

Eclairage LED et vision :

Pour une révision des seuils

en fonction de la qualité du spectre

Table des matières

1.	LA PRISE EN COMPTE DU SYSTEME VISUEL	5
2.	UNE REGLEMENTATION GLOBALEMENT ... OBSOLETE !.....	5
3.	ESSAIS ET RETOURS D'EXPERIENCE DE NOS MEMBRES.....	6
	1. Aéroport Amsterdam Schiphol : caractérisation du s/p ratio (collaboration avec le Groupe ADP)	6
	2. La cabine LVMH	7
	3. Cabine de peinture avec IRC 95 (Airbus)	8
	4. Essais d'éclairage sur des gares de péage (SANEF)	9
	5. Eclairage LED site de Wissous (La Poste).....	10
	6. Remplacement des tubes fluorescents par des tubes LED (RATP)	10
	7. Conclusion	11
4.	LES AXES DE REFLEXION DU CCFLED	12
	1. D'une simple valeur	12
	2. ... à une nouvelle méthode d'évaluation de la lumière	14
	3. Faut-il considérer l'environnement de la scène ?	17
5.	CONCLUSION : CONCILIER FABRICATION ET USAGE.....	18
	ANNEXES.....	19
6.	LA CONNAISSANCE SUR LA LUMIERE	19
7.	UNITES DE MESURE ET ENVIRONNEMENT REGLEMENTAIRE	26
8.	L'ENVIRONNEMENT REGLEMENTAIRE EN FRANCE ET EN EUROPE	29

En Bref

L'éclairage LED a bouleversé nos habitudes d'utilisation de la lumière. Mais cette révolution n'a pas été accompagnée d'une relecture des critères de qualification de l'éclairage. Unique critère de dimensionnement de nombreuses installations, la quantité d'éclairage est devenue un paramètre d'évaluation bien trop réducteur.

Nous pensons qu'il est obsolète, et que l'appréciation d'un éclairage doit prendre en compte des critères qualitatifs, en complément des luminances ou uniformités requises. Fort de sa représentativité, le CCFLed et ses membres, grands donneurs d'ordre et maîtres d'ouvrage français, sont prêts à accompagner et passer cette seconde étape de la révolution LED.

Les enjeux économiques et les impacts écologiques sont si importants pour notre avenir ...

Travaillons ensemble !

La seule qualité des médiocres, c'est la quantité.

Georges Brassens

Alors que la LED a bouleversé nos réflexions et nos modes de conception, l'association entre vision et éclairage est encore largement régie par le concept de quantité : les normes et règlements imposent majoritairement des niveaux d'éclairage, sans regarder les propriétés de la source et en analysant de manière trop réduite l'environnement dans lequel évolue l'observateur.

Pourtant, les premiers synonymes accordés par la langue française au verbe *voir* sont percevoir et distinguer : pour voir, il nous faut distinguer les objets et ce, quel que soit le niveau d'éclairage. Les notions de qualité et de quantité sont donc imbriquées, et la qualité de la vision d'un objet ou d'un espace ne dépend pas uniquement de la quantité de lumière à laquelle il est soumis.

Face au changement climatique et ses multiples impacts sanitaires, sociaux et économiques, il convient de travailler sur les possibilités offertes par la technologie LED pour réduire nos impacts. Nous avons l'audace de tenir compte de l'environnement mais également de la perception de la lumière pour réfléchir à une réduction de la quantité distribuée dans les projets, et, ainsi, la consommation énergétique, l'utilisation de matières, etc. ...

Il est donc nécessaire de caractériser la lumière émise, et de proposer une règle d'adaptation des niveaux réglementaires.

1. LA PRISE EN COMPTE DU SYSTEME VISUEL

La vision est apparue, à l'origine, comme une sensation simple, linéaire. Le confort serait directement lié à la quantité de lumière.

De nombreuses recherches depuis 150 ans, montrent que le système visuel n'est pas un simple luxmètre (voir annexes). Et l'interprétation des informations reçues de l'œil, par le cerveau, est variable, relative au contexte.

En tant que donneurs d'ordre, nous avons à obéir aux seuils fixés par la loi, les règlements, et nous partageons, humblement, l'idée que ces systèmes quantitatifs sont incomplets et perfectibles.

En tant qu'utilisateurs, il nous apparaît indispensable de considérer le système visuel complet : œil et cerveau, et d'explorer l'axe "qualité". La technologie LED nous y invite puisqu'elle est beaucoup moins standardisée que les technologies précédentes.

2. UNE REGLEMENTATION GLOBALEMENT ... OBSOLETE !

Le rapide tour d'horizon des principaux textes réglementaires ou recommandations, présenté en annexe, nous montre que les valeurs à respecter sont majoritairement exprimées **en Lux**, et basées sur des sources anciennes telles que lampes à décharge voire à filament ...

On notera toutefois que les textes relatifs à l'éclairage routier et aux tunnels traitent de luminances et de contraste, et tiennent compte de l'environnement pour ajuster ces valeurs.

En dehors du texte sur la pollution lumineuse, les notions de températures de couleur ou d'IRC ne sont pas présentes.

L'arrivée de la LED permet tout et son contraire, et nous spécifions les projets avec bien plus de paramètres que le simple niveau de Lux, comme au XXe siècle. Dans le contexte de l'adaptation au changement climatique, et après le choc du covid-19, il est indispensable de recalibrer nos principes de conception des projets.

Entrant dans une ère où la frugalité devient indispensable, il faut maintenant faire attention à tout, et se poser les bonnes questions. La caricature serait de prescrire de la privation et du manque.

Nos membres souhaitent aller vers le mieux et le juste. Voici comment nous avons eu cette intuition depuis 2 ans environ.

3. ESSAIS ET RETOURS D'EXPERIENCE DE NOS MEMBRES

Ces expériences, réalisées sans concertation et sur des sujets majeurs, ont une conclusion similaire, mettant en avant le fait que l'environnement et les caractéristiques de la source lumineuse (LED) permettent d'atteindre un niveau de confort et de visibilité satisfaisant bien que les niveaux réglementaires ne soient pas atteints.

1. Aéroport Amsterdam Schiphol : caractérisation du s/p ratio (collaboration avec le Groupe ADP)

Pour les parkings (et par extension pour les aires de stationnement avions), l'aéroport d'Amsterdam Schiphol a procédé à des essais de luminaires LED, avec différentes températures de couleur.

Le protocole consistait à demander à des échantillons d'opérateurs leur ressenti, en faisant varier le niveau d'éclairage.

Les opérateurs déclarent avoir le même niveau de confort et de sécurité sur une zone éclairée :

- à 40 Lux en Sodium Haute Pression,
- à un niveau compris entre 18 et 25 Lux en LED.

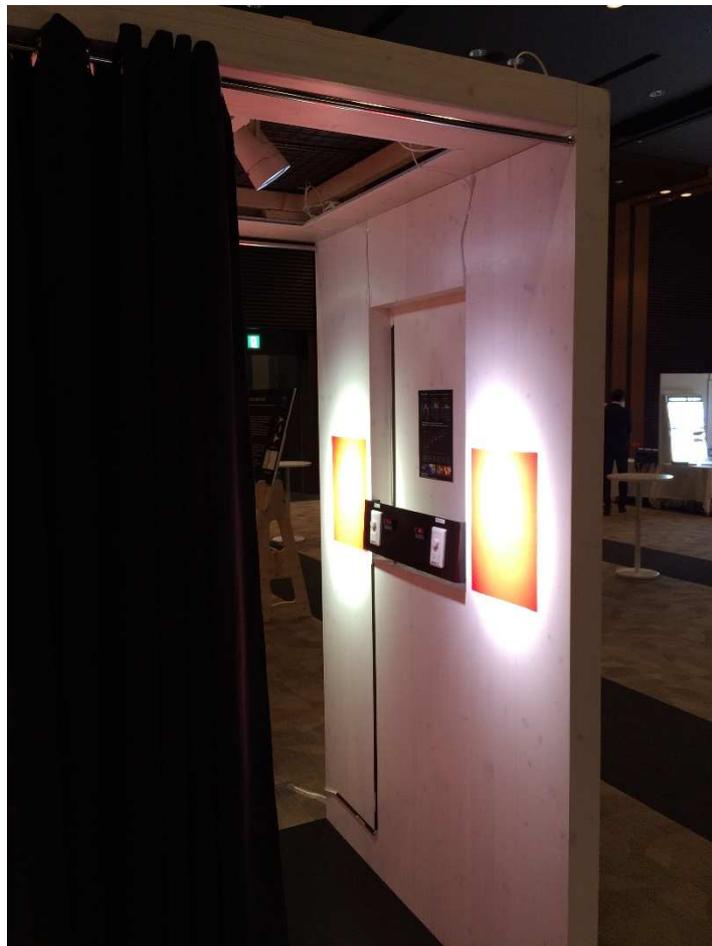


2. La cabine LVMH

Dans une cabine, deux logos rouges sur fond rouge, éclairés d'un côté en IRC80 et de l'autre en spectre "natural vivid" avec un IRC97.

