

Les espaces couleurs

N. Vandenbroucke^{1,2}

¹ École d'Ingénieurs du Pas-de-Calais
Campus de la Malassise
62967 Longuenesse Cedex – France

L. Macaire²

² LAGIS - UMR CNRS 8146
Cité Scientifique, Bâtiment P2
59655 Villeneuve d'Ascq cedex – France

Résumé

Par analogie avec le système visuel humain, la couleur des pixels d'une image acquise par une caméra couleur est codée dans l'espace RVB (rouge, vert, bleu) et ainsi associée à trois composantes couleurs. Mais il existe de nombreux autres espaces couleurs qui ont été construits en se basant sur différentes propriétés physiques, physiologiques ou psychologiques de la perception de la couleur.

Le choix d'un espace couleur est donc une étape importante en analyse d'images car il influence les résultats de l'analyse. Cependant, ce choix est rendu difficile de par la multitude et la diversité des espaces impliquant des présentations diverses, parfois discordantes.

L'objectif de ce cours est de donner une présentation synthétique des principaux espaces couleurs. Compte tenu de leurs propriétés, ces espaces sont regroupés par famille, à savoir :

- les espaces de primaires,
- les espaces luminance-chrominance,
- les espaces perceptuels,
- les espaces d'axes indépendants.

Pour chacun des espaces présentés, nous nous attacherons à spécifier leurs conditions d'utilisation et leurs limites en analyse d'images couleur.

Ce cours se terminera par une présentation des espaces couleurs hybrides qui sont constitués de composantes couleurs pouvant être issues de différents espaces. Il sera suivi par un cours sur les modèles d'apparence colorée qui sont des espaces couleurs plus complexes mais qui tiennent compte d'un plus grand nombre de phénomènes influençant la perception humaine des couleurs.

Mots clés

Système de représentation, Codage, Espaces hybrides.

1 L'image numérique couleur

Dans un système de vision industrielle, différents éléments, représentés sur la figure 1, interviennent pour restituer l'information couleur. Ce sont d'abord l'éclairage et les matériaux dont sont constitués les objets de la scène observée qui vont déterminer les propriétés physiques de la couleur. Les images couleur sont ensuite acquises généralement par une caméra vidéo couleur associée à un dispositif optique puis numérisées par un ordinateur via une *carte d'acqui-*

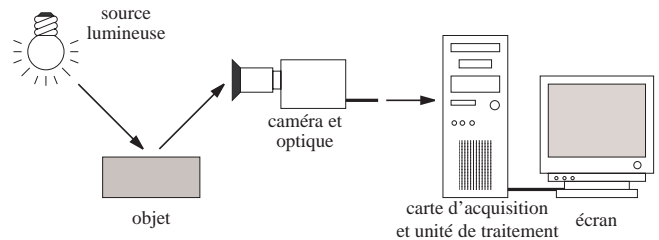


Figure 1 – Vision artificielle.

tion. La visualisation de ces images couleur est généralement réalisée sur un écran à tube cathodique via la *carte vidéo* de l'ordinateur. C'est donc l'ordinateur qui assure la liaison entre les entrées et les sorties associées aux *périphériques* ainsi que les traitements à appliquer sur les images. Il est important de noter que chacun de ces périphériques perçoit ou restitue la couleur différemment. Ils se différencient donc les uns des autres par les gammes de couleurs qu'ils peuvent acquérir ou reproduire. Cet ensemble de couleurs est appelé le *gamut*. Dès lors, il est indispensable de procéder à une phase de *calibrage* des périphériques de telle sorte que les couleurs soient toutes représentées de manière identique.

Afin de comprendre comment la couleur est représentée dans les images numériques, il est d'abord nécessaire d'expliquer comment elle est perçue par un observateur humain. Après avoir rappelé les principes de la vision humaine de la couleur, la chaîne d'acquisition des images couleur est ensuite présentée avant d'évoquer le système de visualisation.

1.1 Vision humaine de la couleur

La perception humaine de la couleur est la réponse que donne notre récepteur, l'oeil et notre système d'interprétation, le cerveau à une source lumineuse soit primaire soit secondaire quand elle est issue de la réflexion ou de la transmission par un matériau d'une source primaire. Outre la lumière et le matériau caractérisés par leurs propriétés physiques, l'oeil et le cerveau propre à chaque individu ajoutent un caractère physiologique et psychologique à la sensation de couleur [1, 2, 3, 4].

Propriétés physiques. Tout d'abord, il n'y aurait pas de couleur sans lumière. La lumière, première cause de la sensation de couleur, est définie comme un rayonnement élec-

tromagnétique, c'est-à-dire un ensemble de radiations ou d'ondes électromagnétiques produites par la propagation de particules lumineuses, les photons. Une radiation électromagnétique est caractérisée par sa longueur d'onde λ exprimée en mètres (m). Ce qui est appelée *lumière visible* correspond à la partie du rayonnement électromagnétique émis par le soleil à laquelle nos yeux sont sensibles (environ entre 380 et 780 nanomètres (nm)). La lumière peut se décomposer en un *spectre* de rayons lumineux à l'aide d'un prisme de verre. Chacun de ces rayons est constitué de radiations de même longueur d'onde, dites *monochromatiques*. Chaque source lumineuse se différencie ainsi par sa *répartition¹ spectrale d'énergie*, c'est-à-dire la quantité d'énergie émise par intervalle de longueurs d'onde (en général 1 nm). Certaines sources correspondant à des conditions d'observation courantes ont été normalisées par la CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) sous le nom d'*illuminants* [5]. Une autre caractéristique d'un illuminant est sa *température de couleur proximale*, c'est-à-dire la température à laquelle il faudrait porter un corps noir pour obtenir l'impression visuelle la plus proche de celle produite par la source lumineuse correspondante. Les illuminants A (lumière émise par un corps noir porté à la température de 2856 K), C (lumière directe du soleil à midi), D₆₅ (lumière du jour) et E (lumière d'énergie constante) sont les illuminants les plus utilisés.

Lorsque la source lumineuse éclaire un objet, les rayons lumineux émis par cette source sont ensuite réfléchis ou transmis par le matériau dont est composé l'objet. Ce matériau transforme ainsi les propriétés de la lumière pour donner naissance au *stimulus de couleur*². Lorsque la lumière entre en contact avec un matériau, deux phénomènes se produisent, une réflexion de surface des rayons lumineux incidents et une pénétration des rayons lumineux incidents dans le matériau. En pénétrant dans le matériau, la lumière rencontre les *pigments*, particules qui déterminent la couleur du matériau en absorbant, diffusant ou transmettant la lumière qui les atteint. En absorbant de façon sélective une partie des ondes électromagnétiques de la lumière, les pigments en modifient la répartition spectrale. La lumière qui n'est pas absorbée par les pigments est diffusée ou transmise vers l'extérieur du matériau et porte ainsi l'information de couleur de ce matériau. Selon sa nature, un matériau peut être caractérisé par sa capacité à réfléchir (réflectance) ou à transmettre (transmittance) l'énergie incidente³. La couleur d'un matériau dépend non seulement de ses caractéristiques mais aussi des conditions d'éclairage et d'observation (position, orientation, ...).

