



N° d'ordre NNT: 2021LYSET008

SOMMAIRE de THÈSE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

opérée au sein de

ENTPE, Lyon

En partenariat industrielle CIFRE n° 2017/1176 avec

Essilor International, Paris

Ecole Doctorale N° 162

MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CIVIL, ACOUSTIQUE

Spécialité / discipline de doctorat :

ÉNERGÉTIQUE

Soutenue publiquement/à huis clos le 09/09/2021, par :

Aiman RAZA

Color Vision Simulation through Ophthalmic Filters

Devant le jury composé de :

ANDRAUD Christine Professeure, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, France

Présidente

KWAK Youngshin Professeure, Ulsan National Institute of Science and Technology, Corée du sud

Rapporteur

HEBERT Mathieu Maître de conférences, HDR, Laboratoire Hubert Curien -UJM, St Etienne

Rapporteur

HANSELAER Peter Professeur KU Leuven, Belgique

Examineur

DUMORTIER Dominique ENTPE, Lyon, France

Directeur de thèse

JOST Sophie ENTPE, Lyon, France

Co-directrice de thèse

DUBAIL Marie Essilor International, Paris, France

Encadrante thèse (entreprise)

Résumé

Aujourd'hui, les lunettes solaires ne protègent pas seulement contre l'éblouissement et les rayons nocifs du soleil, elles améliorent aussi la clarté, la perception de l'espace ainsi que le contraste des couleurs aux longueurs d'onde essentielles à certaines activités : conduite automobile, pratiques sportives... Actuellement, l'industrie ne dispose pas de méthodes standardisées de caractérisation et de valorisation de ces innovations pour des scènes réelles 2D. Ce travail de thèse propose une méthodologie validée permettant de quantifier et d'illustrer l'impact de lunettes de soleil sur des images naturelles/urbaines par le biais de simulations.

L'innovation majeure de cette thèse concerne l'utilisation d'images hyperspectrales qui offrent des informations couvrant un grand nombre de longueurs d'onde de l'UV, du visible et du proche IR, contrairement aux images habituelles en RVB. Ces informations plus riches permettent de manière non invasive, d'analyser les propriétés des objets, allant de leur contenu en couleurs, à leur apparence colorée et à leurs propriétés de réflexion. Lorsqu'elles sont combinées avec la transmission spectrale des verres, les images hyperspectrales permettent de simuler avec une grande précision, la vision de scènes réelles filtrée par des lunettes de soleil.

Cette thèse associe l'imagerie hyperspectrale à la modélisation de l'apparence colorée avec des « image CAMs ». Les modèles d'apparence des couleurs (CAMs) garantissent que le rendu final d'un objet ressemble étroitement à celui de l'objet réel. Pour cela, ils prennent en compte plusieurs phénomènes liés à la vision humaine des couleurs ainsi que les propriétés de l'objet considéré. Les « standard CAMs » traitent les objets comme des points sans prendre en compte les aspects spatiaux de la vision humaine. Les « image CAMs » lèvent cette barrière en simulant la vision des couleurs à l'échelle 2D, ils produisent ainsi des images beaucoup plus proches de la réalité. Les « images CAMs » incluent aussi des techniques qui permettent de simuler des scènes avec une grande dynamique de niveaux de luminance sur des dispositifs d'affichage avec une dynamique beaucoup plus réduite. Ils le font en compressant ces variations tout en respectant au mieux la perception des couleurs et des luminosités pour être au plus proche de la scène réelle. Cette combinaison unique entre l'imagerie hyperspectrale et la modélisation de l'apparence colorée permet de s'assurer que la simulation des lunettes de soleil est précise et peut reproduire fidèlement les améliorations/modifications de la vision apportées par les lunettes de soleil. Pour cette thèse, une large gamme de verres a été simulée : neutres, colorés, fortement colorés avec des opacités variables, etc... La précision des simulations a été validée par le biais d'expériences psycho-visuelles, d'abord sur des experts en science des couleurs, puis sur une population générale.

Pour finir, la thèse propose une métrique permettant de quantifier l'impact des lunettes de soleil sur une scène spécifique ainsi qu'une représentation graphique permettant d'interpréter facilement les changements de couleur qu'elles apporteront sur cette scène. Ces informations aideront ainsi le fabricant à caractériser l'impact des lunettes de soleil sur les scènes où elles seront portées (plages, montagnes, stations de ski, paysages urbains, etc.). Les acheteurs potentiels pourront ainsi effectuer un choix plus pertinent que celui basé sur la vision de l'intérieur du magasin.

Le travail effectué au cours de cette thèse a ainsi implémenté, testé et validé une méthodologie robuste permettant de produire des images simulant avec une grande fidélité la vision de scènes réelles au travers de lunettes de soleil.

Contents

1. Introduction	5
2. Vision des couleurs	7
3. Imagerie hyperspectrale pour la création de stimuli.....	10
4. iCAM06 pour une vision à travers des filtres solaires colorées	13
5. Validation expérimentale: iCAM06	15
6. Caractérisation de shifts colorées induit par des filtres solaire.....	18
7. Sommaire et le conclusion	21
8. Bibliographie.....	23

1. Introduction

L'industrie des verres ophtalmiques propose aujourd'hui des verres qui vont au-delà de la simple correction d'erreur de réfraction en protégeant contre l'éblouissement, les UV; et sont adaptés à diverses activités (conduite (nuit/jour), lecture, informatique) avec un fort accent sur la santé visuelle. L'industrie des lunettes de soleil suit la même tendance, aujourd'hui les lunettes de soleil n'offrent pas simplement une protection contre les rayons solaires intenses mais modifient également la sensation de couleur du porteur en modifiant les contrastes de couleurs selon une activité/un environnement spécifique. Tous les développements mentionnés ci-dessus et autres innovations connexes dans le domaine des lunettes de soleil nécessitent un processus de valorisation qui fait actuellement défaut. Cette absence de processus de valorisation est principalement due à l'incapacité des concepteurs et fabricants à pouvoir représenter avec les moyens d'un outil visuel, l'impact qu'aurait un type de filtre coloré sur leur vision et perception de l'environnement. La prédiction d'une telle vision des couleurs nécessite la collecte de données relatives au porteur et à son environnement visuel, ce qui est un long processus. L'objectif de cette thèse est l'étude, la modélisation et la simulation de la perception des couleurs à travers des lunettes de soleil colorées, dans des environnements naturels complexes, voir Figure 1.



Figure 1, Une scène (gauche) filtrée à travers d'une lunette de soleil (centre) et reproduite sur un écran (droite).

Une simulation de filtres ophtalmiques sur une scène complexe qui reproduit fidèlement la perception des couleurs du porteur nécessite : (1) Une image hyperspectrale d'une scène complexe qui est représentative de situations réelles où des lunettes de soleil sont portées ; (2) Une fonction mathématique appropriée (appelée modèle d'apparence des couleurs ou CAM) qui calcule le phénomène de perception des couleurs associé à la taille, la forme, la couleur et de nombreuses autres propriétés qui dictent la perception des couleurs par les humains dans des scénarios complexes ; et (3) Un ensemble de mesures et d'outils qui peuvent évaluer ces simulations en termes de contraste de couleur, de différence de couleur, etc., et relayer ces informations aux utilisateurs et aux fabricants ou concepteurs.

Ces développements apporteraient plusieurs avantages au domaine des CAMs et en particulier à l'industrie solaire. Pour le fabricant, un CAM capable de simuler avec précision des scènes du monde réel vues à travers un filtre coloré, réduirait le temps et les coûts de prototypage. Pour le détaillant, la possibilité de simuler l'impact d'une lunette de soleil en utilisant des situations réelles telles que des plages, des rues et des paysages ensoleillés au lieu du magasin lui-même donnerait une impulsion aux ventes.

Pour atteindre cet objectif, une base de données d'images hyperspectrales contenant différents types de scènes sera développée. Différentes lunettes de soleil d'Essilor seront simulées sur ces images spectrales sous différentes sources lumineuses. Ces images hyperspectrales filtrées seront converties en images 2D et des corrections de couleurs seront appliquées à l'aide d'un CAM (iCAM06). Ces images corrigées des couleurs seront validées par des expériences psycho visuelles pour identifier les paramètres optimisés

pour la vision filtrée par des lunettes de soleil. Une fois le modèle finalisé, des outils seront développés pour identifier les changements de couleur afin d'étudier de manière synthétique l'impact des lunettes de soleil colorées sur des scènes naturelles complexes, concluant ainsi l'objectif de ce projet.

2. Vision des couleurs

La couleur n'est pas une propriété physique fixe de la matière, mais plutôt une sensation qui change au fur et à mesure que l'interaction entre la matière, la lumière et les yeux évolue. La rétine humaine est sensible à la lumière et elle est composée de photorécepteurs : cônes (trois types), bâtonnets (un type) et cellules ganglionnaires rétiniennes (ipRGC, un type). Ensemble, ces cinq types de photorécepteurs interagissent pour produire la sensation de vision, avec les informations de forme, de taille, de mouvement et de couleur.