L'invité pouvait augmenter la quantité de lumière par un potentiomètre à droite, jusqu'à voir "la même chose" qu'à gauche, en IRC80.

Les deux faisceaux des deux spots étaient identiques, les deux variateurs aussi.



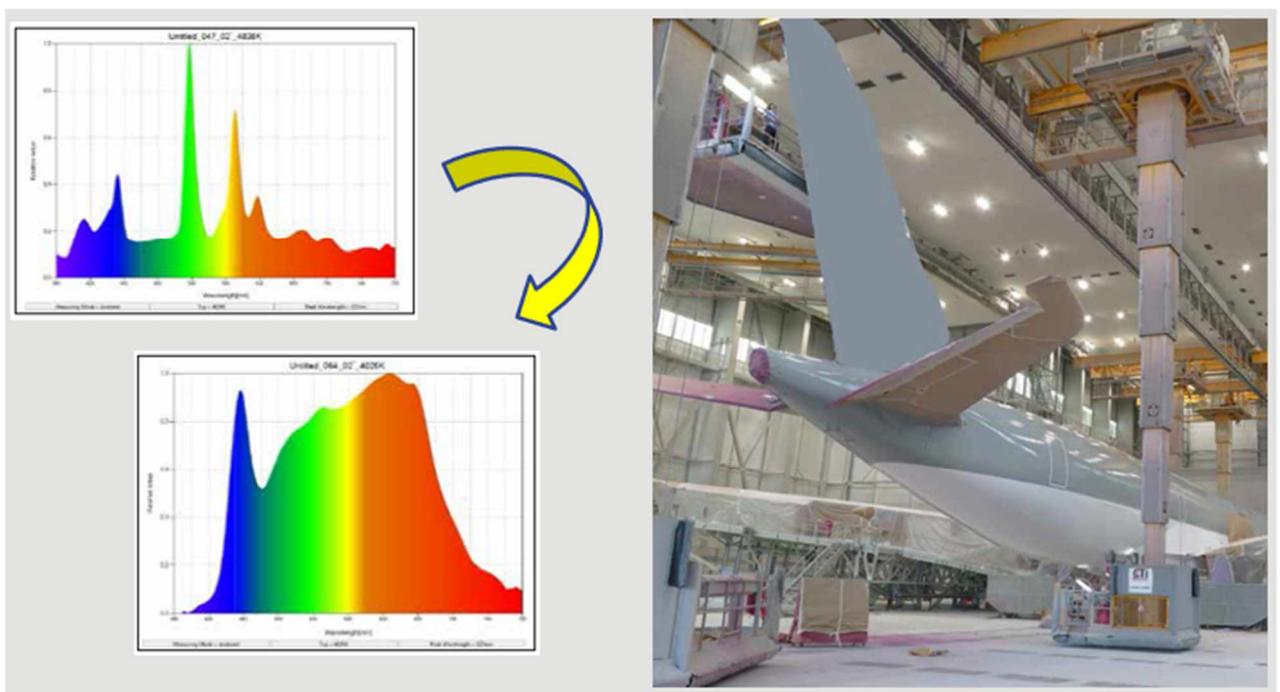
On a pu observer que les invités utilisent 50 % de lumière en moins quand le spectre est de haute qualité, par rapport à l'IRC 80 (basique).

3. Cabine de peinture avec IRC 95 (Airbus)

A l'occasion du remplacement de l'éclairage dans une cabine de peinture sur son site de Toulouse, Airbus a procédé au déploiement de luminaires LED IRC 95.

Ces zones sont caractérisées par une exploitation maximale : 24 h / 24, 7 j / 7, pendant 50 semaines par an.

Le niveau d'éclairage est de 300 Lux moyens à 0,8 m du sol (uniformité de 0,7).



A niveau d'éclairage égal (par rapport aux lampes Iodures Métalliques), les opérateurs ont noté un meilleur confort et une qualité de peinture accrue, caractérisée par une réduction des reprises à réaliser.

4. Essais d'éclairage sur des gares de péage (SANEF)

La SANEF a mené des expérimentations sur les gares de péage de Mourmelon et de La Veuve, en réalisant un éclairage en LED en lieu et place de l'éclairage existant en Sodium Haute Pression.

Elle a procédé à une large étude des exploitants concernés, demandant à quel niveau d'éclairement en LED correspondait la même qualité d'éclairage qu'en SHP ; les résultats sont compilés sur le tableau suivant :

	Emoy recommandé AFE 2002 (lux)	Niveaux comparés par les exploitants		
		PILOTE SHP	PILOTE LED	
	Emoy recommandé AFE 2002 (lux)	Emoy maintenus (lux)	Emoy à l'installation (lux)	Emoy suivant réglage 4
plateforme sortie 1	30	40	44	33
plateforme entrée 1	30	39	43	32
plateforme sortie 2	30	38	41	36
plateforme entrée 2	30	38	41	31
voie sous auvent 1	75	97	122	49
voie sous auvent 2	75	79	98	53
voie sous auvent 3	75	80	102	55
voie sous auvent 4	75	83	96	60
voie sous auvent 5	75	82	115	47
face équipement de péage 1	40	60	76	33
face équipement de péage 2	40	69	80	61
face équipement de péage 3	40	32	40	44
face équipement de péage 4	40	68	75	35
face équipement de péage 5	40	57	85	46
moyenne éclairage des voies sous-auvent comparées			106,6	52,8
moyenne éclairage des faces d'équipement comparées			71,2	43,8



On obtient donc une équivalence 71 Lux SHP pour 44 Lux LED, soit une réduction du niveau d'éclairement de 38 %.

5. Eclairage LED site de Wissous (La Poste)

Le projet consiste à rénover l'ensemble de l'éclairage intérieur du site de traitement de courrier de La Poste à Wissous (91).

L'installation avait été envisagée avec un remplacement à l'identique du nombre de points lumineux et à flux similaire.

Finalement, avec deux luminaires allumés sur trois, les opérateurs ont indiqué avoir une qualité et un confort ressenti identique (situation d'autant plus simple à vérifier pour les personnels concernés que l'installation était rénovée par travée).



6. Remplacement des tubes fluorescents par des tubes LED (RATP)

La RATP a été un pionnier pour le remplacement des luminaires en LED, en remplaçant l'intégralité de ses luminaires à tubes fluorescents par des tubes LED.

Les niveaux d'éclairage existants étaient supérieurs aux niveaux réglementaires, d'environ 30 %.

Avec les nouveaux matériels, la RATP a visé l'atteinte des niveaux d'éclairage.

Avec la baisse de 30 % sur le niveau d'éclairage moyen, la RATP a noté l'absence totale de plainte des usagers, et même une augmentation de la qualité ressentie notamment en termes de propreté des espaces.

7. Conclusion

Menées dans des environnements totalement différents, les expérimentations décrites précédemment démontrent de manière concrète l'intérêt de l'éclairage LED pour une meilleure vision :

- meilleur ressenti de l'éclairage,
- augmentation de la qualité perçue,
- impacts complémentaires comme une propreté apparente et une meilleure qualité de travail réalisé dans ces conditions.

Les impacts ne sont donc pas uniquement liés à l'éclairage et aux économies d'énergie, mais également aux effets induits : réduction possible des campagnes de nettoyage, réduction des coûts de reprise grâce à l'augmentation de la qualité du travail, ...

"Eclairer juste pour mieux voir" relève donc d'un triple enjeu : physiologique, environnemental et économique.

Entre les anciennes technologies et les sources LED, il semble émerger, de façon empirique, de potentielles réductions de niveau d'éclairage de 15 % en intérieur et de 30 % en extérieur, tout en maintenant la qualité du confort visuel.

Il s'agit maintenant de trouver la meilleure manière de traduire le gain potentiel, tout en considérant que ces chiffres et la démarche devront être accompagnés d'un protocole d'analyse tant sur les valeurs que sur les modalités d'application.