Propriétés physiologiques et psychologiques. Après avoir traversé différents éléments de l'oeil, le stimulus couleur arrive sur une zone photosensible localisée au fond de l'oeil, la rétine où viennent se projeter les images de la

scène observée [6]. La rétine contient deux types de cellules photosensibles : les *cônes* et les *bâtonnets*. Les bâtonnets permettent la vision nocturne (vision *scotopique*) tandis que les cônes permettent la vision diurne (vision *photopique*). Les cônes sont de trois types : les cônes S sensibles à des longueurs d'onde courtes (short) proches du bleu, les cônes M sensibles à des longueurs d'onde moyennes (medium) proches du vert et les cônes L sensibles à des longueurs d'onde longues (long) proches du rouge.

La perception humaine de la couleur est donc caractérisée par son aspect tridimensionnel. Les travaux de Young du tout début du XIX^{ème} siècle (vers 1802), repris en 1866 par Helmholtz, mettent en évidence que tout stimulus de couleur peut être reproduit par le mélange de trois autres stimuli : le rouge, le vert et le bleu, appelées *primaires* ou *stimuli de référence*. Ce principe de *trivariance visuelle* est connu sous les noms de *théorie de Young-Helmoltz*, *théorie trichromatique*, *théorie trichrome*, *trichromie* ou encore *synthèse* de la couleur. Trois primaires sont donc nécessaires et suffisantes pour reproduire toute couleur et la *colorimétrie*, science de la mesure de la couleur, est basée sur cette théorie [7, 8]. Les quantités de chacune des primaires nécessaires à reproduire une couleur sont appelées les *composantes trichromatiques*.

Il existe deux types de synthèse : la *synthèse additive* et la *synthèse soustractive*. La synthèse additive résulte de la juxtaposition de lumières colorées, correspondant chacune à une des trois primaires. Le mélange additif en quantités égales des trois primaires fournit le blanc. La synthèse additive est utilisée pour constituer l'image d'un téléviseur ou d'un moniteur couleur, celle d'une photographie ou celle acquise par une caméra couleur, par exemple. La synthèse soustractive, quant à elle, résulte du principe d'absorption sélective de la lumière par un matériau en fonction des différentes longueurs d'onde. Ainsi, de l'encre jaune déposée sur une feuille blanche soustrait la composante bleue à une lumière blanche. En effet, le mélange additif du vert et du rouge donne du jaune. La synthèse soustractive est utilisée en imprimerie et en peinture. Théoriquement, la synthèse soustractive de trois primaires doit permettre d'absorber une lumière blanche et donner ainsi le noir. En pratique, il est difficile d'obtenir le noir parfait et pour certaines applications le noir est ajouté comme primaire supplémentaire. Selon le type de synthèse, les primaires utilisées sont différentes. En synthèse additive, les primaires sont le rouge, le vert et le bleu tandis qu'en synthèse soustractive, ce sont le magenta, le cyan et le jaune. Les primaires relatives aux deux types de synthèse sont dites *complémentaires*. La synthèse additive de deux couleurs complémentaires donne le blanc. Ainsi le bleu est complémentaire du jaune puisque le jaune est lui-même obtenu par mélange additif du rouge et du vert.

Sur la base de la théorie trichromatique présentée par Young, Grassman propose en 1853 des lois consignnant les propriétés fondamentales des mélanges de couleurs qui sont complétées par Abney en 1913. Ces lois permettent

¹Les termes de *distribution* ou de *densité* sont également utilisés.

²Il est aussi dénommé *stimulus lumineux* ou *stimulus visuel*.

³Par opposition, il peut être aussi caractérisé par sa capacité à absorber (absorption) l'énergie incidente.

d'appliquer les propriétés additives, associatives, multiplicatives et transitives des égalités algébriques aux égalités colorimétriques. Elles sont aujourd'hui les bases mathématiques de la colorimétrie.

À l'entrée du nerf optique, notre œil convertit un stimulus de couleur en un signal couleur. Le nerf optique achemine le signal électrique associé à ce signal couleur vers le corps genouillé externe⁴, relais chargé d'établir les connexions avec les fibres allant au cerveau. Une première analyse des données y est effectuée. Il semblerait, d'après la théorie des couleurs opposées de Hering (1875), que le signal couleur y soit codé sous forme antagoniste, c'est-à-dire par un signal achromatique (opposition noir-blanc), par un signal d'opposition rouge-vert et par un signal d'opposition bleu-jaune. Ces signaux sont enfin transmis dans une autre zone du cerveau, le cortex visuel où s'effectue l'interprétation de la couleur.

La perception humaine de la couleur est une réaction subjective à la stimulation de l'œil et il semble mieux adapté de caractériser une couleur en termes de *luminosité*, de *teinte* et de *saturation*. La luminosité est l'attribut d'une sensation visuelle selon laquelle une surface paraît émettre plus ou moins de lumière. Elle correspond donc à une sensation traduite par des vocables comme clair, foncé, lumineux, sombre et caractérise le niveau lumineux d'un stimulus de couleur. Le concept de luminosité a un sens assez large et beaucoup de grandeurs physiques permettent de la quantifier. Ainsi, les termes *intensité*, *éclairage*, *luminance*, *clarté*, ... sont souvent employés dans la littérature, pour désigner la notion de luminosité. La teinte ou *tonalité chromatique* correspond aux dénominations des couleurs telles que rouge, vert, bleu, jaune, ... Elle correspond à la *longueur d'onde dominante* d'un stimulus de couleur, c'est-à-dire la longueur d'onde pour laquelle l'énergie correspondante est la plus élevée. Cette longueur d'onde caractérise donc la teinte, mais le plus souvent, la teinte est représentée par un angle appelé *angle de teinte*. Le blanc, le noir ou les gris sont des couleurs qui n'ont pas de teinte. Elles sont dites *neutres* ou *achromatiques*. La saturation est une grandeur permettant d'estimer le *niveau de coloration* d'une teinte indépendamment de la luminosité. Elle est souvent confondue avec le *chroma* qui est aussi une grandeur correspondant à une estimation du niveau de coloration d'une teinte mais qui dépend de la luminosité. La saturation représente la *pureté* de la couleur perçue comme vive, pâle, terne, ...

1.2 Acquisition d'images couleur

L'œil et le cerveau sont respectivement le récepteur et le système d'interprétation qui répondent aux stimuli de couleur dans la vision humaine. Dans le cadre de la vision industrielle, le récepteur est une caméra couleur et le système d'interprétation est un ordinateur.

⁴ou corps genouillé latéral.

Les caméras couleur. L'élément principal d'une caméra est le capteur⁵ d'images [9, 10]. Celui-ci est constitué d'un ensemble de photorécepteurs qui convertissent le flux lumineux reçu en une information électrique de sorte à fournir un ou plusieurs signaux vidéo au système de numérisation⁶. Ces photorécepteurs sont disposés soit selon une droite (caméra linéaire), soit selon un plan (caméra matricielle). L'image ainsi obtenue est constituée d'un ensemble de points appelés *pixels*⁷ qui correspondent aux photorécepteurs.

La technologie la plus répandue pour la réalisation des capteurs d'images est actuellement la technologie CCD (Charged Coupled Device)⁸ dont les photorécepteurs produisent une tension croissante en fonction de l'intensité lumineuse qu'ils reçoivent. L'information couleur est décomposée par l'utilisation de trois filtres sensibles aux longueurs d'onde proches du rouge, du vert et du bleu par analogie avec le système de perception humaine.

