

Métrique de différence couleur basée sur le seuil de perception

Vincent Rosselli

Mohamed-Chaker Larabi

Christine Fernandez-Maloigne

Laboratoire SIC - Université de Poitiers

Bât. SP2MI, Téléport 2,
Bvd Marie et Pierre Curie, BP 30179,
86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex

{rosselli, larabi, fernandez}@sic.univ-poitiers.fr

Résumé

L'étude du Système Visuel Humain (SVH) est très intéressante pour quantifier la qualité d'une image ou pour prédire quelle information y sera perçue. La fonction de sensibilité au contraste (Contrast Sensitivity Function, CSF) est une des principales façons d'intégrer les propriétés du SVH dans un système d'imagerie. Elle caractérise sa sensibilité aux fréquences spatiales et temporelles. Dans cette étude, nous avons développé une métrique de différence couleur basée sur le seuil de perception. Ce dernier est obtenu par une nouvelle approche de construction de CSF spatio-chromatique par appariement. Cela consiste à faire correspondre le contraste d'un stimulus test avec celui de référence. La métrique proposée s'inspire des travaux sur le s-CIELAB et est ensuite évaluée objectivement et subjectivement.

Mots clefs

Différence couleur, Qualité, Expériences psychophysiques.

1 Introduction

Différents traitements peuvent être effectués sur une image. Ces traitements sont susceptibles d'altérer la qualité de l'image. Il est souvent intéressant, voire nécessaire, de quantifier la qualité ou du moins le niveau de dégradation. Ainsi, des évaluations subjectives doivent être menées sur un panel d'observateurs. Cependant, la mise en place de tels études est fastidieuse du fait du respect nécessaire des standards établis. Pour ne plus avoir recours à ce type d'approche, des outils objectifs ont été proposés. Une métrique objective est un modèle mathématique qui le plus souvent mesure la fidélité entre une image altérée et sa référence. Ces mesures donnent de bons résultats d'un point de vue spectral mais sont rarement corrélés avec le jugement d'un observateur. Une image avec une multitude d'artefacts ponctuels et gênants peut avoir un meilleur PSNR qu'une image visuellement meilleure.

Certains critères objectifs sont basés sur l'étude du Système Visuel Humain (SVH). Leur but est de simuler le comportement de ce dernier pour savoir ce qui sera perçu

ou non sur une image. Le s-CIELAB [1] est un de ces modèles. C'est une extension spatiale de la métrique CIE-LAB ΔE_{94} . Il s'agit donc d'une métrique pour la "fidélité perceptuelle des couleurs". Elle tend à mesurer combien la reproduction d'une couleur est précise par rapport à l'originale quand celle-ci est vue par un observateur.

Son mécanisme est le suivant. L'image subit d'abord une séparation des couleurs vers une représentation en oppositions chromatiques. Puis des filtres spatiaux, issus des études menées par Poirson et Wandell [2], sont appliqués. L'image obtenue est ensuite transformée dans l'espace couleur $L^*a^*b^*$ pour pouvoir calculer la distance colorimétrique ΔE_{94} .

Cette fonction ne permet pas d'obtenir une simulation parfaite de ce que perçoit un observateur. Une des principales façons d'intégrer des propriétés du SVH dans un système d'imagerie reste la Fonction de Sensibilité au Contraste (CSF). Elle caractérise sa sensibilité aux fréquences spatiales et temporelles.

Dans ce papier, nous nous focalisons sur une métrique inspirée du s-CIELAB et permettant de prendre en compte un filtrage CSF dans le domaine de Fourier. Cette CSF résulte d'une nouvelle approche de construction estimant le seuil de perception.

Cet article est organisé comme suit. La section 2 est dédiée à la CSF et plus particulièrement à l'approche proposée. Les détails de construction de la métrique sont donnés dans la section 3. Dans la section 4, nous décrivons les outils expérimentaux utilisés pour valider l'approche. Nous terminerons par une conclusion et des perspectives.

2 La Fonction de Sensibilité au Contraste

Dans la littérature, il existe quatre méthodes pour construire la CSF [3] : par apparition, par disparition, par double alternative et par ajustement. Nombres d'expérimentations psychophysiques ont été menées avec ces approches.

La vision des couleurs est décrite en termes de réponses d'un canal achromatique et de deux canaux chromatiques,

l'un rouge/vert et l'autre bleu/jaune [4]. Pour la construction d'une CSF chromatique, les approches monochromatiques ou couleurs opposées peuvent être utilisées. Dans le premier cas, le contraste est mesuré entre une couleur et le noir, ceci donnant une forme passe-bande. La seconde approche est basée sur l'opposition chromatique. Comme montré par *Mullen* [5], la CSF chromatique a une forme passe-bas.

Dans le but de mieux caractériser la zone du pic de la CSF et de mettre en avant le problème du seuil de perception (seuil de discrimination) dans la construction de la CSF, nous avons développé une nouvelle approche pour les canaux achromatiques et chromatiques basés sur l'appariement.

Les méthodes classiques de construction de la CSF sont basées sur le concept du seuil de détection. Ce seuil est la limite au delà de laquelle le stimulus est perçu.

Pour l'expérimentation de notre approche, deux stimuli sont présentés à l'observateur. Le stimulus de référence est fixé pour les expérimentations à une fréquence spatiale donnée et au contraste maximum. Le stimulus test a une fréquence spatiale différente à chaque expérimentation et son contraste augmente progressivement de 0 à 1. L'observateur doit dire quand il pense que les contrastes des deux stimuli sont semblables. Ceci peut être formalisé ainsi :

$$c_p(f) = c'_p(f_{ref}), \quad (1)$$

où c_p et c'_p sont les contrastes perçus par l'observateur pour les deux stimuli, f la fréquence spatiale du stimulus test et f_{ref} la fréquence spatiale du stimulus de référence. L'équation 1 peut être écrite :

$$c_m(f) * CSF(f) = c_{ref} * CSF(f_{ref}), \quad (2)$$

où c_m est le contraste mesuré du stimulus test pour lequel l'observateur notifie que les deux stimuli ont un niveau de contraste semblable ; c_{ref} est le contraste affiché du stimulus de référence. Nous obtenons ainsi par cette méthode une CSF relative (notée $rCSF$) à une fréquence et un contraste donnés :

$$rCSF(f) = \frac{CSF(f)}{CSF(f_{ref})} = \frac{c_{ref}}{c_m(f)} \quad (3)$$

Les valeurs mesurables de la CSF se trouvent entre :

$$rCSF = \frac{c_{ref}}{c_m(f)} \in \left[\frac{c_{ref}}{c_{max}}; +\infty \right] \quad (4)$$

2.1 Processus expérimental

Selon *Wandell* [6], les stimuli sinusoïdaux sont mieux perçus parce qu'ils ne contiennent qu'une fréquence spatiale. De même, le motif doit avoir une orientation verticale [7]. L'œil y est plus sensible qu'à d'autres orientations. Comme mentionné ci-dessus, deux stimuli doivent être affichés, l'un à côté de l'autre avec un espace significatif entre eux. Mais l'observateur doit pouvoir les percevoir en

même temps. Pour respecter le cône optimal de la vision binoculaire, qui est d'environ 10° d'angle visuel, la distance d'observation est fixée à 1.5 mètres. Et la taille du stimulus est de $4,7^\circ$ (cf. fig.1).

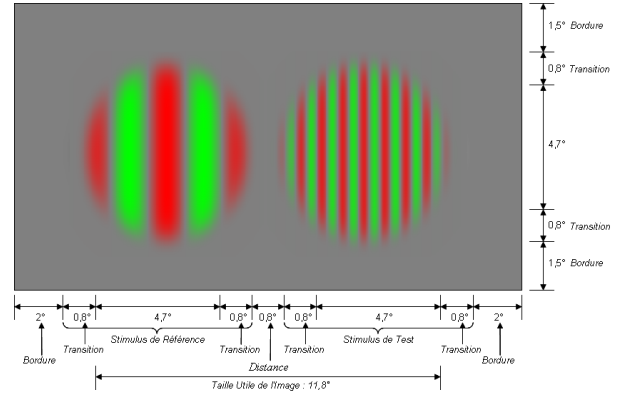


Figure 1 – Position et taille des stimuli sur l'écran

Dix fréquences sont choisies pour ne pas excéder les vingt minutes d'évaluation [8], chaque expérience se faisant trois fois. Au delà de cette durée, l'observateur commence à avoir des pertes de concentration.

Les observations ont lieu dans une salle psychophysique construite dans notre laboratoire dans le respect des recommandations de l'ITU. L'éclairage ambiant est de 65 lux et il n'y a aucune illumination directe sur l'écran. Deux paramètres sont importants pour ce dernier : la température et la luminance du blanc. Pour avoir des résultats plus fiables, le réglage de l'illumination et des paramètres d'affichage a été effectué avec précision avant chaque expérience.

2.2 Résultats

Nous avons rapporté précédemment que les CSFs chromatiques ont des comportements passes-bas. Cependant, celles construites dans cette étude (employant le seuil de discrimination) sont passes-bandes comme la CSF achromatique. Afin de vérifier que nos conditions expérimentales étaient correctes, nous avons mené une contre campagne dans laquelle nous avons retiré le stimulus de référence afin de construire une CSF classique (par apparition).

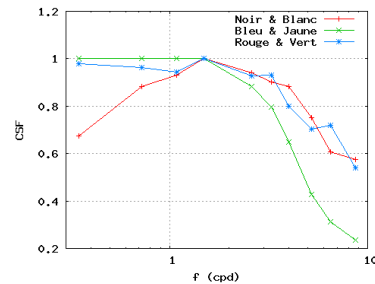


Figure 2 – Contre-expérience pour les canaux achromatiques et chromatiques par apparition

La figure 2 regroupe les résultats obtenus, ceux-ci étant conformes à ceux de la littérature. La CSF achromatique est passe-bande et les CSF chromatiques sont passes-bas. Ceci confirme d'une part que notre protocole expérimental est correct et qu'il n'influence pas les résultats et d'autre part, que cet effet intéressant est dû au seuil de discrimination sur lequel est basée notre approche.

2.3 Modèle Analytique

Un modèle analytique permet d'obtenir, par l'identification de ses paramètres avec les points de mesure, une caractéristique utilisable dans d'autres systèmes exigeant un modèle de CSF. Celui utilisé dans nos expériences est une adaptation du modèle de *Mannos et Sakrison* [9]. Il consiste en une normalisation de leur modèle au point de référence de sorte que la valeur de la CSF à la fréquence de référence soit égale à 1. Ainsi, l'expression analytique de ce modèle est la suivante :

$$rCSF(f) = \frac{\left(a + \frac{f}{f_p}\right) \exp\left(-\left(\frac{f}{f_p}\right)^c\right)}{\left(a + \frac{f_{ref}}{f_p}\right) \exp\left(-\left(\frac{f_{ref}}{f_p}\right)^c\right)}, \quad (5)$$

où f est la fréquence de test en cycle par degré (cpd). a et c influencent la pente de la courbe respectivement pour les basses et les hautes fréquences. f_p et f_{ref} sont respectivement la position du pic de la CSF et la fréquence de référence choisie.

Ces paramètres doivent être identifiés avec ce modèle selon les résultats. Pour ce faire, nous avons utilisé l'algorithme de *Levenberg-Marquardt* pour l'approximation par la méthode des moindres carrés des systèmes non linéaires. La figure 3 rassemble les rCSFs modélisées pour chaque opposition (Blanc-Noir, Rouge-Vert and Bleu-Jaune).

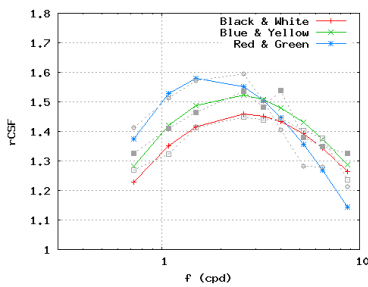


Figure 3 – Représentation graphique des rCSFs

3 Métrique de différence couleur

La CSF présentée est construite par appariement. Ceci signifie qu'elle est basée sur le concept de la comparaison subjective, ce qui mène directement à la définition d'une métrique de différence couleur. Pour l'élaboration de cette métrique, nous nous sommes inspirés du mode opératoire du s-CIELAB.