4. LES AXES DE REFLEXION DU CCFLED

Les expérimentations précédentes démontrent l'intérêt d'une **réflexion sur les niveaux réglementaires** en notion d'éclairage au sol ou sur la surface de travail, en Lux, en fonction de la technologie LED, qui est utilisée depuis une dizaine d'années en éclairage général.

Simple coefficient, caractérisation de la source lumineuse voire de l'environnement : les pistes sont nombreuses. Mais la complexité est croissante. Nous n'avons qu'un objectif : optimiser les installations d'éclairage pour réduire leur impact. Si la formule est trop complexe, ni les autorités, ni les concepteurs ne vont l'utiliser.

1. D'une simple valeur ...

Une solution simple consisterait à appliquer un ratio entre les niveaux d'éclairage réglementaires, et ceux qui seraient autorisés ou souhaitables, en LED.

Deux coefficients distincts pourraient être utilisés :

- un coefficient pour l'éclairage **extérieur**, en vision mésopique (nocturne),
- un coefficient pour l'éclairage **intérieur**, en vision photopique (diurne),

en extérieur

Pour l'éclairage extérieur, le décret relatif à la limitation des nuisances lumineuses entraîne désormais un usage quasi-exclusif de températures de couleur inférieures ou égales à 3000 K. En outre, le rendu des couleurs est souvent un enjeu secondaire pour les projets d'éclairage routier ou d'éclairage de grands espaces (hors espaces sportifs avec contraintes télévisuelles). L'objectif est de voir les formes, de distinguer les obstacles, les dangers, mais pas d'apprécier les couleurs des matériaux, des objets. Dès lors, il est possible de considérer comme figées ces deux données.

D'après nos expériences, les phénomènes décrits aboutissent tous à 30 % de réduction.

En éclairage extérieur, le CCFled propose d'utiliser un coefficient réducteur β_e de 0,3 pour les éclairages assurés par des sources LED, sur le niveau d'éclairage en Lux :

$$E_{LED} = (1 - 0,3) \cdot E_{théorique} = 0,7 \cdot E_{théorique}$$

en intérieur

L'éclairage intérieur doit prendre en compte une dépense énergétique supplémentaire pour assurer un bon rendu des couleurs. Elle est d'environ 5 % aujourd'hui.

En éclairage intérieur, le CCFLed propose d'utiliser un coefficient réducteur β_i de 0,15 pour les éclairages assurés par des sources LED, sur le niveau d'éclairement en Lux :

$$E_{LED} = (1 - 0,15) \cdot E_{théorique} = 0,85 \cdot E_{théorique}$$

Simple ! peut-être trop ?

La simplicité de cette méthode permet d'obtenir une universalité de la transcription, avec effet immédiat sur les études et les réalisations, et donc sur la consommation énergétique. Si elle est actée par la profession, l'application sera aisée et rapide.

En revanche, cette simplicité d'application a plusieurs contreparties :

- elle ne met pas en valeur la qualité de la lumière émise par un luminaire : les IRC renforcés et la répartition spectrale de la lumière ne sont pas prises en compte, ce qui laisse le champ libre aux IRC inférieurs à 80,
- elle impacte directement les fournisseurs de matériel, avec une réduction des ventes,
- les valeurs sont « figées », ce qui implique une nouvelle définition des coefficients en fonction des améliorations techniques des sources lumineuses.

Il est donc nécessaire d'aller au-delà de cette approche par un simple coefficient. Il faut tenir compte du spectre de la lumière émise. C'est-à-dire tenir compte de l'œil et du cerveau.

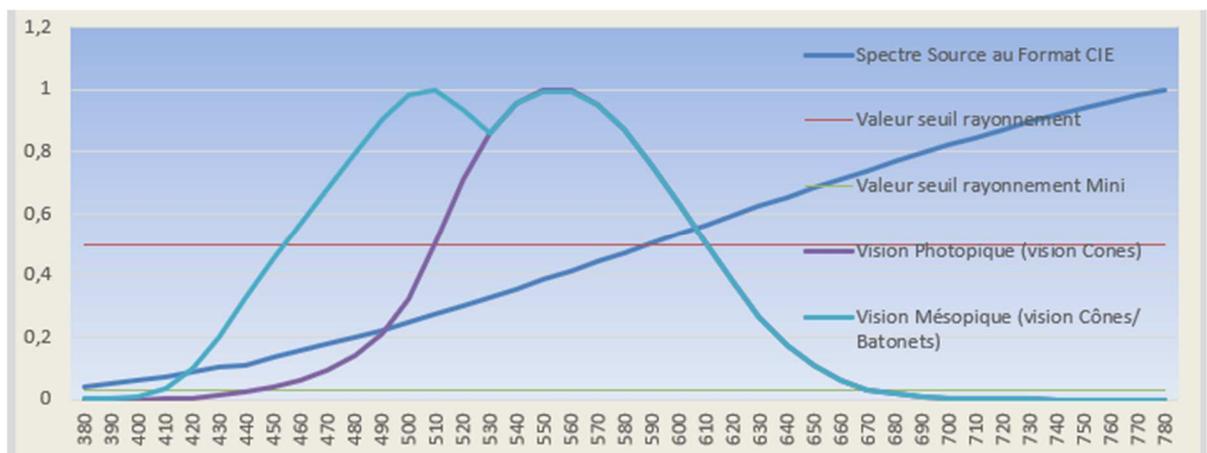
2. ... à une nouvelle méthode d'évaluation de la lumière

La répartition spectrale intègre bien les notions d'Indice de Rendu des Couleurs et de Température de Couleur. En analysant la répartition spectrale de la source, on pourrait donc assurer l'analyse multicritère qui était attendue.

La nouvelle référence est alors à définir. Ce n'est plus la V_{λ} du luxmètre, mais c'est la courbe « idéale » mêlant vision photopique et vision mésopique. Nous aurions alors un système unique pour l'intérieur comme pour l'extérieur.

La méthode consiste à comparer la quantité de lumière, par tranche de longueur d'onde, avec le niveau "idéal" pour la vision humaine.

Nous avons identifié des travaux similaires sur ce thème, chez Marc Bachmann, ingénieur-chercheur représentant d'EDF (centre de recherches des Renardières) qui nous a proposé l'utilisation de son tableau d'analyse :



Ce graphique présente en abscisses la longueur d'onde en nanomètre et en ordonnées l'efficacité lumineuse relative. Dans cet ensemble de courbes figurent :

- une source incandescente en bleu foncé avec sa pente caractéristique,
- deux valeurs seuils : la valeur minimale et la valeur médiane à 0,5.

La courbe à deux bosses reprend les courbes de sensibilité de l'œil en fonctionnement mésopique (vision nocturne) et photopique (vision diurne).

On considère ensuite la répartition spectrale d'une source donnée. La transcription du spectre de la source se fait par ratio d'énergie dans chaque intervalle de 10 nm, entre 380 et 780 nm.

La source obtient alors une notation sur 10 dans une représentation en toile d'araignée, basée sur 4 à 5 critères originaux dépendant :

- de la présence de la valeur mini, pour détecter la largeur du spectre de 400 à 700 nm,
- de l'écart-type entre la courbe et cette valeur de seuil, en rouge, pour détecter le nombre de pics,
- de l'analyse de l'écart entre la représentation spectrale de la source et la courbe à double bosse, selon ses 3 parties : mésopique, photopique et, le cas échéant, scotopique (non pris en compte pour des éclairage uniquement nocturnes).

Les critères ont un poids identique dans cette méthode.

La note sur 10 est retranscrite sur une échelle de 0 à 1 et devient le coefficient ρ . Ce coefficient complémentaire viendra tempérer le premier en fonction de la qualité de la lumière LED utilisée dans le projet. Ce n'est plus seulement le passage en LED qui vous donne « droit » à la réduction de 15% ou 30% du flux.

