nm), des IRB (1 400 – 3 000 nm) et des IRC (3 000 nm – 1 mm).

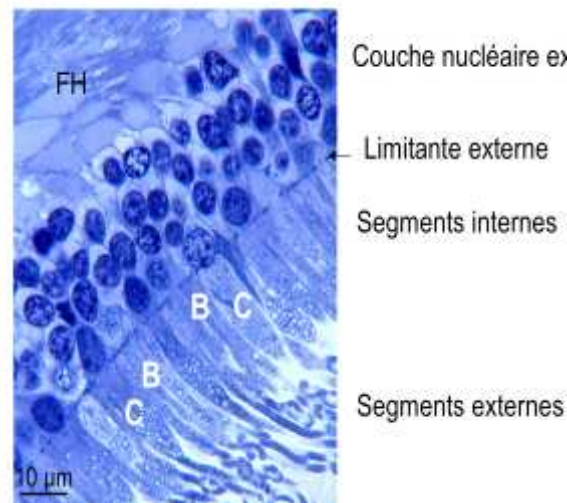


Figure 102 : Les photorécepteurs : cônes (C) et bâtonnets (B)

Mais revenons avant ces considérations sur la nature de ces photorécepteurs, les bâtonnets et les cônes, et leurs sensibilités respectives à la lumière. Ces différents photorécepteurs sont constitués 1) d'un segment externe dans lequel est concentré le pigment visuel, 2) d'un segment interne contenant de nombreuses mitochondries qui vont permettre de fournir l'énergie de la phototransduction et de la synthèse métabolique pour constituer le segment externe, 3) du corps cellulaires et enfin 4) de la terminaison neuronale à l'extrémité de l'axone qui communique l'information visuelle aux cellules bipolaires et horizontales.

Les bâtonnets

Les photorécepteurs, appelés bâtonnets du fait de leur segment externe très allongé, sont responsables de la vision nocturne. Ils sont exclus de la zone très centrale et demeurent par contre à très haute densité dans la partie périphérique (Figure 103A) mais il serait impropre de leur attribuer la vision périphérique. Ces bâtonnets ont une très grande sensibilité à tel point que des études suggèrent qu'ils pourraient faire la détection d'un unique photon. Dans la vie quotidienne, leur gamme de sensibilité est comprise entre 10^{-6} et 1 cd/m^2 ce qui correspond à la lumière de la pénombre et/ou du clair de lune (Figure 103B). Le spectre d'absorption de ces photorécepteurs est illustré dans la Figure 104 montrant un pic à 498 nm dans le bleu. Si l'on prend en compte l'absorption du cristallin et des pigments maculaires, le pic se place vers 507 nm. Ces bâtonnets font l'objet de couplages électriques entre eux ce qui affaiblit leur pouvoir de résolution mais permet un moyennage de l'information sur plusieurs cellules et augmente ainsi la capacité de détection d'un photon. Ce couplage explique en partie pourquoi les images nocturnes ne peuvent avoir la même qualité que les images diurnes.

Les cônes

Les cônes disposent d'un segment externe beaucoup plus court et d'un segment interne plus large donnant l'aspect conique à ces cellules. Ces photorécepteurs sont très nombreux dans la partie très centrale de la rétine, la macula (Figure 103A). Cependant, bien que leur densité décroisse en périphérie, ils sont présents jusque dans la très grande périphérie pouvant notamment pour détecter le mouvement d'objets arrivant dans le champ visuel. Les cônes assurent la vision diurne. Leur sensibilité s'étend dans une gamme de luminance de 10^{-3} à 10^8 cd/m^2 (Figure 103B). En réalité, leur plage de sensibilité s'ajuste en permanence dans cette gamme de luminance sur trois unités logarithmiques par des phénomènes d'adaptation. Ces phénomènes d'adaptation peuvent être mis en évidence dans la vie quotidienne par l'éblouissement transitoire lors de la transition d'une zone faiblement éclairée (intérieur) à une zone fortement éclairée (extérieur ensoleillé), ou la période d'aveuglement produite par la transition inverse. Dans les deux cas, l'adaptation aura lieu en

moins d'une minute ; les mécanismes de cette adaptation à la lumière seront évoqués brièvement ci-après.

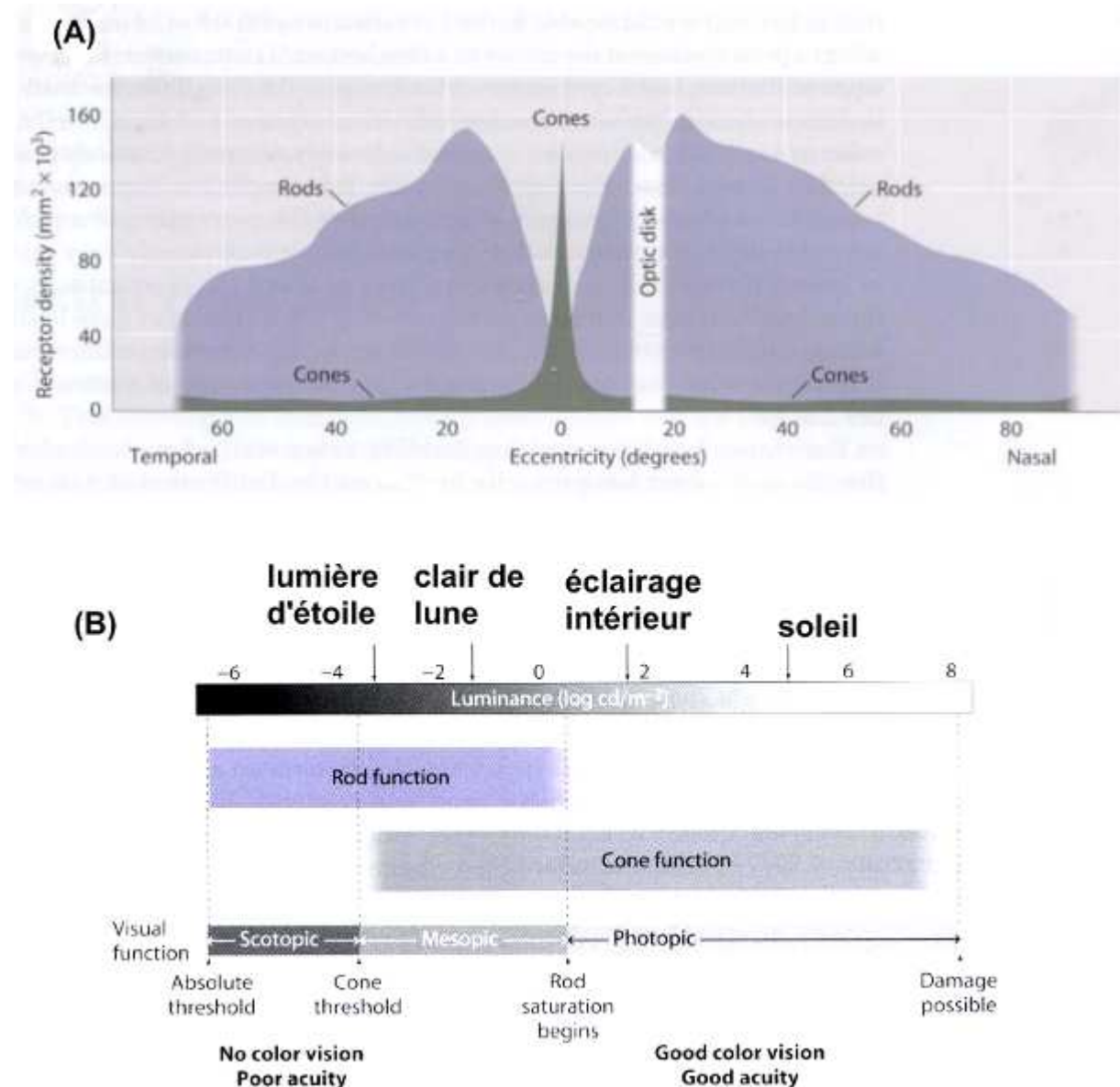


Figure 103 : (A) Répartition numérique et (B) gamme de sensibilité des photorécepteurs de type cônes et bâtonnets

Les cônes se répartissent en 3 types suivant leur sensibilité spectrale respective (Figure 104). Ces différents types sont communément appelés 1) bleu ou courte longueur d'onde, 2) vert ou moyenne longueur d'onde et 3) rouge ou longue longueur d'onde. La répartition de ces différents cônes est très variable suivant les individus. Cependant, les cônes bleus sont exclus de la zone très centrale de la macula. De plus, leur densité est très inférieure à celle des autres types de cônes. Cette différence relative est à lier aux aberrations chromatiques du système optique de l'œil. Le système permettant une meilleure focalisation des plus grandes longueurs d'onde ; la rétine n'aurait pas pu augmenter son pouvoir résolutif dans le bleu par une augmentation de la densité des photorécepteurs correspondants.

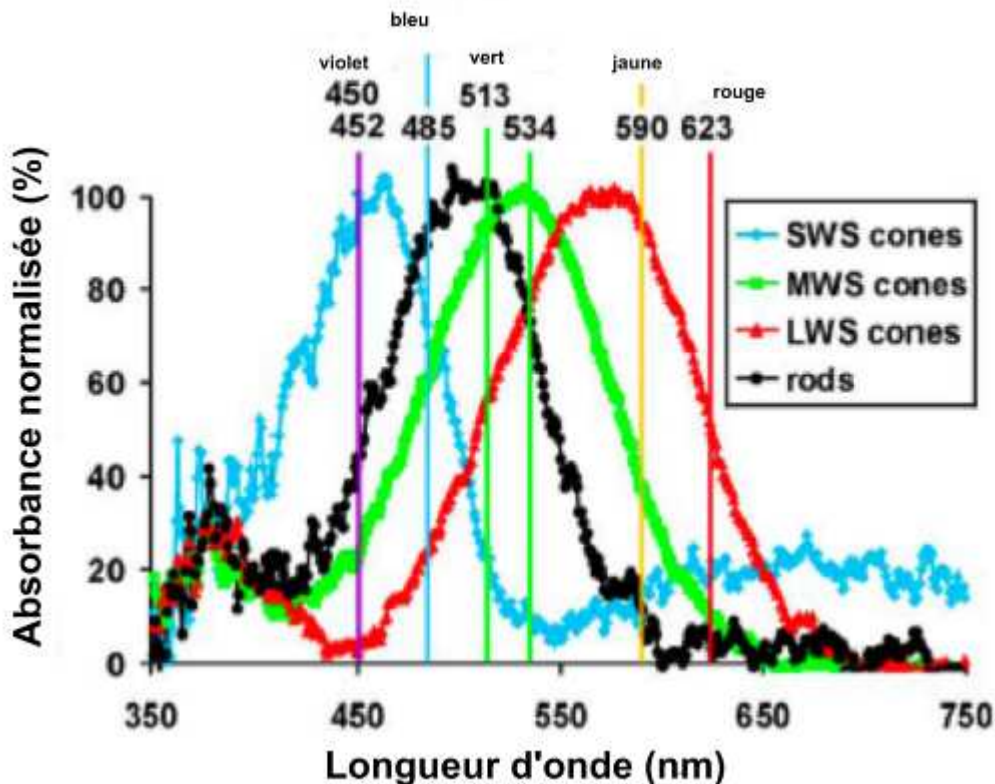


Figure 104 : Sensibilités spectrales des différents types de photorécepteurs

La phototransduction

Les photorécepteurs transforment les photons en une activité électrique au niveau de leur segment externe. Cette phototransduction intervient dans les photorécepteurs selon des mécanismes très semblables même si des différences peuvent être mises en évidence entre cônes et bâtonnets. L'une de ces différences tient par exemple dans la structure du segment externe qui est constitué d'empilement de petits sacs ou saccules dans les bâtonnets alors qu'il s'agit de microvillosités ou invaginations de la membrane cellulaire pour les cônes. Le pigment visuel est constitué d'une protéine, la rhodopsine pour les bâtonnets, les iodopsines pour les cônes et d'un chromophore ou molécule associée, le 11-cis-rétinal. L'absorption d'un photon par le pigment visuel va aboutir à la transformation du 11-cis-rétinal en trans-rétinal produisant un changement de conformation de la protéine. C'est la structure de la protéine qui va conférer au pigment visuel sa sensibilité spectrale spécifique. Le changement de conformation du pigment visuel induit une cascade de réactions enzymatiques très consommatrice en énergie qui assurent la transformation de l'énergie du photon en un signal électrique.

Les cellules de l'épithélium pigmentaire

La phototransduction aboutit à une transformation du 11-cis-rétinal en trans rétinal ce qui implique un renouvellement de ce chromophore. Ce renouvellement est l'une des principales tâches de l'épithélium pigmentaire rétinien. En effet, de nombreuses mutations sur des gènes des protéines impliquées dans le transport ou le renouvellement du pigment visuel sont responsables de pathologies visuelles puisque l'absence du 11-cis-rétinal résulte en une dégénérescence des photorécepteurs. Cet épithélium est constitué d'une monocouche de cellules hexagonales liées par des jonctions serrées (4 à 6 millions, 5 000 cellules/mm² dans la fovea, 2 000 cellules/mm² en périphérie). Ces cellules contiennent des pigments de mélanine (eumélanine et phéomélanine) au sommet apical de la cellule. Leur rôle est

d'absorber l'excès de photons n'ayant pas excité les photorécepteurs, leurs spectres d'absorption vont de 300 à 700 nm.

Les cellules de l'épithélium pigmentaire interviennent également dans le renouvellement du segment externe des photorécepteurs. En effet, celui-ci est en continuelle croissance à partir de sa base et son extrémité libre est phagocytée par les cellules de l'épithélium pigmentaire pour être progressivement dégradée par les lysosomes. Cette tâche de l'épithélium pigmentaire est aussi essentielle puisque les déficits de phagocytose peuvent également être responsables de la dégénérescence des photorécepteurs. Elle permet d'éliminer la partie la plus ancienne du segment externe qui a subi l'effet des rayonnements lumineux à un niveau où le taux d'oxygène est maximal (voir ci-dessous) et où par conséquent la cellule peut être soumise à d'intenses processus photodynamiques. Avec l'âge et avec l'accumulation de matériaux oxydés, la dégradation de ces phagosomes devient de plus en plus difficile, participant ainsi à la formation de dépôts voire des drusens contenant de la lipofuscine. Ces dépôts s'accumulent dans les cellules de l'épithélium pigmentaire rétinien ou sous cet épithélium.

La lipofuscine se trouve dans des vésicules contenant des lipides non digérés et des résidus protéiques formant progressivement avec l'âge des grains de mélando-lipofuscine. La lipofuscine est formée à partir d'un précurseur, l'A2PE, issu du cycle visuel par la conjugaison de l'all-trans-rétinal et de la phosphatidyléthanolamine. L'A2PE se dépose dans les cellules EPR secondairement à la phagocytose des segments externes de photorécepteurs et son hydrolyse conduit à la formation de la lipofuscine dont l'A2E est l'un des constituants majeurs. Les spectres d'absorption des différents constituants de la lipofuscine sont représentés sur la Figure 105.

