

Validation et limitation de métriques couleur pour l'ordonnement

Audrey LEDOUX, Noël RICHARD, Anne-Sophie CAPELLE-LAIZÉ, Christine FERNANDEZ-MALOIGNE

Université de Poitiers, XLIM-SIC UMR CNRS 6172, Boulevard Marie et Pierre Curie,

Téléport 2, BP 30179, 86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex, France

audrey.ledoux@univ-poitiers.fr, richard@sic.univ-poitiers.fr

anne.sophie.capelle@univ-poitiers.fr, christine.fernandez@univ-poitiers.fr

Résumé – La morphologie mathématique repose sur la notion d'ordonnement. Pour le traitement d'images couleur, l'écriture d'une relation d'ordre valide nécessite l'utilisation de distances couleur normalisées issues des espaces *CIELAB* ou *CIELUV*. Depuis les premières recommandations de la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), plusieurs distances couleur ont été proposées pour l'amélioration des traitements de petites différences couleurs. Le but de cet article est d'étudier l'impact de ces formules de distance couleur dans le contexte de la morphologie mathématique couleur. Les résultats sont développés pour une nouvelle construction des opérateurs morphologiques couleur basée sur la distance dans l'espace *CIELAB*.

Abstract – Mathematical morphology is based on the concept of ordering. With color image process, write a valid order relation requires to using distances from standard color spaces *CIELAB* or *CIELUV*. Since the first recommendations of the CIE, several colors distances have been proposed. This is to improved treatment of small color differences. The aim of this paper is studying the impact of each color distances in the context of color mathematical morphology. The results are developed for a new construction of morphological operators based on color distances in *CIELAB* space.

1 Introduction

Notre problématique porte sur la morphologie mathématique dans des espaces couleur, avec une prise en compte du point de vue perceptuel. Pour cela, nous avons défini un formalisme basé sur les fonctions de distance perceptuelle et construit une relation d'ordre qui non seulement est totale et qui, de plus, induit la dualité entre les opérateurs morphologiques de dilatation et d'érosion. Néanmoins, une question cruciale est apparue concernant le choix de la métrique de distance la plus adaptée dans ce cadre. L'objet de l'étude présentée est de construire une base de décision pour répondre à cette question et de comparer les résultats avec les méthodes d'Hanbury [8] et de Lopez [1].

Après avoir présenté le contexte et notamment la question de l'ordonnement, nous présenterons la problématique des distances couleur pour la morphologie mathématique. Nous proposons ensuite notre étude pour identifier le protocole de sélection d'une métrique dans un objectif d'ordonnement, avant de déterminer la méthode la plus adaptée au contexte.

2 Morphologie Couleur basée sur des fonctions de distance

Le contexte général de notre travail concerne l'extension des opérateurs morphologiques aux images multi-valuées, et plus précisément couleur, en intégrant un point de vue perceptuel. Les opérations élémentaires de la morphologie mathématique se fondant sur la recherche d'extrema entre les points, nous avons montré [12] que la dilatation et l'érosion d'un point de coordonnées (i, j) d'une image multi-valuée par un élément

structurant g de support Sg peut se décrire par :

$$\overrightarrow{(f \oplus g)}(i, j) = \bigvee \{ \overrightarrow{f(i+x, j+y)} \}$$

et

$$\overrightarrow{(f \ominus g)}(i, j) = \bigwedge \{ \overrightarrow{f(i+x, j+y)} \} \quad (1)$$

avec $x, y \in Sg$

où \bigvee et \bigwedge correspondent respectivement au maximum et au minimum entre un ensemble de coordonnées couleur vis-à-vis d'un élément structurant défini par la fonction $g(\cdot)$ ^a. La recherche des extrema nécessite alors l'établissement d'un ordre entre points couleur. L'originalité de nos travaux réside en l'intégration du point de vue perceptuel dans la définition de l'ordre. Ainsi, nous avons construit une nouvelle méthode basée sur des métriques perceptuelles de distances couleur [12]. Cette méthode exploite le concept de *convergence* pour définir un ordre total dans des espaces perceptuellement uniformes. En prenant l'opérateur de dilatation comme exemple, une relation d'ordre qui définit le maximum entre deux coordonnées couleur, C_1 et C_2 par rapport au point de convergence $O^{+\infty}$ peut, dans un premier temps, être décrite par :