Il existe essentiellement deux types de caméras couleur CCD :

- Les caméras mono-CCD qui sont équipées d'un seul capteur CCD et de trois filtres colorés entrelacés. Ainsi, les photorécepteurs qui se suivent sur une ligne du capteur sont équipés à tour de rôle de filtres rouge, vert et bleu soit selon des lignes verticales, soit selon une structure mosaïque. L'information couleur est donc obtenue par plusieurs photorécepteurs localisés à des sites différents, ce qui entraîne des aberrations chromatiques et une perte de résolution compensée par un traitement appelé interpolation de sorte à restituer les informations couleurs manquantes. D'autres technologies basées sur une seule matrice CCD sont proposées afin de résoudre ces problèmes, tels que le déplacement des photorécepteurs ou l'utilisation d'une caméra monochrome associée à une roue de filtres couleurs. Mais le déplacement du capteur ou des filtres augmente le temps nécessaire à une acquisition, le risque de problèmes mécaniques et le coût de ces caméras.
- Les caméras tri-CCD qui sont équipées de trois capteurs CCD montés sur un système optique à base de prismes. Chacun des trois capteurs reçoit respectivement les composantes rouge, vert et bleu de l'image grâce à des filtres dichroïques fixés aux prismes. La couleur d'un pixel est fournie par la réponse de trois photorécepteurs, ce qui permet une meilleure résolution et une meilleure qualité d'image que celle fournies par les caméras mono-CCD. Cette technologie peut engendrer le phénomène de *shading* qui se manifeste par l'apparition d'un dégradé de couleur sur une image d'un fond blanc lorsque les rayons lumineux frappant les filtres dichroïques ne sont pas parfaitement parallèles.

Les caméras sont généralement munies d'un filtre infra-

⁵analyseur ou senseur

⁶Le terme *discrétisation* est aussi utilisé.

⁷PICTure ELeMent.

⁸La technologie à tubes n'est plus très utilisée et la technologie CMOS commence à peine son essor.

rouge car les capteurs CCD sont sensibles à des longueurs d'onde se situant au delà du domaine du visible.

Numérisation des images couleur.

Quantification Le système de numérisation, constitué d'une carte d'acquisition extérieure aux caméras analogiques et intégrée aux caméras numériques, réalise la conversion d'un ou plusieurs signaux vidéo en un triplet de valeurs numériques manipulables par l'ordinateur. Il s'agit de la quantification de l'information couleur. Ces signaux vidéo sont, soit un seul signal composite qui est formé des trois signaux primaires rouge, vert et bleu issus des capteurs CCD et codé selon les normes de différents standards, soit les trois signaux primaires eux-mêmes.

Les images couleur sont acquises sous la forme de trois composantes rouge (R pour red), verte (G pour green) et bleue (B pour blue). Ainsi, la numérisation des images couleur consiste à associer à chaque pixel de l'image trois valeurs numériques correspondant aux composantes trichromatiques de la couleur qu'il représente. Une image couleur numérique est donc une matrice de pixels qui sont localisés par leurs coordonnées dans le plan défini par l'image. La couleur de chaque pixel est définie par un triplet de valeurs correspondant aux composantes R , G et B . En règle générale, chacune des composantes R , G et B est codée sur 8 bits et peut donc prendre 256 valeurs. Une couleur est donc codée sur 24 bits, ce qui permet de représenter exactement par synthèse additive 2^{24} , soit 16 777 216 couleurs. Or, il est estimé très approximativement que le système de perception humaine permet de distinguer un peu plus de 350 000 couleurs [11]. Paradoxalement, même si ce type de quantification semble représenter plus de couleurs que l'homme ne peut en percevoir, il n'y a cependant pas uniformité de la sensibilité visuelle. Ainsi, sur certaines plages de couleurs, il est nécessaire de coder chaque composante sur 12 bits afin de différencier toutes les couleurs que le système visuel humain peut percevoir.

La couleur de chaque pixel d'une image acquise est ainsi quantifiée et stockée dans la mémoire de la carte d'acquisition.

Calibrage Les valeurs numériques fournies par le système de numérisation dépendent du matériel utilisé et des conditions d'éclairage et d'observation. Il est rare que ces valeurs numériques soient égales aux valeurs mesurées par un appareil de mesure de la couleur comme un colorimètre ou un spectrocolorimètre. Ainsi, il est nécessaire d'établir une correspondance entre les composantes trichromatiques théoriques d'une couleur de référence connue et observée par la caméra sous un éclairage spécifique et les valeurs fournies par le système de numérisation ; l'idéal étant qu'il y ait une égalité parfaite entre ces deux jeux de valeurs afin de rester indépendant du matériel et de l'environnement. Cette mise en correspondance constitue le calibrage du système d'acquisition et s'effectue en plusieurs phases.

Une fois le matériel et le type d'éclairage choisis, il est d'abord nécessaire de réaliser la *balance des blancs*. L'ac-

quisition des images d'une mire blanche et d'une mire noire est réalisée afin d'établir une relation croissante du noir au blanc modélisant la réponse de chaque capteur CCD ainsi que des tables de conversion appelées LUT (*Look Up Table*) qui permettront ensuite de faire correspondre, par exemple, le triplet (255, 255, 255) à un blanc. Cependant, la transition du noir au blanc ne se fait pas réellement de façon linéaire et il est préférable de réaliser aussi l'acquisition de niveaux gris intermédiaires afin d'être plus proche du modèle, c'est la *balance des gris*. Pour cela, une mire avec différentes nuances de gris, telle la mire de Macbeth constituée de 24 couleurs dont 6 nuances de gris [12, 13] est utilisée. Ensuite, le calibrage du système d'acquisition consiste à :

- acquérir l'image de différents objets colorés de référence qui constituent une mire et dont les composantes dans un système indépendant du matériel et de l'environnement sont connues. La mire de Macbeth ou la mire IT8 sont ainsi souvent utilisées.
- établir la relation entre les valeurs fournies par le système d'acquisition et les valeurs de référence. Cette caractérisation peut être réalisée par des méthodes heuristiques ou des méthodes numériques classiques telles que les méthodes de régression linéaire ou polynomiale.

1.3 Visualisation d'images couleur

Affichage. L'affichage des images acquises est généralement réalisé par un écran à tube cathodique, appelé *moniteur CRT* (Cathodic Ray Tube). L'écran comporte une série de bandes colorées enduites de phosphores groupées par trois, une pour chacune des couleurs primaires (rouge, vert et bleu). Le tube cathodique a pour rôle de bombarder l'écran avec un faisceau d'électrons qui va stimuler chacune des trois bandes de phosphores de façon plus ou moins intense et produire, selon le principe de la synthèse additive, la sensation de couleur. Pour réaliser l'affichage d'une image couleur sur un écran, les valeurs numériques des composantes trichromatiques des pixels sont chargées dans la mémoire de la carte vidéo, puis converties en données analogiques permettant ainsi de spécifier l'intensité du faisceau. Cette intensité n'est pas proportionnelle à la tension générée par la carte vidéo mais suit une loi exponentielle définie par la fonction $\Gamma(x) = x^\gamma$ où la valeur de γ se situe généralement entre 2 et 3. Il convient donc d'appliquer une loi inverse afin de corriger cette non linéarité au moment de l'affichage. Cette opération est connue sous le nom de *correction gamma*.