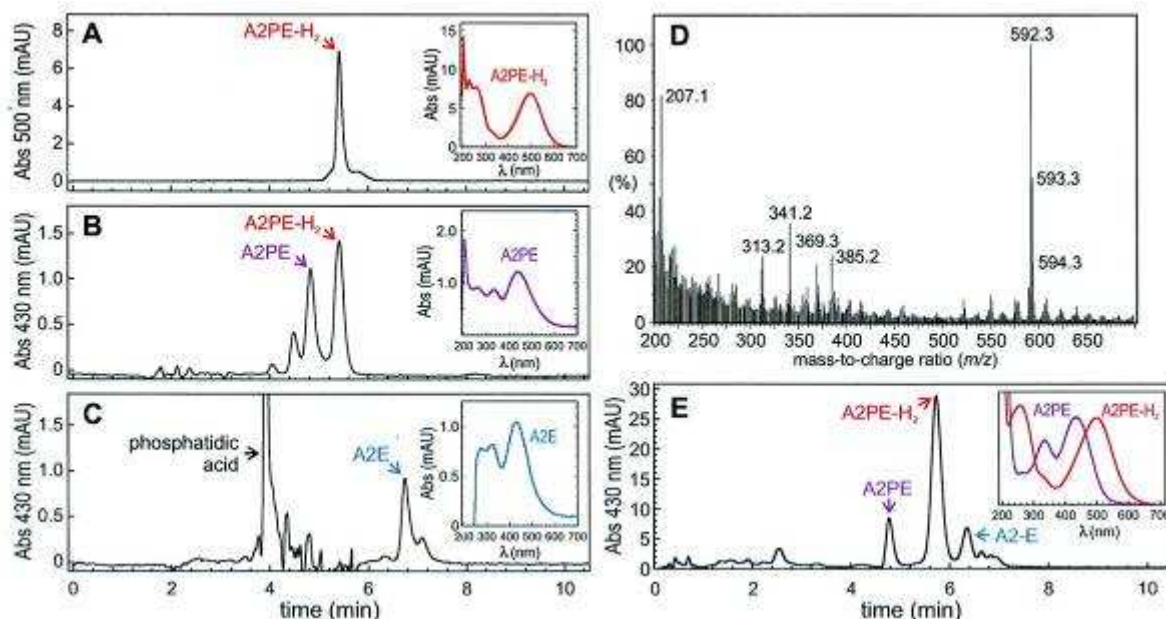


Figure 105 : Spectre des composés de la lipofuscine

Les modifications liées à l'âge dans la composition et l'absorption de la lipofuscine sont associées à une augmentation de l'effet photodynamique et donc de la phototoxicité aérobie. Ainsi, la cinétique d'oxydation induite par une irradiation des granules de lipofuscine par une lumière (gamme de longueurs d'onde : 338 – 542 nm) montre une augmentation de la vitesse d'oxydation en fonction de l'âge des patients. La création d'oxygène singulet par effet photodynamique à proximité de ces granules produit une oxydation des protéines et des lipides contenus dans les structures cellulaires adjacentes.

La transmission de l'information visuelle

Les photorécepteurs sont normalement dépolarisés par le courant d'obscurité produit par les canaux ioniques ouvert par le cGMP. La phototransduction aboutit à la fermeture de ces canaux et à l'hyperpolarisation négative des photorécepteurs. Dans les conditions d'obscurité, les photorécepteurs sont donc dépolarisés, laissant entrer à leur terminaison un flux continu de Ca^{2+} au travers de leurs canaux de type L ce qui engendre une libération continue du principal neuromédiateur du système nerveux central, le glutamate. Cette libération continue est très particulière, voire unique, ce qui explique la présence d'une spécialisation présynaptique dite en ruban. Le nombre de vésicules fusionnant avec la membrane y est 10 fois supérieur à celui normalement rencontré aux synapses classiques. Cette libération continue de glutamate engendre la nécessité de repomper le neuromédiateur grâce à des transporteurs dans les cellules gliales ou les neurones. Cette recapture du neuromédiateur se doit d'être extrêmement efficace à la réception d'un signal lumineux pour une transmission très rapide de l'information visuelle. De plus, la libération vésiculaire continue du neuromédiateur et donc la fusion des vésicules avec la membrane plasmique impose également une endocytose ou diminution progressive de la surface membranaire. Enfin, l'entrée massive de Ca^{2+} dans la terminaison implique un mécanisme d'extrusion du Ca^{2+} basé sur une ATPase calcique, un mécanisme extrêmement efficace mais inhabituel à une terminaison synaptique.

Le soutien métabolique

Les apports énergétiques aux photorécepteurs proviennent essentiellement de la choroïde qui se trouve sous les photorécepteurs. Le lit vasculaire de la choroïde y est fenêtré laissant ainsi librement diffuser l'oxygène et les différents composés métaboliques vers l'épithélium pigmentaire. Il s'agit autant du glucose que de la vitamine A, précurseur du 11-cis retinal. L'épithélium joue alors le rôle de barrière hématorétinienne. La mesure de la pression d'oxygène aux différents niveaux de la rétine permet de révéler l'extraordinaire consommation énergétique par les photorécepteurs à l'obscurité. La pression d'oxygène chute à l'obscurité d'une valeur proche de celle du sang au niveau de l'épithélium pigmentaire à une valeur proche de zéro dans la couche des photorécepteurs. L'exposition à la lumière et l'hyperpolarisation des photorécepteurs réduit très significativement la consommation d'oxygène dont la pression remonte à une valeur proche de celle mesurée dans les couches de la rétine interne quelles que soient les conditions d'éclairement. En effet, le renouvellement du pigment visuel, la cascade de phototransduction, la fusion des vésicules synaptiques avec la membrane et l'endocytose consécutive de la surface membranaire correspondante, l'extrusion du Ca^{2+} entré par les canaux de type L, et la recapture du neuromédiateur par des transporteurs Na^+ dépendants sont tous des événements très consommateurs d'énergie faisant de la rétine le tissu le plus consommateur d'énergie. L'illumination réduit voire supprime ces différents processus consommateurs d'énergie. La pression d'oxygène très élevée au niveau de l'épithélium pigmentaire et des segments externes des photorécepteurs les rend très susceptibles aux phénomènes oxydatifs comme les effets photodynamiques produits par des composants photosensibles comme les pigments visuels ou la lipofuscine.

E - Éléments supplémentaire concernant le réseau neuronal rétinien

La présentation ci-dessous décrit rapidement les différents membres du réseau neuronal rétinien.

Les cellules horizontales

Les cellules horizontales établissent des contacts synaptiques avec les cellules photoréceptrices, les cellules bipolaires et entre cellules horizontales. Ces connexions latérales sont impliquées dans l'augmentation des contrastes au bord des objets.

Les cellules bipolaires

Les cellules bipolaires assurent la transmission verticale de l'information. Ces cellules se divisent en deux types suivant leur réponse physiologique à la lumière. Les cellules dites OFF auront une activité proche de cellule des photorécepteurs avec un statut dépolarisé à l'obscurité et une hyperpolarisation à la lumière. Les cellules bipolaires dites ON répondront de manière opposée par un statut hyperpolarisé à l'obscurité et une dépolarisation par la lumière. Ces deux types de cellules ON et OFF pourront ainsi gérer plus précisément la dynamique des réponses respectivement à l'éclairement et à l'extinction.

Les cellules amacrines

Il existe une variété importante de cellules amacrines suivant la nature de leur neuromédiateur, GABA, glycine, acétylcholine, dopamine voire de leur neuropeptide, vassopressine, neuropeptide Y. Les cellules dopaminergiques sont plus particulièrement impliquées dans l'adaptation de la rétine à la lumière.

Les cellules ganglionnaires

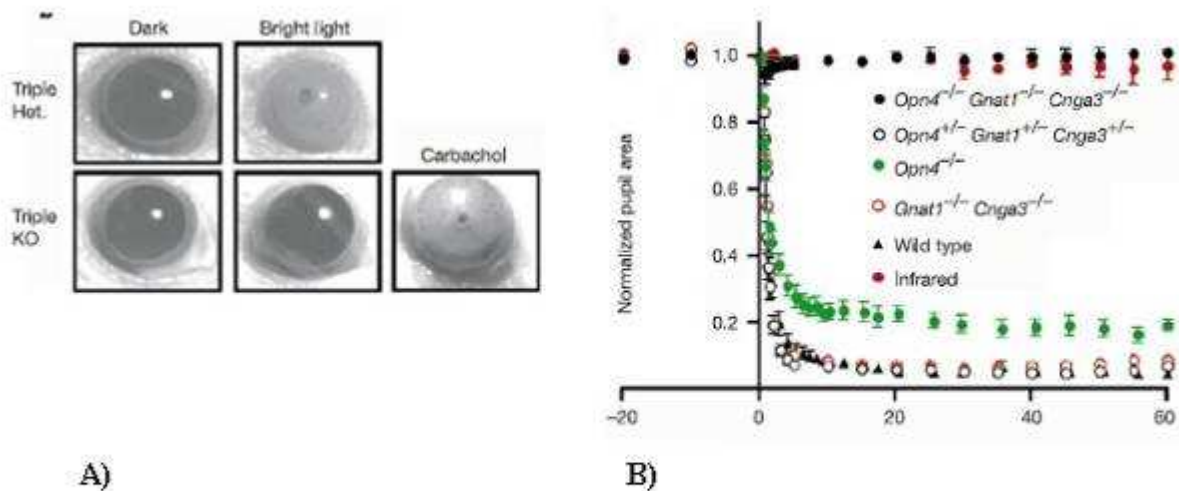
Il existe de nombreux types de cellules ganglionnaires. Les principales cellules ganglionnaires (80 %), dites « *midget* » ou petites, assurent l'acuité visuelle centrale avec une résolution temporelle faible mais une très haute résolution spatiale même à de faibles niveaux de contrastes. Ces cellules procurent une information sur la forme et la couleur (rouge/vert) des objets. Elles se projettent sur les couches parvocellulaires du noyau genouillé latéral (cellules P). Le système koniocellulaire correspond à des cellules ganglionnaires bistratifiées (cellules K) qui véhiculent une information bleue/jaune. Un autre groupe majeur (10 %) est constitué par les cellules ganglionnaires de type parasol qui assurent la perception des mouvements latéraux, verticaux et même frontaux avec une résolution temporelle très élevée mais une résolution spatiale faible et nécessitant de forts contrastes. Les cellules ganglionnaires (1 %) qui projettent sur le noyau suprachiasmatique sont impliquées dans la régulation des rythmes circadiens et le contrôle de l'ouverture pupillaire (voir ci-dessous). Leur sensibilité à la lumière par un pigment particulier, la mélanopsine, a récemment été décrite, faisant de ce type de cellule ganglionnaire, un véritable photorécepteur additionnel.

F - Éléments supplémentaires sur les rythmes circadiens et la contraction pupillaire

Ce système de troisième système photoréception est constitué de cellules ganglionnaires rétinienne sensibles à la lumière. Ces cellules expriment un pigment visuel appelé mélanopsine [Provencio *et al.*, 2000; Hattar *et al.*, 2002; Provencio *et al.*, 2002]. La démonstration de l'existence de ces cellules neuronales photosensibles a été rendue possible grâce à leur isolation et à leur enregistrement électrophysiologique [Berson *et al.*, 2002]. Ces cellules ont la particularité d'être reliées au noyau suprachiasmatique qui contrôle les rythmes circadiens. Il a donc été possible de les marquer de manière rétrograde pour que leurs corps cellulaires contiennent une substance fluorescente. Ces cellules peuvent donc être identifiées par ce marqueur fluorescent. Ensuite, que la cellule soit pharmacologiquement isolée de la rétine ou isolée par dissociation enzymatique et mécanique, elle répond à une stimulation lumineuse [Berson *et al.*, 2002]. Pour ces cellules isolées de rat, le spectre lumineux de l'amplitude des réponses montre un maximum vers 480 nm. Cependant, il faut noter que ces cellules ganglionnaires rétinienne reçoivent

également des informations visuelles provenant des photorécepteurs classiques [Jusuf *et al.*, 2007 ; Ostergaard *et al.*, 2007].

L'importance de ces cellules à mélanopsine et de ce nouveau pigment visuel dans le contrôle des rythmes circadiens avait été suggérée par le travail sur des animaux ayant perdu leurs photorécepteurs de types bâtonnet et cône. En effet, ces animaux comme la souris *rd* présentaient encore un rythme circadien qui pouvait être déplacé par une stimulation lumineuse [Foster *et al.*, 1991]. Cependant, la véritable démonstration de l'importance de ce pigment visuel a été apportée par la production de souris invalidées pour ce gène. Bien que la présence de mélanopsine ne soit pas indispensable pour la genèse de rythmes circadiens, son absence diminue les réponses de 40 % [Panda *et al.*, 2002 ; Ruby *et al.*, 2002]. De plus, si les souris aveugles sont invalidées pour le gène de la mélanopsine, elles perdent complètement leurs rythmes circadiens [Hattar *et al.*, 2003 ; Panda *et al.*, 2003]. Ces résultats sont en accord avec le fait que les photorécepteurs de type cône participent également au contrôle des rythmes circadiens chez l'animal normal [Dkhissi-Benyahya *et al.*, 2007]. La mélanopsine intervient non seulement dans la régulation des rythmes circadiens mais aussi dans le contrôle du réflexe pupillaire. Cette implication dans la contraction pupillaire est mise en évidence par l'impossibilité d'obtenir une contraction complète de la pupille pour les souris invalidées pour le gène de la mélanopsine [Hattar *et al.*, 2003]. Elle est démontrée par l'absence de contraction pupillaire pour des souris aveugles et invalidées pour le gène de la mélanopsine alors que les souris aveugles maintiennent une contraction pupillaire normale à la lumière [Hattar *et al.*, 2003]. De même, les souris invalidées pour le gène de la mélanopsine présentent une dilatation pupillaire après blanchiment des photorécepteurs à cône et à bâtonnet alors que les souris normales peuvent encore contracter leur pupille en réponse à une nouvelle stimulation lumineuse [Zhu *et al.*, 2007]. Pour ces effets de la lumière sur les rythmes circadiens et sur la contraction pupillaire, le spectre d'activité montre un pic vers 480 nm (Figure 106) [Hattar *et al.*, 2003] identique à celui de la réponse à la lumière des cellules ganglionnaires rétiniennes isolées exprimant la mélanopsine [Berson *et al.*, 2002].



Source : [Hattar et al., 2003]

A) Image des pupilles chez les souris normales (triple Het.) et les souris aveugles et sans mélanopsine (triple KO). Notez que la contraction pupillaire ne peut pas être induite par la lumière chez les triple KO mais pharmacologiquement par le carbachol.

B) Diamètres pupillaires chez les souris soumises à la lumière : -Contraction chez les souris normales (*wild type*) et les souris aveugle mais exprimant la mélanopsine ($Gnat1^{-/-}$ $Cnga3^{-/-}$), - contraction incomplète chez les souris invalidées pour la mélanopsine ($Opn4^{-/-}$), - absence de contraction pour les souris triple KO ($Gnat1^{-/-}$ $Cnga3^{-/-}$ $Opn4^{-/-}$).

Figure 106 : Contrôle de la pupille chez la souris

Annexes du chapitre 4 : « Synthèse de la normalisation européenne relative aux systèmes d'éclairage à LED »

A - Compatibilité électromagnétique (CEM)

Les dispositifs d'éclairage sont sources de perturbations électromagnétiques qui peuvent exercer une influence sur les réseaux de distribution et d'autres équipements électriques. Ceux-ci peuvent réciproquement perturber leur fonctionnement. La compatibilité électromagnétique fait l'objet de plusieurs normes et d'une réglementation européenne.

Normes de compatibilité électromagnétique (CEM)

Les prescriptions de CEM valables pour les produits d'éclairage, qu'ils soient à LED ou non, sont données dans des normes européennes établies par le CENELEC.

La norme NF EN 61000-3-2 incite les fabricants à limiter l'émission de courants harmoniques sur le secteur. L'amendement A14 de cette norme range dans une même classe (classe C) les équipements d'éclairage. L'amendement A2 de cette norme, paru en novembre 2009, concerne particulièrement les systèmes d'éclairage intérieur utilisant des LED. Cet amendement définit une exigence générale de limitation du taux de distorsion harmonique (THD) du courant d'alimentation. Le texte donne une méthode d'essai simplifiée consistant à examiner que le THD reste inférieur à 15 %.

Pour les systèmes d'éclairage dont la puissance active d'entrée est inférieure à 25 W, il n'existait pas d'exigences normatives avant novembre 2009. L'amendement A2 de la norme NF EN 61000-3-2 a maintenant rendu obligatoire des critères précis sur la déformation du courant d'alimentation alternatif (forme générale du signal périodique). Il convient à présent de vérifier que l'amplitude du courant harmonique de rang 3, exprimée en pourcentage du courant fondamental, ne dépasse pas 86 % et que l'amplitude du courant harmonique de rang 5 ne dépasse 61 %. Par ailleurs, la forme d'onde du courant d'entrée doit être telle qu'elle atteigne le seuil de 5 % en courant à 60° ou avant, qu'elle ait sa valeur de crête à 65° ou avant et qu'elle ne retombe pas en dessous du seuil de 5 % en courant avant 90°, par référence à n'importe quel passage par zéro du fondamental de la tension d'alimentation. Le seuil en courant correspond à 5 % de la valeur absolue la plus élevée de la valeur de crête qui se produit dans la fenêtre de mesure, et les mesures de déphasages sont faites sur la période qui inclut cette valeur absolue de la valeur de crête.