Deux théories expliquent ensemble la vision humaine des couleurs : la théorie des couleurs trichromatiques (théorie des couleurs de Young-Helmholtz) et la théorie des couleurs opposées d'Ewald Hering (Hall, 1999; Wyszecki & Stiles, 1982). Le traitement visuel dans l'œil (rétine) suit la théorie trichromatique et une fois que le signal passe au-delà de la rétine (vers le cerveau), la théorie des couleurs opposée tient. La théorie trichromatique suggère que la réponse visuelle de l'œil humain est une combinaison de réponses différentielles des trois photorécepteurs à cône. La théorie de la couleur opposée suggère que les signaux trichromatiques atteignant le cerveau sont ensuite traités par des hiérarchies neuronales. La couleur perçue est une combinaison des réponses différentielles de trois systèmes opposés : l'opposition rouge-vert, l'opposition bleu-jaune et l'opposition noir-blanc (Hering, 1920; Hurvich & Jameson, 1957).

Ces processus de lumière entrant dans nos yeux et nous permettant de voir les couleurs doivent être modélisés et compris à une échelle quantifiée. Des définitions et des calculs photométriques ont été développés pour quantifier la sensation physiologique produite par la stimulation lumineuse physique. Par exemple, la radiance spectrale ($W/m^2 \cdot sr \cdot nm$) caractérise une source lumineuse en termes d'énergie rayonnante à travers le spectre visible. Les supports de transmission de la lumière tels que le verre, les vitrages, les lunettes de soleil, etc. sont quantifiés à l'aide de leur pourcentage de transmission de la lumière (%) dans le spectre visible. Les objets opaques sont caractérisés en fonction de la quantité de lumière (en %) qu'ils réfléchissent à travers le spectre visible.

Les quantités spectrales susmentionnées peuvent être multipliées les unes avec les autres pour obtenir une lumière efficace atteignant l'œil humain. Les propriétés physiques et spectrales ci-dessus peuvent être utilisées pour calculer la réponse pertinente d'un œil humain. Cela a été rendu possible avec l'aide des fonctions de correspondance des couleurs de CIE (CIE CMFs) (Guild, 1931; Wright, 1929). Les CMFs de CIE forment un lien entre la réponse de l'œil humain et la distribution spectrale de la lumière. Depuis les premiers CIE CMF, d'autres ont été développés. La plus notable étant les fonctions de correspondance des couleurs CIE XYZ Cône Fondamental de 10° (CIE 170-1, 2006; CIE 170-2, 2015). Ces CMF utilisent les CMFs à 10° de Stiles & Burch et les sensibilités spectrales des cônes (long, moyen et court) dérivées pour le plan cornéen à un champ de vision de 10° (Stiles & Burch, 1959).

Les valeurs tristimulus CIE nous permettent de comparer les couleurs entre les stimuli étant donné qu'ils sont vus dans des conditions visuelles correspondantes. Ils doivent avoir la même taille, la même forme, les mêmes caractéristiques de surface, les mêmes niveaux de luminance et la même direction de la source lumineuse. De telles conditions sont difficiles à remplir dans la vie de tous les jours et de nombreuses situations montrent que les valeurs tristimulus seules ne sont pas suffisantes pour décrire l'apparence des couleurs (M. Fairchild, 2013; M. D. Fairchild, 2002; Schanda, 2007). De tels phénomènes sont la principale force derrière le développement de métriques de couleur améliorées comme les modèles

d'apparence de couleur (M. Fairchild, 2013). Les principaux phénomènes d'apparence des couleurs sont l'effet Hunt, l'effet Steven, le contraste simultané, Bartleson-Breneman, l'adaptation chromatique, etc.

Les valeurs tristimulus de CIE, obtenues pour deux objets similaires, correspondent lorsqu'ils sont vus dans les mêmes conditions visuelles. Remarquablement, de nombreux objets continuent de correspondre en couleurs même lorsqu'ils sont vus sous différentes sources lumineuses et conditions de visualisation. C'est le processus d'adaptation chromatique qui assure que l'apparence des couleurs des objets reste en grande partie inchangée même si les conditions d'éclairage ont changé. C'est le rétablissement des mécanismes sensoriels de la vision des couleurs. L'adaptation chromatique est induite par un changement de type d'éclairage, précisément, un changement de couleur d'une source lumineuse. Un changement de couleur de la source lumineuse induit une régulation des trois photorécepteurs coniques qui est indépendante pour chaque photorécepteur conique. Les humains peuvent réaliser une adaptation chromatique à l'aide de mécanismes visuels, mais les dispositifs de capture d'images ont besoin d'un ajustement des couleurs pour reproduire cette adaptation chromatique. L'adaptation chromatique est l'étape la plus importante dans les calculs d'apparence des couleurs et est obtenue en appliquant une matrice de transformation mathématique sur les valeurs tristimulus (XYZ) de CIE. Presque tous les modèles d'adaptation chromatique prennent en compte le contrôle de gain des photorécepteurs des cônes. Les trois principales transformées d'adaptation chromatique (CATs) proposées jusqu'à aujourd'hui comprennent CMCCAT97 (CIE 131, 1998), la première CAT standardisée de CIE, suivie de CMCCAT02 (CIE 159, 2004) qui corrige la non-linéarité de CAT97 ; suivi de CAT16 qui a pu résoudre les erreurs de calcul de CAT02 (Li et al., 2017).

Les phénomènes d'apparence des couleurs et le processus d'adaptation chromatique discutés jusqu'à présent montrent que les valeurs tristimulus CIE elles-mêmes ne sont pas suffisantes pour reproduire fidèlement les images en couleurs. Ceci est réalisé par des modèles d'apparence de couleur ou des CAMs. Un CAM est un ensemble de fonctions mathématiques qui sont appliquées sur les valeurs tristimulus CIE pour prendre en compte les divers phénomènes évoqués ci-dessus et plus encore. Divers CAM ont été développés, les trois principales proposées sont: CIECAM97s (CIE 131, 1998) suivie de CIECAM02 (CIE 159, 2004); et le modèle simplifié et amélioré CAM16 (Li et al., 2017). Les différents CAMs mentionnés jusqu'à présent ont un point commun : ils traitent chaque pixel comme un stimulus séparé et prédisent différentes propriétés d'apparence des couleurs pixel par pixel. La vision humaine est de nature spatiale et temporelle. Nous ne voyons pas notre environnement comme des objets ponctuels mais plutôt avec une relation perceptive de divers objets. Fairchild a ajouté un contexte spatial aux CAMs avec l'introduction d'iCAM (M. Fairchild & Johnson, 2002), puis d'une version affinée connue sous le nom d'iCAM06 (Kuang et al., 2007). Chaque étape d'iCAM06 est visualisée sur la Figure 2 en appliquant l'algorithme sur une scène naturelle (lumière de jour).

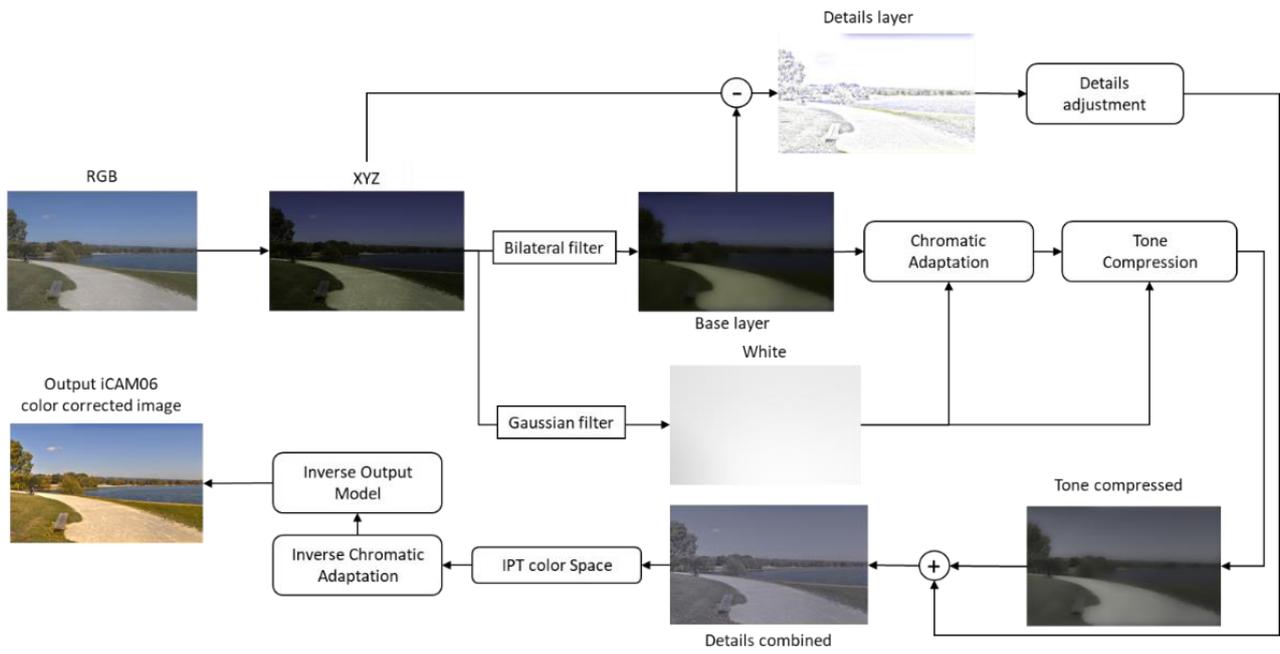


Figure 2, La schéma d'iCAM06 détaillée sur une scène naturelle

3. Imagerie hyperspectrale pour la création de stimuli

L'imagerie hyperspectrale combine des capteurs d'imagerie conventionnels avec la spectroscopie et fournit des données d'image contenant des informations spatiales et spectrales. Pour chaque pixel de l'image, la distribution spectrale de puissance (SPD) est mesurée pour générer des ensembles de données à trois dimensions (ligne, colonne et informations spectrales correspondantes par longueur d'onde). Une caméra hyperspectrale mesure des informations spectrales dans une plage de longueurs d'onde spécifique (UV, NIR, VIS ou un mélange) pour chaque cible spatiale de la scène qui à son tour dépend sur la résolution spatiale de la caméra.

