



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/9462>

To cite this version :

Quentin VIDAL, Sylvain MICHELIN, Baptiste LABORIE, Andras KEMENY - Colorimétrie appliquée à la simulation de phare de voiture - In: Journées de l'Association française de réalité virtuelle, augmentée, mixte et d'interaction 3D, Reims Image 2014, France, 2014-11-26 - Journées de l'Association française de réalité virtuelle, augmentée, mixte et d'interaction 3D - 2014

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : archiveouverte@ensam.eu



Colorimétrie appliquée à la simulation de phare de voiture

Q. Vidal^{1,2}, S. Michelin¹, B. Laborie⁴ et A. Kemeny^{2,3}

¹Laboratoire Informatique, Image et Interaction (L3i) - Université de La Rochelle

²Centre de Réalité Virtuelle et de Simulation Immersive (CRVSI) - Technocentre Renault

³Laboratoire d'Immersion Virtuelle (LIV) - Arts et Métiers ParisTech

⁴OKTAL

Résumé

Afin d'optimiser les temps de conception d'un système d'une voiture (phare, système de freinage, etc.), les industries utilisent de manière de plus en plus régulière des logiciels de simulation et de Conception Assistée par Ordinateur (CAO). Ces derniers permettent la visualisation en temps réel de ces systèmes sous diverses conditions (analyse de la résistance à la pression, à la chaleur, etc.).

Le Centre de Réalité Virtuelle et de Simulation Immersive (CRVSI) de Renault dispose d'outils de conception et de maquettage virtuel (CAVE, simulateur dynamique, etc.). Ces derniers s'intègrent dans le cycle de la conception des véhicules en offrant aux utilisateurs la possibilité d'interagir, en temps réel, avec des maquettes virtuelles.

Dans le cadre spécifique de la simulation des phares d'une voiture, il est important d'étudier la représentativité des couleurs affichées. Il est en effet primordial que, pour un outil de validation, la restitution des couleurs soit au plus proche de la réalité physique (phare halogène, LED, Xenon, etc.).

La colorimétrie offre plusieurs outils permettant de calculer une différence colorimétrique. Nous avons ainsi étudié l'uniformité colorimétrique des métriques CIE76, CIE94 et CIEDE2000 afin d'une part, de proposer des coefficients de pondération pour la teinte et la chroma et, d'autre part, de comparer les résultats de chacune afin de déterminer celle qui uniformise le mieux l'espace CIELAB pour la simulation d'éclairage.

Abstract

To minimize at most the conception time of a car subset (headlight, braking system, etc.), industries increasingly use software such as the Computer-Aided Design (CAD). These last enable real time viewing of said workpiece under various conditions (the analysis of resistance to pressure, the heat, etc.).

The Renault's Centre of Virtual Reality and Simulation Immersive (CRVSI) has tools to design and enhance digital mockup (CAVE, dynamic simulator, etc.). These are part of the vehicle design and validation cycle. They offered to the users the ability to interact in real time with virtual models.

In the specific context of headlight simulation, it is interesting to consider the representativeness of the displayed colors. Indeed, it is essential that, for a validation tool, the color reproduction is the closest to the physical reality (halogen headlight must not look like xenon headlight).

Colorimetry offers several tools for calculating a color difference. Among these, the most advanced use coefficients which are dependent on the application. Therefore, to obtain a consistent measure of color difference, it is necessary to calculate the optimum coefficients for this application.

Mots clé : Différence colorimétrique, Psychophysique, Rendu de lumière

1. Introduction

Afin de réaliser des prestations pour les différentes directions de Renault, le Centre de Réalité Virtuelle et de Simulation Immersive (CRVSI) dispose de plusieurs équipements de simulation tels que : deux CAVE dont un à très haute résolution (cinq faces avec une résolution de 4k) ; deux simulateurs dynamiques dont un munit d'une plate-forme mobile sur rail de sept mètres par sept mètres permettant de resti-

tuer, au mieux, la sensation d'accélération et de freinage du véhicule ; un simulateur d'éclairage statique [Kem14].

Ce dernier, équipé de trois vidéoprojecteurs Barco NW-12, permet de visualiser une scène en stéréovision sur un écran courbe avec un champ de vision à 210°. Pour visualiser la scène, le CRVSI a développé un outil permettant de reproduire, en temps réel, l'éclairage des phares de voitures dans un environnement virtuel. Pour ce faire, l'outil a besoin de la cartographie du phare ainsi que de sa couleur associée. En raison de la différence de puissance entre les phares de voiture et des lampes des vidéoprojecteurs actuels, il n'est pas possible de reproduire les mêmes intensités lumineuses.

En revanche, une étude interne Renault a montré, via l'utilisation de la formule de Michelson [Lau14] (voir équation 1), que le simulateur est apte à reproduire les mêmes rapports des luminances entre la réalité et le virtuel ce qui laisse à penser que la représentativité de la scène pour ce paramètre est suffisante.

$$Ratio = \frac{L_x - L_{min}}{L_{max} - L_{min}} \quad (1)$$

Néanmoins, cette étude révèle également des différences colorimétriques. Ces dernières étant plus difficilement interprétables, dans le cadre de LIV, Laboratoire d'Immersion Virtuelle, laboratoire de recherche commune entre Renault et Arts et Métiers ParisTech, une étude psychophysique a été menée afin de déterminer les seuils d'acceptabilité de la différence pour cette application [VMLK14]. Lors de la publication de cette étude, les auteurs ont précisé qu'ils utilisaient une ancienne métrique à la place de nouvelles plus performantes en raison de leur non-connaissance des paramètres liés à leur application. Cet article a pour objectif de déterminer les coefficients optimaux pour cette application ainsi que, d'un point de vue plus général, la meilleure métrique parmi les plus avancées.

2. État de l'art

2.1. Colorimétrie

Avant de comprendre ce qu'est une différence colorimétrique, il est nécessaire d'avoir quelques bases sur les différents espaces colorimétriques.

2.1.1. CIEXYZ

La Commission Internationale de l'Éclairage a défini, dans les années 1930, le premier espace colorimétrique prenant en compte les aspects physiques de la lumière [Sev09] (c'est-à-dire l'ensemble du spectre visible). Elle définit alors trois courbes $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ et $\bar{z}(\lambda)$ représentant approximativement la réponse des cellules photoréceptrices et permettant respectivement le calcul des valeurs X, Y et Z. Pour le calcul de la couleur, ces courbes sont ensuite intégrées par l'intensité de la lumière $I(\lambda)$ (voir équation 2).

$$F = \int_{380nm}^{780nm} I(\lambda) \bar{f}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

Avec $(F, \bar{f}(\lambda)) \in \{(X, \bar{x}(\lambda)), (Y, \bar{y}(\lambda)), (Z, \bar{z}(\lambda))\}$. Dans la pratique cet espace n'est utilisé que pour la mesure des couleurs de surfaces et ce pour deux raisons principales :

- d'un point de vue pratique, cet espace n'est pas facilement interprétable par un humain ;
- l'espace n'est pas uniforme, ce qui signifie que la différence perçue entre deux couleurs n'est pas la même en fonction de la position des couleurs dans l'espace [MAC42].

2.1.2. Espace CIELAB et CIELCH

Afin d'uniformiser/standardiser l'ensemble des espaces colorimétriques pseudo-uniformes existant (Hunter Lab, ANLAB...), la CIE définie, en 1976, l'espace CIELAB. Ce dernier est calculé à partir de l'espace CIEXYZ avec les équations suivantes :

$$\begin{aligned} L^* &= 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - 16 \\ a^* &= 500 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right)^{\frac{1}{3}} - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} \right] \\ b^* &= 200 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right)^{\frac{1}{3}} - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{\frac{1}{3}} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Avec la fonction $f(x)$ (voir équation 4) calculée à partir du triplet XYZ issue de la mesure ainsi que des valeurs $X_n Y_n Z_n$ du blanc de référence, c'est-à-dire le triplet XYZ du diffuseur parfait éclairé par la source lumineuse sous laquelle sont vus les échantillons. Dans la pratique, ces valeurs sont normalisées en fixant Y_n à 100.

$$f(x) = \begin{cases} \sqrt[3]{x} & \text{si } x > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ \frac{841}{108} * x + \frac{4}{29} & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4)$$

Les différentes composantes L^* , a^* et b^* correspondent respectivement à la luminance, une composante chromatique allant du rouge au vert et une composante chromatique allant du jaune au bleu. Tout comme sa prédécesseure, cet espace n'est pas aisément compréhensible puisqu'une couleur est obtenue à partir de deux composantes chromatiques. Ainsi, afin de faciliter la compréhension humaine de cet espace colorimétrique, il est possible de le convertir vers un système cylindrique dans lequel est défini le *chroma* C^* représentant la distance du point représenté à l'axe neutre (l'intensité de la couleur) et la *teinte* h représentant l'angle du vecteur passant par le stimulus avec l'axe des abscisses (la couleur en elle même).

$$C_{ab}^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad h_{ab} = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (5)$$

2.2. Écart colorimétrique

2.2.1. CIE 1976 ΔE_{ab}^*

Premier écart colorimétrique normalisé, le CIE ΔE_{ab}^* est apparu parallèlement à la création de l'espace CIELAB. Comme dit précédemment, cet espace a été pensé pour être le plus uniforme possible. Il est ainsi logique que la première métrique prenne en compte l'uniformité de l'espace et soit égale au simple écart quadratique de ses trois composantes (voir équation 6).

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (6)$$

Dans la pratique, cet espace donne un avis général sur la différence entre deux couleurs, mais ne permet pas de connaître l'origine de ladite différence. Afin d'analyser de

manière plus précise ce premier résultat, il faut regarder le comportement des différents paramètres. Il est ainsi possible de faire une distinction entre l'écart de clarté ΔL^* , l'écart de chroma ΔC_{ab}^* et l'écart de teinte ΔH_{ab} .

2.2.2. CIE 1994 ΔE_{94}^*

Lors d'études complémentaires, l'espace CIELAB s'est révélé n'être pas totalement uniforme. Ainsi, au lieu de créer un nouvel espace colorimétrique, c'est la mesure de la différence qui a été modifiée.

En 1994, se basant sur la formule ΔE_{CMC}^* , la CIE publie une nouvelle métrique qui fait apparaître des coefficients de pondération pour chacune des composantes de l'espace CIELCH. Ces coefficients dépendent des conditions d'observation ainsi que de l'application considérée. Ainsi, la formule ΔE_{94}^* est calculée de la manière suivante :

$$\Delta E_{94}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_{ab}^*}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{ab}^*}{k_H S_H}\right)^2} \quad (7)$$

Avec les fonctions de pondération $S_L = 1$, $S_C = 1 + 0.045C_{ab}^*$ et $S_H = 1 + 0.015C_{ab}^*$ ainsi que les paramètres correcteurs k_L , k_C et k_H qui se calculent en fonction de l'application.

2.2.3. CIE 2000 ΔE_{00}^*

Depuis la parution de la formule ΔE_{94}^* , plusieurs études ont montré que cette dernière n'était pas totalement satisfaisante, et ce pour plusieurs raisons :

- la fonction de pondération pour la luminance était trop simpliste et a été modifiée afin de prendre en compte que des différences étaient jugées de manière trop importante dans certains cas (forte et faible luminance) ;
- la zone des couleurs bleue est considérée comme étant mal jugée [Sev09].

Dans le but de corriger les imprécisions de cette dernière, Sharma *et al.* introduisent un nouveau calcul de la différence [SWD05]. Celle-ci fait apparaître un nouveau terme mettant en relation directe la teinte avec la chroma ainsi que de nouvelles fonctions correctrices.

$$\Delta E_{00}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'_{ab}}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'_{ab}}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \frac{\Delta C'_{ab}}{k_C S_C} \frac{\Delta H'_{ab}}{k_H S_H}} \quad (8)$$

En raison de sa complexité de calcul, cette dernière formule n'est pas souvent utilisée dans l'industrie et l'on lui préfère les plus anciennes (ΔE_{94}^* et ΔE_{ab}^*) qui sont plus faciles à comprendre pour un non-spécialiste.

3. Expérimentation

Cette section a pour objectif de présenter l'expérience de psychophysique qui nous a permis de déterminer les meilleurs coefficients de pondération des formules ΔE_{94}^* et ΔE_{00}^* .

3.1. Condition expérimentale

L'expérience a été réalisée au sein du simulateur d'éclairage Renault où, hormis les projecteurs, l'ensemble des lumières et des écrans étaient éteints. L'observateur s'assailait sur le siège conducteur d'une Renault espace à une distance de 3.5 mètres de l'écran. En face de lui étaient projetés, sous l'environnement SCANeR, deux patches de couleur au format A4 (cf. figure 1). Avec cette configuration et suivant les recommandations de Schanda [Sch07], l'observateur standard 10° a été utilisé pour les transformations d'espace colorimétrique.



Figure 1: Condition expérimentale

À l'aide d'une interface graphique, l'observateur devait donner son avis sur son degré de satisfaction quant à la similarité entre les deux couleurs affichées. Pour cela, il sélectionnait, parmi les quatre catégories sémantiques suivantes, celle qui lui convenait le mieux : "Très satisfait", "Satisfait", "Pas satisfait" et "Très insatisfait". Notre population pour cette expérience était composée de trois experts couleur venant du design de Renault. Cette population, bien que très restreinte, devrait avoir des résultats avec un écart type très faible puisqu'elle est habituée à ce type d'exercice.

3.2. Patches utilisés

3.2.1. Couleur de référence

L'application industrielle visée étant la visualisation de phare de voiture, les couleurs servant de référence doivent être comprises dans l'ensemble des couleurs atteignables par ces types de lampes (LED, Hallogène et Xenon). La norme NF EN 60809/A4 [AFN09] réglementant ces pièces de voiture précise que les couleurs de phare ne doivent pas sortir du gamut de la figure 2.

Dans le but d'avoir le plus de variation couleur dans les références, 6 patches correspondant aux extrémités du gamut ont été sélectionnés ainsi que trois patches supplémentaires correspondant aux différents types de phares produits par Renault. Enfin, afin de réaliser l'expérience dans de bonnes conditions, il fallait s'assurer que le projecteur était capable de reproduire les différentes couleurs. La figure 3 montre la position des différents patches dans le gamut des vidéoprojecteurs.

Au vu de leur position, il semble que la couleur des différents patches soit reproductible par le vidéoprojecteur. Néanmoins, certains sont proches de la limite du gamut. Il est

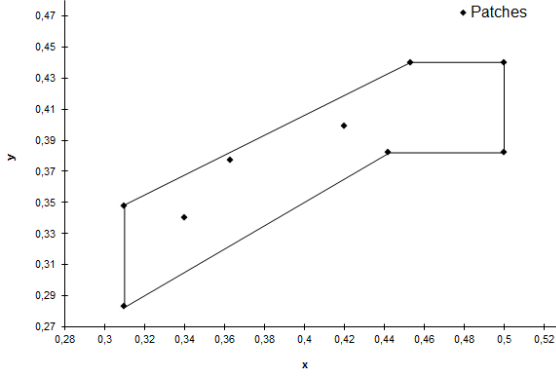


Figure 2: Gamut des phares de voiture [AFN09]

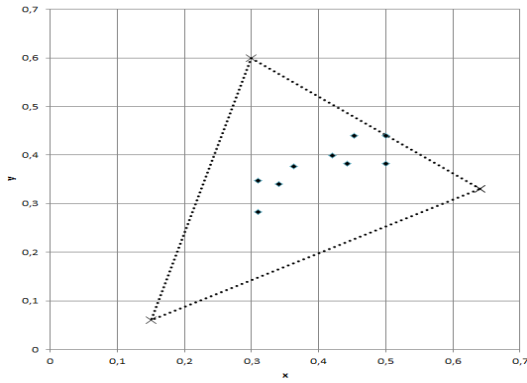


Figure 3: Gamut des vidéoprojecteurs

ainsi possible que lors de la création des patches distants, la couleur ne puisse être affichée convenablement.

3.2.2. Couleur distante

Pour chacune des références, quatre axes de variations ont été utilisés afin de déterminer la distance à partir de laquelle les experts commencent à ne plus accepter la différence entre les deux couleurs. Ces axes correspondent à une différence en Chroma et en teinte (en valeur positive et négative).

Pour chaque axe de variation, en suivant la technique du stimuli constant [EE99], l'observateur est amené à faire varier la différence colorimétrique entre les deux patches. Cette dernière augmente quand il l'accepte et diminue quand il l'a rejeté. Avec cette méthode, pour calculer un seuil, il ne suffit alors plus qu'à calculer la valeur moyenne des retournements. Afin que l'essayeur comprenne facilement cette tâche, la différence entre les couleurs à l'initialisation est très importante ($\Delta E_{ab}^* = 20$ unité).

Afin d'être au plus proche de la valeur optimale du seuil, le pas de variation est divisé par deux au moment de chaque retournement. Une fois la nouvelle distance δ calculée, il suffit soit de l'ajouter à la valeur initiale C_{init} de Chroma (cf. équation 9) ou de calculer la distance angulaire α afin de l'ajouter à la teinte initiale h_{init} (cf. équation 10).

$$C_{dist} = C_{init} + \delta \quad (9)$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{2 \times C_{init}^2 - \delta}{2 \times C_{init}^2}\right) \quad h_{dist} = h_{init} + \alpha \quad (10)$$

4. Résultats

4.1. Différences colorimétriques

Puisqu'il n'est pas possible de reproduire les mêmes valeurs de luminance que celles d'un phare de voiture, le paramètre L^* n'a pas été pris en compte pour le calcul de la différence colorimétrique. Les résultats bruts pour les valeurs du ΔE_{ab}^* moyen pour la population (visibles sur la table 1) attestent de la non-uniformité de l'espace CIELAB puisque les valeurs varient de 1.1 à 8.8 unité. Par ailleurs, comme attendu d'une telle population, la valeur de l'écart type σ est de 0.49 unité ce qui est en dessous du seuil de perception (admis comme égal à 1 pour la première métrique) [Kan97] [MVEO94]. Ce résultat préliminaire montre que les experts sont, comme attendu, d'accord entre eux et que ces chiffres sont suffisamment constants pour être utilisés dans le calcul des coefficients optimaux pour les métriques ΔE_{94}^* et ΔE_{00}^* .

4.2. Calcul des paramètres optimaux

Puisque, pour notre application, la luminance n'est pas prise en considération dans le calcul des distances, seuls les coefficients optimaux k_C et k_h vont être calculé. Pour cela, nous posons, comme postulat de départ, qu'une métrique optimale rendra l'espace le plus uniforme possible ce qui signifie que les différences devraient être le plus proche les unes des autres. Notre problème revient donc à une minimisation de l'écart type σ de l'ensemble des différences D (cf. équation 11).

$$\sigma = \sum_{i=0}^N \frac{\sqrt{(d_i - \mu)^2}}{N} \quad (11)$$

Le calcul des coefficients pour les deux métriques se réalise de manière similaire. Une double itération est effectuée afin de parcourir les valeurs atteignables par les deux coefficients. Pour chaque doublet la différence d_i est calculée puis normalisée entre 0 et 1 afin d'éviter un effet d'échelle (voir équation 12). En effet, les coefficients se mettant au dénominateur, la différence diminue et cela se répercute directement sur l'écart type.

$$d'_i = \frac{d_i - \min(D)}{\max(D) - \min(D)} \quad (12)$$

La table 1 présente les valeurs de différences calculées avec les paramètres optimaux. Ces paramètres valent $k_C = 2.9$ et $k_h = 0.3$ pour ΔE_{94}^* et $k_C = 0.9$ et $k_h = 1.1$ pour ΔE_{00}^* .

À première vue, il semblerait que, contrairement à nos attentes, la formule ΔE_{94}^* fournisse le meilleur résultat puisqu'elle possède, sur sa distribution, la valeur d'écart type la plus faible (0.21 contre 0.65 et 1.28 pour ΔE_{00}^* et ΔE_{ab}^*).

	id	1	2	3	4	5	6	7	8
ΔE_{ab}^*	C-	1.2	2.4	1.9	5.1	6.1	2.1	1.1	1.6
	C+	1.6	2.7	3.2	4.4	4.1	2.9	2.6	2.2
	h-	2.7	2.4	3.7	3.2	7.5	4.5	1.7	3.4
	h+	1.4	2.4	3.5	3.1	8.8	4.6	1.7	2.7
ΔE_{94}^*	C-	0.2	0.3	0.6	0.8	0.6	0.4	0.4	0.3
	C+	0.3	0.5	0.7	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7
	h-	0.4	0.4	0.8	0.4	0.1	0.8	1.5	0.6
	h+	0.2	0.3	0.9	0.5	0.1	0.8	1.2	0.6
ΔE_{00}^*	C-	0.8	1.0	2.6	2.7	2.0	1.4	1.7	0.9
	C+	1.0	1.7	2.6	1.7	1.6	1.9	2.2	2.0
	h-	2.4	2.4	2.0	3.9	2.1	4.1	2.7	2.1
	h+	1.2	2.3	2.0	4.6	2.0	4.2	2.2	2.1

Table 1: Seuil d'acceptabilité de la différence colorimétrique en fonction de la métrique (ΔE_{ab}^* , ΔE_{94}^* ou ΔE_{00}^*), de l'axe de variation et du patch (C désigne la chroma, h la teinte et les signes les axes positifs et négatifs de variation).

Néanmoins ces différentes distributions n'ayant pas les mêmes moyennes, il n'est pas possible de directement les comparer entre elles en raison d'un problème d'échelle.

L'évaluation des différentes métriques a été faite avec l'erreur absolue moyenne en pourcentage ou, en anglais, *Mean Absolute Percentage Error* (voir équation 13). D'un point de vue industriel, en plus de fournir un écart non relatif à la métrique, il a l'avantage d'être interprétable par tout le monde.

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \frac{|d_i - \mu|}{\mu} \quad (13)$$

Avec μ la moyenne de l'échantillon, d_i un élément de D et N le nombre d'éléments de D . À partir de ce résultat (voir table 4.2), il est possible de conclure que les performances du ΔE_{00}^* sont bien supérieures à celles des deux autres métriques.

	ΔE_{ab}^*	ΔE_{94}^*	ΔE_{00}^*
MAPE	40.22%	38.34%	29.79%

Table 2: Erreur absolue moyenne en pourcentage des différentes métriques

5. Discussion et conclusion

Cet article présente une méthode permettant de calculer les coefficients optimaux pour le calcul de la différence colorimétrique du ΔE_{94}^* et du ΔE_{00}^* dans un environnement de simulation immersive.

Cette étude a montré que, comme nous le supposions, la métrique donnant le meilleur résultat est la CIEDE2000. Cette dernière a, par ailleurs, des coefficients proches de ceux conseillés dans diverses sources [Sev09] ($k_C \in [1, 2]$ et $k_h \in [1, 2]$). Afin d'avoir une interprétation plus intéressante de la différence, il serait possible de calculer une échelle d'acceptabilité de la différence colorimétrique [VMLK14] afin de savoir si la différence entre la couleur réelle et virtuelle est gênante pour l'utilisateur final.

Ainsi, pour une validation industrielle de rendu en simulation immersive de conduite, les meilleurs coefficients trouvés sont $k_C = 2.9$ et $k_h = 0.3$ pour ΔE_{94}^* et $k_C = 0.9$ et $k_h = 1.1$ pour ΔE_{00}^* . Par ailleurs, si en raison de la complexité de calcul de ΔE_{00}^* , un industriel ne souhaite pas l'utiliser, il peut aussi bien choisir d'utiliser le ΔE_{ab}^* ou le ΔE_{94}^* puisque leur performance sont équivalentes pour cette application.

Cette étude a ainsi permis de proposer une métrique rendant le système CIELAB le plus uniforme possible permettant une meilleure validation du rendu virtuel des blocs optiques des véhicules Renault. Elle préfigure les études colorimétriques dans le CAVE IRIS de Renault pour la validation de systèmes d'éclairages intérieurs.

Références

- [AFN09] AFNOR : *Lamps for road vehicles - Dimensional, electrical and luminous requirements*. AFNOR pub, 2009.
- [EE99] EHRENSTEIN W. H., EHRENSTEIN A. : Psycho-physical methods. In *Modern Techniques in Neuroscience Research*, Windhorst P. D. U., Johansson P. D. H., (Eds.). Springer Berlin Heidelberg, janvier 1999, pp. 1211–1241.
- [Kan97] KANG H. R. : *Color Technology for Electronic Imaging Devices*. SPIE Press, 1997.
- [Kem14] KEMENY A. : From driving simulation to virtual reality. *Laval Virtual* (2014).
- [Lau14] LAURENT G. : *Ecrans plats et vidéoprojecteurs - 2e éd : Principes, fonctionnement et maintenance*. Dunod, janvier 2014.
- [MAC42] MACADAM D. L. : Visual sensitivities to color differences in daylight. *Journal of the Optical Society of America*. Vol. 32, Num. 5 (mai 1942), 247–273.
- [MVEO94] MAHY M., VAN EYCKEN L., OOSTERLINCK A. : Evaluation of uniform color spaces developed after the adoption of CIELAB and CIELUV, avril 1994.
- [Sch07] SCHANDA J. : *Colorimetry : Understanding the CIE System*. John Wiley & Sons, octobre 2007.
- [Sev09] SEVE R. : *Science de la couleur aspects physiques et perceptifs*. Chalagam éd., Marseille, 2009.
- [SWD05] SHARMA G., WU W., DALAL E. N. : The CIEDE2000 color-difference formula : Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. *Color Research & Application*. Vol. 30, Num. 1 (2005), 21–30.
- [VMLK14] VIDAL Q., MICHELIN S., LABORIE B., KEMENY A. : Colour-difference assessment for driving headlight simulation. *Driving Simulation Conference* (2014).