Les lampes à LED n'étaient pas soumises à ces prescriptions avant novembre 2009, ce qui a pu poser un certain nombre de problèmes dans les réseaux et les systèmes de distributions électriques, monophasés ou triphasés : pas de maîtrise de la puissance réactive, défaillances et surchauffes d'équipements de puissance provoqués par les courants harmoniques, etc.

Les autres normes CEM intéressant l'éclairage et l'éclairage à LED sont la NF EN 61000-3-3 [NF EN 61000-3-3, 2005], la norme NF EN 61547 [NF EN 61547, 1996] portant sur les prescriptions d'immunité CEM pour les équipements d'éclairage général (actuellement en

révision) et la norme NF EN 55015 [NF EN 55015, 2007] portant sur les perturbations radioélectriques produites par les appareils électriques d'éclairage.

Directives européennes CEM et « basse tension »

La directive européenne CEM en vigueur (2004/108/CE) a été transposée en décret français en 2006 (décret n°2006-1278). Cette directive a pour objectif de limiter les risques de perturbations électromagnétiques des équipements électriques et électroniques, tout en garantissant leur libre circulation dans l'Union européenne. L'évaluation de la conformité aux normes CEM s'appliquant aux équipements considérés est laissée à la responsabilité du fabricant. Le fabricant peut néanmoins s'adresser à un organisme officiellement notifié qui délivrera un avis qualifié. Dans le domaine de l'éclairage à LED, les normes utilisées comprennent celles qui ont été listées dans le paragraphe précédent.

La directive basse tension (BT) (2006/95/CE) couvre les risques résultants de l'utilisation de matériel électrique. Les appareils doivent permettre un raccordement fiable, disposer d'une isolation et d'une protection adaptée, ne pas produire des températures, arcs ou rayonnements dangereux. La directive BT devant également garantir la prise en compte de **tous les risques non électriques**, les fabricants et les distributeurs de produits d'éclairage à LED doivent examiner les problématiques d'exposition des personnes aux champs électromagnétiques et aux rayonnements optiques (**risques photobiologiques**).

Comme dans le cas de la directive CEM, l'attestation de conformité à la directive BT est une déclaration de conformité du fabricant ou du distributeur, qui peut faire appel à un laboratoire tiers. Pour les dispositifs d'éclairage à LED, les normes entrant dans le cadre de la directive sont celles relatives aux prescriptions de sécurité des produits, citées précédemment. Le suivi de production est obligatoire dans le cadre de la directive BT.

Il est important de noter que la directive BT ne s'applique pas aux produits dont la tension d'alimentation est inférieure à 50 V continu ou 75 V alternatif, ce qui exclut les lampes et luminaires TBT (très basse tension), qui représentent un marché très important pour l'éclairage à LED.

B - Réglementation concernant la classe énergétique des lampes

Étiquetage

La directive européenne 98/11/CE impose le marquage de la classe énergétique des lampes à usage domestique (classe A à G). Le marquage comprend également le flux lumineux de la lampe, la puissance électrique et la durée de vie nominale. La détermination de la classe énergétique est effectuée conformément à la norme NF EN 50285 [NF EN 50285, 2000].

Il est important de noter que certaines lampes échappent à la classification énergétique : les lampes dont la puissance est inférieure à 4 W et les lampes à réflecteur (lampes MR16 fonctionnant à TBT par exemple). Par conséquent, la plupart des lampes à LED ne rentrent pas dans cette classification, alors que ces formats de lampes se développent énormément à l'heure actuelle. La commission européenne étudie l'extension de la classification énergétique pour parer à ce problème.

Impact de la directive européenne EuP sur les produits d'éclairage à LED

La directive 2005/32/EC, dite EuP (*Ecodesign requirements for Energy Using Products*), est une directive cadre qui fixe les grands principes d'éco-conception des produits consommateurs d'énergie. Un règlement a été approuvé au printemps 2009 pour définir une interdiction progressive des lampes les plus énergivores, en fonction de leur classe énergétique et de leur technologie. Ainsi, depuis le 1^{er} septembre 2009, les lampes à incandescence non claires (ampoules dépolies) sont bannies. L'interdiction portera ensuite progressivement sur les autres types de lampes non-directionnelles de classe D et supérieure à D.

Les lampes directionnelles, les lampes à réflecteur et les lampes de puissance inférieure à 4 W échappant à la classification énergétique, le règlement EuP actuel ne s'applique à la plupart des lampes à LED. La commission européenne travaille actuellement sur un nouveau règlement EuP couvrant tous les types de lampes à LED.

C - Normes relatives aux performances lumineuses de l'installation d'éclairage

Quelles que soient les technologies d'éclairage considérées, les installations d'éclairage doivent remplir des critères fondamentaux pour assurer le bien-être et la sécurité des usagers, tout en étant respectueuses des performances énergétiques et des nuisances lumineuses. Ces critères sont décrits dans les normes européennes et françaises d'éclairagisme qui constituent les meilleurs référentiels techniques pour garantir la qualité de l'éclairage selon l'usage considéré. Les normes d'éclairagisme spécifient notamment des critères d'éclairement moyen à maintenir, de confort visuel et de qualité de la lumière.

Dans le domaine de l'éclairage intérieur des lieux de travail, le code du travail français donne des prescriptions obligatoires mais extrêmement minimalistes. La norme européenne d'éclairage intérieur des lieux de travail NF EN 12464-1 [NF EN 12464-1, 2003] est beaucoup plus précise. Elle détaille des exigences relatives à chaque type de local (bureau, salle de restauration, chambre d'hôpital, etc.). Les spécifications concernent les paramètres suivants :

- éclairement moyen à maintenir sur la tâche de travail
- indice d'éblouissement unifié (UGR) limite
- uniformité de l'éclairement
- indice de rendu des couleurs minimal

Il est primordial pour les développeurs de solutions d'éclairage à LED d'examiner l'ensemble de ces critères que les systèmes puissent un jour être installés dans le secteur professionnel. En particulier, il existe à l'heure actuelle très peu de solutions d'éclairage général à LED susceptible de fournir un éclairage conforme aux prescriptions de la norme NF EN 12464-1. Les difficultés sont essentiellement dues à la quantité de lumière à fournir mais aussi à la limitation de l'éblouissement d'inconfort. La luminance des LED étant intrinsèquement élevée, il est nécessaire de concevoir des systèmes optiques qui empêchent la vision directe de la source à certains angles, sans trop induire de pertes optiques lors de la formation des faisceaux.

Le phénomène d'éblouissement ou d'inconfort est quantifié par l'indice d'éblouissement unifié UGR, qui fait actuellement l'objet de travaux à la CIE pour revoir son application à des sources de faible dimension angulaire comme les LED.

La norme NF EN 12464-1 tient compte des spécificités liées à l'âge et à la criticité de certaines tâches visuelles à accomplir. Il existe également une norme française d'ergonomie visuelle, la norme NF X 35-103 [NF X35-103, 1990], qui décrit précisément les exigences de répartition spatiale de la lumière dans le champ de vision de la personne. Cette norme fait l'objet d'une révision importante qui va spécifier ces exigences en termes de luminance, ce qui est le plus pertinent pour la vision et posera certainement le plus de difficultés pour l'éclairage à LED.

Les certifications de qualité environnementale des bâtiments, comme la certification HQE en France, donnent également des critères très précis sur l'installation d'éclairage électrique, en termes de température de couleur, d'indice de rendu de couleur et d'éclairement à maintenir.

D - Comparaison des normes NF EN 62471 (normes en vigueur pour les LED) et NF EN 60825-1 (norme laser anciennement utilisée pour les LED)

Rappel

Les normes se préoccupant de sécurité optique sont les normes NF EN 60825-1 « Sécurité des appareils à laser – Partie 1 : Classification des matériels, prescription et guide d'utilisateur » et NF EN 62471 « Sécurité photobiologique des lampes et des appareils utilisant des lampes ».

Elles définissent respectivement de la catégorie de risque du plus faible au plus élevé, des classes : 1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B et 4 et des groupes de risque : Sans, 1 (faible), 2 (modéré) et 3 (élevé).

Des recommandations pour les marquages de sécurité, l'utilisation et les dispositifs de sécurité sont définis en fonction des classes.

Jusqu'à la version de norme NF EN 60825-1/A2 de janvier 2006, les LED étaient traitées de la même manière que les sources laser. Depuis la publication de la norme NF EN 60825-1 de janvier 2008, Il est recommandé d'utiliser pour les dispositifs à LED, la norme CEI 62471 équivalente à la norme NF EN 62471 de décembre 2008, exception faite des limites d'exposition qui sont définies dans la directive 2006/25/CE sur les rayonnements optiques artificiels. La norme NF EN 60825-1 de décembre 2008 remplacera définitivement la version précédente à partir de septembre 2010.

Nous avons réalisé la caractérisation d'une LED blanche selon la norme NF EN 60825-1/A2 de janvier 2006 et selon la norme NF EN 62471 de décembre 2008.

Entre les 2 normes, les conditions de mesures sont différentes, de même que l'expression des Limites d'Exposition. Les conditions de mesures indiquées ci-après sont spécifiques au domaine 400-700nm correspondant au spectre d'émission du dispositif à LED « blanche » étudié.

Pour la norme NF EN 60825-1, Il faut caractériser le flux accessible au travers d'une ouverture (7mm à 50mm) et acceptant le rayonnement de la source dans un certain angle d'acceptance (diaphragme de champ) (1,5mrad à 100mrad). Les distances de mesures sont comprises entre 14mm et 2000mm.

Pour la détermination de la classe laser, le flux accessible est alors comparé aux valeurs limites des classes (1, 2, 3R, 3B et 4). Elles sont déterminées à partir de la longueur d'onde, de la durée d'exposition et de la dimension apparente de la source.

Dans le cas des sources à spectre large, il faut examiner longueur d'onde par longueur d'onde que l'on ne dépasse par la limite de la classe applicable. Pour simplifier, le rapport du flux accessible sur la limite applicable est calculé longueur d'onde par longueur d'onde puis intégré sur le domaine spectral où les effets des longueurs d'onde sont considérés comme additifs selon la norme. Un rapport supérieur à 1 indique que la limite de la classe est dépassée.

Pour la norme NF EN 62471, il est possible de caractériser le rayonnement accessible dans un plan où l'éclairement est égal à 500 lux. Toutefois, cette distance ne sera pas inférieure à

200 mm de la source lumineuse. Dans ce plan, l'éclairement énergétique spectrique ($\text{W/m}^2/\text{nm}$) ou la luminance énergétique spectrique ($\text{W/m}^2/\text{sr}/\text{nm}$) sont mesurés sur tout le domaine spectral d'émission de la source dans des conditions spécifiques de mesures.

Pour la mesure d'éclairement, l'angle d'acceptance est inférieur à 11mrad. Pour la luminance spectrique, on doit mesurer une luminance « moyenne » dans un angle d'acceptance de 1,7mrad à 100mrad.

Dans le cas où, la source a une dimension apparente plus petite que l'angle d'acceptance applicable, la luminance spectrique moyenne mesurée sera inférieure à la luminance spectrique réelle de la source (cf. CEI TR 62471-2 août 2009).

En fonction des risques définis par bande spectral, des fonctions de pondérations sont appliquées avant intégration sur le domaine spectral considéré. Ces valeurs d'éclairement et de luminance intégrés sont comparées aux limites d'exposition des différents groupes de risque.

Résultats de la caractérisation :

Description de la source lumineuse caractérisée.

Il s'agit d'un éclairage portatif de type lampe de poche. La LED est située derrière une lentille de mise en forme du faisceau. Le dispositif est alimenté par 4 piles 1,5V (AA).



Figure 107 : Le composant à LED. Diamètre support 24 mm

La luminance « lumineuse » du dispositif est mesurée avec un luminancemètre étalonné sur un champ de 1,7mrad. Le niveau de luminance est $15 \cdot 10^6 \text{ cd / m}^2$.

Le graphique ci-après montre la répartition spectrale relative du rayonnement.

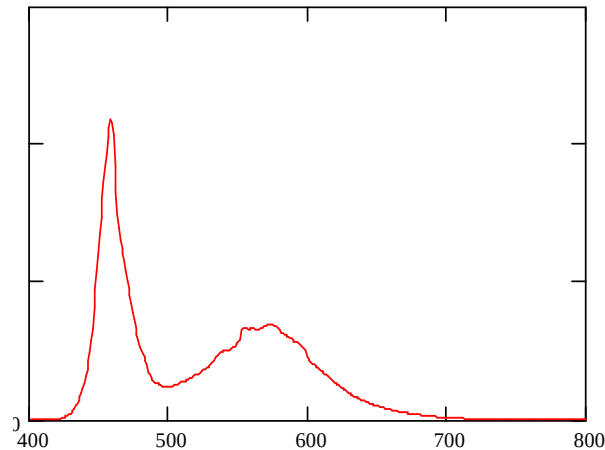


Figure 108 : Répartition spectrale relative du rayonnement

Résultats de la caractérisation selon la norme NF EN 60825-1/A2 janvier 2006

La base de temps pour le calcul des limites est de 100s. Elles sont calculées par bandes spectrales. Pour le domaine spectral 400-600nm, il existe 2 types de limite : Thermique et Photochimique.

Les configurations géométriques de mesures sont précisées pour chaque condition 1, 2 et 3 définies par la norme. Pour la détermination de la dimension apparente de la source, nous considérons le diamètre d'ouverture de la lentille de mise en forme du faisceau soit 25 mm.

Tableau 28 : Tableau récapitulatif des mesures

Base de temps [s]	100	100	100	100	100	100
Longueur d'onde [nm]	400-600	400-700	700-800	400-600	400-700	700-800
Conditions de Mesures Thermique	Condition 1			Condition 2 et 3		
Distance [mm]	NA	2000	2000	NA	100	100
Diamètre ouverture [mm]	NA	50	50	NA	7	7
Niveau de rayonnement	NA	10 mW	50 μ W	NA	1,3 mW	6,0 μ W
Rapport Niv. Ray./Limite Thermique Classe 1	NA	4,0	0,02	NA	0,09	0,001
Conditions de Mesures Photochimique	Condition 1			Condition 2 et 3		
Distance [mm]	2000	NA	NA	100	NA	NA
Diamètre ouverture [mm]	50	NA	NA	7	NA	NA
Niveau de rayonnement	900 mJ	NA	NA	5,0 mJ	NA	NA
Rapport Niv. Ray./Limite Photochimique Classe 1	90	NA	NA	0,43	NA	NA

La limite de la classe 1 (valeurs en « gras ») est dépassée pour la condition géométrique n°1. Elle ne l'est pas pour les conditions n°2 et 3 : Le dispositif à LED est de classe 1M selon la norme NF EN 60825-1/A2 de janvier 2006.

Pour ce type de dispositif, la norme recommande la mise en place d'un marquage spécifique sur l'appareil, ou à défaut dans la notice d'utilisation. Il n'y a pas de dispositif spécifique de sécurité à prévoir.

Pour information, la définition de la classe 1M : Tout appareil à LED dans la gamme des longueurs d'onde de 302,5 nm à 4 000 nm, ne permettant pas l'accès humain à un rayonnement laser excédant les limites d'émission accessible de la classe 1, pour des longueurs d'onde et des durées d'émission applicables, où le niveau du rayonnement est mesuré, mais évalué toutefois avec de plus petites ouvertures de mesure ou à une plus grande distance de la source apparente que celles utilisées pour des appareils à LED de classe 1. La sortie d'un appareil de la classe 1M est donc potentiellement dangereuse lorsqu'elle est observée en utilisant un instrument optique

Résultats de la caractérisation selon la norme NF EN 62471 de décembre 2008.

Les mesures de rayonnement sont réalisées dans le plan où l'éclairement est 500 lux. Pour le dispositif étudié, cette distance est 2,95 m mesurée à partir de l'ouverture de la source.