$$C_1 \succeq C_2 \Leftrightarrow |\overrightarrow{C_1 O^{+\infty}}| \leq |\overrightarrow{C_2 O^{+\infty}}| \quad (2)$$

où la norme du vecteur $|\cdot|$ est une distance perceptuelle normalisée ou validée par des tests psychovisuels.

L'expression 2 assure une convergence linéaire des points, d'un point de vue perceptuel vers la couleur $O^{+\infty}$, mais n'est pas suffisante pour construire un ordre total. La description complète et la validation d'un ordre total se trouve dans l'article

^a. Ici, nous ne considérerons que des éléments structurants plats ($g(x, y) = 0$ sur le domaine de définition Sg de g et $-\infty$ ailleurs)

[12]. Elle aboutit à l'expression suivante pour la définition du maximum parmi l'ensemble $\mathcal{S}_{\mathcal{D}}$ de coordonnées couleur appartenant au support de l'élément structurant :

$$\begin{aligned} \bigvee \{x\}_{\forall x \in \mathcal{S}_{\mathcal{D}}} &= \left\{ y, y_{\beta} = \bigvee \{x_{\beta}\}_{\forall x \in \mathcal{S}_{\mathcal{D}_4}} \right\} \\ \text{avec} \quad \mathcal{S}_{\mathcal{D}_4} &= \left\{ y, y_{\alpha} = \bigvee \{x_{\alpha}\}_{\forall x \in \mathcal{S}_{\mathcal{D}_3}} \right\}, \\ \mathcal{S}_{\mathcal{D}_3} &= \left\{ y, |\overrightarrow{yO^{-\infty}}| = \bigvee \{|\overrightarrow{xO^{-\infty}}|\}_{\forall x \in \mathcal{S}_{\mathcal{D}_2}} \right\}, \\ \mathcal{S}_{\mathcal{D}_2} &= \left\{ y, |\overrightarrow{yC_i}| = \bigvee \{|\overrightarrow{xC_i}|\}_{\forall x \in \mathcal{S}_{\mathcal{D}_1}} \right\}, \\ \mathcal{S}_{\mathcal{D}_1} &= \left\{ y, |\overrightarrow{yO^{+\infty}}| = \bigwedge \{|\overrightarrow{xO^{+\infty}}|\}_{\forall x \in \mathcal{S}_{\mathcal{D}}} \right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Comme nous le montre cette équation, la notion de distance est prépondérante dans la définition des extrema et plus généralement pour l'ordonnancement couleur. L'objectif du travail présenté est d'étudier l'influence de la fonction de distance et de définir des critères de validation de celle-ci.

3 Pourquoi le choix d'une métrique ?

Les travaux de la CIE ont conduit à la production d'espaces dédiés au calcul de distances couleur corrélées à la perception [3], et permis des formulations de plus en plus précises au sens des panels d'évaluateurs testés. La première recommandation importante fût produite en 1976 avec l'adoption de l'espace *CIELAB* et de la métrique ΔE . Plusieurs évolutions lui succédèrent afin d'affiner les capacités de discrimination entre couleurs proches (ΔE_{94} [4] puis ΔE_{2000} [5]). En parallèle et au sein de la CIE, d'autres métriques virent le jour : *CMC(l : c)* [6] et *DIN99* [7]. Typiquement, les métriques ΔE_{94} et ΔE_{2000} ont été développées pour améliorer cette précision et validées sur des différences couleur distantes de moins de 5 unités *CIELAB*. Mais doit-on directement déduire que ces métriques sont plus adaptées pour les ordonnancements que la métrique initiale ΔE ?

Une première étude sur une partie d'image, nous a montré l'impact des fonctions de distances couleur dans un processus morphologique. La figure 1 montre ainsi, dans le cadre d'une dilatation vers le blanc, que la distance ΔE induit une détérioration du dégradé couleur (fig. 1-b, la flèche pointe un exemple), alors que la distance ΔE_{2000} utilisée dans la dilatation permet d'obtenir un dégradé perceptuellement plus linéaire (fig. 1-c).

4 Nouveaux tests et résultats

L'objectif de l'étude est de produire des critères quantitatifs pour estimer les performances des méthodes d'ordonnancement couleur. Notre hypothèse repose sur une validation statistique des tests d'ordonnancement de dégradés couleur. Notre modèle de génération de dégradés choisit aléatoirement deux

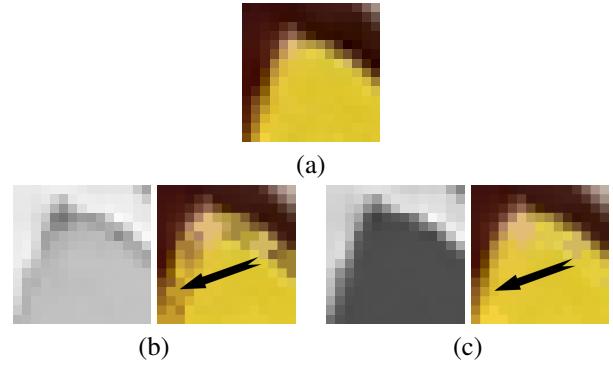


FIGURE 1 – (a) image originale "Le chanteur"; (b) image dilatée avec ΔE et carte des distance associée ; (c) image dilatée avec ΔE_{2000} et carte des distance associée (la dilatation utilise le point de convergence blanc avec un élément structurant croix 3x3)

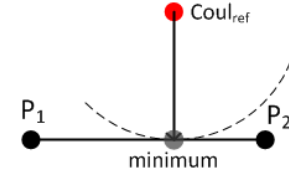


FIGURE 2 – Exemple de bilinéarité pour un dégradé

coordonnées couleur P_1 et P_2 dans l'espace *RGB*, puis suivant le cas, les convertit dans un des espaces couleur de travail (*HLS*, *CIELAB*), pour assurer la validité physique des coordonnées produites et l'indépendance de la validation entre le générateur et la méthode d'ordonnancement. Le dégradé est ensuite obtenu par division du segment (P_1P_2) .

Dans le cas d'un dégradé linéaire produit dans *CIELAB*, la métrique ΔE étant conçue comme une distance euclidienne, l'ordonnancement obtenu en utilisant ΔE est, par construction, correct d'un point de vue géométrique. Cependant, lorsque les dégradés sont ordonnés, ils peuvent se retrouver dans une configuration de bilinéarité en fonction du calcul de distance à la couleur de référence. La figure 2 illustre ce phénomène. L'ordonnancement final pourra alors être séparé en deux parties linéaires (figure 3, la couleur noire sépare les deux parties).

La métrique ΔE_{2000} n'est pas construite comme une simple distance euclidienne dans l'espace *CIELAB*. Elle a été conçue pour rendre le calcul de distance plus précis pour certaines configurations. Il est alors possible de se retrouver dans un cas similaire à celui de la figure 4, la ligne rouge représentant un ensemble de points situés à la même distance ΔE_{2000} de la couleur de référence. L'algorithme d'ordonnancement trouvera donc plusieurs minima et ne sera pas capable d'ordonner correctement les couleurs (figure 5).

Différents tests ont été mis en place afin d'étudier de façon plus précise les résultats d'ordonnancement lorsque la dis-

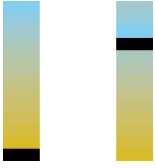


FIGURE 3 – à gauche : dégradé initial ; à droite : ordonnancement avec ΔE

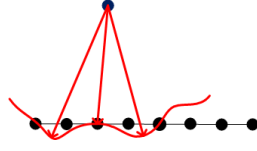


FIGURE 4 – Problème de la non-linéarité avec ΔE_{2000}

tance ΔE_{2000} ^b est utilisée. Ceux-ci prennent en compte différentes couleurs de convergence prises aléatoirement et des dégradés quelconques. Nous avons pu mettre en évidence qu’aucun cas de mauvais ordonnancement n’est trouvé lorsque la distance est inférieure à 5 unités *CIELAB*. Ce chiffre montre que la métrique ΔE_{2000} pour des distances inférieures à 5 unités *CIELAB* permet un ordonnancement que nous pouvons géométriquement valider ce qui n’est pas le cas lorsque les écarts couleur deviennent supérieurs à ce seuil de 5. De plus, l’observation des dégradés mal ordonnés (figure 5) met également en évidence une non linéarité perceptuelle des dégradés.

Pour compléter l’étude, nous avons comparé notre méthode utilisant la métrique ΔE ou ΔE_{2000} et les méthodes de priorité par plan dans les espaces *HLS* et *RGB*. Les trois méthodes testées sont celles utilisant les plans suivant ces ordres : $L \rightarrow S \rightarrow H$, $S \rightarrow L \rightarrow H$ et $I \rightarrow R \rightarrow G \rightarrow B$ (avec $I = \beta \cdot (0,299 \cdot R + 0,587 \cdot G + 0,114 \cdot B) + (1 - \beta) \cdot (M - m)$ où M et m le maximum et le minimum des valeurs R, G, B et ici $\beta = 0,5$). Ces dernières sont citées comme les principales méthodes permettant d’obtenir un ordonnancement total des couleurs [9, 2], et utilisées par de nombreux auteurs [1, 8, 10] parfois avec un ordre des plans différent [11]. Afin de mettre en défaut chacune des méthodes à comparer, plusieurs générateurs ont été utilisés pour créer les dégradés à partir des différents espaces colorimétriques. Le tableau 1 résume les résultats obtenus. Il en ressort que toutes les méthodes ordonnent correctement les dégradés en niveaux de gris.

générateurs	ΔE	ΔE_{2000}	<i>IRGB</i>	<i>LSH</i>	<i>SLH</i>
nv de gris	0%	0%	0%	0%	0%
<i>RGB</i>	<1%	<10%	>95%	>95%	>95%
<i>HSL</i>	<i>S</i>	0%	0%	0%	0%
	<i>L</i>	<16%	<7%	0%	0%
	<i>H</i>	<25%	<27%	30%	<26%
<i>CIELAB</i>	0%	0% ^c	>90%	>90%	>90%

TABLE 1 – Taux d’erreur d’ordonnement de chaque méthode d’ordonnement pour différents générateurs

De plus, lorsque les dégradés sont construits aléatoirement dans l’espace *RGB*, toutes les méthodes présentent des erreurs d’ordonnement, cependant le taux d’erreur obtenu avec une

b. Distance calculée entre une couleur de convergence et la couleur considérée en (x, y)

c. si $\Delta E_{2000} < 35$

approche en ΔE reste le plus faible et inférieur à 1%.

Pour les tests avec des dégradés créés dans l’espace *HLS*, 3 variantes ont été testées, pour chacune d’elles deux des composantes sont fixées et la troisième^d varie. Les résultats montrent que lorsque seule la saturation varie, toutes les approches sont exactes. En revanche, lorsque seule la luminance varie les approches directement liées à l’espace *HLS* ou *RGB* réussissent sans erreur l’ordonnement. Néanmoins, une variation de la teinte induit des taux d’erreurs important pour toutes les approches. Enfin pour les dégradés créés dans l’espace *CIELAB*, seules les approches utilisant les métriques ΔE et ΔE_{2000} réussissent à retrouver les ordonnancements initiaux, pour les autres approches les taux d’erreurs sont très élevé (>90%).

Nous en concluons que pour ordonner les couleurs, les méthodes utilisant la priorité de plan dans les espaces *HLS* et *RGB* ne sont pas adaptées, ou au mieux ne le sont que si les images ont été créées dans ces espaces.

La figure 6 présente un exemple d’impact de ces erreurs d’ordonnement pour toutes les méthodes. La première ligne montre une étoile construite avec un dégradé de vert vers du marron et l’ordonnement de ce dégradé par les différentes approches. Seule l’approche basée distance en ΔE réussit l’ordonnement exact. La seconde ligne montre les erreurs suite à une dilatation par un élément structurant diamant 3x3 (Noir = erreur nulle). Enfin la troisième ligne montre le résultat après 5 dilatations, où les erreurs initiales sont amplifiées.

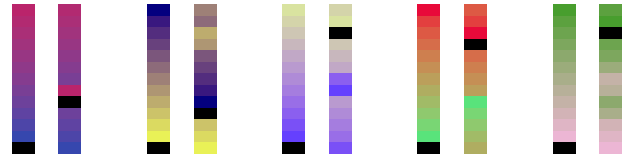


FIGURE 5 – Exemples de dégradés mal ordonnés

5 Conclusion

Dans le cadre de la morphologie mathématique couleur, nous avons développé une méthode d’ordonnement des couleurs qui tient compte de la perception des couleurs par le système visuel humain. Celle-ci s’appuie sur l’utilisation de métriques couleur. Dans ce cadre, nous avons ici étudié l’impact et la validité de différentes métriques perceptuelles pour l’ordonnement.

Face à la multitude de propositions scientifiques existantes, nous avons choisi de consolider notre propos par une validation de l’approche afin de définir la fonction de distance couleur la plus adaptée et de comparer les performances de notre proposition. L’étude quantitative présentée ici montre les limites de la métrique ΔE_{2000} pour des ordonnancements de distances supérieures à 5 unités *CIELAB*. Ce résultat est cohérent avec le

d. qui correspond aux différentes lignes du générateur *HLS* du tableau 1

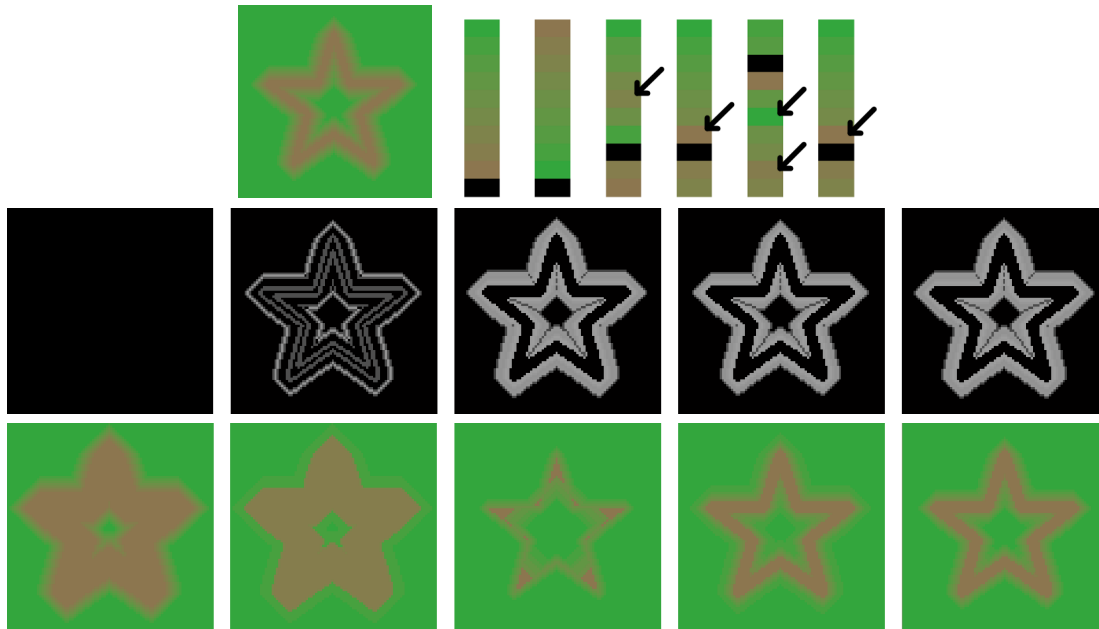


FIGURE 6 – 1^{ère} ligne : à gauche : image initiale avec dégradé couleur ; à droite : ordonnancements obtenus avec les couleurs du dégradé (de gauche à droite : dégradé initial, ΔE , ΔE_{2000} , $IRGB$, LSH , SLH). 2^{ème} ligne : Images des différences entre le résultat attendu et ceux obtenus avec les différentes méthodes à la première itération (amplifiés d'un coefficient de 10). 3^{ème} ligne : résultat obtenus à la cinquième itération. De la ligne 2 à 3 : de gauche à droite : ΔE , ΔE_{2000} , $IRGB$, LSH , SLH ; élément structurant croix et la couleur blanche comme point de convergence pour notre méthode ou la dilatation pour les autres méthodes.

texte de recommandation de la CIE, bien que cette limite ne soit citée, ni évoquée dans le domaine de la morphologie mathématique couleur et plus généralement du traitement d'images. Même si les résultats des approches classiques en morphologie couleur ($IRGB$, LSH , SLH) soient plus adaptés à des traitements dans l'espace HSL , cela ne suffit pas à les valider. Cet espace n'étant pas un espace d'acquisition ou de comparaison et les taux d'erreur pour les ordonnancement dans RGB étant supérieur à 95%. En revanche, la construction euclidienne de la métrique ΔE dans $CIELAB$ (ou $CIELUV$) présente les taux d'erreur d'ordonnement les plus faibles pour des dégradés générés dans RGB (inférieur à 1 %) et nul dans les espaces de comparaison de couleur ($CIELAB$ ou $CIELUV$).

Références

- [1] J. Angulo et J. Serra *Morphological coding of color images by vector connected filters*. Signal Processing and Its Applications, 1 :69-72, 2003.
- [2] E. Aptoula et S. Lefèvre. *On lexicographical ordering in multivariate mathematical morphology*. Pattern Recognition Letters, 29(2) :109-118, 2008.
- [3] P. Bonton, C. Fernandez-Maloigne et A. Tremeau (ouvrage collectif) *Image Numérique Couleur : de l'acquisition au traitement*. Dunod, 2004.
- [4] CIE, Commission Internationale de l'éclairage. *Industrial colour-difference evaluation*. CIE Publication, 116, 1995.
- [5] CIE, Commission Internationale de l'éclairage. *Technical Report : Improvement to Industrial Colordifference Evaluation*. CIE Publication, 142, 2001.
- [6] F.J.J. Clarke, R. McDonald et B. Rigg. *Modification to the JPC79 Colour-difference Formula*. Journal of the Society of Dyers and Colourists, 100(4) :128-132, 1984.
- [7] DIN. 6176. *Farbmetrische Bestimmung von Farbständen bei Körperfarben nach der DIN99-Formel (Colorimetric evaluation of colour differences of surface colours according to DIN99 formula-available in English)*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Burggrafentraße 6, 10787 Berlin, Germany. 1994.
- [8] A. Hanbury et J. Serra. *Mathematical morphology in the HLS colour space*. Proceedings of the British Machine Vision Conference, 451-460, 2001.
- [9] P. Lambert et J. Chanussot. *Extending mathematical morphology to color image processing*. Proc. CGIP, 2000.
- [10] G. Louverdis, M.I. Vardavoulia, I. Andreadis et P. Tsalides. *A new approach to morphological color image processing*. Pattern recognition, 35(8) :1733-1741, 2002.
- [11] F. Ortiz, F. Torres, E. De Juan et N. Cuenca. *Colour Mathematical Morphology For Neural Image Analysis*. Real Time Imaging, 8(6) :455-465, 2002.
- [12] N. Richard, A.S. Capelle-Lazé, M. Ivanovici et A. Ledoux *Colour Mathematical Morphology Based on Colour Distances : Theory and Validation*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Submitted, 2011.