La représentation en oppositions chromatiques est faite sur l'espace de couleur AC1C2 dans les deux modèles. Au lieu d'un filtrage spatial, le choix d'un filtrage dans le domaine fréquentiel après une transformation de Fourier a été effectué en raison de la définition de la CSF. De nouveau dans le domaine spatial, l'espace couleur de l'image est changé pour le $L^*a^*b^*$. Le ΔE_{2000} [10] est alors calculé pour obtenir l'image d'erreur des différences perceptuelles des couleurs. La figure 4 récapitule les modifications décrites. Dans le s-CIELAB, le ΔE_{94} est calculé pour produire l'image d'erreur. La décision a été prise d'utiliser le ΔE_{2000} pour le nôtre. La raison est que le ΔE_{2000} est particulièrement adapté à l'évaluation des images naturelles. Il inclut les coefficients du ΔE_{94} pour les images naturelles avec l'addition d'un poids.



Figure 5 – Approches de filtrage CSF classiques

Il y a deux manières de filtrer une image à partir d'une CSF spatiale (cf fig. 5). La première est basée sur une normalisation de la CSF à la fréquence de pic. Pour les fréquences inférieures à cette fréquence, un coefficient de 1 est appliqué sur le signal qui le laisse inchangé. Ensuite pour les hautes fréquences, le coefficient diminue suivant cette règle :

$$coef(f) = \frac{rCSF(f)}{rCSF(f_{pic})}, \quad (6)$$

où f est la fréquence. Ceci engendre une suppression progressive des hautes fréquences.

L'autre manière est basée sur une normalisation de la CSF à la fréquence de référence. Dans ce cas-ci, le coefficient de 1 est appliqué pour les fréquences inférieures à la fréquence de référence. Ensuite les coefficients au-dessus de la fréquence de référence sont maintenus inchangés :

$$coef(f) = rCSF(f), \quad (7)$$

où f est la fréquence. Ceci mène à une amplification des fréquences moyennes et à une suppression progressive des hautes fréquences. La fréquence de référence est égale à 0.421 cpd.

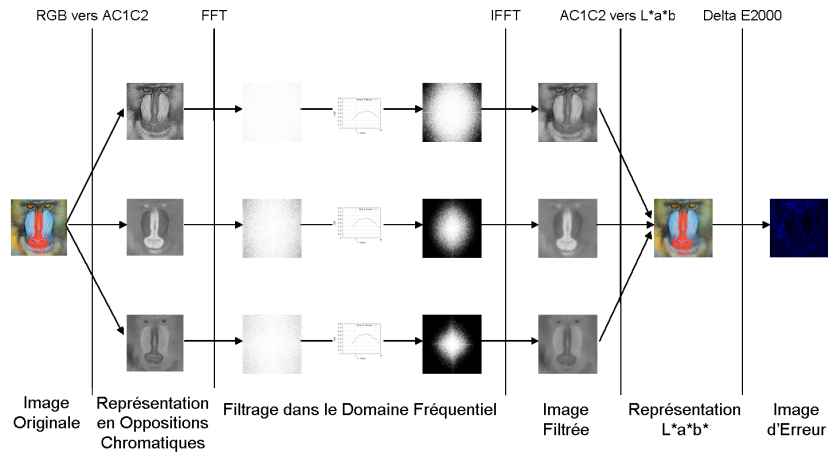


Figure 4 – Diagramme du modèle proposé

4 Expérimentation

Dans cette section, nous présentons les expériences menées dans le but de démontrer l'efficacité du modèle proposé. Pour ce faire, nous avons utilisé 9 images représentant des paysages, des portraits... et nous avons choisi 3 types de dégradations : un Bruit Laplacien (10dB, 20dB, 30dB et 40dB), un Flou Gaussien (3x3, 5x5, 7x7 et 9x9) et une compression JPEG2000 (0.05bpp, 0.125bpp et 0.5bpp). La figure 6 donne une comparaison de l'erreur mesurée due au flou gaussien aux différentes tailles de filtre. Cette figure permet de comparer nos approches à la MSE (erreur quadratique moyenne EQM), au s-CIELAB et au ΔE_{2000} .

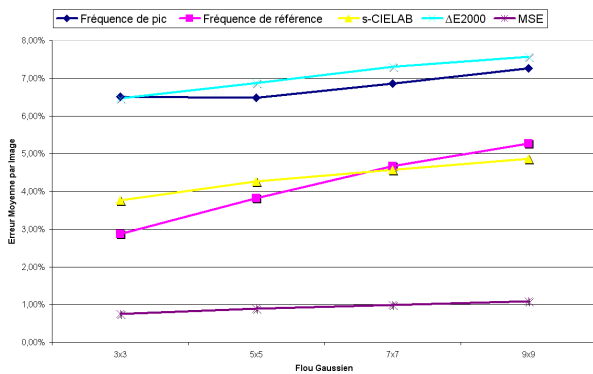


Figure 6 – Mesures de fidélité pour différents filtres de flou gaussien et différentes métriques

Du graphique 6, il est possible de noter que l'approche basée sur la fréquence de référence produit moins d'erreur que celle basée sur la fréquence de pic et que ces erreurs ne sont pas proportionnelles. La différence entre les erreurs données par le s-CIELAB pour les différents flous est relativement plate. Ceci signifie que cette métrique ne reproduit pas avec fidélité la différence visuelle existant entre les quatre taux de dégradations. Par contre, l'approche basée sur la fréquence de référence que nous avons proposée reproduit mieux la différence entre les 4 taux et est plus près

de l'impression visuelle que pourrait avoir un observateur. Afin de quantifier les différences entre notre modèle et le s-CIELAB, une étude psychophysique a été conduite dans notre salle normalisée. Pour cette expérience, nous avons gardé les neuf images utilisées dans la comparaison objective ainsi que les onze détériorations.

Le protocole de cette campagne psychophysique est basé sur un paradigme de choix forcé où l'image originale et une des copies altérées sont présentées sur le haut de l'écran et sur le bas, les images d'erreur dans un ordre aléatoire (celles de notre modèle avec la normalisation à la fréquence de pic et la normalisation à la fréquence de référence, et celle du s-CIELAB). Les observateurs, ils étaient au nombre de 12, doivent choisir l'image d'erreur qui correspond le mieux à leur perception de l'erreur entre les images du haut. La figure 7 montre une capture d'écran du test.

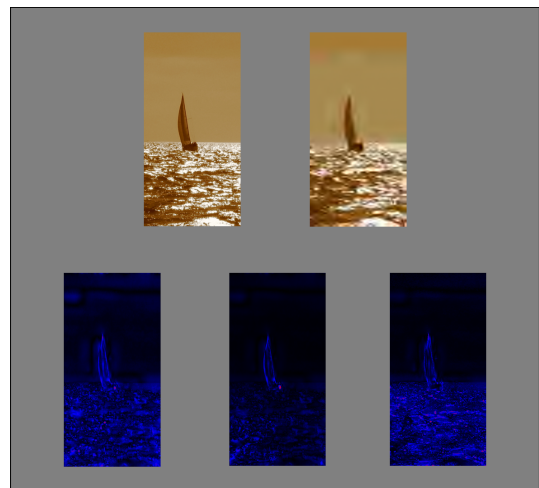


Figure 7 – Disposition des images pendant les tests psychophysiques

Les résultats obtenus dépendent réellement de la dégradation et de l'image. En moyenne, les trois approches ont reçu les mêmes scores ce qui ne nous permet

pas de conclure directement du score d'opinion moyen.

Quand les résultats sont considérés en détail, par type de détérioration, le même genre de distribution est trouvé. Ce qui est très intéressant est qu'un modèle peut avoir la préférence des observateurs pour une famille de détérioration mais ce n'est pas nécessairement vrai pour les sous-familles. C'est le cas pour la compression JPEG2000 par exemple. L'approche basée sur la fréquence de pic est préférée pour les forts taux (0.05bpp et 0.125bpp) tandis que le s-CIELAB est préféré pour les faibles taux de compression. Une partie des résultats est représentée sur la figure 8.

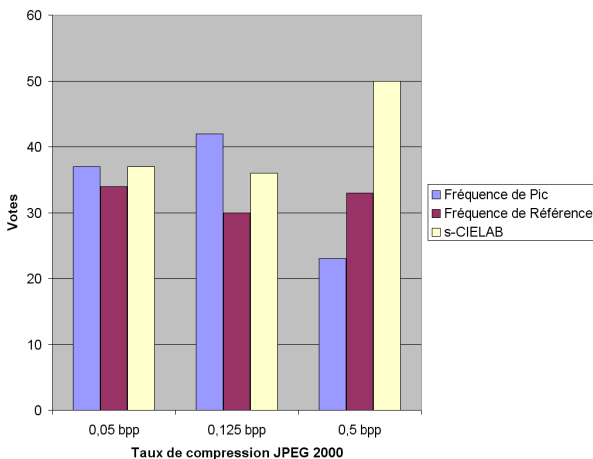


Figure 8 – Résultats de l'évaluation des dégradations générées par JPEG 2000

Ce que nous pouvons noter également est le fait que l'approche basée sur la fréquence de pic est souvent préférée à celle à la fréquence de référence.

5 Conclusions et perspectives

Dans ce papier, nous avons présenté une métrique de différence couleur comprenant une nouvelle approche pour la construction de la CSF spatio-chromatique pour simuler une partie des propriétés du SVH. La nouveauté de la construction se trouve dans l'évaluation du seuil de perception qui est particulièrement adapté pour l'évaluation de la fidélité d'une reproduction.

Les résultats obtenus sont très encourageants et ouvrent une voie prometteuse pour l'estimation de la fidélité de traitements couleur. Cette étude a été basée sur des procédures d'évaluation objectives et subjectives prenant en compte la perception humaine.

Afin d'améliorer notre modèle et simuler au mieux la perception visuelle humaine, une version hybride basée sur les deux approches proposées sera étudiée. Le but est de définir une table d'évaluation pour savoir automatiquement si une image est bien perçue ou pas.

Références

- [1] X. Zhang and B.A. Wandell, "A spatial extension of cielab for digital color image reproduction," *Society for Information Display Symposium Technical Digest*, vol. 27, pp. 731–734, 1996.
- [2] A.B. Poirson and B.A. Wandell, "Pattern-color separable pathways predict sensitivity to simple colored patterns," *Vision Research*, vol. 35, no. 2, pp. 239–254, 1996.
- [3] P.G.J. Barten, *Contrast Sensitivity of the HUMAN EYE and its Effects on Image Quality*, SPIE Optical Engineering Press, Washington, USA, 1999.
- [4] R.V. Klassen and N. Goodman, "Measuring human chromatic contrast sensitivity in an industrial setting," in *CIC Conference*, Scottsdale, USA, 2002, pp. 1–6.
- [5] K.T. Mullen, "The contrast sensitivity of human colour vision to red-green and blue-yellow chromatic gratings," *Journal of Physiology*, vol. 359, pp. 381–400, 1985.
- [6] B.A. Wandell, *Foundations of Vision*, Sinauer Associates, Inc, Sunderland, Massachusetts, 1995.
- [7] S. Daly, "The visible differences predictor : an algorithm for the assessment of image fidelity," in *Digital images and human vision*, pp. 179–205. MIT Press, 1993.
- [8] ITU-R, "Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures," Tech. Rep. BT.500-10, ITU, Geneva, Switzerland, 2002.
- [9] J.L. Mannos and D.J. Sakrison, "The effects of visual fidelity criterion on the encoding of images," *IEEE Trans. On Infor. Theory*, vol. 20, no. 4, pp. 525–536, 1974.
- [10] E. N. Dalal G. Sharma, W. Wu, "the ciede2000 color-difference formula : implementation notes, supplementary test data and mathematical observations," *Color research and application*, vol. 30, no. 1, pp. 21–30, 2005.