

INCRUSTATION DE MICROSTRUCTURES PAR ÉCARTS CHROMATIQUES

THÈSE N° 2757 (2003)

PRÉSENTÉE A LA FACULTÉ INFORMATIQUE & COMMUNICATIONS

SECTION D'INFORMATIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES TECHNIQUES

PAR

Nicolas RUDAZ

ingénieur informaticien diplômé EPF
de nationalité suisse et originaire de Vex (VS)

acceptée sur proposition du jury :

Prof. Wulfram Gerstner, président du jury

Prof. Roger D. Hersch, directeur de thèse

Prof. Rudolf Gschwind, rapporteur

Prof. Jon Hardeberg, rapporteur

Prof. Sabine Süsstrunk, rapporteuse

Lausanne, EPFL

2003

Remerciements

Si ce travail a pu voir le jour, je le dois en premier lieu à la générosité du Professeur Roger David Hersch, mon directeur de thèse. Je tiens à le remercier de ses efforts et de sa ténacité à faire émerger l'ordre du chaos.

Je remercie ensuite mon collègue de travail le Docteur Itzhak Amidror qui a bien voulu relire mon manuscrit, et qui m'a toujours accordé le secours de son expérience.

Ma gratitude va également aux personnes qui ont accepté la charge d'évaluer ce travail : je remercie le Professeur Wulfram Gerstner, le Professeur Jon Hardeberg, le Docteur Rudolf Gschwind et la Professeure Sabine Süsstrunk de leur dévouement.

La collaboration avec la société Orell Füssli Security Documents AG a été riche d'enseignements et a permis une application pratique de ce travail : je remercie MM. Martin Eichenberger et Antonio Marraffino de leur coopération.

Mes derniers remerciements vont à mes parents, qui ne m'ont jamais mesuré ni leur compréhension, ni leur soutien.

Table des matières

	Version abrégée	8
	Summary	10
	Introduction	12
CHAPITRE 1	Colorimétrie et espaces couleur	14
	Rappels de colorimétrie	14
	Attributs perceptuels	14
	Luminosité	14
	Saturation	14
	Tonalité	15
	Espaces perceptuels	15
	CIE-XYZ	16
	CIE-Lab et CIE-LCh	17
	OSA	18
	Additivité et mélange optique	18
	Principe	18
	Espaces couleurs et additivité	19
	Moniteur, RGB et linéarité	19
	L'espace LEF	19
	Définition	19
	Les attributs perceptuels dans le système LEF	20
	Écarts chromatiques	22
	Spécification interactive d'écart chromatiques symétriques	22
CHAPITRE 2	Rendu d'images par écarts chromatiques symétriques	26
	Principe	26
	Micro-structure, fond et chair	27
	Contraintes	28
	Continuité de l'image	28
	Uniformité de la micro-structure	28
	Cohérence des écarts chromatiques	29
	Extrapolation des écarts chromatiques	29
	Cas général	30
	Extrapolation au voisinage de l'axe achromatique	32
	Projection achromatique	33
	Limite achromatique	34
	Interpolation entre la référence et l'axe achromatique	34

Extrapolation au voisinage des frontières du cube RGB	35
Projection radiale	36
Limite radiale	37
Interpolation radiale	37
Cas 1 : La couleur cible C est moins saturée que la limite achromatique	38
Cas 2 : La couleur cible C est plus saturée que la limite achromatique et moins saturée que la limite radiale	38
Cas 3 : La couleur cible C est plus saturée que la limite radiale	39
Evolution des écarts interpolés	39
CHAPITRE 3 Ecarts chromatiques asymétriques	42
Déséquilibre chair/fond	42
Ecarts chromatiques équilibrés	43
Extrapolation et recentrage	44
Taux de couverture : principes et problèmes	45
Calcul de taux de couverture par un filtre passe-bas	48
Calcul de taux de couverture par échantillonnage 1D	49
Echantillonnage 1D	50
Micro-élément et rectangle de validation	54
Propagation des mesures	55
Pavage de Voronoï	56
Qualité des taux de couverture calculés	57
CHAPITRE 4 Contraste uniforme	60
Espace LEF et contraste	60
Inversion du ΔL et annulation du contraste	61
Première expérience : seuils de discrimination du contraste	62
Protocole	62
Résultats	64
Deuxième expérience : contraste uniforme en saturation	67
Protocole	67
Résultats	68
Application à l'incrustation de microstructure	69
Recentrage des écarts chromatiques P3dS20	69
Ecarts chromatiques équi-lumineux	71
Luminosité CIE-Lab et luminosité dans LEF	71
CHAPITRE 5 Applications et résultats	74
Logiciel d'incrustation de microstructures	74
Fonctionnalités et performances	74
PhotoProtect	75
Description	75
Problèmes logiciels et solutions	77
Problèmes matériels et solutions	78
Brevet	80

	Conclusion.....	82
	Bibliographie.....	86
ANNEXE A	Formules de transformation entre CIE-Lab et CIE-XYZ.....	90
ANNEXE B	Constructions géométriques pour l'extrapolation d'écarts chromatiques au voisinage des frontières du cube RGB.....	92
	Extrapolation au voisinage des frontières du cube RGB.....	92
	Ramener les extrémités de la projection radiale à l'intérieur du cube RGB.....	92
	Construction de la projection radiale lorsque le centre de la projection achromatique sort du cube RGB.....	93
	Construction de la limite radiale lorsque la référence ne peut pas être ramenée par translation à l'intérieur du cube RGB.....	94
	Transformation de la limite achromatique lorsqu'elle est plus saturée que la limite radiale.....	94
	Interpolation radiale.....	95
	Interpolation radiale lorsque le centre de la limite achromatique est situé à l'extérieur du cube RGB.....	95
	Interpolation radiale lorsque la limite achromatique est plus saturée que la limite radiale.....	96
	Planches couleur.....	98
	Curriculum vitae.....	107

Version abrégée

Les dispositifs de reproduction d'images créent l'illusion d'une image couleur continue au moyen de trames, qui sont des structures répétitives de micro-éléments discrets. En eux-mêmes, ces micro-éléments n'ont aucune signification : leur seul rôle est de tromper l'oeil en lui faisant voir une plage de couleurs continues. Nous explorons une nouvelle manière de créer des images en couleurs contenant deux niveaux d'information, le premier niveau étant l'image globale, et le second niveau étant représenté par une microstructure porteuse de sens incrustée dans l'image globale. A distance de vision normale, seule l'image globale apparaît; une inspection rapprochée fait clairement apparaître le second niveau d'information.

Une microstructure est incrustée dans une image couleur au moyen d'écart chromatiques appliqués aux couleurs du fond et de la chair des micro-éléments. Ces écarts chromatiques peuvent se composer d'écarts en luminosité, en saturation ou en tonalité, et il est possible de combiner ces caractéristiques. A une certaine distance, les micro-éléments deviennent indiscernables et les couleurs de leur chair et de leur fond se mélangent pour produire les couleurs de l'image globale.

Un premier problème consiste à produire des écarts chromatiques continus dans un volume de couleurs donné. Un second problème est posé par la synthèse d'écarts chromatiques perceptuellement similaires pour toutes les couleurs possibles. Déterminer les proportions locales entre la chair et le fond de la microstructure et trouver les écarts chromatiques adaptés à ces proportions constitue un troisième problème.

Les outils que nous avons conçus automatisent l'incrustation de microstructures dans une image en couleurs. Ces microstructures peuvent prendre la forme d'images en noir et blanc numérisées ou dessinées à la main. Elles peuvent avoir un but décoratif en représentant un logo ou un motif ornemental, mais elles peuvent également servir à marquer un papier-valet ou un document d'identité dans le but de prévenir sa contrefaçon. L'information ainsi incrustée peut être spécifiquement adaptée à chaque exemplaire du document protégé pour accroître sa résistance à la falsification par substitution.

Summary

Electronic imaging devices produce the illusion of synthesizing continuous colors by applying halftones, which are repetitive structures of discrete micro-elements. By themselves, these microstructures do not carry any meaning: their only purpose is to fool the eye. We explore a new approach for creating color images with two layers of information, one layer of information being the global image and the second layer of information being represented by a meaningful microstructure embedded within the global image. When seen from far away, only the global image should be visible. From a close viewing distance, the microstructure should provide a clear visual impact.

A microstructure is incusted into a color image by synthesizing chromatic differences between the foreground and background of the microstructure shapes. When viewed from a large distance, microstructure shapes embedded in the global image should not be distinguishable by the human eye. The resulting perceived color should be a combination of foreground and background colors, weighted by their respective surfaces. We have much freedom in creating chromatic differences expressed in terms of lightness, saturation or hue difference components.

The first problem consists in creating continuous chromatic differences within a 3D color space. A second problem is the creation of perceptually similar chromatic differences across the color space. A further problem resides in determining the local coverage percentages of the microstructure's foreground and background, in order to appropriately choose their respective colors so as to ensure that when viewed from a certain distance, the combination of foreground and background appears as the desired target color.

The tools we created allow without much technical efforts to create global images incorporating freely designed or scanned bi-level microstructures. They may be used for advertisement as well as for creating huge posters incorporating artistically designed microstructures such as text, logos, and ornaments. In addition, the incrustation of characters and numbers into valuable document images (e.g. photographs in ID cards) provides a protection against counterfeiting attempts. The incrustation of such information can be specifically adapted to each instance of a security document, increasing its resistance against falsification by substitution.

Introduction

Nombre de moyens d'expression graphique et de procédés de reproduction d'images exploitent l'incapacité de l'œil humain à séparer deux points rapprochés et produisent des surfaces en apparence continues au moyen d'une structure régulière de petits éléments discrets. Le dessin et la gravure au burin ou à la pointe sèche expriment le volume des objets par un modelé fait de hachures entrecroisées; la mosaïque affiche une infinité de nuances à l'aide de petits cubes de verre dotés d'un nombre limité de couleurs; l'impression offset ou à jet d'encre recrée l'illusion photographique avec seulement quatre couleurs réparties en une trame de points microscopiques.

En eux-mêmes, ces micro-éléments n'expriment rien : leur seule raison d'être est de tromper l'œil en l'amenant à voir des nuances là où il n'y a que des couleurs primaires. Notre recherche s'inscrit dans la lignée de travaux qui, comme le tramage artistique, visent à leur faire endosser le rôle de vecteurs d'information. Nous explorons une nouvelle manière de créer des images en couleurs contenant deux niveaux de lecture, le premier niveau étant l'image globale, et le second niveau étant représenté par une microstructure porteuse de sens incrustée dans l'image globale. A distance de vision normale, seule l'image globale apparaît, mais une inspection rapprochée dévoile le second niveau de lecture.

Cette couche d'information supplémentaire est incrustée dans une image en couleurs en imposant une déviation chromatique aux pixels situés sur la chair de la microstructure. Une seconde déviation de même direction et de sens opposé compense la première en modifiant la chromaticité des pixels situés sur le fond de la microstructure. Ensemble, ces deux déviations forment un écart chromatique entre la chair et le fond de la microstructure. Au-delà d'une certaine distance, l'œil n'est plus capable d'en distinguer les micro-éléments : les couleurs de leur chair et de leur fond s'additionnent pour donner les couleurs de l'image originale. Cette synthèse additive est indépendante de l'orientation des déviations qui constituent l'écart chromatique : celui-ci peut prendre la forme d'un contraste de luminosité, de saturation ou de tonalité; il est également possible de combiner ces trois caractéristiques.

Un premier problème consiste à produire une famille d'écarts chromatiques occupant de façon continue et cohérente la totalité d'un volume de couleurs donné. Après avoir brièvement évoqué au chapitre 1 les notions de colorimétrie utilisées dans cette recherche, nous présentons un espace couleur additif permettant de spécifier un écart chromatique pour une couleur de référence. Nous montrons ensuite au chapitre 2 comment transformer géo-

métriquement un écart de référence dans cet espace afin de l'adapter à une autre couleur tout en préservant simultanément l'image globale et la microstructure.

Produire une image globale chromatiquement fidèle pose un deuxième problème, car il est nécessaire de transformer l'écart chromatique en fonction de la proportion locale de chair et de fond dans la microstructure incrustée. Le chapitre 3 détaille cette transformation et propose un algorithme permettant de calculer le taux de couverture local d'une microstructure en s'adaptant automatiquement aux variations de taille et de répartition des micro-éléments qui la composent.

Un troisième problème survient lorsqu'on cherche à créer une microstructure présentant des contrastes identiques sur toute la surface de l'image. Le chapitre 4 expose deux expériences psycho-visuelles ayant servi à déterminer une famille de contrastes uniformes pour tout le volume des couleurs. Comme ces contrastes ne valent que pour un ensemble restreint de fréquences spatiales, une méthode générale pour uniformiser un écart chromatique en contrôlant sa luminosité est également proposée.

Les outils logiciels conçus pour résoudre les problèmes rencontrés sont présentés au chapitre 5, qui traite également de leurs applications. Les microstructures incrustées peuvent servir un but décoratif en représentant un logo ou un motif ornemental, mais elles peuvent également prendre la forme d'un texte authentifiant un papier-valeur ou un document d'identité dans le but de prévenir sa contrefaçon. La visibilité de ce tatouage est entièrement contrôlable : en utilisant des écarts numériquement importants mais de faible contraste, il peut devenir invisible et n'apparaître qu'après un traitement approprié. L'information ainsi incrustée peut être spécifiquement adaptée à chaque exemplaire du document protégé pour accroître sa résistance à la falsification par substitution. Nous avons réalisé une application industrielle de ce marquage personnalisé pour le nouveau permis de conduire suisse.

1.1 Rappels de colorimétrie

Comme l'objet de ce travail est essentiellement de nature visuelle, un détour par les différentes branches de la science de la vision s'avère indispensable pour alimenter notre connaissance du sujet et pour préciser les termes que nous allons utiliser par la suite. Par souci de concision, nous restreindrons ce détour aux notions trouvant une application dans ce travail.

1.2 Attributs perceptuels

S'il est vrai que, physiquement parlant, une couleur est entièrement déterminée par son spectre, une telle représentation est si éloignée de notre expérience quotidienne qu'elle n'est pas utilisable dans un contexte descriptif. De nombreux travaux ont montré que la perception humaine discerne trois qualités distinctes dans une couleur [Guillemard98]. Ces attributs perceptuels de la sensation colorée ne sont pas totalement indépendants les uns des autres.

1.2.1 Luminosité

Appelée également valeur ou luminance, cet attribut mesure la quantité de lumière qu'émet une couleur comparativement au blanc de référence, qui a par définition la plus haute luminosité possible. Une couleur peu lumineuse est qualifiée de foncée, et une couleur très lumineuse, de claire. Cet attribut est facile à appréhender intuitivement, parce qu'il correspond à une fonction bien distincte de notre système visuel [Hunt92].

1.2.2 Saturation

La saturation mesure le degré de pureté d'une couleur. Les couleurs spectrales sont très saturées, les gris sont peu saturés. On parle également de vivacité des couleurs, en les répartissant en couleurs vives et en couleurs ternes. Il est moins facile d'appréhender intuitivement cet attribut, car il n'est pas totalement indépendant de la luminosité. On sait en général fort bien classer par ordre de saturation croissant une famille de couleur ayant plus

ou moins la même tonalité et la même luminosité, mais l'exercice est plus difficile lorsqu'on a affaire à des couleurs très différentes les unes des autres.

1.2.3 Tonalité

Appelée également teinte, la tonalité est différente des deux attributs précédents en ceci qu'elle n'a ni minima ni maxima. La psychologie de la perception distingue quatre tonalités fondamentales, organisées en deux paires de tonalités antagonistes : l'opposition rouge-vert, et l'opposition jaune-bleu [Krauskopf82]. Ces paires sont dites antagonistes parce qu'elles s'excluent mutuellement : il n'existe pas de rouge verdâtre ou de jaune tirant sur le bleu. On représente ces quatre tonalités fondamentales comme les extrémités de deux diamètres orthogonaux d'un même cercle. Une telle représentation s'appuie sur le fait que notre système visuel perçoit le spectre des couleurs et la ligne des pourpres sous la forme d'un continuum cyclique. Cette représentation est conforme à la réalité perceptuelle, mais pas à la réalité physique : elle montre le rouge et le bleu comme proches, alors que, physiquement parlant, ces couleurs sont situées aux deux extrémités opposées du spectre. Elle met en outre les pourpres sur le même pied que les couleurs spectrales, alors que ce ne sont justement pas des couleurs pures. Dans une telle représentation, la tonalité prend la valeur d'un angle, avec les quatre tonalités fondamentales situées aux multiples entiers de $\pi/2$.

1.3 Espaces perceptuels

Avant d'aborder la description des espaces couleur utilisés dans ce travail, il convient de se pencher brièvement sur leur classification. Il n'existe pas d'espace universel permettant de décrire les couleurs de manière précise et exhaustive dans les trois perspectives divergentes de la physique, de la sensation et de la perception. Si l'on ajoute à ces trois perspectives la nécessité de décrire les couleurs en fonction de l'appareil qui sert à les produire, on peut répartir les espaces-couleur décrits par la littérature en quatre classes distinctes :

1. Espaces conçus pour la mesure physique des couleurs (spectre)
2. Espaces liés à un périphérique, conçus pour la production de couleurs sur un dispositif donné (*RGB*, *CMYK*) [Foley93]
3. Espaces conçus pour prédire la sensation produite par une couleur dans des conditions d'observation rigoureusement définies (*CIE-XYZ*, *CIE-Lab*, *CIE-Luv*, *CIE-Lcb*) [Wyszecki82]
4. Espaces conçus pour décrire la perception des couleurs en fonction de leur voisinage et dans des conditions d'observation variables (modèles de Hunt, de Nayatani, CIECAM) [Fairchild98]

Le but premier de ce travail est d'introduire des variations locales des couleurs dans une image imprimée ou affichée sur un écran d'ordinateur. Par conséquent, nous utilisons principalement la deuxième classe d'espaces-couleur. Comme nous souhaitons exercer un contrôle sur ces variations afin de les maintenir dans des limites précises, nous utilisons également la troisième classe d'espaces-couleur. Nous nous limitons aux conditions d'observation qu'on peut trouver dans une pièce convenablement éclairée, ce qui nous permet d'éviter l'utilisation de modèles destinés à rendre compte des changements d'apparence des couleurs en fonction des conditions d'observation.

1.3.1 CIE-XYZ

Bien qu'il ne soit pas directement utilisé dans ce travail, l'espace *CIE-XYZ* joue le rôle de jonction entre les espaces liés au périphérique de reproduction et les espaces colorimétriques proprement dits.

Deux contraintes nous ont conduit à choisir un moniteur comme périphérique de référence. Premièrement, la technique que nous cherchons à développer requiert l'application d'un éventail de couleurs aussi vaste que possible à des surfaces de taille restreinte. Les techniques d'impression couramment accessibles que sont l'impression laser et le jet d'encre sont toutes deux limitées à quatre tons discrets et simulent les demi-tons au moyen de trames. Quoique conçues pour être aussi peu voyantes que possible sur les images imprimées, ces trames présentent néanmoins l'inconvénient d'interférer avec la microstructure que nous cherchons à produire. Nous préférons donc un périphérique à tons continus. Deuxièmement, il est indispensable de produire des couleurs de manière fiable et contrôlée. Or, les procédés de caractérisation et de calibration d'imprimantes couleur exigent beaucoup de temps, alors que la caractérisation et à la calibration d'un moniteur prennent environ une minute, tout en offrant une meilleure précision.

Ces raisons nous ont porté à choisir un moniteur calibré de marque LaCie et de modèle *electron21/108* comme périphérique de référence pour la génération d'images couleur. Cet appareil comporte deux parties distinctes : le moniteur proprement dit reçoit ses trois signaux *R*, *G* et *B* de la carte vidéo. Il est en outre doté de capteurs internes mesurant divers paramètres tels que la température et la tension effective de ses cathodes, et transmet ces paramètres à l'unité centrale au moyen d'un câble série indépendant. Ce lien est bidirectionnel, et permet également à l'unité centrale de transmettre des consignes au moniteur afin de modifier son comportement, ce qui constitue une méthode plus précise et plus fiable que la modification des paramètres de la carte vidéo habituellement utilisée dans ce but. Une sonde de mesure reliée à l'unité centrale par un câble ADB constitue la deuxième partie de ce dispositif; cette sonde comporte trois capteurs présentant une réponse identique aux courbes de sensibilité spectrales définies par la CIE [Wyszecki82], et peut se fixer au moniteur par une ventouse. Un logiciel ad hoc permet d'imposer en permanence un comportement défini au moniteur.

Après calibration, les caractéristiques du moniteur ont les valeurs suivantes : le point blanc est fixé à 6500K avec une luminance de 75.4 cd/m^2 . La luminance du noir vaut 0.34 cd/m^2 , et le gamma de la fonction de transfert est fixé à 1.8 pour chacun des trois canaux *R*, *G* et *B* [Poynton96]. On vérifie en outre que les valeurs recueillies par la sonde de mesure correspondent aux mesures effectuées par un appareil de mesure indépendant (Minolta, modèle CRT Color Analyzer CA-100). Cet appareil permet en outre de mesurer les chromaticités *CIE-XYZ* des phosphores *R*, *G* et *B*, pour lesquels on obtient :

$$\begin{aligned} R_{xyz} &= [X_R \ Y_R \ Z_R] = [35.14 \ 20.20 \ 1.89] \\ G_{xyz} &= [X_G \ Y_G \ Z_G] = [25.13 \ 59.10 \ 9.88] \\ B_{xyz} &= [X_B \ Y_B \ Z_B] = [14.45 \ 6.97 \ 79.60] \end{aligned} \quad (1.1)$$

Ces caractéristiques nous permettent de définir la transformation d'une couleur C depuis l'espace RGB du moniteur vers l'espace $CIE-XYZ$ ainsi que la transformation inverse comme :

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{XYZ} &= \mathbf{M} \cdot \mathbf{C}_{RGB}^{1.8} \\ \mathbf{C}_{RGB} &= \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{C}_{XYZ}^{\frac{1}{1.8}} \end{aligned} \quad (1.2)$$

où \mathbf{M} est une matrice construite à partir des chromaticités des primaires :

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} R_{XYZ} \\ G_{XYZ} \\ B_{XYZ} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 35.14 & 25.13 & 14.45 \\ 20.20 & 59.10 & 6.97 \\ 1.89 & 9.88 & 79.60 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

La mise en oeuvre informatique de ces formules de transformation impose de prendre certaines précautions lors de la l'application de la correction gamma et de son inverse [Olds99, Post00]. Au cours de la transformation de l'espace CIE-Lab vers l'espace RGB du moniteur, la conversion de valeurs RGB en virgule flottante en valeurs RGB en nombre entiers introduit une erreur d'arrondi qui peut produire une couleur CIE-Lab différente de la couleur désirée. Comme les différences de luminosité sont plus visibles que les différences de saturation ou de tonalité (chapitre 4), nous privilégions la précision en luminosité en arrondissant les valeurs RGB de manière à afficher la couleur ayant la luminosité la plus proche de la couleur CIE-Lab désirée.

L'utilisation d'un moniteur calibré nous permet également de définir un profil ICC pour ce périphérique. Ce profil trouve son utilité lors de la production d'images imprimées, que nous avons choisi d'effectuer sur une imprimante à sublimation d'encre (Kodak, modèle 8670 PS). En dépit de sa résolution peu élevée de 300 dpi, cette imprimante utilise des tons réellement continus au lieu de les simuler par un tramage, et évite de ce fait toute interférence avec la microstructure incrustée dans l'image. Un second avantage réside dans le fait que ce modèle d'imprimante a été conçu pour le tirage d'épreuves avant l'impression offset, et qu'il offre par conséquent une excellente stabilité colorimétrique. En outre, son système de gestion de la couleur est compatible avec la norme ICC et nous permet donc d'obtenir des épreuves fiables des images produites sur le moniteur de référence. En pratique, nous avons pu constater un $\Delta E_{CIE-Lab}$ maximal inférieur à 2 pour les couleurs situées dans le volume des couleurs imprimables.

1.3.2 CIE-Lab et CIE-LCh

Le système CIE-XYZ n'offre pas la possibilité de définir une métrique perceptuelle, et la nature imaginaire de ses axes principaux ne permet pas de s'en faire une représentation intuitive. L'espace CIE-Lab remplit partiellement ces besoins, puisqu'il possède une métrique pour les petits écarts chromatiques, et que ses axes principaux sont basés sur la luminosité et sur les quatre tonalités fondamentales (section 1.2.3, p.15). Il est en outre possible d'en dériver un système basé sur les attributs perceptuels, en remplaçant les quantités a^* et b^* par les quantités C_{ab}^* pour la saturation et h_{ab} pour la tonalité.

Les formules de transformation entre les systèmes CIE-XYZ et CIE-Lab sont détaillées à l'annexe A.

1.3.3 OSA

Ce système fut développé par l'Optical Society of America dans le but d'offrir des échelles de couleur uniformes suivant le plus grand nombre d'axes possibles [OSA77]. Il utilise une grille discrète à symétrie rhombo-icosaédrique, et chaque couleur y possède 12 voisins directs. Ces voisins sont répartis sur 6 droites, et les couleurs se trouvant sur des sommets par lesquels passe une de ces droites sont perceptuellement équidistantes et forment ensemble un dégradé uniforme.

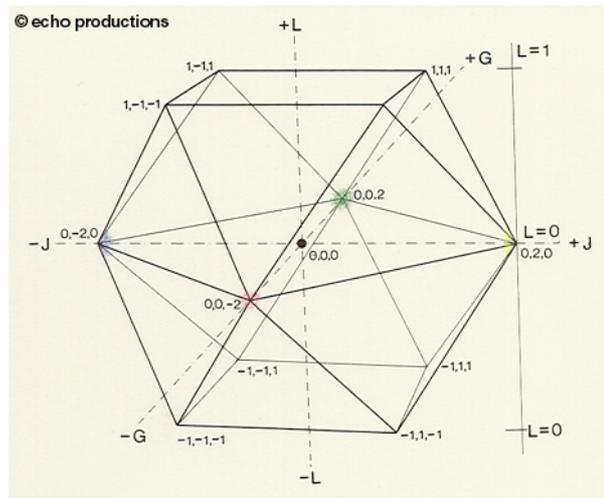


Fig.1.1 Rhombo-icosaèdre structurant l'espace OSA

Le système OSA définit également trois axes L , j et g , qui correspondent à la luminosité, à l'opposition jaune-bleu et à l'opposition vert-rouge. Chaque sommet discret de l'espace OSA possèdent une équivalence dans le système CIE-xyY, et une transformation permet de passer du système CIE-xyY aux coordonnées Ljg du système OSA. Cependant, la nature essentiellement discrète de ce système ne permet pas le développement d'une métrique réellement uniforme, ce d'autant plus qu'il n'est pas possible d'interpoler des échelles uniformes entre les axes principaux. Enfin, ces échelles ne sont uniformes que de proche en proche : une nouvelle échelle fabriquée en prenant une couleur sur deux dans une des échelles pré-définies n'est plus uniforme.

1.4 Additivité et mélange optique

L'incrustation de microstructure par écarts chromatiques repose sur la synthèse additive des couleurs, un principe dont les règles furent exposées pour la première fois par Helmholtz au milieu du XIX^e siècle [Roque97]. Le principe du contraste simultané des couleurs exposé dans les travaux de Chevreul influence également la perception des écarts chromatiques [Chevreul, Viénot01a, Viénot01b]. Il a été sporadiquement exploité par certains peintres impressionnistes tels que Monet, et de façon systématique par le post-impressionniste Georges Seurat dans des tableaux couramment désignés sous le terme de pointillistes, mais qu'il préférait lui-même nommer divisionnistes.

1.4.1 Principe

La superposition de deux faisceaux de lumière colorée de spectres S_1 et S_2 produit une lumière colorée de spectre résultant $S_3 = S_1 + S_2$. Cette superposition peut avoir lieu sur la

surface où les faisceaux sont projetés, mais l'effet est le même si les couleurs sont placées côte à côte et que le mélange se produit dans l'œil de l'observateur. Ce second type de superposition, que nous nommons *mélange optique* pour le distinguer du premier, fait intervenir des plages de couleur suffisamment petites pour que l'œil ne puisse les distinguer à distance de vision normale. On lui trouve une application dans les écrans à tube cathodique, à plasma ou à cristaux liquides, mais il était déjà exploité de façon empirique dans les mosaïques du temps de l'Empire Romain.

1.4.2 Espaces couleurs et additivité

La représentation de couleurs sous forme de spectres est physiquement la plus précise, mais elle n'est pas adaptée aux besoins de l'imagerie électronique. Une représentation trichromatique lui est préférable pourvu qu'elle rende compte du mélange optique des couleurs de façon exacte. Cette contrainte limite le choix des espaces couleur : en effet, parmi les systèmes vus jusqu'ici, seuls les espaces CIE-XYZ et RGB sont linéaires et permettent d'additionner deux couleurs avec exactitude.

1.4.3 Moniteur, RGB et linéarité

Un moniteur à tube cathodique présente une courbe de transfert de la forme $y = x^\gamma$, où x représente la tension appliquée à la cathode et y , l'énergie lumineuse émise par les phosphores (équation 1.2, p. 17). Par conséquent, l'addition de deux couleurs dans l'espace RGB_{image} utilisé pour spécifier les couleurs des images à afficher au moniteur produit un résultat différent de l'addition physique de ces mêmes couleurs. Il est donc nécessaire d'effectuer cette addition dans un espace RGB_{physique} modélisant correctement le comportement physique du périphérique utilisé. Les formules de transformation entre ces deux espaces sont :

$$\begin{aligned} RGB_{\text{physique}} &= RGB_{\text{image}}^\gamma \\ RGB_{\text{image}} &= RGB_{\text{physique}}^{\frac{1}{\gamma}} \end{aligned} \quad (1.4)$$

L'espace RGB utilisé dans la suite de ce travail est linéaire et correspond donc toujours à l'espace RGB_{physique} .

1.5 L'espace LEF

Aucun des espaces chromatiques vus jusqu'ici ne possède simultanément les deux propriétés de linéarité et de cohérence perceptuelle qui sont nécessaires à la spécification et au calcul d'écart chromatiques. Pour pallier ce manque, nous utilisons un nouvel espace couleur, le système LEF [Rudaz97].

1.5.1 Définition

On peut définir un espace couleur combinant l'additivité de l'espace RGB avec une approximation des attributs perceptuels intuitifs que sont la luminosité, la tonalité et la saturation en appliquant une transformation linéaire à l'espace RGB. Cette transformation a pour effet de redresser le cube RGB et de le faire reposer sur le coin correspondant au noir. L'axe noir-blanc, ou axe achromatique, est dressé à la verticale et devient l'axe L du système de coordonnées LEF ainsi créé. Les deux axes horizontaux E et F définissent un plan

perpendiculaire à l'axe L. L'axe E contient la paire de couleurs antagonistes rouge-cyan, et l'axe F contient la paire de couleurs antagonistes vert-magenta. La transformation linéaire utilisée comprend une homothétie assurant que les coordonnées transformées appartiennent à l'intervalle $[-1, 1]$ pour les axes E et F, et à l'intervalle $[0, 2]$ pour l'axe L.

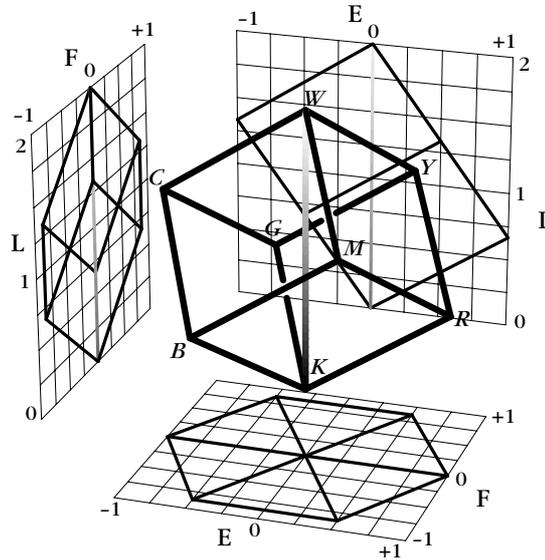


Fig.1.2 Le cube *RGB* vu dans l'espace *LEF*

L'espace LEF présente des similarités avec l'espace IHS utilisé en traitement d'images dans les années 80 [Niblack85]. Les formules de transformation entre l'espace RGB normalisé et l'espace LEF sont :

$$\begin{bmatrix} L \\ E \\ F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{2}{3} & \frac{2}{3} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{2}{3} & 0 \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{3} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L \\ E \\ F \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

1.5.2 Les attributs perceptuels dans le système LEF

Contrairement au système CIE-Lab et à ses dérivés, l'espace LEF n'est pas un système perceptuel. Cependant, il est possible d'y définir des approximations de la luminosité, de la tonalité et de la saturation. La composante L verticale d'une couleur LEF peut être assimilée à sa valeur achromatique, ou encore à sa luminosité. Les composantes E et F correspondent à sa chromaticité. La valeur $\sqrt{E^2 + F^2}$ donne la distance entre une couleur $C = [L, E, F]$ et l'axe L, qui est une valeur approchée de la saturation de C. L'angle horizontal entre l'axe E et la projection de C sur le plan EF est donné par $\text{atan}\left(\frac{E}{F}\right)$. Il peut être considéré comme une approximation de la tonalité de C.

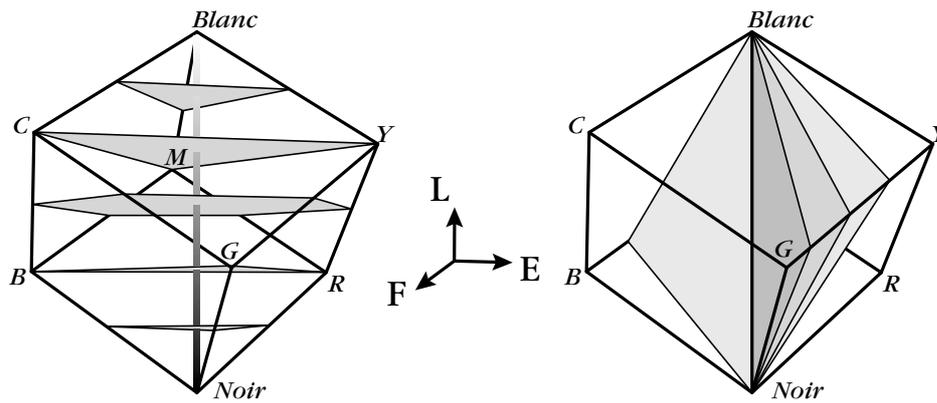


Fig.1.3 Division de l'espace LEF en sections à luminosité constante et à tonalité constante

La définition des attributs perceptuels associés à l'espace LEF permet de découper celui-ci par des plans qui permettent une représentation en deux dimensions. Une première famille de plans horizontaux perpendiculaires à l'axe L découpe le cube RGB en sections à luminosité L_{LEF} constante, notées cL . Une deuxième famille de plans méridiens contenant l'axe L découpe le cube RGB en sections contenant deux tonalités opposées et constantes, notées cH .

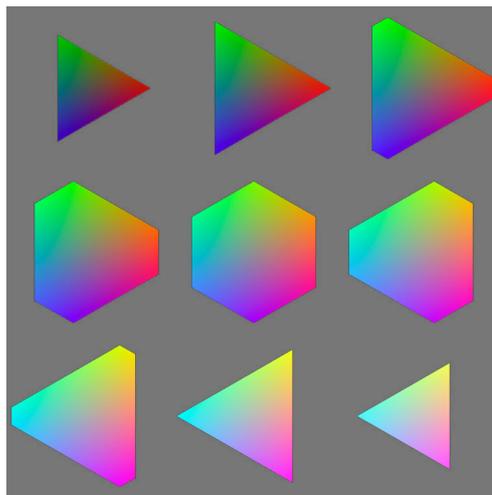


Fig.1.4 Sections équi-lumineuses de l'espace LEF (planche 1, p. 99)

Le découpage de l'espace LEF par des plans méridiens produit des surfaces contenant toutes les saturations et les luminosités possibles pour une paire de tonalités opposées. Bien que les tonalités d'une section soient au nombre de deux, nous les désignons sous le terme de sections équi-tonales.

