

Évaluation et jugements sur la qualité des lumières à LED⁽¹⁾

Parmi les très nombreuses communications sur les diodes électroluminescentes présentées lors de la dernière session de Pékin de la CIE en juillet dernier, dix-huit conférences ont porté sur les principes fondamentaux de description des LED en termes de vision/couleur, mesures physiques alors que six d'entre elles ont concerné les applications des nouvelles technologies de l'éclairage par semi-conducteur dans les domaines de l'éclairage architectural, intérieur et extérieur. Alors qu'une conférence magistrale donnée par János Schanda (Université de Pannonia, Hongrie) a salué « les cent ans de l'électroluminescence à l'état solide, un challenge pour la CIE », beaucoup d'experts ont présenté à Pékin leurs dernières recherches sur les LED ; si ces dernières se sont imposés dans le domaine de la couleur et de l'éclairage dynamique, il reste encore beaucoup de développement à faire pour améliorer la qualité des LED au moyen de nouveaux référentiels, procédés expérimentaux et normes. En particulier, pour que les valeurs mesurées de la couleur rejoignent les valeurs visuellement observées, Françoise Viénot nous a présenté une étude expérimentale permettant de mieux traduire les aspects de qualité de couleurs et les meilleures solutions à LED élaborées.

(1) Conférence présentée par Françoise Viénot dans le cadre de la 26^e session de la CIE à Pékin (4-11 juillet 2007)

FRANÇOISE VIÉNOT,
JEAN-JACQUES
EZRATI,
CLOTILDE BOUST,
ÉLODIE MALHER
MUSEUM NATIONAL
D'HISTOIRE
NATURELLE, CRCDG
ET CENTRE DE
RECHERCHE ET DE
RESTAURATION DES
MUSÉES DE FRANCE

Lumière blanche et qualité visuelle

Qu'attendons-nous de la lumière artificielle ? Techniquement : une efficacité élevée, une faible consommation d'énergie, une gradation de la lumière, l'absence d'ultraviolet et d'infrarouge dans le cas des musées, et plus généralement de la « lumière blanche » et de la « qualité visuelle ». Face à ces attentes, l'éclairagiste dispose de données quantitatives sur la consommation électrique, les besoins de maintenance, l'émission des sources, et sur le spectre de la lumière émise. Ici, nous nous intéresserons au spectre de la lumière émise par les LED, et nous nous placerons du point de vue de l'utilisateur qui souhaite, pour son environnement visuel, une lumière de qualité.

Typiquement, la lumière blanche est une lumière qui rappelle la lumière « du jour ». Autour de cette notion, l'usager peut préférer une ambiance plutôt « chaude » ou plutôt « froide ». Pour caractériser précisément la coloration d'une lumière blanche, les éclairagistes ont introduit l'échelle de « température de couleur » : les ambiances chaudes sont caractérisées par des températures de couleur basses (inférieures à 3 300 K), les ambiances froides sont caractérisées par des températures de couleur élevées (au-dessus de 6 300 K). Cette échelle reflète uniquement la couleur de la lumière, et n'informe en rien sur son spectre.

Plusieurs idées de la qualité

La qualité peut être envisagée selon différentes perspectives. Il peut s'agir de garantir la fidélité des couleurs d'objets en vente, par exemple, et dans ce cas, l'indice de rendu des couleurs (IRC) renseigne convenablement sur la qualité. Il peut aussi s'agir d'assurer la discrimination fine des nuances d'un tableau de maître dans un musée, de restituer une apparence naturelle dans un cabinet médical, ou encore d'apporter du confort à la tombée de la nuit, de la performance visuelle sur une tâche de détail, de l'agrément en général.