Nous avons un premier coefficient à 0,7 (pour l'extérieur) ou 0,85 (pour l'intérieur), et dans un deuxième temps, selon la qualité du spectre de la source, on multiplie par ρ :

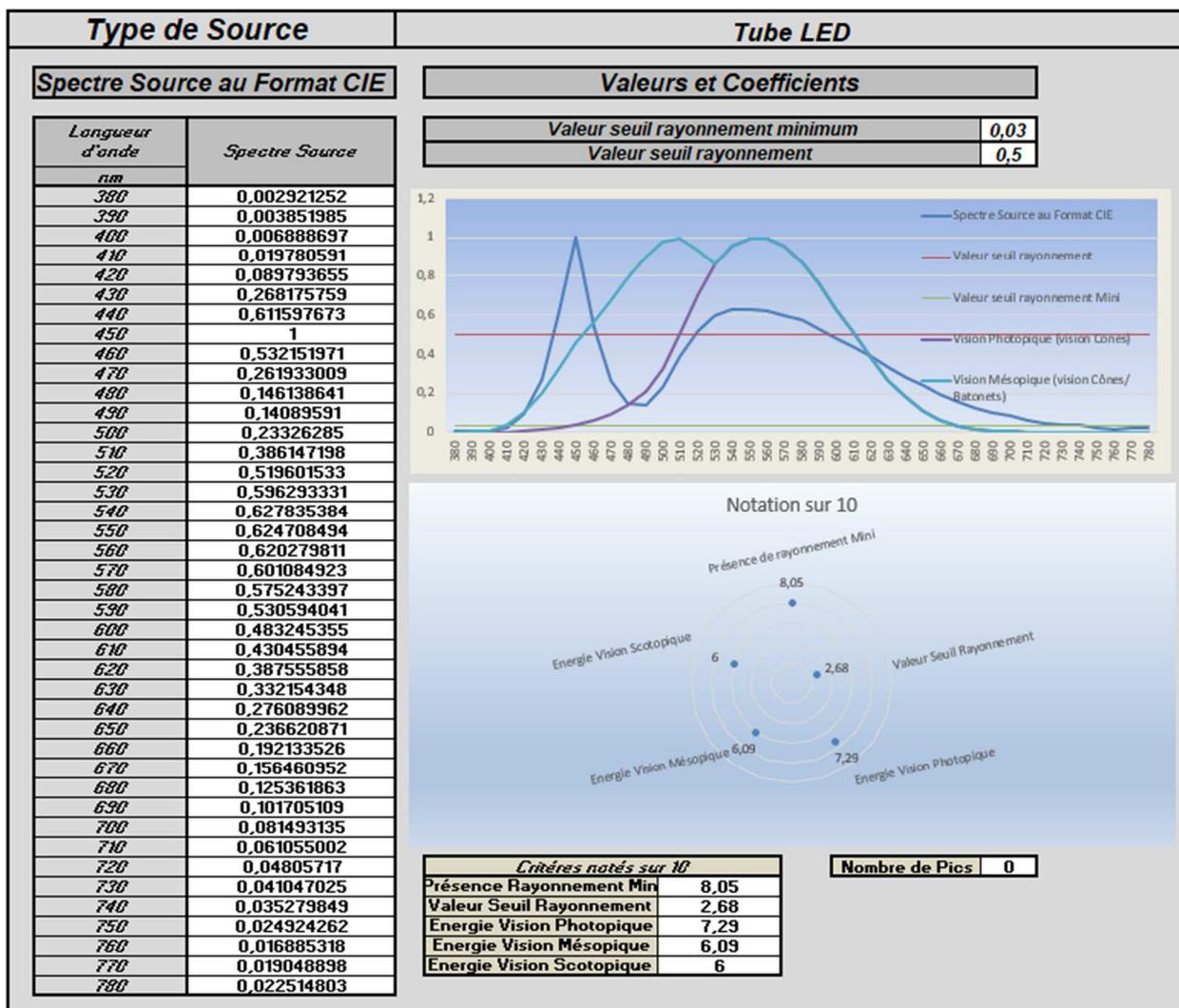
En éclairage extérieur, cette formule devient, pour le niveau d'éclairement en Lux :

$$E_{LED} = (1 - 0,3 \cdot \rho) \cdot E_{théorique}$$

En éclairage intérieur, cette formule devient, pour le niveau d'éclairement en Lux :

$$E_{LED} = (1 - 0,15 \cdot \rho) \cdot E_{théorique}$$

Voici un exemple d'application de cette méthode pour un tube LED :



Sur la colonne de gauche, le laboratoire mesure la quantité d'énergie par bande de 10 nm. La courbe bleu foncé, de la source évaluée, a une certaine distance par rapport à la courbe idéale en bleu turquoise (courbe à double bosse), caractérisée par les 5 valeurs qui apparaissent sur la "toile d'araignée" de droite, avec les 5 notations.

Pour cette source, le coefficient (la note) serait de 6,02 / 10, soit $\rho = 0,602$.

Par exemple, si cet éclairage est dédié à des vestiaires (et hors autres considérations particulières et utilisation exclusive de la norme 12464-1), le niveau d'éclairément moyen théorique est de 200 Lux. L'application de la formule donne :

$$E_{LED} = (1 - 0,15 \times 0,602) \times 200 = 182 \text{ lux}$$

Cela représente une économie d'énergie "lumineuse" d'environ 10 %.

3. Faut-il considérer l'environnement de la scène ?

Les sections précédentes concernent la caractérisation de la source lumineuse. Pour optimiser les niveaux à atteindre, il faut aussi caractériser l'environnement.

La première solution est de considérer uniquement des valeurs ou niveaux réglementaires en luminance (cd/m^2) et non en éclairage (Lux) : on se rapprocherait ainsi de la lumière ressentie par l'œil. Il est également nécessaire de prendre en compte le contraste.

Cette caractérisation de l'environnement pourrait ainsi être fondée sur :

- Les réflexions des supports,
- La lumière environnante et "luminances" externes,
- L'uniformité d'éclairage,
- L'éblouissement, l'orientation des rayons lumineux.

Si l'environnement est brillant, et trop lumineux, ou trop « sombre », il faut compenser par un apport de lumière supplémentaire, pour assurer un bon confort de vision.

La réponse est donc « OUI ! » et c'est tout le savoir-faire des concepteurs lumière qui est requis à cet instant, sans compter leur sens artistique. Nous ne réduisons pas ici le travail de la lumière par quelques formules.

5. CONCLUSION : CONCILIER FABRICATION ET USAGE

Le présent document n'a aucune vocation à devenir un guide en matière d'adaptation des niveaux réglementaires à la technologie LED. Il est le reflet de réflexions internes partagées au sein du CCFLed, basées sur des expérimentations et des retours concrets.

L'objectif n'est pas, non plus, de se résoudre à baisser les niveaux d'éclairage ou de luminance sur nos installations, sans réflexion, sans protocole et a fortiori sans échange avec les fabricants et le législateur.

Il convient simplement de profiter de la meilleure vision offerte à l'œil par certaines sources LED, pour profiter d'économies d'énergie, qui peuvent se révéler massives. Ceci tout en augmentant la qualité de l'éclairage offert à nos utilisateurs, clients et collaborateurs.

La caractérisation des sources, conformément à la proposition du présent document, est réalisable directement par les fabricants, pour afficher un nouvel indicateur aux prescripteurs : le coefficient « good vision ». Nous sommes prêts à travailler avec les fabricants sur un module de calcul simple et efficace pour tous.

En prescrivant des appareils d'un nouveau genre, qui permettent de faire des projets plus sobres, les Clients Finaux de la LED invitent les fabricants et le législateur à favoriser les produits de la meilleure qualité. C'est un gage de nouveaux marchés pour les fabricants, dédiés aux clients les plus avertis. Cela compensera la réduction du nombre de points lumineux dans les projets.