A cette distance, la dimension apparente de la source est : 8,5 mrad. Cette valeur est inférieure à 11 mrad, alors les limites d'exposition s'expriment en éclairement (W/m^2)

Le tableau ci-après donne pour le risque de lumière bleu, la valeur accessible de l'éclairement pondéré par la fonction de pondération du risque à la lumière bleue, et la limite d'exposition avec sa base de temps applicable pour les différents groupes de risque.

Tableau 29 : Les groupes de risques

Groupe	Éclairement pondéré	Limite d'Exposition	Base de temps
Sans risque	0,86 W/m^2	0,01 W/m^2	10000 s
1 (faible)		1 W/m^2	100 s
2 (modéré)		400 W/m^2	0,25 s

La limite d'exposition du groupe « sans risque » est dépassée. Elle ne l'est pas pour le groupe de risque « faible ».

Le dispositif au sens de la norme NF EN 62471 de décembre 2008 est classé dans le groupe de risque faible.

Le document CEI TR 62471-2 août 2009, ne recommande pas de marquage spécifique pour le groupe de risque faible, lorsque le risque lié à la lumière bleue est le seul présent..

Pour information, un exemple de détermination du groupe de risque est donné dans le document CEI TR 62471-2 sur un composant à LED « blanche ». Il conclut à un groupe de risque faible. Il est donné, pour illustrer la différence entre la luminance réelle de la source et celle utilisée pour la détermination du groupe de risque qui est une luminance moyennée sur un angle d'acceptance variable en fonction de la durée d'exposition.

Conclusion

Les deux référentiels normatifs concluent tous les deux sur un risque potentiel pour une vision en direct de cette source de lumière.

Pour la norme de sécurité laser, le dispositif étudié est de classe 1M, soit potentiellement dangereux si observé en utilisant un instrument d'optique.

Pour la norme de sécurité photobiologique NF EN 62471, le dispositif est dans un groupe de risque 1 dit « faible ».

Les bases de temps d'exposition utilisées sont de 100s pour les deux référentiels. Cependant, en cas de visualisation directe par un observateur normal compte tenu des niveaux de luminance ($15 \cdot 10^6$ cd / m² pour le dispositif étudié), le réflexe palpébrale est activé, réduisant la durée d'exposition à 0,25s (valeur normalisée) et permettant une protection de l'observateur.

Qu'en est-il des effets cumulés dans le cas où les personnes seraient soumises en continu à ce type d'éclairage, avec des visualisations accidentelles répétées ?

Aujourd'hui, sur les jouets de nombreuses LED colorées ou « blanche » sont présentes. Qu'en est-il du comportement d'un enfant en présence de ce type de source « froide ».

Les conditions de mesures bien que simples d'après les descriptions données par les normes, nécessitent de nombreuses précautions liées aux grandeurs complexes à mesurer. Le document CEI TR 62471-2 apporte des précisions. Cependant, l'application n'est pas toujours évidente. Pour mémoire dans le cas de la norme laser, un avis aux opérateurs avait été émis pour rappeler les conditions de calculs des limites de cette norme (« Avis aux opérateurs relatifs à la classification des lasers et sources assimilées » 10/01/2007 et 11/03/2008).

Annexe du chapitre 5 : Effets sanitaires des systèmes d'éclairage à LED

Évaluation du risque photobiologique sur la rétine lié à la lumière bleue émise par des LED bleues et blanches.

Principe de la méthode d'évaluation utilisée

Dans cette partie, 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.

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.

Détermination du champ de vision effectif en fonction des durées d'exposition

La Figure 109 présente les principaux paramètres décrivant les conditions d'observation d'une LED.

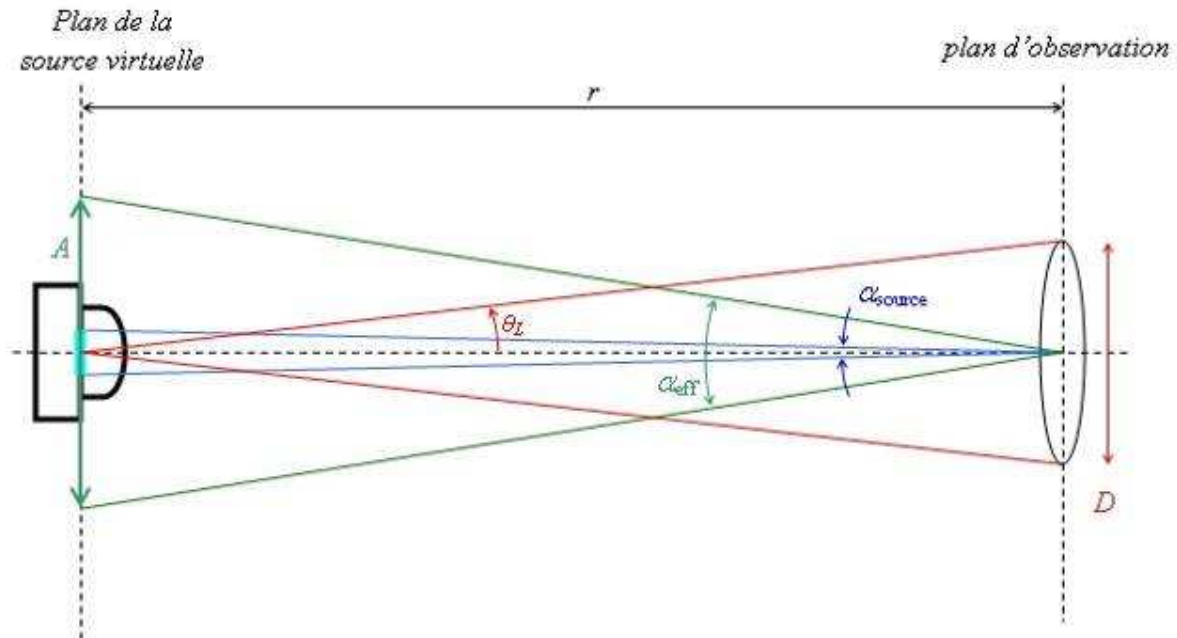


Figure 109 : Conditions d'observation pour l'évaluation de la luminance énergétique selon la norme NF EN 62471:2008

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 supérieur de $\alpha_{\text{max}} = 0,1$ rd, correspondant aux temps d'exposition supérieurs à 10 000 s.

Méthodologie d'évaluation de risque

La Figure 110 présente les différentes étapes de l'évaluation du risque photobiologique lié à la lumière bleue émise par des LED.

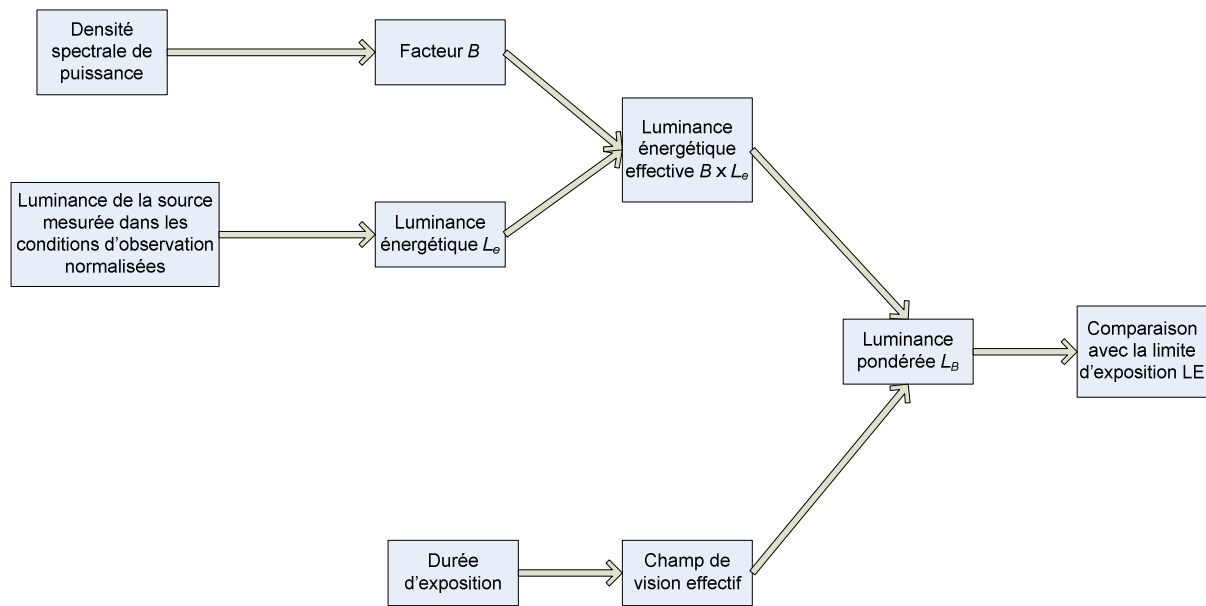


Figure 110 : Démarche schématique de l'évaluation de risque lié à la lumière bleue effectuée dans cette partie en respectant la norme NF EN 62471

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
- Blanc chaud : dix références correspondant à des températures de couleurs proximales comprises entre 2600 K et 3400 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 ProMetric. À 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.

La puce des LED considérées a une surface d'environ 1 mm², mais en raison du grossissement du dôme externe, la taille de source apparente est de 1,4 mm x 1,4 mm (voir la Figure 111).

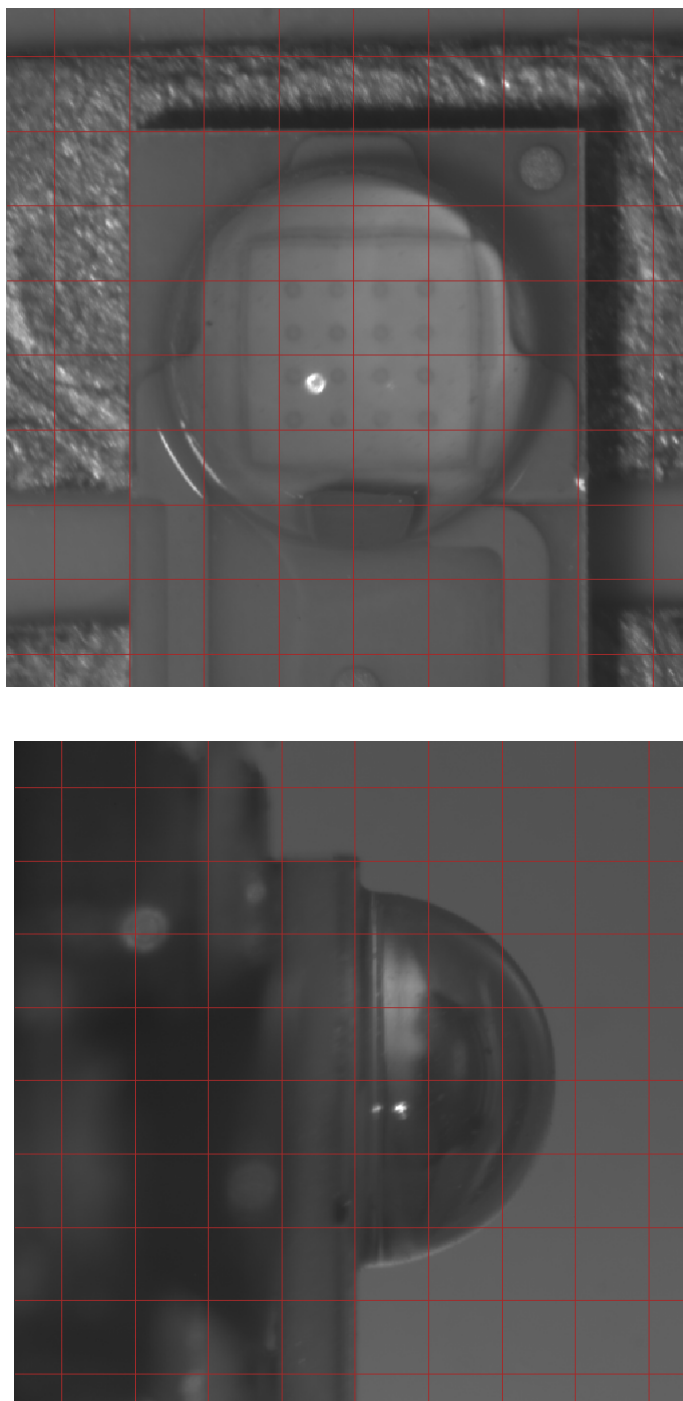


Figure 111 : Vues de face et de côté d'une LED blanc froid. L'échelle des photographies est donnée par la grille rouge dont chaque division mesure 0,5 mm de côté

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.

Spectres lumineux des LED

Les densités spectrales de flux des LED étudiées ont été fournies par le fabricant avec un pas de 1 nm. Elles sont représentées sur les Figures 41, 42, 43 et 44 du chapitre 5. 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.

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 30 et représentés graphiquement sur la Figure 112. 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 30 : 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

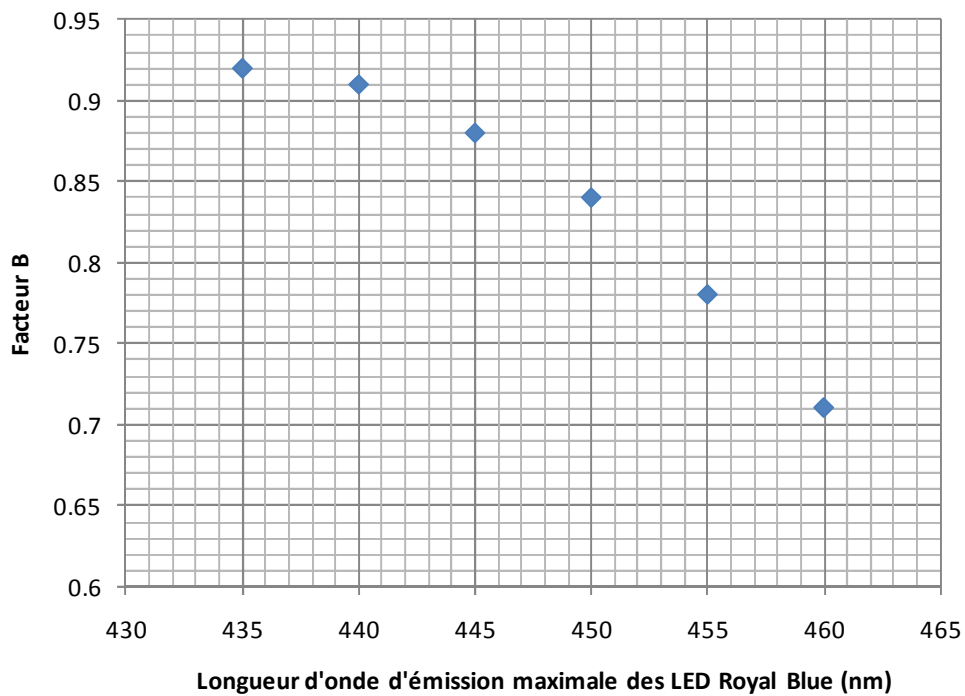


Figure 112 : Graphe montrant les valeurs du facteur B en fonction de la longueur d'onde d'émission maximale des LED bleu roi

Le Tableau 31 présente les résultats obtenus sur l'ensemble des LED blanches, pour chaque température de couleur. La Figure 113 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 31 : 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</i>	<i>Facteur B</i>
------------------	---	------------------

	(K)	
Blanc froid	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
	8411	0,330
Blanc neutre	3793	0,121
	3893	0,159
	4439	0,187
	3728	0,158
	3598	0,120
	3729	0,152
	4054	0,189
Blanc chaud	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

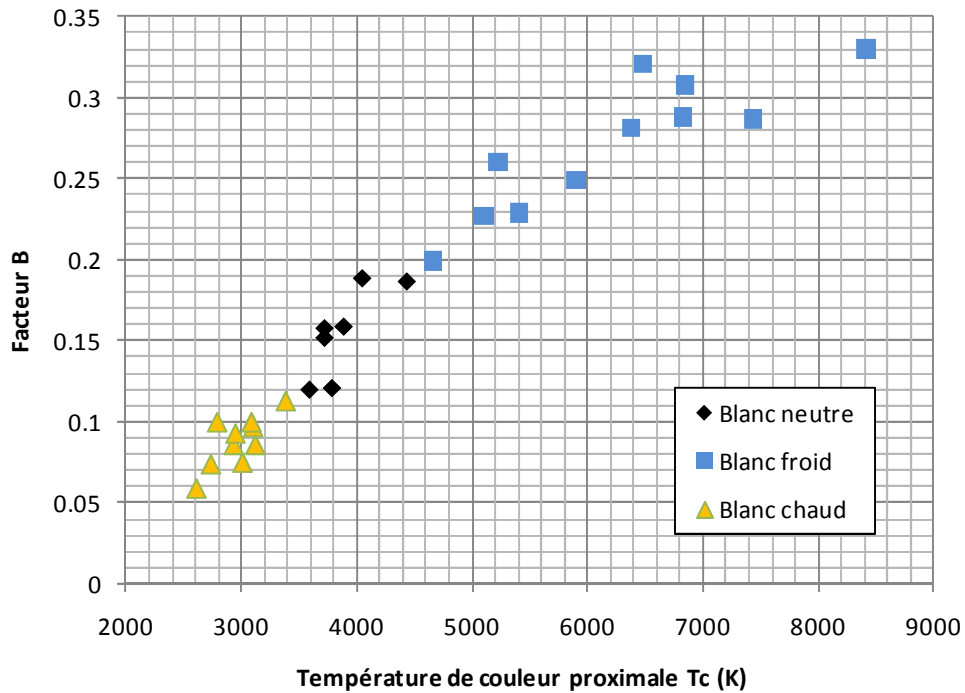


Figure 113 : Graphe montrant les valeurs du facteur B en fonction de la température de couleur proximale des LED blanches

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.