Correction Gamma. Généralement, le système d'acquisition assure la correction gamma qui consiste à compenser la non-linéarité de la sensibilité des tubes cathodiques en agissant sur les signaux vidéo acquis. Ce sont donc les valeurs des composantes trichromatiques R , G et B acquises par la caméra qui sont gamma corrigées.

Par exemple, les chaînes de télévision transmettent des signaux qui sont destinés à être affichés sur des téléviseurs à tube cathodique et qui sont donc gamma corrigés. Cette

correction dépend des luminophores utilisés qui fixent les primaires nécessaires à la synthèse additive de l'image couleur et qui n'est pas la même selon les pays. Ainsi, les téléviseurs américains répondent à la norme NTSC (National Television Standards Committee) qui utilise les primaires fixées par la FCC (Federal Communications Commission) et qui diffusent des images en 525 lignes. Les téléviseurs européens répondent à la norme allemande PAL (Phase Alternation by Line) fixée par l'EBU (European Broadcasting Union ou Union Européenne de Radio-télévision (UER)) ou à la norme française SECAM (SÉquentiel Couleur À Mémoire) qui diffusent des images en 625 lignes. Pour la norme NTSC $\gamma = 2,2$ et pour la norme PAL $\gamma = 2,8$.

Les caméras couleur offrent souvent la possibilité d'effectuer la correction gamma sur les signaux rouge, vert et bleu qu'elles délivrent. Ce réglage de la caméra ne servant qu'à corriger les défauts d'affichage d'un écran, il est inutile de l'effectuer dans le cadre du traitement d'images numériques. En effet, il s'agit dans ce cas de manipuler des images issues d'un système d'acquisition correctement calibré dont la couleur des pixels doit correspondre à la couleur des éléments de la scène. En revanche, dans le cas où il faut réaliser des mesures colorimétriques sur l'image affichée par un écran ou dans un souci de rendu des couleurs sur un écran, il est nécessaire d'appliquer la correction gamma sur les images couleur.

Lorsque les conditions d'acquisition ne sont pas précisées, il est difficile de déterminer si les images couleur à analyser ont subi une correction gamma ou non. C'est le cas, par exemple des images rapatriées sur l'internet. Si les images sont gamma corrigées, il convient alors de réaliser l'opération approximativement inverse afin de manipuler des images qui ne soient plus gamma corrigées. Poynton a largement étudié la correction gamma [14]. Il constate une stupéfiante coïncidence entre la fonction de transfert d'un tube cathodique et celle de notre oeil qui suit une loi approximativement inverse. En effet, la réponse de notre oeil à un stimulus lumineux n'est pas non plus proportionnelle à son intensité mais suit une loi logarithmique et la loi de correction gamma est une loi en puissance très proche d'une loi logarithmique. Ainsi, l'application d'une correction gamma sur les composantes fournies par le système d'acquisition permet de disposer d'une représentation de la couleur plus proche de la perception humaine. Selon Poynton, si la correction gamma n'avait pas été nécessaire pour des raisons physiques liées à la technologie des tubes cathodiques, elle aurait pu être inventée pour des raisons perceptuelles.

Calibrage de l'écran. Comme pour l'acquisition des images couleur, se pose le problème de faire correspondre les composantes trichromatiques du stimulus émis par un écran aux composantes trichromatiques réelles de la couleur à visualiser. Ici encore, c'est un problème de calibrage. Ce calibrage peut être effectué par une série de mesures sur l'écran afin de déterminer les primaires et le blanc de référence correspondant [12]. Connaissant les valeurs nu-

mériques chargées dans la mémoire vidéo et correspondant à chaque mesure, il suffit alors de déterminer la valeur de γ permettant de relier les valeurs mesurées aux valeurs numériques de la mémoire vidéo. En général, il est possible de connaître le blanc de référence grâce à la documentation technique du moniteur. En revanche, les primaires doivent être mesurées pour calibrer l'écran correctement. Si le matériel adéquat n'est pas disponible, il est possible de se reporter aux valeurs préconisées par la CIE.

2 Les systèmes de représentation de la couleur

Il existe de nombreux systèmes de représentation de la couleur ainsi que de nombreuses définitions pour un même système.

Les premiers systèmes proposés pour manipuler la couleur furent basées sur des impressions psychosensorielles afin d'élaborer des classifications de couleurs. Ce sont donc des systèmes ordonnés de couleurs qui sont des représentations géométriques visuelles sous forme de planches, de nuanciers, de collections ou d'atlas. Ces représentations sont en majorité réalisées dans des espaces à trois dimensions et les unités des composantes couleur sont purement conventionnelles car elles ne servent qu'à repérer une couleur à l'intérieur d'un solide dans lequel elle est inscrite. Ces systèmes comme le système Munsell, le système NCS (Natural Color System), le système OSA (Optical Society of America) ou le système DIN (Deutsches Institut für Normung) dont l'usage est le plus répandu sont peu utilisés dans le domaine de l'analyse d'images couleur.

Les systèmes utilisés en analyse d'images couleur sont des systèmes dans lesquels chaque couleur est définie numériquement de sorte de disposer d'une métrique permettant d'évaluer leur similarité.

Cette partie tente de faire une synthèse des systèmes de représentation de la couleur les plus utilisés dans le cadre de l'analyse d'images couleur. Suivant leurs caractéristiques, ils sont ici regroupés en quatre familles :

- les systèmes de primaires,
- les systèmes luminance-chrominance,
- les systèmes perceptuels,
- les systèmes d'axes indépendants.

2.1 Les systèmes de primaires

La théorie trichrome des récepteurs visuels de Young-Helmholtz réduit la perception de la couleur à la synthèse de trois stimuli. Ainsi, la représentation de la couleur dépend de trois primaires notées $[R_*]$, $[G_*]$ et $[B_*]$, l'indice $*$ faisant référence à un standard, une norme ou une commission ayant défini le jeu de primaires. Comme la couleur d'un objet dépend de son éclairage, il est nécessaire de modéliser cet éclairage par un blanc de référence. Les valeurs unitaires des primaires sont alors fixées par rapport à ce blanc de référence ⁹ noté $[W]$ de telle sorte que

⁹Le blanc de référence est aussi appelé *stimulus de base*.

le mélange additif en quantités égales des trois primaires fournit ce blanc. Le choix des primaires ainsi que du blanc de référence n'est pas unique. Cependant, aucune des trois couleurs primaires choisies ne doit résulter du mélange des deux autres. C'est pourquoi les primaires sont souvent des stimuli monochromatiques dont les longueurs d'onde sont respectivement proches du rouge, du vert et du bleu par analogie aux trois types de cônes de l'oeil humain. En général, le blanc de référence choisi correspond à un illuminant normalisé. Les paragraphes qui suivent présentent différents systèmes de primaires.