Cependant, la sortie d'un appareil d'imagerie hyperspectrale (HSI) typique est en unités brutes qui ne correspondent pas aux radiances réelles (les pics, les formes et les magnitudes sont différents). Ces données brutes définies par le fabricant de la caméra nécessitent un étalonnage pour produire des radiances en unités SI. L'objectif principal de la calibration est de rapprocher la radiance hyperspectrale de celle d'un appareil de mesure de référence à l'aide d'un facteur de correction (ou d'une matrice de facteurs par longueurs d'onde). Ceci peut être obtenu en divisant la radiance spectrale brute des données hyperspectrales avec celle de l'appareil de référence (comme un spectroradiomètre) pour la même zone de mesure. Une caméra hyperspectrale commerciale Specim FX10, a été utilisée pour établir un protocole généralisé pour tout système HSI similaire. Pour calibrer la caméra hyperspectrale, les captures ont été réalisées dans une cabine de lumière blanche recouverte d'un tissu de réflectance uniforme, éclairée par une source incandescente froide, contenant Macbeth Color Checker Chart (MCC) et un étalon blanc Spectralon. Pour calibrer la radiance brute de la caméra hyperspectrale, les données hyperspectrales brutes associées au Spectralon ont été extraites du fichier de sortie non calibré. Ces valeurs de radiance brutes ont été divisées avec la radiance spectrale de référence correspondante mesurée avec le spectroradiomètre pour obtenir la courbe d'étalonnage.

La courbe d'étalonnage a été vérifiée (pour les erreurs spectrales et les différences de couleur) sous 18 sources lumineuses différentes (composées de sources LEDs, Incandescentes, Fluorescentes et Mixtes, luminance max sur Spectralon=848 cd/m²) avec des Températures de Couleur Corrélées (CCT) allant de 2316 K à 6589 K. Les différences de radiances spectrales entre les données hyperspectrales calibrées et le spectroradiomètre ont été évaluées avec la *Normalized Root Mean Square Deviation* (NRMSD) (Foster & Amano, 2019). La précision colorimétrique a été évaluée avec la formule de différence de couleur CIELAB (ΔE^*_{ab} (CIE 15, 2004)) avec le Spectralon choisi comme blanc de référence (mesuré avec le spectroradiomètre). Les erreurs spectrales moyennes pour différentes sources lumineuses (max NRMSD 11 % pour les incandescents, 7 % pour les fluorescents et 5 % pour les LED) sont trouvés dans les limites identifiées par d'autres études (Foster & Amano, 2019; Vilaseca et al., 2014). La courbe d'étalonnage appliquée sur des captures de sources LED et fluorescentes nous a donné un ΔE^*_{ab} moyen de 4 unités qui était inférieur à la différence visuellement perceptible pour les images (Hordley et al., 2004; Meyer, 1988). Les différences de couleur se sont avérées inacceptables pour les lampes à incandescence, car une quantité importante de lumière parasite a été introduite par les sources de lumière à incandescence. Un ΔE^*_{ab} moyen de 4,5 a été obtenu pour une scène ensoleillée en intérieur (161 cd/m²) sur les 24 patchs de MCC et Spectralon, et un ΔE^*_{ab} de 4,7 a été obtenu sur Spectralon pour une scène ensoleillée en extérieur (1554 cd/m²). Cela a assuré l'efficacité de notre méthode d'étalonnage sur les scènes intérieures et extérieures ensoleillées.

Les données obtenues à partir d'une capture hyperspectrale calibrée peuvent être utilisées pour récupérer des données radiométriques (radiances), photométriques (tristimulus XYZ) et colorimétriques (CIELAB) en plus de l'image RVB de la scène, avec une seule capture. Naturellement, la précision de reproduction de ces ensembles de données différents serait également différente. De plus, selon les montages optiques et les capteurs de la caméra hyperspectrale, cette précision de reproduction peut varier d'un appareil à l'autre.

Pour étudier la possibilité d'utiliser des systèmes HSI pour la recherche in situ, nous avons comparé la qualité spectrale, photométrique, colorimétrique et d'image de deux systèmes HSI différents du même fabricant, sous des sources lumineuses avec différents SPD et températures de couleur corrélées (CCT). L'un des deux systèmes HSI était le Specim FX10, utilisé pour créer le protocole d'étalonnage, tandis que l'autre était le Specim V10E. Le Specim FX10 est portable, relativement léger et moins cher (20K€) tandis que le Specim V10E est encombrant, lourd et très cher (80K€). En comparant leurs spécifications techniques, nous constatons une différence significative dans les résolutions spectrales/spatiales proposées. Nous voulions identifier si les avantages de portabilité proposés par le Specim FX10 ont un coût de précision important. Les deux caméras hyperspectrales ont été calibrées selon le même protocole décrit ci-dessus. La scène de test était une cabine lumineuse contenant : un tableau Macbeth ColorChecker (MCC), 33 échantillons de Munsell et un tableau d'acuité visuelle. Trois projecteurs LED (SourceFour LED, Lustr+, ETC Company) éclairaient la cabine lumineuse à travers un diffuseur. Leurs sept canaux LED ont été mélangés pour produire huit sources lumineuses : S1 à S7 (chacun avec ~ 1796 lux) - des illuminants métamériques à planckiens ou à lumière du jour à différents CCT avec l'indice de fidélité des couleurs (R_f) le plus élevé possible (CIE 224, 2017), et S8 (2349 lux) - un spectre presque plat (proche du spectre d'énergie égale).

Pour l'analyse des données, les données spectrales associées aux 24 patches colorés du MCC et du Spectralon ont été extraites des fichiers de sortie étalonnés. Les radiances spectrales ont été converties en valeurs tristimulus (XYZ) avec les CMF d'observateur standard CIE 2°. De plus, les valeurs CIE $L^*a^*b^*$ ont été calculées en utilisant l'étalon blanc diffus mesuré avec le spectroradiomètre comme référence (CIE 15, 2004). Les images colorées ont été reconstruites à l'aide du modèle d'apparence de couleur d'image iCAM06 (Kuang et al., 2007). Les différences de radiances spectrales entre les systèmes HSI et le spectroradiomètre ont été évaluées avec la *Normalized Root Mean Square Deviation* (NRMSD). La précision photométrique a été quantifiée par l'erreur de pourcentage absolu moyen (MAPE (Inanici & Galvin, 2004)) entre les valeurs de luminance (Y) capturées avec les systèmes HSI et les valeurs de luminance mesurées avec le spectroradiomètre. La précision colorimétrique a été évaluée avec la formule de différence de couleur CIELAB (ΔE^*ab) avec le Spectralon choisi comme blanc de référence (mesuré au spectroradiomètre). Deux métriques de qualité d'image, sans aucune exigence de référence, ont été sélectionnées pour calculer objectivement la qualité de l'image RVB produite par chaque instrument. Il s'agissait de: Blind/Referenceless Image Spatial Quality Evaluator (BRISQUE) (Ghadiyaram & Bovik, 2016) et Naturalness Image Quality Evaluator (NIQE) (Mittal et al., 2013).

Le Specim V10E s'est avéré être le système avec la plus haute précision, acceptable pour n'importe quel usage, qu'il soit spectral (moyenne NRMSD 1,8 %), photométrique (moyenne MAPE 4,3 %), colorimétrique (moyenne ΔE^*ab 1,7), ou pour des expériences psychophysiques via des images RVB traitées par iCAM06 (moyenne BRISQUE 27, moyenne NIQE 3). Le Specim FX10 est un bon candidat pour une utilisation spectrale (moyenne NRMSD 3,3%) et photométrique (moyenne MAPE 4,5%) mais

pour la reproduction colorimétrique, il doit être évité pour les sources lumineuses chaudes ($CCT \leq 3000K$) car le ΔE^*_{ab} individuel dépasse 6 unités (qui est la limite des différences de couleurs imperceptibles pour les images). Le Specim FX10 avait également un score BRISQUE moyen significativement plus élevé (donc moins bon) de 37 et un score moyen NIQE de 3,9. Au vu de ces métriques, il a été décidé d'utiliser le Specim V10E pour tester les modèles d'apparence des couleurs dans le cadre de ce projet.

4. iCAM06 pour une vision à travers des filtres solaires colorées

Une fois que nous avons compris les technicités de la vision des couleurs et élaboré les techniques d'imagerie pour acquérir des images spectrales, nous devons les combiner pour créer des images 2D corrigées pour les couleurs à partir d'images spectrales. Cette section décrit les paramètres optimaux pour la création de stimuli et le cadre complet pour la simulation de lunettes de soleil colorées en utilisant la technologie d'imagerie hyperspectrale et iCAM06.