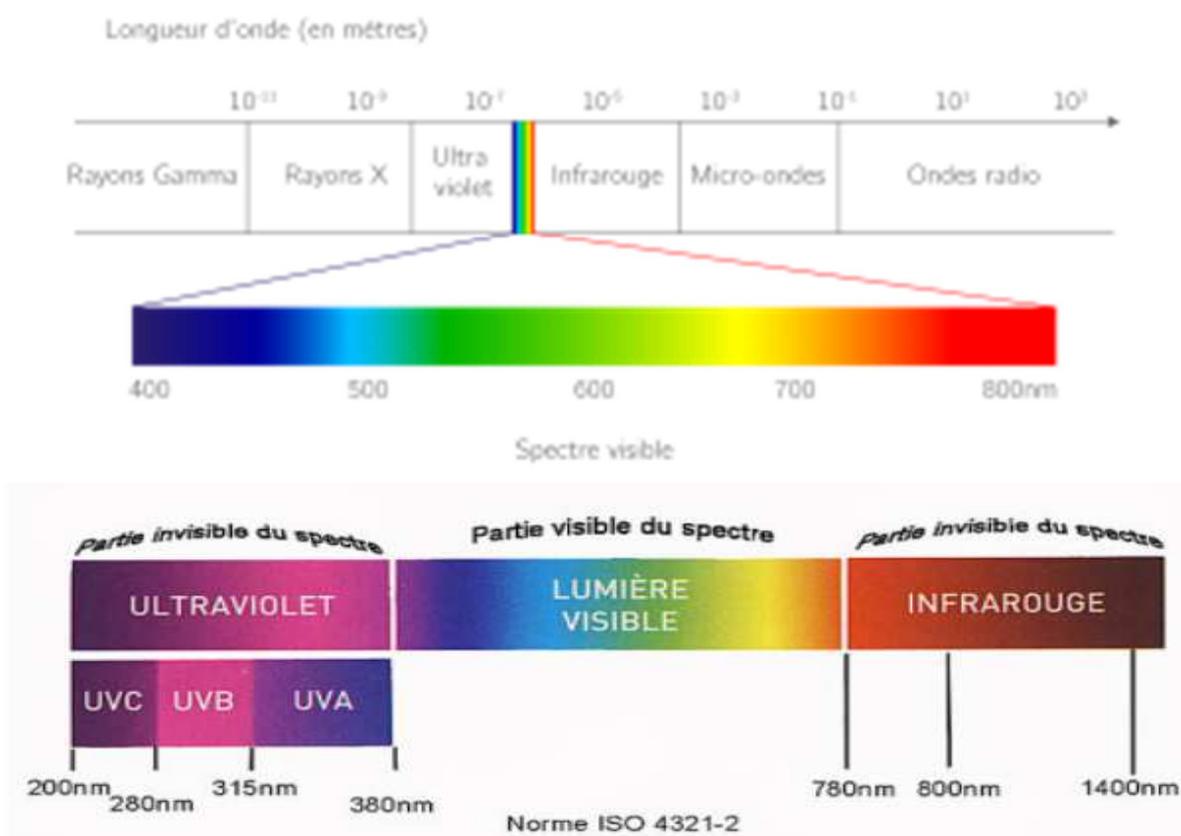
Travaillons ensemble à réaliser des projets d'éclairage plus optimisés pour le cerveau humain ... et pour la planète ...

ANNEXES

6. LA CONNAISSANCE SUR LA LUMIERE

1. La Lumière et l'œil humain

La lumière est un phénomène physique identifié comme un rayonnement électromagnétique qui peut produire une sensation visuelle. Elle est constituée de l'ensemble des ondes électromagnétiques perçues par le système visuel humain, dont les longueurs d'onde, dans le vide, sont comprises entre 380 nm (violet) et 780 nm (rouge).



2. L'œil humain comme capteur

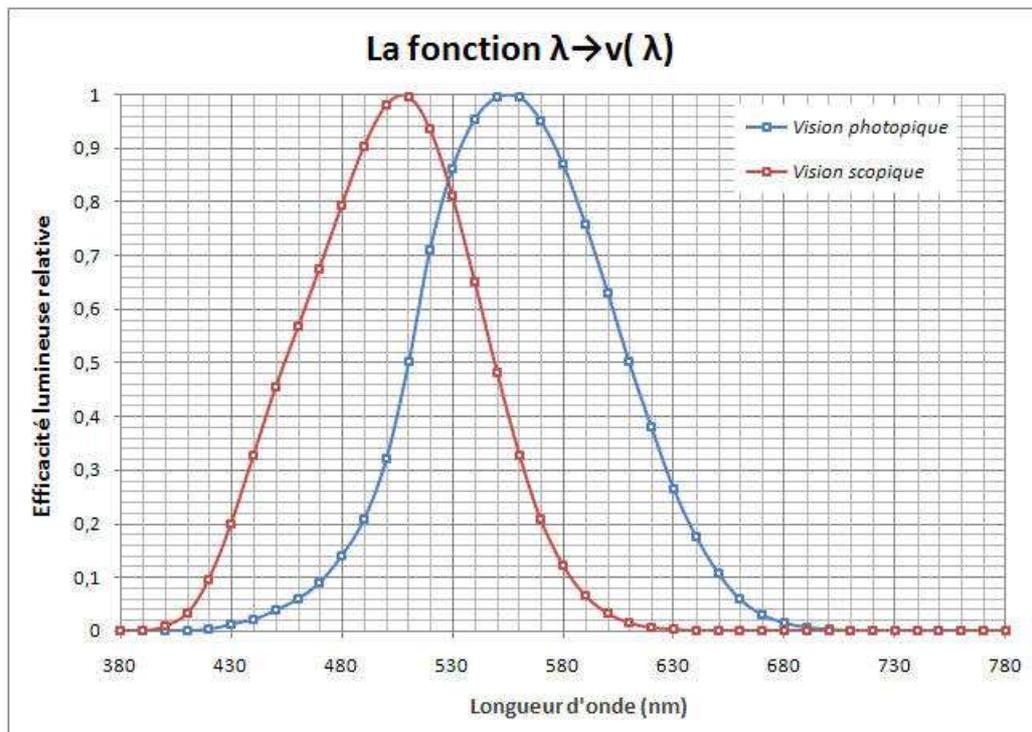
1. Réponse de l'œil en visions photopique et scotopique

L'œil humain n'est sensible qu'à une petite partie du spectre électromagnétique (le domaine visible) et n'a pas la même sensibilité aux différentes longueurs d'onde.

Dans un environnement lumineux (vision diurne, dite photopique), l'œil humain est plus sensible au domaine de longueur d'onde correspondant à la perception du vert-jaune, vers 555 nanomètres.

Dans un environnement plus obscur, la vision humaine ne distingue plus les couleurs, et la sensibilité spectrale relative est décalée vers le bleu. On parle de vision scotopique. Entre les deux domaines de luminosité, on parle de vision mésopique.

Ainsi, deux sources lumineuses de même puissance rayonnée en radiométrie et situées à égale distance d'un observateur n'ont pas forcément la même intensité lumineuse en photométrie. Une source monochromatique rayonnant dans le vert-jaune aura une intensité lumineuse perçue supérieure à une autre rayonnant dans le rouge ou dans le bleu, comme représenté sur la courbe suivante :

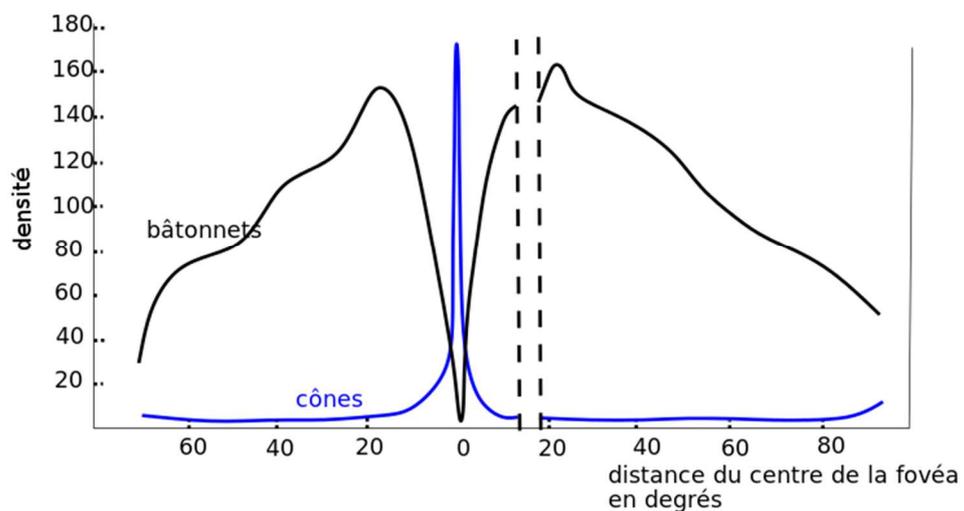


2. Cônes et bâtonnets

Les cônes sont des photorécepteurs situés au fond de l'œil, transformant le signal électromagnétique de la lumière en signal nerveux permettant la vision colorimétrique diurne.

La vision nocturne est assurée par les bâtonnets.

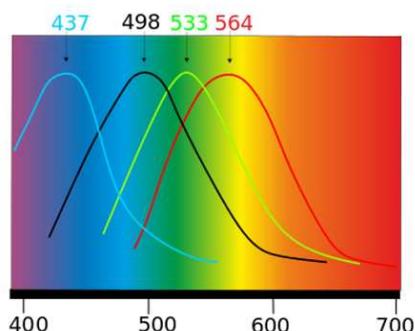
Les cônes sont entre 31 et 42 millions par œil chez l'Homme. Ils ne représentent que 5 % du total des photorécepteurs et sont principalement concentrés sur la fovéa, au centre de la rétine, dans le prolongement de l'axe optique. La partie centrale de la fovéa (ou « fovéola »), sur un rayon de 0,3 mm, ne contient que des cônes. Cette région centrale est dotée d'une grande acuité visuelle.