Le système (R, G, B) de la CIE noté (R_C, G_C, B_C) . Le système (R_C, G_C, B_C) de la CIE, défini en 1931, découle des expériences d'égalisation menées par Wright et Guild qui utilisent les trois primaires, notées respectivement $[R_C]$, $[G_C]$ et $[B_C]$ ¹⁰, comme les stimuli de couleur monochromatiques rouge, vert et bleu de longueurs d'onde respectives 700,0 nm, 546,1 nm et 435,8 nm pour reproduire l'ensemble des couleurs du spectre visible [15]. Aux trois primaires $[R_C]$, $[G_C]$ et $[B_C]$, correspondent respectivement trois vecteurs directeurs normés \vec{R}_C , \vec{G}_C et \vec{B}_C qui forment le repère d'un espace vectoriel d'origine O . Dans cet espace, chaque stimulus de couleur $[C]$ est ainsi représentée par un point C qui définit le vecteur couleur \vec{OC} . Les coordonnées de ce vecteur sont les composantes trichromatiques R_C , G_C et B_C . Certains de ces points ont des coordonnées négatives puisqu'ils correspondent à des stimuli de couleur non réalisables¹¹ par synthèse additive. Les points correspondant à des stimuli de couleur dont les composantes trichromatiques sont positives sont contenus dans un cube, connu sous le nom de *cube des couleurs* (voir figure 2). L'origine O correspond au noir ($R_C = G_C = B_C =$

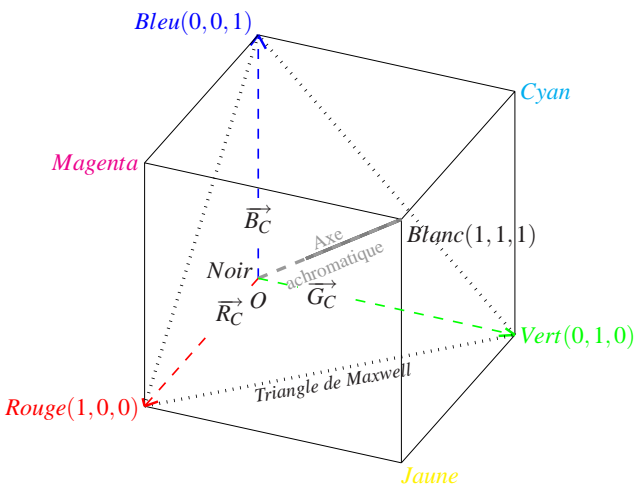


Figure 2 – Cube des couleurs.

¹⁰L'indice C est utilisé en référence à la CIE. Il est très fréquent que la notation des primaires soit confondue avec celle des composantes trichromatiques. Les primaires rouge, verte et bleue sont donc souvent notées R_C , G_C et B_C .

¹¹Les termes reproductibles ou égalisables sont également employés.

0) tandis que le blanc de référence est défini par le mélange unitaire des trois primaires ($R_C = G_C = B_C = 1$).

La droite passant par les points *Noir* et *Blanc* est appelée *axe des gris*, *axe des couleurs neutres* ou encore *axe achromatique*. En effet, les points de cette droite représentent des nuances de gris allant du noir au blanc.

Les composantes trichromatiques d'un stimulus de couleur sont liées à sa luminosité. Deux stimuli de couleur peuvent ainsi posséder le même caractère chromatique, appelé *chrominance*, mais avoir des composantes trichromatiques R_C , G_C et B_C différentes à cause de leur luminosité. Afin d'obtenir des composantes qui ne tiennent compte que de la chrominance, il convient donc de normaliser les valeurs des composantes trichromatiques par rapport à la luminosité. Ceci est réalisé en divisant chaque composante trichromatique par la somme des trois. Les composantes ainsi obtenues sont appelées *coordonnées trichromatiques*, *coordonnées réduites* ou encore *composantes normalisées*. Elles sont notées r_C , g_C , b_C et sont définies par :

$$\begin{cases} r_C = \frac{R_C}{R_C + G_C + B_C}, \\ g_C = \frac{G_C}{R_C + G_C + B_C}, \\ b_C = \frac{B_C}{R_C + G_C + B_C}. \end{cases} \quad (1)$$

La transformation définie par l'équation 1 correspond à la projection du point C sur le plan normal à l'axe achromatique d'équation : $R_C + G_C + B_C = 1$. Les intersections de ce plan avec le cube des couleurs forment un triangle équilatéral dont les sommets sont les trois primaires $[R_C]$, $[G_C]$ et $[B_C]$. Ce triangle est appelé *triangle de Maxwell*, ou encore *triangle des couleurs*. Il est représenté en pointillé sur la figure 2.

L'espace de représentation associé aux coordonnées trichromatiques est appelé l'espace (R_C, G_C, B_C) normalisé. Il est noté (r_C, g_C, b_C) . Comme $r_C + g_C + b_C = 1$, deux composantes suffisent à représenter la chrominance d'une couleur. Ainsi, Wright et Guild ont proposé un diagramme appelé *diagramme de chromaticité* (r_C, g_C) .

La figure 3 représente le diagramme de chromaticité qui contient la courbe passant par les points correspondant à des stimuli de couleur monochromatiques de longueur d'onde variant de 380 nm à 780 nm. Les deux extrémités de cette courbe, appelée *lieu spectral*, *lieu du spectre* ou encore *spectrum locus*, sont reliées par une droite appelée *droite des pourpres*. De ce fait, toutes les couleurs du spectre visible sont contenues dans le lieu ainsi construit. Sur cette figure, le triangle de Maxwell n'englobe pas toutes les couleurs du visible car certaines d'entre elles ne sont pas physiquement réalisables par synthèse additive et possèdent des coordonnées trichromatiques négatives.

Autres systèmes (R, G, B) . Des primaires autres que celles définies par la CIE peuvent être mises en oeuvre pour manipuler la couleur et être utilisées dans le cadre de la colorimétrie.

Par exemple, les téléviseurs couleur analogiques utilisent des tubes cathodiques dont les luminophores émettent dans

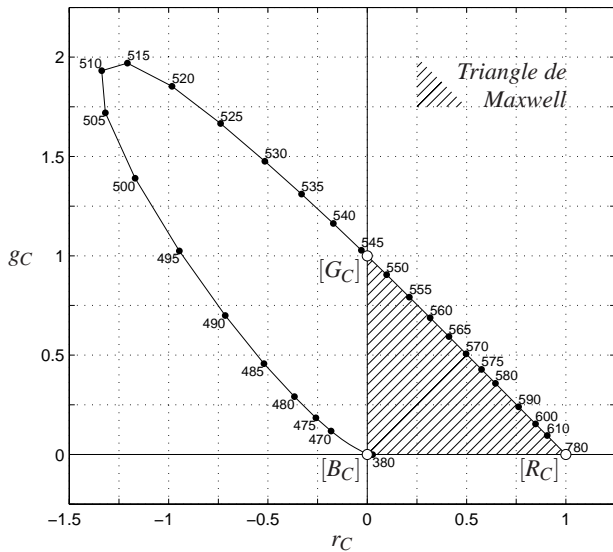


Figure 3 – Diagramme de chromaticité (r_C, g_C) de la CIE.

des longueurs d'onde différentes de celles définies par la CIE. Le blanc de référence utilisé n'est pas non plus le même selon les différentes normes. Ainsi, la norme NTSC utilise l'illuminant C comme blanc de référence alors que les normes PAL et SECAM utilisent l'illuminant D₆₅. De même, les moniteurs couleur CRT répondent aux normes de leur constructeur et utilisent donc des primaires différentes de celles employées en télévision ou de celles définies par la CIE.