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 effective du chip (1,4 mm x 1,4 mm) : $3,6 \cdot 10^6$ cd / m².

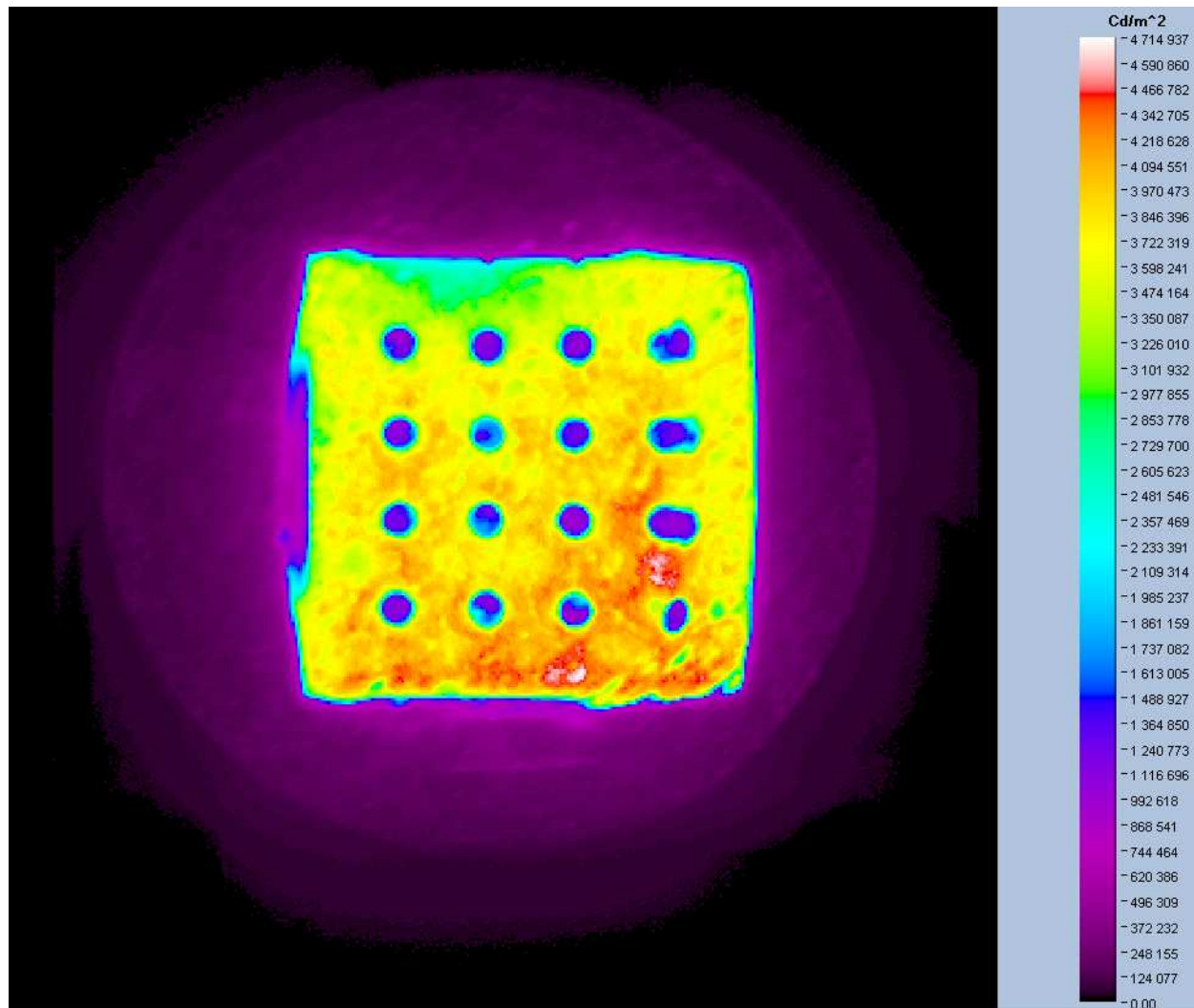


Figure 114 : Carte de luminance mesurée sur une LED bleu roi

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 111 .

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 moyenne spécifiée par le fabricant.

Quelle que soit la longueur d'onde dominante des LED bleu roi, on trouve alors que la luminance énergétique de la LED varie peu et est en moyenne égale à $150\,000\text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$. 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 $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$. Les résultats sont reportés dans le Tableau 32.

Tableau 32 : 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 ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$)	Produit $B \times L_e$ pour un flux énergétique de 0,5 W ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$)
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

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 effective du chip (1,4 mm x 1,4 mm) : $1,1 \cdot 10^7\text{ cd} / \text{m}^2$.

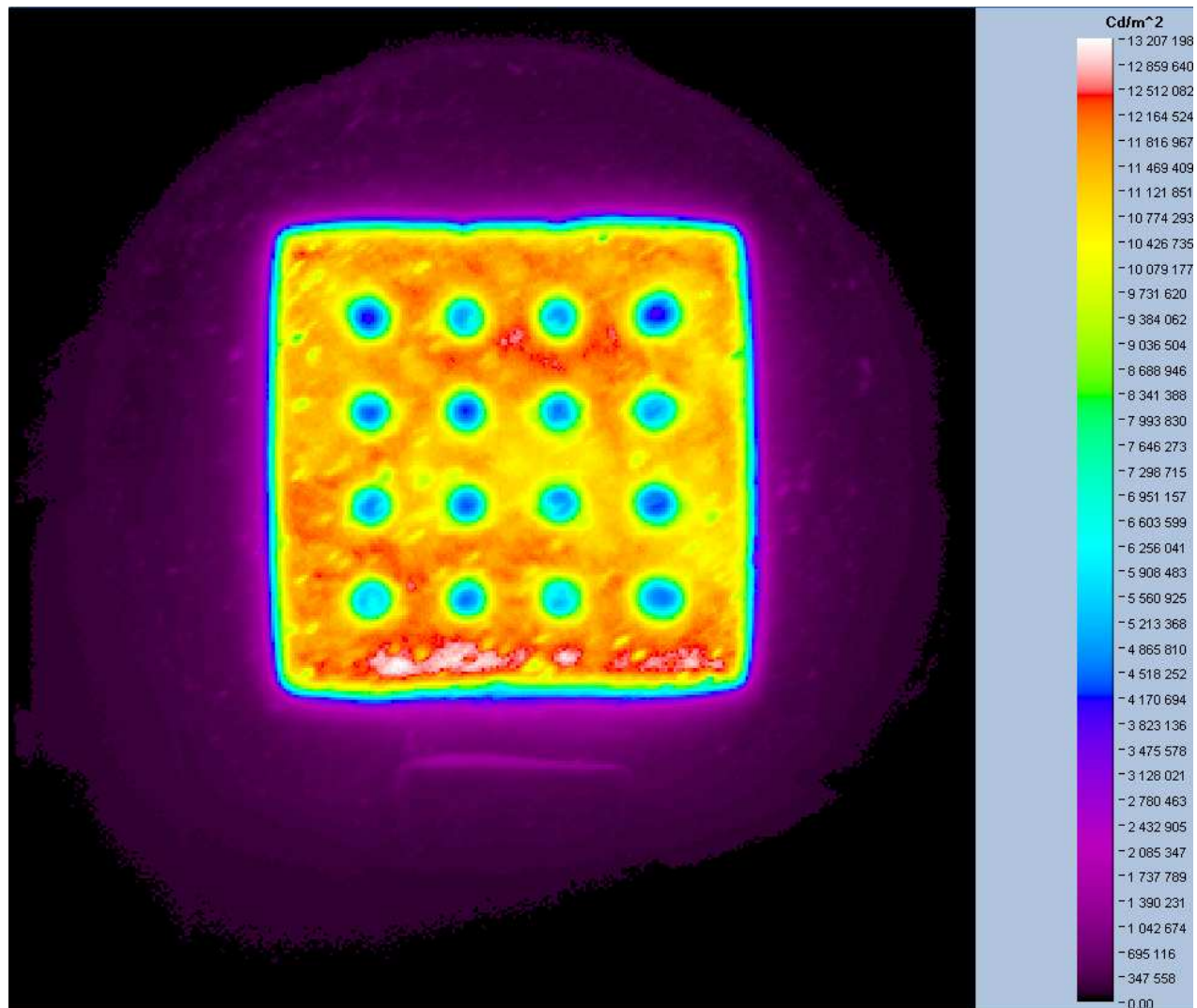


Figure 115 : Carte de luminance mesurée sur une LED blanc froid

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 111.

En considérant un flux lumineux ramené arbitrairement à 100 lm, correspondant à la catégorie de flux lumineux moyenne spécifiée par le fabricant, la luminance de la surface émissive des LED blanc froid et blanc neutre est de $1,6 \cdot 10^7$ 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 9 000 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 33.

Tableau 33 : 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 ($Wm^{-2}sr^{-1}$)
Blanc froid	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
	8411	286	57 560	18995
Blanc neutre	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

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 effective du chip (1,4 mm x 1,4 mm) : $6,2 \cdot 10^6$ cd / m².

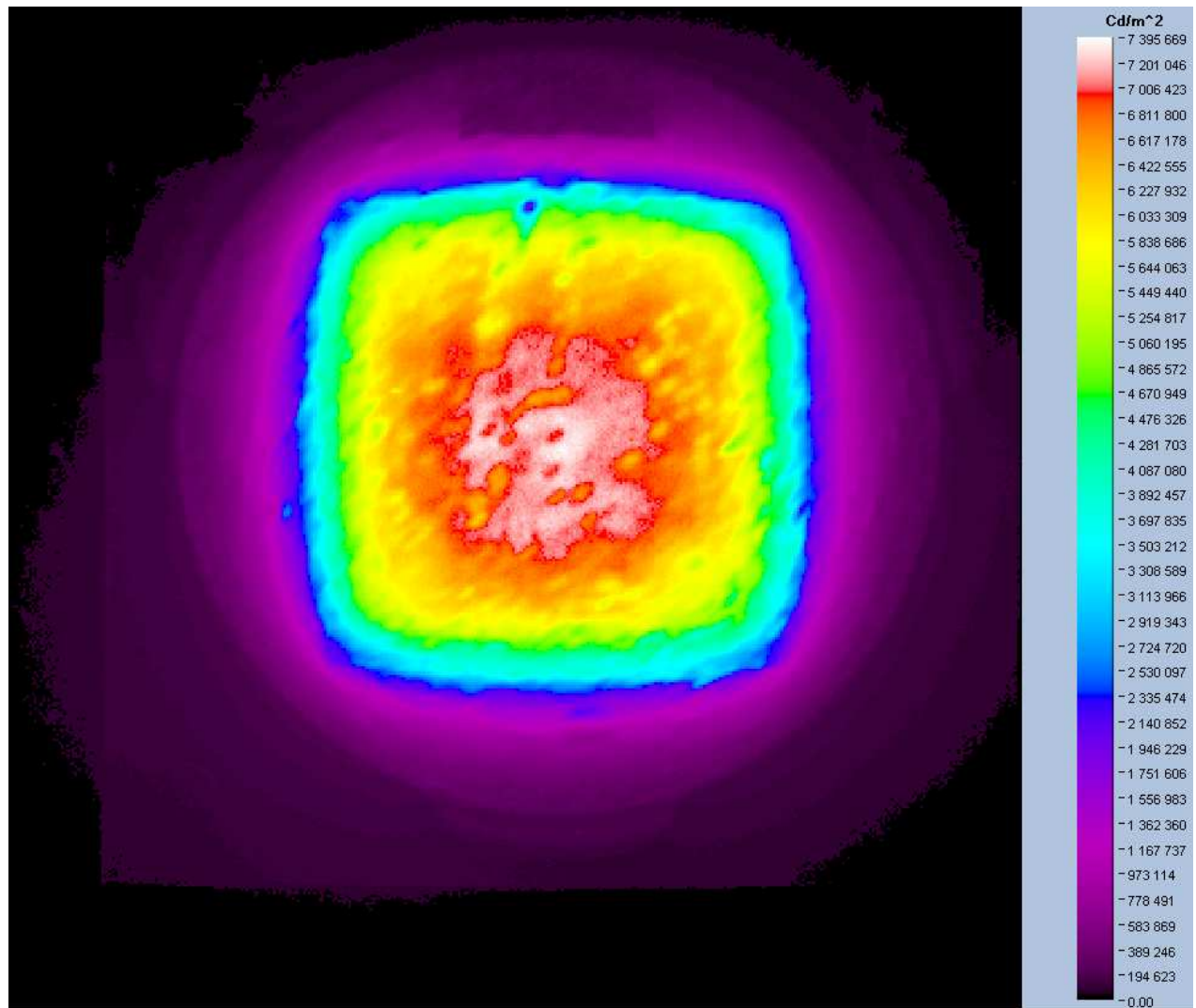


Figure 116 : Carte de luminance mesurée sur une LED blanc chaud

On constate sur la Figure 116 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 moyenne spécifiée par le fabricant, la luminance de la surface émissive des LED blanc chaud est de $1,1 \cdot 10^7$ cd/m².

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 Wm⁻²sr⁻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 2 500 et 4 300 Wm⁻²sr⁻¹. Les résultats sont reportés dans le Tableau 34.

Tableau 34 : 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 ($Wm^{-2}sr^{-1}$)
Blanc chaud	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

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 35 présentent les résultats obtenus pour des temps d'exposition variant entre 0,25 s et 10 000 s.

Tableaux 35 : 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

Durée d'exposition (s)	Champ de vision effectif α_{eff} (rd)	Rayon de surface 200 mm de visée la à (mm)	$k = \frac{\text{surface émissive}}{\text{surface effective}}$
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

Durée d'exposition (s)	Champ de vision effectif α_{eff} (rd)	Rayon de surface 200 mm de visée la à (mm)	$k = \frac{\text{surface émissive}}{\text{surface effective}}$
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

On peut donc calculer, pour chaque référence de LED, la luminance L_B en fonction de la durée d'exposition et tracer les graphes correspondants. La limite d'exposition est également représentée graphiquement de manière à déduire la durée maximale d'exposition, ce qui permet de déterminer le groupe de risque. Les résultats obtenus pour les LED bleu roi, blanc froid, blanc neutre et blanc chaud sont donnés sur les figures suivantes : Figure 117, Figure 118, Figure 119, Figure 120, Figure 121, Figure 122.

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 $1/t$.

Résultats et analyses

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 118 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 mm², 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.