L'homme perçoit une immense variété de couleurs différentes. Pourtant il ne possède que trois types de cônes ayant une sensibilité plus grande à certaines radiations de longueurs d'onde comprises entre 400 et 700 nm :

- les cônes (B) sensibles aux radiations de basses longueurs d'onde ou cônes cyanolabes (437 nm),
- les cônes (V) sensibles aux radiations de moyennes longueurs d'onde ou cônes chlorolabes (533 nm),
- et les cônes (R) sensibles aux radiations de grandes longueurs d'onde ou cônes érythrolabes (564 nm) (ces derniers réagissant d'ailleurs principalement aux radiations provoquant la sensation jaune⁵).

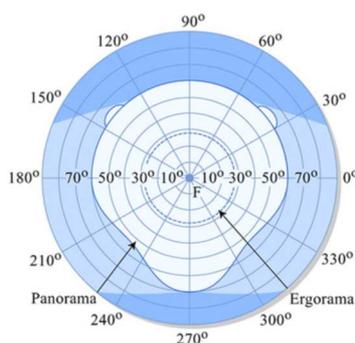
Dans la littérature scientifique anglo-saxonne, l'usage est de qualifier les cônes bleus de S (pour short), les cônes verts de M (pour medium) et rouges de L (pour long) en référence à la longueur d'onde au maximum de sensibilité.



3. Ergorama et panorama

Le champ visuel est réparti en trois zones spécialisées, conformément à la densité des cônes et des bâtonnets :

- sur 1°, la zone de la rétine dite « Fovea » qui a une grande quantité de capteurs visuels,
- sur 60° d'ouverture, l'ergorama, qui est utilisé pour le travail,
- sur 120° d'ouverture, le panorama, la zone dans laquelle les mouvements sont perçus



Cette notion est directement liée au confort visuel avec l'éblouissement.

La recherche du confort visuel passe par l'élimination de l'éblouissement dans le champ de vision et par la limitation des luminances trop fortes dues à l'arrivée de lumière naturelle pendant la journée.

Un rapport de **1 à 3** est acceptable, entre les luminances les plus extrêmes, dans l'ergorama.

Un rapport de **1 à 10** est acceptable dans le panorama de l'utilisateur.

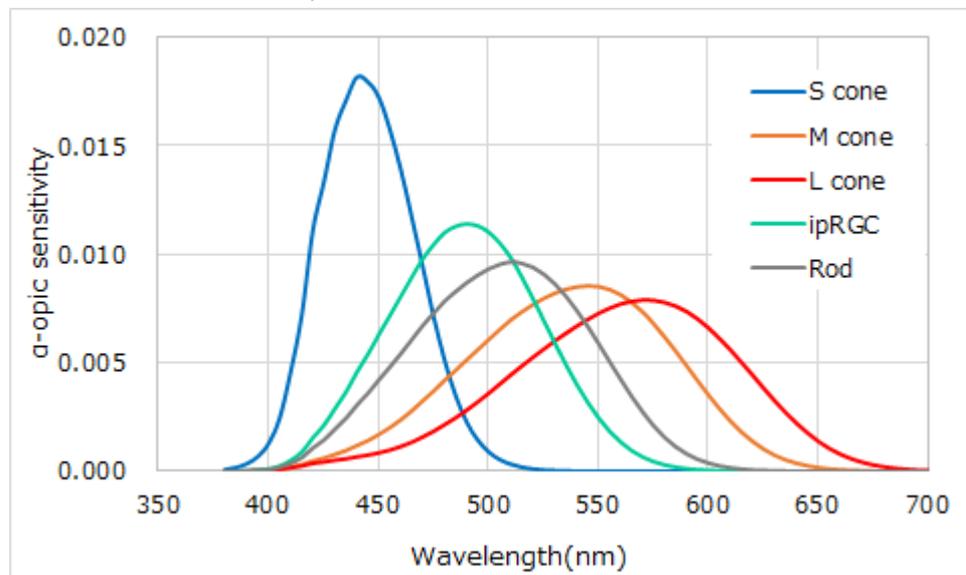
4. Capteurs non-visuels

L'œil n'est pas uniquement un capteur de sensation visible : il dispose de capteurs non-visuels, découverts en 1998

Les IPRGC « *Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells* » sont, notamment, les déclencheurs de la production de mélanopsine. Ce photopigment prend part au contrôle de la sécrétion rythmique de mélatonine – l'hormone du sommeil – ou encore de la cortisone, qui entre en jeu dans le métabolisme des sucres. Il s'agit donc d'un capteur directement en lien avec le rythme circadien, relativement à l'ouverture de la rétine).

Le pic de réception des IPRGC est situé à 485nm.

Ces capteurs se caractérisent par la courbe suivante :



5. Effet Purkinje

L'effet Purkinje (du nom de son découvreur : Jan Evangelista Purkinje) désigne le fait que, chez l'être humain, la vision des couleurs dépend de la luminosité : à forte luminosité, ce sont les couleurs rouges que l'œil distingue le mieux mais lorsque l'illumination diminue, ce sont les couleurs plus bleues qui sont le mieux perçues.

Plus précisément, le pic de sensibilité maximale en vision photopique se situe vers 555 nm (vert-jaune), mais il se déplace vers les courtes longueurs d'onde du spectre à mesure que l'on s'approche de la vision scotopique jusqu'à environ 507 nm (vert-bleu).

3. Les modèles existants

L'œil n'est pas un luxmètre. Ce constat avait déjà ému plusieurs chercheurs de la première moitié du XXe siècle : ils analysaient les choses relativement, et sur plusieurs critères.

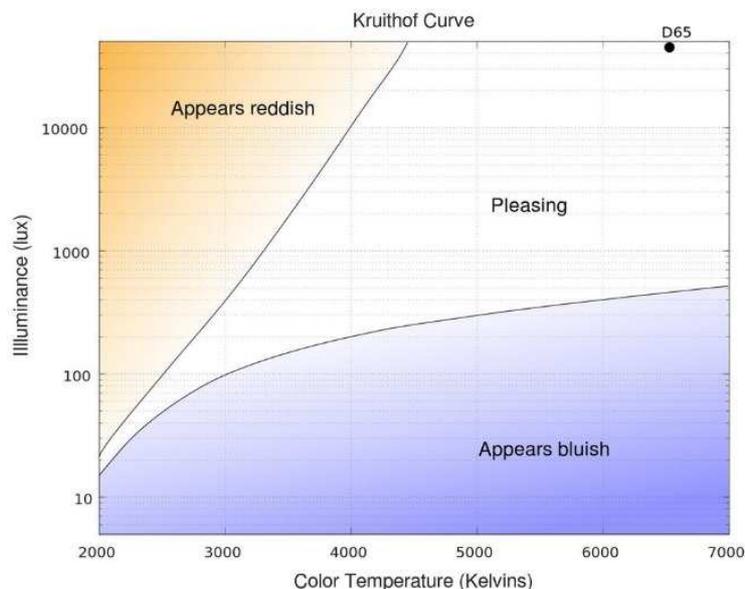
1. La Courbe de Kruithof

À l'émergence de l'éclairage fluorescent en 1941, Kruithof a mené des expériences psychophysiques pour fournir un guide technique pour concevoir l'éclairage artificiel. En utilisant des lampes fluorescentes à décharge, Kruithof a pu manipuler la couleur de la lumière émise et demander aux observateurs de dire si la source leur plaisait ou non.

L'esquisse de sa courbe, telle que présentée ci-dessous, est constituée de trois grandes régions :

- la région du milieu, qui correspond à des sources lumineuses considérées comme agréables,
- la région inférieure, qui correspond aux couleurs considérées froides et sombres,
- la région supérieure, qui correspond à des couleurs chaudes et anormalement colorées.

Ces régions, bien qu'approximatives, sont encore utilisées pour déterminer les configurations d'éclairage appropriées pour les maisons ou les bureaux.