Les images hyperspectrales sont assez lourdes en termes de taille, bien qu'il soit possible de réduire la taille d'une image hyperspectrale en faisant des compromis sur certains paramètres, comme la résolution spectrale et la plage spectrale. La question est : cela aurait-il un impact sur la précision colorimétrique des données hyperspectrales ? Par exemple, la résolution spectrale de base de Specim V10E est de 1,3 nm. En prenant des mesures de radiance spectrale tous les 5,4 nm au lieu de 1,3 nm, la taille de l'hypercube peut être réduite de 4 fois tout en restant dans la résolution spectrale optimale recommandée par la CIE de ~ 5 nm (CIE 15, 2004). Une comparaison des différences colorimétriques obtenues pour une résolution spectrale de 1,3 nm - 2,7 nm et 5,4 nm a confirmé que l'augmentation de la résolution spectrale de 1,3 nm à 5,4 nm n'avait pas d'impact significatif sur la précision colorimétriques des captures hyperspectrales (différence max en $\Delta E^*=0,03$). Outre la résolution spectrale, la gamme spectrale de la capture peut également impacter la taille de l'hypercube. Le Specim V10E et le Specim FX10 sont tous deux capables de mesurer des données de radiance dans la gamme spectrale de [400-1000] nm. Étant donné que l'objectif est de produire des images à partir des données hyperspectrales, toutes les données en dehors de la plage visible du spectre peuvent être ignorées. Avant de décider d'utiliser une gamme spectrale plus petite que les CMF de CIE (par exemple [400-780] nm), il fallait vérifier qu'une gamme spectrale plus petite ne réduirait pas la précision de l'hypercube. Pour cela, les différences de couleur obtenues à partir des radiances hyperspectrales de différentes gammes spectrales ont été comparées. Les gammes spectrales testées étaient : [400-830] nm, [400-780] nm, [400-720] nm et [400-650] nm pour une scène éclairée par le soleil. Aucune différence n'a été trouvée entre les gammes spectrales de [400-830] nm à [400-780] nm ou [400-720] nm, bien que des différences significatives aient été obtenues pour la gamme spectrale de [400-650] nm. Dans le cadre de ce projet, le domaine spectral des hypercubes était ainsi limité à [400-780] nm..

Une fois l'hypercube prêt, l'étape suivante consiste à appliquer la lunette de soleil (filtre) sur l'hypercube et à créer une image (avec iCAM06). La création du cube de radiance filtré $\phi(\lambda)_f$ peut être décrite à l'aide de l'équation: $\phi(\lambda)_{f(i,j)} = \phi(\lambda)_{o(i,j)} * \tau_v(\lambda)$, où, $\phi(\lambda)_{o(i,j)}$ est la radiance hyperspectrale d'origine non filtrée et calibrée pour le pixel (i, j) et $\tau_v(\lambda)$ is the spectral transmittance of a particular sunglass. est la transmittance spectrale d'une lunette de soleil particulière. Une fois que l'hypercube filtré est prêt, l'information spectrale est réduite aux valeurs tristimulus fondamentales de CIE (XYZF10°) en utilisant l'équation: $XYZ_{f10(i,j)} = k \int_{\lambda} \phi(\lambda)_{f(i,j)} \overline{xyz}_{F10}(\lambda) d\lambda$. Le canal Y de l'espace colorimétrique XYZ contient les informations de luminance absolue de la scène capturée et a été utilisé pour créer une carte de luminance de la scène en créant une image scalaire pseudo-colorée du canal Y.

Les données XYZF10 filtrées sont maintenant prêtes à être traitées avec iCAM06, en utilisant les paramètres par défaut IPT power factor $pval=0,75$; gamma value pour le réglage de surround $gval=1$ et degré d'adaptation $D=0.9$ pour les scènes du monde réel. Le chemin complet pour la simulation de la vision colorée à travers des lunettes de soleil est décrit dans la Figure 3.

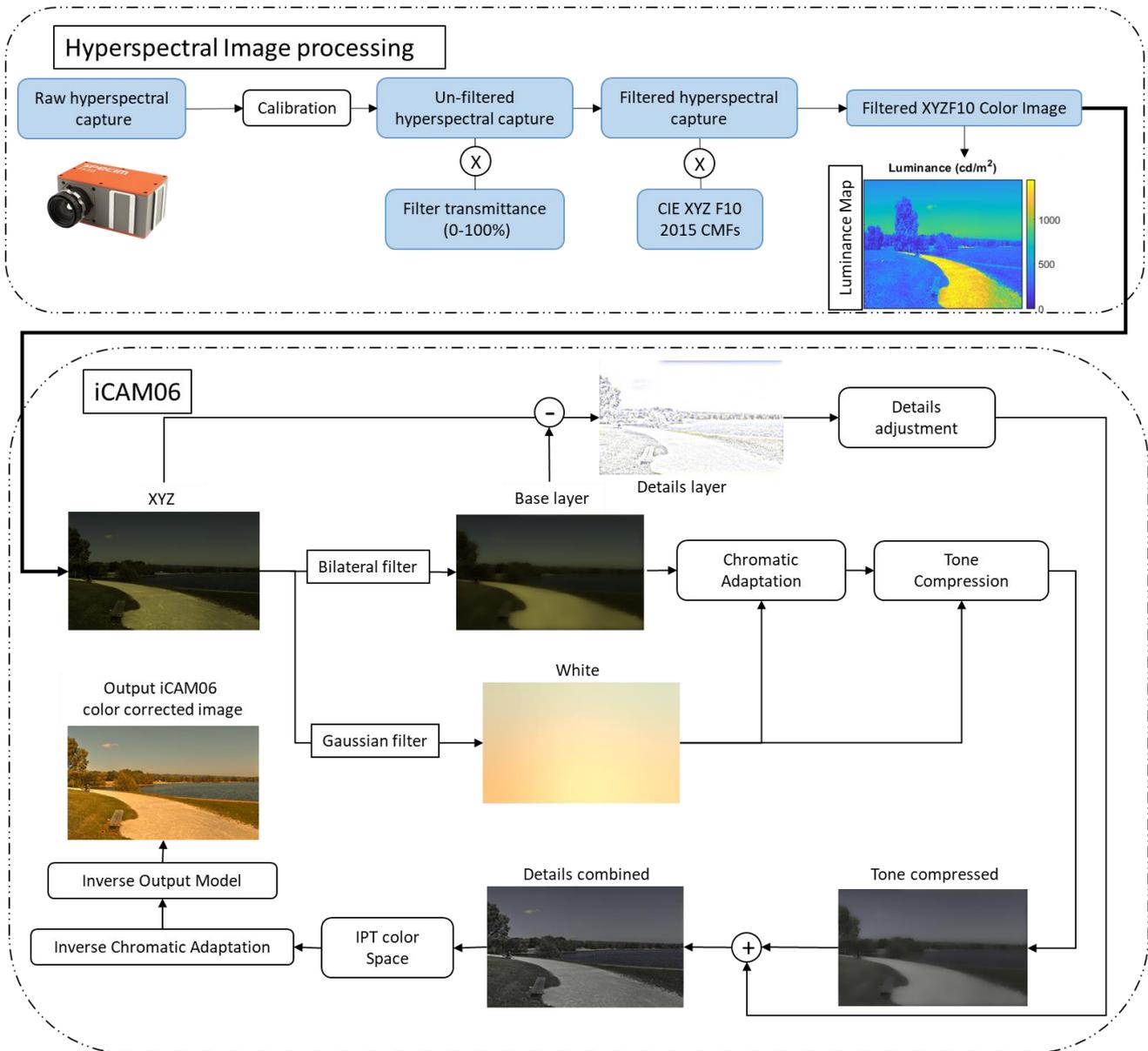


Figure 3, Schéma pour la création d'images filtrées via imagerie hyperspectrale et iCAM06

En utilisant le chemin ci-dessus, une base de données d'images hyperspectrales a été créée avec des conditions variables de chromaticité et de la luminance (extérieur ensoleillé, extérieur nuageux, espaces intérieurs, portraits, etc.). Certaines des images hyperspectrales sont accessibles au public (à <https://www.entpe.fr/en/ressources-p2e>) (Cauwerts & Jost-Boissard, 2019). Notre base de données hyperspectrale contient 50 images. Les images extérieures contiennent des scènes naturelles avec des paysages de mer, de lacs et de montagnes ; et des scènes urbaines, avec les paysages de la ville, des rues, des places, des bâtiments (sans/avec des gens) et des jardins. Les images intérieures comprennent des salles d'attente, des bureaux, des salles de réunion, des classes, des tables de bureau, des couloirs et des cabines lumineuses. À l'exception des configurations de cabines lumineuses, les scènes d'intérieur sont partiellement ou entièrement éclairées par la lumière du jour, via des velux et des fenêtres. La plage dynamique de luminance pour les scènes extérieures est comprise entre 0:2000 et 0:25000 ($Lv_max \in (2000 \text{ cd/m}^2, 25000 \text{ cd/m}^2)$). Pour les scènes d'intérieur, la dynamique de luminance est entre 0:300 et 0:5000 ($Lv_max \in (300 \text{ cd/m}^2, 5000 \text{ cd/m}^2)$).