Dans le domaine de l'analyse d'images, les composantes trichromatiques R, G et B liées à la couleur d'un pixel dépendent du système d'acquisition utilisé et en particulier de la caméra. Ainsi, avec des conditions d'éclairage et d'observation identiques, une même couleur n'aura pas les mêmes composantes trichromatiques selon le modèle de caméra utilisé.

Étant donnée la multitude de systèmes (R, G, B) existants, les notations du tableau 1 seront utilisées dans la suite de cet article pour désigner le type de système (R, G, B) considéré. La notation (R_*, G_*, B_*) est employée pour désigner

Standard	Composantes trichromatiques
Caméra	(R, G, B)
CIE	(R_C, G_C, B_C)
FCC (NTSC)	(R_F, G_F, B_F)
EBU (PAL)	(R_E, G_E, B_E)
Moniteur	(R_M, G_M, B_M)

Tableau 1 – Différentes notations de systèmes (R_*, G_*, B_*) .

l'un de ces systèmes.

Quelque soit le standard utilisé, il est possible de réaliser un changement de primaires, qu'elles soient monochromatiques ou non, par une simple relation matricielle. Ainsi, il existe toujours une *matrice de passage* \mathbf{P} permettant le

changement de système (R_*, G_*, B_*) [16, 17].

À chaque système de primaires, il est alors possible d'associer des coordonnées trichromatiques et un cube des couleurs de la même façon que précédemment avec le système (R_C, G_C, B_C) .

Le système (X, Y, Z) de la CIE. Les systèmes (R_*, G_*, B_*) présentent quelques inconvénients majeurs :

- Les coordonnées et les composantes trichromatiques peuvent prendre des valeurs négatives.
- Les valeurs des composantes trichromatiques sont liées à la luminance qui est une combinaison linéaire des composantes trichromatiques et non une composante elle-même.
- Il existe une multitude de systèmes (R_*, G_*, B_*) .

En 1931, la CIE établit le système de référence colorimétrique (X, Y, Z) dont les primaires sont virtuelles (ou imaginaires) et permettent de pallier les inconvénients du système (R_C, G_C, B_C) . Le système (X, Y, Z) correspond donc à un changement de primaires et s'obtient ainsi à l'aide d'une simple matrice de passage à partir du système (R_C, G_C, B_C) ou de n'importe quel autre système (R_*, G_*, B_*) .

Les primaires $[X], [Y]$ et $[Z]$, dites *primaires de référence*, ont été créées de telle sorte que toutes les couleurs soient exprimées par des composantes trichromatiques positives et de telle sorte que l'une de ces primaires, la primaire $[Y]$, représente une information de luminosité (plus précisément, Y représente la luminance lumineuse).

De même que pour le système (R_C, G_C, B_C) , la CIE a défini les coordonnées trichromatiques du système (X, Y, Z) qui se calculent à partir des composantes trichromatiques X, Y et Z par les relations de l'équation 2 et qui forment le système (X, Y, Z) normalisé noté (x, y, z) .

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X+Y+Z}, \\ y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \\ z = \frac{Z}{X+Y+Z}. \end{cases} \quad (2)$$

Comme $x + y + z = 1$, z peut être déduit à partir de x et y , ce qui permet de représenter la couleur dans un plan appelé le diagramme de chromaticité (x, y) (voir figure 4). Ce diagramme est construit de la même façon que le diagramme de chromaticité (r_C, g_C) et toutes les couleurs sont contenues dans l'aire délimitée par le lieu du spectre et la droite des pourpres. Les couleurs physiquement réalisables par synthèse additive sont contenues dans le triangle des couleurs dont les sommets sont les trois primaires de coordonnées $[X](1, 0)$, $[Y](0, 1)$ et $[Z](0, 0)$. Ce triangle englobe toutes les couleurs du visible mais aussi d'autres couleurs sans réalité physique qui peuvent être qualifiées d'imaginaires [12]. Ce diagramme montre bien que les primaires de référence $[X], [Y]$ et $[Z]$ permettent de reproduire toutes les couleurs du visible par synthèse additive contrairement aux primaires $[R_C], [G_C]$ et $[B_C]$.

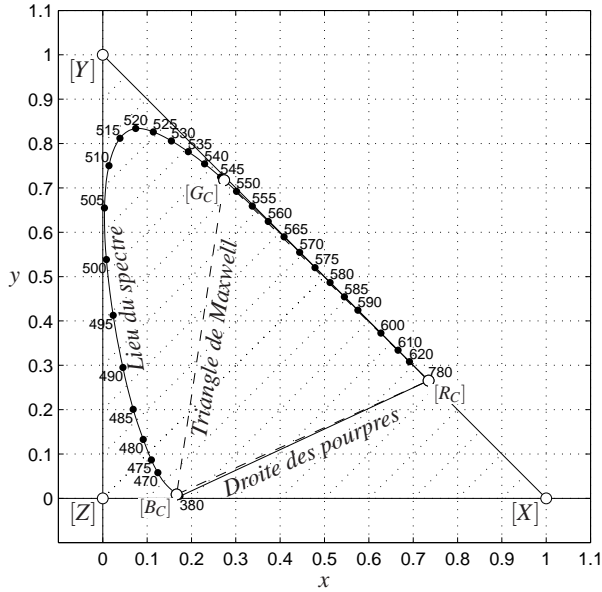


Figure 4 – Diagramme de chromaticité (x,y) .

La transformation d'un des systèmes (R_*, G_*, B_*) vers le système de référence colorimétrique (X, Y, Z) de la CIE correspond à un changement de primaires et peut donc s'exprimer sous forme matricielle de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{P} \times \begin{bmatrix} R_* \\ G_* \\ B_* \end{bmatrix}, \quad (3)$$

avec :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Les coefficients de la matrice \mathbf{P} sont nécessairement déterminés par rapport à un blanc de référence qui conditionne les valeurs unitaires associées aux primaires $[X]$, $[Y]$, $[Z]$ et par rapport aux primaires $[R_*]$, $[G_*]$ et $[B_*]$ choisies. Les primaires et le blanc de référence sont généralement caractérisés par leurs coordonnées trichromatiques x et y . Le tableau 2 donne les coordonnées trichromatiques x et y des primaires de différents standards et le tableau 3 fournit celles des illuminants A, C, D_{65} et E.

Les triangles des couleurs correspondant aux différentes primaires du tableau 2 ainsi que les points correspondant aux illuminants du tableau 3 apparaissent dans le diagramme de chromaticité (x,y) de la figure 5. Cette figure montre, tout d'abord, que les primaires utilisées par tous les standards, sauf celui de la CIE, ne sont pas des stimuli de couleurs monochromatiques puisque les points correspondants n'appartiennent pas au lieu du spectre. De plus, aucun des différents triangles n'englobe toutes les couleurs du visible et certaines d'entre elles ne peuvent donc être reproduites avec des primaires réelles. La surface de ces triangles (gamut) n'est pas la même selon le standard utilisé, ce qui signifie que les couleurs reproductibles par synthèse

Standard	Primaires	λ (nm)	x	y	z
CIE	$[R_C]$	700	0,735	0,265	0,000
	$[G_C]$	546,1	0,274	0,717	0,009
	$[B_C]$	435,8	0,167	0,009	0,824
FCC (NTSC)	$[R_F]$	612	0,670	0,330	0,000
	$[G_F]$	530	0,210	0,710	0,080
	$[B_F]$	472	0,140	0,080	0,780
EBU (PAL)	$[R_E]$	612	0,640	0,330	0,030
	$[G_E]$	518	0,290	0,600	0,011
	$[B_E]$	455	0,150	0,060	0,790

Tableau 2 – Coordonnées trichromatiques x , y et z de quelques primaires.