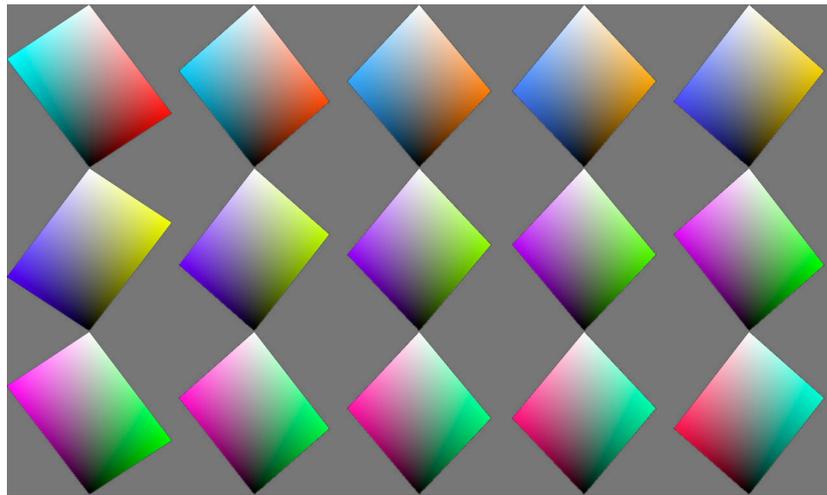


Fig.1.5 Sections équi-tonales de l'espace LEF (planche 2, p. 99)

1.6 Ecart chromatiques

L'espace LEF est linéaire, car il est construit à partir d'une transformation linéaire de l'espace RGB. Selon les lois de Grassmann, l'addition de deux couleurs juxtaposées C_1 et C_2 , pondérées par leurs surfaces respectives α_1 et α_2 se définit comme :

$$C = \frac{\alpha_1 C_1 + \alpha_2 C_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (1.7)$$

De même, pour toute couleur C qui ne se trouve pas sur l'un des sommets du cube RGB, il existe une infinité de paires de couleurs à écart symétrique $\{C_-, C_+\}$ telles que $C = C_- + C_+$. Par conséquent, il est toujours possible de reproduire une plage d'une couleur C n'appartenant pas à l'ensemble $\{K, W, R, G, B, C, M, Y\}$ au moyen d'un écart $\{C_-, C_+\}$ symétrique par rapport à C . Les trois couleurs C , C_- et C_+ appartiennent à une même droite; C_- et C_+ s'écartent symétriquement de C (figure 1.6).

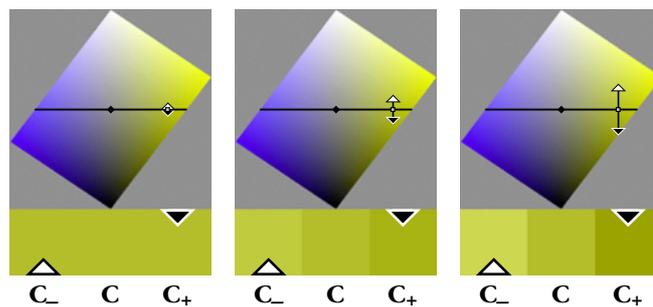


Fig.1.6 Deux couleurs C_- et C_+ s'écartant progressivement et symétriquement d'une troisième couleur C (planche 4, p. 100)

1.6.1 Spécification interactive d'écart chromatiques symétriques

Une application permettant la spécification, la visualisation et l'ajustement d'écart chromatiques dans l'espace LEF a été développée sous MacOS. Sa vue principale représente

une section cL et une section cH de l'espace LEF. Sur chaque section, la projection de l'autre section est représentée par une ligne noire.

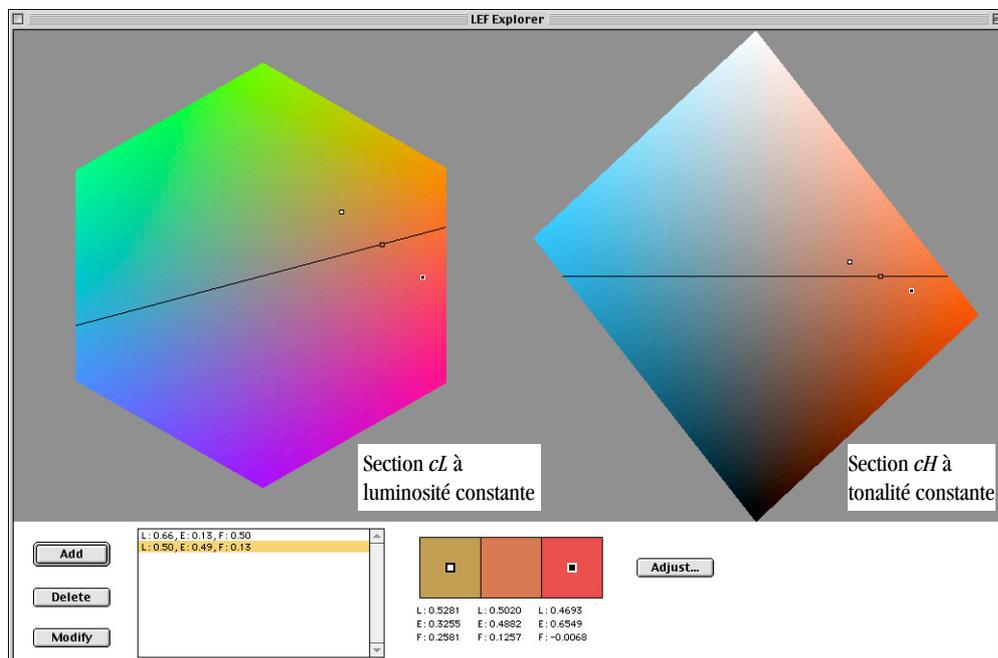


Fig.1.7 Fenêtre principale du sélecteur d'écart chromatiques (planche 3, p. 99)

La sélection de la luminosité et de la tonalité s'effectue au moyen des lignes de projection d'une section sur l'autre. La ligne oblique représentant la section cH sur la section équiluminieuse peut tourner autour de son axe, ce qui modifie l'affichage de la section cH en conséquence. De même, la ligne horizontale représentant la section cL sur la section équitonale peut être déplacée verticalement, ce qui modifie l'affichage de la section cL en conséquence.

La couleur sélectionnée est représentée par deux curseurs carrés centrés sur chacune des deux lignes de projection des sections cL et cH . On modifie sa saturation en faisant coulisser l'un de ces deux curseur le long de sa ligne de projection; la position de l'autre curseur est immédiatement adaptée en fonction du curseur déplacé. Les coordonnées LEF et l'aspect de la couleur sélectionnée sont affichées dans une zone séparée dans la partie inférieure de la fenêtre.

Une fois que le choix de l'utilisateur s'est fixé sur une couleur C , il est possible de séparer le curseur carré indiquant la position de C dans l'espace en deux indicateurs complémentaires. Ces nouveaux curseurs représentent les couleurs C_- et C_+ d'un écart chromatique dont la résultante est C . Ils peuvent être librement déplacés sur les deux sections cL et cH , dans les limites du volume des couleurs. Un déplacement du curseur correspondant à C_- est automatiquement compensé par un déplacement équivalent du curseur correspondant à C_+ dans la direction opposée, et vice versa. Les coordonnées LEF et l'aspect des deux couleurs de l'écart chromatique sont affichés dans la partie inférieure de la fenêtre, de part et d'autre de la zone où sont affichés les coordonnées LEF et l'aspect de C .

Une fenêtre auxiliaire permet de juger l'aspect visuel du contraste produit par un écart chromatique. Il est en outre possible d'augmenter et de diminuer avec précision l'écart entre C_- et C_+ au moyen du clavier. La direction de la droite supportant l'écart chromatique reste constante au cours de cet ajustement.

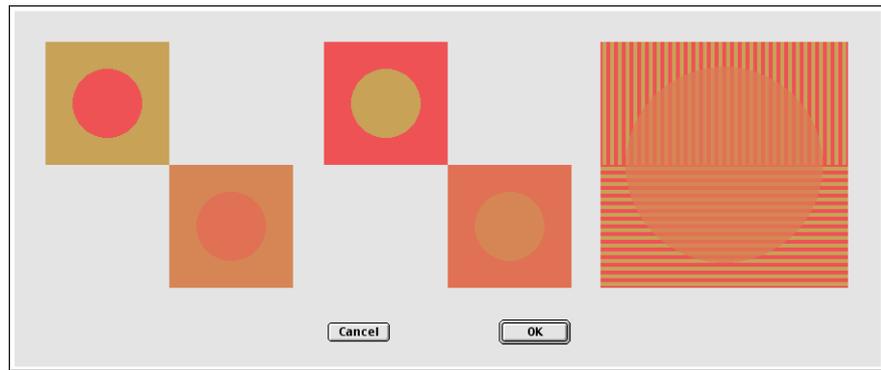


Fig.1.8 Fenêtre permettant de visualiser l'aspect d'un écart chromatique et d'ajuster sa taille (planche 5, p. 100)

Il est possible de modifier la position de C après qu'un écart chromatique ait été spécifié pour cette couleur. Les couleurs C_- et C_+ sont alors modifiées de façon à reproduire la nouvelle couleur. Au besoin, l'écart entre C_- et C_+ est réduit pour que les deux couleurs restent à l'intérieur du cube RGB. L'écart chromatique original reste stocké en mémoire, et il est possible d'ajuster la taille du nouvel écart par rapport à l'ancien. En procédant de proche en proche, on peut définir une famille d'écart chromatiques visuellement équivalents.

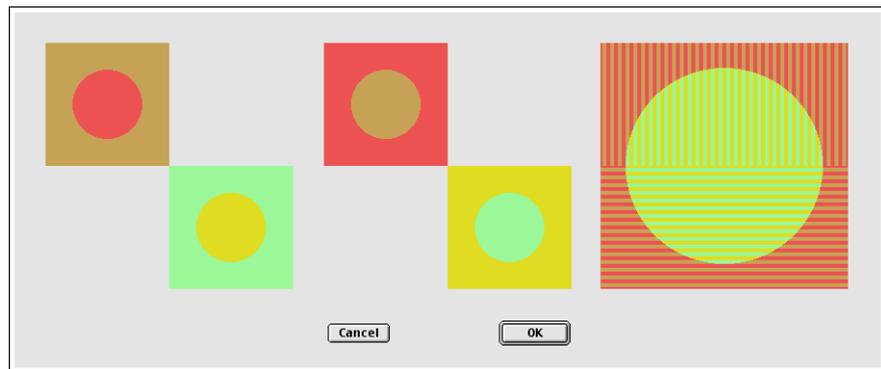


Fig.1.9 Ajustement d'une différence chromatique par rapport à une différence chromatique de référence (planche 6, p. 100)

Les écarts chromatiques peuvent être stockés dans une liste au fur et à mesure de leur spécification. Il est possible de revenir à tout moment sur un écart précédemment spécifié afin de le modifier. Cette liste d'écart chromatiques peut être stockée sur disque sous la forme d'un fichier de texte que l'application pourra relire lors d'une session ultérieure. Comme le format de fichier est conçu pour être lisible par l'utilisateur, celui-ci peut également le modifier et l'étendre en dehors du sélecteur d'écart chromatiques. Les écarts chromatiques ainsi créés jouent le rôle d'écart de référence pour l'incrustation d'une microstructure, en fournissant l'orientation et la taille du contraste couleur que l'on souhaite appliquer à la microstructure.

Rendu d'images par écarts chromatiques symétriques

A lui seul, un écart chromatique tel qu'il est défini au chapitre 1 (section 1.6, p. 21) est d'une utilité restreinte, puisqu'il ne vaut que pour une seule couleur. Le présent chapitre expose le mécanisme fondamental utilisé par le procédé d'incrustation d'une micro-structure dans une image couleur. Ce mécanisme repose sur trois éléments : un motif en noir et blanc représentant la micro-structure à incruster, un écart chromatique de référence indiquant les modifications chromatiques à utiliser pour l'incrustation, et une image en couleurs à traiter.

2.1 Principe

Un écart chromatique symétrique est défini comme un triplet de couleurs $\Delta C = \{C, C_-, C_+\}$ dans l'espace LEF satisfaisant à la relation

$$C = C_- + C_+ \quad (2.1)$$

La couleur C est définie comme le *centre* de l'écart symétrique, et les couleurs C_- et C_+ en sont les *extrémités* négatives et positives. La propriété énoncée dans l'équation 2.1 indique qu'un mélange additif d'une quantité égale des deux couleurs correspondant aux deux extrémités d'un écart chromatique symétrique produit une couleur équivalente à celle de son centre. Dans l'espace LEF, cette propriété entraîne que les trois points C, C_- et C_+ constituant un écart symétrique sont colinéaires, et que les deux points C_- et C_+ situés aux extrémités d'un écart symétrique se trouvent de part et d'autre de son centre C , à égale distance de ce dernier.

Nous aurons besoin par la suite de traiter de la *norme* d'un écart chromatique. Cette norme est définie comme la norme de la différence vectorielle entre ses deux extrémités. De même, on utilisera les termes de *demi-norme négative* pour parler de la norme de la différence vectorielle entre le centre d'un écart chromatique et son extrémité C_- , et celui de *demi-norme positive* pour la norme de la différence vectorielle entre son centre et son extrémité C_+ . Dans le cas d'un écart symétrique, ces deux demi-normes sont évidemment égales.

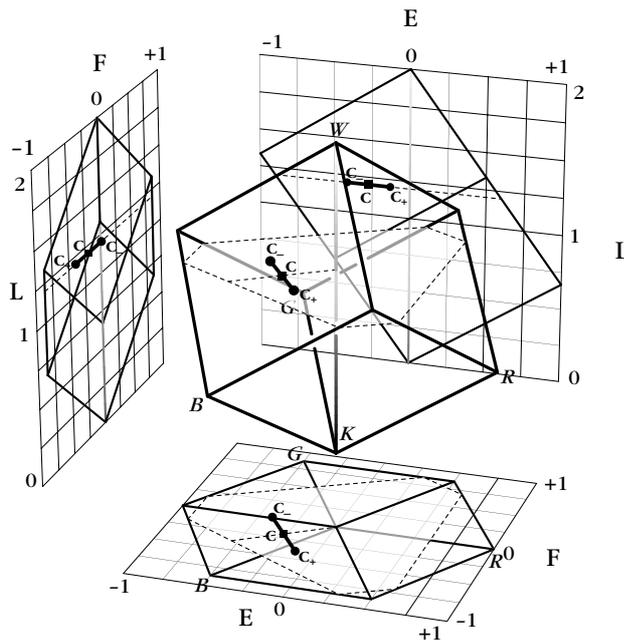


Fig.2.1 Représentation d'un écart chromatique en saturation et en tonalité, avec ses projections sur les plans LE, LF et EF

2.1.1 Micro-structure, fond et chair

L'utilisation d'un écart chromatique symétrique permet de reproduire une couleur donnée dans l'image à traiter au moyen d'une quantité égale de deux autres couleurs. Comme un pixel constitue le plus petit élément d'une image, il n'est évidemment pas question de le subdiviser en deux parties possédant chacune sa couleur. En revanche, il est possible d'effectuer cette subdivision pour un groupe de pixels formant un voisinage dans l'image à traiter. Les pixels de ce voisinage peuvent être répartis entre deux sous-ensembles distincts de même taille. On remplace la couleur des pixels appartenant au premier sous-ensemble par celle de la première des deux extrémités de l'écart symétrique, et on utilise celle de la deuxième extrémité pour remplacer la couleur des pixels appartenant au deuxième sous-ensemble. Une telle répartition peut être matérialisée par un motif en noir et blanc ayant exactement la même forme et le même nombre de pixels que le voisinage à subdiviser, et qui soit composé d'un nombre égal de pixels blancs que de pixels noirs. On utilise le terme de *chair* pour désigner la partie noire de ce motif, et celui de *fond* pour désigner sa partie blanche. Par extension, l'ensemble des pixels d'un voisinage donné correspondant à la chair du motif utilisé est désigné comme la chair de la microstructure, et l'ensemble complémentaire de ces pixels est désigné comme le fond de la micro-structure.

Par convention, les pixels d'un voisinage donné situés dans la chair du motif utilisé sont associés à l'extrémité C_+ de l'écart chromatique, et les pixels situés dans le fond du motif sont associés à son extrémité C_- .

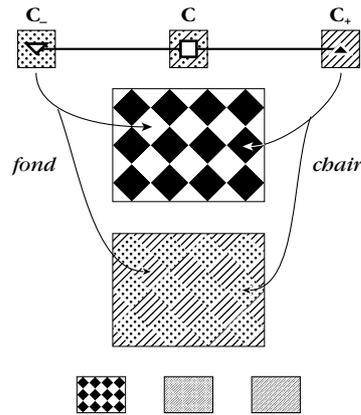


Fig.2.2 Ecart chromatique symétrique autour d'une couleur C appliquée à un motif comprenant autant de chair que de fond (planche 8, p. 101)

2.2 Contraintes

Un écart chromatique ΔC permet de décomposer la couleur C en deux couleurs C_- et C_+ . La première de ces couleurs, C_- , est utilisée pour les pixels faisant partie du fond de la micro-structure, et la seconde, C_+ , est utilisée pour les pixels appartenant à la chair de la micro-structure. Un écart chromatique donné ne permettant cette décomposition que pour la couleur C correspondant à son centre, il est par conséquent nécessaire de trouver un moyen de l'appliquer à d'autres couleurs afin de pouvoir traiter tous les pixels d'une image. Le mécanisme permettant cette application, que nous nommerons extrapolation, est soumis à trois contraintes, énumérées par ordre d'importance décroissant : il doit être continu, il doit produire des écarts chromatiques uniformes, et ces écarts doivent présenter une certaine cohérence entre eux.

2.2.1 Continuité de l'image

La contrainte de continuité de l'image appliquée à l'extrapolation d'un écart chromatique initial $\Delta K = \{K, K_-, K_+\}$ à une couleur C pour obtenir un écart chromatique ΔC exprime le fait que, si K et C sont proches, alors K_- et C_- doivent également être proches, de même que K_+ et C_+ . Visuellement parlant, l'extrapolation d'un écart chromatique aux couleurs d'un dégradé uniforme doit produire un dégradé uniforme. Cette contrainte a pour but d'éviter d'introduire dans l'image traitée des éléments autres que la micro-structure à incruster, tels que faux contours ou bandes de Mach. Sachant qu'il est toujours possible de passer d'une couleur à une autre de façon continue au moyen d'une interpolation, la continuité de l'image pourra toujours être respectée.

2.2.2 Uniformité de la micro-structure

La micro-structure incrustée dans l'image traitée n'y sera visible qu'en fonction du contraste qu'elle offre avec le fond sur lequel elle se détache. Bien qu'il puisse s'avérer souhaitable de faire varier sa visibilité d'une image à l'autre selon l'application envisagée, il doit être possible de préserver le contraste associé à un écart chromatique initial ΔK quelle que soit la couleur C à laquelle on l'extrapole. Dans le cas contraire, on s'expose à produire des micro-structures fluctuantes, tantôt invisible et tantôt masquant les détails de l'image dans laquelle on les incruste. Cette contrainte correspond à la préservation de la distance euclidienne des écarts extrapolés; ce point sera traité en détail au chapitre 4.

Il n'est pas toujours possible de préserver l'uniformité de la microstructure : les couleurs situées au bord du domaine des couleurs imprimables ne peuvent être reproduites qu'à l'aide d'un nombre limité d'écarts chromatiques. Par exemple, une couleur appartenant au plan rouge-vert défini par l'ensemble des triplets de la forme $\{R, G, 0\}$ ne pourra être reproduite qu'avec une paire de couleurs appartenant au même plan, car toute autre paire de couleurs comporterait au moins un élément situé hors du domaine des couleurs imprimables. De même, il n'existe aucune paire de couleurs imprimables capables de reproduire le noir ou le blanc.

2.2.3 Cohérence des écarts chromatiques

Observés d'un point de vue psycho-perceptuel, deux écarts chromatiques de même amplitude peuvent néanmoins présenter un aspect très différent l'un de l'autre. Ce sera par exemple le cas si les extrémités du la premier ne se distinguent que par leur saturation plus ou moins grande, alors que celles du second diffèrent par leur tonalité tout en offrant une saturation identique. Afin de préserver l'unité de la micro-structure, il est nécessaire de veiller à ce que l'extrapolation d'un écart chromatique initial $\Delta\mathbf{K}$ à une couleur \mathbf{C} pour obtenir un écart chromatique $\Delta\mathbf{C}$ préserve au mieux les attributs perceptuels de l'écart initial.

Il n'est pas toujours possible de préserver la cohérence entre deux écarts chromatiques, et ceci pour deux raisons. Premièrement, il existe des couleurs pour lesquelles un attribut perceptuel donné n'a pas de valeur définie. C'est le cas des couleurs situées sur l'axe achromatique, qui sont par définition dépourvues de tonalité. En deuxième lieu, il existe des couleurs pour lesquelles un attribut perceptuel donné constitue un maximum local, et qui ne peuvent être reproduites par un écart chromatique basé sur cet attribut. Par exemple, il n'est pas possible de reproduire une couleur \mathbf{C} située sur une des faces du cube RGB au moyen de deux autres couleurs différant uniquement par leur saturation, car la couleur \mathbf{C} est la plus saturée de toutes les couleurs ayant la même tonalité et la même luminosité.

2.3 Extrapolation des écarts chromatiques

Le mécanisme permettant d'extrapoler un écart chromatique initial $\Delta\mathbf{K}$ à une couleur donnée \mathbf{C} afin d'obtenir un écart chromatique $\Delta\mathbf{C}$ consiste en une composition de trois transformations linéaires : une rotation autour de l'axe achromatique, suivie d'une translation le long de ce même axe, et pour finir une translation le long d'un axe radial (figure 2.3). Ces transformations respectent les trois contraintes énoncées plus haut. Tout d'abord, le fait qu'elles soient linéaires garantit leur continuité. Ensuite, elles préservent la taille de l'écart chromatique initial. Enfin, le modèle géométrique à l'intérieur duquel elles opèrent est basé sur les trois attributs perceptuels fondamentaux que sont la luminosité, la tonalité et la saturation ce qui permet de préserver la cohérence entre l'écart initial et l'écart extrapolé.

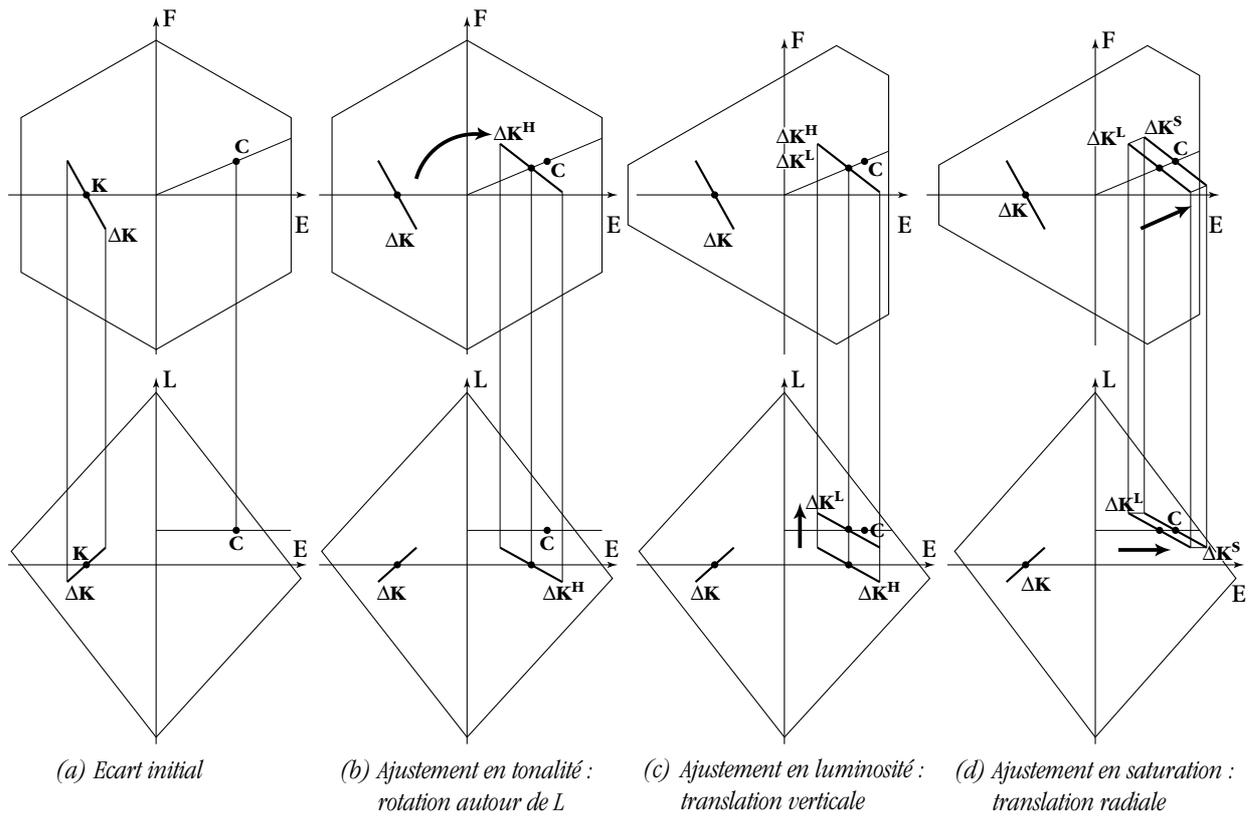


Fig.2.3 Vue schématique des trois transformations linéaires permettant d'extrapoler un écart chromatique $\Delta\mathbf{K}$ à une couleur \mathbf{C}

2.3.1 Cas général

La première de ces trois transformations linéaires a pour but de donner au centre \mathbf{K} de l'écart initial $\Delta\mathbf{K}$ une tonalité égale à celle de la couleur \mathbf{C} , tout en lui conservant la même luminosité et la même saturation (figure 2.3 b). Les extrémités de l'écart initial subissent ensuite une transformation identique. Elle consiste en une rotation de l'écart chromatique $\Delta\mathbf{K}$ autour de l'axe achromatique défini par la coordonnée L de l'espace LEF. L'écart initial pivoté ainsi produit est noté $\Delta\mathbf{K}^{\mathbf{H}} = \{\mathbf{K}^{\mathbf{H}}, \mathbf{K}^{\mathbf{H}}_{-}, \mathbf{K}^{\mathbf{H}}_{+}\}$, où l'indice \mathbf{H} indique que cet écart possède la tonalité voulue.¹ Cette rotation s'effectue en multipliant les vecteurs \mathbf{K} , \mathbf{K}_{-} et \mathbf{K}_{+} par une matrice 3×3 . Un point \mathbf{V} de l'espace LEF est transformé en un point $\mathbf{V}^{\mathbf{H}}$ par :

$$\mathbf{V}^{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \mathbf{V} \quad (2.2)$$

L'angle θ est l'angle horizontal existant entre les projections des vecteurs \mathbf{C} et \mathbf{K} sur un plan normal à l'axe achromatique :

$$\theta = \arctan \frac{F_C}{E_C} - \arctan \frac{F_K}{E_K} \quad (2.3)$$

Par la suite, nous nous référerons à $\Delta\mathbf{K}^{\mathbf{H}}$ en utilisant le terme de *référence tonale*.

1. De l'anglais "Hue", qui signifie "teinte" ou "tonalité".

La seconde transformation linéaire vise à donner au centre \mathbf{K}^H de la référence tonale $\Delta\mathbf{K}^H$ une luminosité égale à celle de la couleur \mathbf{C} , tout en préservant sa tonalité et sa saturation (figure 2.3 c). Comme dans le cas précédent, la même transformation est ensuite appliquée aux extrémités de la référence tonale. Elle consiste en une translation le long de l'axe achromatique. L'écart initial pivoté et translaté ainsi produit est dénoté $\Delta\mathbf{K}^L = \{\mathbf{K}^L, \mathbf{K}^L_-, \mathbf{K}^L_+\}$, où l'indice L indique que cet écart possède la luminosité voulue. Un point \mathbf{V} de l'espace LEF est transformé en un point \mathbf{V}^L par :

$$\mathbf{V}^L = \mathbf{V} + [L(\mathbf{C}) - L(\mathbf{K}) \quad 0 \quad 0] \quad (2.4)$$

où $L(\mathbf{C})$ et $L(\mathbf{K})$ désignent la composante L_{LEF} des couleurs \mathbf{C} et \mathbf{K} (figure 2.3 a). Nous utiliserons le terme de *référence tonale-lumineuse* pour dénoter l'écart chromatique $\Delta\mathbf{K}^L$. Par la suite, cet écart sera abondamment utilisé sous le nom d'*écart de référence*, ou même de *référence* tout court. Pour le désigner, on utilise la notation modifiée : $\Delta\mathbf{K}^* = \{\mathbf{K}^*, \mathbf{K}^*_-, \mathbf{K}^*_+\}$.

La dernière des trois transformations linéaires doit donner au centre \mathbf{K}^L de la référence tonale-lumineuse $\Delta\mathbf{K}^L$ (ou au centre \mathbf{K}^* de la référence $\Delta\mathbf{K}^*$) une saturation égale à celle de la couleur \mathbf{C} , tout en préservant la luminosité et la tonalité acquises lors des deux étapes précédentes (figure 2.3 d). Contrairement à ces deux cas, il n'est pas toujours possible d'appliquer exactement la même transformation aux extrémités de la référence tonale-lumineuse. En effet, chacune des trois transformations linéaires peut projeter l'une ou l'autre des extrémités des écarts transformés à l'extérieur du cube RGB. Cependant, la troisième transformation doit fournir l'écart chromatique à utiliser pour la couleur \mathbf{C} , et il faut donc veiller à ce les extrémités de cet écart soient toutes deux situées à l'intérieur du cube RGB. Une telle contrainte fait de cette transformation une opération beaucoup plus complexe que les deux transformations précédentes. Son principe consiste en une translation le long d'une demi-droite radiale \mathbf{r} perpendiculaire à l'axe achromatique et passant par \mathbf{C} . L'écart chromatique ainsi obtenu est dénoté $\Delta\mathbf{K}^S = \{\mathbf{K}^S, \mathbf{K}^S_-, \mathbf{K}^S_+\}$, où l'indice S indique que cet écart possède la saturation voulue. Par construction, le centre de cet écart coïncide avec la couleur \mathbf{C} . Un point \mathbf{V} de l'espace LEF est transformé en un point \mathbf{V}^S par :

$$\mathbf{V}^S = \mathbf{V} + \frac{S(\mathbf{C})}{S(\mathbf{K})} \cdot \frac{\mathbf{V}}{\|\mathbf{V}\|} \quad (2.5)$$

où $S(\mathbf{C})$ représente la saturation dans LEF de la couleur \mathbf{C} , et $S(\mathbf{K})$ représente celle de \mathbf{K} (figure 2.3 a). Pour $\mathbf{C} = [L, E, F]$, cette saturation est calculée d'après la relation :

$$S(\mathbf{C}) = \sqrt{E^2 + F^2} \quad (2.6)$$

Contrairement aux deux opérations précédentes, cette transformation ne constitue qu'un principe général qu'il faut ensuite décomposer en plusieurs cas particuliers. En pratique, cette transformation doit veiller à respecter les limites du cube RGB, préserver les attributs perceptuels de l'écart initial, et assurer la continuité des écarts extrapolés. Les techniques utilisées pour respecter ces contraintes sont exposées dans la section suivante. La figure 2.4 offre un aperçu schématique d'un ajustement de la saturation d'un écart extrapolé tenant aussi bien compte de la géométrie du volume des couleurs que des contraintes imposées à l'extrapolation d'un écart chromatique. On y observe quatre écarts chromatiques mis en évidence qui délimitent trois domaines d'interpolation. Le premier domaine va de l'axe achromatique jusqu'à un écart nommé *limite achromatique* : les écarts extrapolés sur ce domaine perdent leur chromaticité à proximité de l'axe achromatique. Le second domaine s'étend entre la limite achromatique et un écart nommé *limite radiale* : les écarts extrapolés sur ce domaine sont obtenus par translation de l'écart de référence. Le troi-

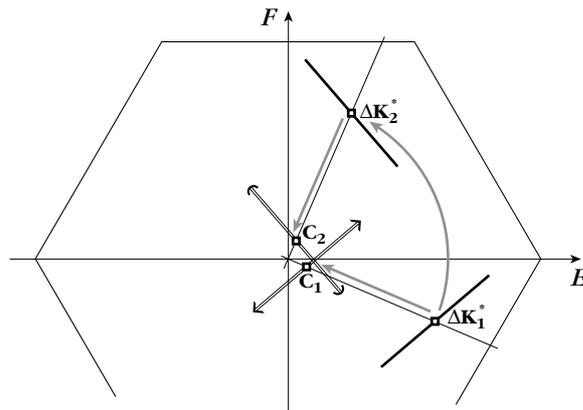


Fig.2.6 Discontinuité d'écarts chromatiques extrapolés au voisinage de l'axe achromatique

2.4.1 Projection achromatique

Pour éviter les discontinuités dans l'image (section 2.2.1, p. 28) et assurer la cohérence des écarts extrapolés (section 2.2.3, p. 29), il est nécessaire de circonscrire le domaine au sein duquel il est acceptable d'ajuster la saturation d'un écart chromatique par une translation radiale. En dehors de ce domaine, les écarts chromatiques doivent être limités aux écarts en luminosité. Pratiquement, cette limitation prend la forme d'un premier écart de référence auxiliaire $\Delta\mathbf{K}^0 = \{\mathbf{K}^0, \mathbf{K}^0_-, \mathbf{K}^0_+\}$ que nous appellerons par la suite *projection achromatique*, dont le centre et les deux extrémités sont situés sur l'axe achromatique. Un exemple d'une telle projection achromatique est donné par la figure 2.7.

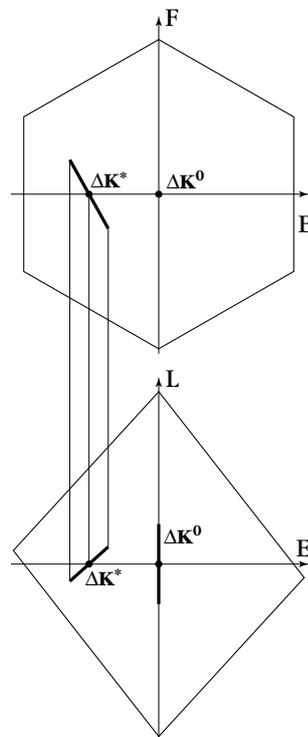


Fig.2.7 Projection achromatique : extrapolation d'un écart chromatique sur l'axe achromatique

Les coordonnées du centre \mathbf{K}^0 de la projection achromatique $\Delta\mathbf{K}^0$ sont obtenues par projection du centre \mathbf{K}^* de la référence $\Delta\mathbf{K}^*$. Les coordonnées des extrémités \mathbf{K}^0_- et \mathbf{K}^0_+ de $\Delta\mathbf{K}^0$ sont déterminées en exigeant que les normes de $\Delta\mathbf{K}^0$ et de $\Delta\mathbf{K}^*$ soient égales :

$$\left\| \overrightarrow{\mathbf{K}^0_- \mathbf{K}^0_+} \right\| = \left\| \overrightarrow{\mathbf{K}^*_- \mathbf{K}^*_+} \right\| \quad (2.7)$$

Cette égalité des normes dans l'espace LEF¹ permet de préserver la continuité géométrique des écarts chromatiques sur toute trajectoire passant par l'axe achromatique.

2.4.2 Limite achromatique

La projection achromatique de la référence $\Delta\mathbf{K}^*$ représente l'écart chromatique associé à une couleur totalement désaturée. Pour préserver la continuité de l'image, on désature progressivement les écarts chromatiques associés aux couleurs proches de l'axe achromatique. Le seuil en dessous duquel commence cette désaturation est donné par le centre $\overline{\mathbf{K}}^0$ d'un deuxième écart de référence auxiliaire $\Delta\overline{\mathbf{K}}^0 = \{\overline{\mathbf{K}}^0, \overline{\mathbf{K}}^0_-, \overline{\mathbf{K}}^0_+\}$ (figure 2.8). Cet écart chromatique est obtenu par translation radiale de $\Delta\mathbf{K}^*$. Son centre $\overline{\mathbf{K}}^0$ est situé à égale distance du centre \mathbf{K}^0 de la projection achromatique $\Delta\mathbf{K}^0$ et du centre \mathbf{K}^* de la référence $\Delta\mathbf{K}^*$. Il représente un point-limite en-deçà duquel il n'est plus possible de préserver entièrement la chromaticité de $\Delta\mathbf{K}^*$, raison pour laquelle on désigne $\Delta\overline{\mathbf{K}}^0$ par le terme de *limite achromatique*.