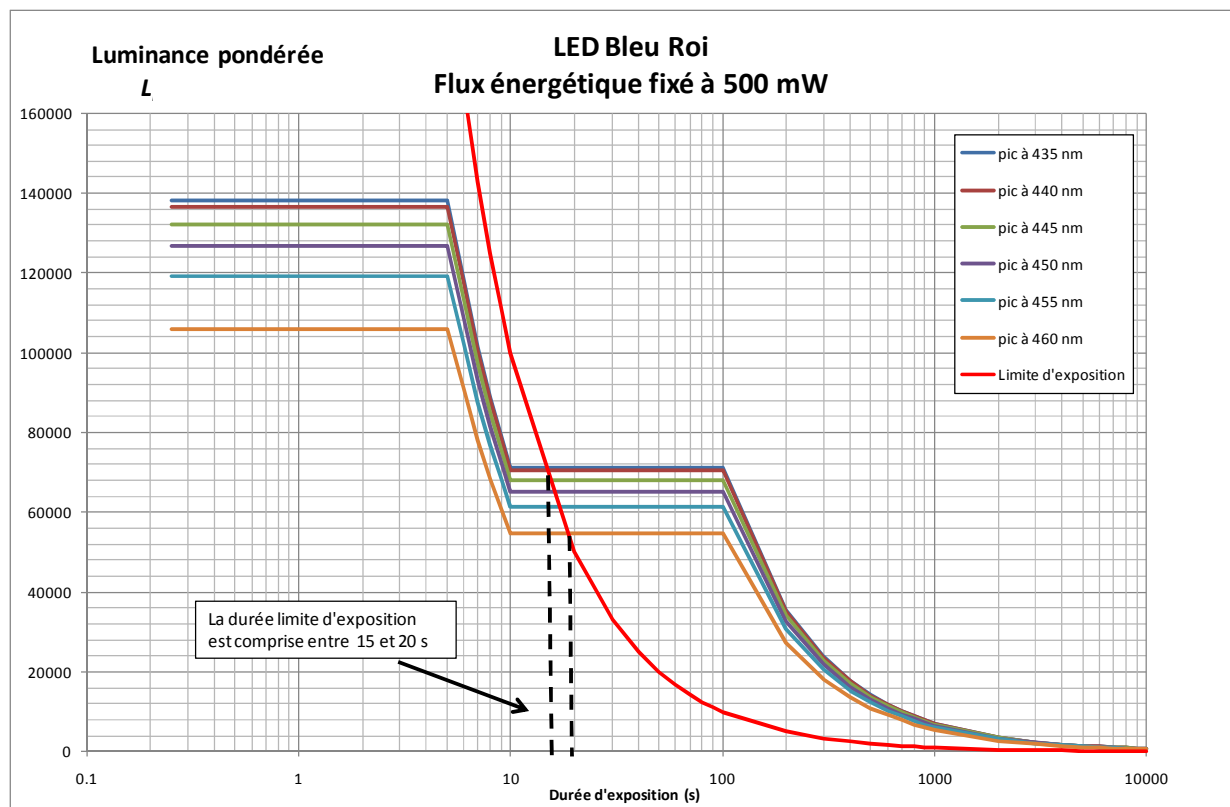


Figure 117 : Graphe indiquant l'évolution de la luminance pondérée L_B des LED bleu roi en fonction du temps d'exposition pour un flux énergétique de 500 mW.

La limite d'exposition est représentée par le trait plein de couleur rouge.

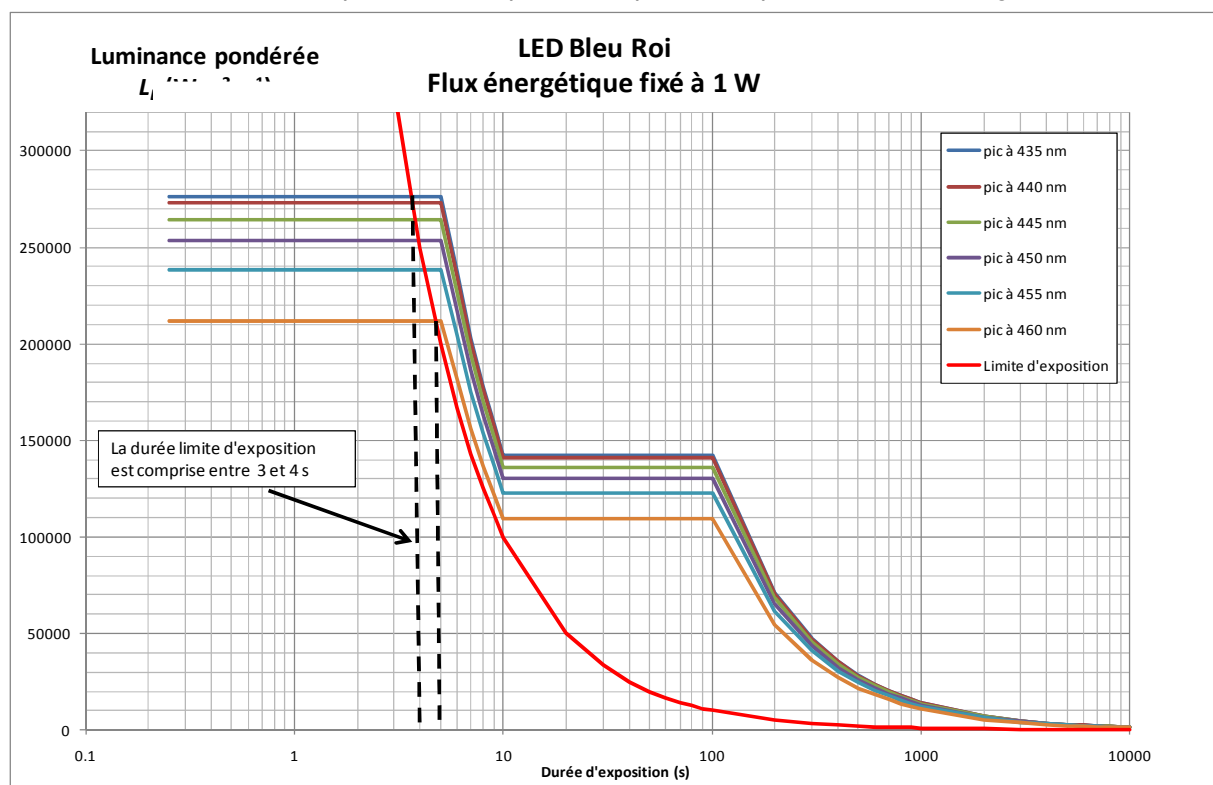


Figure 118 : Graphe indiquant l'évolution de la luminance pondérée L_B des LED bleu roi en fonction du temps d'exposition pour un flux énergétique de 1W.

La limite d'exposition est représentée par le trait plein de couleur rouge.

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 120. 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).

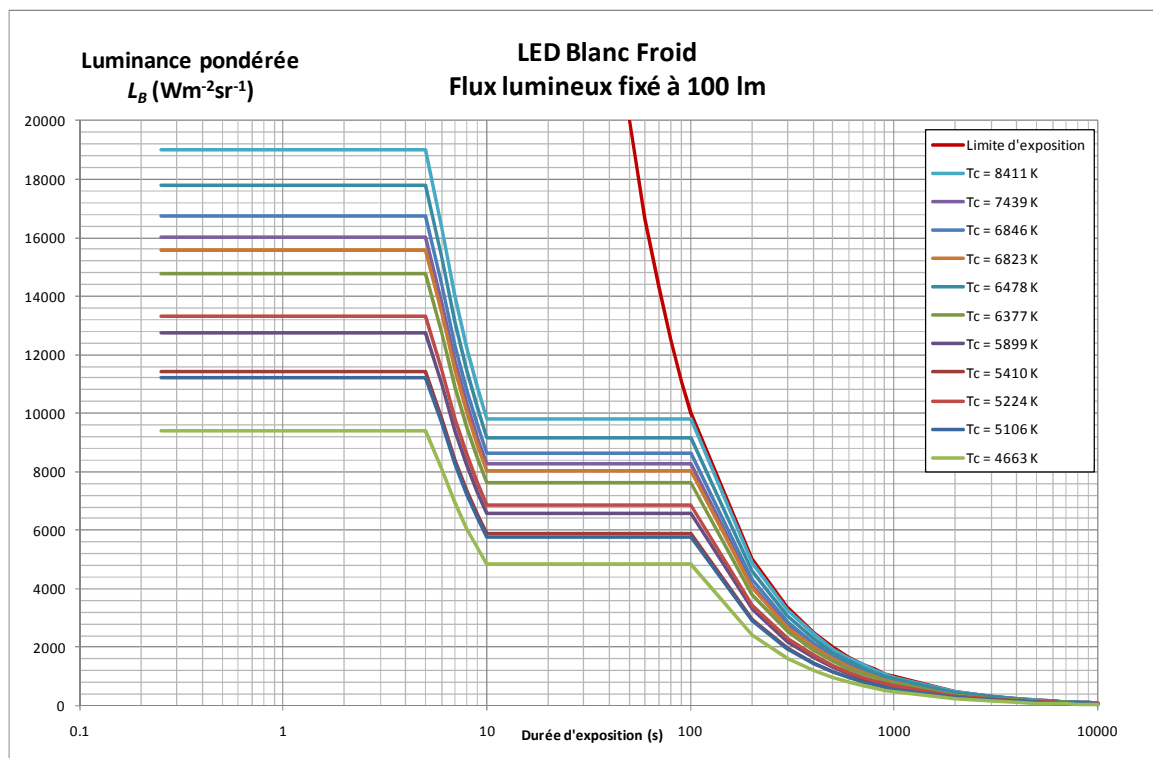


Figure 119 : Graphe indiquant l'évolution de la luminance pondérée L_B des LED blanc froid en fonction du temps d'exposition, pour un flux lumineux de 100 lm

La limite d'exposition est représentée par le trait plein de couleur rouge.

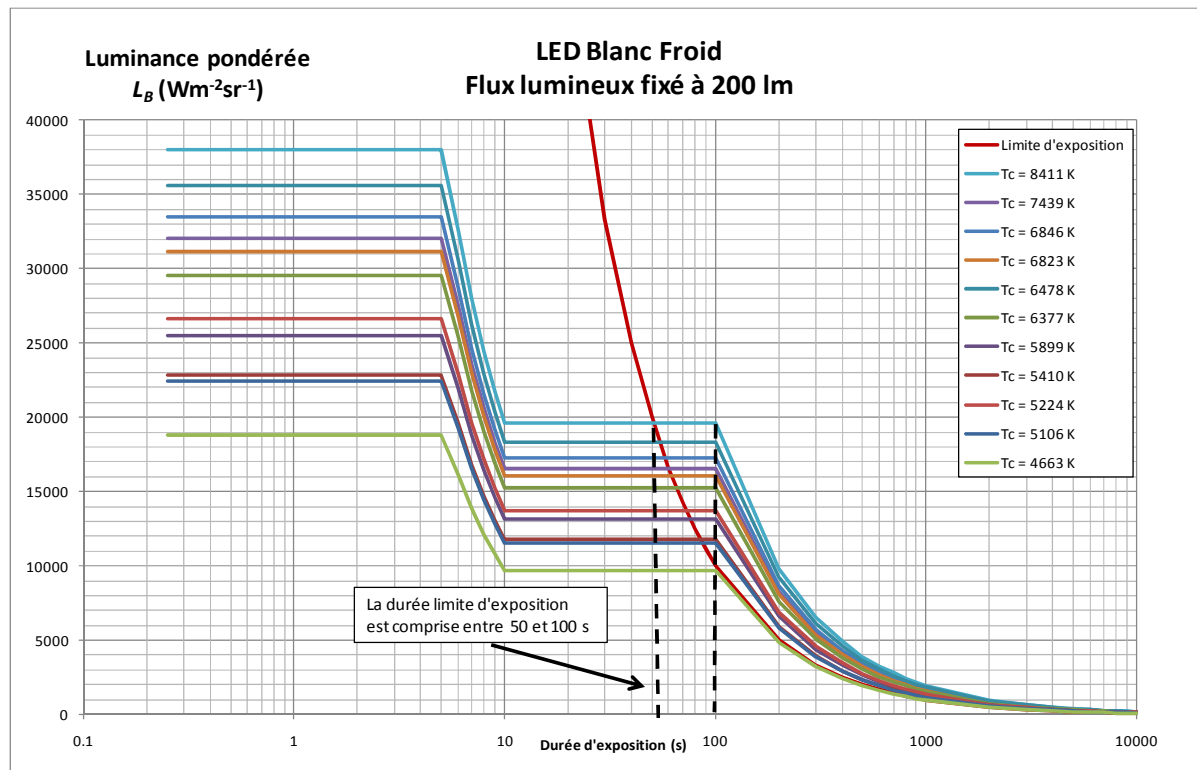


Figure 120 : Graphe indiquant l'évolution de la luminance pondérée L_B des LED blanc froid en fonction du temps d'exposition, pour un flux lumineux de 200 lm.

La limite d'exposition est représentée par le trait plein de couleur rouge.

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 122. 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).

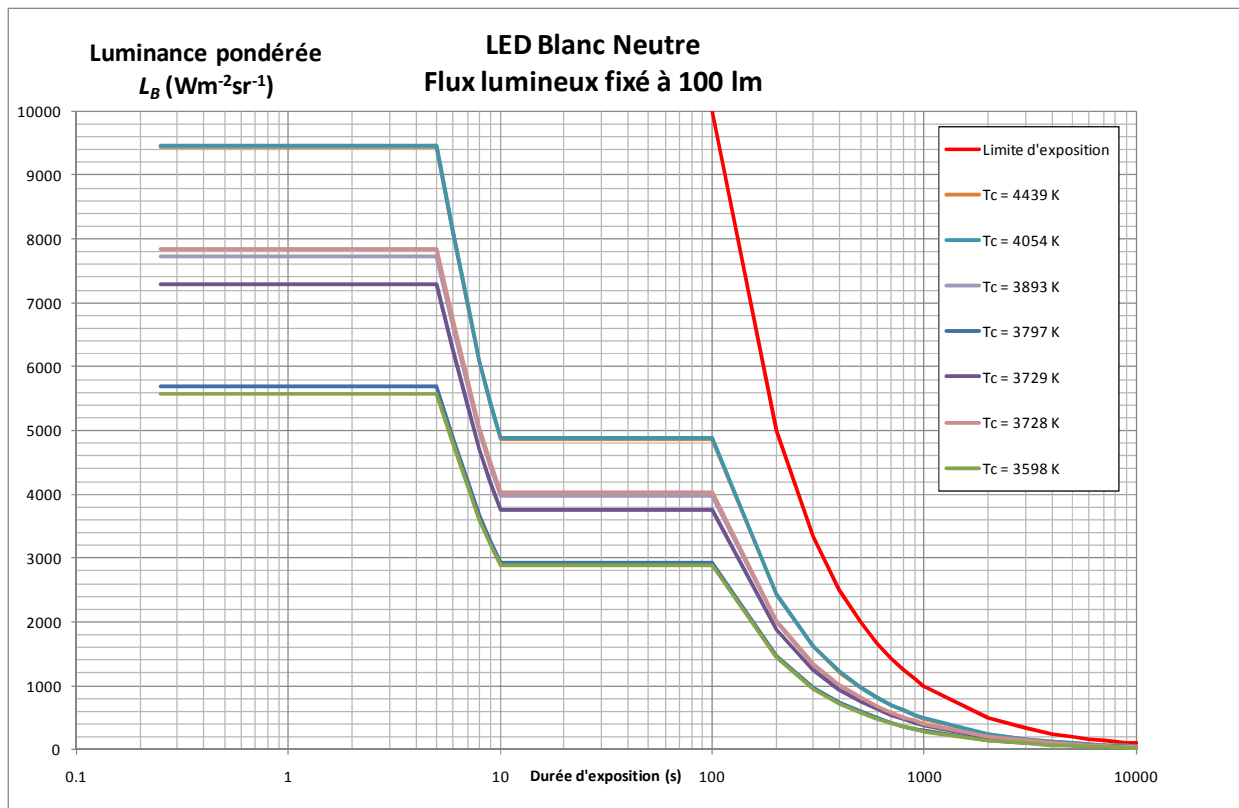


Figure 121 : Graphe indiquant l'évolution de la luminance pondérée L_B des LED blanc neutre en fonction du temps d'exposition, pour un flux lumineux de 100 lm.

La limite d'exposition est représentée par le trait plein de couleur rouge.