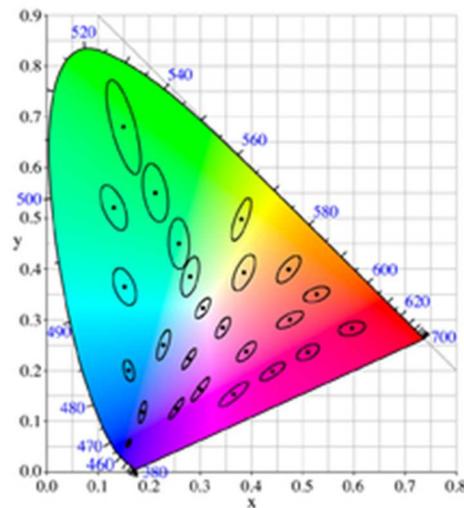


Ces tests ont mis en évidence l'impact de la température de couleur sur la luminosité ressentie, et ce à luminance constante.

2. Les ellipses de MacAdam

David Lewis MacAdam est un opticien colorimétriste, né le 1er juillet 1910, et mort le 9 mars 1998. Il est connu pour ses études sur le seuil de perception différentielle des couleurs, présenté graphiquement sur le diagramme de chromaticité par les ellipses de MacAdam.

En effet, le seuil de différenciation entre couleurs proches dépend de leur position chromatique relative ; par exemple, pour une couleur proche du blanc, il est bien plus faible quand on fait varier la quantité de bleu-vert, en plus ou en moins, que quand on change la quantité de bleu.



3. La loi du contraste simultané des couleurs

Il s'agit d'une caractéristique de la perception humaine des couleurs énoncée en 1839 par le chimiste Michel-Eugène Chevreul.

Le ton de deux plages de couleur paraît plus différent lorsqu'on les observe juxtaposées que lorsqu'on les observe séparément, sur un fond neutre commun. Les plages doivent être d'une dimension suffisante pour qu'on les perçoive dans leur étendue, et ne pas occuper une part trop importante de l'espace visuel. Si les plages diffèrent par la luminosité, la juxtaposition augmente la perception de la différence de luminosité ; si les plages diffèrent par la teinte, la différence de teinte est magnifiée. Les deux effets peuvent se produire simultanément.

Les artistes avaient depuis longtemps noté et utilisé les effets de contraste. Chevreul a énoncé la loi en termes généraux, après l'avoir étayée par une série d'expériences systématiques et un raisonnement fondé sur une arithmétique de la composition des lumières.

7. UNITES DE MESURE ET ENVIRONNEMENT REGLEMENTAIRE

1. Les unités de mesure et le V-Lambda

1. Le lumen

Le lumen quantifie le flux lumineux émis.

Par définition, 1 lumen correspond au flux lumineux émis dans un angle solide de 1 stéradian par une source lumineuse isotrope (ponctuelle uniforme) située au sommet de l'angle solide et dont l'intensité lumineuse vaut 1 candela :

$$1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot 1 \text{ sr}$$

2. Le Lux

Le Lux est une unité de mesure de l'éclairement lumineux (symbole : lx). Il caractérise le flux lumineux reçu par unité de surface. Un Lux est l'éclairement d'une surface qui reçoit, d'une manière uniformément répartie, un flux lumineux d'un lumen par mètre carré.

Le Lux sert de cadre normatif pour définir, dans les législations française et européenne, les niveaux minimum ou moyens requis pour l'éclairage public et l'éclairage des lieux de travail.

3. La candela

Depuis le 12 octobre 1979, la candela est définie de la façon suivante : "la candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est $1/683$ watt par stéradian".

La fréquence choisie correspond à une longueur d'onde de 555 nm, dans la partie vert-jaune du spectre visible, et qui est proche du maximum de sensibilité de l'œil humain à la lumière du jour. Une bougie a un éclat d'approximativement 1 cd dans le plan horizontal ; c'est pour conserver la grandeur correspondant à d'anciennes définitions de l'intensité lumineuse, réalisées avec des bougies que les définitions successives de la candela ont été choisies.

4. Vision humaine et photométrie

Tandis que l'objet de la radiométrie est la mesure du rayonnement sur tout ou partie du spectre électromagnétique, la photométrie s'intéresse uniquement aux rayonnements visibles et quantifie l'impression visuelle qu'ils provoquent. Des sources de puissances rayonnées identiques, mais dont les répartitions spectrales diffèrent, peuvent être perçues avec des éclats très différents. Tout particulièrement, les sources infrarouges ou ultraviolettes ne sont pas visibles, quelle que soit leur puissance. Aussi, la première

évaluation de la sensibilité du système visuel humain, longueur d'onde par longueur d'onde, c'est-à-dire couleur pure par couleur pure, par le biais de la première fonction d'efficacité lumineuse, fut un acte fondateur de la photométrie. Depuis, trois autres fonctions d'efficacité lumineuse spectrale tabulées ont été normalisées à sa suite par la CIE. D'autres ont été publiées mais ne sont pas encore normalisées.

Dans le domaine photopique :

- V_{λ} (CIE 1924) la première d'entre elles, définit l'observateur de référence en vision diurne pour un champ visuel de 2° ; elle est aussi la fonction colorimétrique du système CIE XYZ 1931,
- V_M_{λ} (CIE 1988) apporte une correction à la précédente,
- $V_{10_{\lambda}}$ (CIE 1964) définit l'observateur de référence en vision diurne pour un angle de 10° ; elle est aussi la fonction colorimétrique du système CIE X10Y10Z10 1964.

Dans le domaine scotopique :

- V'_{λ} (CIE 1951) définit l'observateur de référence en vision nocturne.

Valeurs tabulées de la fonction d'efficacité lumineuse spectrale relative $V_{10}(\lambda)$ ¹⁶

$\lambda(\text{nm})$	$V_{10}(\lambda)$								
		400	0,002 004	500	0,460 777	600	0,658 341	700	0,003 718
		405	0,004 509	505	0,531 360	605	0,593 878	705	0,002 565
		410	0,008 756	510	0,606 741	610	0,527 963	710	0,001 768
		415	0,014 456	515	0,685 660	615	0,461 834	715	0,001 222
		420	0,021 391	520	0,761 757	620	0,398 057	720	0,000 846
		425	0,029 497	525	0,823 330	625	0,339 554	725	0,000 586
		430	0,038 676	530	0,875 211	630	0,283 493	730	0,000 407
		435	0,049 602	535	0,923 810	635	0,228 254	735	0,000 284
		440	0,062 077	540	0,961 988	640	0,179 828	740	0,000 199
		445	0,074 704	545	0,982 200	645	0,140 211	745	0,000 140
		450	0,089 456	550	0,991 761	650	0,107 633	750	0,000 098
		455	0,106 256	555	0,999 110	655	0,081 187	755	0,000 070
		460	0,128 201	560	0,997 340	660	0,060 281	760	0,000 050
		465	0,152 761	565	0,982 380	665	0,044 096	765	0,000 036
		470	0,185 190	570	0,955 552	670	0,031 800	770	0,000 025
		475	0,219 940	575	0,915 175	675	0,022 602	775	0,000 018
380	0,000 017	480	0,253 589	580	0,868 934	680	0,015 905	780	0,000 013
385	0,000 072	485	0,297 665	585	0,825 623	685	0,011 130		
390	0,000 253	490	0,339 133	590	0,777 405	690	0,007 749		
395	0,000 769	495	0,395 379	595	0,720 353	695	0,005 375		

5. La mesure du flux lumineux au luxmètre

Les luxmètres modernes fonctionnent selon le principe d'une cellule C.C.D ou cellule photovoltaïque ; un circuit intégré reçoit une certaine quantité de lumière (photons constituant le « signal » qui est une énergie de rayonnement) et la transforme en signal électrique (signal analogique).

Ce signal est visualisé par le déplacement d'une aiguille, l'allumage d'une diode, ou encore l'affichage d'un chiffre (une photo-résistance associée à un ohmmètre jouerait le même rôle). Un filtre de correction de spectre permet d'éviter que les différences de spectre ne faussent la mesure (la lumière jaune est par exemple plus efficace que la bleue pour produire un électron à partir de l'énergie d'un paquet de photons).



8. L'ENVIRONNEMENT REGLEMENTAIRE EN FRANCE ET EN EUROPE

1. Le Code du travail

Les articles R4223-1 à 12 du Code du travail, dans leur version du 7 mars 2008, définissent les exigences minimales à respecter pour "éviter la fatigue visuelle et les affections de la vue qui en résultent et "permettre de déceler les risques perceptibles par la vue".

Les valeurs qui y sont présentées sont exclusivement en **Lux**.