2.4.3 Interpolation entre la référence et l'axe achromatique

La limite achromatique $\Delta\overline{\mathbf{K}}^0$ et la projection achromatique $\Delta\mathbf{K}^0$ de la référence $\Delta\mathbf{K}^*$ permettent ensemble de définir l'extrapolation d'un écart chromatique pour une couleur \mathbf{C} située au voisinage de l'axe achromatique (figure 2.8). On commence par calculer les saturations $S(\mathbf{C})$ et $S(\overline{\mathbf{K}}^0)$ en utilisant l'équation 2.6. Si $S(\mathbf{C}) \geq S(\overline{\mathbf{K}}^0)$, on considère que \mathbf{C} est suffisamment éloignée de l'axe achromatique et on obtient $\Delta\mathbf{C}$ par translation radiale de $\Delta\mathbf{K}^*$. Si $S(\mathbf{C}) < S(\overline{\mathbf{K}}^0)$, on procède à une interpolation linéaire entre $\Delta\mathbf{K}^0$ et $\Delta\overline{\mathbf{K}}^0$ en se basant sur $S(\mathbf{C})$ et sur $S(\overline{\mathbf{K}}^0)$:

$$\Delta\mathbf{C} = \left(1 - \frac{S(\mathbf{C})}{S(\overline{\mathbf{K}}^0)} \right) \cdot \Delta\mathbf{K}^0 + \frac{S(\mathbf{C})}{S(\overline{\mathbf{K}}^0)} \cdot \Delta\overline{\mathbf{K}}^0 \quad (2.8)$$

Cette interpolation, qui donne lieu à une verticalisation progressive de $\Delta\mathbf{C}$, est illustrée par les écarts chromatiques de la figure 2.8.

1. Nous verrons au chapitre 4 que les écarts chromatiques ainsi spécifiés doivent encore être corrigés pour produire un contraste perceptuel constant.

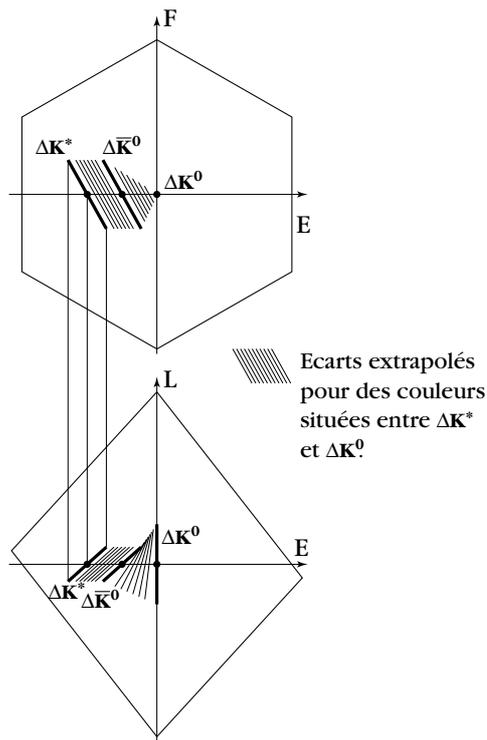


Fig.2.8 Ecarts chromatiques extrapolés par translation radiale et/ou désaturation entre la référence $\Delta\mathbf{K}^*$ et l'axe achromatique

2.5 Extrapolation au voisinage des frontières du cube RGB

A proximité des faces du cube RGB, les écarts extrapolés peuvent se retrouver partiellement à l'extérieur du volume des couleurs. La solution consistant à tronquer ces écarts n'est pas optimale, car elle a pour effet de limiter la visibilité de la microstructure sur une partie importante de l'espace couleur. Comme l'uniformité de la micro-structure prime sur la cohérence des écarts chromatiques, nous choisissons de modifier la saturation et la tonalité de ces écarts de manière à ce qu'ils s'adaptent au volume disponible.

Une telle modification ne doit évidemment pas entraîner des discontinuités dans l'image traitée. Par conséquent, il faut veiller à l'effectuer de manière graduelle, sans qu'il y ait de saut brusque entre un écart chromatique extrapolé intégralement contenu dans le cube RGB et un écart chromatique voisin qui commence tout juste à en sortir.

Mis à part le cas exceptionnel où la référence $\Delta\mathbf{K}^*$ est parallèle à la face du cube RGB qui est traversée par la radiale \mathbf{r} supportant \mathbf{K}^* , on trouve toujours un point au-delà duquel il n'est plus possible de traduire radialement $\Delta\mathbf{K}^*$ sans faire sortir au moins un de ses points du cube RGB. Il est donc nécessaire de remplacer la translation radiale visant à amener la saturation de $\Delta\mathbf{K}^*$ à celle de \mathbf{C} par un autre mécanisme. Ce mécanisme utilise deux écarts chromatiques auxiliaires dérivés de la référence $\Delta\mathbf{K}^*$ (figure 2.9). Le premier de ces écarts auxiliaires est noté $\Delta\mathbf{K}^1 = \{\mathbf{K}^1, \mathbf{K}^1_-, \mathbf{K}^1_+\}$ et dénommé *projection radiale* de la référence $\Delta\mathbf{K}^*$. Le second écart auxiliaire est noté $\Delta\bar{\mathbf{K}}^1 = \{\bar{\mathbf{K}}^1, \bar{\mathbf{K}}^1_-, \bar{\mathbf{K}}^1_+\}$ et dénommé *limite radiale* de la référence $\Delta\mathbf{K}^*$. La projection radiale $\Delta\mathbf{K}^1$ est une projection de $\Delta\mathbf{K}^*$ sur une des faces du cube RGB, et peut être vue comme l'écart chromatique le plus saturé qu'il est possible d'obtenir à partir de $\Delta\mathbf{K}^*$ par une transformation linéaire ne modifiant pas sa luminosité. La

limite radiale $\Delta\bar{\mathbf{K}}^1$ peut être définie comme l'écart chromatique la plus saturé qu'il est possible d'obtenir par une translation de $\Delta\mathbf{K}^*$.

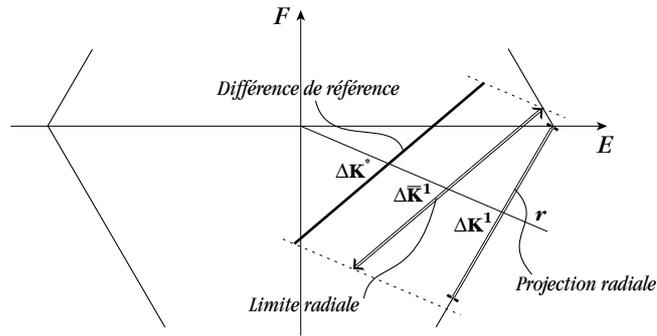


Fig.2.9 Limite radiale et projection radiale d'un écart chromatique de référence entièrement contenu dans le cube RGB¹

2.5.1 Projection radiale

La première étape du calcul de la projection radiale $\Delta\mathbf{K}^1$ consiste à chercher parmi les six faces du cube RGB $\{KRYG, KGCB, KBMR, RMWY, BCWM, GYWC\}$ la face F_r traversée par la demi-droite radiale r reliant \mathbf{K}^* à l'axe achromatique. Ensuite, on calcule le point d'intersection \mathbf{K}^1 de cette face et de cette demi-droite, qui devient le centre de $\Delta\mathbf{K}^1$ [Badouel90, Möller97].

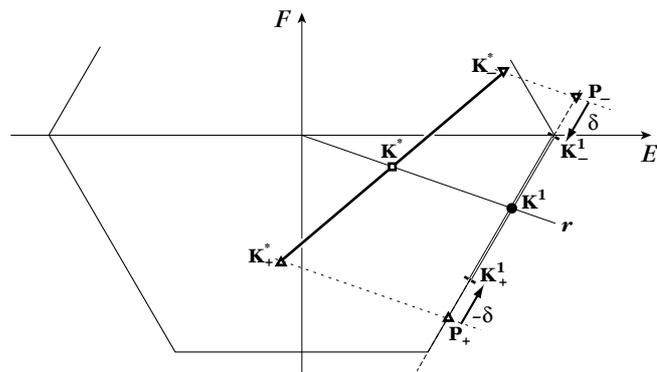


Fig.2.10 Calcul du centre et des extrémités de la projection radiale d'un écart chromatique.

Les extrémités \mathbf{K}_-^1 et \mathbf{K}_+^1 s'obtiennent en projetant radialement les extrémités \mathbf{K}_-^* et \mathbf{K}_+^* de l'écart de référence sur le plan contenant la face du cube RGB à laquelle appartient \mathbf{K}^1 . Cette projection est illustrée par les points \mathbf{P}_- et \mathbf{P}_+ de la figure 2.10. Si l'un de ces points se trouve en-dehors du cube RGB (tel le point \mathbf{P}_- dans la figure 2.10), on le translate d'un vecteur δ parallèle au segment $\mathbf{P}_-\mathbf{P}_+$ afin de diminuer la distance qui le sépare de \mathbf{K}^1 et de le ramener à l'intérieur du volume des couleurs; l'autre point subit ensuite une translation symétrique de vecteur $-\delta$.

1. Dans cette figure, ainsi que dans celle qui suivent, les écarts chromatiques sont représentés sans composante L, ceci afin de simplifier leur lecture. Cette simplification se fait sans perte de généralité.

2.5.2 Limite radiale

La projection radiale représente la forme que prend la référence $\Delta\mathbf{K}^*$ extrapolée aux limites du volume des couleurs. A l'intérieur de ce volume, il est souvent possible d'obtenir un écart chromatique ayant la saturation voulue au moyen d'une simple translation de $\Delta\mathbf{K}^*$. La limite radiale $\Delta\bar{\mathbf{K}}^1 = \{\bar{\mathbf{K}}^1, \bar{\mathbf{K}}^1_-, \bar{\mathbf{K}}^1_+\}$ (voir figure 2.9) sert à déterminer ces points, et fournit, avec la projection radiale, une base pour extrapoler la référence aux points où une translation n'est pas utilisable.

Cette limite radiale s'obtient par une projection sur les faces du cube RGB des deux extrémités \mathbf{K}^*_- et \mathbf{K}^*_+ de la référence $\Delta\mathbf{K}^*$ le long d'une droite parallèle à la demi-droite radiale \mathbf{r} reliant le centre \mathbf{K}^* à l'axe achromatique. On choisit parmi ces deux intersections \mathbf{P}_- et \mathbf{P}_+ avec les faces du cube le point dont la distance à l'extrémité projetée est minimale, soit \mathbf{P}_- dans la figure 2.11.

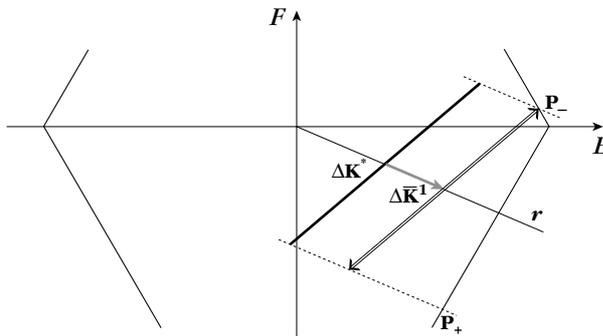


Fig.2.11 Projection radiale des extrémités d'un écart chromatique sur les faces du cube RGB pour déterminer la limite radiale

La limite radiale $\Delta\bar{\mathbf{K}}^1$ peut alors être construite par une translation radiale de l'écart de référence $\Delta\mathbf{K}^*$ (figure 2.11). Par construction, $\Delta\bar{\mathbf{K}}^1$ est entièrement contenue dans le cube RGB. De plus, parmi toutes les translations radiales de $\Delta\mathbf{K}^*$ satisfaisant à cette condition, $\Delta\bar{\mathbf{K}}^1$ est l'écart chromatique situé à distance maximale de l'axe achromatique. En d'autres termes, cette limite radiale permet de respecter au mieux la cohérence des écarts chromatiques extrapolés en préservant le plus longtemps possible l'écart chromatique de référence.

Cas particuliers. La construction de la projection radiale et de la limite radiale présentée aux sections 2.5.1 et 2.5.2 représente le cas général. Plusieurs cas particuliers doivent être traités afin d'assurer la continuité des écarts chromatiques extrapolés pour tout le volume des couleurs. Ces cas particuliers sont exposés en détail dans l'annexe B.

2.6 Interpolation radiale

Les quatre écarts de référence auxiliaires $\Delta\mathbf{K}^0$, $\Delta\bar{\mathbf{K}}^0$, $\Delta\mathbf{K}^1$ et $\Delta\bar{\mathbf{K}}^1$ introduits précédemment nous permettent de couvrir la totalité des cas de figures pouvant se produire lors de l'extrapolation d'un écart de référence $\Delta\mathbf{K}^*$ à une couleur \mathbf{C} donnée. Ces cas de figure sont au nombre de trois : dans chaque cas, on calcule la position de la couleur-cible \mathbf{C} par rapport aux centres $\bar{\mathbf{K}}^0$ de la limite achromatique et $\bar{\mathbf{K}}^1$ de la limite radiale. En fonction de cette position, $\Delta\mathbf{C}$ est interpolé entre une paire de références auxiliaires successives choisies parmi trois paires possibles : $\{\Delta\mathbf{K}^0, \Delta\bar{\mathbf{K}}^0\}$, $\{\Delta\bar{\mathbf{K}}^0, \Delta\bar{\mathbf{K}}^1\}$ et $\{\Delta\bar{\mathbf{K}}^1, \Delta\mathbf{K}^1\}$.

Notons ici que l'algorithme réel fait l'économie du calcul des références auxiliaires dont on sait qu'elles n'auront pas d'influence sur le résultat final, et se borne à dériver leur saturation en cas de besoin. La projection et la troncature d'un écart chromatique sont des opérations relativement coûteuses en temps de calcul, et il est préférable de restreindre leur utilisation au strict minimum. Pour des raisons de clarté, l'algorithme est néanmoins exposé en admettant que toutes ces références auxiliaires sont calculées.

2.6.1 Cas 1 : La couleur cible C est moins saturée que la limite achromatique

Si C est moins saturée que $\bar{\mathbf{K}}^0$, alors ΔC est partiellement achromatique et doit être interpolé entre $\Delta \mathbf{K}^0$ et $\Delta \bar{\mathbf{K}}^0$:

$$\Delta C = \left(1 - \frac{S(C)}{S(\bar{\mathbf{K}}^0)}\right) \cdot \Delta \mathbf{K}^0 + \frac{S(C)}{S(\bar{\mathbf{K}}^0)} \cdot \Delta \bar{\mathbf{K}}^0 \quad (2.9)$$

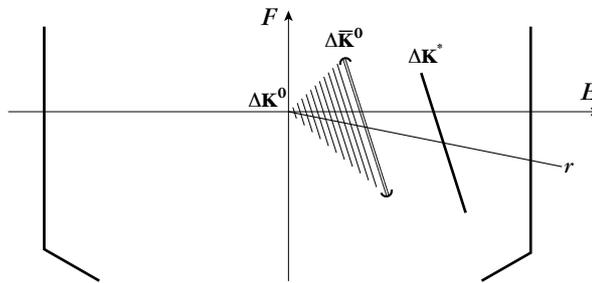


Fig.2.12 Interpolation de ΔC pour une famille de points situés entre la projection achromatique et la limite achromatique

2.6.2 Cas 2 : La couleur cible C est plus saturée que la limite achromatique et moins saturée que la limite radiale

Si C est située entre $\bar{\mathbf{K}}^0$ et $\Delta \bar{\mathbf{K}}^1$, on extrapole ΔC au moyen d'une translation radiale de $\Delta \mathbf{K}^*$ (figure 2.13). Dans la pratique, vu que $\Delta \bar{\mathbf{K}}^0$ et $\Delta \bar{\mathbf{K}}^1$ ont dû être préalablement calculées pour qu'on puisse déterminer leurs positions relatives, on utilise une interpolation linéaire au lieu d'une translation :

$$\Delta C = \left(1 - \frac{S(C) - S(\bar{\mathbf{K}}^0)}{S(\bar{\mathbf{K}}^1) - S(\bar{\mathbf{K}}^0)}\right) \cdot \Delta \bar{\mathbf{K}}^0 + \frac{S(C) - S(\bar{\mathbf{K}}^0)}{S(\bar{\mathbf{K}}^1) - S(\bar{\mathbf{K}}^0)} \cdot \Delta \bar{\mathbf{K}}^1 \quad (2.10)$$

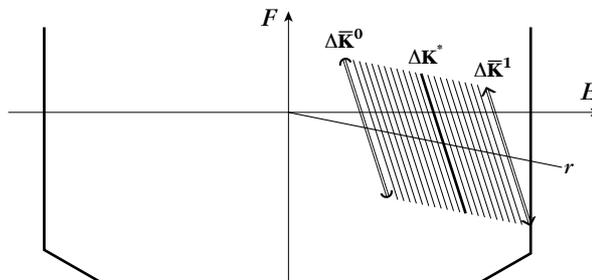


Fig.2.13 Interpolation de ΔC pour une famille de points situés entre la limite achromatique et la limite radiale

2.6.3 Cas 3 : La couleur cible C est plus saturée que la limite radiale

Si C est située entre $\bar{\mathbf{K}}^1$ et surface du cube RGB, on obtient ΔC par une interpolation entre la limite radiale et la projection radiale :

$$\Delta C = \left(1 - \frac{S(C) - S(\bar{\mathbf{K}}^1)}{S(\mathbf{K}^1) - S(\bar{\mathbf{K}}^1)}\right) \cdot \Delta \bar{\mathbf{K}}^1 + \frac{S(C) - S(\bar{\mathbf{K}}^1)}{S(\mathbf{K}^1) - S(\bar{\mathbf{K}}^1)} \cdot \Delta \mathbf{K}^1 \quad (2.11)$$

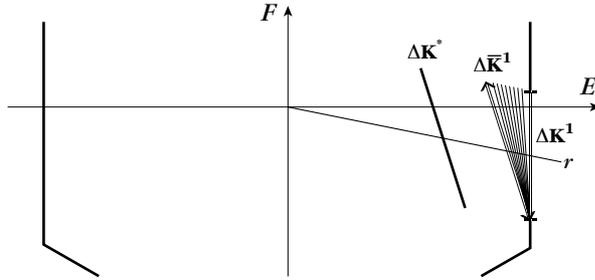


Fig.2.14 Interpolation de ΔC pour une famille de points situés entre la limite radiale et la projection radiale

Cas particuliers. L'interpolation radiale d'un écart chromatique présentée aux sections 2.6.1, 2.6.2 et 2.6.3 constitue le cas général. Plusieurs cas particuliers doivent être traités afin d'assurer la continuité des écarts chromatiques extrapolés pour tout le volume des couleurs. Ces cas particuliers sont exposés en détail dans l'annexe B.

2.6.4 Evolution des écarts interpolés

Nous avons présenté une méthode générale permettant d'extrapoler un écart chromatique $\Delta \mathbf{K}$ à une couleur C quelconque. Afin d'offrir au lecteur une vue d'ensemble du processus, nous présentons deux séquences d'extrapolations d'un écart chromatique sur les deux pages suivantes. La première séquence (figure 2.15) montre l'évolution des écarts extrapolés et des références auxiliaires lorsqu'on fait varier la luminosité de C tout en gardant sa tonalité constante. Pour des raisons de lisibilité, l'échelle des figures de cette séquence augmente progressivement lorsque la luminosité de C diminue. La portion de l'espace LEF représentée dans chaque figure peut se déduire de la taille relative de la section équiluminieuse considérée (figure 2.15, p. 40, colonne de droite). La seconde séquence (figure 2.16, p. 41) illustre un processus similaire à la première, mais cette fois en faisant varier la tonalité de C et en maintenant constante sa luminosité. La tonalité de C est affichée en degrés dans le coin inférieur droite de chaque figure. Ces deux séquences se lisent de gauche à droite et de haut en bas.

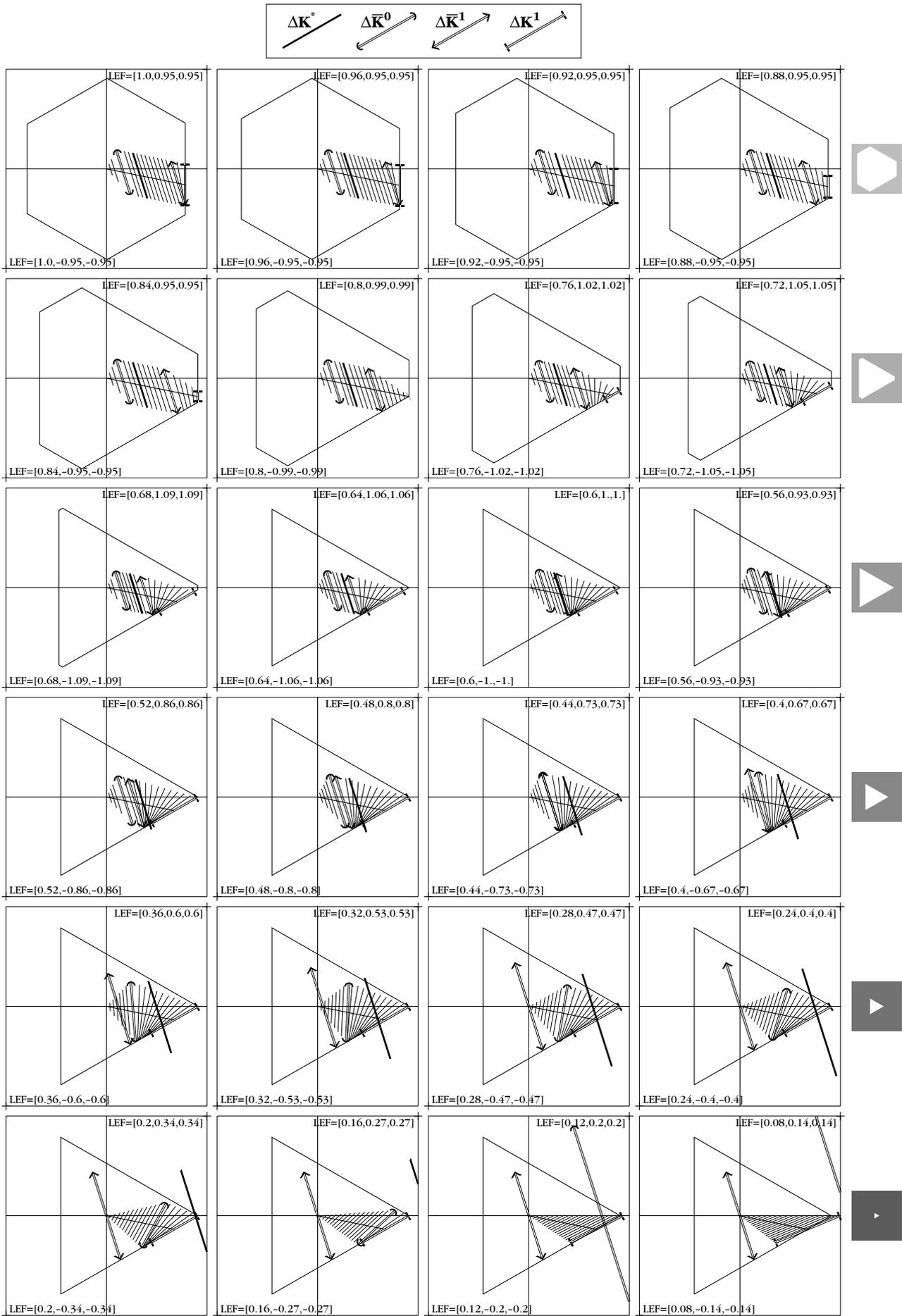


Fig.2.15 Ecarts extrapolés et références auxiliaires pour une luminosité décroissante et une tonalité constante

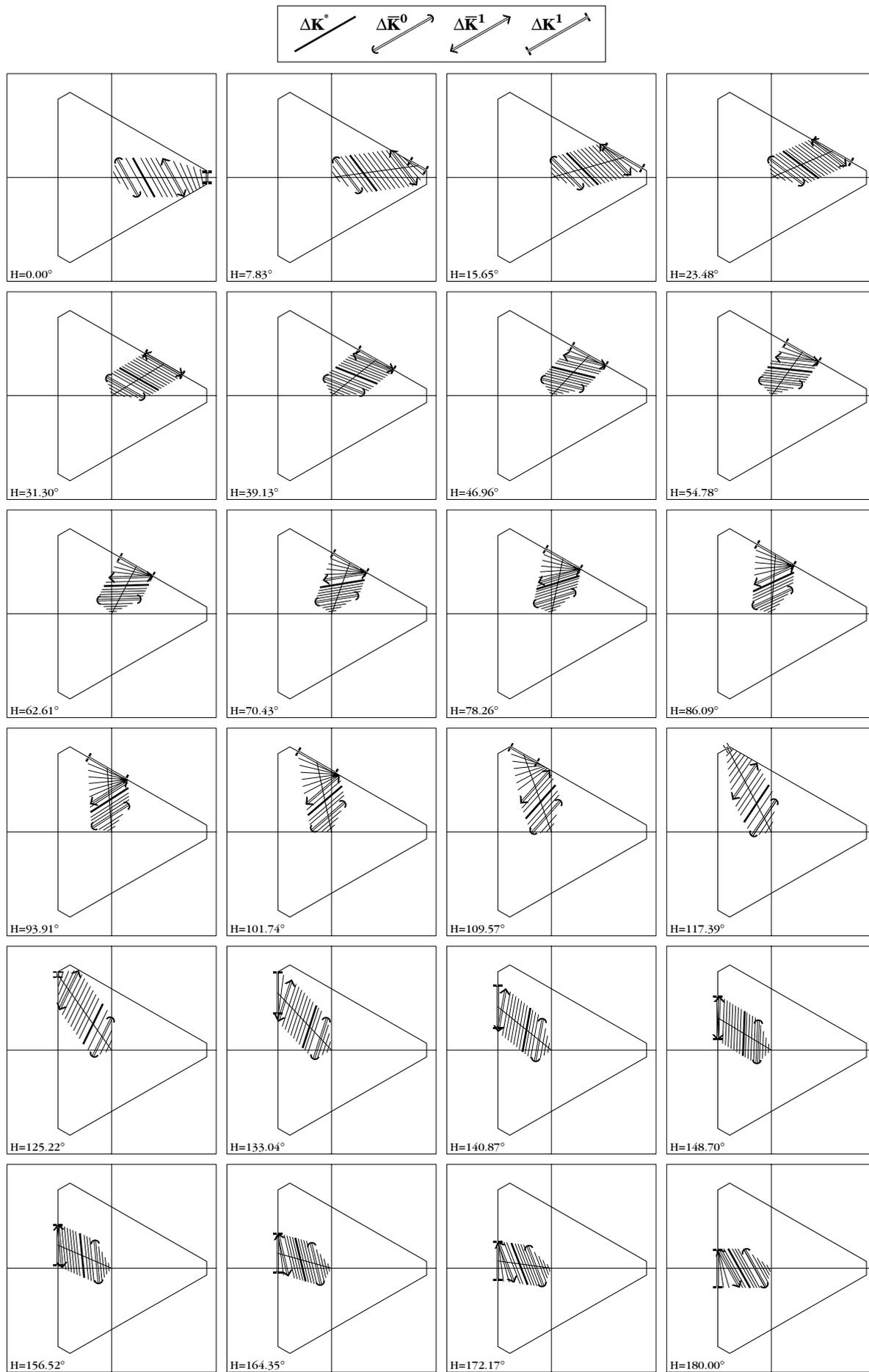


Fig.2.16 Ecarts extrapolés et références auxiliaires pour une tonalité variable et une luminosité constante

Écarts chromatiques asymétriques

Le résultat de la synthèse additive de deux couleurs varie en fonction du rapport entre les quantités respectives de chaque couleur. De même, un écart chromatique symétrique produit une couleur variant en fonction du rapport entre les quantités respectives de chair et de fond dans la microstructure à laquelle il est appliqué. Dans ce chapitre, nous étendons le mécanisme du chapitre 2 à des écarts chromatiques asymétriques. Nous montrons comment rééquilibrer un écart chromatique en fonction des variations locales du rapport entre la surface occupée par la chair et celle occupée par le fond dans le motif à incruster, et nous exposons une méthode respectant la géométrie du motif pour calculer ces variations.

3.1 Déséquilibre chair/fond

Un motif \mathcal{M} à incruster dans une image RGB \mathcal{I} est donné par un plan de pixels noirs ou blancs en proportions variables. L'incrustation consiste à générer un écart chromatique $\Delta C = \{C, C_-, C_+\}$ pour chacune des couleurs $C \in \mathcal{I}$ et à remplacer C par C_- ou par C_+ en fonction des pixels de \mathcal{M} . Pour que l'image incrustée soit globalement équivalente à l'image originale \mathcal{I} , il faut que les écarts chromatiques utilisés soient adaptés au motif incrusté (cf 2.1, p. 26). A cette fin, nous complétons l'équation 2.1 par un nouveau paramètre exprimant le rapport chair/fond du motif à incruster. Ce paramètre, que nous dénommons *taux de couverture* et que nous notons α , se calcule en divisant le nombre des éléments de la chair du motif par le nombre total des éléments du motif. Le mélange optique de deux couleurs C_- et C_+ peut alors s'écrire sous la forme d'une interpolation linéaire entre C_- et C_+ , utilisant le taux de couverture α comme facteur d'interpolation :

$$C = \alpha \cdot C_+ + (1 - \alpha) \cdot C_- \quad (3.1)$$

Cette nouvelle définition du mélange optique de deux couleurs introduit une conséquence importante : la couleur reproduite C peut varier de façon continue entre C_- et C_+ en fonction du taux de couverture α , comme le montre la figure 3.1, où la microstructure représentée à gauche a un taux de couverture variant entre 20% et 80%. La partie centrale de la figure montre les couleurs des deux extrémités C_- et C_+ d'un écart chromatique; ces couleurs sont fixes. La position et la couleur résultant du mélange optique de C_- et de C_+ pondéré par α est donnée par C . Cette couleur résultante varie de façon continue entre C_- et C_+ , ainsi que l'indique la partie droite de la figure. Tout à droite, on a fait figurer un à-plat

d'un mélange à proportions égales de C_- et de C_+ , qui permet de mieux juger de la variation chromatique de la microstructure.

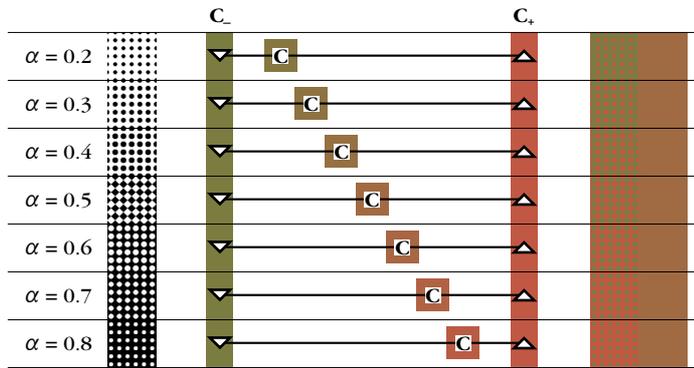


Fig.3.1 Influence du taux de couverture α local du motif incrusté sur le mélange optique de deux couleurs (planche 9, p. 101)

La variation du taux de couverture exerce une grande influence sur la fidélité chromatique de l'image reproduite, et il est nécessaire d'en tenir compte.

3.2 Ecart chromatiques équilibrés

Pour une couleur cible C et pour un taux de couverture α , nous cherchons à modifier les extrémités C_- et C_+ d'un écart chromatique ΔC afin qu'elles vérifient la relation donnée par l'équation 3.1. Etant donnée la nature additive de l'espace couleur dans lequel on opère, il s'agit de trouver un décalage de C_- et de C_+ par rapport à son centre C . Ce décalage, que nous nommons *recentrage*, s'opère au moyen de l'addition d'un vecteur δ_α à C_- et à C_+ , afin de préserver la norme de l'écart chromatique ΔC (figure 3.2). Ce calcul est exposé par les équations 3.2 : C_- et C_+ sont les extrémités de l'écart chromatique de référence, et C'_- et C'_+ , celles de l'écart chromatique recentré. Le vecteur δC est donné par $\delta C = C_+ - C_-$.

$$\begin{aligned}
 \alpha C'_+ + (1 - \alpha) C_- &= C \\
 \alpha (C_+ + \delta_\alpha) + (1 - \alpha) (C_- + \delta_\alpha) &= C \\
 \alpha \left(C + \frac{\delta C}{2} + \delta_\alpha \right) + (1 - \alpha) \left(C - \frac{\delta C}{2} + \delta_\alpha \right) &= C \\
 \delta_\alpha &= (1 - 2\alpha) \frac{\delta C}{2}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Pour une microstructure comportant autant de chair que de fond ($\alpha = 0.5$), on obtient $\delta_\alpha = 0$, et que par conséquent l'écart recentré et l'écart de référence sont égaux. Aux extrêmes, un taux de couverture égal à 1 provenant d'une microstructure ne comportant pas de fond fournit un écart recentré dans lequel $C'_+ = C$; de même, un taux de couverture égal à 0 provenant d'une microstructure ne comportant pas de chair se traduit par un écart recentré dans lequel $C'_- = C$.

L'aspect géométrique du recentrage est illustré par la figure 3.2. On observe que cette opération revient à faire glisser l'écart chromatique de référence le long du vecteur $\delta C = C_+ - C_-$, avec C jouant le rôle de butée. Un taux de couverture α inférieur à 0.5 a pour effet d'éloigner C'_+ de C et d'en rapprocher C'_- , alors qu'un taux de couverture α supérieur à 0.5 produit l'effet inverse.

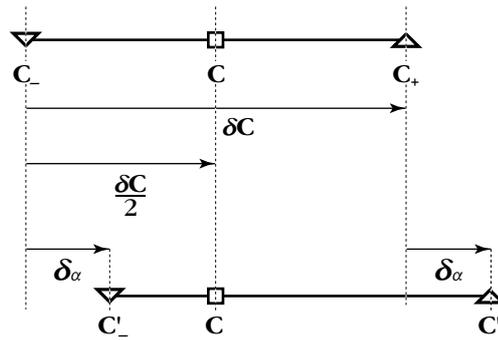


Fig.3.2 Recentrage d'un écart chromatique en fonction d'un taux de couverture α donné

L'effet optique du recentrage d'un écart chromatique est illustré dans la figure 3.3. La microstructure représentée à gauche est la même que celle de la figure 3.1. Dans la partie centrale, on observe le décalage géométrique de l'écart chromatique en fonction du taux de couverture de la microstructure, ainsi que la répercussion de ce décalage sur les couleurs des extrémités de l'écart recentré. Le centre de cet écart est fixe, de même que sa couleur. En observant l'évolution de la couleur de C_- pour α allant de 0.2 à 0.8, on peut vérifier que celle-ci passe d'un ocre verdâtre au vert bronze. De même, l'observation de l'évolution de la couleur de C_+ pour α allant de 0.8 à 0.2 montre que celle-ci passe d'un ocre rougeâtre au vermillon. On peut constater dans la partie droite de l'image que ces variations de C'_- et C'_+ sont effectivement compensées par les variations des surfaces qu'occupent respectivement le fond et la chair dans la microstructure représentée à droite, et que leur mélange optique pondéré produit une surface qui, à un mètre de distance, ne se distingue pas de l'à-plat de couleur situé tout à droite.

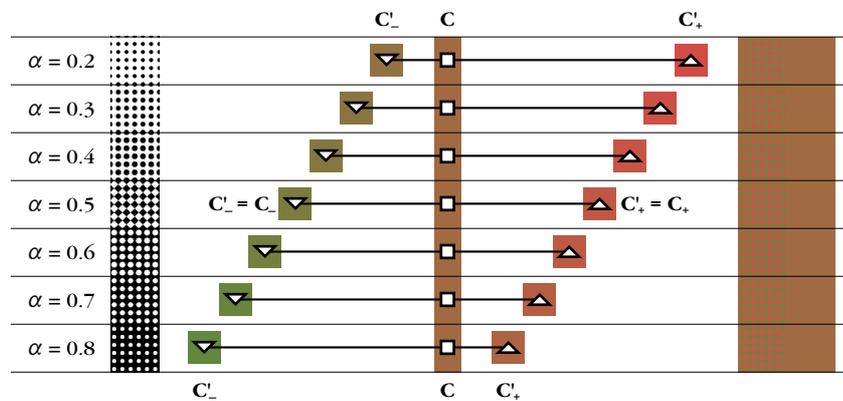


Fig.3.3 Influence du recentrage d'un écart chromatique appliqué à une microstructure ayant un taux de couverture variable (planche 10, p. 101)

3.3 Extrapolation et recentrage

Etant donnée la linéarité de l'espace couleur dans lequel s'effectuent les transformations d'écarts chromatiques, l'ordre dans lequel on effectue l'extrapolation d'un écart chromatique de référence et son recentrage n'a pas d'influence sur l'écart chromatique obtenu. Puisque le fait de travailler sur des écarts chromatiques symétriques simplifie les calculs, on choisit d'effectuer le recentrage de l'écart chromatique après son extrapolation. Toutefois, on vient de voir que ce recentrage peut avoir pour effet d'éloigner du centre l'une des

deux extrémités de l'écart chromatique, et par conséquent de la faire sortir du volume des couleurs admissibles. Il est donc parfois nécessaire de faire suivre le recentrage par une troncature de l'écart chromatique obtenu, comme on peut l'observer sur la figure 3.4.