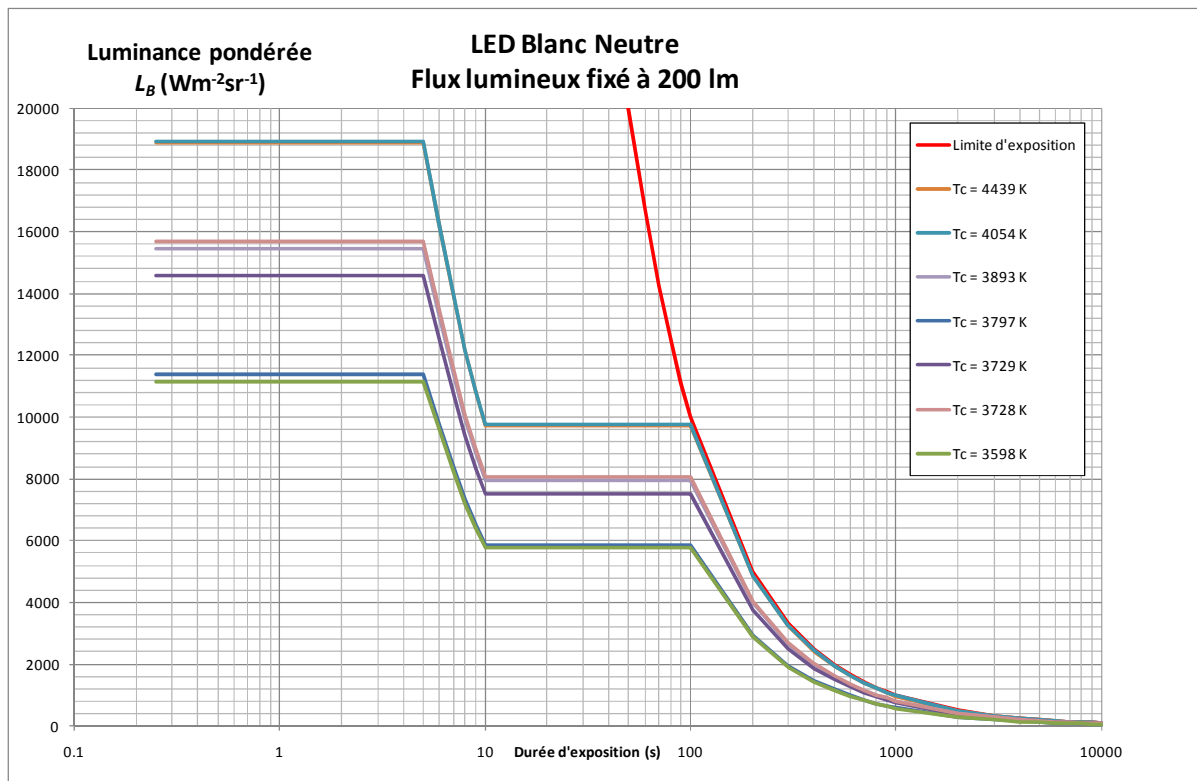


Figure 122 : Graphe indiquant l'évolution de la luminance pondérée L_B des LED blanc neutre en fonction du temps d'exposition, pour un flux lumineux de 200 lm.

La limite d'exposition est représentée par le trait plein de couleur rouge.

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 : exempt de risque. L'analyse montre que le flux lumineux des LED de température de couleur égale à 3 400 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 2 600 K devrait atteindre quant à lui une valeur de 1 000 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.**

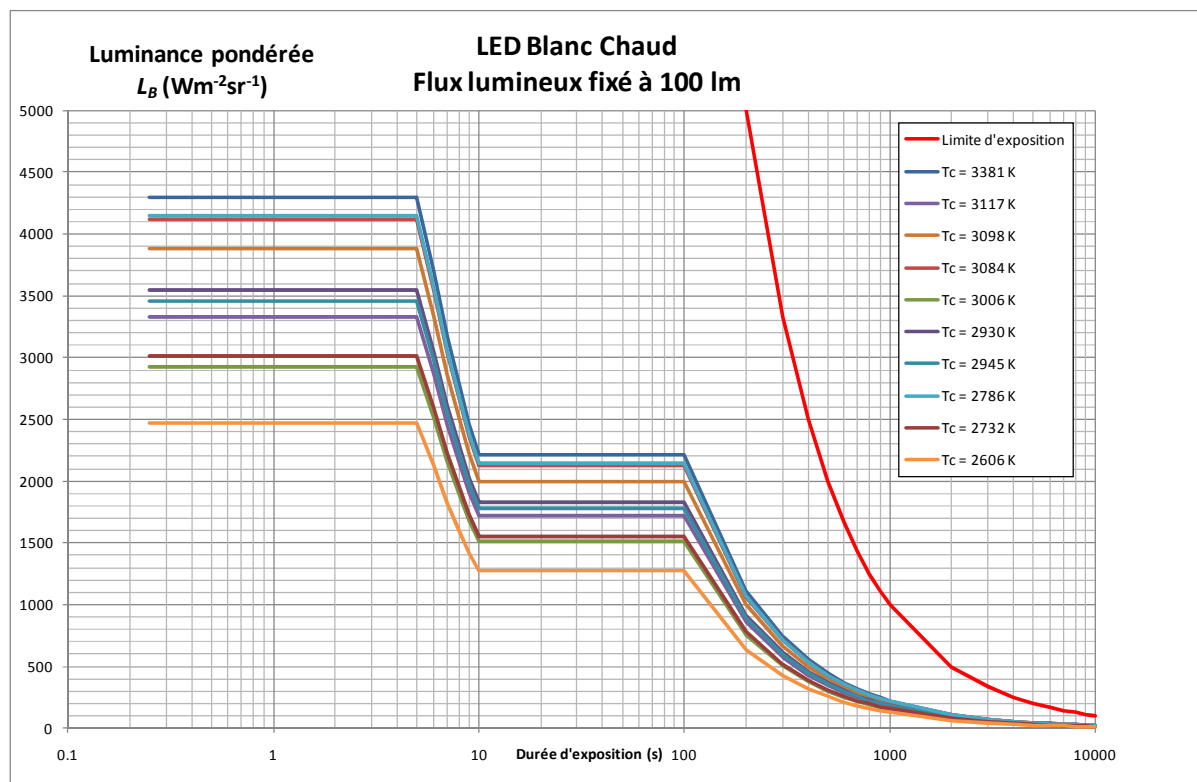


Figure 123 : Graphe indiquant l'évolution de la luminance pondérée L_B des LED blanc chaud en fonction du temps d'exposition, pour un flux lumineux de 100 lm.

La limite d'exposition est représentée par le trait plein de couleur rouge.

Synthèse des résultats

Le Tableau 36 rassemble les résultats obtenus pour les différents types de LED et les flux considérés.

Tableau 36 : 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 mm².

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.

Évaluation de risque en présence d'un assemblage dense de LED blanches (type multichip)

Dans ce type d'assemblage, on considère que les surfaces émissives des LED sont contiguës et ne forment qu'une seule surface dont la luminance est égale à la luminance d'une seule puce (Figure 49 du chapitre 5).

A partir de la valeur de la luminance pondérée correspondant aux temps d'exposition courts, i.e. le premier palier des courbes $L_B(t)$, on peut connaître le temps t_{lim} au-delà duquel la limite d'exposition est dépassée. Ce temps est donné par la formule suivante :

$$t_{lim} = \frac{10^6}{B \times L_E}$$

Ce temps correspond peut être déterminé graphiquement en prolongeant le premier palier de la courbe courbes $L_B(t)$ jusqu'à la courbe de la limite d'exposition (voir Figure 124).

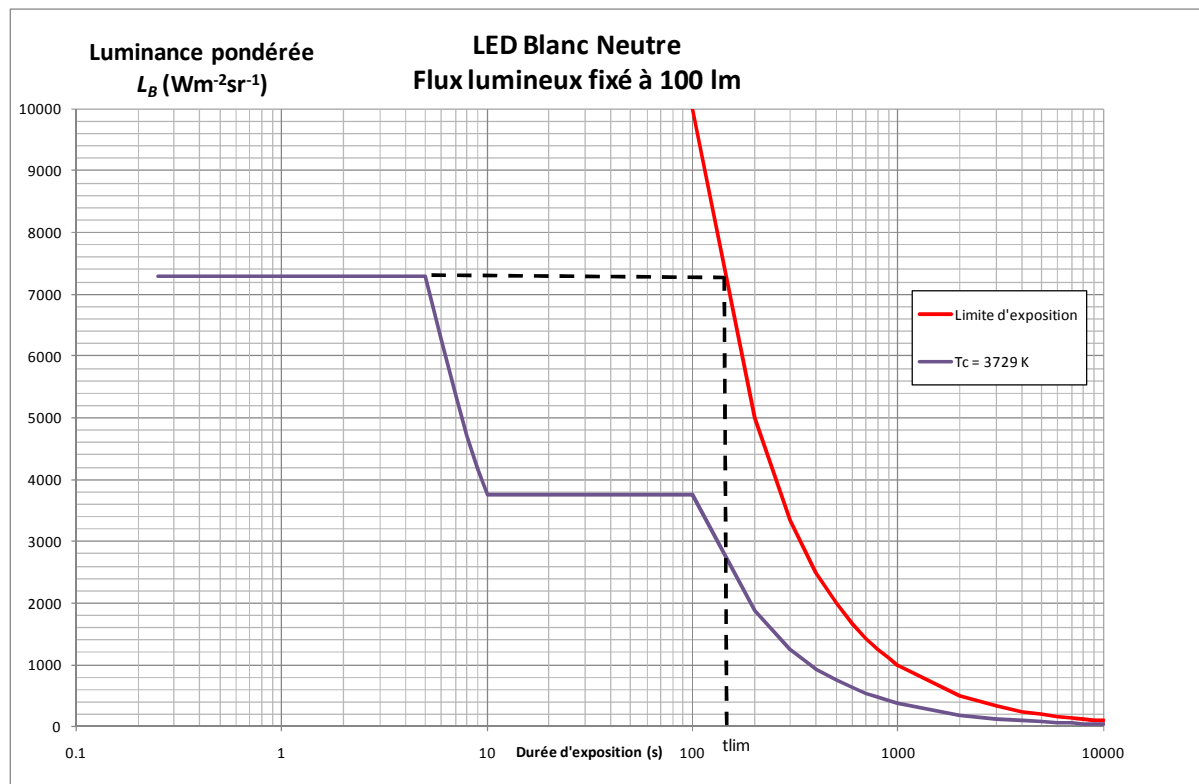


Figure 124 : Extrapolation de la durée limite d'exposition pour un assemblage dense de type « multichip » de LEDs blanc neutre émettant chacune 100 lm.

Le temps limite t_{lim} correspond à la durée d'exposition la plus défavorable (la plus courte) d'un assemblage de LED de type « multichip ». Ce temps permet de déterminer le groupe de risque le plus défavorable correspondant à l'assemblage de LED considérées, quelle que soit la taille de l'assemblage considéré.

Évaluation des risques pour les LED de haute luminance destinées à l'éclairage automobile de jour

Les luminances annoncées par les fabricants de ce type d'éclairage à LED sont de l'ordre de $6 \cdot 10^7 \text{ cd} / \text{m}^2$, avec des spectres lumineux de type blanc froid ($5200 \text{ K} \leq T_c \leq 6000 \text{ K}$).

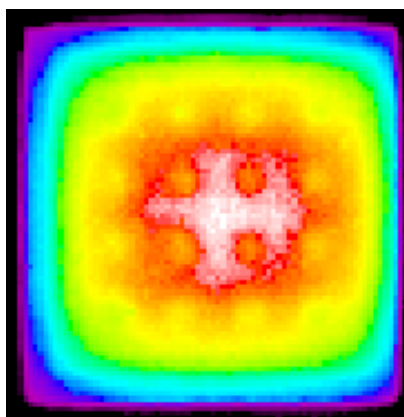


Figure 125 : Cartes de luminance mesurées sur une puce de 1 mm² émettant un flux de 212 lm. Ce type de composant est destiné à l'éclairage automobile de jour. La luminance maximale est de $7.8 \cdot 10^7$ cd / m².

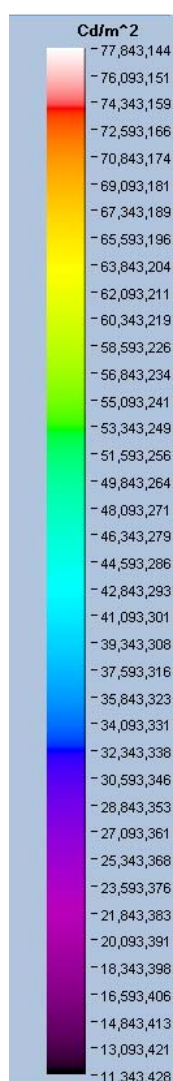
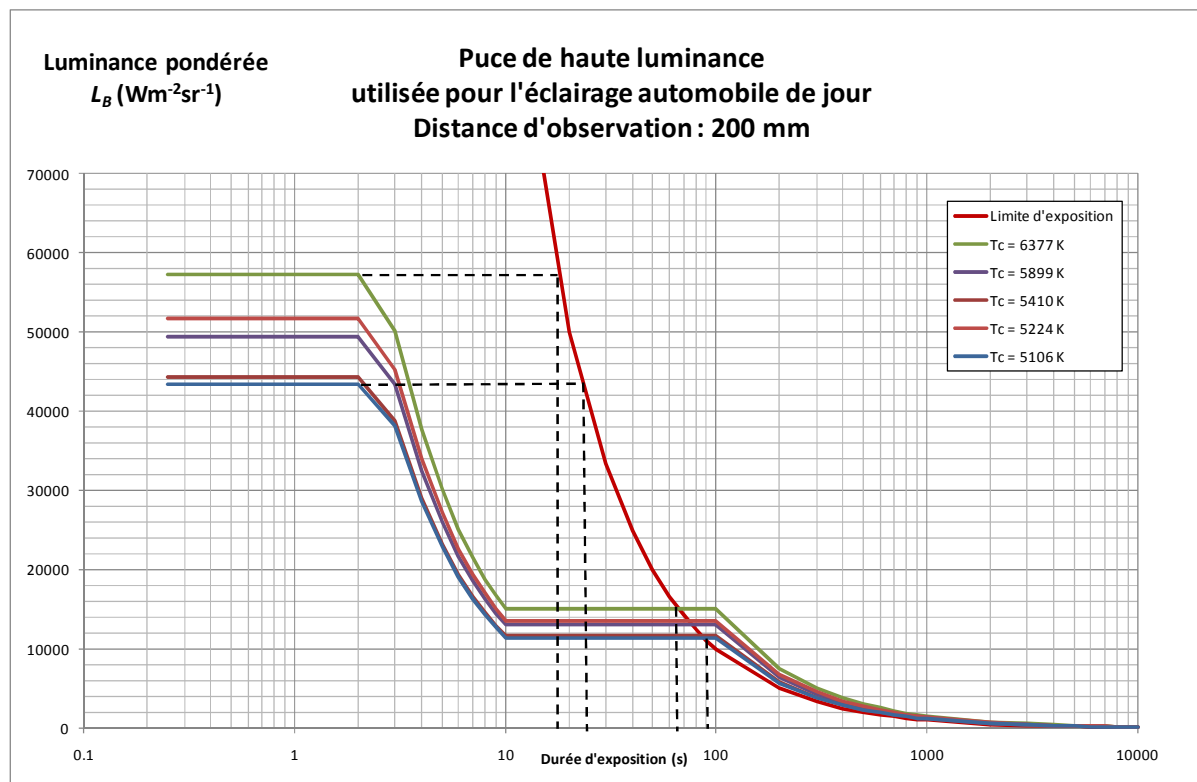


Figure 126 : Niveaux de luminance par couleur

La Figure 126 indique les niveaux de luminances atteints par une LED commercialement disponible dédiée à cette application. La puce produit une luminance moyenne de $6.2 \cdot 10^7$ cd / m² (avec des valeurs maximales de $7.8 \cdot 10^7$ cd / m²). Le flux émis est d'environ 212 lm.