Il est toutefois intéressant de noter les dispositions de l'article 8 :

« Les dispositions appropriées sont prises pour protéger les travailleurs contre l'éblouissement et la fatigue visuelle provoqués par des surfaces à forte luminance ou par des rapports de luminance trop importants entre surfaces voisines.

Les sources d'éclairage assurent une qualité de rendu des couleurs en rapport avec l'activité prévue et ne doivent pas compromettre la sécurité des travailleurs.

Les phénomènes de fluctuation de la lumière ne doivent pas être perceptibles ni provoquer d'effet stroboscopique.

En effet, ces éléments (non quantifiés) traitent de la qualité de l'éclairage ressenti par les observateurs, en tenant compte autant de la qualité de la source (rendu des couleurs, flickering) que de l'environnement. »

2. L'arrêté Accessibilité PHMR aux ERP et IOP

L'article 14 de l'arrêté du 20 avril 2017 relatif aux conditions d'accessibilité des personnes handicapées à mobilité réduite aux ERP et IOP définit les exigences minimales d'éclairage pour les ouvrages concernés et leurs abords.

Les niveaux sont uniquement quantifiés en **Lux** (éclairage).

Cet arrêté établit une corrélation directe et restrictive entre la qualité de l'éclairage et le niveau d'éclairage, sans prise en compte de la qualité de la lumière ni de l'environnement. Pour ce type de besoin, l'absence d'exigence sur l'environnement est d'autant plus surprenante que les personnes concernées et leurs associations mettent en avant le fait que la qualité de l'éclairage est plus lié à la caractérisation des contrastes plutôt qu'à la quantité d'éclairage.

3. Les Normes NF EN 12464-1 et 12464-2

La norme 12462-1 date de juillet 2011 et précise les niveaux d'éclairagements requis dans les lieux de travail intérieurs.

La norme 12462-2 date de mars 2014 et précise les niveaux d'éclairagements requis dans les lieux de travail extérieurs.

Dans ces deux documents, il est indiqué que les critères de conception en éclairage vont au-delà de la simple notion de niveau d'éclairagement. Toutefois, à l'exception de valeur d'indice de rendu des couleurs, les seules exigences concernent **les niveaux d'éclairagement**, sans prise en compte de l'environnement.

4. Le récent Décret sur la pollution lumineuse (arrêté du 27 décembre 2018)

Le décret du 27 décembre 2018 et ses mises à jour viennent définir les règles de limitation des nuisances lumineuses.

Les valeurs-seuil qui y figurent sont exprimées en flux lumineux par unité de surface (lm / m^2).

En complément, le lecteur est invité à prendre connaissance de l'analyse de ce document réalisée par le CCFLed.

5. Les Normes EN 13201-1 et -2

La première norme citée présence les outils de caractérisation des ouvrages routiers, notamment selon leur environnement. Il est intéressant de noter par exemple la prise en compte de la luminosité ambiante au tableau 1, qui impacte la valeur de pondération caractérisant une partie des ouvrages.

A l'issue de cette classification, la norme 13201-2 définit les niveaux de luminances et les uniformités.

Contrairement aux textes précédents, ces normes introduisent deux critères importants :

- la prise en compte de l'environnement, comme ayant un impact sur la vision puisque permettant (ou nécessitant) une adaptation du niveau de luminance requis,
- les niveaux en luminance plutôt qu'en éclairement, tenant ainsi compte du revêtement routier.

Dès lors, ces normes intègrent le fait qu'à éclairement identique, la vision d'une même zone diffère selon le type de surface.

6. European Aviation Safety Agency (EASA) – CS-ADR-DSN

Ce texte réglementaire est spécifique aux plateformes aéroportuaires : il définit notamment (section M.750) les conditions d'éclairage des aires de stationnement des aéronefs.

Les recommandations qui y figurent sont exprimées **en Lux**, sans distinction liée au type de revêtement (enrobé ou béton) ou au type de source lumineuses (Iodures Métalliques, Sodium Haute Pression ou LED).

7. La certification LEED impose Energy Star

Cette certification des bâtiments par rapport à leur impact environnemental, sert de guide de prescription pour les concepteurs, principalement dans la zone US/UK. Elle impose l'installation de produits certifiés « Energy Star ». Ce label dresse la liste des seuils autorisés pour garantir une bonne qualité et durabilité des produits :

- *Efficacy > 55 lm / Watt*
- *CCT between 2700 K and 5000 K*
- *CRI > 80*
- *Good Color Angular Uniformity*
- *≥ 50Khours lifetime (L70)*
- *Good Color Maintenance*
- *Light source shall remain illuminated within application of 750 ms of electrical power*
- *PF ≥ 0.7*
- *Standby Power Consumption of maximum 1.5watts*
- *Frequency ≥ 120 Hz*
- *Use of connectors to ease replaceability*
- *Temperature at the T_c point doesn't exceed 95°C, if T_A<30°C*
- *For recessed downlights : air leakage of less than 2 CFM at 75 Pascals (2 ft³/min is equal to 56.63 l/min) : this implies a marking ("Certified airtight per ASTM E283-04")*
- *Continuous dimming from 100% to 20%, with less than 24dB at 1 meter*
- *Minimum 3 years warranty*
- *RoHS compliant*

On remarque qu'il y a plusieurs critères qui concernent la couleur et la qualité, et non seulement la quantité de lumière produite.

8. Le Dossier pilote « Eclairage des tunnels »

Une particularité fondamentale des tunnels est le besoin d'un éclairage de jour. En effet, dans la plupart de ces ouvrages, la lumière naturelle ne pénètre que sur une distance de l'ordre d'une à trois fois leur plus grande dimension transversale, en fonction de l'orientation et du site. Au-delà, les conditions lumineuses sont insuffisantes pour assurer la visibilité d'obstacles éventuels, ou même le guidage des usagers.

C'est pourquoi il est indispensable d'installer un éclairage artificiel diurne et nocturne qui offre aux usagers des conditions de visibilité et de confort permettant de traverser le tunnel dans les meilleures conditions de sécurité.

En France, le dossier pilote éclairage du CETU donne les concepts et les règles de dimensionnement d'une installation d'éclairage en tunnel routier en fonction des caractéristiques de l'ouvrage (géométrie, trafic, vitesse, orientation, ...) et des luminances extérieures perçues par les usagers lorsqu'ils approchent des têtes d'ouvrage. Ce dimensionnement, réalisé en luminance, prend en compte les phénomènes d'adaptation spatiale et d'adaptation temporelle pour permettre à un usager, tout au long de son déplacement, de distinguer un obstacle gisant sur la chaussée à une distance au moins égale à la distance d'arrêt.

Il faut noter que, pour ce qui concerne le rôle de l'éclairage pour la sécurité en cas d'incident ou d'accident dans un tunnel, la Circulaire interministérielle n°2000-63 du 25 août 2000 relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national impose certaines exigences.

Les niveaux de luminance à mettre place ne sont pas liés à la nature des sources, mais les possibilités qu'offrent les LED, notamment en termes de variations du spectre lumineux et de gradation du flux, permettent d'envisager des éclairages mieux adaptés aux besoins réels des conducteurs et donc plus optimisés en termes de dépense énergétique. En particulier, l'assertivement de l'éclairage d'entrée (dit de renforcement) en fonction des conditions lumineuses extérieures réellement perçues par l'utilisateur, peut permettre des économies d'énergie significatives.

La plage de gradation importante des LED permet aussi de pouvoir adapter au plus près du besoin le niveau de luminance fourni par une installation d'éclairage artificiel. En effet, il est difficile, notamment pour les projets de tunnels neufs, d'obtenir les caractéristiques photométriques complètes de la future chaussée. C'est pourquoi, bien que le dimensionnement soit établi en luminances, les exigences contractuelles de l'installation sont généralement définies en éclairage. Le passage des luminances aux éclairages se fait en retenant les caractéristiques d'une chaussée standard (le plus souvent R2 au sens de la classification CIE) pour un type d'installation donné (symétrique ou contre-flux). Si la luminance réelle mesurée en réception s'avère supérieure au besoin réel de l'utilisateur, cela peut être dû aux caractéristiques photométriques de la chaussée réalisée qui sont plus ou moins différentes de celles de la chaussée type retenue. Bien souvent, la spécularité de la chaussée réelle est plus

forte et le caractère très direct des LED accentue le phénomène. Toutefois, grâce à la large plage de gradation des sources LED, il devient possible d'ajuster la luminance in situ pour le tunnel concerné pour la rendre conforme au besoin avéré, ce qui constitue une seconde source d'optimisation énergétique.