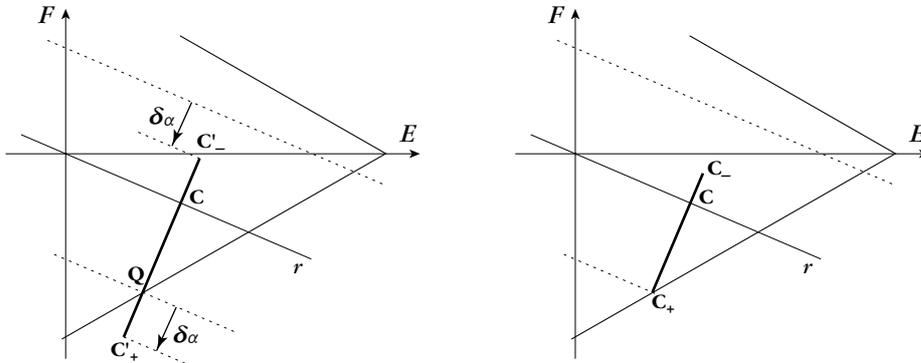


Fig.3.4 Recentrage et troncature d'un écart chromatique extrapolé

La troncature d'un écart recentré $\Delta C' = \{C, C'_-, C'_+\}$ sortant du cube RGB prend la forme d'une homothétie de centre C et de rapport b , décrite par la relation :

$$C_{\pm} = (1 - b) \cdot C + b \cdot C'_{\pm} \quad (3.3)$$

Le rapport d'homothétie b se calcule en fonction de l'extrémité (C'_- ou C'_+) sortant du cube RGB. Soit Q l'intersection entre le segment de droite reliant C à cette extrémité; b se calcule alors comme suit :

$$b = \left\| \frac{\overrightarrow{CQ}}{\overrightarrow{CC'_-}} \right\|, \quad C'_- \notin \text{RGB} \quad \text{ou} \quad b = \left\| \frac{\overrightarrow{CQ}}{\overrightarrow{CC'_+}} \right\|, \quad C'_+ \notin \text{RGB} \quad (3.4)$$

3.4 Taux de couverture : principes et problèmes

Les exemples précédents (figures 3.1 et 3.3) font clairement apparaître le besoin d'une fonction α calculant le taux de couverture $\mathcal{T} = \alpha(\mathcal{M})$ du motif \mathcal{M} qu'on souhaite incruster dans une image. Comme ce taux de couverture peut varier arbitrairement sur l'étendue du motif, il faut que la fonction $\alpha(\mathcal{M})$ puisse détecter ces variations et adapter son résultat en conséquence. Idéalement, $\alpha(\mathcal{M})$ devrait être capable de découper la microstructure de la figure 3.5 en carrés de tailles égales, et d'associer un taux de couverture à chacun de ces carrés :

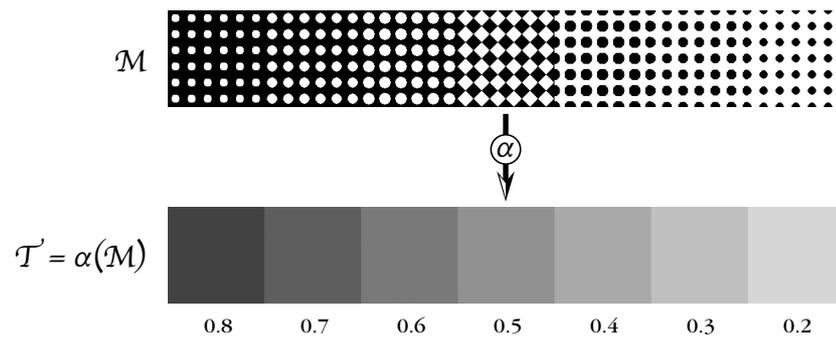


Fig.3.5 Découpage d'un motif en régions caractérisées par un taux de couverture uniforme

Dans la figure 3.5, les carrés où α est uniforme constituent des *sous-motifs uniformes* du motif \mathcal{M} . Ces sous-motifs sont eux-mêmes constitués d'éléments plus simples : des ronds blancs sur fond noir pour $\alpha > 0.5$ et des ronds noirs sur fond blanc pour $\alpha < 0.5$; le cas $\alpha = 0.5$ est plus ambigu, puisqu'on peut le décrire aussi bien comme un ensemble de carrés blancs sur fond noir que comme un ensemble de carrés noirs sur fond blanc. C'est de tels éléments fondamentaux, ou *micro-éléments*, que la fonction $\alpha(\mathcal{M})$ doit être à même de discerner.

La principale difficulté d'une telle tâche réside dans le fait que les frontières entre les micro-éléments ne sont pas toujours clairement définies. En effet, s'il est évident que les ronds noirs et blancs sont les éléments de base du motif de la figure 3.5, il est moins facile de déterminer les éléments de base d'un motif un peu plus complexe, en raison d'une incertitude liée à l'échelle minimale de ses éléments significatifs. Dans la figure 3.6 par exemple, l'élément significatif de base est contenu dans le cadre polygonal portant le numéro 2; mais cet élément de base est lui-même formé d'une imbrication d'éléments plus simples mis en évidence par le cadre 1. Alors que cette catégorisation est immédiate pour la perception, elle semble parfaitement arbitraire d'un strict point de vue topologique, et il est impossible de trouver un critère suffisamment universel qui permette de justifier le choix du cadre 2 plutôt que celui du cadre 1. Nous devons cependant respecter la continuité de l'image globale à toutes les distances de vision : les détails de la microstructure contenus dans le cadre 1 doivent être visibles de très près, et ceux du cadre 2 doivent l'être à distance de vision normale. Enfin, ces détails doivent disparaître pour laisser place à l'image globale à une distance de vision éloignée.

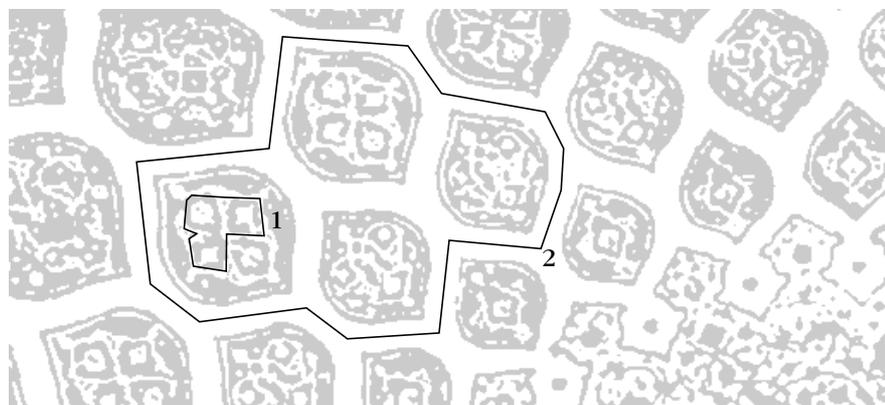


Fig.3.6 Ambiguïté lors du choix d'un élément significatif de base

On peut adopter une approche purement topologique et subdiviser le motif en régions centrées autour d'éléments connexes appartenant tous soit à la chair, soit au fond : cette approche a pour elle l'avantage de la simplicité, et s'applique de manière satisfaisante à beaucoup de motifs. Cependant, elle ne tient pas compte du fait que la perception a tendance à regrouper les formes proches en une entité unique. Cette propension décrite par la psychologie de la Gestalt [Ellis99] est un phénomène perceptuel, et non pas un phénomène visuel : deux éléments peuvent être à la fois visuellement distincts et faire partie de la même entité perceptuelle. Comme l'état des connaissances en matière de reconnaissance des formes ne permet pas d'émuler ces mécanismes de la perception humaine [Lowe85, Forsyth02, Malik01], nous devons nous contenter de cette approche heuristique et imparfaite.

La subdivision correcte d'un motif en micro-éléments est importante, car elle influence beaucoup la fidélité chromatique de l'image reproduite. Une subdivision globalement correcte mais inadaptée à la géométrie locale du motif à incruster peut produire une image entachée d'aberrations chromatiques aussi importantes que si l'on n'avait pas du tout pris en compte les taux de couverture du motif. La planche 7, p. 100 permet de s'en rendre compte en montrant un à-plat de couleur uniforme dans lequel on a incrusté un motif formé de points de taille variable distribués sur une grille hexagonale. La taille des points varie abruptement aux frontières de cette grille qu'on a superposée au motif dans la ligne du haut en A. Les taux de couverture calculés pour chaque cellule de la grille originale sont affichés en B. Le motif incrusté est représenté pour une distance de vision normale en C, entouré par l'à-plat de couleur uniforme. Afin de donner une vision plus proche des variations chromatiques produites par les différences entre les deux subdivisions de cette microstructure, un agrandissement de la partie centrale du motif incrusté est donné en D. Dans la ligne du bas, une grille hexagonale de même orientation mais de période inférieure à celle de la grille originale est utilisée pour le calcul des taux de couverture. Cette grille chevauche les parties claires et foncées du motif décrit en A, parce qu'elle n'est pas en phase avec les frontières implicites du motif. Bien que sa géométrie corresponde à celle du motif, on peut observer en C des variations de la couleur résultante, car le mauvais découpage de la microstructure par la grille hexagonale fausse le calcul du taux de couverture.

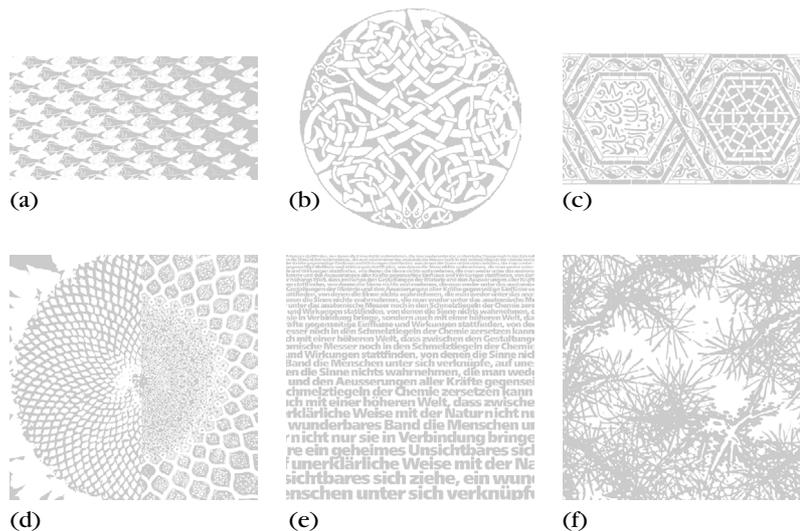


Fig.3.7 Microstructures problématiques pour le calcul des taux de couverture locaux

Les exemples de motifs exposés dans les figures 3.5, 3.6 et dans la planche 7, p. 100 indiquent quelques-uns des problèmes à résoudre lors de la conception d'un algorithme non-

supervisé pour déterminer les taux de couvertures locaux d'un motif : éléments de tailles variables, symétries non-rectangulaires, variations abruptes du taux de couverture. La figure 3.7 présente des motifs posant encore d'autres problèmes : distinction entre la chair et le fond peu apparente (a) ou variant dans l'image (c, d), fréquence spatiale difficile à déterminer (b), fréquence spatiale variant de façon abrupte (d) ou continue (e), éléments de microstructure difficiles à distinguer les uns des autres (b, f). Contrairement aux motifs géométriques des figures précédentes, les motifs de la figure 3.7 ne sont pas répétitifs, et il est difficile de déterminer manuellement leurs taux de couverture locaux. On recherche donc un algorithme général capable d'être appliqué à tous les cas de la figure 3.7. Cet algorithme doit pouvoir fonctionner sans intervention de l'utilisateur. Il doit permettre l'incrustation de microstructure avec une altération minimale de la fidélité chromatique de l'image globale observée à une distance de vision normale ou éloignée, contrairement à l'exemple de subdivision incorrecte de la planche 7, p. 100.

3.5 Calcul de taux de couverture par un filtre passe-bas

Face à la difficulté de la tâche consistant à subdiviser un motif en micro-éléments, on peut tenter de contourner le problème en se servant de certaines approximations. Il est par exemple possible de tirer parti du fait que certains motifs tels que le texte imprimé sont composés de micro-éléments alignés sur une grille rectangulaire présentant une certaine régularité. On opère une subdivision du motif basée sur une cellule rectangulaire de taille fixe dérivée de la fenêtre englobante moyenne des éléments de microstructure.

En comparant les taux de couvertures dérivés du motif de la figure 3.5 avec le motif lui-même, on peut réaliser que ces taux de couverture présentent un aspect similaire à ce qu'aurait produit l'application d'un filtre passe-bas sur le motif. Une première approximation d'un tel filtre peut être réalisée par l'utilisation d'un opérateur de flou gaussien dont le σ serait dérivé de la période du motif.

Cependant, cette approche ne peut s'appliquer à des motifs dont la fréquence spatiale varie. En outre, la période du motif doit être connue à l'avance, ce qui ne s'accorde pas avec la recherche d'un algorithme non-supervisé. Enfin, cette méthode présente la particularité de ne jamais fournir de frontières nettes entre deux régions de taux de couverture très différents, même lorsque cette variation est abrupte et prononcée. A première vue, ce lissage des variations du taux de couverture semble être un avantage, puisqu'on peut supposer qu'il se traduira par un lissage équivalent des défauts introduits par la motif incrusté dans l'image résultante. Or, si une telle supposition est juste pour une distance de vision proche de la microstructure, elle se révèle totalement infondée si on augmente la distance de vision afin de percevoir l'image globale. En effet, à cette distance de vision, le lissage des transitions entre les régions où le taux de couverture varient fortement se traduit perceptuellement par des distorsions chromatiques directement proportionnelles à l'ampleur du lissage effectué. Cet effet apparemment paradoxal s'explique facilement lorsqu'on se remémore le principe fondamental du mélange optique : la couleur résultante C est la moyenne des deux couleurs mélangées C_- et C_+ , pondérée par le rapport des surfaces que ces deux

couleurs occupent respectivement. Si la pondération utilisée s'écarte du rapport effectif des surfaces, la couleur résultante sera entachée d'une erreur proportionnelle à cet écart.

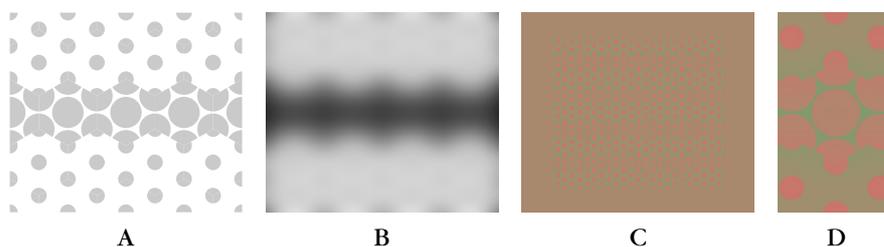


Fig.3.8 Taux de couverture par application d'un flou gaussien au motif (planche 11, p. 101)

La figure 3.8 permet de vérifier la réalité de ce phénomène : pour déterminer les taux de couverture locaux, on a appliqué un flou gaussien à la microstructure, avec un σ ayant la moitié de la taille des éléments de microstructure. On peut notamment constater que le motif incrusté affichée pour une distance de vision normale en C présente en son centre une distorsion chromatique aussi importante que celle causée par mauvaise subdivision du motif dans la partie inférieure de la planche 7, p. 100. L'agrandissement de la microstructure en D montre pourtant que le passage d'un taux de couverture peu élevé à un taux de couverture très élevé se produit de façon graduelle et reste pratiquement imperceptible. Il est important de garder à l'esprit ce phénomène apparemment paradoxal, dans lequel une continuité imposée au niveau microscopique provoque une brisure de continuité au niveau macroscopique. Le lissage des transitions, qu'il est difficile, voire impossible d'éviter lors de l'utilisation d'un filtre passe-bas, crée une inadéquation entre les variations réelles du taux de couverture du motif et la carte de ces mêmes variations. Cette inadéquation se répercute sur l'image traitée et diminue d'autant sa fidélité chromatique. Pour cette raison, l'application d'un filtre passe-bas ne saurait fournir une méthode valable pour le calcul non-supervisé du taux de couverture.

3.6 Calcul de taux de couverture par échantillonnage 1D

Une méthode suffisamment précise et fiable pour calculer le taux de couverture de n'importe quelle microstructure ne doit formuler aucune hypothèse sur les caractéristiques de cette microstructure. En particulier, la méthode doit pouvoir s'appliquer à des microstructures d'orientation, de symétrie et de fréquence spatiale variables, ainsi qu'à des motifs non-répétitifs. Elle doit en outre donner des résultats valables aussi bien pour les motifs à éléments noirs sur fond blanc que pour les motifs à élément blancs sur fond noir.

L'algorithme présenté dans cette section répond à ces critères. Son principe fondamental réside dans l'échantillonnage du taux de couverture le long de segments de droite passant par un point de mesure appartenant à un micro-élément (figure 3.9). Ces segments de droite servent à définir un échantillon rectangulaire autour de ce micro-élément. De nouveaux points de mesure sont dérivés à partir de cet échantillon rectangulaire, et l'algorithme se poursuit jusqu'à ce que tous les points du motif fassent partie d'au moins un échantillon rectangulaire. Un pavage de Voronoï est alors calculé à partir des points de mesure obtenus, et les taux de couverture mesurés sont associés aux polygones de ce pavage.

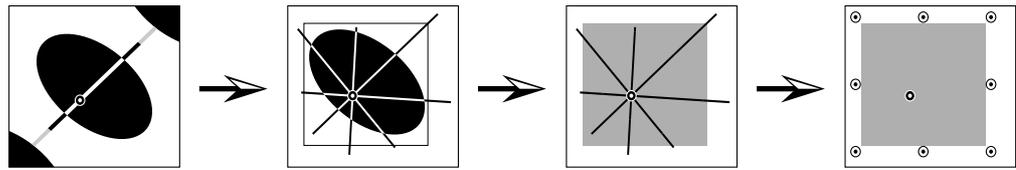


Fig.3.9 Déroulement de l'algorithme de calcul des taux de couverture par échantillonnage 1D

3.6.1 Echantillonnage 1D

L'opération fondamentale de notre méthode consiste, étant donné un point P d'un motif \mathcal{M} , à détecter et à mesurer le taux de couverture d'un micro-élément ε contenant P . Ce double objectif est atteint en une seule opération, qui consiste à rechercher les limites de ε en parcourant \mathcal{M} le long d'un ensemble de lignes droites passant par P . Lors du parcours de ces droites, les pixels noirs et blancs (chair et fond) sont comptabilisés et donnent une première mesure du taux de couverture local autour de P .

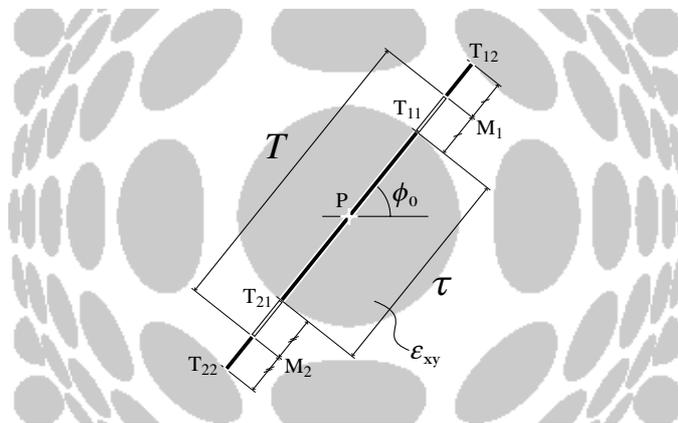


Fig.3.10 Echantillonnage 1D le long d'une droite passant par un point du motif.

La première étape de cette opération est illustrée par la figure 3.10. Pour une raison qui sera expliquée plus bas, le premier point P testé coïncide avec le centre du motif à évaluer. Ce point P appartient soit à la chair, soit au fond d'un micro-élément que nous notons ε_{xy} . La valeur M_{xy} du motif en ce point est notée (dans notre exemple, le noir), et un angle initial ϕ_0 est déterminé aléatoirement. Le caractère aléatoire de cet angle initial a pour but d'éviter le biais statistique qu'on obtiendrait inévitablement en privilégiant arbitrairement l'une ou l'autre direction. P et ϕ_0 définissent une droite discrète dans \mathcal{M} , que l'on subdivise en deux demi-droites partant chacune de P . On cherche alors l'intersection de ces deux demi-droites avec le micro-élément ε_{xy} contenant P . Cette recherche consiste à parcourir chaque demi-droite selon un algorithme incrémental dérivé de l'algorithme de Bresenham [Bresenham65].

Les pixels formant les demi-droites discrètes sont successivement parcourus jusqu'à ce qu'on ait rencontré une transition noir-blanc suivie d'une transition blanc-noir pour chacune des demi-droites.¹ Dans la figure 3.10, ces transitions sont désignées par T_{11} et T_{12} pour la première demi-droite, et par T_{21} et T_{22} pour la deuxième.

1. On suppose que P appartient à la chair du motif. Si P appartient au fond du motif, il faut intervertir les rôles du noir et du blanc.

On cherche alors à déterminer la frontière entre le micro-élément ε_{xy} et ses voisins directs, sachant que cette frontière passe entre T_{11} et T_{12} , puis entre T_{21} et T_{22} . Les deux points M_1 et M_2 de cette limite sont obtenus par une interpolation linéaire :

$$\mathbf{M}_i = (1-t) \cdot \mathbf{T}_{i1} + t \cdot \mathbf{T}_{i2}, \quad i \in \{1, 2\} \quad (3.5)$$

Une difficulté surgit lorsqu'on veut déterminer le facteur d'interpolation t . Celui-ci doit logiquement se déduire de deux facteurs : premièrement, il dépend du rapport entre la taille de ε_{xy} et celle de ses voisins directs. Deuxièmement, t dépend également du rapport entre le taux de couverture de ε_{xy} et celui de ses voisins directs.

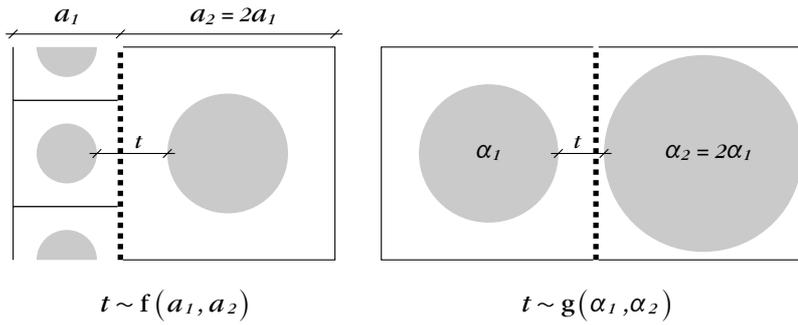


Fig.3.11 Limite entre les micro-éléments, fonction du rapport de leur taille et du rapport de leur taux de couverture

Comme ces deux paramètres sont justement ceux que la méthode cherche à déterminer, il est impossible de les connaître a-priori et nous devons nous contenter de les approcher. Une première approximation consiste à choisir t de manière à ce que les points M_1 et M_2 de la limite entre les micro-éléments soient situés à mi-chemin entre ces micro-éléments. De cette manière, l'erreur commise est bornée supérieurement par la moitié de la distance entre ε_{xy} et ses voisins directs. Par conséquent, nous posons $t = 1/2$, et déterminons M_1 et M_2 par :

$$\mathbf{M}_i = \frac{\mathbf{T}_{i1} + \mathbf{T}_{i2}}{2}, \quad i \in \{1, 2\} \quad (3.6)$$

Les deux points T_{11} et T_{21} de la frontière de ε_{xy} définissent un segment dont la longueur τ est un échantillonnage 1D de l'aire occupée par la chair ou le fond (noir ou blanc) composant ce micro-élément. De même, les deux points M_1 et M_2 marquant la limite entre ε_{xy} et ses voisins directs définissent un segment dont la longueur T est un échantillonnage 1D de l'aire totale occupée par ε_{xy} (figure 3.10). Selon que le point P appartient à la chair ou au fond du motif, nous pouvons en déduire une mesure du taux de couverture local $\alpha_0(P)$ de ε_{xy} :

$$\begin{aligned} \alpha_0(P) &= \frac{\tau}{T} && \text{si } P \text{ fait partie de la chair} \\ \alpha_0(P) &= \frac{T-\tau}{T} && \text{si } P \text{ fait partie du fond} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Bords du motif. A proximité des bords des motifs, il peut arriver que le parcours de l'une ou l'autre des demi-droites d'angle ϕ_0 passant par P sorte du motif avant qu'un ou plusieurs points de transition T_{ij} ait pu être trouvé. Dans ce cas, le point d'intersection entre la demi-droite et les bords du motif est utilisé pour la ou les transitions manquantes, ainsi que pour le ou les points marquant la limite entre ε_{xy} et son ou ses voisins directs.

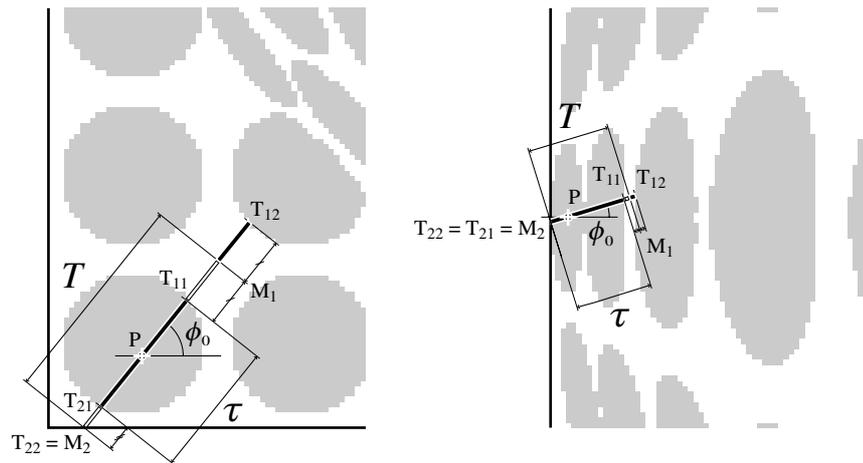


Fig.3.12 Points de transition et points-limites aux bords du motif

L'échantillonnage 1D $\alpha_0(P)$ donne une mesure précise du taux de couverture d'un micro-élément ε_{xy} au voisinage d'un point P, mais cette mesure n'est valable que pour la direction donnée par l'angle ϕ_0 . Théoriquement, la mesure complète du taux de couverture de ε_{xy} devrait exiger une infinité d'échantillons 1D. En pratique, nous avons constaté que seize directions différentes sont suffisantes si la direction initiale est choisie aléatoirement pour chaque point de mesure. La mesure complète du taux 1D de couverture local consiste donc à répéter seize fois la mesure effectuée pour ϕ_0 , en remplaçant ϕ_0 par $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{15}$, tels que :

$$\phi_i = \phi_0 + i \cdot \frac{\pi}{16} \quad (3.8)$$

Au total, on obtient donc seize échantillons 1D du taux de couverture local $\alpha_0(P), \alpha_1(P), \dots, \alpha_{15}(P)$, ainsi que seize paires de points marquant la limite entre ε_{xy} et ses voisins directs. Ces points-limites peuvent être utilisés pour construire un polygone-limite autour de P marquant la frontière entre ε_{xy} et ses voisins (figure 3.13).

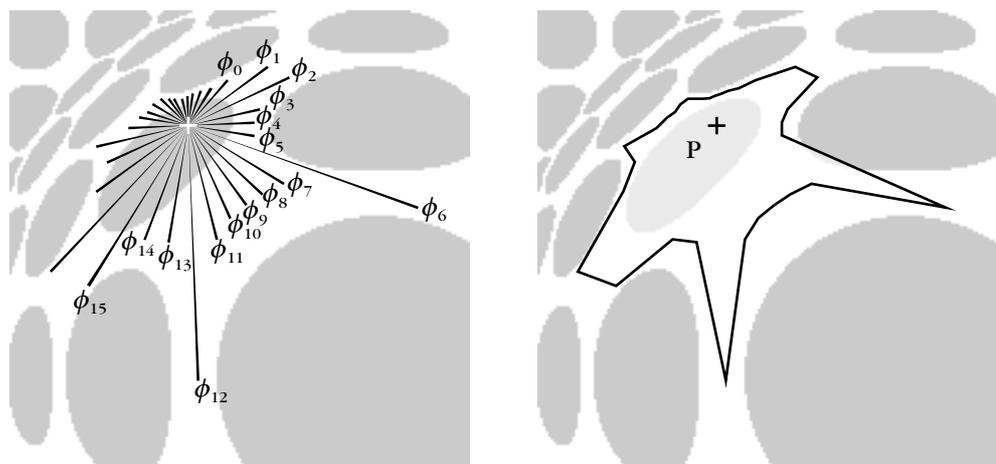


Fig.3.13 Échantillonnage 1D complet d'un micro-élément pour un point P donné et frontière entre ce micro-élément et ses voisins

Le polygone-limite permet déjà d'obtenir une mesure relativement fiable du taux de couverture du micro-élément ε_{xy} . On pourrait calculer cette mesure en effectuant un balayage

du polygone-limite et en dénombrant les éléments noirs et blancs qu'il contient. En pratique, on découvre que le taux de couverture 1D moyen $\bar{\alpha}_L(P)$ défini par:

$$\bar{\alpha}(P) = \frac{1}{16} \sum_{i=0}^{15} \alpha_i(P) \tag{3.9}$$

fournit un résultat d'une précision comparable tout en étant plus simple à calculer. Il est tentant à ce stade d'éliminer du calcul de la moyenne les échantillons 1D dégénérés provenant de droites qui ne traverseraient aucun autre micro-élément. Cette correction est toutefois prématurée et ne repose pas sur une base solide : aucune des informations collectées jusqu'ici ne permet d'opérer la distinction entre un échantillon 1D dégénéré et un échantillon 1D valide pris sur un micro-élément très irrégulier, comme le montre la figure 3.14.

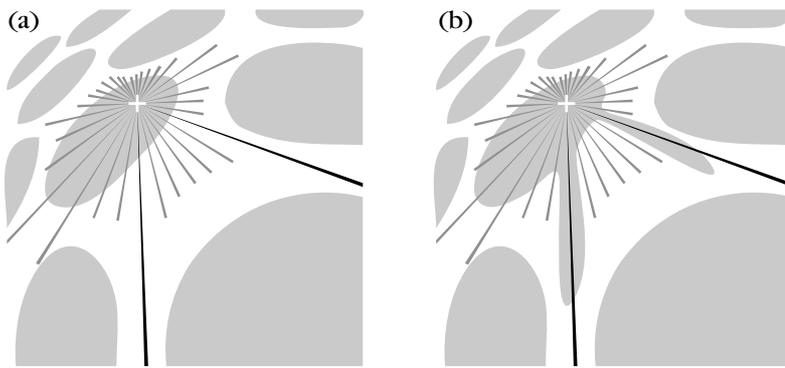


Fig.3.14 Echantillons 1D dégénérés (a) et micro-élément irrégulier (b)

Le taux de couverture 1D moyen présente un biais inhérent, car il sur-estime systématiquement la chair ou le fond du micro-élément ε_{xy} dans le calcul du taux de couverture : si le point P est sur la chair, alors $\bar{\alpha}_L(P)$ est supérieur au taux de couverture effectif; et si P est sur le fond, alors $\bar{\alpha}_L(P)$ est inférieur au taux de couverture effectif.

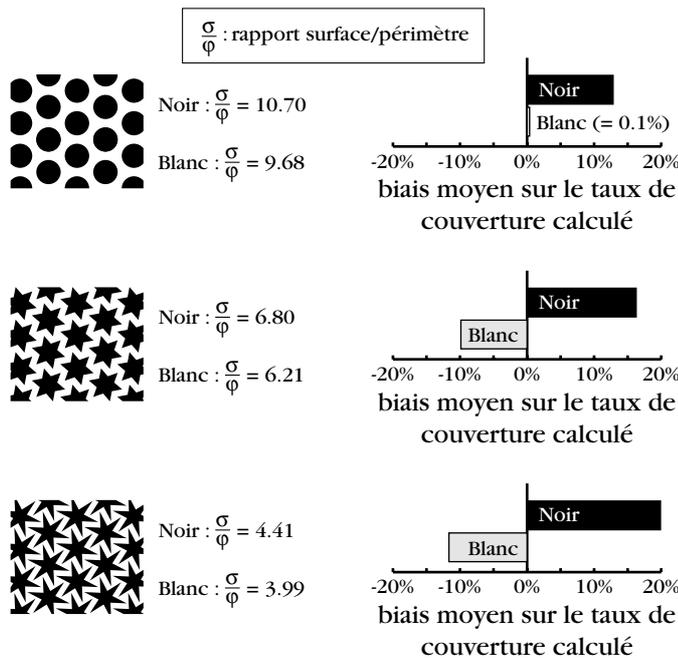


Fig.3.15 Biais du taux de couverture 1D en fonction du rapport surface/périmètre des micro-éléments, pour un taux de couverture de 50%.

Ce biais dépend du rapport $\frac{\sigma}{\varphi}$ entre la surface σ et le périmètre φ des micro-éléments. Il est plus prononcé sur la chair de la microstructure que sur son fond, comme le montre la figure 3.15.

3.6.2 Micro-élément et rectangle de validation

Puisque l'estimation des taux de couverture locaux doit être aussi peu sensible que possible aux variations de fréquence spatiale et d'échelle du motif, il est nécessaire de déterminer la région spatiale au sein de laquelle un taux de couverture 1D moyen $\bar{\alpha}_L(P)$ est valide. Nos observations ont montré que la mesure $\bar{\alpha}_L(P)$ présente un biais. Afin de le corriger, nous essayons de trouver un rectangle de validation noté R_{xy} , construit sur la base des points-limites. Ces points-limites sont d'abord triés par ordre croissant selon leur abscisse : la médiane des huit premiers points fournit l'abscisse du côté gauche du rectangle R_{xy} , et la médiane des huit derniers points fournit l'abscisse de son côté droit. Ensuite, les points-limites sont triés par ordre croissant selon leur ordonnée : la médiane des huit premiers points fournit l'ordonnée du côté inférieur de R_{xy} , et la médiane des huit derniers points fournit l'ordonnée du côté supérieur.

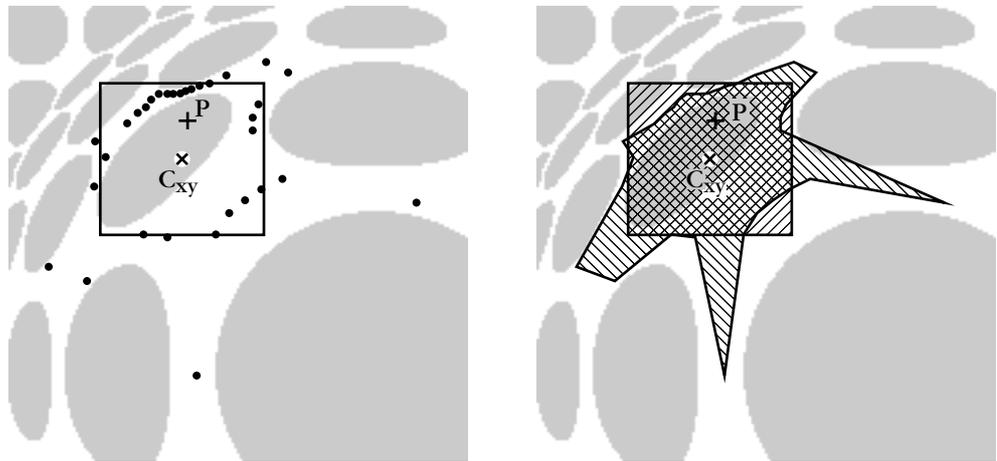


Fig.3.16 Construction du rectangle de validation

Le rectangle de validation joue quatre rôles : premièrement, il sert à marquer les régions du motif qui ont déjà été traitées par l'algorithme et de garantir ainsi qu'il ne recalcule pas de taux de couverture sur des points à l'intérieur du rectangle. Deuxièmement, il permet de générer de nouveaux points de mesure, qu'on détermine à partir des coordonnées de ses sommets et des milieux de ses côtés, en ne retenant que les points appartenant à une région encore non-traitée. Troisièmement, son centre C_{xy} est proche du centre du micro-élément ε_{xy} , alors que P peut se trouver sur n'importe quel point de ε_{xy} . On calcule donc un nouveau taux de couverture 1D moyen $\bar{\alpha}_L(C_{xy})$ à partir du centre du rectangle de validation, qui fournit un meilleur échantillonnage du taux de couverture local α_{xy} .

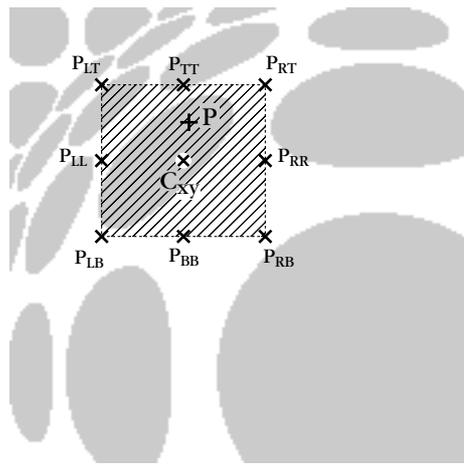


Fig.3.17 Génération de nouveaux points de mesure à partir du rectangle de validation

Le quatrième et dernier rôle du rectangle de validation est d'apporter une correction au biais du taux de couverture 1D moyen $\bar{\alpha}_L(P)$. En effet, le taux de couverture de la région du motif délimitée par R_{xy} , noté $\alpha_R(R_{xy})$, présente un biais opposé, et tend à sous-estimer la chair ou le fond du micro-élément ε_{xy} dans le calcul du taux de couverture : si le point P est sur la chair, alors $\alpha_R(R_{xy})$ est inférieur au taux de couverture effectif; et si P est sur le fond, alors $\alpha_R(R_{xy})$ est supérieur au taux de couverture effectif. Il y a une corrélation entre le biais de $\alpha_R(R_{xy})$ et celui de $\bar{\alpha}_L(P)$, mais les deux biais ne se compensent pas exactement. On peut néanmoins corriger le taux de couverture 1D moyen en effectuant une moyenne entre $\bar{\alpha}_L(C_{xy})$ et $\alpha_R(R_{xy})$, qui fournit l'estimation finale du taux de couverture local α_{xy} .

3.6.3 Propagation des mesures

La génération de nouveaux points de mesure constitue la dernière étape d'une itération de l'algorithme. Comme mentionné plus haut, celui-ci démarre sur un point pris au centre du motif, qui constitue à lui seul la première génération de points de mesure. La seconde génération comprend les huit points de mesure pris sur le pourtour du rectangle de validation du premier point de mesure. Cette seconde génération de points donne naissance à huit rectangles de validation, qui engendrent une troisième génération comportant 64 points de mesure. Les points d'une génération donnée situés sur un rectangle de validation d'une génération antérieure sont écartés. Il s'ensuit que les mesures successives se propagent du centre vers les bords du motif, comme le montre la figure 3.18. Dans cet exemple, les parties du motif déjà traitées sont éclaircies par rapport aux parties restant à traiter.

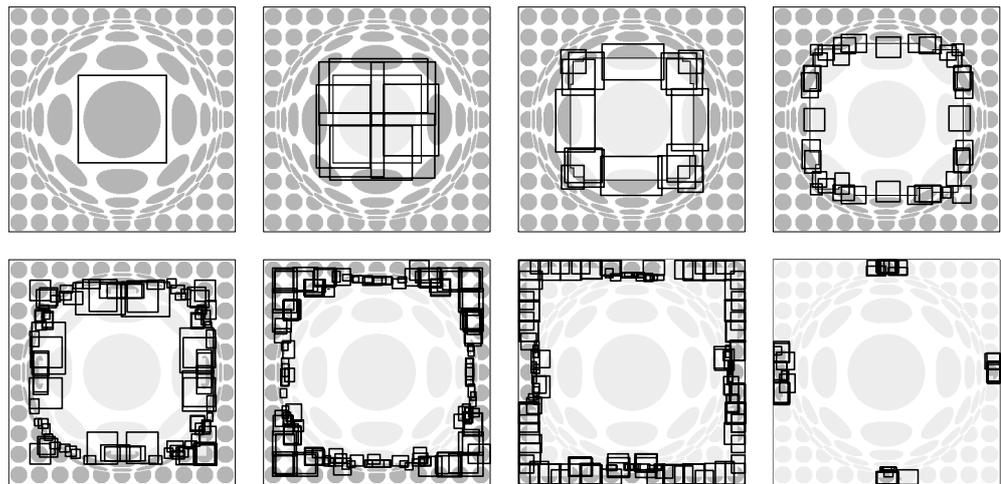


Fig.3.18 Propagation de l'échantillonnage 1D en fonction des générations successives de rectangles de validation

3.6.4 Pavage de Voronoï

Après détermination des taux de couverture aux centres des micro-éléments, nous devons calculer le taux de couverture en chaque point de la microstructure. Par construction, la distribution spatiale des points de mesure du taux de couverture est une fonction de la fréquence spatiale du motif qu'ils mesurent. En d'autres termes, lorsque la distance entre les points de mesure augmente, la taille des micro-éléments associés s'accroît et la fréquence spatiale diminue. Cette propriété nous amène naturellement à organiser les points de mesure dans un diagramme de Voronoï [Okabe92]. Chaque polygone de ce pavage correspond à un taux de couverture local α_{xy} . La création du diagramme de Voronoï et l'association des α_{xy} aux points qui le composent s'effectuent au moyen de deux balayages associant les α_{xy} aux points du diagramme de Voronoï en fonction de leur distance euclidienne avec les points de mesure du taux de couverture [Danielsson80].

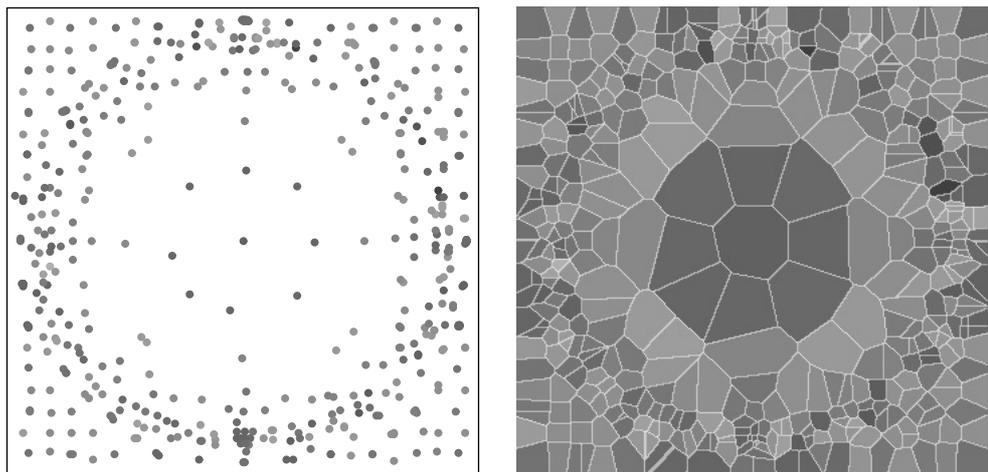
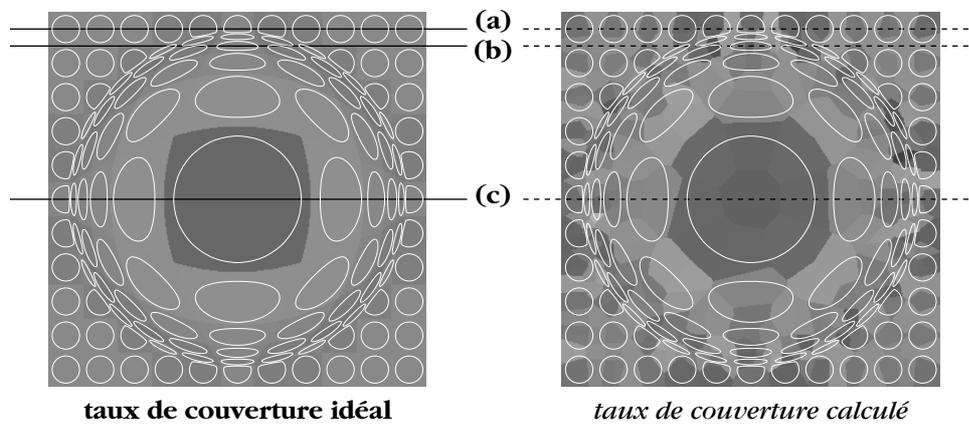


Fig.3.19 Points de mesure du taux de couverture et pavage de Voronoï associé

3.6.5 Qualité des taux de couverture calculés

Il est possible de mesurer la qualité des taux de couverture locaux calculés dans le cas d'une microstructure simple formé d'éléments simples dont on connaît les taux de couverture idéaux. La figure 3.20 donne un exemple d'une telle mesure : on a calculé la valeur absolue de l'erreur entre le taux de couverture idéal représenté à gauche et le taux de couverture calculé représenté à droite. On constate que la précision du taux de couverture par échantillonnage 1D est bonne, puisque l'erreur moyenne est de l'ordre de 5%, et que 90% des erreurs sont inférieures à 10%. Des mesures similaires effectuées sur d'autres microstructures constituées d'éléments plus complexes, non-répétitifs et de fréquence spatiale variable donnent des résultats similaires : l'erreur moyenne est de l'ordre de 7%, 90% des erreurs sont inférieures à 15% et moins de 1% des erreurs dépassent 25%.

Une analyse plus fine des erreurs est effectuée en mesurant le profil du taux de couverture suivant trois axes différents : l'axe (a) passe par une région comportant une majorité de chair (pixels noirs), l'axe (b) passe par une région comportant une majorité de fond (pixels blancs), et l'axe (c) passe par le centre de la microstructure.



Erreur globale moyenne de 4.9%
 90% des erreurs inférieures à 9.8%
 99% des erreurs inférieures à 16.1%

Fig. 3.20 Erreurs globales entre le taux de couverture idéal et le taux de couverture calculé

Le résultat de ces mesures est donné dans la figure 3.21, où les zones rectangulaires grisées correspondent à la chair de la microstructure de la figure 3.20. On constate premièrement que notre algorithme de calcul du taux de couverture a tendance à sur-estimer le taux de couverture sur la chair, et à le sous-estimer sur le fond. Deuxièmement, les erreurs les plus importantes sont principalement dues au fait que les frontières des polygones de Voronoï du taux de couverture calculé ne coïncident pas toujours avec les frontières du taux de couverture idéal

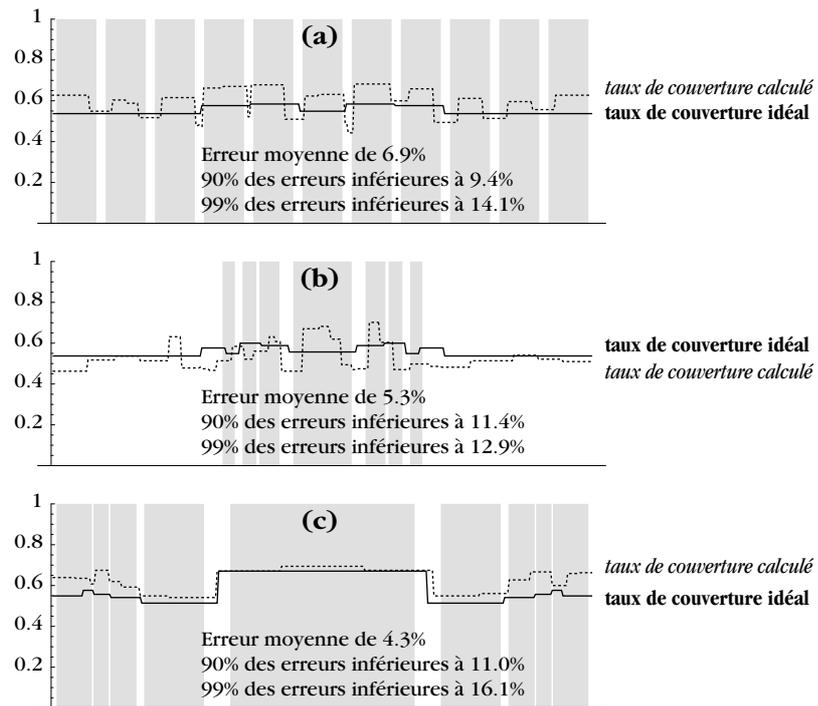


Fig.3.21 Taux de couverture idéal et du taux de couverture calculé, selon les profils utilisent des axes a, b et c de la figure 3.20

Une évaluation visuelle des taux de couverture calculés est donnée par la figure 3.22. Les taux de couverture ont été calculés sur les microstructures de la figure 3.7. Comme les taux de couverture réels de ces microstructures ne sont pas connus, il est impossible d'effectuer une mesure des erreurs obtenues.

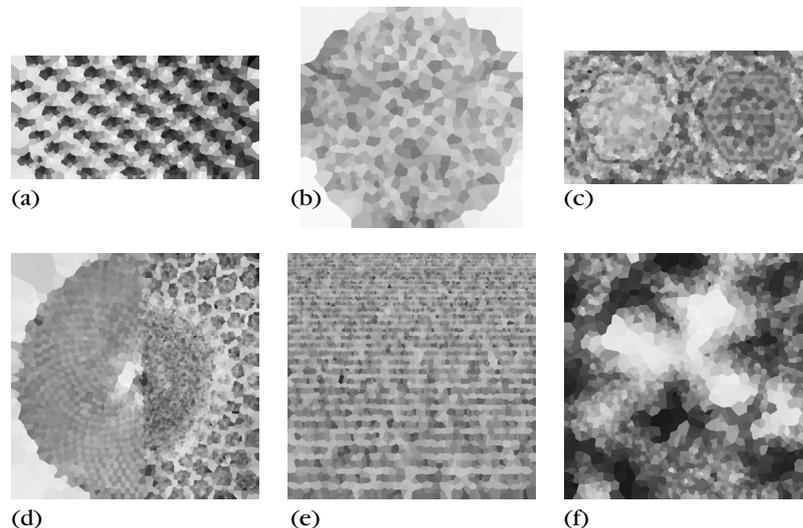


Fig.3.22 Calcul de taux de couverture par échantillonnage 1D appliqué aux exemples de la figure 3.7

Finalement, une évaluation visuelle des taux de couverture de la figure 3.22 est obtenue en incrustant les microstructures de la figure 3.7 dans un dégradé en tonalité ayant une saturation et une luminosité CIE-Lab constantes. Le résultat est visible dans la planche 12, p. 102. Un écart chromatique en saturation et en tonalité est utilisé dans les six premières images

(planche 12 a-f). La septième image (planche 12 g) utilise un écart en tonalité pure de taille plus importante. A distance de vision normale, les détails des microstructures sont visibles, même aux fréquences spatiales élevées; toutefois, ces détails apparaissent avec plus de netteté dans l'image utilisant un écart chromatique de grande taille (planche 12 g). A une distance de vision plus importante (1.5 m), les détails des microstructures disparaissent, et seul le dégradé en tonalité demeure visible. A cette distance de vision, les couleurs de chaque image globale deviennent identiques quel que soit l'écart chromatique utilisé, indiquant que notre algorithme a calculé les taux de ouverture de chaque microstructure avec une précision globale suffisante.

D'un strict point de vue géométrique, les mécanismes d'extrapolation et d'équilibrage d'un écart chromatique présentés aux chapitres 2 et 3 sont satisfaisants. Cependant, ces mécanismes ne tiennent qu'imparfaitement compte de la perception humaine des couleurs [Schiffman90]. Les écarts chromatiques qu'ils permettent de produire ne sont pas égaux dans différentes portions de l'espace des couleurs. Ce chapitre montre comment certains principes de la science de la vision peuvent être exploités pour corriger cette insuffisance. Comme les mécanismes de la vision des couleurs ne sont pas tous connus, il n'existe pas de réponse à certaines des questions soulevées par les objectifs de ce travail, notamment dans le domaine encore largement inexploré des grands écarts chromatiques [Indow94, Wuerger95, Izmailov95, Attridge99, Switkes99]. Pour cette raison, nous avons dû développer nos propres expériences pour résoudre quelques-uns des problèmes rencontrés dans la production de contrastes chromatiques perceptuellement uniformes. Ces expériences indiquent qu'une solution générale au problème posé par la définition d'une métrique pour la perception du contraste constitue un objectif encore lointain. Cependant, les résultats partiels déjà acquis offrent une amélioration considérable et permettent de produire des microstructures uniformes pour plusieurs classes d'écarts chromatiques.

4.1 Espace LEF et contraste

Nous avons traité jusqu'ici d'écarts chromatiques indépendamment du motif auxquelles ils sont associés lors de leur incrustation. Deux plages de couleurs voisines présentent un contraste visuel qui dépend non seulement de l'écart chromatique qui les sépare, mais également de leur surface apparente. Nous utilisons ici le terme de contraste dans un sens différent de celui donné par sa définition selon Michelson [Peli97], dans laquelle il dépend uniquement de la luminance minimale et de la luminance maximale :

$$\frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} \quad (4.1)$$

Cette définition ne tient compte ni de l'écart de saturation ni de l'écart de tonalité des écarts chromatiques utilisés dans ce travail. En outre, la fréquence spatiale du motif n'est pas prise en compte, alors qu'on sait qu'elle joue un rôle important dans la perception du contraste [Barten92, Poirson93, Rovamo99]. Par conséquent, nous utilisons ici le terme de contraste en lui donnant le sens de contraste perçu [Tiippana99].

Nous avons choisi d'utiliser l'espace LEF parce qu'il offre une représentation géométrique des couleurs compatible avec leur perception. Mais cette compatibilité n'est que partielle, et les distances géométriques entre les couleurs ne sont pas équivalentes à leurs distances perceptuelles. L'absence de relation entre ces deux types de distance est mise en évidence dans la figure 4.1 : une microstructure en damier est incrustée dans deux sections orthogonales de l'espace LEF. La première section affiche une tonalité LEF constante jaune-bleu et est traitée avec un écart en saturation LEF pure. La deuxième section affiche une luminosité LEF constante et est traitée avec un écart en tonalité LEF pure. Les deux écarts de référence ont la même norme euclidienne dans l'espace LEF. Si la distance perceptuelle des écarts extrapolés à partir de ces références était constante, le damier incrusté présenterait un contraste uniforme sur les deux sections, excepté à proximité des bords du volume des couleurs. Or, on observe au contraire d'importantes variations du contraste, et la localisation de ces variations semble suivre un schéma qui présente une analogie avec la géométrie de l'espace LEF, notamment dans les zones où il est le plus réduit.

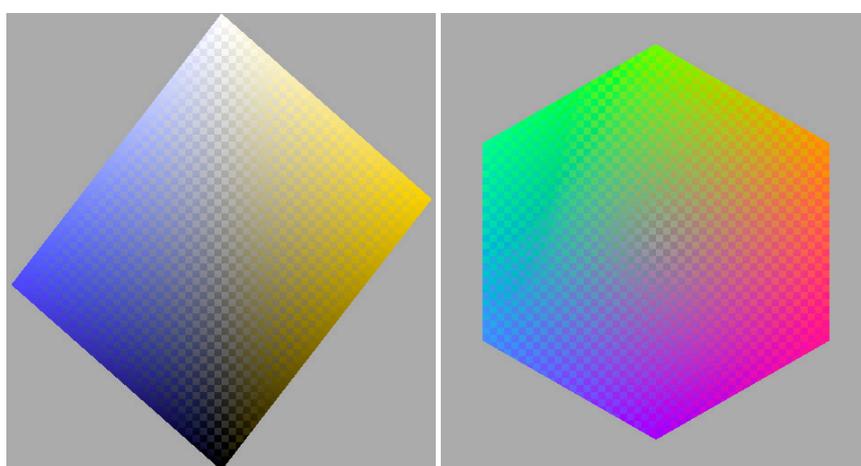


Fig.4.1 Irrégularité du contraste obtenu par l'application d'un écart en saturation et d'un écart en tonalité (planche 13, p. 102)

4.2 Inversion du ΔL et annulation du contraste

Une analyse colorimétrique des zones où le contraste semble s'annuler montre que l'écart de luminosité (ΔL_{Lab}) entre la couleur de la chair et celle du fond de la microstructure présente une inversion, et qu'elle est précisément nulle là où le contraste est le plus faible. Les écarts de saturation et de tonalité entre la chair et le fond n'ont que très peu d'influence sur le contraste perçu, comme on peut le vérifier sur la figure 4.2, qui montre une microstructure incrustée dans un dégradé construit sur une radiale de l'espace LEF. La réduction progressive du contraste en fonction du ΔL est visible à tous les niveaux de fréquence spatiale, y compris sur les échantillons agrandis qui ont servi aux mesures colorimétriques en Lab. On remarque également que le ΔE_{Lab} ne fournit pas une mesure correcte du contraste perçu, puisque l'échantillon 3 offre un contraste inférieur à l'échantillon 1 tout en présentant un ΔE_{Lab} presque deux fois plus élevé.

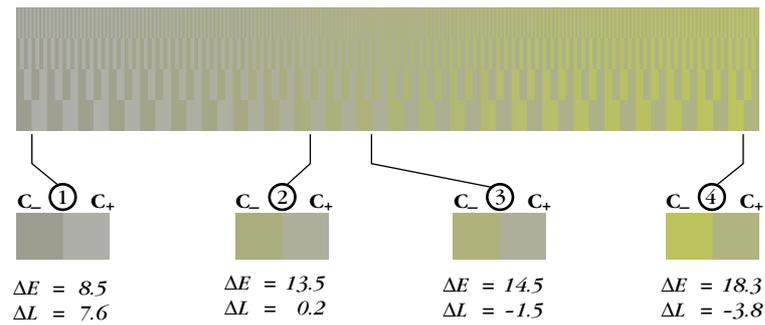


Fig.4.2 Ecart chromatique en saturation extrapolé sur un segment de droite dans l'espace LEF (planche 14, p. 102)

L'absence de corrélation observée entre la valeur ΔE_{Lab} d'un écart chromatique et le contraste qu'il affiche s'explique par le fait que le système CIE-Lab a été conçu pour mesurer le degré de proximité de deux couleurs, et qu'il ne peut être utilisé pour mesurer le degré d'éloignement de deux couleurs. Par conséquent, le ΔE_{Lab} est une mesure fiable pour des écarts couleur tout juste perceptibles, mais cette fiabilité ne s'étend pas aux grands écarts chromatiques nécessaires à l'incrustation de microstructures visibles.

L'absence de modèle pour de grands écart chromatiques est une caractéristique de tous les systèmes définissant une métrique pour la couleur [Fairchild98], parce que tous ces systèmes sont dérivés d'expériences d'égalisation chromatique, où l'on demande à l'observateur de transformer une couleur jusqu'à ce qu'il ne puisse plus la distinguer d'une couleur de référence. Afin de pouvoir garantir l'uniformité de la microstructure, nous avons besoin d'un système permettant de comparer un contraste donné avec un contraste de référence, et capable de quantifier les différences entre deux contrastes pour une fréquence spatiale donnée. Comme les connaissances dans ce domaine en sont encore au stade qualitatif [Campbell68, McCourt85, McCourt93, McCourt97], nous avons effectué deux expériences dans le but d'acquérir les données nécessaires à l'établissement d'une métrique pour la perception de grands écart chromatiques équi-lumineux.

4.3 Première expérience : seuils de discrimination du contraste

La première expérience a pour objectif de déterminer le seuil de discrimination du contraste au voisinage d'une couleur C pour une fréquence spatiale donnée. Les contrastes sont définis comme des écarts chromatiques symétriques équi-lumineux de taille variable centrés sur C. Le seuil de discrimination du contraste d'un écart chromatique est défini comme la taille de cet écart pour laquelle la probabilité de détection du contraste affiché est égale à la probabilité de sa non-détection.

4.3.1 Protocole

Le motif servant à mesurer la détection du contraste est un C de Landolt, souvent utilisé dans les tests d'acuité visuelle [Colenbrander88]. Ce motif peut prendre deux orientations, correspondant à un C ayant une ouverture à gauche ou à droite. La taille du C détermine la taille de son ouverture dont dépend la fréquence spatiale du contraste; cette taille peut prendre trois valeurs aboutissant à des fréquences spatiale de 15, 20 et 30 cycles par degré. Les stimuli sont présentés dans l'obscurité, sur un fond gris de luminosité moyenne et à une distance minimale de 233.6 cm pour limiter l'influence des artefacts liés au moniteur. Huit directions définies à partir des axes a et b de l'espace CIE-Lab sont testées pour cha-

que couleur. Pour chacune de ces directions, plusieurs paires de couleurs équi-lumineuses et équidistantes de C sont produites; la distance entre ces paires de couleurs correspond à un ΔE variant entre 2 et 30.

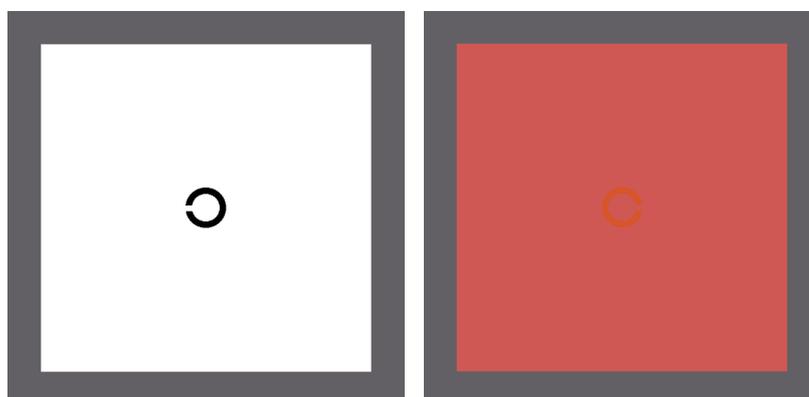


Fig.4.3 C de Landolt utilisé pour la détection du contraste (planche 15, p. 103)

Pour chaque stimulus, l'observateur a le choix entre trois réponses : gauche, droite et passe; le dernier choix sert à indiquer que l'observateur s'estime incapable de déterminer l'orientation du motif. Le temps de présentation est limité à cinq secondes par stimulus; l'absence de réponse après le temps imparti est assimilé à une non-détection du contraste. Pour chaque stimulus, une direction est choisie aléatoirement parmi les huit directions possibles, afin d'éviter que l'observateur réponde en fonction d'un schéma de présentation fixe [Engel drum00]. Pour une direction donnée, l'ordre de présentation des stimuli dépend de la qualité des réponses : en cas de réponse correcte, la distance chromatique du stimulus suivant décroît, et elle augmente en cas de réponse erronée. Le pas de variation dépend à la fois de la distance chromatique et de la qualité des réponses de l'observateur. Des stimuli de contrôle sont présentés à des intervalles aléatoires pour tester le degré de fiabilité de l'observateur : ils se divisent en faux négatifs présentant un contraste si élevé qu'ils doivent obligatoirement susciter une réponse correcte, et en faux positifs ne présentant aucun contraste de manière à ne susciter aucune réponse, ou une réponse de type "passe".

Pour une direction donnée, une suite de réponse fausse se terminant par une réponse correcte marque le franchissement du seuil de discrimination en direction de la détection [Finney77]. De même, une suite de réponses correctes se terminant par une réponse fausse marque le franchissement du seuil de discrimination en direction de la non-détection. Les valeurs des écarts chromatiques pour lesquels ces inversions positives ou négatives de tendance se produisent sont comptabilisées, et la présentation de stimuli pour cette direction prend fin dès qu'on a constaté dix inversions de tendance. Les temps de réponse

sont également comptabilisés, car ils fournissent une indication sur la difficulté qu'a l'observateur à détecter le contraste affiché.

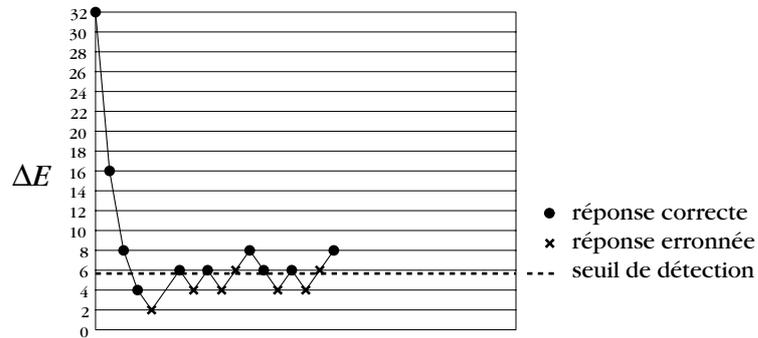


Fig.4.4 Réponses pour une direction donnée, inversions de tendance et seuil de détection estimé

4.3.2 Résultats

Pour une direction donnée, la moyenne des six dernières inversions de tendance donne le seuil de discrimination du contraste. Avec huit directions par couleur et deux points par direction, on obtient donc seize seuils de discrimination correspondant à autant de points répartis autour de la couleur C dans l'espace CIE-Lab. Les coordonnées $[a, b]$ de ces points font l'objet d'une analyse en composantes principales [Berns91] dont le résultat fournit les deux axes d'une ellipse centrée sur C (figure 4.5). Cette ellipse fournit le seuil de discrimination du contraste autour de C pour une fréquence spatiale donnée.

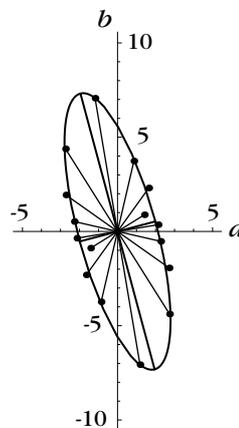


Fig.4.5 Seuils de discrimination de contraste autour d'un point de l'espace CIE-Lab

Les résultats font apparaître une faible variance intra-observateur, qui porte essentiellement sur la taille des ellipses. Pour un même observateur, l'orientation des ellipses et le rapport

de leurs axes ne varie que très peu. (figure 4.6) Leur variation de taille est compatible avec la variation naturelle d'acuité visuelle au cours de la journée.

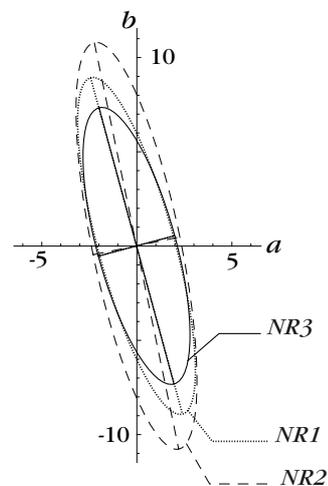


Fig.4.6 Seuils de discrimination du contraste pour un point et un seul observateur

Les variations inter-observateurs sont plus importantes que les variations intra-observateur. Ces différences portent sur la taille des ellipses, alors que leurs orientations et le rapport de leurs axes varie peu d'un observateur à l'autre (figure 4.7). Elles proviennent principalement des différences d'acuité visuelle entre les différents observateurs, mais également de différences dans la stratégie de réponse adoptée lors de l'expérience : certains observateurs ne fournissent une réponse que lorsqu'ils sont absolument certains de sa validité, alors que d'autres répondent aussi vite qu'ils le peuvent.

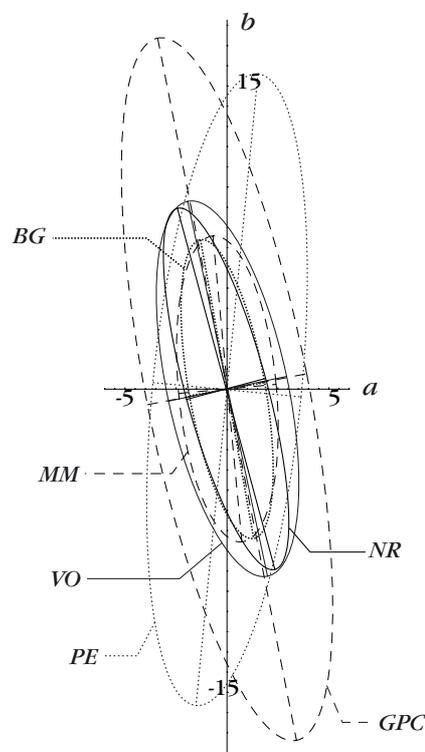


Fig.4.7 Seuils de discrimination du contraste pour un point et plusieurs observateurs

Les ellipses obtenues aux trois fréquences spatiales testées dans l'expérience sont similaires en orientation aux ellipses servant à circonscrire les écarts chromatiques tout juste discernables obtenues par d'autres travaux [MacAdam42, Melgosa97]. La figure 4.8 les représente à leur taille réelle, superposées aux ellipses de MacAdam agrandies dix fois. Leur taille est bien supérieure à celles des ellipses de MacAdam parce que nous utilisons des fréquences spatiales plus élevées : MacAdam demandait à ses observateurs d'égaliser les deux moitiés d'un champ circulaire biparti ayant un diamètre apparent de 2 degrés, alors que la fréquence la plus basse que nous utilisons correspond à un diamètre apparent de 4 minutes d'arc. Malgré cette différence d'échelle, les rapports entre les tailles des ellipses autour des différents points testés sont préservés. L'allongement plus prononcé des ellipses selon l'axe jaune-bleu s'explique par le fait c'est sur cet axe que la détection du contraste est la plus sensible à l'augmentation de fréquence spatiale.

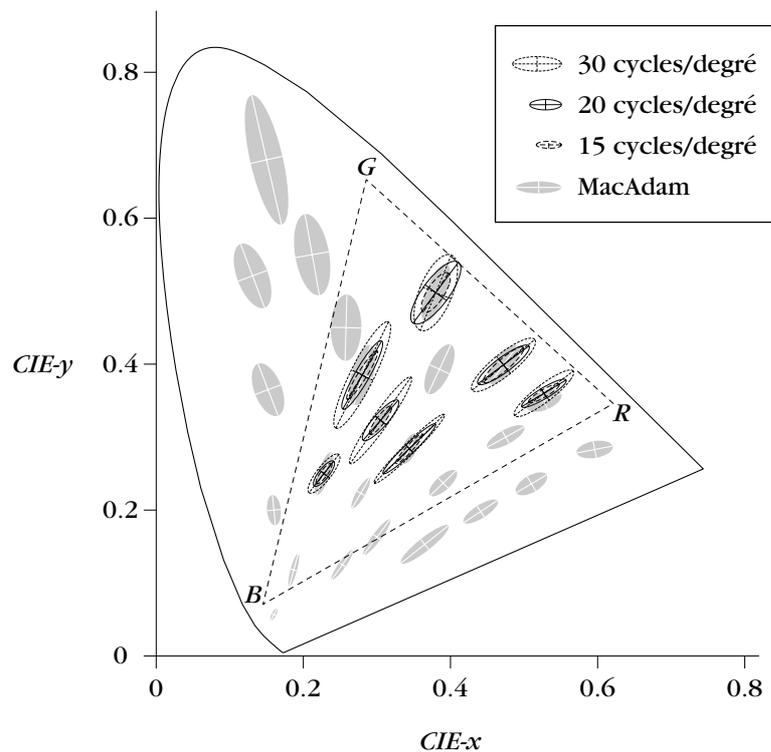


Fig.4.8 Seuils de discrimination du contraste pour les fréquences spatiales de 15, 20 et 30 cycles par degré, superposés aux ellipses de McAdam agrandies 10 fois

Ces observations amènent les conclusions suivantes :

1. Il est possible d'étudier la composante chromatique du contraste indépendamment de sa composante spatiale
2. Les seuils de discrimination du contraste obtenus pour une fréquence spatiale peuvent servir à calculer les seuils de discrimination pour une autre fréquence spatiale au moyen d'une homothétie.
3. Le seuil élevé de discrimination du contraste sur l'axe bleu-jaune limite la possibilité de produire des contrastes uniformes sur tout l'espace couleur pour des fréquences spatiales élevées.

4.4 Deuxième expérience : contraste uniforme en saturation

Les résultats obtenus lors de la première expérience ne suffisent pas à établir une métrique du contraste, même en se limitant à une seule fréquence spatiale. En effet, les seuils mesurés en quelques points de l'espace CIE-Lab ne peuvent être étendus de façon fiable à la totalité du volume des couleurs. Plus généralement, les propriétés d'un écart chromatique interpolé entre deux autres écarts chromatiques peuvent être très éloignées des propriétés de ces deux écarts si leur distance est élevée : par exemple, une interpolation entre deux écarts tout juste discernables n'aboutit pas toujours à un écart tout juste discernable.

Comme notre but est de produire une microstructure de visibilité contrôlée, nous avons besoin d'un ensemble de grands écarts chromatiques perceptuellement équivalents. Cet ensemble doit être consistant et ne comporter que des écarts chromatiques de même nature. Il doit couvrir la plus grande partie possible du volume des couleurs. Comme l'interpolation linéaire ne donne de résultats fiables qu'entre des écarts chromatiques proches, il doit être suffisamment dense. En raison de la géométrie du volume des couleurs, nous avons choisi de nous limiter à un ensemble d'écarts chromatiques en saturation. Le choix de la saturation permet en effet d'utiliser des écarts chromatiques de plus grande taille sur une partie plus importante du volume des couleurs, alors que la taille des écarts en tonalité est rapidement limitée par la proximité de l'axe achromatique et par les frontières du cube RGB.

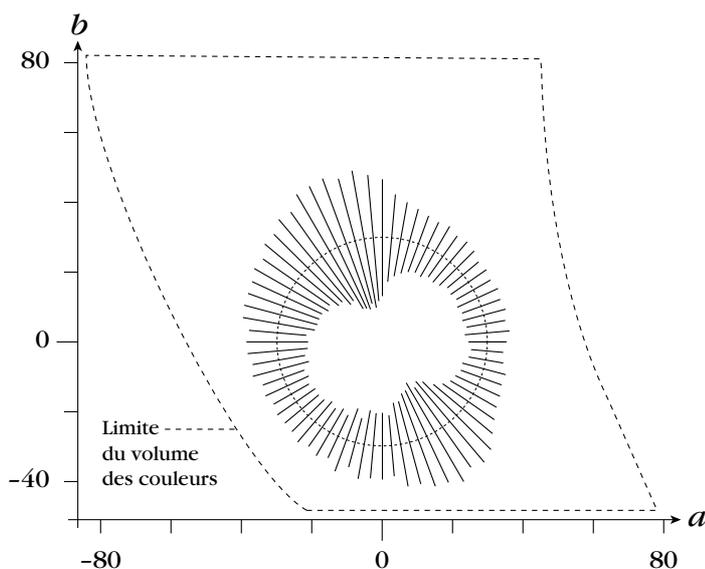


Fig.4.9 Radiales et écarts en saturation sur un plan CIE-Lab de luminosité constante ($L = 70$)

4.4.1 Protocole

Le principe de cette deuxième expérience consiste à égaliser entre eux des contrastes en saturation sur l'intégralité du volume des couleurs. Le contraste de référence auquel tous les autres contrastes sont comparés est un contraste en luminosité CIE-Lab avec un ΔL égal à 2. Le motif utilisé est un damier présentant une fréquence spatiale de 20 cycles par degré à la distance de 233.6 cm retenue pour l'expérience (voir planche 16, p. 103).

Comme il est impossible de représenter tout le volume des couleurs à la fois sur la surface d'affichage du moniteur, on le découpe selon une géométrie cylindrique : l'espace CIE-Lab est divisé par des lignes radiales de tonalité et de luminosité constantes uniformément

réparties. Une séance d'égalisation de contraste porte sur une seule de ces radiales, qui est affichée sous la forme d'un dégradé uniforme dans lequel un motif en damier est incrusté par des écarts en saturation. Les écarts initiaux sont dérivés des seuils de discrimination du contraste obtenus lors de l'expérience 1. Ce dégradé est entouré par un fond gris de même luminosité affichant le contraste de référence; le fond et le dégradé sont graduellement fondus l'un dans l'autre sur une distance de deux cycles afin d'éviter la contamination due à la proximité de couleurs très éloignées l'une de l'autre. A proximité de l'axe achromatique (espace LEF), l'écart en saturation appliqué au dégradé est progressivement remplacé par l'écart en luminosité appliqué au fond.

L'observateur a pour tâche d'uniformiser le contraste perçu sur l'ensemble du dégradé, de manière à ce qu'il soit en tout point équivalent au contraste perçu sur le fond. A cette fin, il a la possibilité d'augmenter ou de diminuer l'écart en saturation de certains points-clés sur le dégradé (figure 4.10). Les écarts chromatiques pour les points autres que les points-clés sont interpolés linéairement entre les écarts des points-clés. On sait que l'interpolation linéaire entre écarts chromatiques éloignés donne des résultats peu fiables au niveau de la perception. Pour cette raison, les points-clés sont proche les uns des autres, et le ΔE CIE-Lab entre deux points-clés n'excède pas 4.

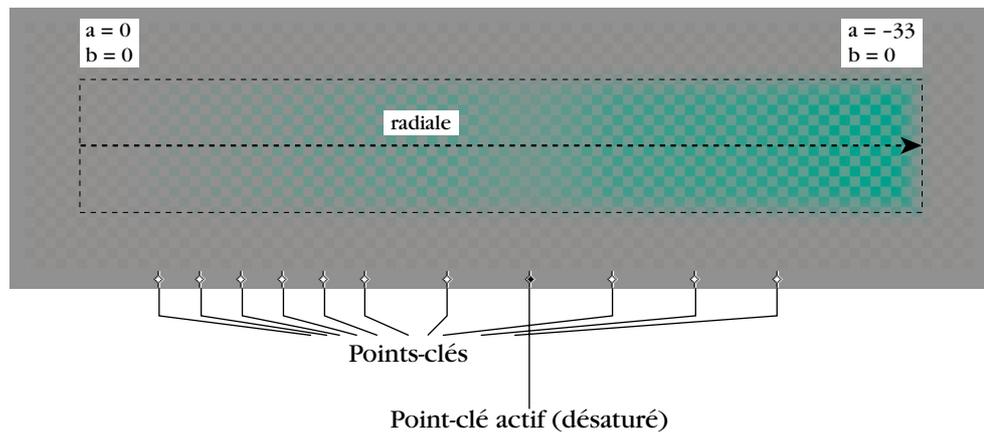


Fig. 4.10 Dégradé de contrastes en saturation à uniformiser en agissant sur les points-clés. Le point-clé actif est insuffisamment saturé (planche 18, p. 104)

4.4.2 Résultats

Lorsque l'observateur estime avoir obtenu un contraste uniforme sur la totalité du dégradé, les écarts chromatiques ayant servi à produire ces contrastes sont mémorisés. Pour un plan à luminosité constante de l'espace CIE-Lab, les radiales ainsi traitées sont au nombre de 36, séparées par un angle de tonalité de 10° . Les plans à luminosité constante traités sont séparés par un ΔL_{Lab} de 10. Un schéma des écarts chromatiques obtenus pour le plan de luminosité 70 est présenté à la figure 4.11. La taille des écarts chromatiques obtenus est diminuée d'un facteur 10 pour permettre une meilleure lisibilité de l'ensemble. Pour cette

raison, certaines radiales paraissent incomplètes, car elles semblent s'arrêter bien avant les limites du volume des couleurs.

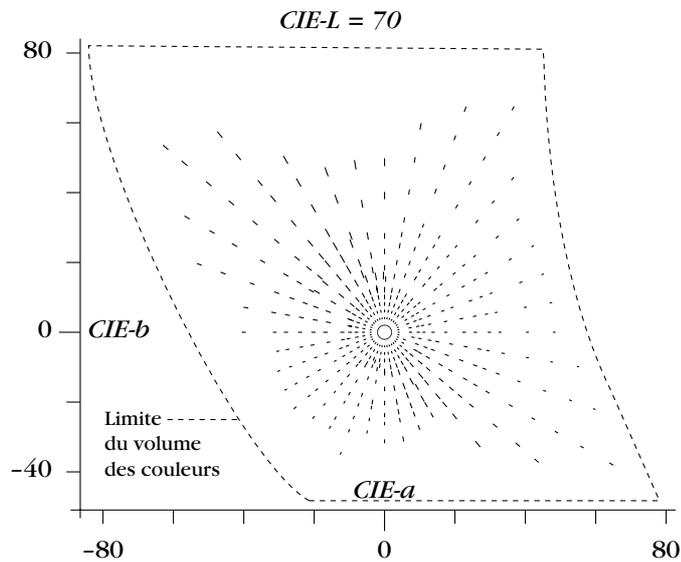


Fig.4.11 Radiales et écart en saturation obtenus sur un plan CIE-Lab de luminosité constante (représentées au $1/10^6$)

4.4.3 Application à l'incrustation de microstructure

Les écart chromatiques obtenus par égalisation du contraste ne sont pas additifs, puisqu'ils sont définis dans l'espace CIE-Lab. Il est toutefois possible de les transformer en écart additifs en recalculant leur centre à partir de leurs extrémité converties dans l'espace LEF. Cette transformation appliquée à tous les écart chromatiques obtenus empiriquement fournit un maillage d'écart chromatiques additifs peuplant partiellement l'espace couleur selon une géométrie cylindrique. Ce maillage est tout d'abord étendu par des translations radiales et verticales afin de peupler l'intégralité du volume des couleurs. Les écart chromatiques translats sont simplement tronqués afin de rester à l'intérieur du volume des couleurs dans LEF. On applique ensuite une transformation géométrique à ce maillage cylindrique étendu de manière à obtenir une grille cubique régulière couvrant la totalité du cube LEF. Cette grille cubique que nous notons $P3dS20^1$ peut alors être utilisée pour assigner un écart chromatique en saturation/luminosité à toute couleur C de l'espace.   cette fin, on effectue une interpolation tri-linéaire entre les six sommets de la maille à laquelle appartient C . Si les écart chromatiques ainsi obtenus sont appliqués à une microstructure équilibrée présentant une fréquence spatiale de 20 cycles par degré, ils produisent un contraste uniforme. Un exemple de ce contraste uniforme est donné par la planche 17, p. 103.

4.4.4 Recentrage des écart chromatiques $P3dS20$

Par construction, les écart chromatiques de $P3dS20$ sont symétriques et ne peuvent donc être appliqués sans modification qu'à une microstructure comprenant autant de fond que de chair. Pour une microstructure présentant un taux de couverture variable α diff rent de 0.5, il est nécessaire de recentrer un écart chromatique $\Delta C = \{C, C_-, C_+\}$ en fonction de α (section 3.2, p. 43). Cependant, un écart chromatique recentré ne fait pas automatique-

1. Période égale à 3 minutes d'arc, écart moyen en saturation pure δS égal à 20.

ment partie de P3dS20, et son uniformité perceptuelle n'est par conséquent pas garantie. On résout ce problème en recherchant dans P3dS20 un écart chromatique $\Delta C^1 = \{C^1, C^1_-, C^1_+\}$ tel que :

$$\alpha \cdot C^1_+ + (1 - \alpha) \cdot C^1_- = C \tag{4.2}$$

L'algorithme appliqué se base sur l'observation qu'un écart chromatique asymétrique, qui a été recentré d'un vecteur δ_α pour reproduire une couleur C à un taux de couverture α est identique à un écart chromatique symétrique de centre $C^1 = C + \delta_\alpha$. On recherche donc une couleur C^1 telle que son écart symétrique $\Delta C^1 = \{C^1, C^1_-, C^1_+\}$ associée dans P3dS20 vérifie la relation donnée par l'équation 4.2.

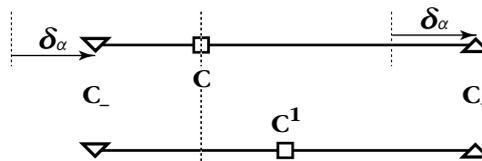


Fig.4.12 Écart chromatique recentré et écart symétrique équivalent

Cette recherche prend la forme d'un procédé itératif (voir figure 4.13). Soit ΔC l'écart symétrique obtenu pour $C^0 = C$ dans P3dS20 (figure 4.13, 1). On décale ΔC d'un vecteur δ_α pour obtenir un écart asymétrique ΔC_α adapté à un taux de couverture α (figure 4.13, 2). On recherche ensuite dans P3dS20 l'écart symétrique ΔC^1 associé au centre C_α de l'écart ΔC_α (figure 4.13, 3). On détermine la couleur C^1 obtenue en appliquant ΔC^1 à un taux de couverture α (figure 4.13, 4). Si le ΔE CIE-Lab entre C et C_1 est inférieur à un seuil ε fixé, alors on considère que ΔC_1 remplit le rôle d'écart chromatique pour C recentré à un taux de couverture α . Sinon, on modifie C_0 par translation dans LEF d'un vecteur $\delta_{01} = C - C_1$, et on effectue une nouvelle itération en partant de (1). Pour un seuil $\varepsilon = 0.5$, deux itérations suffisent en moyenne, mais il est parfois nécessaire d'effectuer jusqu'à six itérations.

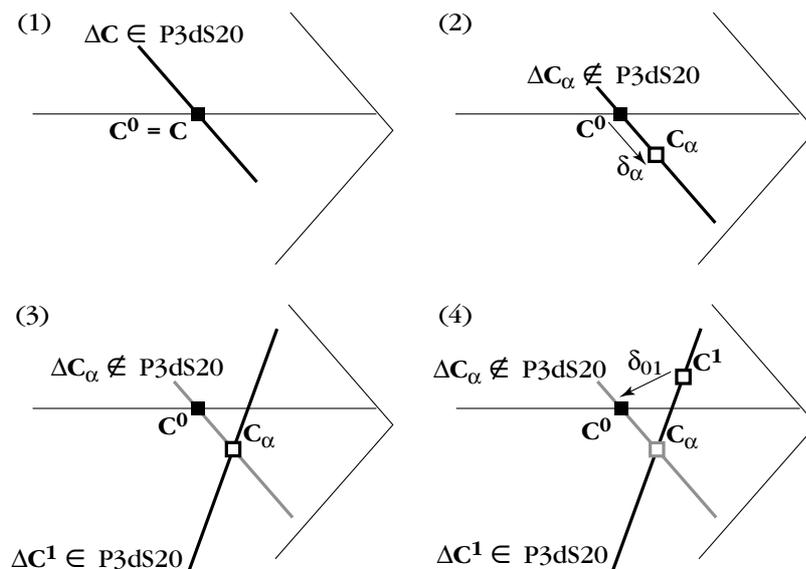


Fig.4.13 Algorithme utilisé pour obtenir un écart chromatique dans P3dS20 pour C recentré à un taux de couverture α

Avec cette technique de recentrage par itérations, nous obtenons des écarts en saturation d'un usage aussi général que les écarts chromatiques définis dans LEF. Appliqués à des microstructures ayant une fréquence spatiale de 20 cycles par degré, ces écarts chromatiques produisent un contraste uniforme sur la quasi-totalité de l'espace couleur.

4.5 Ecarts chromatiques équi-lumineux

L'ajustement empirique de contrastes donne des résultats satisfaisants pour un type d'écart chromatiques et une fréquence spatiale donnée. Toutefois, généraliser cette méthode exige une quantité très importante de données expérimentales. Des travaux récents [Chen96] ont montré qu'il existe une hiérarchie dans l'influence des attributs perceptuels sur la perception du contraste : il suffit que l'écart de luminosité du contraste dépasse un certain seuil pour que les écarts de tonalité ou de saturation cessent de jouer un rôle mesurable. Nous exploitons cette découverte en imposant une contrainte sur le ΔL_{Lab} des écarts chromatiques après leur extrapolation.

4.5.1 Luminosité CIE-Lab et luminosité dans LEF

L'espace LEF n'est pas un espace colorimétrique, et les attributs perceptuels qu'on peut y définir ne constituent que des approximations. La figure 4.14 permet de le vérifier en montrant deux sections équi-tonales orthogonales de LEF. Des lignes de luminosité CIE-Lab constante y sont superposées, et l'on constate que leur distribution n'est pas uniforme, et que leur orientation ne correspond pas à celle des lignes de luminosité LEF.

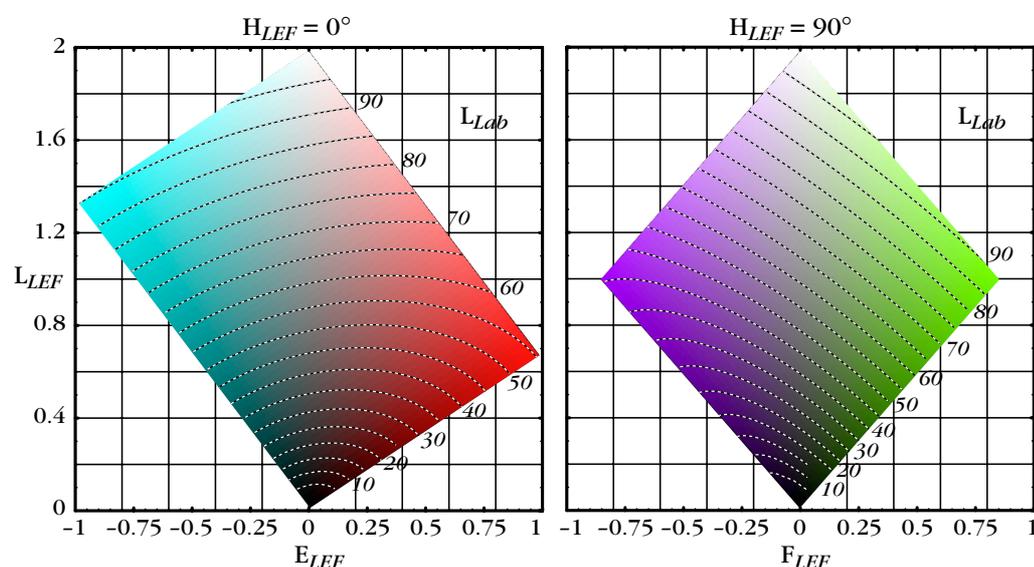


Fig.4.14 Sections équi-tonales de LEF avec lignes d'équi-luminosité CIE-Lab (planche 19, p. 104)

L'absence de correspondance entre la luminosité CIE-Lab et la luminosité LEF semble vouer à l'échec toute tentative d'imposer une contrainte sur la luminosité CIE-Lab d'écarts chromatiques extrapolés dans LEF. Cependant, une représentation différente du problème permet de constater que la correction à apporter à un écart chromatique afin de lui imposer un ΔL_{Lab} donné est de faible amplitude. C'est ce que montre la figure 4.15 : pour une droite radiale située au milieu d'une section équi-tonale de LEF, on a tracé le lieu des points situés

à distance fixe de la radiale en termes de ΔL_{Lab} . On constate que la courbure de ces lignes est peu prononcée, et qu'elle l'est d'autant moins que la distance ΔL_{Lab} est petite.

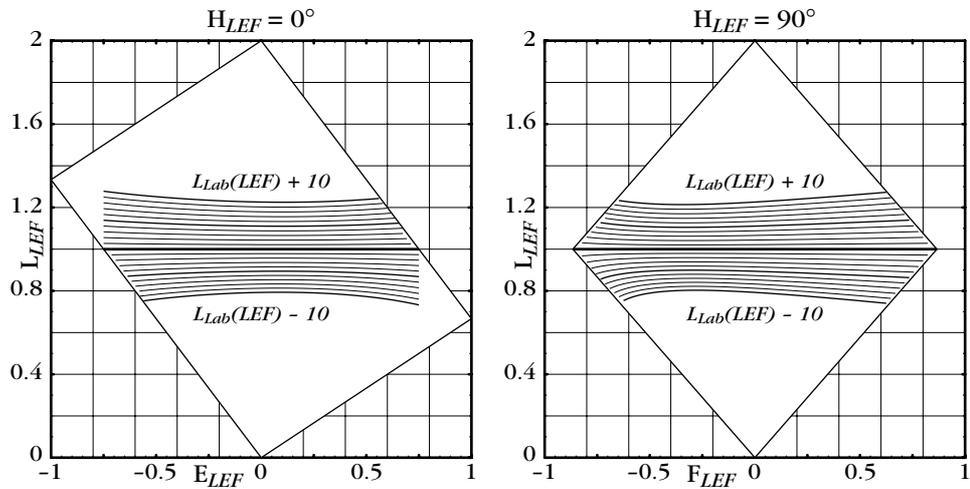


Fig.4.15 Lignes de ΔL_{Lab} constant autour d'une radiale LEF de L donné

La méthode utilisée pour imposer un écart de luminosité ΔL_{Lab} déterminé à un écart chromatique est basée sur la recherche dichotomique d'une correction de la luminosité LEF des deux extrémités. Cette correction intervient après que l'écart chromatique ait été recentré pour s'adapter au taux de couverture local de la microstructure. Le recentrage doit être préservé, et par conséquent les deux extrémités ne sont pas modifiées de manière symétrique. On commence par comparer le ΔL_{Lab} effectif entre les deux extrémités de l'écart avec le ΔL_{Lab} recherché. La composante L_{LEF} de chaque extrémité est alors modifiée en fonction de la différence entre le ΔL_{Lab} cible et le ΔL_{Lab} effectif. La modification pour chaque extrémité est proportionnelle à la distance entre cette extrémité et le centre de l'écart chromatique. Si l'une ou l'autre des extrémités ainsi modifiées sort du volume des couleurs, l'écart chromatique est tronqué. On compare alors le ΔL_{Lab} du nouvel écart avec le ΔL_{Lab} cible; si les deux ΔL_{Lab} sont suffisamment proches, on considère qu'on a trouvé la correction désirée. Si le ΔL_{Lab} cible et le ΔL_{Lab} effectif sont trop éloignés, on réitère le processus en adaptant la modification L_{LEF} à la correction ΔL_{Lab} effective.

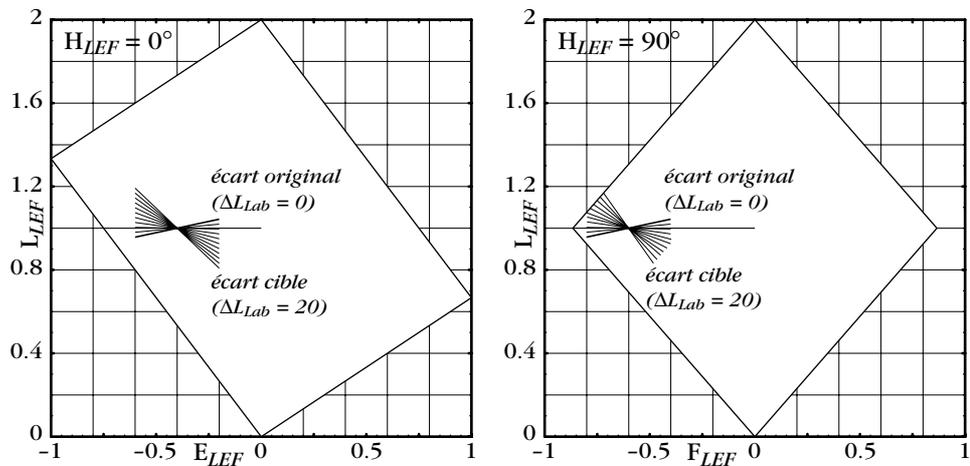
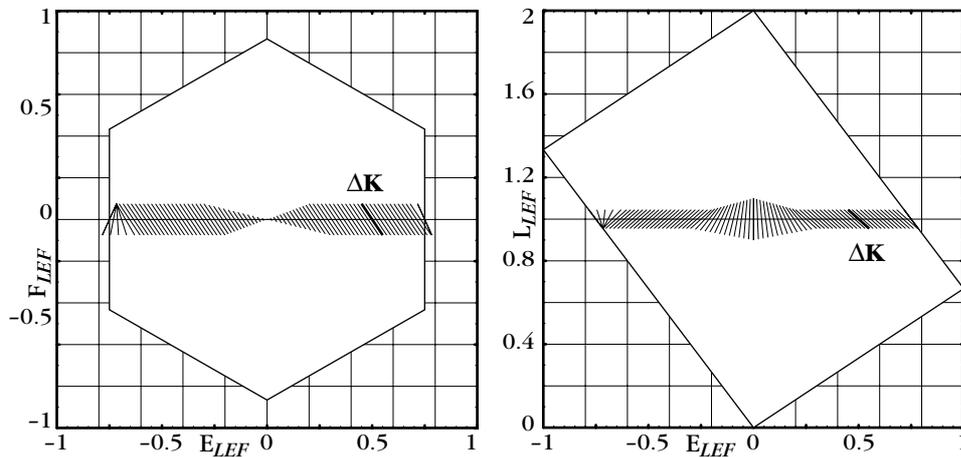
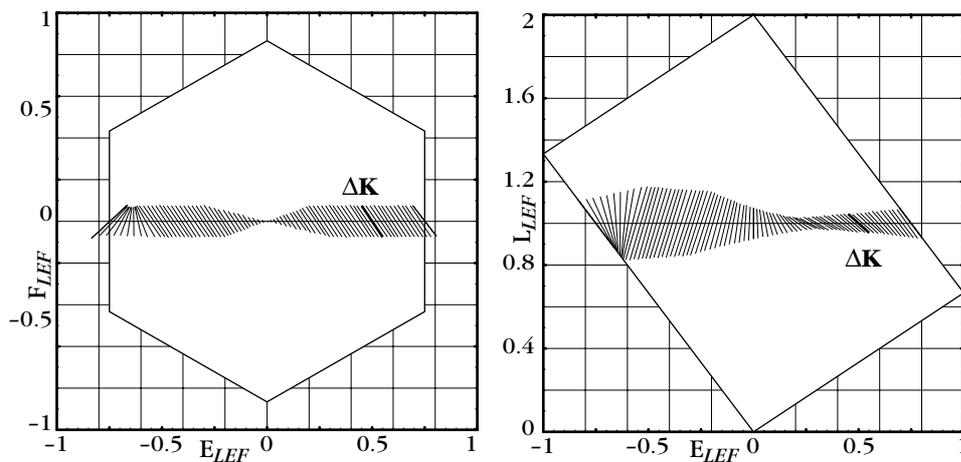


Fig.4.16 Etapes de l'algorithme d'égalisation du ΔL_{Lab} dans le cas général et à proximité des limites du volume des couleurs

L'effet de la correction du ΔL_{Lab} sur la géométrie d'un écart chromatique est illustré dans la figure 4.17. La partie supérieure de la figure 4.17 montre l'extrapolation radiale classique d'un écart chromatique de référence ΔK projetée sur deux sections orthogonales de LEF. Dans la partie inférieure de la figure, le ΔL_{Lab} de tous les écarts extrapolés est maintenu à la valeur constante de 6.9, qui est celle du ΔL_{Lab} de la référence ΔK . On peut vérifier en comparant l'extrapolation à ΔL_{Lab} constant (figure 4.17 a) avec l'extrapolation classique (figure 4.17 b) que la saturation et la tonalité LEF des écarts extrapolés sont préservées.



(a) Sans maintien de l'écart en luminosité ΔL_{Lab} constant



(b) Avec maintien de l'écart en luminosité ΔL_{Lab} constant

Fig.4.17 (a) extrapolation radiale d'un écart chromatique sans contrôle de l'écart en luminosité ΔL_{Lab} ; (b) extrapolation radiale obtenue en maintenant constant l'écart en luminosité ΔL_{Lab}

Sans être aussi précises que les écarts de P3dS20, les écarts chromatiques à ΔL_{Lab} constant améliorent visiblement l'uniformité perceptuelle de la microstructure incrustée. On peut en juger en comparant les planches 20, p. 104 et 21, p. 105. Le même écart de référence présentant un ΔL_{Lab} original de 4 a été utilisé dans les deux cas. Dans la première figure, le ΔL_{Lab} des écarts extrapolés n'est pas contraint, et le contraste obtenu varie fortement avec les couleurs reproduites. Dans la deuxième figure, le ΔL_{Lab} est maintenu à sa valeur de référence de 4, ce qui réduit considérablement les variations du contraste. Une comparaison avec les écarts de P3dS20 utilisés sur la même image originale dans la planche 17, p. 103 montre que l'amplitude des variations perceptuelles du contraste sont du même ordre de grandeur.

5.1 Logiciel d'incrustation de microstructures

Les principes développés dans les chapitres précédents ont servi à l'élaboration d'un logiciel interactif permettant d'incruster une microstructure dans une image RGB au moyen d'écartis chromatiques définis avec l'application présentée au chapitre 1 (voir section 1.6.1, p. 22).

5.1.1 Fonctionnalités et performances

L'interface-utilisateur de cette application a été développée sous MacOS 9, mais ses fonctionnalités sont écrites en C ANSI de façon à pouvoir fonctionner sur n'importe quelle plate-forme. Les images traitées en lecture et en écriture sont au format TIFF, qui offre une bonne compatibilité et une grande souplesse d'utilisation.

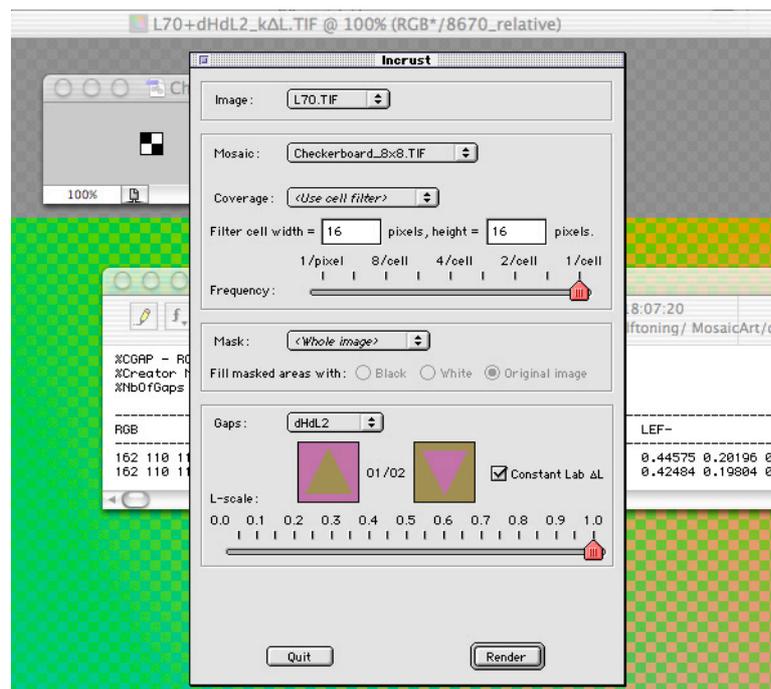


Fig.5.1 Logiciel interactif d'incrustation de microstructure (planche 22, p. 105)

Les écarts chromatiques sont de fichiers de texte ASCII créés par l'application permettant la spécification interactive d'écarts chromatiques (section 1.6.1, p. 22). L'écart chromatique de référence est visible à tout moment, ce qui permet d'avoir une idée préalable du résultat. Le maintien du ΔL_{Lab} à une valeur constante est au choix de l'utilisateur; cette valeur peut être celle de l'écart de référence, mais il est également possible de choisir une fraction de ce ΔL_{Lab} de référence. Enfin, l'utilisateur a la possibilité d'utiliser les écarts perceptuels de l'ensemble P3dS20 décrit au chapitre 4.

Les taux de couverture locaux de la microstructure peuvent être calculés automatiquement selon la méthode exposée au chapitre 3. Le résultat de ce calcul peut être sauvegardé sous la forme d'un fichier TIFF à niveau de gris pour vérifications ultérieures. Il est également possible d'utiliser des taux de couverture locaux pré-calculés ou déterminés a priori. Enfin, une troisième option permet de calculer un taux de couverture unique pour les microstructures qui présentent peu de variations locales.

Par défaut, le logiciel traite l'ensemble de l'image d'entrée, mais il est possible d'associer un masque à cette image sous la forme d'un fichier TIFF à niveaux de gris. Ce masque joue le rôle d'un canal alpha lors du traitement de l'image : les zones de l'image correspondant à une valeur de 1 dans le masque sont copiées telles quelles dans l'image finale après leur traitement. Celles qui correspondent à une valeur comprise entre 0 et 1 sont fusionnées avec une couleur prédéfinie après leur traitement, en proportion de la valeur associée dans le masque. La couleur de fusion peut être prise dans l'image originale. Cette option permet d'obtenir des images où la microstructure vient s'incruster de manière graduelle à certains endroits seulement, au lieu de figurer partout avec la même intensité.

Sans avoir fait l'objet d'une optimisation poussée, le logiciel offre néanmoins des performances compatibles avec une utilisation intensive. Le temps de traitement d'une image de 1600x1600 pixels est d'environ une minute sur un ordinateur moderne (IBM PowerPC 1 GHz).

5.2 PhotoProtect

L'incrustation de microstructures trouve des applications dans la protection contre la contrefaçon de documents imprimés [Rudaz02]. Elle a notamment été incorporée dans la réalisation du nouveau permis de conduire suisse. Cette application a été développée en collaboration avec le maître d'oeuvre du projet, Orell Füssli Security Documents AG.

5.2.1 Description

Suivant une tendance de plus en plus répandue, le nouveau permis de conduire suisse est un document au format carte de crédit. Les informations communes à l'ensemble des permis de conduire font l'objet d'une pré-impression en offset et en sérigraphie. La personnalisation et la finition du permis est décentralisée et s'effectue au Service des Automobiles du canton délivrant le document. Cette personnalisation comprend l'impression d'informations propres au titulaire du permis, ainsi que d'une photographie d'une taille de 2.5 x 3.15 cm, relativement importante pour ce genre de document. La photographie peut être prise sur le lieu d'impression, où se trouve un matériel de prise de vue normalisé. Le titulaire du permis a également la possibilité d'apporter une photographie qui est alors numérisée sur place. Ces informations personnelles sont inscrites au moyen d'une imprimante à sublimation thermique, offrant des tons continus de cyan, magenta, jaune et noir, à une résolution de 300 dpi.

Avoir simultanément accès à la photographie du titulaire, à ses informations personnelles et aux informations spécifiques au document lui-même permet de concevoir une protection basée sur l'incrustation d'une microstructure personnalisée dans la photographie. Cette microstructure est définie de manière à être unique et différente pour chaque document. Elle est peu intrusive et n'altère pas la photographie du titulaire à une distance de vision normale. Elle est cependant conçue pour être clairement lisible de près, ce qui permet une comparaison immédiate avec les données textuelles figurant sur le permis et offre une protection contre le maquillage par substitution d'informations sur un document authentique.

Notre proposition originale comprenait l'incrustation d'une microstructure déformée par une transformation géométrique continue sur l'ensemble du permis de conduire au moyen d'un fond discrètement coloré. La présence continue de la microstructure empêche la substitution d'informations, et la transformation géométrique augmente la difficulté d'une imitation du document par un amateur.



Fig.5.2 Projet initial pour le nouveau permis : transformation géométrique et incrustation continue (planche 23, p. 106)

Pour le projet final, la maison Orell-Füssli a préféré restreindre l'incrustation de microstructure à la photographie du titulaire.



Fig.5.3 Spécimen partiel de la version définitive du nouveau permis (planche 24, p. 106)

5.2.2 Problèmes logiciels et solutions

Le logiciel fourni devant s'insérer dans une application automatisant le processus d'impression, nous l'avons réalisé sous la forme d'une librairie dynamique (DLL) ré-entrante et thread-safe, en respectant des contraintes strictes quant à l'utilisation de la mémoire et aux entrées-sorties. La DLL ne peut accéder au disque dur ni en lecture, ni en écriture, et ne peut pas allouer dynamiquement la mémoire qu'elle utilise.

Un jeu de caractères alphanumériques de type OCR-B adaptés à la taille de la photographie et à la quantité d'informations à incruster a été développé sous la forme d'images bitmap, directement codées dans le logiciel. La génération d'une microstructure répétitive à la volée à partir d'une chaîne de caractères fournie en entrée fait partie des fonctionnalités du logiciel. Les taux de couverture individuels de chaque micro-caractère ont été précalculés et incorporés dans la DLL, garantissant ainsi un calcul optimal du taux de couverture pour toutes les microstructures utilisables.

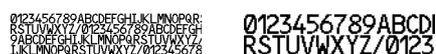


Fig. 5.4 Caractères utilisés pour l'incrutation d'informations. A gauche, jeu complet à sa taille réelle; à droite, jeu partiel agrandi deux fois

Les écarts chromatiques utilisés pour incruster ces caractères sont soumis à plusieurs contraintes :

1. Ils doivent être définis une fois pour toutes et ne peuvent être adaptés à chaque photographie.
2. Dans les tons chair, la microstructure doit être tout juste visible, et ne doit en aucun cas altérer le teint du sujet photographié. Le résultat doit être uniforme quel que soit le type de carnation.
3. Dans les tons bleu-gris utilisés comme fond lors de la prise de vue, la microstructure doit être clairement lisible.
4. Les écarts de tonalité sont privilégiés par rapport aux écarts de saturation, ces derniers étant préférés aux écarts en luminosité.
5. Le procédé doit pouvoir être utilisable même sur des photographies monochromes.

De nombreuses recherches ont été nécessaires à l'élaboration d'un écart chromatique de référence satisfaisant à toutes ces conditions. Afin de privilégier les écarts en tonalité et en saturation (contrainte 4), l'algorithme servant à extrapoler les écarts chromatiques a été modifié et génère des écarts chromatiques parallèles à l'axe bleu-jaune au voisinage de l'axe achromatique.



Fig.5.5 Exemples de photos d'identité avec microstructure incrustée (planche 25, p. 106)

Finalement, l'utilisation du logiciel dans un contexte de production impose de se pencher sur ses performances. Etant donnée la taille relativement restreinte des images à traiter, ce point ne pose pas de problème particulier : sur un PC actuellement disponible dans le commerce, le temps de traitement est de l'ordre de une à deux secondes par photographie.

5.2.3 Problèmes matériels et solutions

Pour que la photographie incorpore une microstructure tout juste visible et uniforme (contrainte 2), il est indispensable de pouvoir contrôler avec précision le contraste affiché par les écarts chromatiques extrapolés. Pour cette raison, le ΔL_{Lab} de ces écarts est maintenu à une valeur constante, et il est nécessaires de préserver cette valeur lors de l'impression sur n'importe laquelle des imprimantes utilisées dans le dispositif de production.¹ Les tolérances sur la courbe de reproduction sont étroites : la planche 26, p. 106 montre qu'une déviation de -5% de la courbe de reproduction effective par rapport à la courbe de reproduction désirée produit un texte incrusté beaucoup trop apparent dans les tons chair. Une déviation de +5% a un effet moins dramatique, mais l'image globale prend un aspect délavé faisant penser que la photographie est surexposée.

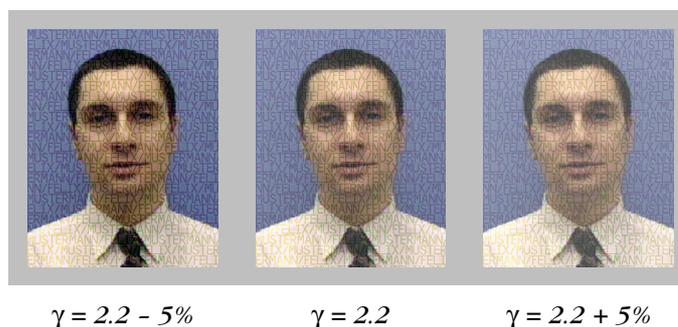


Fig.5.6 Simulation de l'effet d'une déviation de $\pm 5\%$ de la courbe de reproduction de l'imprimante sur le contraste de la microstructure (planche 26, p. 106)

1. Les imprimantes utilisées sont assemblées par InterCard A.G., de marque DataCard et de modèle ImageCard IV

Pour éviter une telle perte de qualité à l'impression, nous avons développé et testé une procédure simple de caractérisation de ces imprimantes. Nous avons premièrement défini un protocole de mesure de la courbe de reproduction des imprimantes [Poynton96] au moyen d'un simple densitomètre, ainsi que des marges de tolérance pour ces mesures (figure 5.7 a). Les densités D sont mesurées pour 15 niveaux de gris uniformément répartis entre le blanc et le noir. Elles sont transformées en coordonnées CIE-L par la formule :

$$L = 116 \cdot 10^{-\frac{D}{3}} - 16 \quad (5.1)$$

Ces coordonnées CIE-L sont ensuite transformées en coordonnées CIE-Y selon les formules de l'annexe A. Après avoir testé ce protocole sur plusieurs modèles chez l'assembleur, nous avons constaté qu'il était impossible d'amener la courbe de reproduction des imprimantes à la valeur désirée uniquement par des réglages matériels. Toutefois, nous avons observé que toutes les imprimantes pouvaient être réglées pour fournir une courbe de reproduction spécifique (figure 5.7 b) : leur courbe de reproduction est ajustée par envoi de valeurs de consigne par l'intermédiaire d'un câble série.

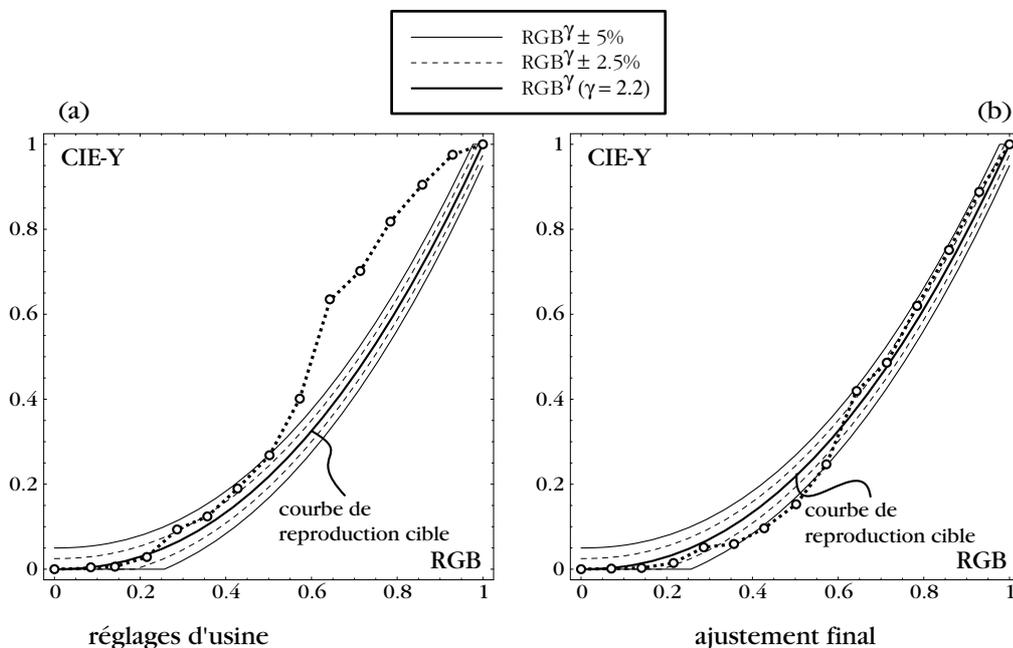


Fig.5.7 Courbe de reproduction type d'une imprimante non-corrigée (a) et après correction par réglages matériels (b)

Afin d'amener la courbe de reproduction des imprimantes à la valeur désirée (figure 5.7, courbe $\gamma = 2.2$), nous avons incorporé à la DLL une correction adaptée à la courbe de reproduction spécifique ajustée (figure 5.7 b) [Fairchild94]. Cette correction logicielle prend la forme d'une table de correspondance entre les valeurs RGB de l'image en entrée et les valeurs RGB à fournir en sortie à l'imprimante pour obtenir une courbe de reproduction présentant un gamma de 2.2 (figure 5.8). Lors d'une première étape, la courbe de reproduction ajustée de l'imprimante est modélisée au moyen d'un fit polynomial des points de mesure (figure 5.8 a). Ce fit polynomial permet d'obtenir les valeurs RGB à fournir en entrée pour les valeurs RGB en sortie selon la courbe de reproduction cible. La

deuxième étape consiste à apparier ces valeurs et à construire la table de correspondance $[RGB_{in}, RGB_{out}]$.

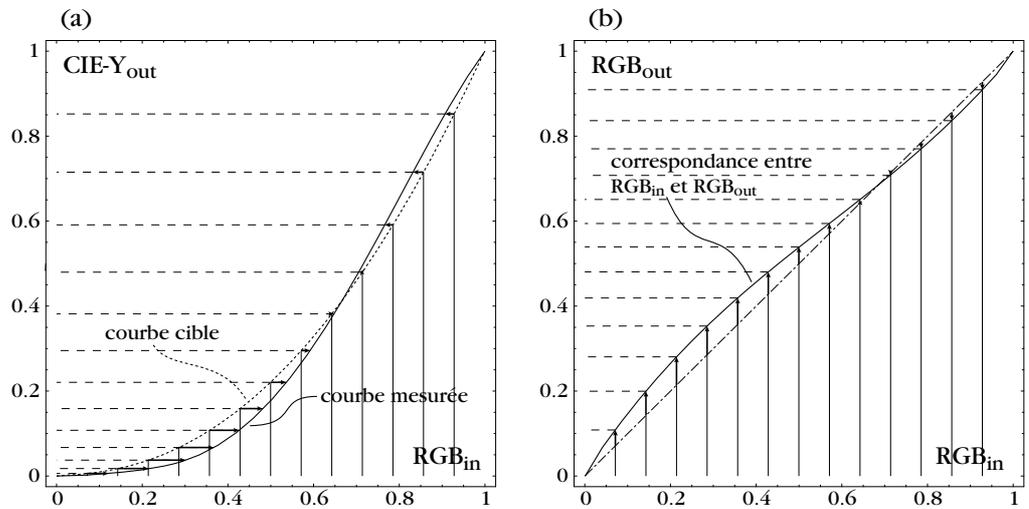


Fig.5.8 (a) différences entre la courbe de reproduction mesurée et la courbe de reproduction cible; (b) courbe de correspondance entrée/sortie

5.2.4 Brevet

Le procédé sur lequel est basé le logiciel PhotoProtect a fait l'objet d'une demande de brevet européen [Rudaz01] détenu conjointement par l'EPFL et par Orell-Füssli AG.

Conclusion

L'ajout d'une microstructure porteuse de sens à une image en couleurs offre de nombreux défis à relever. Notre objectif est de produire des images contenant un niveau de lecture supplémentaire visible de près et présentant l'aspect d'une image ordinaire de loin. Cet objectif est réalisé au moyen d'écarts chromatiques complémentaires appliqués à l'image originale en fonction de la microstructure. Ce choix technique nous conduit à formuler trois contraintes fondamentales : la continuité de l'image doit être préservée à distance de vision normale, la microstructure doit apparaître de manière uniforme à distance de vision rapprochée, et les écarts chromatiques doivent s'adapter de façon cohérente aux couleurs de l'image.

Nous définissons un système chromatique additif, l'espace LEF, permettant la spécification d'écarts chromatiques en utilisant les concepts intuitifs de luminosité, de saturation et de tonalité. Une application graphique offre une interface-utilisateur commode pour naviguer dans cet espace couleur et sélectionner ou ajuster un écart chromatique. Nous proposons ensuite un mécanisme permettant d'étendre un écart chromatique de référence à tout l'espace couleur. Ce mécanisme adapte les écarts chromatiques de façon cohérente aux frontières du volume des couleurs et au voisinage de l'axe achromatique. Ces adaptations se font sans perte de cohérence : les écarts chromatiques obtenus le long d'une courbe continue dans l'espace LEF varient de façon continue.

Nous donnons une solution au problème consistant à conserver l'additivité d'un écart chromatique lorsqu'il est appliqué à une microstructure présentant un déséquilibre entre la chair et le fond. Un algorithme non-supervisé basé sur un échantillonnage 1D de la microstructure permet de calculer avec une précision satisfaisante les taux de couverture locaux de motifs comportant des éléments de taille, de forme et de répartition variables.

Deux expériences psycho-visuelles précisent la manière dont est perçu le contraste d'un motif simple à certaines fréquences spatiales couramment présentes dans les microstructures incrustées. Elles permettent la construction d'une grille d'écarts chromatiques uniformes couvrant tout le volume des couleurs pour une fréquence spatiale de 20 cycles par degré. Cet ensemble d'écarts symétriques en saturation est cohérent et additif pour des microstructures équilibrées. Une méthode itérative par approximations successives permet d'appliquer ces écarts symétriques à des microstructures ayant un taux de couverture variable. Ayant montré que le contraste perçu dépend en priorité de la différence de luminosité de l'écart chromatique, nous proposons une méthode conservant un ΔL CIE-Lab

constant sur l'ensemble du volume des couleurs. Cette méthode permet de préserver l'uniformité de la microstructure quel que soit l'écart chromatique utilisé.

Une application pourvue d'une interface-utilisateur met en œuvre les solutions développées lors de cette recherche et offre un moyen simple et commode de produire des images à microstructure incrustée. Les microstructures incrustées peuvent servir un but décoratif : par exemple, en rajoutant une couche de sens à une affiche qui pourra être lue de plusieurs façons selon la distance à laquelle on la regarde. Elles peuvent également protéger une image en lui apposant une marque indélébile qui servira à identifier son auteur. Un sous-ensemble des fonctionnalités de ce logiciel est incorporé sous la forme d'une DLL à l'application assurant l'impression du nouveau permis de conduire suisse. Cette DLL génère automatiquement une microstructure à partir d'une chaîne de caractères et l'incruste dans la photographie du titulaire du permis.

Le délai imparti pour ce travail nous a conduit à privilégier certains axes de développement. Nous terminons cet exposé par un rapide survol des améliorations, des extensions et des applications que nous envisageons pour l'incrustation de microstructure par écarts chromatiques :

1. *Extrapolation d'écarts chromatiques basée sur un schéma autre que le modèle luminosité-saturation-tonalité* : un schéma privilégiant les écarts équivalents selon l'axe bleu-jaune, pour lequel la sensibilité de l'œil est minimale, permettrait de maximiser la taille des écarts chromatiques en minimisant la visibilité de la microstructure.
2. *Écarts chromatiques en fonction de la position dans l'image* : une fonction continue de la forme $\Delta C = f(x, y, \Delta K)$ permettrait de faire varier la couleur de la microstructure sur une plage de couleur uniforme. En rajoutant un paramètre temporel à f , il devient envisageable d'incruster une microstructure dans une animation.
3. *Contraintes supplémentaires sur les écarts chromatiques* : la méthode de préservation du ΔL CIE-Lab peut être appliquée à d'autres paramètres, tels que la tonalité ou la saturation définies dans les systèmes OSA ou CIE-Lch. Appliqués aux patterns habituellement utilisés dans les expériences psycho-perceptuelles, ces écarts additifs permettraient de mesurer l'homogénéité et l'uniformité de ces systèmes colorimétriques pour des écarts chromatiques supra-liminaires.
4. *Segmentation de la microstructure par morphologie mathématique* : l'erreur entachant le calcul des taux de couverture par échantillonnage 1D provient principalement de l'imprécision dans la détection des frontières des micro-éléments. Les méthodes utilisées en granulométrie, comme la segmentation selon la ligne de partage des eaux, peuvent séparer les micro-éléments avec davantage de précision.
5. *Filigrane numérique visible* : les techniques actuelles reposent sur l'introduction d'écarts avec une importante composante en luminance dans les images à protéger, et font varier la taille de ces écarts en fonction de la texture des images [Braudaway96, Fleet97, Rao98, Meng98]. Comme l'œil est particulièrement sensible aux variations de luminance, ces écarts sont souvent peu importants. Les remplacer par des écarts uniformes en saturation développés dans cette recherche permettrait d'augmenter significativement leur taille, et de produire des filigranes numériques potentiellement plus robustes.

En conclusion, cette recherche a élargi le champ des écarts chromatiques utilisables pour incruster une microstructure dans une image couleur. Ces écarts ne sont pas limités à la luminosité, mais peuvent au contraire s'étendre à la chrominance et à la tonalité. Leur visibilité et leurs caractéristiques perceptuelles sont librement ajustables. Lors de leur application à une image couleur, ils sont automatiquement adaptés à la chromaticité de l'image et aux caractéristiques spatiales de la microstructure. Cette adaptation permet de préserver l'aspect global de l'image tout en produisant une microstructure perceptuellement uni-

forme. Le domaine d'application des microstructures incrustées par écarts chromatiques comprend les arts graphiques, la protection de contenus digitaux et l'impression de sécurité.

Bibliographie

- Attridge99 Attridge, G. G., Pointer, M. R., Some aspects of the visual scaling of large color differences, *Color Research and Application* **25-2**, 116-122, 1999.
- Badouel90 Badouel, Didier, An efficient ray-polygon intersection, in Glassner, Andrew S. (Ed.), *Graphic Gems*, Academic Press, 1990.
- Barten92 Barten, Peter G. J., Physical model for the contrast sensitivity of the human eye, *SPIE Vol. 1666 Human Vision, Visual Processing and Digital Display III*, 1992.
- Berns91 Berns, Roy S., Alman, David H., Reniff, Lisa, Snyder, Gregory D., Balonon-Rosen, Mitchell R., Visual Determination of Suprathreshold Color-Difference Tolerances Using Probit Analysis, *Color Research and Application* **16**, 297-315, 1991.
- Braudaway96 Braudaway, Gordon, Magerlein, K., Mintzer, Frederick, "Protecting publicly available images with a visible image watermark", In *Proc. SPIE: Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques*, SPIE **2659**, 126-133, 1996.
- Bresenham65 Bresenham, Jack, Algorithm for computer control of a digital plotter, *IBM Systems Journal* **4-1**, 25-30, 1965.
- Campbell68 Campbell, F.W., Robson, J. G., Application of Fourier analysis to the visibility of gratings, *Journal of Physiology* **197**, 551-566, London, 1968.
- Chen96 Chen, T. L., Yu, C. Y., The Relationship between Visual Acuity and Color Contrast in the OSA Uniform Color Space, *Color Research and Applications* **21-1**, 18-25, 1996.
- Chevreul Chevreul, Michel-Eugène, De la loi du contraste simultané des couleurs, 1829.
- Colenbrander88 Colenbrander, A., Consilium Ophthalmologicum Universale, Visual Functions Committee, Visual acuity measurement standard, *Ital J Ophthalmol* **2**, 5-19, 1988.
- Danielsson80 Danielsson, Per-Erik, Euclidean distance mapping, *Computer Graphics and Image Processing* **14**, 227-248, 1980.
<<http://www.cl.cam.ac.uk/~mg290/VoronoImage/Technology.html>>
- Ellis99 Ellis, Willis D., Koffka, Kurt, A source book of Gestalt psychology, Routledge, 1999.
<http://www.rci.rutgers.edu/~cfs/305_html/Gestalt/wertheimer2.html>
- Engeldrum00 Engeldrum, Peter G., Psychometric scaling: a toolkit for imaging systems development, Imcotek Press, 2000.
- Fairchild94 Fairchild, Mark D., A Simple Printer Calibration Technique for "Good Enough" Color Reproduction of CRT Images, Munsell Color Science Laboratory Technical Report, 1994.
<<http://www.cis.rit.edu/people/faculty/fairchild/PDFs/GEP.pdf>>

- Fairchild98 Fairchild, Mark D., Color Appearance Models, Addison-Wesley, 1998.
- Finney77 Finney, D.J., Probit Analysis, Cambridge University Press, 1977.
- Fleet97 Fleet, David J., Heeger, David J., Embedding invisible information in color images, Proc. IEEE ICIP **1**, 532-535, 1997.
- Foley93 Foley, D. D., vanDam, A., Feiner, S.K., Hughes, J.F., Computer Graphics: Principle and Practice, Addison Wesley, 1993.
- Forsyth02 Forsyth, David A., Ponce Jean, Computer vision : a modern approach, Prentice Hall, 2002.
<<http://www.cs.berkeley.edu/~daf/bookpages/toc-parts-detail-ptr.html>>
- Guillemard98 Guillemard, Colette, Le dico des mots de la couleur, éditions du Seuil, avril 1998.
- Hunt92 Hunt, R. W. G., Measuring Colour, 2nd Edition, Ellis Horwood, 1992.
- Indow94 Indow, T., Metrics in color spaces: Im kleinen und im grössen, in G.H. Fisher and D. Leming (Eds.), Contributions to Mathematical Psychology, Psychometrics, and Methodology, 3-17, New York, 1994.
- Izmailov95 Izmailov, Chinghis, Spherical model of discrimination of self-luminous and surface colors, in R. D. Luce, M. D. D'Zmura, D. Hoffman, G. J. Iverson and A. K. Romney (Eds.), 153-168, Lawrence Erlbaum Associates, 1995.
- Krauskopf82 Krauskopf, J., Williams, D. R., and Heeley, D. W., The cardinal directions of color space, Vision Research **22**, 1123-1131, 1982.
- Lowe85 Lowe, D. G., Perceptual organization and visual recognition, Kluwer Academic Publishers, 1985.
- MacAdam42 MacAdam, D. L., Visual sensitivities to color differences in daylight, J. Opt. Soc. Am. **32**, 247, 1942.
- Malik01 Malik, J., Belongie, S., Leung, T., Shi, J., Contour and texture analysis for image segmentation, International Journal of Computer Vision **43**, 7-27, 2001.
<<http://www.cs.berkeley.edu:80/Research/Projects/vision/shape/>>
- McCourt85 McCourt, M.E, Foley J.M., Spatial frequency interference on grating-induction. Vision Research **25**, 1507-1518, 1985.
- McCourt93 McCourt, Marc E., Spatial frequency tuning, contrast tuning, and spatial summation of suprathreshold lateral spatial interactions: Grating induction and contrast-contrast. OSA Annual Meeting Technical Digest **16**, 155, 1993.
- McCourt97 McCourt, Marc E., Spatial Frequency Analysis, 1997
<<http://www.psychology.psych.ndsu.nodak.edu/mccourt/website/htdocs/HomePage/Psy460/Spatial%20frequency%20analysis/Spatial%20frequency%20analysis.html>>
- Melgosa97 Melgosa, M., Hita, E., Poza, A. J., Alman, David H., Berns, Roy S., Suprathreshold Color-Difference Ellipsoids for Surface Colors, Color Research and Application **22**, 148-155, June 1997.
- Meng98 Meng, Jianhao, Chang, Shih-Fu, Embedding visible video watermarks in the compressed domain, IEEE 1998 International Conference on Image Processing **1-4-7**, 474-477, 1998.
- Möller97 Möller, Tomas, Trumbore, Ben, Fast, minimum storage ray-triangle intersection, Journal of graphics tools **2-1**, 21-28, 1997.

-
- Niblack85 Niblack, W., An Introduction to Image Processing, Prentice-Hall, 1985.
- Okabe92 Okabe, Atsuyuki., Boots, Barry, Sugihara, Kokichi, Spatial tessellations: concepts and applications of Voronoi diagrams, John Wiley, 1992.
<<http://www.lems.brown.edu/vision/people/leymarie/Refs/CompGeom/Okabe2000/OkabeBookToC00.html>>
- Olds99 Olds, Elizabeth S., Cowan, William B., Jolicœur, Pierre, Effective color CRT calibration techniques for perception research, J. Opt. Soc. Am. A **16-6**, 1501-1505, 1999.
- OSA77 OSA Committee on Uniform Color Scales, Applied Optics **16-9**, 1977.
- Peli97 Peli, Eli, In search of a contrast metric: matching the perceived contrast of Gabor patches at different phases and bandwidths, Vision Research **37-23**, 3217-3224, 1997.
- Poirson93 Poirson, Allen B., Wandell, Brian A., The appearance of colored patterns: pattern-color separability, J. Opt. Soc. Am. **10-12**, 2458-2470, 1993.
- Post00 Post, David L., Calhoun, Christopher S., Further evaluation of methods for producing desired colors on CRT monitors, Color Research and Application **25-2**, 90-104, 2000.
- Poynton96 Poynton, Charles, A Technical Introduction to Digital Video. New York: Wiley, 1996. Le chapitre 6, "Gamma", est disponible en ligne :
<<http://www.poynton.com/GammaFAQ.html>>
- Rao98 Rao, A. Ravishankar, Braudaway, Gordon W., Mintzer, Frederick C., Automatic visible watermarking of images, SPIE Conf. on Optical Security, SPIE **3314**, 110-121, 1998.
- Roque97 Roque, Georges, Art et science de la couleur. Chevreul et les peintres de Delacroix à l'abstraction, Nîmes, 1997.
- Rovamo99 Rovamo, Jyrki M., Kankaanpää, Mia I., Kukkonen, Heljä, Modelling spatial contrast sensitivity functions for chromatic and luminance-modulated gratings, Vision Research **39**, 2387-2398, 1999.
- Rudaz97 Rudaz, Nicolas, Hersch, Roger D., Ostromoukhov, Victor, Specifying color differences in a linear color space (LEF), Proceedings of the IS&T/SID 97 Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications, 197-202, 1997.
- Rudaz01 Rudaz, Nicolas, Hersch, Roger D., Method for generating a security document, Demande de brevet européen EP1073257, EPFL et Orell-Füssli Security Printing, 31.1.2001.
- Rudaz02 Rudaz, Nicolas, Hersch, Roger D., Protecting identity documents with a just noticeable microstructure, Conf. Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques IV, SPIE **4677**, 101-109, 2002.
- Schiffman90 Schiffman, Harvey R., Sensation and perception : an integrated approach 3rd ed., Wiley, 1990.
- Switkes99 Switkes, Eugene, Crognale, Michael A., Comparison of color and luminance contrast: apples versus oranges ?, Vision Research **39**, 1823-1831, 1999.
- Tiippana99 Tiippana, Kaisa, Näsänen, Risto, Spatial-frequency bandwidth of perceived contrast, Vision Research **39**, 3399-3403, 1999.
- Viénot01a Viénot, Françoise, Chiron, Michel, Michel-Eugène Chevreul and his colour classification system, Color Research and Application **26-8**, 20-24, 2001.

- Viénot01b Viénot, Françoise, Michel-Eugène Chevreul: from laws and principles to the production of colour plates, *Color Research and Application* **27-1**, 4-14, 2001.
- Wuerger95 Wuerger, Sophie M., Maloney, Lawrence T. and Krauskopf, John, Proximity judgments in color space: test of a euclidean color geometry, *Vision Res.* **35-6**, 827-835, 1995.
- Wyszecki82 Wyszecki, Günther, Stiles, W.S., *Color Science*, J. Wiley, 1982.

Formules de transformation entre CIE-Lab et CIE-XYZ

Les formules utilisées pour le passage de l'espace CIE-XYZ vers l'espace CIE-Lab sont directement reprises de [Wyszecki82].

$$L^* = \begin{cases} 116 \cdot \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - 16 & \frac{Y}{Y_n} > 0.008856 \\ 903.3 \cdot \frac{Y}{Y_n} & \frac{Y}{Y_n} \leq 0.008856 \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

$$a^* = 500 \cdot \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] \quad (\text{A.2})$$

$$b^* = 200 \cdot \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right] \quad (\text{A.3})$$

$$f(\alpha) = \begin{cases} \alpha^{\frac{1}{3}} & \alpha > 0.008856 \\ 7.787 \cdot \alpha + \frac{16}{116} & \alpha \leq 0.008856 \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

Cet ouvrage ne fait pas mention de la transformation inverse permettant de passer de CIE-Lab vers CIE-XYZ. Nous la détaillons ci-dessous.

$$Y = \begin{cases} \left(\frac{L^* + 16}{116}\right)^3 \cdot Y_n & L^* > 7.99959 \\ \frac{L^*}{903.3} \cdot Y_n & L^* \leq 7.99959 \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

$$f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \begin{cases} \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} & L^* > 7.99959 \\ 7.787 \cdot \frac{Y}{Y_n} + \frac{16}{116} & L^* \leq 7.99959 \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

$$f\left(\frac{X}{X_n}\right) = \frac{a^*}{500} + f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \quad (\text{A.7})$$

$$f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - \frac{b^*}{200} \quad (\text{A.8})$$

$$X = \begin{cases} \left(f\left(\frac{X}{X_n}\right)\right)^3 \cdot X_n & f\left(\frac{X}{X_n}\right) > 0.206893 \\ \frac{f\left(\frac{X}{X_n}\right) - \frac{16}{116}}{7.787} \cdot X_n & f\left(\frac{X}{X_n}\right) \leq 0.206893 \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

$$Z = \begin{cases} \left(f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right)^3 \cdot Z_n & f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) > 0.206893 \\ \frac{f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) - \frac{16}{116}}{7.787} \cdot Z_n & f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \leq 0.206893 \end{cases} \quad (\text{A.10})$$

Constructions géométriques pour l'extrapolation d'écart chromatiques au voisinage des frontières du cube RGB

B.1 Extrapolation au voisinage des frontières du cube RGB

Le calcul de la projection radiale et de la limite radiale exposé à la section 2.5 présente la construction de la projection radiale et de la limite radiale dans le cas général. Or, ce cas repose sur deux hypothèses : premièrement, il faut que le centre de la limite achromatique soit situé à l'intérieur du cube RGB, et deuxièmement, il faut que la saturation de la limite radiale soit supérieure à celle de la limite achromatique. Cette annexe expose les détails de la construction de la projection radiale et de la limite radiale lorsque l'une ou l'autre de ces hypothèses n'est pas vérifiée. En outre, les cas particuliers rencontrés lors de la construction de ces références auxiliaires sont traités de façon détaillée.

B.1.1 Ramener les extrémités de la projection radiale à l'intérieur du cube RGB

Cette section expose le détail des calculs effectués lors de la construction de ΔK^1 (section 2.5.1). Les extrémités K^1_- et K^1_+ s'obtiennent en projetant radialement les extrémités K^*_- et K^*_+ de l'écart de référence sur le plan contenant la face du cube RGB à laquelle appartient K^1 . Cette projection est illustrée par les points P_- et P_+ de la figure B.1. Si l'un de ces points se trouve en-dehors du cube RGB, on le ramène à l'intérieur du volume des couleurs par une translation le long du segment P_-P_+ ; l'autre point subit ensuite une translation symétrique.

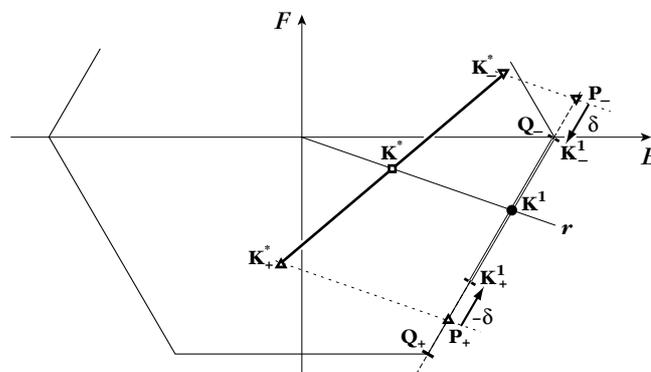


Fig.B.1 Calcul du centre et des extrémités de la projection radiale d'un écart chromatique.

A cette fin, on calcule les points d'intersection Q_- et Q_+ entre la droite passant par P_- et P_+ et les faces du cube RGB.¹ Les points K_-^1 et K_+^1 sont alors obtenus en appliquant aux points P_- et P_+ une homothétie de centre K^1 et de rapport b , décrite par la relation :

$$K_{\pm}^1 = (1 - b) \cdot K^1 + b \cdot P_{\pm} \quad (B.1)$$

Le rapport d'homothétie b doit être suffisamment petit pour que K_-^1 et K_+^1 soient entièrement ramenés dans le cube RGB, mais pas davantage; il est donné par la relation :

$$b = \min \left(\frac{\left\| \overrightarrow{K^1 Q_-} \right\|}{\left\| \overrightarrow{K^1 P_-} \right\|}, \frac{\left\| \overrightarrow{K^1 Q_+} \right\|}{\left\| \overrightarrow{K^1 P_+} \right\|} \right) \quad (B.2)$$

B.1.2 Construction de la projection radiale lorsque le centre de la projection achromatique sort du cube RGB

Si le centre \overline{K}^0 de la limite achromatique $\Delta\overline{K}^0$ se trouve à l'extérieur du cube RGB, alors le centre K^1 de la projection radiale est situé en-deçà de la limite achromatique, et il est nécessaire de diminuer la chromaticité de la projection radiale ΔK^1 (section 2.5.1, p. 36). Par conséquent, ce n'est pas l'écart de référence ΔK^* qui est projeté sur le cube RGB pour obtenir une projection radiale partiellement achromatique, mais un écart chromatique intermédiaire situé entre la projection achromatique et la limite achromatique (figure B.2). Cet écart auxiliaire $\Delta K' = \{K', K'_-, K'_+\}$ est obtenu par une interpolation entre la limite achromatique $\Delta\overline{K}^0$ et la projection achromatique ΔK^0 , de manière à ce son centre K' se trouve sur la surface du cube RGB, à l'intersection de r et de la face courante F_r .

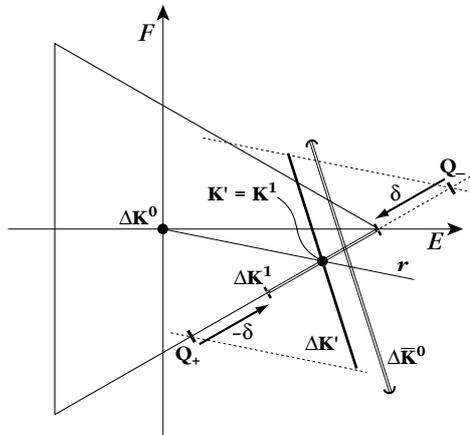


Fig.B.2 Calcul de la projection radiale lorsque le centre de la limite achromatique est en dehors du cube RGB

Le point K' coïncide donc avec le centre K^1 de la projection radiale ΔK^1 , et $\Delta K'$ est calculé par interpolation entre la projection achromatique ΔK^0 et la limite achromatique $\Delta\overline{K}^0$:

$$\Delta K' = \left(1 - \frac{S(K^1)}{S(\overline{K}^0)} \right) \cdot \Delta K^0 + \frac{S(K^1)}{S(\overline{K}^0)} \cdot \Delta\overline{K}^0 \quad (B.3)$$

1. A l'exception de la face courante F_r , qui contient les points P_- et P_+ .

L'écart intermédiaire $\Delta\mathbf{K}'$ est un écart partiellement achromatique dont le centre est situé à la frontière du cube RGB, mais il n'est pas entièrement contenu dans le cube RGB. On ramène $\Delta\mathbf{K}'$ à l'intérieur du cube RGB en projetant ses extrémités sur le plan contenant la face F_r du cube RGB intersectée par la radiale r . Les points Q_- et Q_+ ainsi obtenus sont alors symétriquement translatés le long du vecteur Q_-Q_+ jusqu'à ce qu'ils soient entièrement ramenés à l'intérieur du cube RGB.

B.1.3 Construction de la limite radiale lorsque la référence ne peut pas être ramenée par translation à l'intérieur du cube RGB

Dans le cas général, on construit la limite radiale en translatant la référence $\Delta\mathbf{K}^*$ le long de la demi-droite radiale r supportant \mathbf{K}^* (section 2.5.2). S'il est impossible de trouver une translation ramenant les deux extrémités \mathbf{K}^*_- et \mathbf{K}^*_+ à l'intérieur du volume des couleurs, on construit la limite radiale en centrant $\Delta\mathbf{K}^*$ sur l'axe achromatique et en tronquant l'écart résultant, comme le montre la figure B.3.