Visuellement, c'est le jugement de l'observateur qui va décider de la qualité. Pour cette raison, l'éclairagiste doit se doter d'outils pour prédire ce jugement. Le schéma adopté est unique. Étant donné une collection d'échantillons colorés, choisis soit pour leur universalité, soit au contraire pour leur spécificité, on va comparer l'aspect de ces échantillons sous la source étudiée à celui qu'ils revêtiraient sous une source de référence. Ce schéma, adopté pour la définition de l'indice de rendu des couleurs (IRC), peut s'appliquer à toute définition de la qualité visuelle : discrimination des couleurs, apparence des couleurs.

Obtenir de la lumière blanche, avec des LED

Par principe, les diodes électroluminescentes émettent de la lumière à spectre étroit, fortement coloré. Pour obtenir de la lumière blanche à base de LED, deux procédés sont majoritairement employés. Soit on assemble plusieurs diodes, typiquement des rouges, des verts et des bleues, dont les lumières s'ajoutent pour fournir une lumière blanche. Soit on fabrique une diode blanche qui n'est rien de moins qu'une diode bleue recouverte de poudre fluorescente. Celle-ci capte une partie du rayonnement bleu et restitue, par fluorescence, un rayonnement de plus faible énergie dans le jaune. A nouveau, l'addition de lumière bleue et de lumière jaune fournit une lumière blanche. Quelle que soit la solution, le spectre de cette lumière artificielle est nettement différent du spectre de la lumière naturelle, ce qui peut poser problème.

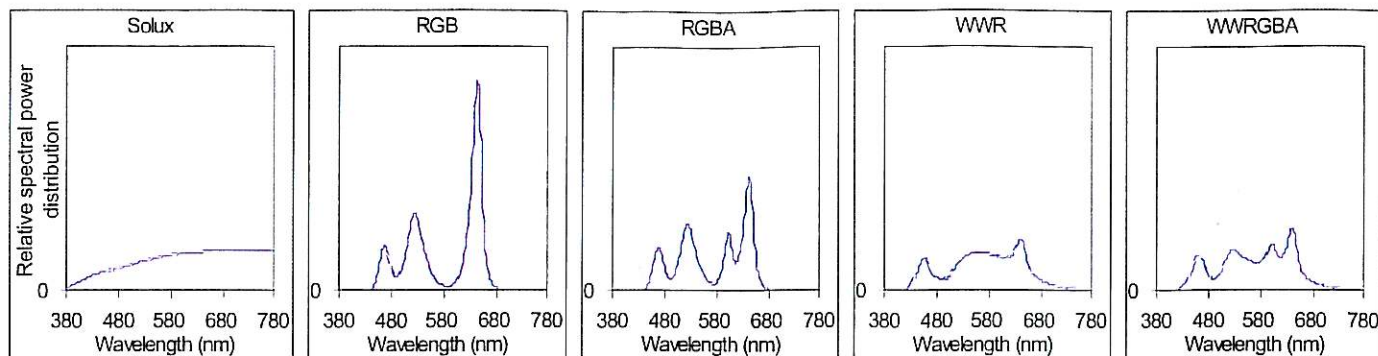


Figure 1. Distribution spectrale des sources utilisées pour l'expérience sur l'apparence des couleurs

En revanche, comparée aux technologies classiques, la technologie à base de LED apporte une grande souplesse dans le choix de la couleur ou de la température de couleur de l'éclairage. Selon le procédé d'assemblage retenu, des calculs colorimétriques permettent de calculer l'intensité des LED. En l'état actuel de la technologie, et en dépit des annonces des fabricants, les flux disponibles avec la technologie à base de LED sont encore faibles, et leur usage est réservé à des espaces confinés ou pour des éclairages d'accentuation.

Confrontation expérimentale

Étant donné que l'IRC rend compte de manière satisfaisante de la fidélité des couleurs des objets de l'environnement, nous avons voulu affiner les jugements de qualité et nous nous sommes appesantis sur la finesse de discrimination et les distorsions apparentes des couleurs. La vision a effectivement un fonctionnement complexe, et le jugement que portent les observateurs sur la qualité de la lumière dépasse un seul jugement global de fidélité.

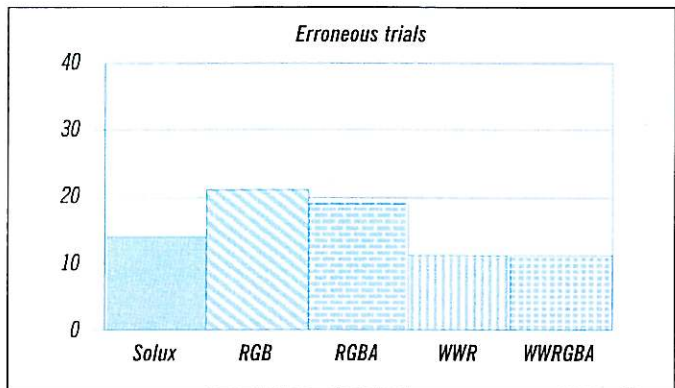
Pratiquement, nous avons monté une cabine à lumière pour installer différents assemblages de LED (figure 1) : des ensembles RGB, des ensembles RGBA (Diodes RGB + Ambre), des LED blanches corrigées par quelques LED rouges (WWR), ainsi qu'un mélange « enrichi » d'un grand nombre de LED colorées (WWRGBA). Notre source de référence est une source tungstène halogène à réflecteur dichroïque fermé (SOLUX), émettant à 4 000 K, une lumière proche de celle du corps noir ou de la lumière directe du soleil.

L'expérimentation a été menée en considérant une installation de référence constituée d'une surface blanche éclairée par des sources dont les caractéristiques colorimétriques figurent dans le tableau 1.

Quarante observateurs ont été invités à classer des pions de couleurs à peine différentes et formant dans leur ensemble un cercle chromatique. Le test est assez difficile pour que les sujets soient

amenés à faire quelques erreurs de classement. L'hypothèse de mise en cause de la source a été faite en cas d'erreurs de classement faites par les sujets. Les résultats montrent que le nombre d'erreurs commises est deux fois plus important sous les sources RGB et RGBA que sous les autres assemblages de LED ou sous la source de référence (figure 2).

Figure 2. Nombre d'observateurs qui ont échoué à l'essai de discrimination pour un éclairage donné de cinq sources (population de 40 sujets).



Toutefois, de manière surprenante, les sujets ont fait remarquer que sous ces sources RGB et RGBA, responsables d'erreurs, les couleurs des pions paraissaient plus vives que sous la source de référence. Nous avons donc monté une deuxième expérience. Vingt sujets ont été invités à évaluer sur une échelle de 0 à 10 le niveau de coloration d'échantillons colorés, formant eux aussi un cercle chromatique. Effectivement, les résultats montrent que sous l'assemblage RGBA, et encore mieux sous l'assemblage RGB, les échantillons rougeâtres et les échantillons bleu-verdâtres gagnaient en coloration apparente.

Conclusion

Nous arrivons ainsi à un paradoxe. Avec certains assemblages de LED RGB ou RGBA, la coloration apparente des surfaces colorées d'une scène peut être rehaussée, précisément là où la discrimination fine des couleurs est appauvrie. Nous en concluons que pour le rendu des couleurs de l'environnement et pour la différenciation des nuances, ces assemblages RGB ou RGBA devraient être évités. Les diodes « blanches » fournissent une lumière beaucoup plus satisfaisante.

Tableau 1. Éclairage E donné par des sources de caractéristiques colorimétriques (x, y), une température de couleur proximale T_{cp} et des indices de couleur R_a et R_{a14}

	SOLUX	RGB	RGBA	WWR	WWRGBA
Luminance L_v – cd/m^2	162	166	162	159	161
Éclairage E – lux	509	522	509	500	506
x	0,3896	0,3893	0,3902	0,3881	0,3878
y	0,3861	0,3858	0,3894	0,3857	0,3862
T_{cp} - K	3 838	3 844	3 848	3 874	3 885
R_a	97,5	19,1	59,9	88,3	95,4
R_{a14}	96,9	3,6	51,3	83,8	93,2