Illuminant	T_p (K)	x	y	z
A	2856	0,448	0,407	0,145
C	6774	0,310	0,316	0,374
D_{65}	6504	0,313	0,329	0,358
E	5400	0,333	0,333	0,333

Tableau 3 – Coordonnées trichromatiques x , y et z de quelques illuminants.

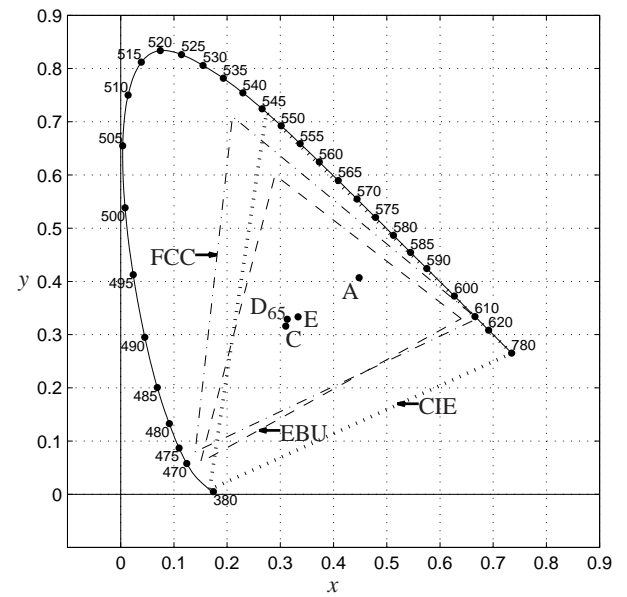


Figure 5 – Illuminants et couleurs dans le diagramme de chromaticité (x,y) .

additive sont spécifiques au standard utilisé. Enfin, les coordonnées trichromatiques x et y d'un stimulus de couleur se positionnent différemment par rapport au blanc de référence utilisé. Ceci confirme que la matrice de passage \mathbf{P} dépend du choix des primaires et du blanc de référence.

Dans l'équation 4, X_R , Y_R et Z_R sont les composantes trichromatiques des primaires $[X]$, $[Y]$ et $[Z]$ nécessaires à produire une unité de la primaire $[R_*]$. Similairement X_G , Y_G , Z_G et X_B , Y_B , Z_B sont respectivement nécessaires pour obtenir $[G_*]$ et $[B_*]$ [18].

Trémeau constate que les valeurs numériques de la matrice \mathbf{P} sont différentes selon les utilisateurs, bien que ces différences soient minimales [19]. De plus, très souvent, ils ne précisent pas dans quel contexte ils utilisent le système (X, Y, Z) . De façon générale, les différents auteurs choisissent leur transformation en fonction d'un illuminant normalisé. Néanmoins, pour un même illuminant, les valeurs de la matrice \mathbf{P} peuvent être différentes. Dans certains cas, les coefficients de la matrice sont déterminés directement à partir de mesures. Par exemple, la transformation du système (R_F, G_F, B_F) avec illuminant C vers le système (X, Y, Z) est définie par la matrice de passage \mathbf{P} suivante [18, 19, 17] :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0,607 & 0,174 & 0,200 \\ 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ 0,000 & 0,066 & 1,116 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

2.2 Les systèmes luminance-chrominance

De nombreux systèmes de représentation de la couleur présentent un point commun : ils possèdent une composante appelée ici *luminance* permettant de quantifier la luminosité et deux autres composantes de chrominance suffisantes pour quantifier le caractère chromatique d'un stimulus de couleur. Les systèmes de ce type peuvent être regroupés en une famille particulière de systèmes de représentation de la couleur, les systèmes *luminance-chrominance*.

Les composantes d'un système luminance-chrominance sont évaluées à partir des composantes trichromatiques R_* , G_* et B_* , soit par une transformation linéaire définie par une matrice de passage, soit par une transformation non linéaire. Le type de transformation est lié à la nature même du système. Ainsi, différents types de systèmes luminance-chrominance se distinguent :

- Les systèmes perceptuellement uniformes qui possèdent une métrique permettant d'établir une correspondance entre une différence de couleurs telle qu'elle est perçue par l'homme avec une distance dont la mesure reflète cette différence.
- Les systèmes de télévision qui permettent de séparer l'information de chrominance de l'information de luminance pour la transmission des signaux de télévision.
- Les systèmes antagonistes qui tentent de reproduire le modèle de la théorie des couleurs opposées de Hering.
- Les autres systèmes.

Soit L , la composante de luminance des systèmes luminance-chrominance. La notion de luminosité peut avoir plusieurs sens selon la façon dont elle est considérée et sera ainsi nommée, luminance, clarté, ou intensité. Dans les différents systèmes luminance-chrominance présentés ici, cette distinction existe et les différents termes utilisés dans la littérature sont alors explicités. Afin de les distinguer, les deux composantes de chrominance sont respectivement notées Chr_1 et Chr_2 . Les systèmes luminance-chrominance sont ainsi notés (L, Chr_1, Chr_2) .

Les systèmes perceptuellement uniformes. Le système (X, Y, Z) n'est pas perceptuellement uniforme. En effet,

dans le diagramme de chromaticité (x, y) , une même distance entre deux couleurs ne sera pas perçue de la même façon par l'être humain selon la zone du diagramme considérée. Ainsi, il existe dans le diagramme de chromaticité (x, y) des zones pour lesquelles les *différences de couleurs*¹² ne sont pas perceptibles par un observateur (ellipses de MacAdam).

Se pose alors le problème de la quantification des écarts de couleurs qui est le point essentiel de nombreuses applications [20]. En effet, des couleurs perceptuellement proches risquent de correspondre à des écarts de couleurs importants dans le système de représentation adopté alors que des couleurs perceptuellement très différentes risquent de correspondre à des écarts de couleurs trop faibles.

En 1976, la CIE propose un nouveau système tridimensionnel perceptuellement uniforme, le système CIELUV, encore appelé système (L^*, u^*, v^*) 1976 [15]. Le blanc de référence utilisé est alors caractérisé par ses composantes trichromatiques qui sont notées X^W , Y^W et Z^W respectivement pour les primaires $[X]$, $[Y]$ et $[Z]$. L'information de luminance correspond ici à la clarté qui, dans le vocabulaire de la CIE, représente la réponse de l'oeil à un niveau de luminance :

$$L^* = \begin{cases} 116 \times \sqrt[3]{\frac{Y}{Y^W}} - 16 & \text{si } \frac{Y}{Y^W} > 0,008856, \\ 903,3 \times \frac{Y}{Y^W} & \text{si } \frac{Y}{Y^W} \leq 0,008856. \end{cases} \quad (6)$$

Les composantes de chrominance pour le système (L^*, u^*, v^*) sont :

$$u^* = 13 \times L^* \times (u' - u'^W), \quad (7)$$

$$v^* = 13 \times L^* \times (v' - v'^W), \quad (8)$$

avec :

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}, \quad (9)$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \quad (10)$$

et u'^W et v'^W sont les composantes de chrominance respectives de u' et v' correspondant au blanc de référence. Le système (L^*, u^*, v^*) définit le diagramme de chromaticité (u', v') CIE 1976 représenté sur la figure 6.