L'évaluation de risque à la distance normative de 200 mm conduit aux résultats de la Figure 127. La durée limite d'exposition est comprise entre 65 s et 90 s. L'extrapolation du premier plateau donne les durées limites correspondant à un assemblage dense de puce du même type. Celles-ci représentent le pire cas d'exposition, le champ de vision étant entièrement rempli par la source. Ces durées d'exposition, les plus défavorables, sont comprises entre 17 s et 23 s.

Cette analyse conduit à classer ces LED dans le groupe de risque 2 (risque modéré).



L'exposition à ce type d'éclairage étant, par nature, intermittente mais répétée, il serait intéressant de mener une analyse statistique des durées d'exposition pour un conducteur et un passager en situation de conduite, ainsi que pour les piétons.

Les systèmes d'éclairage automobile étant situé à moins d'un mètre du sol, les enfants sont particulièrement susceptibles d'être exposés à la lumière émise, notamment dans le cas où les véhicules se garent le long des trottoirs.

Cas de l'utilisation de collimateurs optiques placés devant des LED

Les collimateurs sont des systèmes optiques destinés à focaliser le rayonnement émis par les LED de manière à produire un faisceau de lumière plus étroit. Un schéma de principe est donné dans la Figure 128. Les collimateurs sont très utilisés dans les applications d'éclairage directif : lampes à LED grand public de type GU5.3 (remplacement des lampes halogènes dichroïques), projecteurs pour l'éclairage scénographique ou architectural.

Il est important de noter que la luminance perçue par l'œil dans le faisceau collimaté n'est pas augmentée par rapport à la luminance de la source. En effet, l'effet de focalisation est compensé par l'augmentation de la taille apparente de la source (conservation de l'étendue géométrique du faisceau). L'utilisation de collimateurs, ou plus généralement de systèmes optiques (miroirs, lentilles, etc.) ne peut donc pas conduire à l'augmentation de la luminance de la LED.

En revanche, **l'effet de grandissement géométrique** conduit à une taille de source effective plus grande. La taille de source effective maximale correspond au diamètre du collimateur lui-même (cas où la LED serait placée au foyer d'une lentille convergente idéale).

Par conséquent, la luminance pondérée L_B décroîtra moins vite en fonction du temps d'exposition et la durée limite d'exposition pourra être sensiblement plus courte. Ces dispositifs optiques peuvent donc être critiques du point de vue de la sécurité photobiologique.

A titre d'exemple, l'utilisation d'un collimateur idéal de 10 mm (faisceau de sortie parallèle et diamètre effectif de source égal à 10 mm) peut faire passer une LED du groupe de risque 0 au groupe de risque 2, comme l'illustre la Figure 129.

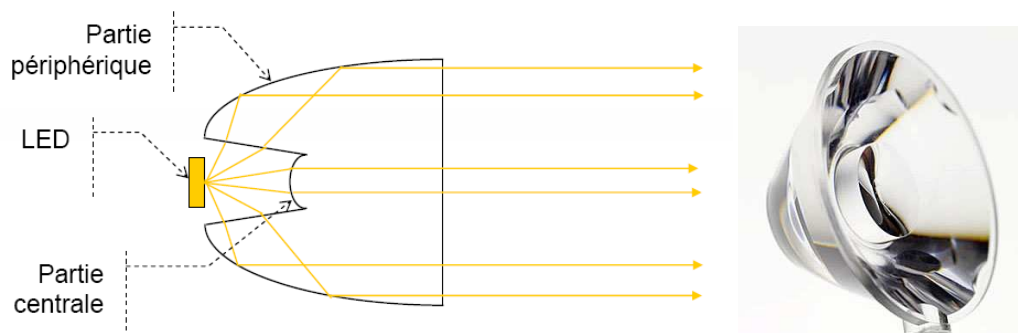


Figure 128 : Schéma de principe d'un collimateur pour LED. Photographie d'un collimateur de LED disponible commercialement.

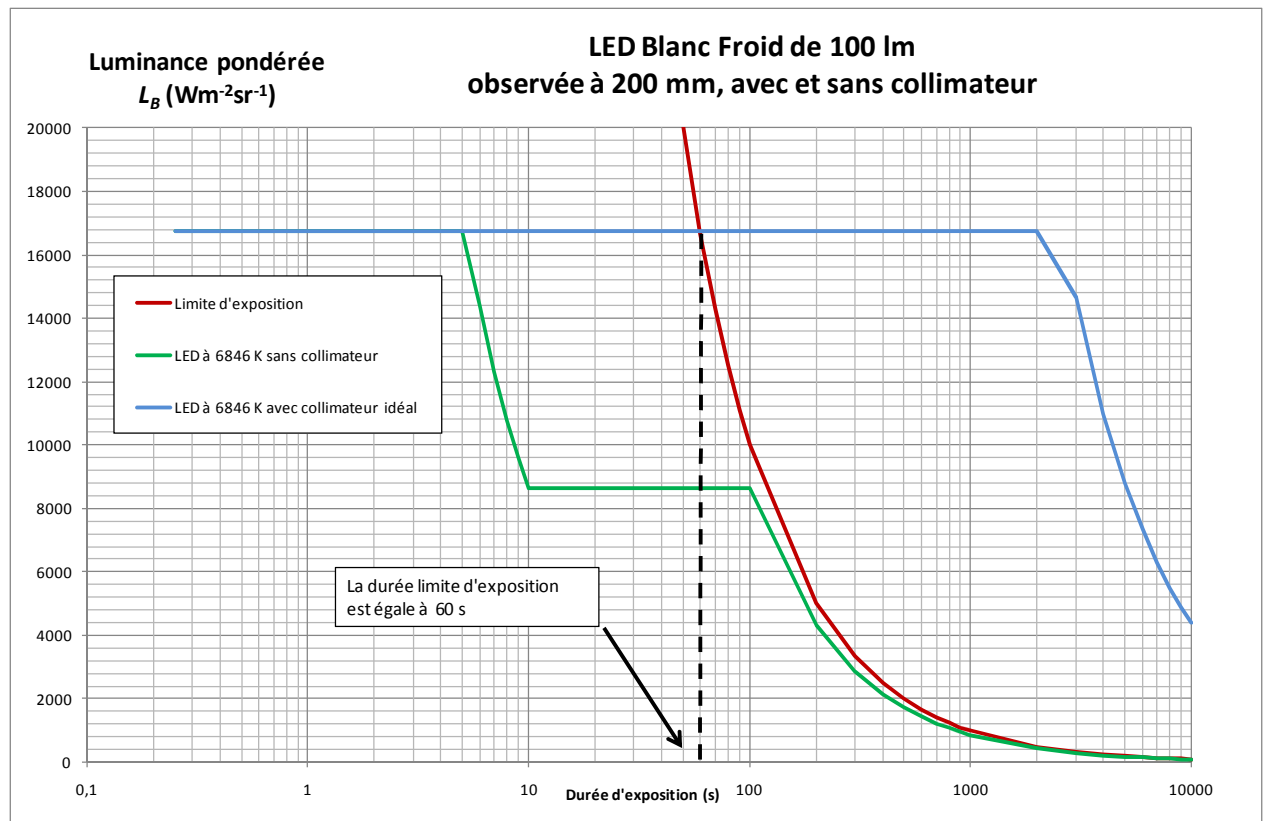


Figure 129 : Détermination des durées limites d'exposition pour deux LED identiques blanc froid, avec et sans collimateur. Sans collimateur, les limites d'exposition ne sont jamais dépassées. Avec un collimateur idéal de 10 mm de diamètre, les limites d'exposition sont dépassées au-delà de 60 s, ce qui conduit à classer le dispositif dans le groupe de risque 2.

Annexe : Synthèse des déclarations publiques d'intérêts des experts par rapport au champ de la saisine

RAPPEL DES RUBRIQUES DE LA DECLARATION PUBLIQUE D'INTERETS

IP-A	Interventions ponctuelles : autres
IP-AC	Interventions ponctuelles : activités de conseil
IP-CC	Interventions ponctuelles : conférences, colloques, actions de formation
IP-RE	Interventions ponctuelles : rapports d'expertise
IP-SC	Interventions ponctuelles : travaux scientifiques, essais, etc.
LD	Liens durables ou permanents (Contrat de travail, rémunération régulière ...)
PF	Participation financière dans le capital d'une entreprise
SR	Autres liens sans rémunération ponctuelle (Parents salariés dans des entreprises visées précédemment)
SR-A	Autres liens sans rémunération ponctuelle (Participation à conseils d'administration, scientifiques d'une firme, société ou organisme professionnel)
VB	Activités donnant lieu à un versement au budget d'un organisme

SYNTHESE DES DECLARATIONS PUBLIQUES D'INTERETS DES MEMBRES DU CES PAR RAPPORT AU CHAMP DE LA SAISINE

NOM	Prénom Rubrique de la DPI Description de l'intérêt <i>en cas de lien déclaré</i>	Date de déclaration des intérêts
Analyse Anses :		
ANFOSSO-LÉDÉE Fabienne	Aucun lien déclaré	13 mai 2008 23 juin 2008 09 décembre 2009
Analyse Anses :	/	
BÉRENGIER Michel	Aucun lien déclaré	29 avril 2008 07 mai 2008 23 octobre 2009
Analyse Anses :	/	
CÉSARINI Jean-Pierre		29 avril 2008 15 mai 2008 09 mars 2009 02 novembre 2009

NOM	Prénom <i>Rubrique de la DPI</i> Description de l'intérêt <i>en cas de lien déclaré</i>	Date de déclaration des intérêts
Analyse Anses :	Évaluation des bénéfices et risques d'un appareil contenant une LED, lumière bleue pour le traitement de l'acné. Expertise médicale rémunérée pour le laboratoire pharmaceutique Galderma.	
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
COHEN	Jean-Claude Aucun lien déclaré Analyse Anses : /	06 mai 2008 23 juin 2008 26 octobre 2009
COURANT	Daniel IP-CC Formation sur la sécurité Laser et l'utilisation de normes pour LASOPTIC (2006-2007) et IREPA LASER (2000-2002) donnant lieu à rémunération personnelle. Analyse Anses : Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	28 avril 2008 23 juin 2008 03 novembre 2009
COUTURIER	Frédéric Aucun lien déclaré Analyse Anses : /	29 avril 2008 15 mai 2008 07 décembre 2009
DEBOUZY	Jean-Claude Aucun lien déclaré Analyse Anses : /	29 avril 2008 06 mai 2008 24 octobre 2009
DORÉ	Jean-François Aucun lien déclaré Analyse Anses : /	29 avril 2008 11 mai 2009
EL KHATIB	Aïcha	30 avril 2008 23 juin 2008 23 janvier 2010

NOM	Prénom <i>Rubrique de la DPI</i> Description de l'intérêt <i>en cas de lien déclaré</i>	Date de déclaration des intérêts
Analyse Anses :	Aucun lien déclaré /	
FLAHAUT Emmanuel	Aucun lien déclaré Analyse Anses : /	29 avril 2008 17 juillet 2008 23 octobre 2009
GAFFET Éric	Aucun lien déclaré Analyse Anses : /	29 avril 2008 09 juin 2008 23 juin 2008 11 août 2008 06 novembre 2008 24 octobre 2009
HOURS Martine	Aucun lien déclaré Analyse Anses : /	29 avril 2008 30 avril 2008 26 octobre 2009
JOB Agnès	Aucun lien déclaré Analyse Anses : /	29 avril 2008 23 novembre 2009
LABEYRIE Antoine	Aucun lien déclaré Analyse Anses : /	25 avril 2008 28 avril 2008 20 novembre 2009
LAMBERT Jacques	Aucun lien déclaré Analyse Anses : /	06 mai 2008
LAURIER Dominique	Aucun lien déclaré Analyse Anses : /	13 mai 2008

NOM	Prénom <i>Rubrique de la DPI</i> Description de l'intérêt <i>en cas de lien déclaré</i>	Date de déclaration des intérêts
Analyse Anses :		
LE BIHAN	Olivier Aucun lien déclaré	22 avril 2008 23 juin 2008 08 décembre 2008 15 octobre 2009
Analyse Anses :	/	
LEPOUTRE	Philippe Aucun lien déclaré	25 avril 2008 23 juin 2008 27 octobre 2009
Analyse Anses :	/	
MARCHAL	Didier Aucun lien déclaré	29 avril 2008 07 janvier 2009 24 octobre 2009
Analyse Anses :	/	
MOCH	Annie Aucun lien déclaré	29 avril 2008 24 janvier 2009
Analyse Anses :	/	
PIRARD	Philippe Aucun lien déclaré	15 mai 2008 24 novembre 2009
Analyse Anses :	/	
PLANTON	Serge Aucun lien déclaré	23 juin 2008 10 juillet 2008 27 octobre 2009
Analyse Anses :	/	
RUMEAU	Michel Aucun lien déclaré	02 mai 2008 23 juin 2008 20 novembre 2009
Analyse Anses :	/	
De SÈZE	René	12 juin 2008 23 juin 2008 20 novembre 2009

NOM Analyse Anses :	Prénom <i>Rubrique de la DPI</i> Description de l'intérêt <i>en cas de lien déclaré</i>	Date de déclaration des intérêts
Analyse Anses :	Aucun lien déclaré /	
TARDIF	François Aucun lien déclaré Analyse Anses : /	15 avril 2008 26 novembre 2008 20 novembre 2009
VALLET	Michel Aucun lien déclaré Analyse Anses : /	24 avril 2008 09 décembre 2009
VECCHIA	Paolo Aucun lien déclaré Analyse Anses : /	29 avril 2008 06 mai 2009 26 octobre 2009

**SYNTHESE DES DECLARATIONS PUBLIQUES D'INTERETS DES EXPERTS RAPPORTEURS PAR
RAPPORT AU CHAMP DE LA SAISINE**

NOM	Prénom Rubrique de la DPI Description de l'intérêt	Date de déclaration des intérêts
Analyse Anses :		
BEHAR - COHEN	Francine Aucun lien déclaré	08 mars 2009
Analyse Anses :	/	
BARLIER - SALSI	Annick LD Responsable d'étude à l'INRS	10 mars 2009
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine /	
CESARINI	Jean-Pierre (membre du CES « Évaluation des risques liés aux agents physiques, aux nouvelles technologies et aux grands aménagements ») Évaluation des bénéfices et risques d'un appareil contenant une LED, lumière bleue pour le traitement de l'acné. Expertise médicale rémunérée pour le laboratoire pharmaceutique Galderma.	29 avril 2008 15 mai 2008 09 mars 2009 02 novembre 2009
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
ENOUF	Olivier Aucun lien déclaré	12 mars 2009
Analyse Anses :	/	
GARCIA	Michel VB Participation au projet CITADEL sur la caractérisation de l'intégration et de la durabilité des systèmes d'éclairage à LED dans le bâtiment donnant lieu à versement à l'organisme d'appartenance (CSTB) Ne présente pas de conflit d'intérêt avec la thématique	04 mars 2009
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
MARTINSONS	Christophe VB	05 mars 2009

Analyse Anses :	Coordonateur du projet CITADEL sur la caractérisation de l'intégration et de la durabilité des systèmes d'éclairage à LED dans le bâtiment donnant lieu à versement à l'organisme d'appartenance (CSTB) Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine
PICAUD Serge PF Actions Fovea Pharmaceuticals LD Consultant pour Fovea Pharmaceuticals VB Étude sur la toxicité rétinienne du Vigabatrin financée par Ovation Pharmaceuticals donnant lieu à versement à l'organisme d'appartenance (Inserm) (10 % du budget du laboratoire). Étude sur la neuroprotection rétinienne financée par Servier donnant lieu à versement à l'organisme d'appartenance (Inserm) (10 % du budget du laboratoire). Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine
VIENOT Françoise VB Encadrement de thèse : « Ambiances visuelles dans les trains : évaluations sensorielles et physiques en situation réelle de voyage et en laboratoire », bourse CIFRE SNCF (2007-2010) Encadrement de thèse « Vision des couleurs sur les affichages dans l'automobile », bourse CIFRE Renault (2008-2011) Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine
ZISSIS Georges Participation au projet CITADEL sur la caractérisation de l'intégration et de la durabilité des systèmes d'éclairage à LED dans le bâtiment donnant lieu à versement à l'organisme d'appartenance (Laboratoire LAPLACE) Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine