

Master Recherche 2 Physique
Spécialité : Physique et Interface

RAPPORT DE STAGE

Etude statistique des Color Matching Functions

Présenté par : **Samir AMIR**

Septembre 2007

Remerciement

Ces remerciements ne sauraient débiter sans rendre hommage à Jean-Ronan Vigouroux, qui m'a encadré, encouragé, aiguillé, motivé, fait confiance et surtout supporté ! Par son encadrement réellement exceptionnel.

Bien sûr, sans Pascal Bourdon, je n'aurais pu mener à bien ce travail...Je lui suis également reconnaissant pour son aide, sa disponibilité, dévouement et surtout sa gentillesse.

Je tiens à remercier la société Thomson qui m'a accueilli dans ces locaux et qui m'a donné les moyens techniques pour réaliser mon stage dans des bonnes conditions.

Je suis par ailleurs redevable à l'ensemble du laboratoire CPM de Thomson.

Mes remerciements s'adressent aux membres du jury qui me font l'honneur de participer à la soutenance.

Enfin, je tiens à souligner, l'ambiance générale du stage a été très agréable et je tiens encore à remercier ces messieurs.

Table de matière

Remerciements

Présentation de l'entreprise

I. Introduction à la colorimétrie	6
I.1 Couleur	7
I.2 Perception	7
I.3 l'œil.....	8
I.4 Trichromie	9
I.5 Les espaces de couleurs	9
I.5.1 Le modèle couleur CIE RGB	9
I.5.2 Le modèle couleur CIE XYZ	11
I.5.3 Le diagramme CIE _{xy}	12
I.5.4 Le diagramme CIE L*a*b	13
I.6 Quelques Color Matching Functions proposées	14
I.7 Métamérisme	15
I.8 Position du problème	15
II. Méthode proposée	17
II.1 Résolution du problème des projections itératives.....	18
II.2 Comportement de l'algorithme avec des spectres à quatre primaires	22
II.2 Robustesse de l'algorithme	26
III. Résultats des manipulations	28
III. 1 Schéma de manipulation	29
III. 2 Résultats obtenus	29
Conclusion	31

Présentation de l'entreprise

Thomson – Leader mondial des technologies de l'image

Thomson propose des technologies, des services, et des systèmes pour aider ses clients des industries « Media & Entertainment » - créateurs de contenu, opérateurs de réseaux, diffuseurs et utilisateurs de ses technologies - à atteindre leurs objectifs commerciaux et à améliorer leurs performances, au sein d'un environnement technologique en évolution constante et rapide. Le Groupe est le partenaire privilégié de l'industrie des médias au travers de ses marques Technicolor, Grass Valley, RCA et Thomson.

Plus d'informations : <http://www.thomson.net>.

Activités :

Thomson est organisé en trois Divisions, qui occupent sur leurs marchés des positions clés :

- Services

La division Services est spécialisée dans la gestion des services clés pour le compte des clients – média physiques (DVD, films), médias électroniques, gestion de réseaux.

- N°1 mondial pour les services liés aux médias physiques
- N°1 mondial pour les services de publicité « hors du domicile » (Screenvision)
- N°2 mondial pour les services de post-production

- Systèmes

La division Systèmes fournit des systèmes centrés sur la vidéo (Grass Valley et Plate-formes d'Accès & Passerelles). Cette division joue un rôle stratégique à chaque extrémité aux côtés des opérateurs de réseaux, distributeurs et consommateurs finaux.

Grass Valley (Diffusion et Réseaux) :

- N°1 mondial pour les équipements de diffusion en haute définition (HD), les caméras de studios, les caméras de production sur le terrain, les serveurs vidéos, les enregistreurs vidéos numériques, les mélangeurs et les routeurs
- N°2 mondial pour la fourniture d'équipements de diffusion professionnelle

Plate-formes d'Accès & Passerelles :

- N°1 mondial pour les modems/passerelles DSL, et pour les décodeurs satellite et terrestre
- N°2 mondial pour les modems câble
- Leader mondial pour la fourniture de décodeurs utilisant le Protocole Internet
- Innovateur de premier ordre pour les solutions de triple play (vidéo, voix, données)
- Leader pour les produits de téléphonie résidentielle

- Technologie

La division Technologie développe et monétise la technologie de Thomson (centres de recherches, activités de licences, solutions microélectroniques « silicon solutions », solutions logiciels et technologie), fournissant des licences aux tierces parties et anticipant le développement des futurs standards technologiques.

Un portefeuille de **50 000** brevets
7 laboratoires de Recherche dans le monde
Plus de **4 000** personnes
Plus de **500** ingénieurs de recherche
190 experts en brevets & licences

Principaux clients :

Les studios de cinéma : Disney, Universal, 20th Century Fox, Dreamworks, Paramount...
Les éditeurs de logiciels : Microsoft, etc
Les chaînes de télévision : TF1, Canal Plus, ABC, NBC, CNN, etc.
Les opérateurs de réseaux : DIRECTV, Echostar, Sky, France Télécom, Telefonica, etc
Les fabricants de produits d'électronique grand public et les distributeurs : TCL-Thomson Electronics (TTE), Wal-Mart, Carrefour, Best Buy etc.

Chiffres clés :

Effectifs : 24 465 salariés dans le monde, dans plus de 30 pays (au 31.12.06)**Th**

Chiffre d'affaires 2006 : 5,747 milliards d'euros

Thomson R&D France - Pôle d'excellence dans les technologies de création, de distribution et d'accès aux contenus audiovisuels

Thomson R&D France est le plus grand centre technologique du Groupe Thomson. Pôle d'excellence sur l'ensemble de la chaîne de l'image, le centre de Rennes conçoit et développe des solutions innovantes pour les industries « Média, Communication & Divertissement ». Thomson R&D France étudie les nouvelles technologies de compression, de protection, de transmission, de production, de gestion des contenus en haute définition et prépare les futures générations d'équipements numériques et de services associés –notamment décodeurs numériques, modems d'accès large bande, modules pour la télévision interactive- pour des clients professionnels et grand public des industries « Média, Communication & Divertissement ».

Implanté à Rennes depuis plus de 30 ans, au sein de la technopôle Rennes Atalante, Thomson R&D France travaille en partenariat avec les grands instituts universitaires européens, des laboratoires de recherche publics, des industries. Le centre collabore à tous les grands programmes coopératifs de recherche français et européens : RNRT, RNTL, RIAM, MEDEA, ITEA, IST, CNES, ESA ...et est co-fondateur du pôle de compétitivité « Images et Réseaux » en Bretagne.

Des axes de Recherche et Développement qui soutiennent la vision stratégique du Groupe

- Production et Gestion des contenus audiovisuels
- Compression/décompression avec traitement audio/vidéo
- Sécurité des contenus tout au long de la chaîne de l'image
- Transmission large bande et sans fil
- Distribution des Contenus Electroniques sur terminaux fixes et mobiles
- Plates-formes de décodeurs numériques intégrant les dernières technologies avec disque dur, codage MPEG4, protocole Internet, haute définition,...
- Conception de circuits intégrés à forte valeur ajoutée

Chiffres clés 470 personnes ; 80 % d'ingénieurs et cadres

I. Introduction à la colorimétrie

I.1 Couleur

La couleur est une sensation produite par les radiations de la lumière sur l'œil au moment où ces radiations sont absorbées ou réfléchies par les objets [1]. Ainsi pour mieux définir le mot couleur, il est nécessaire de comprendre comment la lumière devient couleur. Quand une source émet de la lumière, l'énergie rayonnée varie selon la longueur d'onde. Le spectre lumineux s'étend des radiations ultraviolettes aux radiations infrarouges. A l'intérieur de ce spectre, seule une région étroite constitue la lumière visible (longueurs d'ondes situées entre 400 nm et 700 nm).

Disons simplement que la couleur est une sensation produite par l'interaction de lumière visible avec les cellules de notre œil. A chaque longueur d'onde est associée une sensation physiologique différente que l'on qualifie de « couleur » : le violet vers 400 nm, le vert vers 550 nm et le rouge vers 650 nm.

I.2 Perception

La perception d'un objet coloré est liée aux :

- La composition spectrale éclairant le corps coloré : $E(\lambda)$.
- La réflectance spectrale $R(\lambda)$: la lumière est donc observée ou réfléchi par les molécules de la matière. Sous une lumière blanche un objet qui réfléchira, sans absorption, toutes les radiations visibles paraîtra blanc, alors qu'un objet noir absorbera intégralement toutes les radiations. Un objet apparaîtra coloré s'il présente une absorption sélective du spectre lumineux [2].
- La perception physiologique via la courbe $V(\lambda)$ de la visibilité moyenne de l'œil humain (Figure 1).

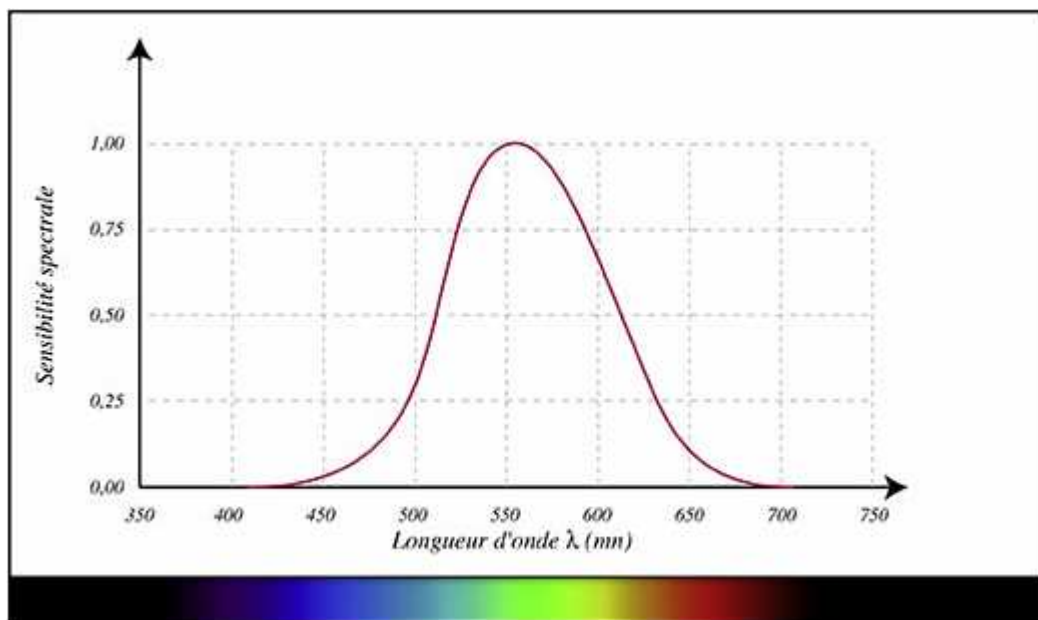


Figure 1

I.3 l'œil

L'œil focalise la lumière reçue sur sa partie photosensible, la rétine, par l'intermédiaire de :

- La cornée, partie antérieure du globe oculaire, c'est une lentille transparente dont le rôle est de capter et de focaliser la lumière sur le cristallin.
- L'iris, une membrane colorée, comme un diaphragme, permet de contrôler la quantité de lumière pénétrant dans l'œil.
- Le cristallin, une lentille biconvexe, permet de focaliser le stimulus, (Figure 2).

La rétine contient quatre types de cellules photosensibles qui assurent la vision humaine. Les bâtonnets qui sont sensibles aux très faibles lumières et trois types de cônes sensibles principalement au rouge, au vert et au bleu, si la quantité de lumière est suffisante (Figure 3). La stimulation de chacun des types de cônes est transmise séparément au cerveau où les informations sont combinées pour reproduire les couleurs du monde environnant [2].

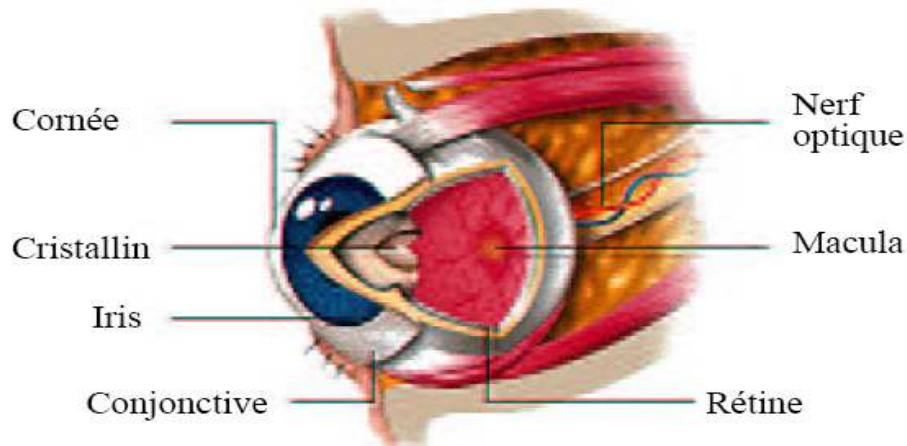


Figure 2 : Principe de la vision humaine

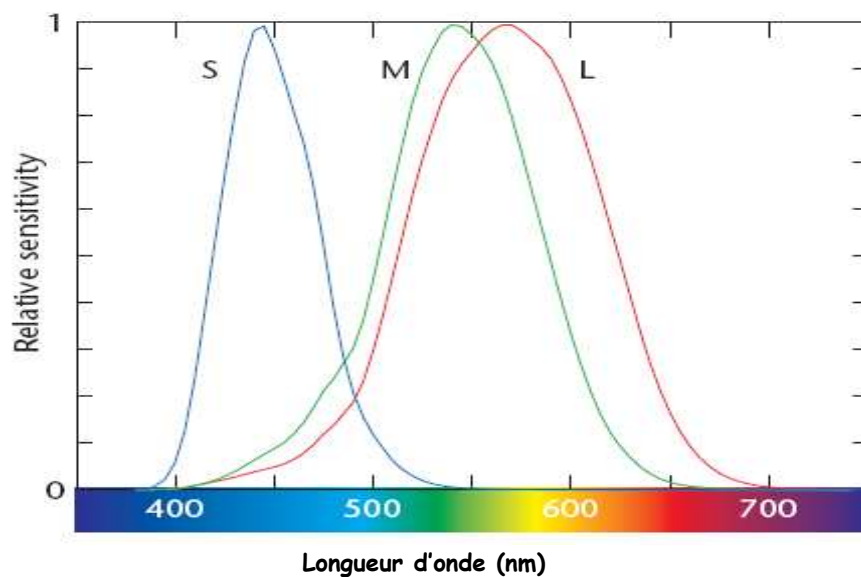


Figure 3 : Sensibilité spectrale des cônes
S (bleu), M (vert) et L (rouge)

I.4 Trichromie

La perception humaine de la couleur est caractérisée par son aspect tridimensionnel. L'expérience montre que seules trois couleurs, appelées primaires permettant de reproduire la quasi-totalité des couleurs. C'est qu'on appelle la trichromie, Figure 4.

- *Synthèse Additive des couleurs* : c'est la technique utilisée pour la reproduction de la couleur des écrans ou dans autres périphériques d'affichage. Un vecteur couleur C peut être représenté par trois composants, le rouge, le vert et le bleu [7].
- *Synthèse Soustractive des couleurs* : la décomposition additive de la lumière en trois composantes RVB cité précédemment est utile quand on veut afficher une image par l'addition des trois composantes. Dans le cas de l'impression on éclaire une surface par une lumière blanche contenant toutes les couleurs. Certaines de ces couleurs ne sont pas réfléchies et la couleur résultante correspond au blanc moins les couleurs absorbées. Les primaires sont alors CMY.

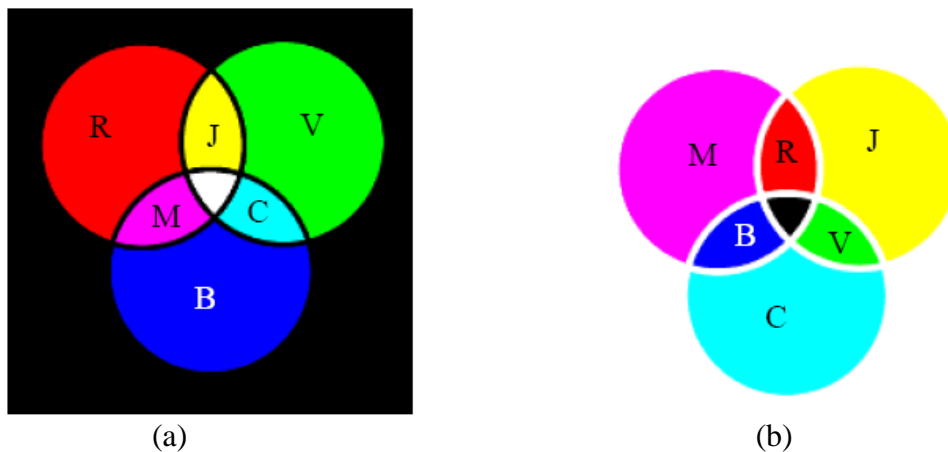


Figure 4 : Composition additive (a) et soustractive (b) de la couleur

I.5 Les espaces de couleurs

I.5.1 Le modèle couleur CIE RGB

La CIE (Comité Internationale de l'Eclairage) a réalisé des résultats expérimentaux sur la vision et a normalisé un système qui permet d'interpréter avec précision les sensations colorées. C'est « l'observateur de référence » exposé 1931, dit CIE 31. Il correspond à une vision de couleur sous un angle de 2° , cette valeur est considérée suffisante pour les applications de télévision.

L'expérience consiste à comparer deux couleurs, une couleur pure (c-à-d possédant une longueur d'onde unique) avec une autre couleur produite par le mélange de trois couleurs RVB. A cette époque les connaissances physiologiques de l'œil humain sont bien avancées et l'on sait notamment que les couleurs sont captées par l'œil avec des cônes sensibles au rouge, au vert et au bleu. Donc l'idée de définir la vision humaine dans un système RVB est tout à fait justifiée. Cet espace RVB, aujourd'hui nommé CIERVB, est constitué trois primaires :

700,0 nm pour le rouge appelé R.

546.1 nm pour le vert appelé V.

435.8 nm pour le bleu appelé B.

Le résultat de cette comparaison se traduit par un diagramme de la sensibilité trichromatique (ou composantes trichromatiques spectrales) qui est tout à fait représentatif de la façon dont l'œil utilise les trois composantes rouge, vert et bleu (Figure 5). Certaines valeurs qui sont au dessous du point d'origine du diagramme (négatives) méritent quelques explications [4].

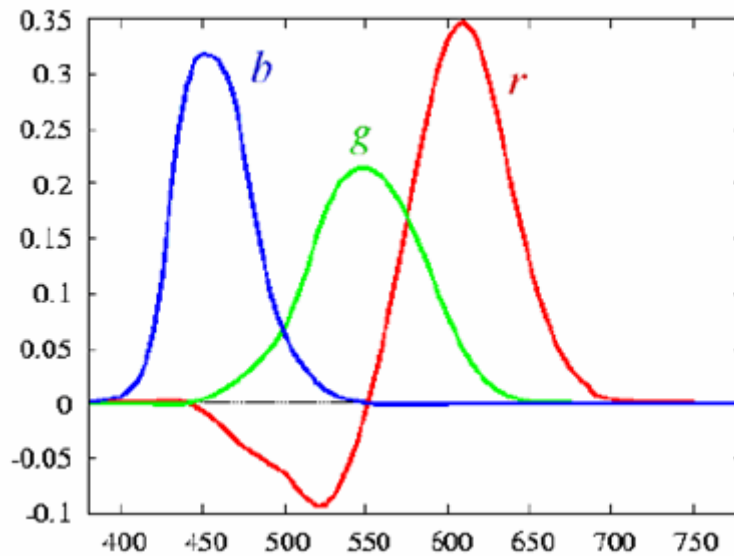


Figure 5 : Composantes trichromatiques spectrales $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$

Tout d'abord ces courbes représentent un tableau de valeurs normalisées, soit, pour chaque longueur d'onde dont on souhaite égaliser l'impression visuelle la quantité lumineuse de la primaire considérée. D'autre part, compte tenu du recouvrement très important entre les cônes sensibles au rouge et au vert (Figure 3), il est impossible d'égaliser l'impression visuelle de toutes les longueurs d'onde pures uniquement par la combinaison des trois primaires. Pour cela l'égalisation de certains couleurs fortement saturées nécessite l'ajout d'une quantité de couleur négative.

Supposons qu'on veut égaliser une radiation monochromatique de 500 nm (Figure 6). La figure 3 nous montre que la sensibilité spectrale des trois familles de cônes à cette longueur d'onde est environ 0.4 pour le vert, 0.2 pour le rouge et 0.1 pour le bleu. Même avec une composante rouge égale à zéro la primaire verte provoque un stimuli trop important sur les cônes sensibles au rouge. Cette couleur ne peut donc pas être égalisée par la synthèse additive des primaires de CIE. La seule solution consiste à ajouter du rouge à la couleur de départ, pour ensuite trouver une équivalence possible. Une fois que cela est fait, la quantité du rouge ajoutée est comptée en négatif pour la couleur considérée.

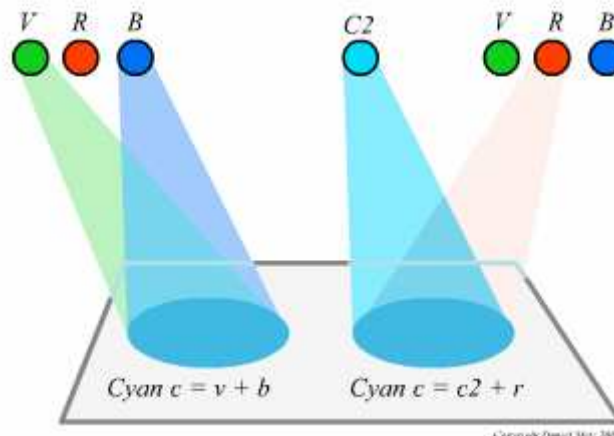


Figure 6

Ce graphique des "Composantes Trichromatiques Spectrales" est la fondation de toute la colorimétrie moderne. Car depuis cette base, on est en mesure de placer toutes les couleurs spectrales dans une représentation géométrique. En d'autres termes on va pouvoir construire un modèle colorimétrique représentatif de la vision humaine. Les "frontières" de cet espace colorimétrique sont les trois primaires CIE RGB. Mais nous savons désormais y inclure les couleurs hors gamut grâce aux quantités négatives introduites dans la notation. La figure 5 est une représentation de l'espace CIE RGB qui correspond à la vision de l'observateur standard.

Finalement, il est à noter qu'il est impossible de reproduire un certain nombre de couleurs par superposition des trois spectres (zone grise de la Figure 7). Ceci peut poser des problèmes dès que l'on désire travailler en synthèse additive (en n'additionnant que des valeurs positives). Afin de pallier ces inconvénients, la CIE a défini un espace de représentation de la couleur basée sur trois primaires X, Y et Z. Cet espace est traité dans la section suivante.

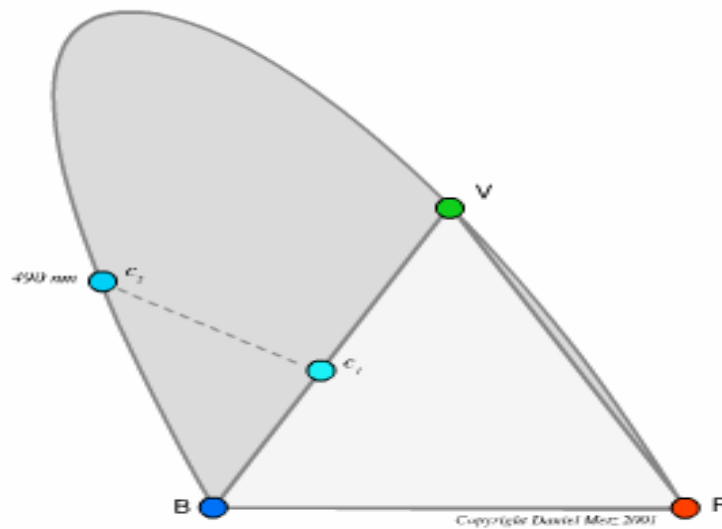


Figure 7

La détermination des coordonnées chromatiques à partir de la répartition spectrale est obtenue à partir des formules :

$$R = \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} S(\lambda) \cdot \bar{r}(\lambda) \cdot d\lambda, \quad G = \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} S(\lambda) \cdot \bar{g}(\lambda) \cdot d\lambda, \quad B = \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} S(\lambda) \cdot \bar{b}(\lambda) \cdot d\lambda$$

Avec $S(\lambda)$ la distribution spectrale du stimulus visuel, λ_{inf} et λ_{sup} les bornes spectrales du spectre visible.

Parmi les inconvénients des espaces trichromatiques est la perte d'information car le calcul de la couleur associée à un spectre pouvait s'interpréter comme une projection de ce spectre de dimension N (généralement supérieur à 3) dans un sous espace de dimension 3.

1.5.2 Le modèle couleur CIE XYZ

Afin d'élaborer le nouveau système de référence XYZ, les fonctions colorimétriques $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ ont été remplacées par $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$. De cette façon, les stimuli XYZ ne correspondent à aucunement à un rayonnement ou à des sensations réelles, mais résultent d'une seule transformation linéaire du système RGB. Les lois simples du mélange des

couleurs de l'espace RGB sont conservées. Les composantes de référence XYZ permettent d'exprimer toutes les couleurs à l'aide de composantes trichromatiques positives.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.7690 & 1.7518 & 1.1300 \\ 1.0000 & 4.5907 & 0.0601 \\ 0.0000 & 0.0565 & 5.5943 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

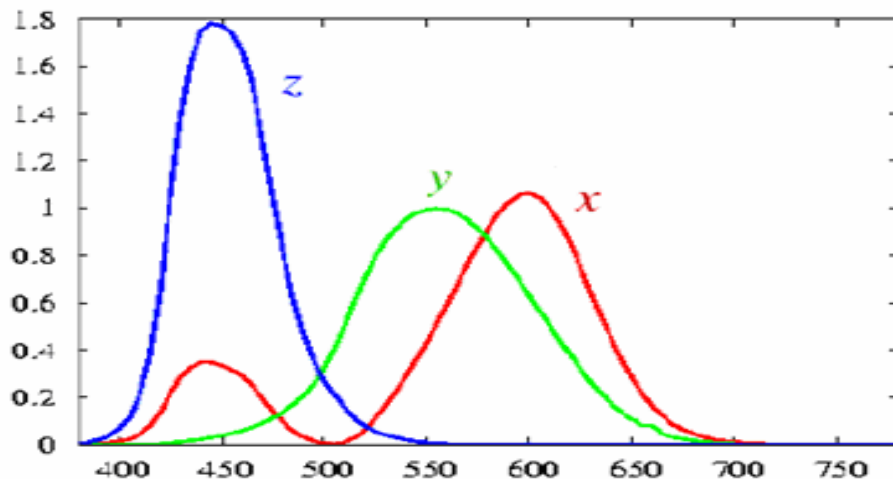


Figure 8 : Composantes trichromatiques spectrales $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$.

1.5.3 Le diagramme CIExy

Le but du diagramme CIExy est d'apporter une simplification au modèle XYZ en passant d'une notation à trois composantes à une notation à deux composantes. Pourquoi utiliser un système qui fait intervenir 3 variables alors que 2 seraient suffisantes pour représenter une couleur.

Le plan de chromaticité du modèle XYZ bien qu'étant en 2 dimensions n'est pas pratique avec ces trois variables interdépendantes pour noter les couleurs qui y figurent. La solution consiste à ne conserver que deux variables x et y pour noter les couleurs, Cela revient géométriquement à aplatir ce plan de chromaticité sur le plan xOy . On peut se passer du composant z car il découle des deux autres x et y .

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

$$x+y+z=1$$

Les couleurs caractérisables par cette représentation sont contenues dans le diagramme de chromaticité (x, y) (Figure 9).

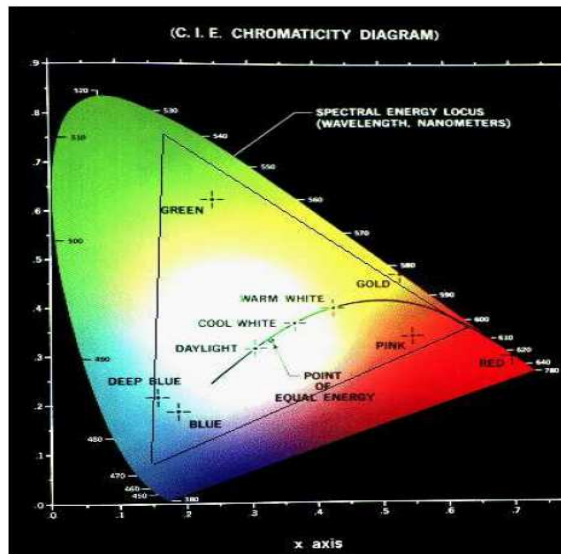


Figure 9 : Diagramme de chromacité de la CIE

1.5.4 Le diagramme CIEL*a*b

Les espaces couleurs cités précédemment dépendent linéairement de la distribution spectrale de la lumière colorée. Malheureusement la sensibilité de l'œil à la couleur n'est pas linéaire. Ces diagrammes ne permettent pas au colorimétricien de déterminer les différences comme des simples écarts dans la perception. C'est pourquoi un nouveau système CIEL*a*b* a été introduit dès 1976 (figure 10).

Les équations du passage de XYZ vers L*a*b* sont :

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

Où X_n , Y_n , Z_n sont les coordonnées de blanc de référence : $X_n=94.81$, $Y_n = 100$, $Z_n = 107.30$ (sous l'illuminant standard D_{65} et pour une angle de vision inférieure à 10°)

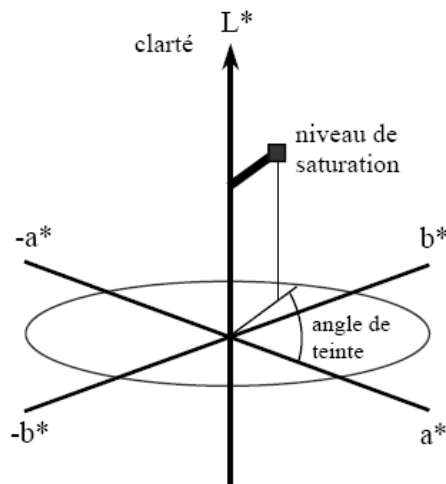


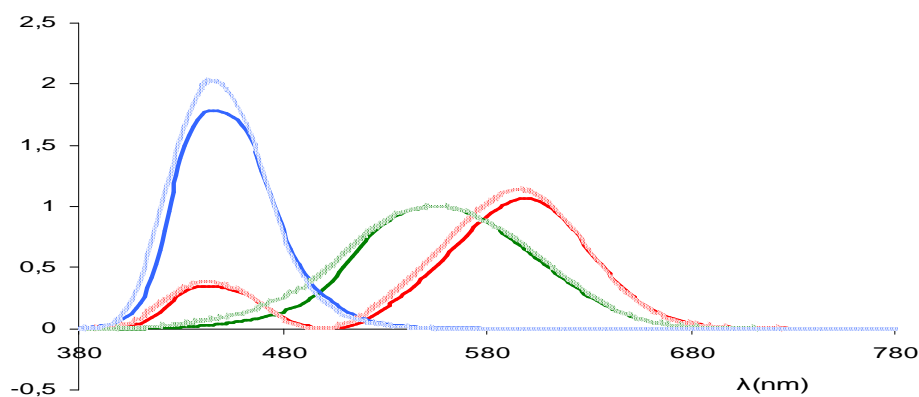
Figure 10

Dans ce nouvel espace, L^* représente la clarté, a^* représente la composante chromatique rouge-vert et b^* représente la composante chromatique jaune-bleu.

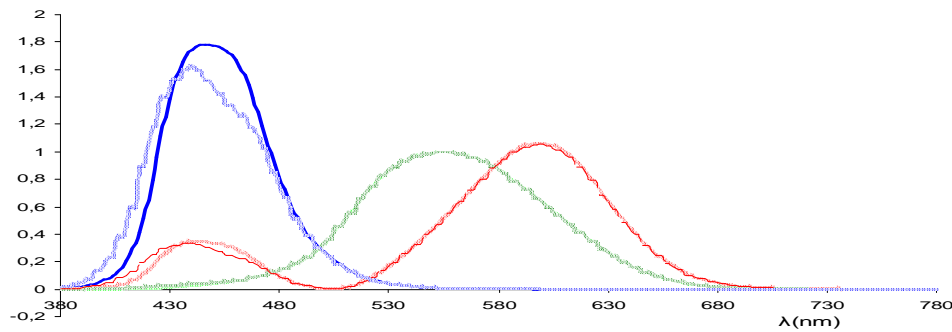
I.6 Quelques Color Matching Functions proposées

Les figures 11.a et 11.b représentent quelques Color Matching Functions qui ont été proposées et sont les plus utilisées dans le domaine de la colorimétrie. En faisant une comparaison entre les courbes on peut facilement constater une différence entre ces dernières, cette différence est due aux conditions de définition des Color Matching tel que l'angle de vision (2° pour CIE31 et 10° pour CIE64).

Il n'est pas étonnant que ces courbes soient différentes. En effet, la composition de la rétine est différente entre 2° et 10° d'excentricité. La proportion des différent types de récepteurs est différente et, par la-même, la sensation visuelle correspondante. Par exemple à 2° d'angle visuel, il y a une faible proportion de cônes S alors qu'à 10° cette proportion augmente.



(a)



(b)

Figure 11: (a) *Color Matching functions CIE31 (courbe continue), CIE64 (discontinue)*
(b) *Color Matching functions CIE31 (courbe continue), JV (discontinue).*

I.7 Métamérisme

Nous avons vu dans les paragraphes précédents que calculer la couleur associée à un spectre pouvait s'interpréter comme le calcul de la projection de ce spectre dans un sous espace de dimension 3 appelé le sous espace visuel humain. Le passage à un espace de dimension N à un espace de dimension 3 implique une perte d'informations dès que N est plus grand que 3 (ce qui est largement le cas). Il existe donc une quantité de spectres différents possédant la même projection et donc associés à la même sensation colorée (même coordonnées sur le diagramme de chromacité). Ces spectres sont dits *métamères* [6].

I.8 Position du problème

Dans ce chapitre nous avons défini la notion de colorimétrie ainsi que quelques espaces de couleur utilisés, les coordonnées dans ces espaces sont liées aux spectres ainsi qu'aux Composantes Trichromatiques Spectrales. La réalisation des Color Matching Functions (Composantes Trichromatiques Spectrales) d'après (I.5.1) est très subjective, les ensembles de test ont été fait sur un nombre très limité de personnes qui représentent un échantillon d'une population.

Afin d'évaluer la précision des Color Matching Functions existantes (CIE31, CIE64, JV...) nous avons effectué un test sur un ensemble de N couples de spectres métamères selon ces fonctions, $(S_1^i, S_2^i) i \in N$. L'expérience consiste à générer des spectres S_1^i et S_2^i avec 3 et 4 primaires d'affichage respectivement (r, g, b) et (r, g, b, p) , ce qui rend leurs formes différentes sachant que leurs coordonnées $X_i Y_i Z_i$ sont identiques selon les fonctions qu'on cherche à évaluer. Après la visualisation des couleurs C_1^i et C_2^i correspondantes aux S_1^i et S_2^i respectivement nous avons remarqué qu'il y a une différence (visuellement) entre C_1^i et C_2^i bien que leurs coordonnées $X_i Y_i Z_i$ sont identiques. Cela prouve vraiment l'imprécision des Color Matching existantes.

Afin de pallier le problème mentionné précédemment, on va chercher des nouvelles fonctions colorimétriques xyz qui vérifient une égalité (visuelle) de couleur pour tous les spectres qui ont des coordonnées égales.

$$\forall i \in \mathbb{N}, \quad X_i Y_i Z_i = \langle S_1^i, xyz \rangle = \langle S_2^i, xyz \rangle \Leftrightarrow C_1^i = C_2^i.$$

La réalisation des nouvelles Color Matching en refaisant l'expérience de la CIE citée précédemment est difficile et très couteuse. Cependant, on peut facilement remarquer que toutes les Color Matching qui ont été proposées sont très proches entre eux, cela nous indique que les nouvelles Color Matching qu'on cherche à déterminer seront évidemment très proches de celles qui ont été proposées. A ce stade, l'exploitation de la connaissance a priori sur les Color Matching est très intéressante, elle nous aide à trouver des nouvelles fonctions sans refaire toute l'expérience de la CIE.

Dans le chapitre suivant on va proposer une méthode pour déterminer des nouvelles fonctions en se servant de la connaissance a priori que nous avons (CIE31, CIE64, JV...). L'idée principale est de générer des spectres S_1^i et S_2^i métamères (visuellement). Ces spectres sont construits par trois et quatre primaires respectivement (r,g,b) et (r,g,b,p). Une méthode de projections orthogonales suivies par des itérations est appliquée dans le but de s'approcher des Colors Matchning qui vérifient une égalité des coordonnées $X_i Y_i Z_i$ pour S_1^i et $S_2^i \forall i$ déjà métamère visuellement. Cette méthode sera détaillée dans le chapitre suivant.

II. Méthode proposée

Dans le chapitre précédent nous avons présenté quelques Color Matching Functions qui ont été proposées par des chercheurs afin d'égaliser le maximum des couleurs monochromatique en combinant les trois primaires (R, V, B) uniquement.

Dans ce chapitre nous allons proposer un algorithme qui nous permet d'élaborer des nouvelles Color Matching Functions en se basant sur les fonctions déjà proposées et qui sont proches entre eux.

II.1 Résolution du problème des projections itératives

Rappelons que les coordonnées d'un spectre S dans le repère XYZ sont données par :

$$\begin{aligned} X &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda) x(\lambda) d\lambda = \langle S(\lambda), x(\lambda) \rangle \\ Y &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda) y(\lambda) d\lambda = \langle S(\lambda), y(\lambda) \rangle \\ Z &= \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda) z(\lambda) d\lambda = \langle S(\lambda), z(\lambda) \rangle \end{aligned}$$

λ_{\min} et λ_{\max} sont respectivement les bornes inférieure et supérieure de l'intervalle des spectres visibles.

x, y , et z : Color Matching Functions.

Soient S_1 et S_2 deux spectres métamères par rapport la fonction de JV, en utilisant les équations ci-dessus ainsi que la propriété de métamérisme on obtient :

$$X = \langle S_1(\lambda), x_{jv}(\lambda) \rangle = \langle S_2(\lambda), x_{jv}(\lambda) \rangle$$

$$Y = \langle S_1(\lambda), y_{jv}(\lambda) \rangle = \langle S_2(\lambda), y_{jv}(\lambda) \rangle$$

$$Z = \langle S_1(\lambda), z_{jv}(\lambda) \rangle = \langle S_2(\lambda), z_{jv}(\lambda) \rangle$$

$x(\lambda)_{jv}, y(\lambda)_{jv}$ et $z(\lambda)_{jv}$: Color Matching Functions de JV.

Donc

$$\langle S_1(\lambda) - S_2(\lambda), x_{jv}(\lambda) \rangle = 0 \quad \dots\dots\dots 1$$

$$\langle S_1(\lambda) - S_2(\lambda), y_{jv}(\lambda) \rangle = 0 \quad \dots\dots\dots 2$$

$$\langle S_1(\lambda) - S_2(\lambda), z_{jv}(\lambda) \rangle = 0 \quad \dots\dots\dots 3$$

Posons $D(\lambda) = S_1(\lambda) - S_2(\lambda)$

Il est évident que la fonction de JV se trouve sur le plan perpendiculaire à D. Cependant, une projection orthogonale d'une fonction quelconque sur l'hyperplan perpendiculaire à D peut être aussi une autre solution de notre problème. A ce stade, il est clair que les Color Matching proposées par la CIE sont très proches entre eux, cela rend l'exploitation de ces dernières

incontournable afin de ne pas s'éloigner de la gamme des solutions acceptables et satisfaisante.

Rappelons que la formule de projection orthogonale d'un vecteur f de dimension N sur un hyperplan H est donnée par :

$$P f = f - \frac{H^T \cdot f \cdot H}{\|H\|^2}$$

Connaissant les spectres S_1 et S_2 (spectres métamères par rapport JV), on peut déterminer une deuxième solution à notre système d'équations en faisant une projection orthogonale d'une fonction initiale (proche de JV pour ne pas s'éloigner de la gamme des résultats acceptables, CIE31 par exemple) sur l'hyperplan perpendiculaire à D .

$$x = x_0 - \frac{D^T \cdot x_0 \cdot D}{\|D\|^2} ; \quad y = y_0 - \frac{D^T \cdot y_0 \cdot D}{\|D\|^2} ; \quad z = z_0 - \frac{D^T \cdot z_0 \cdot D}{\|D\|^2} ;$$

x_0, y_0, z_0 Color Matching CIE31

De plus de xyz_{jv} , on obtient des autres fonctions xyz qui sont des solutions pour notre système d'équations, elles sont proches et équivalentes de JV, cela est dû à la connaissance à priori qu'on a utilisé (projection de CIE31).

Dans le paragraphe précédent nous avons montré que la projection orthogonale de CIE31 sur le plan perpendiculaire à D donne une solution équivalente à JV, ce résultat est intéressant au niveau de notre travail qui consiste à récupérer des spectres métamères visuellement et de faire des projections orthogonales sur les plans perpendiculaires à ces spectres. Le résultat de cette projection est une fonction proche et équivalente à la fonction exacte (réelle), pour cela on le considère toujours comme une solution idéale.

$$X = \langle S_1(\lambda), x(\lambda) \rangle = \langle S_2(\lambda), x(\lambda) \rangle \approx \langle S_1(\lambda), x_{jv}(\lambda) \rangle = \langle S_2(\lambda), x_{jv}(\lambda) \rangle$$

$$Y = \langle S_1(\lambda), y(\lambda) \rangle = \langle S_2(\lambda), y(\lambda) \rangle \approx \langle S_1(\lambda), y_{jv}(\lambda) \rangle = \langle S_2(\lambda), y_{jv}(\lambda) \rangle$$

$$Z = \langle S_1(\lambda), z(\lambda) \rangle = \langle S_2(\lambda), z(\lambda) \rangle \approx \langle S_1(\lambda), z_{jv}(\lambda) \rangle = \langle S_2(\lambda), z_{jv}(\lambda) \rangle$$

x, y, z : Color Matching résultat de la projection.

Les nouvelles fonctions trouvées sont des solutions pour notre système. Par contre, ces solutions ne sont pas globales et ne vérifient pas l'égalité des coordonnées pour les autres spectres $S_1^i, S_2^i \forall i$ aussi métamères par rapport JV. Pour cela, des projections itératives sur les différents hyperplans possibles sont incontournables afin d'avoir des fonctions satisfaisantes.

L'idée c'est de générer N couples de spectres métamères par rapport JV notées $(S_1^i, S_2^i) i \in [0, N]$ et de faire des projections itératives sur les hyperplans perpendiculaires aux D_i , générés

par les différents couples de spectres métamères, ces couples de spectres sont générés par la méthode suivante :

Pour chaque S_1^i on calcule X_i, Y_i, Z_i correspondants (coordonnées selon JV) puis grâce à la décomposition des valeurs singulières (SVD) on calcule S_2^i (métamère de S_1^i selon JV) par la méthode suivante :

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = A \cdot S_1^i ; \quad A \text{ est la matrice de JV.}$$

En effectuant la décomposition SVD de la matrice A, cela revient à

$$A = U \cdot W \cdot V^T \quad \text{où } U \text{ et } V \text{ sont des matrices orthogonales.}$$

Des légères perturbations sont introduites sur W pour produire une matrice B dont la différence entre cette dernière et A est négligeable.

Le spectre S_2^i est calculé par la résolution de l'équation ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = B \cdot S_2^i, \quad X_i, Y_i, Z_i \text{ sont les coordonnées de } S_1^i \text{ selon A.}$$

Le spectre S_2^i a les mêmes coordonnées que S_1^i selon B et aussi selon A, cela revient à la différence négligeable entre A et B sachant que la formes des deux derniers est totalement différente.

Après la génération de N couples métamères par rapport JV on aura :

$$(S_1^i, S_2^i) \quad i \in [0, N]$$

$$\langle S_1^i(\lambda) - S_2^i(\lambda), x_{jv}(\lambda) \rangle = 0,$$

$$\langle S_1^i(\lambda) - S_2^i(\lambda), y_{jv}(\lambda) \rangle = 0,$$

$$\langle S_1^i(\lambda) - S_2^i(\lambda), z_{jv}(\lambda) \rangle = 0,$$

$$D^i(\lambda) = S_1^i(\lambda) - S_2^i(\lambda)$$

De plus des fonctions xyz_{jv} , on cherche des fonctions xyz équivalentes et proches à xyz_{jv} qui vérifient les égalités ci-dessous :

$$\langle S_1^i(\lambda) - S_2^i(\lambda), x(\lambda) \rangle = 0,$$

$$\langle S_1^i(\lambda) - S_2^i(\lambda), y(\lambda) \rangle = 0,$$

$$\langle S_1^i(\lambda) - S_2^i(\lambda), z(\lambda) \rangle = 0, \quad \forall i \in [0, N]$$

Une série de projections itératives est faite sur les différents plans D_i , ainsi qu'après chaque itération une normalisation est faite afin de garder la même norme pour tous les vecteurs projetés, cette opération est obligatoire afin de pouvoir bien évaluer nos résultats.

$$x_{i+1} = x_i - \frac{D_i^T \cdot x_i \cdot D_i}{\|D_i\|^2} ; \quad y_{i+1} = y_i - \frac{D_i^T \cdot y_i \cdot D_i}{\|D_i\|^2} ; \quad z_{i+1} = z_i - \frac{D_i^T \cdot z_i \cdot D_i}{\|D_i\|^2}$$

$$x_{i+1} = \frac{\|x_i\|}{\|x_{i+1}\|} \cdot x_{i+1} ; \quad y_{i+1} = \frac{\|y_i\|}{\|y_{i+1}\|} \cdot y_{i+1} ; \quad z_{i+1} = \frac{\|z_i\|}{\|z_{i+1}\|} \cdot z_{i+1};$$

x_0, y_0 et z_0 Color Matching Function CIE31 ou JV.

Afin d'évaluer la convergence de l'algorithme, nous l'avons testé sur les N couples métamères par rapport JV, à chaque itération on calcule l'erreur E_i correspondante donnée par la formule suivante :

$$E_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left\| S^{j_1 T} \cdot \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} - S^{j_2 T} \cdot \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} \right\|$$

La figure 12 montre les nouvelles fonctions trouvées, qui sont proches des autres fonctions définies par la commission internationale de l'éclairage. On constate aussi une diminution de l'erreur en fonction de nombre d'itérations, cela signifie qu'il y a vraiment une convergence partielle vers les fonctions recherchées (Figure 13).

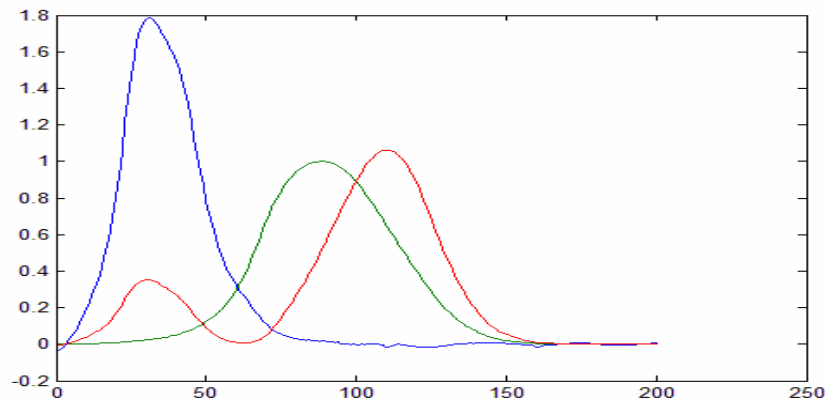


Figure 12: *Color Matching Function trouvées (80 Iteration)*

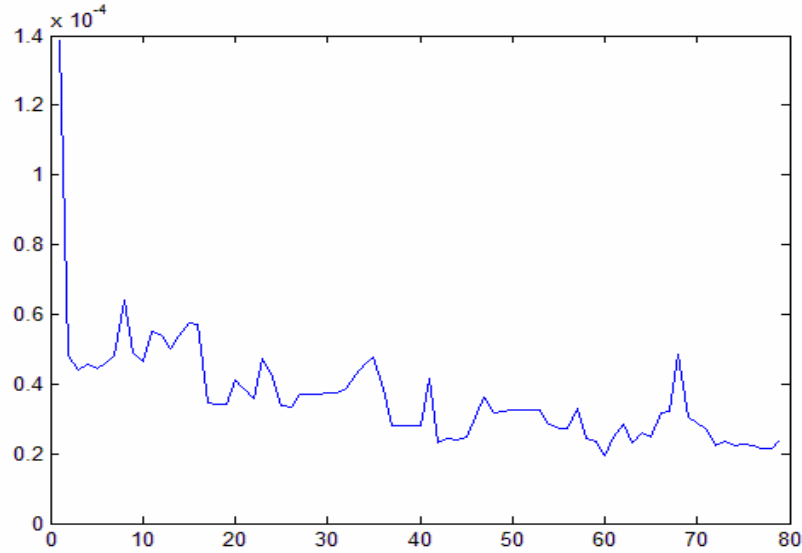


Figure 13 : L'évolution de l'erreur E_i en fonction de nombre d'itération ($N=80$)

Les résultats trouvés sont encourageants selon notre point de vue, une convergence partielle vers les fonctions recherchée (équivalentes à JV) est vérifiée. Par contre, le problème se pose au niveau de nombre des hyperplans nécessaires sur lesquels on fait la projection, combien de spectres métamères faut il créer pour avoir une convergence importante.

II.2 Comportement de l'algorithme avec des spectres à quatre primaires

Les spectres utilisés dans l'expérience précédente sont en réalité des spectres générés sans aucune contrainte (dimension N), contrairement aux spectres produits pour l'affichage sur un écran par exemple où ces derniers sont générés par trois lumières appelés primaires d'affichage.

Afin de tester la convergence de notre algorithme pour le cas particulier (trois primaires d'affichage), on a généré des spectres S_1^i par trois primaires ainsi que leurs spectres correspondants S_2^i (métamères par rapport les fonctions de JV) par quatre primaires :

$$S_1^i(\lambda) = R_1^i.r(\lambda) + G_1^i.g(\lambda) + B_1^i.b(\lambda) \dots\dots\dots 5$$

$$S_2^i(\lambda) = R_2^i.r(\lambda) + G_2^i.g(\lambda) + B_2^i.b(\lambda) + P^i.p(\lambda) \dots\dots\dots 6$$

$R_1^i, G_1^i, B_1^i, R_2^i, G_2^i, B_2^i$ et P_{\max}^i sont des scalaires.
 $r(\lambda), g(\lambda), b(\lambda)$ et $p(\lambda)$ sont des primaires d'affichage (Figure 13).

Dans un premier temps on fait un balayage de toutes les valeurs possibles de R_1^i, G_1^i, B_1^i afin de créer tous les spectres S_1^i possibles générés par 3 primaires (rgb), pour chaque spectre S_1^i on cherche S_2^i (métamère) par la résolution de l'équation 7. Il est évident que les spectres S_1^i et S_2^i auront des formes différentes dès que P^i supérieur à zéro sachant que leurs coordonnées sont toujours identiques, pour cette raison la valeur de P^i est choisie maximale.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = xyz_{jv} \cdot \text{rgb}^T \cdot \begin{bmatrix} R_1^i \\ G_1^i \\ B_1^i \end{bmatrix} = xyz_{jv} \cdot \text{rgbp}^T \cdot \begin{bmatrix} R_2^i \\ G_2^i \\ B_2^i \\ P_{\max}^i \end{bmatrix} \dots\dots\dots 7$$

xyz_{jv} = Color matching Functions de JV

Les solutions issues l'équation 7 pour différentes valeurs de $i \in$ nous permettent d'avoir des couple de spectres métamères par rapport les fonctions de JV, (S_1^i, S_2^i) . On a fait tourner l'algorithme en utilisant (S_1^i, S_2^i) afin de voir son comportement dans ce cas particulier et de calculer son taux de convergence.

La Figure 15 décrit l'évolution de l'erreur E_i , elle nous montre une convergence totale dès la première itération vers une fonction F proche de JV, elle vérifie le métamérisme (égalité des coordonnées) pour tous les autres couples y compris les couples non inclus dans les itérations.

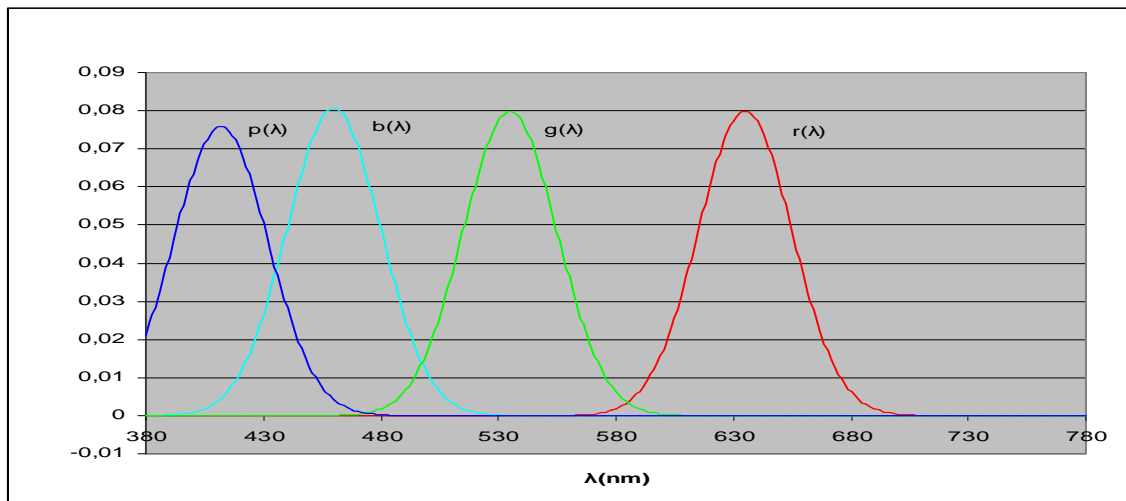


Figure 14 : *Primaires d'affichage*

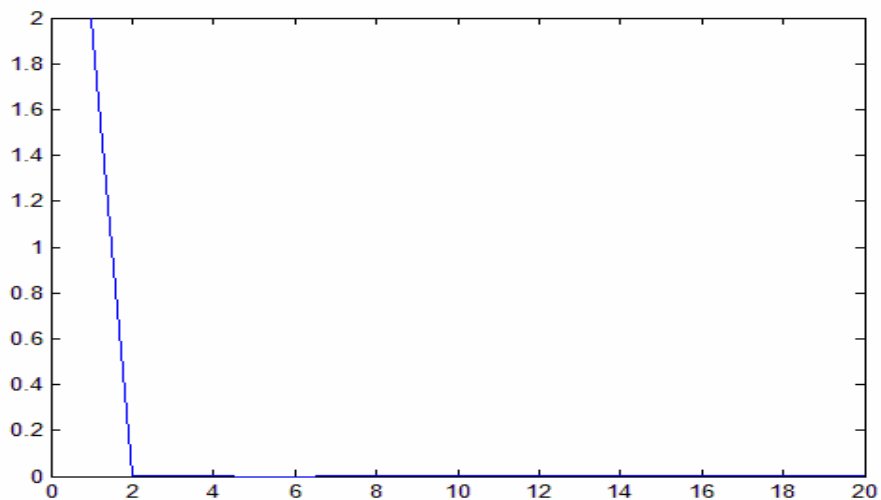


Figure 15 : L'évolution de l'erreur E_i en fonction de nombre d'itération ($N=20$)

Le cas traité dans la première expérience consiste à faire des projections en utilisant des spectres métamères sans aucune contrainte ce qui nécessite un nombre important de projections pour avoir des résultats satisfaisants, ce qui n'est pas évident à la pratique. Par contre, le cas traité dans la deuxième expérience (limité à quatre primaires d'affichage) est exceptionnel car toutes les projections se font sur le même hyperplan, donc une seule projection est suffisante pour avoir une fonction stable qui vérifie l'égalité des coordonnées pour tous les couples de spectres (S_1^i, S_2^i) construits par les primaires rgbp (fonction équivalente et proche de JV uniquement pour les spectres construits par rgbp).

Démonstration

Soient (S_1^i, S_2^i) , $i \in [0, N]$ des couples de spectre métamère par rapport JV tel que :

$$S_1^i(\lambda) = R_1^i.r(\lambda) + G_1^i.g(\lambda) + B_1^i.b(\lambda) \dots\dots\dots 1$$

$$S_2^i(\lambda) = R_2^i.r(\lambda) + G_2^i.g(\lambda) + B_2^i.b(\lambda) + P.p(\lambda) \dots\dots\dots 2$$

$$D^i(\lambda) = S_1^i(\lambda) - S_2^i(\lambda) \Leftrightarrow D^i(\lambda) = (R_1^i - R_2^i).r(\lambda) + (G_1^i - G_2^i).g(\lambda) + (B_1^i - B_2^i).b(\lambda) + P.p(\lambda) \dots\dots\dots 3$$

Soient x_{jv} , y_{jv} et z_{jv} les colors Matching de JV.

On a :

(S_1^i, S_2^i) , $i \in [0, N]$ métamères par rapport JV alors :

$$\langle D^i(\lambda), x_{jv}(\lambda) \rangle = 0, \dots\dots\dots 4$$

$$\langle D^i(\lambda), y_{jv}(\lambda) \rangle = 0, \dots\dots\dots 5$$

$$\langle D^i(\lambda), z_{jv}(\lambda) \rangle = 0, \dots\dots\dots 6$$

Remplaçons 3 dans 4, 5 et 6.

$$\langle x_{jv}(\lambda) . [(R_1^i - R_2^i).r(\lambda) + (G_1^i - G_2^i).g(\lambda) + (B_1^i - B_2^i).b(\lambda) - P.p(\lambda)] \rangle = 0 \dots\dots\dots 7$$

$$\langle y_{jv}(\lambda) . [(R_1^i - R_2^i).r(\lambda) + (G_1^i - G_2^i).g(\lambda) + (B_1^i - B_2^i).b(\lambda) - P.p(\lambda)] \rangle = 0 \dots\dots\dots 8$$

$$\langle z_{jv}(\lambda) . [(R_1^i - R_2^i).r(\lambda) + (G_1^i - G_2^i).g(\lambda) + (B_1^i - B_2^i).b(\lambda) - P.p(\lambda)] \rangle = 0 \dots\dots\dots 9$$

Posons $A_x^r = \langle x_{jv}(\lambda) . r(\lambda) \rangle$; $A_x^b = \langle x_{jv}(\lambda) . b(\lambda) \rangle$; $A_x^g = \langle x_{jv}(\lambda) . g(\lambda) \rangle$;

$$A_x^p = \langle x_{jv}(\lambda) . p(\lambda) \rangle .$$

$$A_x = \begin{bmatrix} A_x^r \\ A_x^g \\ A_x^b \\ A_x^p \end{bmatrix}; \quad A_y = \begin{bmatrix} A_y^r \\ A_y^g \\ A_y^b \\ A_y^p \end{bmatrix}; \quad A_z = \begin{bmatrix} A_z^r \\ A_z^g \\ A_z^b \\ A_z^p \end{bmatrix}$$

Le système (8. 9. 10) devient :

$$\begin{bmatrix} A_x^r \\ A_x^g \\ A_x^b \\ A_x^p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_1^i - R_2^i \\ G_1^i - G_2^i \\ B_1^i - B_2^i \\ P_{\max}^i \end{bmatrix} = 0 \dots\dots\dots 10$$

$$\begin{bmatrix} A_y^r \\ A_y^g \\ A_y^b \\ A_y^p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_1^i - R_2^i \\ G_1^i - G_2^i \\ B_1^i - B_2^i \\ P_{\max}^i \end{bmatrix} = 0 \dots\dots\dots 11$$

$$\begin{bmatrix} A_z^r \\ A_z^g \\ A_z^b \\ A_z^p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_1^i - R_2^i \\ G_1^i - G_2^i \\ B_1^i - B_2^i \\ P_{\max}^i \end{bmatrix} = 0 \dots\dots\dots 12$$

A_x, A_y, A_z sont des vecteurs linéairement indépendants, ils forment un sous espace E de dimensions 3. On remarque aussi que les vecteurs D^i forment un sous espace vectoriel F de dimensions 4 (à cause de l'indépendance linéaire des primaires $rgbp$).

A_x, A_y, A_z sont des résultats des produits scalaires $\langle x_{jv}(\lambda), D^i(\lambda) \rangle, \langle y_{jv}(\lambda), D^i(\lambda) \rangle$ et $\langle z_{jv}(\lambda), D^i(\lambda) \rangle$ respectivement, ce qui rend forcément $E \subset F$. à ce stade, d'après (10, 11, 12) on remarque $D^i(\lambda)$ qui est de dimension 4 est perpendiculaire sur les trois vecteurs linéairement indépendants donc $D^i(\lambda)$ est perpendiculaire sur l'espace E engendré par les trois vecteurs A_x, A_y, A_z , donc :

$$\text{Dim } F = \text{Dim } E + \text{Dim } E^\perp$$

$$\text{Dim } E^\perp = 1, \text{ c'est l'espace qui reste libre pour la droite } D^i \forall i.$$

Nous avons démontré que la droite D^i est de dimension 1 ce qui donne une explication aux résultats trouvés dans la deuxième expérience, tous les plans sur lesquels on fait les projections orthogonales (perpendiculaires à $D^i \forall i$) sont confondus, il suffit de faire une

seule projection pour avoir une solution globale qui vérifie le métamérisme pour tous les spectres $(S_1^i, S_2^i) \forall i$, générés par quatre primaire (rgbp).

II.2 Robustesse de l'algorithme

Les simulations ont montré que l'algorithme converge dès la première itération ce qui est vraiment intéressant. Par contre, ces simulations ne tiennent pas compte des différents bruits de mesure qui sont inévitables dans la pratique. Afin de tester la robustesse de notre algorithme et d'évaluer sa performance pour les manipulations on a affecté ce dernier par des bruits qui peuvent être rencontrés à la pratique afin de mieux évaluer ces performances.

Comme il est mentionné précédemment, l'expérience consiste à créer des spectres S_1^i avec trois primaires d'affichage et de chercher leurs spectres correspondants S_2^i avec quatre primaires (métamères visuellement). Lors de cette manipulation on peut tomber sur une plage de solution S_2^i pour chaque S_1^i dont la couleur de (S_1^i, S_2^i) paraît identique pour l'œil humain.

A ce stade, il n'est pas évident que le choix de l'observateur tombe exactement sur le bon spectre.

Les expérimentations ont montré que l'œil humain ne distingue deux couleurs que si leurs ∇E_{ab} est supérieur à 5 (voir I.5.4), pour cette raison on a affecté l'algorithme par des bruits afin de perturber les spectres sous la condition que ∇E_{ab} (entre les deux couleurs correspondante aux deux spectres métamères par rapport à aux fonctions de JV) reste inférieur ou égale à 5. Les bruits introduits dans nos mesures sont de type gaussien de loi normale centrée en zéro.

$$\nabla E_{ab} = [(\nabla_L)^2 + (\nabla_a)^2 + (\nabla_b)^2]$$

La figure 16 nous montre l'évolution de l'erreur E_i en fonction des itérations, on constate une stabilisation de cette dernière mais cette fois vers une valeur non nulle. Le tableau ci-dessous nous permet de bien évaluer les résultats des itérations, il montre les valeurs de ∇E_{ab} entre les spectres (S_1^i, S_2^i) par rapport les nouvelles fonctions trouvées (résultats des itérations) en fonction des nouvelles valeurs ∇E_{ab} par rapport à JV.

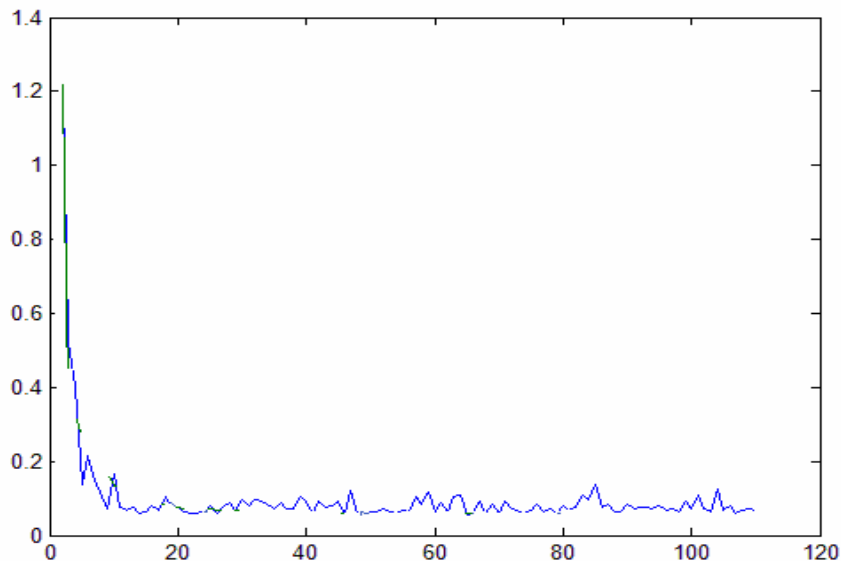


Figure 16

$\nabla E_{ab}(JV)$	5.00	4.66	3.11	3.92	2.66	1.11	4.44	4.05	1.3
$\nabla E_{ab}(\text{fonctions trouvées})$	4.73	5.05	2.22	4.06	3.16	2.09	4.03	4.8	2

Tableau 1 : ∇E_{ab} pour les nouvelles fonctions trouvées en fonction des ∇E_{ab} initiales (par rapport les fonctions de JV)

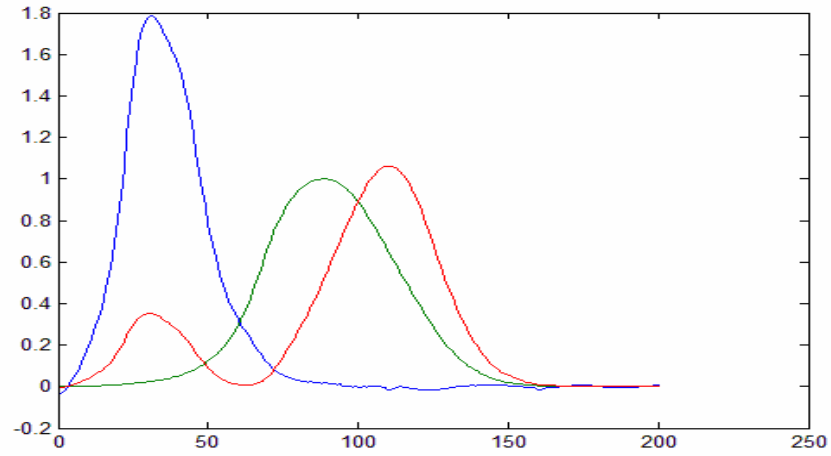


Figure 17: Color Matching resultants ($\nabla E_{ab} \leq 5$)

D'après les résultats du tableau 1 on peut remarquer que les valeurs de ∇E_{ab} qui correspondent aux spectres (S_1^i, S_2^i) par rapport les fonctions de JV sont très proches de celles qui correspondent aux (S_1^i, S_2^i) par rapport les nouvelles fonctions (résultats). Ces résultats sont acceptables selon notre point de vue car notre algorithme garde toujours ces performances.

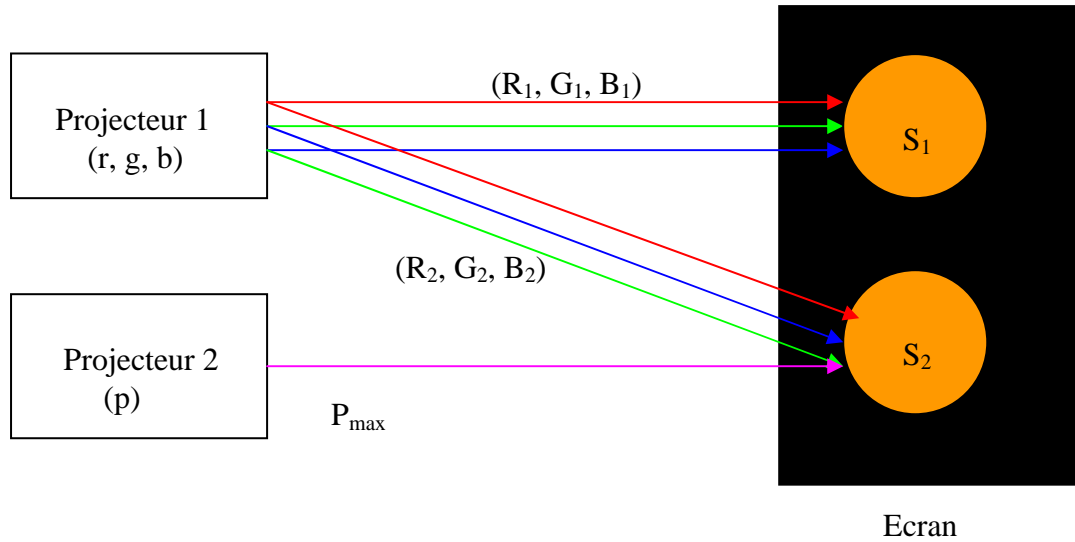
III. Résultats de manipulation

Nous avons montré dans les sections précédentes une convergence et stabilité de l'algorithme, dans cette section nous allons présenter les résultats obtenus dans les expérimentations.

III. 1 Schéma de manipulation

L'expérimentation consiste à créer N couples de spectres métamères (S_1^i, S_2^i) à base de 3 et 4 primaires comme il est mentionné précédemment. Cela est réalisé par deux projecteurs, le premier génère les trois primaires principales (r, g, b) et le deuxième génère uniquement la quatrième primaire p (Figure 18).

Une fois le spectre S_1 est fixé, une opération de matching est faite (chercher R_2, G_2, B_2 et P pour trouver S_2 métamère à S_1). Ce dernier aura forcément une forme différente par rapport celle de S_1 tant que p est différent de zéro (voir II.2). Les N couples tirés de cette expérience seront utilisés pour tourner notre algorithme.



R_1, G_1, B_1 et R_2, G_2, B_2, P sont les coefficients des primaires formant les deux spectres métamères visuellement S_1 et S_2 respectivement

Figure 18 : Schéma expliquant la manipulation

III. 2 Résultats obtenus

Après avoir réalisé l'expérience citée dans (III.1) nous avons réussi à récupérer quelques spectres métamères pour lesquels les appareils de mesure indiquent des coordonnées différentes sur le diagramme CIExyY sachant qu'ils sont visuellement identiques, cela est évidemment due à l'imprécision des Colors Matching utilisées par ces appareils.

Nous avons démontré dans II.2 que la droite $S_1^i - S_2^i$ est toujours constante $\forall i$. A ce stade, les simulations ont montré que l'itération à l'ordre $(i+1)$ qui correspond au couple (S_1^{i+1}, S_2^{i+1}) donne des résultats quasiment identiques si on initialise l'itération $(i+1)$ par CIE31 ou par le résultat de l'itération précédente (i) . Pour cela nous avons jugé inutile de faire les itérations sur les couples de spectres métamères que nous avons récupérés. Des projections sur chaque hyperplan ont été faites séparément sur les différents couples (S_1^i, S_2^i) afin de récupérer N Color Matching pour ces N couples de spectre. Parmi les N fonctions on choisi

celle qui donne des coordonnées quasiment identiques pour chaque couple $(S_1^i, S_2^i) \forall i$ métamères visuellement.

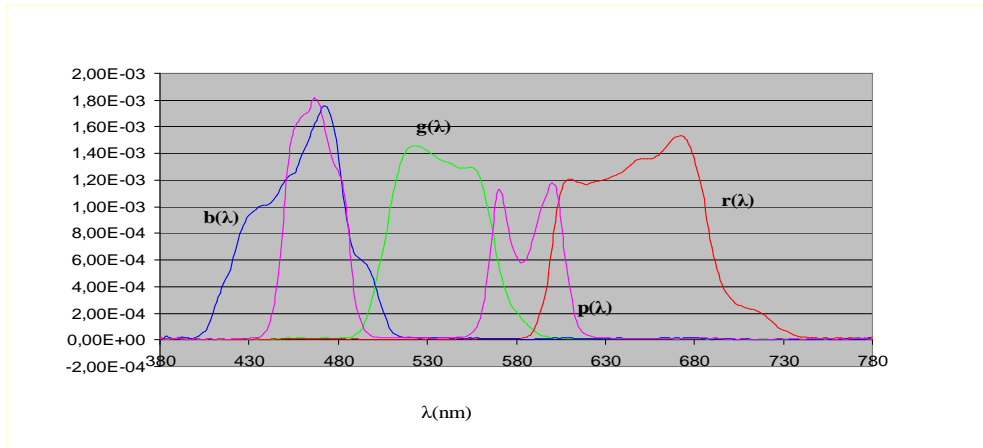
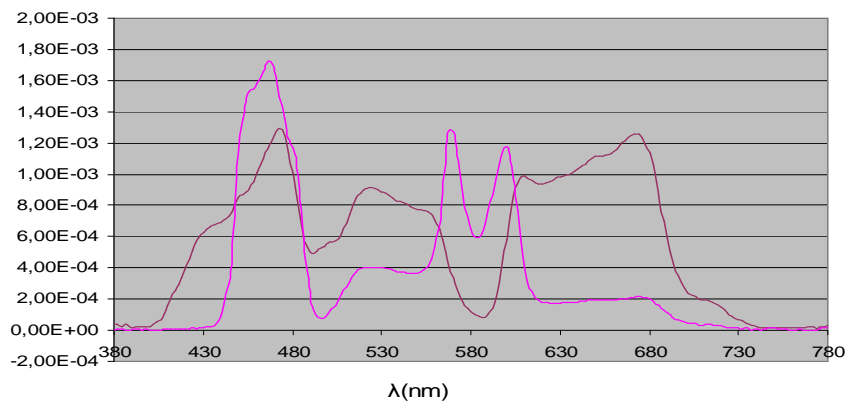
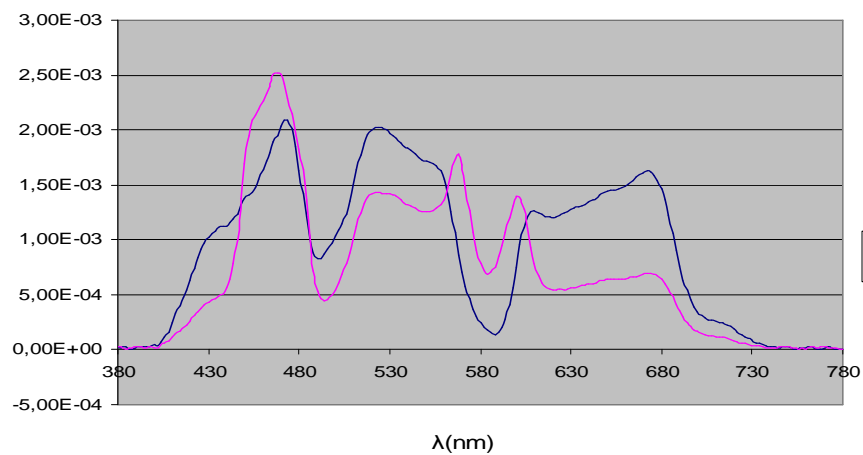


Figure 19 : Les quatre primaires utilisées (r, g, b, p)

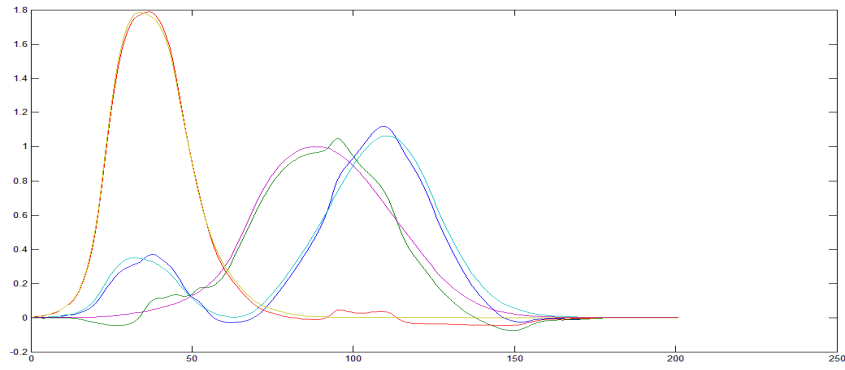


(a)

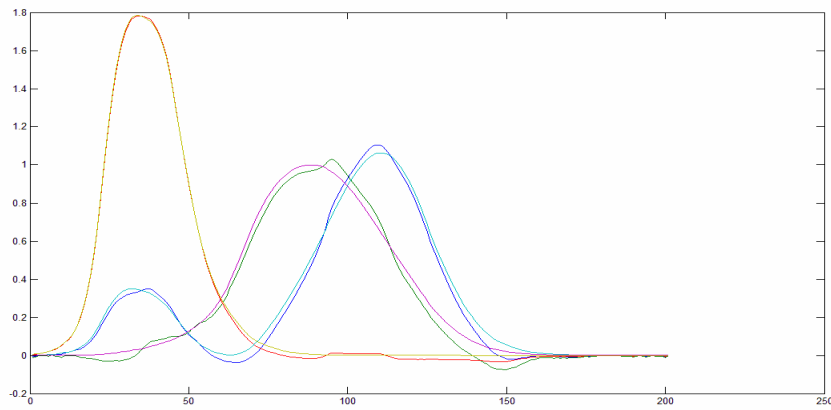


(b)

Figure 20 : (a), (b) exemple de quelques spectres métamères récupérés



(a)



(b)

Figure 21 : (a), (b) Color Matching Résultats

III. 3 Evaluation des résultats

Le tableau ci-dessous nous montre les coordonnées (x,y) de 3 couples métamères visuellement. Les coordonnées selon CIE31 et selon les nouvelles fonctions trouvées

Couple métamère	(S^1_1, S^1_2)	(S^2_1, S^2_2)	(S^3_1, S^3_2)
(x,y) selon CIE31	(0.32, 0.31) (0.31, 0.29)	(0.29,0.35)(0.29,0.33)	(0.33,0.38)(0.32,0.36)
(x,y) selon résultats	(0.31, 0.31) (0.31, 0.29)	(0.29,0.33)(0.29,0.33)	(0.33,0.38)(0.33,0.37)

Les résultats du tableau ci-dessus confirment notre démonstration, on remarque que les coordonnées des 3 spectres métamères visuellement sont proches entre eux en comparaison avec les coordonnées de CIE31.

Les résultats obtenus sont encourageants selon notre point de vue, une amélioration a été introduite sur les Color Matching. Par contre, ces résultats ne vérifient pas l'égalité des coordonnées pour tous les spectres visuellement métamères. Cela revient à l'observateur qui est incapable de distinguer entre deux couleurs dont la distance ∇_{Eab} est inférieur à 5.

Conclusion

Les Color Matching Functions sont la fondation de toute la colorimétrie moderne. Car depuis cette base, on est en mesure de placer toutes les couleurs spectrales dans une représentation géométrique. *En d'autres termes on va pouvoir construire un modèle colorimétrique représentatif de la vision humaine.*

Plusieurs Color Matching ont été proposés ces dernières décennies, la réalisation de ces dernières est subjective car elle est faite sur un nombre limité de personnes qui représentent un échantillon de la population. Durant nos expériences on a réussi à trouver plusieurs spectres dont leurs coordonnées selon CIE31 sont identiques par contre une différence remarquable entre les couleurs correspondantes à ces spectres, cela prouve vraiment ce qui a été dit précédemment.

Nous avons proposé un algorithme afin de remédier aux défauts des Color Matching existantes, une série de projections itératives est faite afin de s'approcher des fonctions idéales. L'algorithme est initialisé par les fonctions de CIE31 pour ne pas s'éloigner de la gamme de solution acceptables.

Nous avons démontré dans un deuxième temps que dans le cas limité à quatre primaires d'affichage tous les hyper plans sur lesquels on projette sont confondus donc une seule projection est suffisante pour avoir une convergence totale vers les fonctions recherchées. Finalement, l'algorithme est bruité par des bruits additifs afin d'évaluer sa robustesse.

Selon notre point de vue, l'implémentation de l'algorithme nous a permis d'introduire des améliorations importantes sur les Color Matching de CIE31, des coordonnées très proches entre les spectres métamères visuellement. Cependant les résultats trouvés restent toujours subjectifs car elles dépendent toujours de l'observateur.

Bibliographie

- [1] : Dictionnaire. Paris, Larousse.
- [2] : MARLENE VIGER, *l'utilisation des couleurs vives ou du contraste noir/blanc*. Faculté des études supérieures de l'Université Laval.
- [3] : Michel GUIFFES, *Apports de la Couleur et des Modèles de réflexion pour L'extraction et le suivi des primitives*, Thèse, Université de Poitier, 25 Avril 2002.
- [4] : Grégory BIZZARI, *Etude de mécanisme de dégradation du luminophore*. Thèse, Université Claude Bernard-LYON1, 15 décembre 2003.
- [5] : Alfred ANWANDER, *segmentation d'images couleur par un opérateur gradient vectoriel multi échelle et contour actif*, Thèse, INSA de Lyon, Décembre 2001.
- [6] : H.J.TRUSSELL, *DSP Solutions Run the Gamut for Color Systems*, IEEE signal Processing magazine.
- [7] : ALLEYSSON David, *le traitement du signal chromatique dans rétine : un modèle de Base pour la perception humaine des couleurs*, Thèse, Université de Joseph Fourier, 25 Avril 2002.