5. Validation expérimentale: iCAM06

Dans ce chapitre, nous validerons notre méthode de création de stimuli par le biais des expérimentations psycho-visuelles. L'utilisation d'iCAM06 en tant que HDR-TMO (High Dynamic Range - Tone Mapping Operator) a été quantifiée par une expérience psychophysique menée par l'équipe de Fairchild (Kuang et al., 2007). Ils ont traité 12 images extérieures/intérieures avec iCAM06 et les ont comparées à quatre TMOs: *bilateral filter* (Durand & Dorsey, 2002), *photographic reproduction* (Reinhard et al., 2002), iCAM (M. Fairchild & Johnson, 2002), et *histogram equalization* (Larson et al., 1997) ainsi que deux méthodes de conversion Photoshop CS2 HDR: *Exposure-Gamma* et *Local Adaptation*. Les attributs testés étaient la préférence de rendu d'image et la précision perceptive de la reproduction HDR. Les images ont été présentées à l'aide d'une méthode de comparaison par paires. Pour les scores de préférence, les observateurs ont été invités à comparer les 6 versions des 12 images pour les préférences individuelles en fonction d'attributs tels que le contraste, le naturel, la netteté, etc. Pour une précision de perception, les observateurs ont comparé la scène originale avec la reproduction présentée sur l'ordinateur. Ils devaient regarder la scène originale dans une pièce différente, puis évaluer la précision de la reproduction perceptive avec leur mémoire (avec une adaptation chromatique obligatoire de 30s). Les résultats ont montré que iCAM06 était le TMO préféré pour le rendu d'images, tandis que pour la précision des couleurs perceptuelles, iCAM06 fonctionnait de manière similaire aux méthodes Photoshop mais mieux que les quatre TMO testés. Cependant, cette étude ne valide pas l'utilisation d'iCAM06 pour représenter les changements d'apparence des couleurs des scènes vues à travers des lunettes de soleil. Les lunettes de soleil les plus populaires de la catégorie 3 induisent une réduction de $> 80\%$ de la luminance, parfois accompagnée de forts changements de couleur. De plus, peu ou pas de données sont disponibles pour comparer la précision de reproduction de scène non HDR de l'iCAM06, c'est-à-dire son utilisation en tant qu'image CAM. La méthode de comparaison d'images utilisée par Kuang et al dépend sur la mémoire. Une série d'expériences menées par Wei et al. (Wang et al., 2019; Wei et al., 2017) a évalué des méthodes de comparaison de paires basées sur la mémoire et la comparaison côte à côte (conditions haploscopiques). La méthode haploscopique s'est avérée être une méthode plus précise pour la comparaison des paires.

Ainsi, pour tester la précision de reproduction des images hyperspectrales traitées par iCAM06 pour simuler les apparences de couleurs vues à travers des lunettes de soleil, une série d'expériences a été conçue. L'objectif était de tester une large gamme de lunettes de soleil et d'identifier leur précision de reproduction. Parallèlement, diverses modifications ont été introduites dans iCAM06 pour certains composants qui ont connu une évolution majeure depuis le lancement de l'iCAM06. Ces modifications ont été comparées à l'iCAM06 d'origine à chaque étape expérimentale. Une installation de cabine lumineuse recouverte d'un tissu blanc uni de réflectance uniforme ($\rho=0,8$) a été choisie pour une analyse en intérieur des scènes complexes. Un panier de fruits et légumes en plastique était mis dans la cabine, contenant des pommes (rouges et vertes), des piments (rouges et verts), des orchidées bleues, des aubergines, des tomates, une orange et un citron. Pour avoir une référence, un MCC de 24 patchs et un Spectralon ont également été ajoutés dans la scène qui était illuminée par trois projecteurs LEDs. Un écran EIZO ColorEdge CG277 a été utilisé pour présenter les images capturées et traitées. Un champ visuel haploscopique côte à côte a été choisi pour évaluer les différentes modifications d'iCAM06 (sur l'écran) à côté de la scène d'origine (cabine) comme le montre la Figure 4. Les lunettes de soleil n'avaient qu'une seule lentille sur l'œil gauche pour visualiser le cabine lumineuse et couvrait tout l'œil gauche. La lentille droite avait été retirée afin que les observateurs puissent comparer la simulation des lunettes

de soleil sur l'écran EIZO. Une échelle de notation de 0 à 10 a été choisie pour évaluer la précision de reproduction de la scène originale (cabine lumineuse) projetée sur l'écran EIZO. Une note de 10 impliquait une « reproduction des couleurs parfaitement précise », tandis qu'une note de 0 signifiait « une reproduction pas du tout précise ».

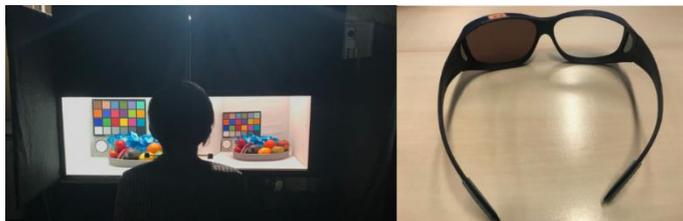


Figure 4, Méthode de la présentation d'images (gauche) et filtres solaires de test (droite)

Le degré d'adaptation chromatique dans iCAM06 a été fixé à $D=0.9$ pour l'expérience 1. Les paramètres supplémentaires pour iCAM06 (qui restent inchangés pour les autres expériences) étaient : contraste global, $p_{val} = 0,75$ (valeur par défaut pour les scènes d'intérieur) et le paramètre de facteur de surround, $g_{val} = 1,5$ (surround sombre) avec un gamut d'Adobe RVB. Les valeurs colorimétriques et photométriques des éclairages testés vues à travers des filtres testés sont présentées dans la Figure 5.

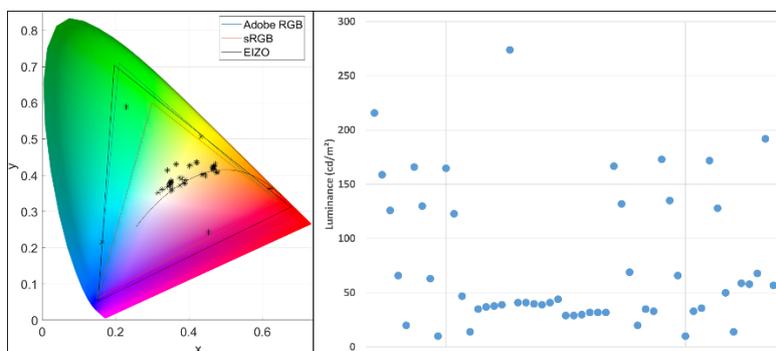


Figure 5, Coordonnées de chromaticité (à gauche) et niveaux de luminance (à droite) testées

Les observateurs ont reçu une introduction et des instructions à l'expérience à partir d'un document déjà préparé. Avant de commencer l'expérience, les observateurs ont effectué une adaptation dans le noir de 5 minutes. Les images ont été présentées dans une présentation Microsoft PowerPoint en utilisant une séquence aléatoire. Chaque fois qu'il y avait un changement dans l'éclairage ou le filtre, une adaptation chromatique de 2 minutes a été effectuée. Un résumé des composants testés dans les expériences et les composants optimaux identifiés après les analyses statistiques sur les notes sont présentés dans la Table 1.

Table 1, Résumé des composants testés dans la série expérimentale

S.No	Composants testés	Composants d'origine	Composants proposée	Nb. de Obs.	Meilleur Composants
1	Méthode de décomposition de l'image et l'espace colorimétrique	IPT, <i>bilateral filter</i>	JzAzBz, <i>guided filter</i>	6	IPT, <i>bilateral filter</i>
2	Degré d'adaptation chromatique et le point blanc d'adaptation	D=0,3 (iCAM06); D=0,9 (Smet et al); WP=D65	D = 0,5; 0,7 et 0,9; WP=effectif de l'éclairage et filtre	6	D=0,3; D=0,5; WP= précisions différentes
3	Degré d'adaptation chromatique et le point blanc d'adaptation	D=0,3 (iCAM06); WP=D65	D = 0,5; WP= effectif de l'éclairage et filtre	34	D=0,3; WP= précisions différentes

4	Modèle d'adaptation chromatique et le point blanc d'adaptation	CAT02; WP=D65	CAT97; Ma et al; WP= effectif de l'éclairage et filtre proche à D65	20	CAT02; WP=D65
---	--	---------------	---	----	---------------

Les notes moyennes pour l'iCAM06 d'origine (*bilateral filter*, espace colorimétrique IPT, $D=0,3$; $WP=D65$ et avec CAT02) de toutes les expériences se sont avérées supérieures à 7 pour tous les filtres, à l'exception du filtre orange hautement chromatique. Les notes moyennes pour tous les filtres testés sont présentées dans la Figure 6 pour les filtres classiques et leurs paires métamériques (partie A) et dans la Figure 7 pour les filtres d'amélioration de la chrominance/chromatiques (partie B). Pour chaque note moyenne, le nombre d'observateurs (N) est également indiqué dans les graphiques. Ces expérimentations ont ainsi validé l'utilisation d'iCAM06 pour la simulation de vision des couleurs à travers des lunettes de soleil.

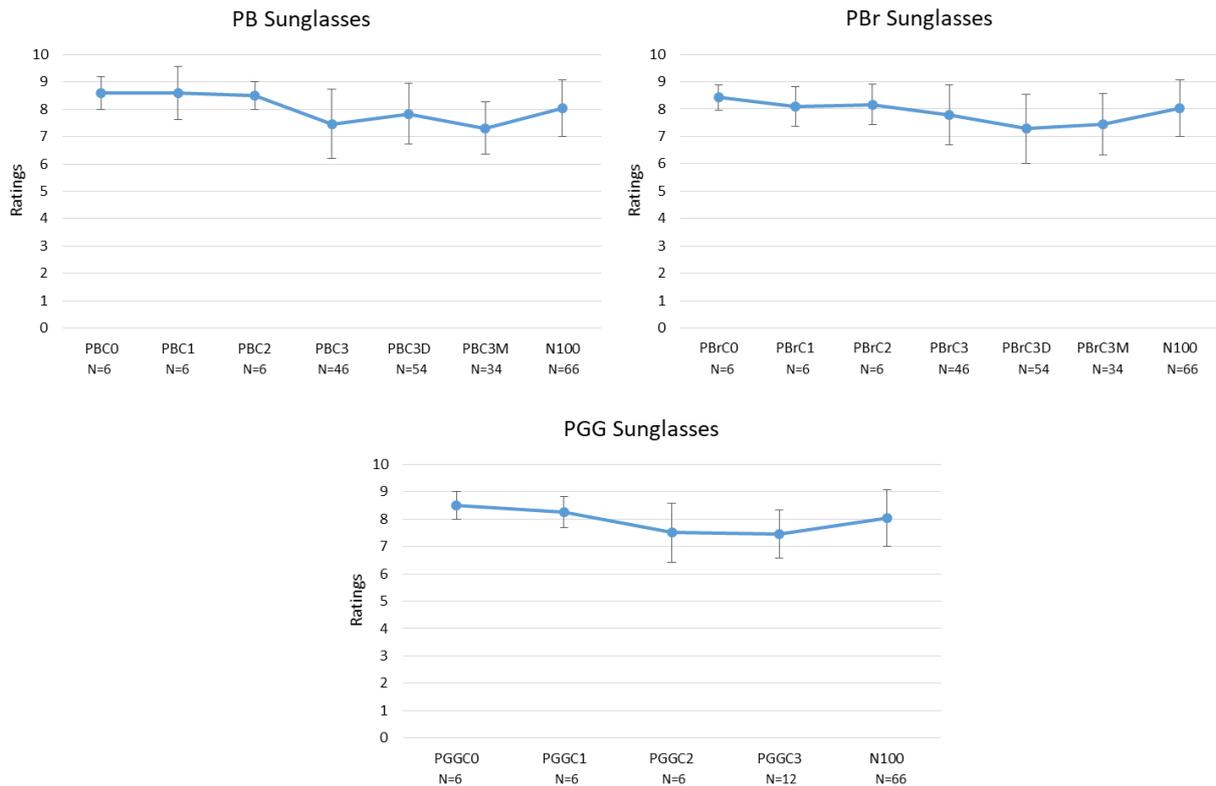


Figure 6, Notes moyennes pour les filtres de Partie A; avec Std. Dev Errors

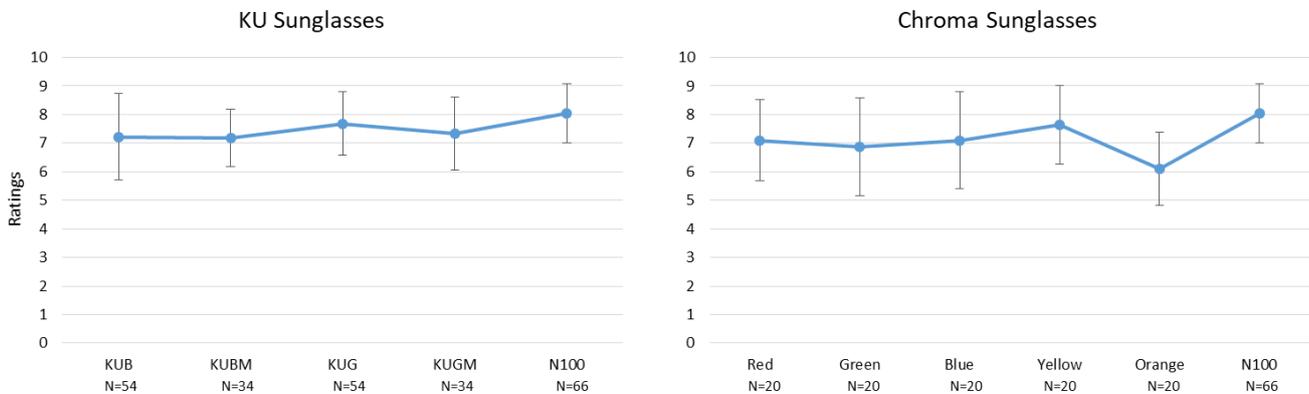


Figure 7, Notes moyennes pour les filtres de Partie B; avec Std. Dev Errors

6. Caractérisation de shifts colorées induit par des filtres solaire

L'utilisation principale des lunettes de soleil est d'éviter l'éblouissement en réduisant la quantité de lumière transmise aux yeux. Cette transmittance varie dans toute la gamme du spectre visible et peut introduire des changements de couleur importants qui nécessitent une caractérisation par des moyens rapides et fiables. La simulation de lunettes de soleil au moyen d'images hyperspectrales et d'un modèle d'apparence de couleur d'image (iCAM06) a été validée dans le chapitre 5 pour la précision de reproduction des couleurs. Cependant, l'effet objectif des lunettes de soleil sur la vision des couleurs n'est pas facile à interpréter à partir de ces images simulées. Ainsi, nous devons caractériser ces changements de couleur grâce à un processus rationalisé, fournissant des données simplifiées mais informatives. Pour cela, nous proposons d'illustrer l'effet des lunettes de soleil en représentant les changements de couleur résultants sur un graphique de changement de couleur.

L'utilisation d'outils d'illustration visuelle pour caractériser les modifications de tonalité de couleur existe depuis les années 1950, par exemple, pour étudier les effets de l'adaptation chromatique (Sobagaki et al., 1974) et des couleurs shifts (Helson et al., 1979; Hunt, 1965). Depuis une dizaine d'années, de tels outils graphiques ont refait surface, et sont de plus en plus utilisés pour la caractérisation du rendu des couleurs. Notamment, les vecteurs de rendu des couleurs de van der Burgt (van der Burgt & van Kemenade, 2010) et celui de Davis and Ohno (Davis & Ohno, 2005). Plus récemment, l'IES a proposé un nouvel indice de fidélité des couleurs pour remplacer le CIE Ra, ainsi qu'un indice de gamme de couleurs et un ensemble de représentations graphiques comprenant un graphique vectoriel de couleur et un graphique de distorsion des couleurs (IES TM-30-15, 2015). Ces graphiques ont rendu les caractérisations plus illustratives, donc plus faciles à comprendre. Le point commun entre tous ces graphiques de couleur est l'utilisation de patches et de palettes de couleurs prédéfinies, qui fournissent une description très détaillée du changement de couleur possible mais ne traitent pas les distorsions de couleur dues au contenu de couleur réel des scènes réelles. Le graphique de couleur développé par Cauwerts et Jost suit un principe similaire mais aborde les couleurs réelles présentes dans une scène complexe plutôt qu'une palette de couleurs prédéfinie (Cauwerts & Jost-Boissard, 2018). Ce graphique de couleur a une contextualisation supplémentaire et s'est avéré efficace pour une utilisation dans l'analyse du changement de couleur dû au vitrage et aux éclairages LED (Cauwerts & Jost-Boissard, 2018).

L'approche de notre étude est d'élaborer un graphique de couleur qui prend en compte la contextualisation des scènes réelles et les couleurs qui y sont présentes. Parallèlement, pour augmenter la lisibilité des graphiques en couleurs, cette étude vise à réduire le nombre de couleurs utilisées pour représenter les shifts chromatiques et à ne prendre en compte que les couleurs dominantes de la scène réelle. À cette fin, nous visons à décrire la composition des couleurs de la scène réelle après l'application de lunettes de soleil et le traitement d'image via iCAM06. La composition des couleurs d'une scène (naturelle ou artificielle) représente les couleurs significatives qui dictent la perception visuelle des observateurs. La couleur qui dominera le repère visuel de l'image est la couleur dominante et, avec d'autres couleurs importantes, elle forme la composition des couleurs de l'image. De nombreuses méthodes existent pour déterminer la composition des couleurs des images, la plus courante étant un histogramme des couleurs (Gong et al., 1996; Lu et al., 1994; Sethi et al., 1997; Stricker & Orengo, 1995; Stricker & Swain, 1994; Yihong et al., 1994). Outre les histogrammes de couleurs, les techniques de segmentation d'images telles que la *region growing* (Adams & Bischof, 1994), la segmentation

d'images combinée à des histogrammes (Sural et al., 2002), ou la segmentation d'images combinée à une neural network hiérarchique en (2-ANN) (Ong et al., 2002).

Pour identifier la composition des couleurs de la scène, nous avons décidé d'utiliser des techniques de segmentation d'images. L'idée était de pouvoir répartir les couleurs présentes dans la scène en différents groupes de couleurs similaires et récupérer les couleurs dominantes de la scène. Nous avons implémenté l'algorithme K-means++ pour la segmentation d'images afin de fournir un descripteur de couleur simple mais efficace d'une image complexe (Arthur & Vassilvitskii, 2007). Notre méthode a été validée en testant la palette de couleurs résultante pour une cohérence visuelle sur six images, par le biais d'une expérience psycho-visuelle. Notre méthode a atteint une corrélation de 93,2 % entre les résultats objectifs et subjectifs pour chaque catégorie de couleur et image. La Figure 8 résume l'ensemble du processus dans un schéma visuel et les résultats obtenus sur une image.

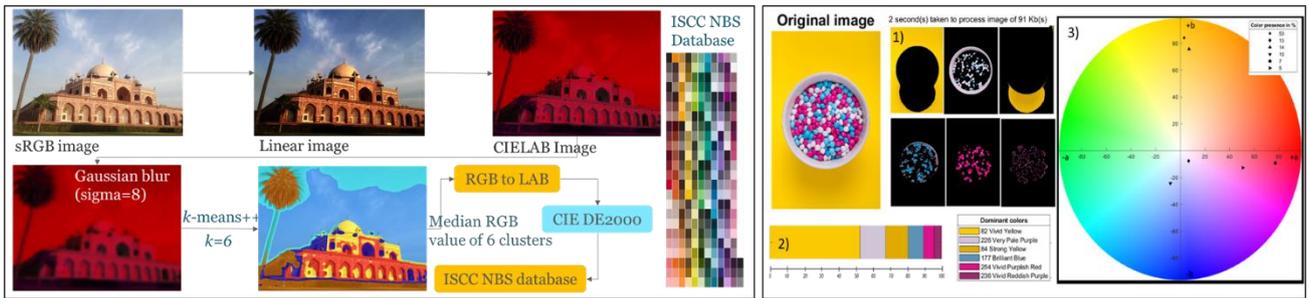


Figure 8, Schéma de le descripteur de couleurs dominante (à gauche) et le résultat d'une image (à droite)

Notre méthodologie pour segmenter les images en clusters en fonction de leur distribution de couleurs a été utilisée pour calculer les changements de teinte et les différences de chrominance résultant de l'application de lunettes de soleil en comparant les palettes de couleurs d'une scène de test avec celle de la même scène filtrée à travers deux lunettes de soleil (KUB et PZBB) voir la Figure 9.

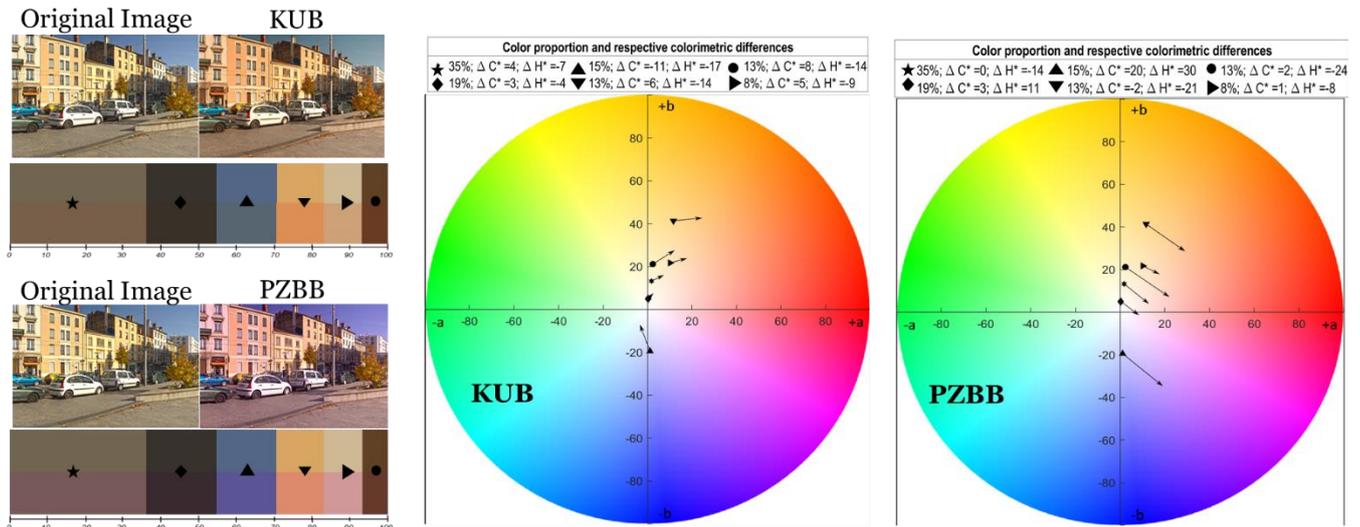


Figure 9, Descripteur de changement de couleur : Application sur deux lunettes de soleil

Notre descripteur de changement de couleur est simple, rapide et fiable pour une analyse colorimétrique de scènes complexes et de leur rendu lorsqu'elles sont vues à travers des lunettes de soleil. Une

amélioration majeure apportée par notre outil graphique est la lisibilité et la compréhension des changements de couleurs. Seules les couleurs dominantes de la scène sont traitées réduisant ainsi l'encombrement vu avec d'autres descripteurs utilisant un grand nombre de couleurs fixes. Notre méthode de quantification du changement de couleur dû aux lunettes de soleil peut caractériser toutes sortes de lunettes de soleil même lorsqu'elles sont trop chromatiques pour être testées par d'autres métriques de rendu des couleurs comme IES TM-30-2018. Notre graphique de changement de couleur peut être un outil important pour analyser objectivement la couleur finale rendue d'une scène sous n'importe quelle paire de lunettes de soleil.

7. Sommaire et le conclusion

Cette thèse visait à caractériser et simuler la vision des couleurs telle qu'elle est perçue à travers des lunettes de soleil. Dans ce chapitre, nous concluons la thèse par une discussion résumée des travaux et des avancées scientifiques qu'elles ont apportées.

Les lunettes de soleil sont devenues un objet d'usage quotidien non seulement pour protéger les yeux de l'éblouissement du soleil, mais aussi des rayons UV nocifs. Avec le développement continu de montures et de verres esthétiques, les lunettes de soleil sont également devenues un accessoire de mode incontournable. Aujourd'hui, l'industrie des lunettes de soleil propose des filtres dédiés à des tâches spécifiques : faire du sport (baseball, ski, etc.), conduite de nuit, course professionnelle, etc. Les filtres peuvent également être conçus avec différents objectifs comme la réduction de la photosensibilité ou la diminution des symptômes de stress visuel. Les lunettes de soleil offraient à l'origine des teintes neutres de gris ou de brun, mais aujourd'hui, les lunettes de soleil très chromatiques fabriquées avec des colorants très sélectifs sont monnaie courante. Malgré ces développements dans les caractéristiques des lunettes de soleil, il n'y a eu aucun développement dans la capacité de simuler virtuellement la vision à travers des lunettes de soleil. Il n'y a pas eu non plus de recherche sur l'impact des lunettes de soleil sur l'adaptation chromatique. Cette thèse propose de simuler la vision à travers des lunettes de soleil à l'aide de l'imagerie hyperspectrale. Avec le développement de haute gamme de caméras hyperspectrales portables, ils offrent désormais des résolutions spectrales et spatiales élevées. Ces données hyperspectrales plus détaillées peuvent être encore multipliées avec la transmittance spectrale des lunettes de soleil pour créer des images hyperspectrales filtrées. Ces données hyperspectrales filtrées, converties dans un espace 2D à l'aide de la colorimétrie de CIE (XYZ), ont été utilisées pour appliquer iCAM06. Les images traitées par iCAM06, filtrées à travers des lunettes de soleil, nous ont permis de prendre en compte divers phénomènes d'apparence spatiale des couleurs qui ne font pas partie des CAM standardisées. Toutes ces étapes ont fait du processus d'une tâche à plusieurs volets qui a nécessité des tests et une validation approfondis des paramètres utilisés à chaque étape. De l'imagerie aux simulations de vision des couleurs. A l'aide de tests psycho-visuels, nous nous sommes assurés de l'efficacité de la méthode choisie pour la simulation d'images hyperspectrales via iCAM06.

Nous avons constaté que notre méthode choisie était aussi efficace pour les lunettes de soleil que pour la vision à la lumière du jour non filtrée. Cependant, la fidélité de la précision de reproduction de l'iCAM06 n'était pas uniforme selon le CCT de l'illuminant ou la chromaticité du filtre. Contrairement aux sources de lumière froide, les images simulées avaient une précision inférieure lorsque des sources de lumière chaude étaient utilisées. L'utilisation de l'espace colorimétrique IPT dans iCAM06 a également saturé les couleurs chaudes et les a forcées à sortir de la gamut de l'écran. La structure iCAM06 actuelle maintient la distance relative des couleurs à l'intérieur de la gamut d'un écran, mais pas pour les couleurs en dehors de la gamut. Cet effet était amplifié lorsque des filtres chromatiques étaient appliqués, réduisant ainsi leur précision de reproduction moyenne. Bien que la modification de certains paramètres/composants iCAM06 n'ait pas changé cette précision, l'utilisation de l'iCAM06 d'origine pour la simulation de vision filtrée a été validée.

Notre méthodologie ouvre également la porte à diverses autres applications. Par exemple, il peut également être utilisé pour simuler l'apparence d'une pièce (via son image hyperspectrale) lorsqu'elle est éclairée avec un nouveau luminaire (avec une radiance spectrale connue). À l'aide de l'outil de

changement de couleur, on peut également identifier les éventuels changements de couleur induits par le nouveau luminaire.

Certaines nouvelles modifications pourraient potentiellement améliorer la précision de notre méthode. Néanmoins, en l'état, nous disposons d'une méthodologie robuste pour capturer spatialement les radiances spectrales d'une scène. À l'aide de ces images spectrales, nous avons pu créer des images haute-fidélité pour une variété de lunettes de soleil (différentes transmittances, chromaticités et distribution spectrale), concluant ainsi cette thèse.

8. Bibliographie

- Adams, R., & Bischof, L. (1994). Seeded region growing. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16(6), 641–647. <https://doi.org/10.1109/34.295913>
- Arthur, D., & Vassilvitskii, S. (2007). *k-means++: The advantages of careful seeding*. 1027–1035.
- Cauwerts, C., & Jost-Boissard, S. (2018). A color graphic informing on the impact of electric lighting and coated glazing in complex architectural scenes. *Color Research & Application*, 43(6), 885–898. <https://doi.org/10.1002/col.22267>
- Cauwerts, C., & Jost-Boissard, S. (2019). Color rendering of window glass: Analysis of landscape content with hyperspectral imaging. *Proceedings of the International Colour Association (AIC) Conference 2019, Buenos Aires, Argentina*. AIC 2019. <https://www.entpe.fr/en/ressources-p2e>
- CIE 15 (Ed.). (2004). *Colorimetry* (3. ed). CIE, Central Bureau.
- CIE 131 (Ed.). (1998). *THE CIE 1997 INTERIM COLOUR APPEARANCE MODEL (SIMPLE VERSION) CIECAM97S*. CIE Central Bureau.
- CIE 159 (Ed.). (2004). *A colour appearance model for colour management systems: CIECAM02*. CIE Central Bureau.
- CIE 170-1 (Ed.). (2006). *Fundamental chromaticity diagram with physiological axes. Pt. 1: ...* CIE Central Bureau.
- CIE 170-2. (2015). *Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes—Part 2: Spectral Luminous Efficiency Functions and Chromaticity Diagrams* (Vol. 41). <http://doi.wiley.com/10.1002/col.22020>
- CIE 224. (2017). *CIE 2017 colour fidelity index for accurate scientific use*. CIE Central Bureau.
- Davis, W., & Ohno, Y. (2005). *Toward an improved color rendering metric* (I. T. Ferguson, J. C. Carrano, T. Taguchi, & I. E. Ashdown, Eds.; p. 59411G). <https://doi.org/10.1117/12.615388>
- Durand, F., & Dorsey, J. (2002). Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images. *Proceedings of the 29th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques - SIGGRAPH '02*, 257. <https://doi.org/10.1145/566570.566574>
- Fairchild, M. (2013). *Color appearance models* (Third edition). John Wiley & Sons, Inc.

- Fairchild, M. D. (2002). *Status of CIE color appearance models* (R. Chung & A. Rodrigues, Eds.; p. 550). <https://doi.org/10.1117/12.464726>
- Fairchild, M., & Johnson, G. M. (2002). *Meet iCAM: A next-generation color appearance model*. *2002(1)*, 33–38.
- Foster, D. H., & Amano, K. (2019). Hyperspectral imaging in color vision research: Tutorial. *Journal of the Optical Society of America A*, *36(4)*, 606. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.36.000606>
- Ghadiyaram, D., & Bovik, A. C. (2016). Massive Online Crowdsourced Study of Subjective and Objective Picture Quality. *IEEE Transactions on Image Processing*, *25(1)*, 372–387. <https://doi.org/10.1109/TIP.2015.2500021>
- Gong, Y., Chuan, C. H., & Xiaoyi, G. (1996). Image indexing and retrieval based on color histograms. *Multimedia Tools and Applications*, *2(2)*, 133–156. <https://doi.org/10.1007/BF00672252>
- Guild, J. (1931). The colorimetric properties of the spectrum. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, *230(681–693)*, 149–187. <https://doi.org/10.1098/rsta.1932.0005>
- Hall, R. (1999). *Color Perception*. https://web.mst.edu/~rhall/web_design/color_perception.html
- Helson, H., Wilson, M., & Judd, D. (1979). Color rendition with fluorescent sources of illumination. *Contributions to Color Science*, *13*, 422.
- Hering, E. (1920). *Outlines of a Theory of the Light Sense* (trans. By LM Hurvich and D. Jameson).
- Hordley, S. D., Finalyson, G., & Morovic, P. (2004). A multi-spectral image database and its application to image rendering across illumination. *Third International Conference on Image and Graphics, ICIG 2004, Hong Kong, China, December 18-20, 2004*, 394–397. <https://doi.org/10.1109/ICIG.2004.10>
- Hunt, R. W. G. (1965). Measurement of Color Appearance. *Journal of the Optical Society of America*, *55(11)*, 1540. <https://doi.org/10.1364/JOSA.55.001540>
- Hurvich, L. M., & Jameson, D. (1957). An opponent-process theory of color vision. *Psychological Review*, *64(6, Pt.1)*, 384–404. <https://doi.org/10.1037/h0041403>

- IES TM-30-15. (2015). *IES TM-30-15, IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition*. Illuminating Engineering Society of North America.
- Inanici, M., & Galvin, J. (2004). *Evaluation of High Dynamic Range Photography as a Luminance Mapping Technique* (LBNL--57545, 841925; p. LBNL--57545, 841925). <https://doi.org/10.2172/841925>
- Kuang, J., Johnson, G. M., & Fairchild, M. (2007). iCAM06: A refined image appearance model for HDR image rendering. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 18(5). <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2007.06.003>
- Larson, G. W., Rushmeier, H., & Piatko, C. (1997). A visibility matching tone reproduction operator for high dynamic range scenes. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 3(4), 291–306. <https://doi.org/10.1109/2945.646233>
- Li, C., Li, Z., Wang, Z., Xu, Y., Luo, M. R., Cui, G., Melgosa, M., Brill, M. H., & Pointer, M. (2017). Comprehensive color solutions: CAM16, CAT16, and CAM16-UCS. *Color Research & Application*, 42(6), 703–718. <https://doi.org/10.1002/col.22131>
- Lu, H., Ooi, B.-C., & Tan, K.-L. (1994). Efficient Image Retrieval By Color Contents. In W. Litwin & T. Risch (Eds.), *Applications of Databases* (Vol. 819, pp. 95–108). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-58183-9_43
- Meyer, G. W. (1988). Wavelength selection for synthetic image generation. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 41(1), 57–79. [https://doi.org/10.1016/0734-189X\(88\)90117-X](https://doi.org/10.1016/0734-189X(88)90117-X)
- Mittal, A., Soundararajan, R., & Bovik, A. C. (2013). Making a “Completely Blind” Image Quality Analyzer. *IEEE Signal Processing Letters*, 20(3), 209–212. <https://doi.org/10.1109/LSP.2012.2227726>
- Ong, S. H., Yeo, N. C., Lee, K. H., Venkatesh, Y. V., & Cao, D. M. (2002). Segmentation of color images using a two-stage self-organizing network. *Image and Vision Computing*, 20(4), 279–289. [https://doi.org/10.1016/S0262-8856\(02\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(02)00021-5)

- Reinhard, E., Stark, M., Shirley, P., & Ferwerda, J. (2002). Photographic tone reproduction for digital images. *ACM Transactions on Graphics*, 21(3), 267–276. <https://doi.org/10.1145/566654.566575>
- Schanda, J. (Ed.). (2007). *Colorimetry: Understanding th CIE system*. Wiley.
- Sethi, I. K., Coman, I. L., Day, B., Jiang, F., Li, D., Segovia-Juarez, J., Wei, G., & You, B.-M. (1997). *Color-WISE: A system for image similarity retrieval using color* (I. K. Sethi & R. C. Jain, Eds.; pp. 140–149). <https://doi.org/10.1117/12.298438>
- Sobagaki, H., Yamanaka, T., Takahama, K., & Nayatani, Y. (1974). Chromatic-adaptation study by subjective-estimation method. *Journal of the Optical Society of America*, 64(6), 743. <https://doi.org/10.1364/JOSA.64.000743>
- Stiles, W. S., & Burch, J. M. (1959). N.P.L. Colour-matching Investigation: Final Report (1958). *Optica Acta: International Journal of Optics*, 6(1), 1–26. <https://doi.org/10.1080/713826267>
- Stricker, M. A., & Orengo, M. (1995). *Similarity of color images* (W. Niblack & R. C. Jain, Eds.; p. 381). <https://doi.org/10.1117/12.205308>
- Stricker & Swain. (1994). The capacity of color histogram indexing. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR-94*, 704–708. <https://doi.org/10.1109/CVPR.1994.323774>
- Sural, S., Gang Qian, & Pramanik, S. (2002). Segmentation and histogram generation using the HSV color space for image retrieval. *Proceedings. International Conference on Image Processing*, 2, II-589-II-592. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2002.1040019>
- van der Burgt, P., & van Kemenade, J. (2010). About color rendition of light sources: The balance between simplicity and accuracy. *Color Research & Application*, NA-NA. <https://doi.org/10.1002/col.20546>
- Vilaseca, M., Schael, B., Delpueyo, X., Chorro, E., Perales, E., Hirvonen, T., & Pujol, J. (2014). Repeatability, reproducibility, and accuracy of a novel pushbroom hyperspectral system. *Color Research & Application*, 39(6), 549–558. <https://doi.org/10.1002/col.21851>

- Wang, Y., Lv, X., Wei, M., & Luo, M. (2019). PROPOSAL OF A NEW WHITENESS FORMULA BASED ON CAM16-UCS. *PROCEEDINGS OF the 29th Quadrennial Session of the CIE*, 521–524. <https://doi.org/10.25039/x46.2019.OP71>
- Wei, M., Ma, S., Wang, Y., & Luo, M. R. (2017). Evaluation of whiteness formulas for FWA and non-FWA whites. *Journal of the Optical Society of America A*, 34(4), 640. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.34.000640>
- Wright, W. D. (1929). A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours. *Transactions of the Optical Society*, 30(4), 141–164. <https://doi.org/10.1088/1475-4878/30/4/301>
- Wyszecki, G., & Stiles, W. S. (1982). *Color science* (Vol. 8). Wiley New York.
- Yihong, G., Hongjiang, Z., & Chuan, C. H. (1994). An image database system with fast image indexing capability based on color histograms. *Proceedings of TENCON'94 - 1994 IEEE Region 10's 9th Annual International Conference on: "Frontiers of Computer Technology,"* 407–411. <https://doi.org/10.1109/TENCON.1994.369269>