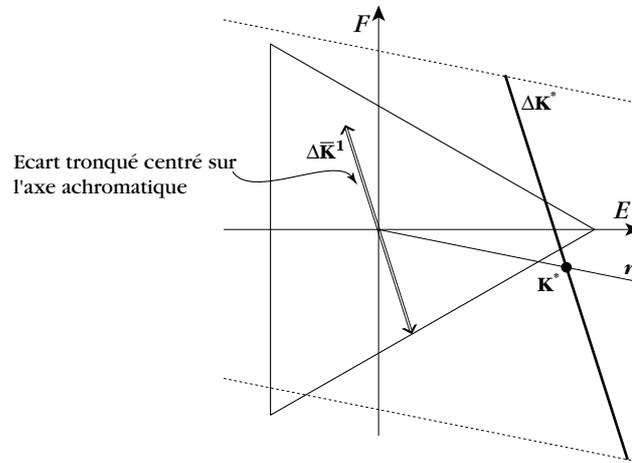


Fig.B.3 Limite radiale lorsque la référence ne peut être confinée au cube RGB par translation radiale

B.1.4 Transformation de la limite achromatique lorsqu'elle est plus saturée que la limite radiale

Le centre $\bar{\mathbf{K}}^0$ de la limite achromatique $\Delta\bar{\mathbf{K}}^0$ doit toujours être moins saturé que le centre $\bar{\mathbf{K}}^1$ de la limite radiale $\Delta\bar{\mathbf{K}}^1$ (figure B.4 a). Suivant l'angle entre la référence $\Delta\mathbf{K}^*$ et la radiale r , ce n'est pas toujours le cas (figure B.4 b). Nous devons donc adapter la définition de la limite $\Delta\bar{\mathbf{K}}^0$ achromatique pour la rendre cohérente avec la limite radiale dans tous les cas. On résout ce problème en modifiant $\Delta\bar{\mathbf{K}}^0$ de façon à ce qu'elle puisse jouer à la fois le rôle de limite achromatique et celui de limite radiale. A cette fin, on interpole $\Delta\bar{\mathbf{K}}^0$ entre $\Delta\bar{\mathbf{K}}^1$ et $\Delta\mathbf{K}^1$ au point $\bar{\mathbf{K}}^0$ selon la formule :

$$\Delta\bar{\mathbf{K}}_0 = \left(1 - \frac{S(\bar{\mathbf{K}}^0) - S(\bar{\mathbf{K}}^1)}{S(\mathbf{K}^1) - S(\bar{\mathbf{K}}^1)}\right) \cdot \Delta\bar{\mathbf{K}}_1 + \frac{S(\bar{\mathbf{K}}^0) - S(\bar{\mathbf{K}}^1)}{S(\mathbf{K}^1) - S(\bar{\mathbf{K}}^1)} \cdot \Delta\mathbf{K}_1 \quad (\text{B.4})$$

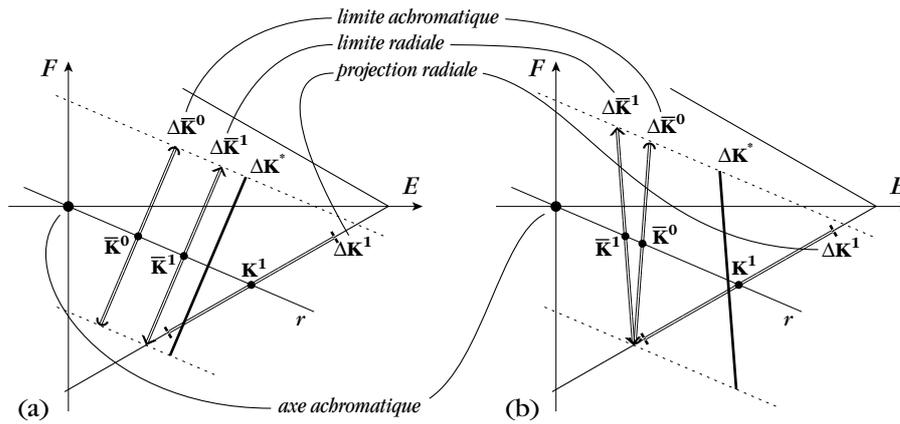


Fig.B.4 Cas général : limite achromatique moins saturée que la limite radiale (a). Transformation de la limite achromatique lorsqu'elle est plus saturée que la limite radiale (b).

Dans le cas illustré par la figure B.4 b, l'écart $\Delta\bar{\mathbf{K}}^0$ sert à la fois de limite achromatique et de limite radiale. L'écart $\Delta\bar{\mathbf{K}}^1$ ne joue plus aucun rôle une fois que $\Delta\bar{\mathbf{K}}^0$ a été calculé.

B.2 Interpolation radiale

La section 2.6 présente l'interpolation radiale d'un écart chromatique dans le cas général. Un premier cas particulier doit être spécifiquement traité lorsque le centre $\bar{\mathbf{K}}^0$ de la limite achromatique sort du cube RGB, et que $\Delta\mathbf{C}$ est interpolée entre la projection achromatique et la projection radiale. Un deuxième cas particulier se produit lorsque le centre $\bar{\mathbf{K}}^0$ de la limite achromatique est plus saturé que le centre $\bar{\mathbf{K}}^1$ de la limite radiale.

B.2.1 Interpolation radiale lorsque le centre de la limite achromatique est situé à l'extérieur du cube RGB

Lorsque le centre $\bar{\mathbf{K}}^0$ de la limite achromatique $\Delta\bar{\mathbf{K}}^0$ se trouve hors du cube RGB, tous les écarts chromatiques extrapolés à partir de $\Delta\mathbf{K}^*$ doivent être partiellement achromatiques, puisqu'ils sont nécessairement situés entre l'axe achromatique et la limite achromatique. Cependant, il est impossible de construire cette limite achromatique, puisque son centre ne fait pas partie du cube RGB. On contourne cette impossibilité en remplaçant $\Delta\bar{\mathbf{K}}^0$ par la projection radiale $\Delta\mathbf{K}^1$ modifiée de la section B.1.2 : $\Delta\mathbf{C}$ est interpolé entre la projection achromatique et cette projection radiale modifiée :

$$\Delta\mathbf{C} = \left(1 - \frac{S(\mathbf{C})}{S(\mathbf{K}^1)}\right) \cdot \Delta\mathbf{K}^0 + \frac{S(\mathbf{C})}{S(\mathbf{K}^1)} \cdot \Delta\mathbf{K}^1 \quad (\text{B.5})$$

La figure B.5 montre que les écarts chromatiques extrapolés s'éloignent beaucoup de la référence $\Delta\mathbf{K}^*$ (ou plutôt, de sa limite achromatique $\Delta\bar{\mathbf{K}}^0$ représentée dans l'illustration). La cohérence des écarts extrapolés n'est donc pas respectée, mais ce genre d'incohérence ne se présente que dans des zones restreintes proches des sommets du cube RGB, et le fait d'y transformer un écart de saturation en un écart de tonalité ne prête que peu à conséquence, perceptuellement parlant.

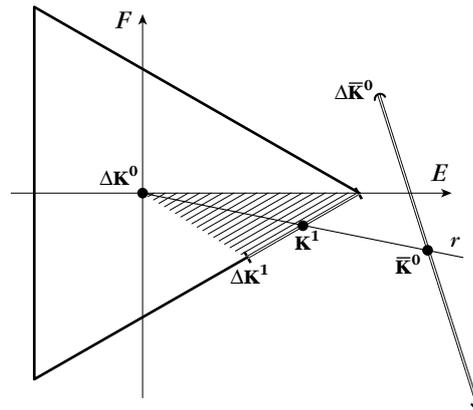


Fig.B.5 Interpolation de ΔC lorsque \bar{K}^0 est hors du cube RGB

B.2.2 Interpolation radiale lorsque la limite achromatique est plus saturée que la limite radiale

Dans le cas général illustré par la figure 2.12 (section 2.6.1, p. 38), la limite achromatique et la limite radiale sont correctement ordonnées, puisque \bar{K}^0 est moins saturée que \bar{K}^1 . Mais il peut aussi arriver, lorsqu'on se rapproche des extrémités de l'axe achromatique, que la limite achromatique soit plus saturée que la limite radiale. Dans de pareils cas, la manière de calculer la limite achromatique \bar{K}^0 est modifiée (voir l'équation B.4 et la figure B.4). L'interpolation de ΔC est modifiée en conséquence. Si C est située entre l'axe achromatique et la limite achromatique, l'interpolation de ΔC est donnée par l'équation 2.9 de la section 2.6.1 (figure B.6).

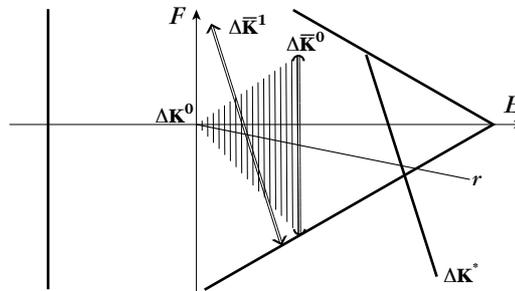


Fig.B.6 Interpolation de ΔC pour une famille de points situés au voisinage de l'axe achromatique lorsque $S(\bar{K}^0) > S(\bar{K}^1)$

Si C est située la limite achromatique et les frontières du cube RGB, on passe sans transition d'une interpolation entre ΔK^0 et $\Delta \bar{K}^0$ (section 2.6.1, p. 38) à une interpolation entre $\Delta \bar{K}^1$ et ΔK^1 (section 2.6.3, p. 39). Ceci provoque une discontinuité dans les écarts extrapolés. On évite cette discontinuité en remplaçant $\Delta \bar{K}^1$ par $\Delta \bar{K}^0$ lorsque $S(\bar{K}^0) > S(\bar{K}^1)$ (figure B.7). L'interpolation devient alors :

$$\Delta C = \left(1 - \frac{S(C) - S(\bar{K}^0)}{S(K^1) - S(\bar{K}^0)}\right) \cdot \Delta \bar{K}^0 + \frac{S(C) - S(\bar{K}^0)}{S(K^1) - S(\bar{K}^0)} \cdot \Delta K^1 \quad (B.6)$$

Soulignons que le passage du cas $S(\bar{K}^0) < S(\bar{K}^1)$ au cas $S(\bar{K}^0) > S(\bar{K}^1)$ n'entraîne aucune discontinuité dans l'interpolation de ΔC .

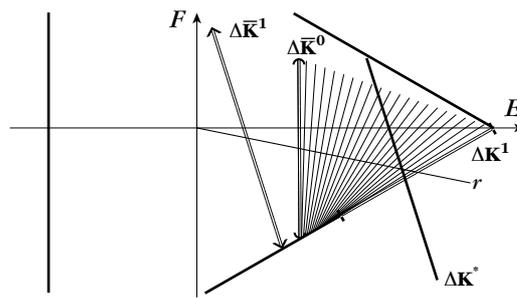


Fig.B.7 Interpolation d'un écart chromatique au voisinage de la surface du cube RGB lorsque $S(\bar{\mathbf{K}}^0) > S(\bar{\mathbf{K}}^1)$

Planches couleur

Planche 1 Sections équi-lumineuses de l'espace LEF

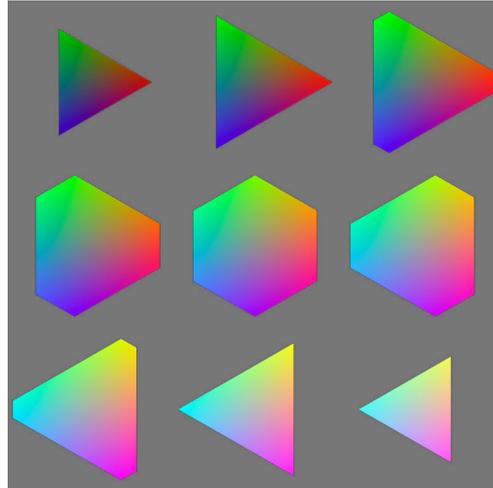


Planche 2 Sections équi-tonales de l'espace LEF

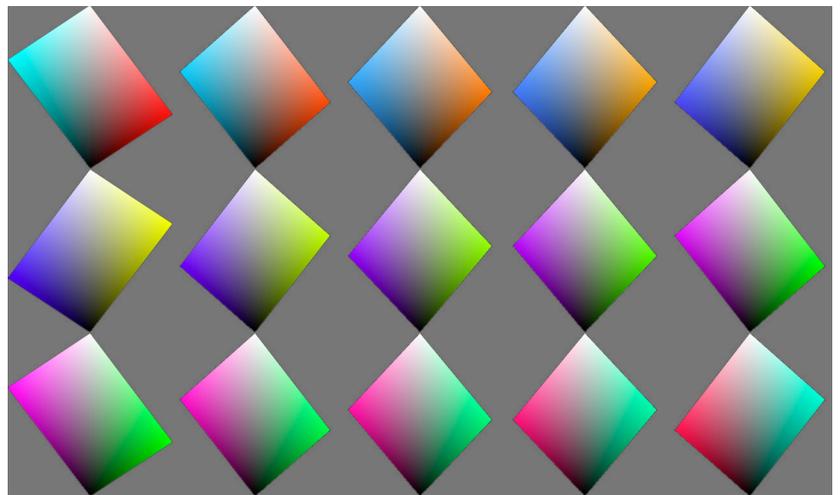


Planche 3 Fenêtre principale du sélecteur de différences chromatiques

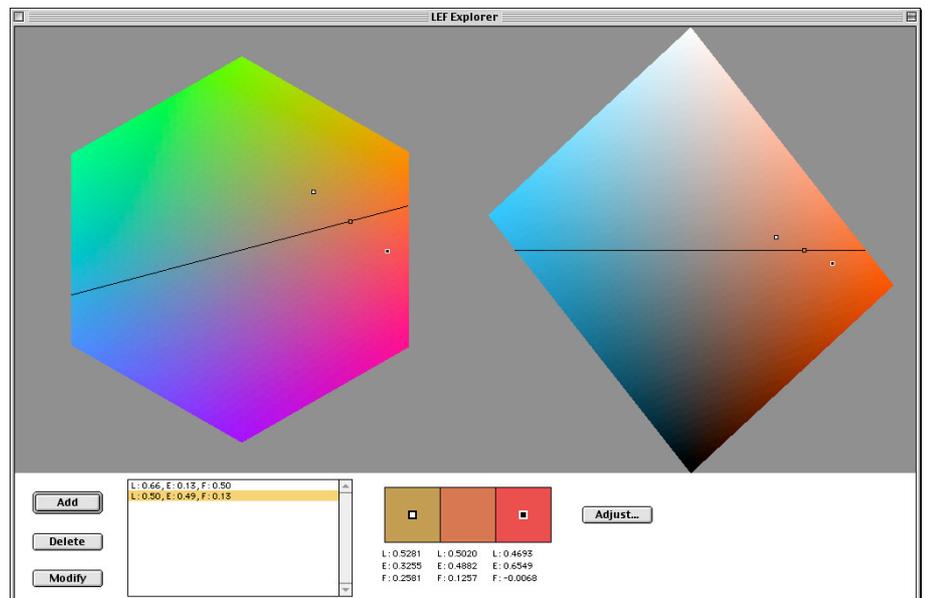


Planche 4 Deux couleurs C_- et C_+ s'écartant progressivement et symétriquement d'une troisième couleur C

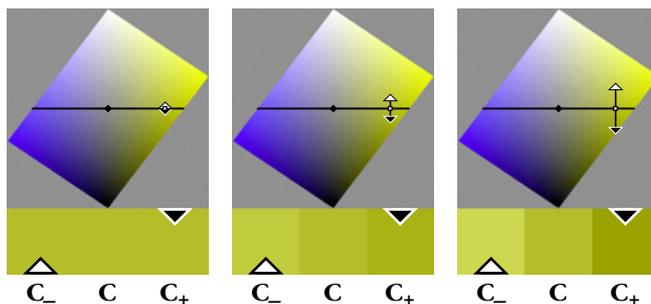


Planche 5 Fenêtre permettant de visualiser l'aspect d'un écart chromatique et d'ajuster sa taille

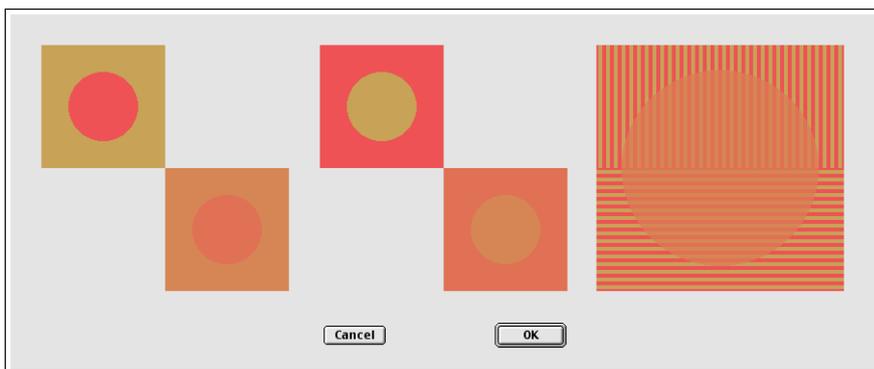


Planche 6 Ajustement d'un écart chromatique par rapport à un écart chromatique de référence

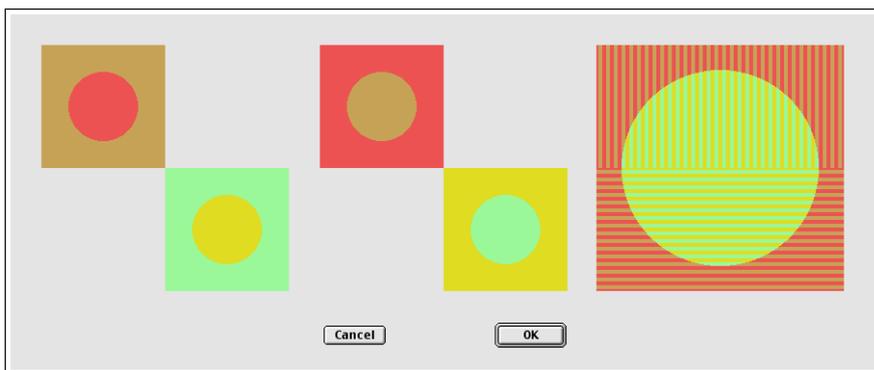


Planche 7 Effet d'une subdivision incorrecte du motif en micro-éléments

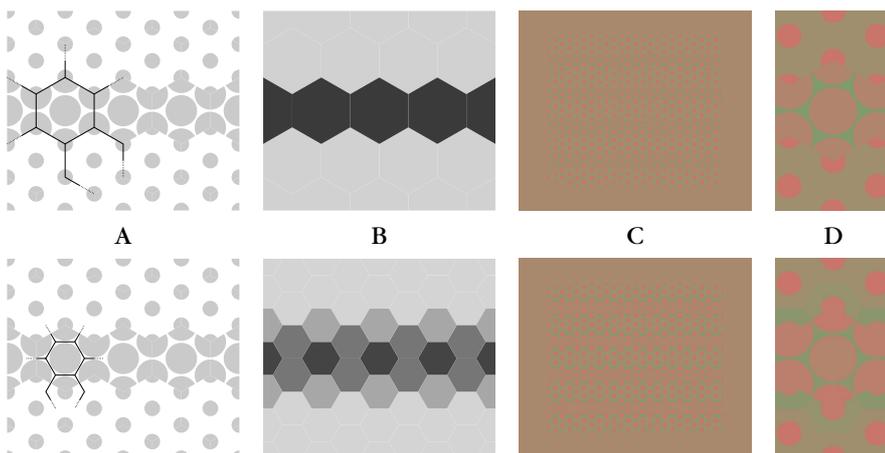


Planche 8 Ecart chromatique symétrique autour d'une couleur C appliqué à un motif comprenant autant de chair que de fond

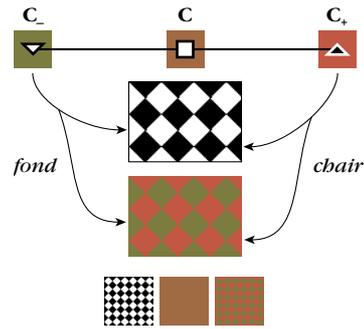


Planche 9 Influence du taux de couverture α local du motif incrusté sur le mélange optique de deux couleurs

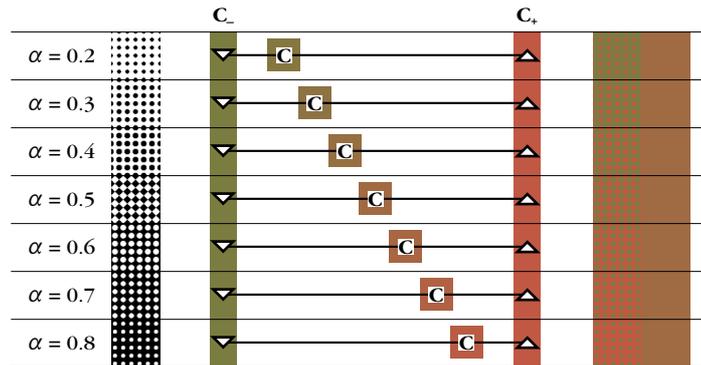


Planche 10 Influence du recentrage d'un écart chromatique appliqué à une microstructure ayant un taux de couverture variable

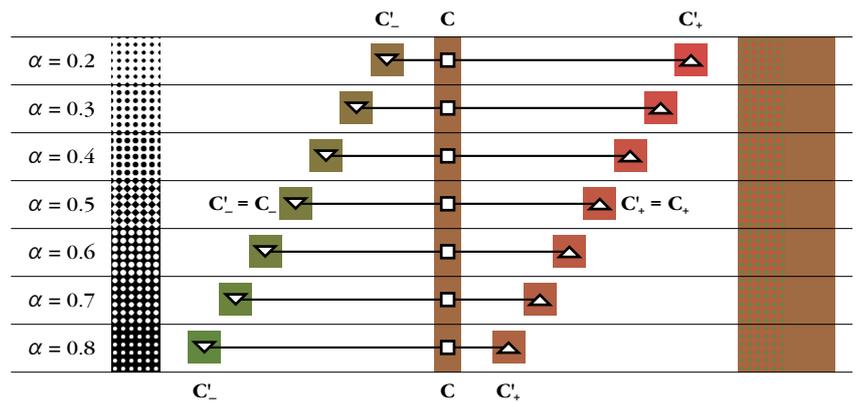


Planche 11 Taux de couverture par application d'un flou gaussien au motif

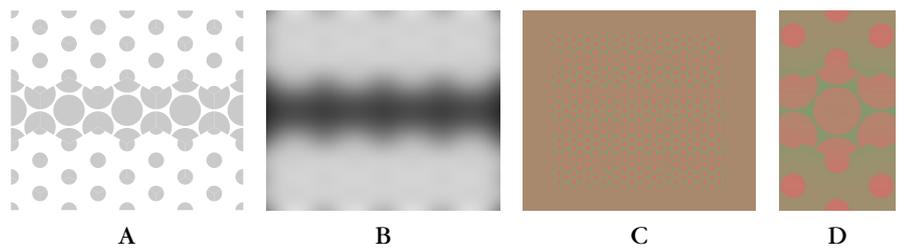


Planche 15 C de Landolt utilisé pour la détection du contraste

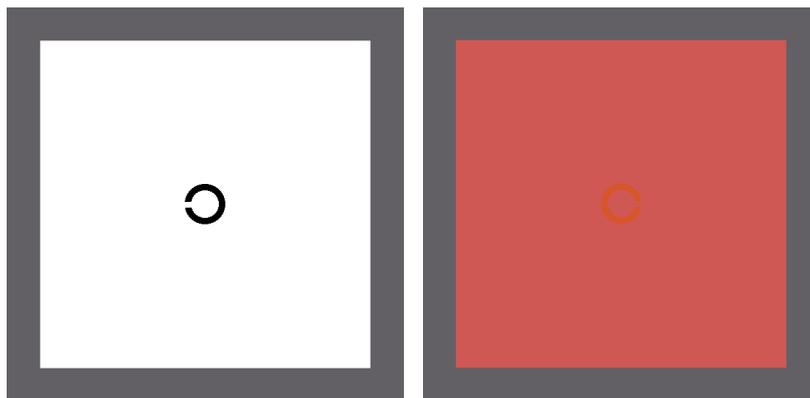


Planche 16 Contraste en saturation CIE-Lab vis-à-vis d'un contraste en luminosité CIE-Lab égal à 2

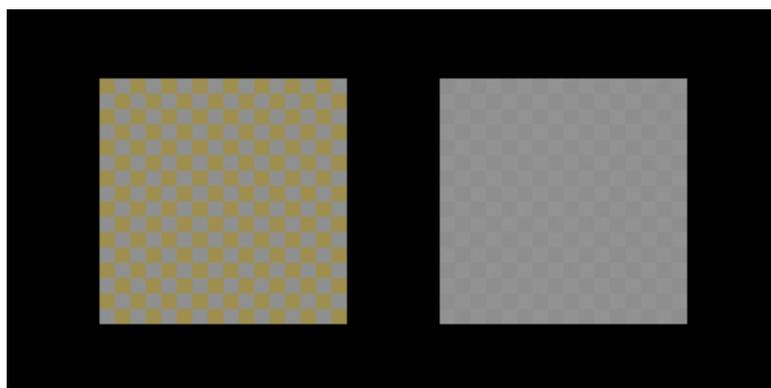


Planche 17 Microstructure équilibrée incrustée dans un plan à luminosité CIE-Lab constante avec écarts chromatiques selon P3dS20

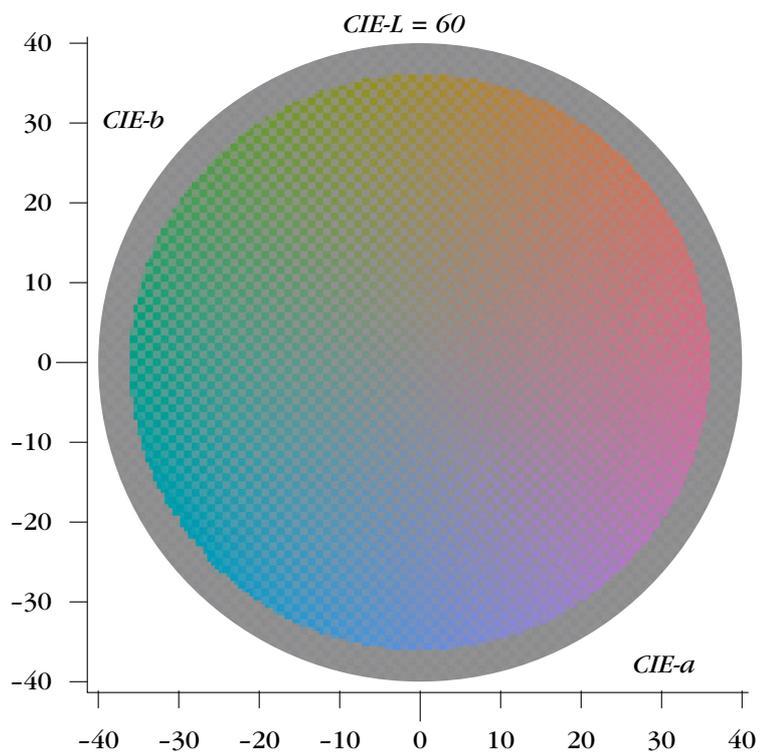


Planche 18 Dégradé de contrastes en saturation pris sur une radiale à luminosité constante de l'espace CIE-Lab

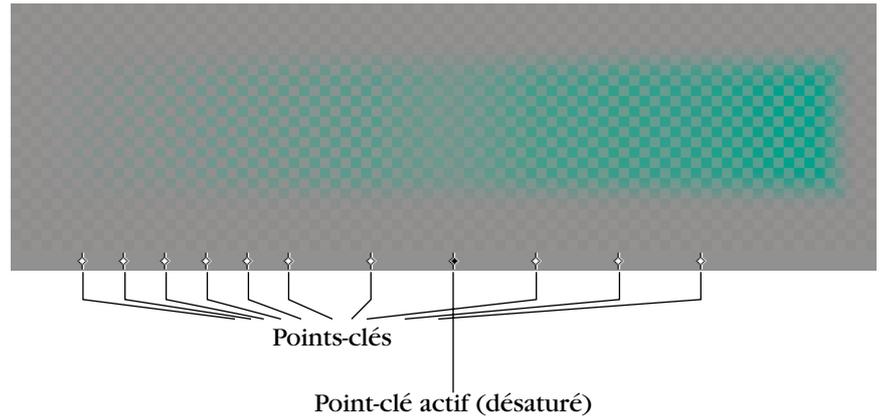


Planche 19 Sections équi-tonales de LEF avec lignes d'équi-luminosité CIE-Lab

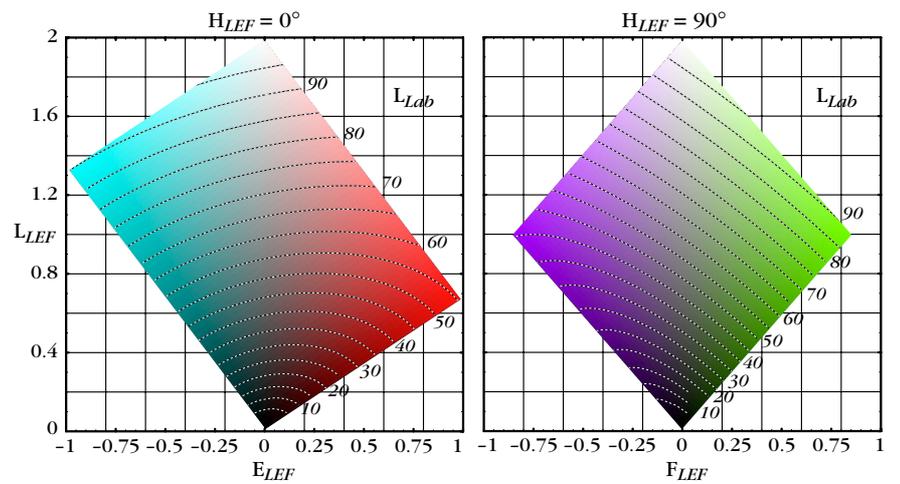


Planche 20 Microstructure équilibrée incrustée dans un plan à luminosité CIE-Lab constante avec des écarts en tonalité et un ΔL_{Lab} non-contrôlé

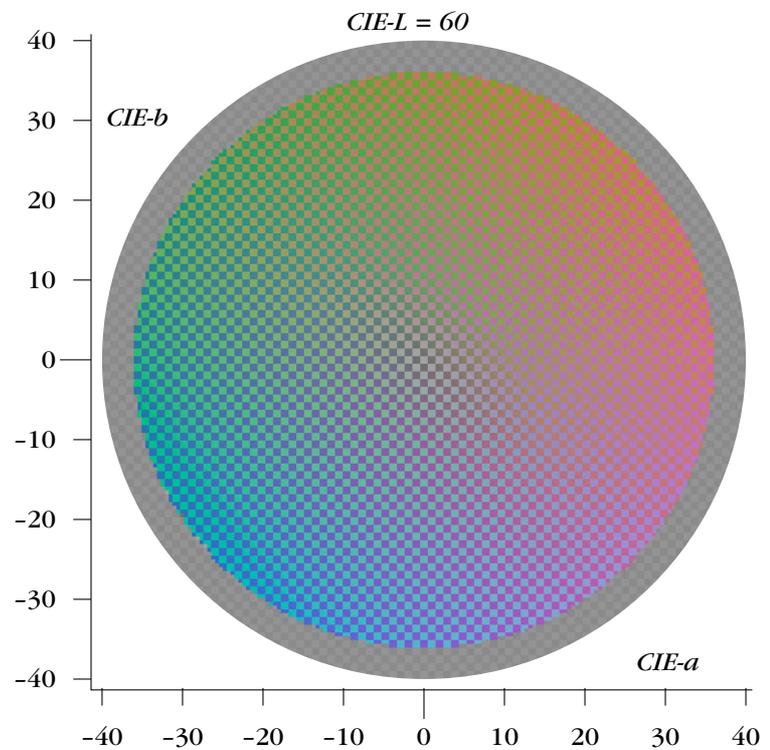


Planche 21 Microstructure équilibrée
 incrustée dans un plan à luminosité
 CIE-Lab constante avec des écarts en
 tonalité et un ΔL_{Lab} constant égal à 4

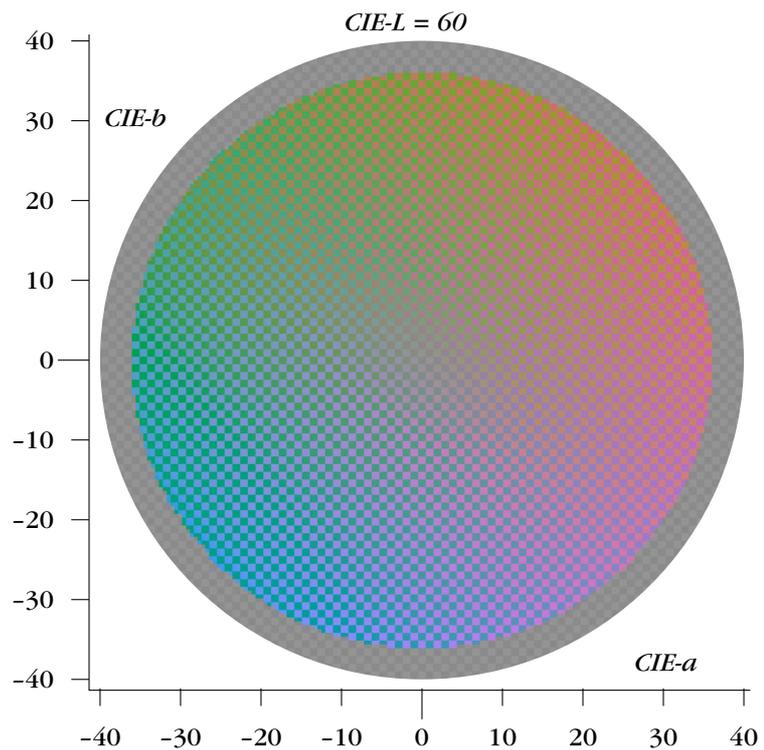


Planche 22 Logiciel interactif pour
 l'incrustation de microstructure

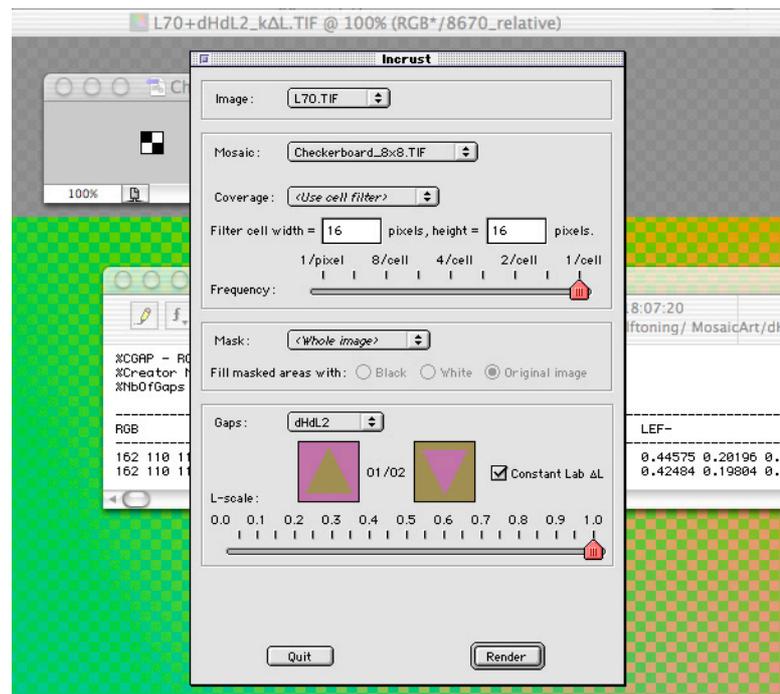


Planche 23 Projet initial pour le nouveau permis : transformation géométrique et incrustation continue



Planche 24 Spécimen partiel de la version définitive du nouveau permis



Planche 25 Exemples de photos d'identité avec microstructure incrustée



Planche 26 Simulation de l'effet d'une déviation de $\pm 5\%$ de la courbe de reproduction de l'imprimante sur le contraste de la microstructure



$\gamma = 2.2 - 5\%$

$\gamma = 2.2$

$\gamma = 2.2 + 5\%$

Nicolas RUDAZ
Cheneau-de-Bourg 7
1003 Lausanne

Tél. : 021 693 66 88
E-mail : Nicolas.Rudaz@epfl.ch

37 ans
Célibataire
Nationalité suisse
Sans obligations militaires

Formation

1995 Diplôme d'ingénieur informaticien EPFL
1989 Diplôme de l'Ecole Supérieure de Vitrail et de Création
1986 Maturité scientifique

Expérience professionnelle

1995-2003 Assistant de recherche à L'EPFL
*Encadrement de laboratoires et de projets d'étudiants.
Réalisation et diffusion d'une application graphique, avec formation et suivi des utilisateurs.
Collaboration avec Orell Füssli AG pour la réalisation du nouveau permis de conduire suisse.
Collaboration avec l'imprimerie SSP S.A. pour l'impression d'encre métalliques.*

Eté 1994 Stage chez Bobst S.A.
Développement d'un moniteur réseau.

1989-1991 Atelier de vitrail indépendant
Conception et réalisation du tronçon valaisan de la Voie Suisse pour le 700e anniversaire de la Confédération.

Langues

Français langue maternelle
Anglais courant
Espagnol courant (*séjour au Pérou 1983-1984*)
Allemand moyen
Japonais notions
Italien notions

Bagage technique

Imagerie numérique 2D
Impression et reproduction couleur
Colorimétrie
Langages
C/C++/Objective-C, Lisp
Environnements de développement
CodeWarrior, ProjectBuilder, AllegroCL, Visual Studio
Applications
Mathematica, FrameMaker, Photoshop, Illustrator, PageMaker, InDesign, Acrobat, Word
Plateformes
MacOS 9 et 10, SunOS, Solaris, Windows NT/2000