En 1976, la CIE propose dans le même temps un autre système perceptuellement uniforme, le système CIELAB ou (L^*, a^*, b^*) , établi par des relations non linéaires à partir du système (X, Y, Z) [15]. Ce système est une approximation de l'espace d'Adams-Nickerson fréquemment utilisé par certaines industries. L'information de luminance (clarté) est évaluée par l'équation 6 et les composantes de chrominance pour le système (L^*, a^*, b^*) sont :

$$a^* = 500 \times \left(f \left(\frac{X}{X^W} \right) - f \left(\frac{Y}{Y^W} \right) \right), \quad (11)$$

¹²Les termes *écart de couleurs*, *différence colorimétrique* ou *écart colorimétrique* sont aussi employés pour désigner une différence entre deux stimuli de couleur.

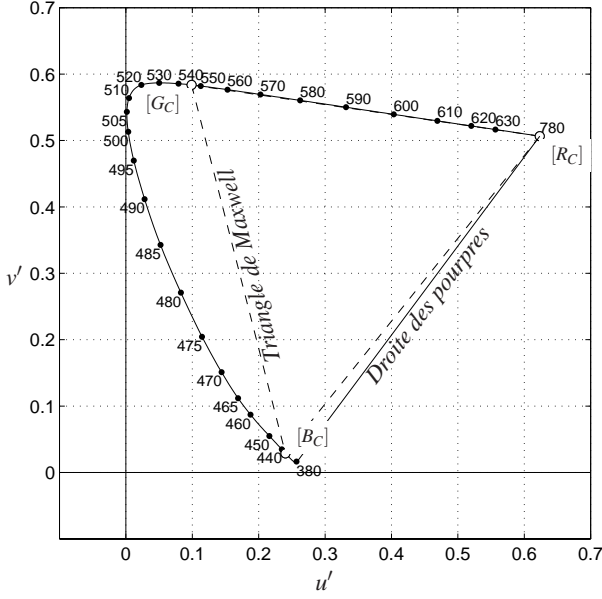


Figure 6 – Diagramme de chromaticité (u', v').

$$b^* = 200 \times \left(f \left(\frac{Y}{Y^W} \right) - f \left(\frac{Z}{Z^W} \right) \right), \quad (12)$$

avec :

$$f(x) = \begin{cases} \sqrt[3]{x} & \text{si } x > 0,008856, \\ 7,787x + \frac{16}{116} & \text{si } x \leq 0,008856. \end{cases} \quad (13)$$

La CIE modélise cette réponse non linéaire par la fonction racine cubique. Pour ces deux systèmes uniformes, la première composante de chrominance (a^* ou u^*) représente une opposition de couleurs vert-rouge alors que la seconde composante de chrominance (b^* ou v^*) représente une opposition de couleurs bleu-jaune.

Dans les systèmes (L^*, a^*, b^*) et (L^*, u^*, v^*), les différences colorimétriques, notées respectivement ΔE_{ab}^* et ΔE_{uv}^* , entre deux stimuli de couleur sont calculées comme la distance euclidienne entre les points les représentant dans les espaces correspondants (voir équations 14 et 15) [15].

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}, \quad (14)$$

$$\Delta E_{uv}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2}. \quad (15)$$

En 1995, la CIE apporte une amélioration à l'équation 14 pour l'évaluation industrielle des différences de couleur [21].

Les systèmes (L^*, a^*, b^*) et (L^*, u^*, v^*) sont les plus utilisés actuellement en colorimétrie car ils s'avèrent les plus efficaces pour mesurer des différences colorimétriques. En revanche, ils sont peu employés dans le domaine de l'analyse d'images couleur [22] car ils nécessitent des calculs trop coûteux en temps, notamment en ce qui concerne le système (L^*, a^*, b^*).

Aucun organisme ne privilégie l'utilisation de l'un de ces systèmes par rapport aux autres car ils ne sont pas réellement perceptuellement uniformes et présentent des propriétés différentes selon le cadre de leur utilisation. En fait, plusieurs auteurs démontrent qu'aucun système de dimension inférieure à six ne peut prétendre être perceptuellement uniforme [23].

Les systèmes de télévision. Le codage des signaux de télévision en couleur a été réalisé de façon à rester compatible avec les téléviseurs noir et blanc qui doivent pouvoir recevoir en noir et blanc les émissions en couleur. De même, les téléviseurs couleurs doivent pouvoir recevoir en noir et blanc les émissions en noir et blanc. Pour satisfaire ces deux principes, les signaux de télévision séparent donc l'information de luminance de celle de chrominance. Cette séparation peut être réalisée par une transformation linéaire des composantes trichromatiques du système (R_*, G_*, B_*) correspondant au standard considéré et donc par l'utilisation d'une matrice de passage. La luminance correspond à la composante Y (luminance lumineuse) du système (X, Y, Z). Les composantes de chrominance Chr_1 et Chr_2 sont alors calculées par les relations suivantes :

$$\begin{cases} Chr_1 = a_1(R_* - Y) + b_1(B_* - Y), \\ Chr_2 = a_2(R_* - Y) + b_2(B_* - Y). \end{cases} \quad (16)$$

Les coefficients a_1, b_1, a_2 et a_2 sont spécifiques aux normes (NTSC, PAL ou SECAM). Partant du principe que l'oeil humain perçoit les détails fins essentiellement grâce à la luminance, les systèmes de télévision ont été créés de façon à réduire la bande passante du signal de l'information de chrominance qui est peu sensible aux conditions d'éclairage.

Il existe deux principaux systèmes de télévision : le système (Y', I', Q') correspondant à la norme NTSC et le système (Y', U', V') correspondant à la norme PAL. La norme SECAM définit le système (Y, D_r, D_b) avec pour coefficients : $a_1 = -1,9, b_1 = 0, a_2 = 0$ et $b_2 = 1,5$ et l'image de télévision numérique est codée dans le système (Y, C_b, C_r) dont l'expression est donnée dans [24, 18].

Rappelons que les signaux transmis par les chaînes de télévision sont gamma corrigés et que les équations correspondantes s'appliquent en réalité à des composantes R, G et B qui sont gamma corrigées. Ces composantes sont notées respectivement R', G' et B' dans la littérature. Ceci justifie, en outre, la notation adoptée ici pour les systèmes de télévision.

Dans le système (Y', I', Q'), Y' est définie en utilisant les coefficients de l'équation 5 tandis que l'information de chrominance correspondant à I' et Q' est définie à l'aide de l'équation 16 avec $a_1 = 0,74, b_1 = -0,27, a_2 = 0,48$ et $b_2 = 0,41$ [18]. En exprimant la chrominance uniquement en fonction de R_F, G_F et B_F , ces équations s'écrivent sous

forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} Y' \\ I' \\ Q' \end{bmatrix} = \mathbf{P} \times \begin{bmatrix} R_F \\ G_F \\ B_F \end{bmatrix}, \quad (17)$$

avec :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ 0,596 & -0,274 & -0,322 \\ 0,212 & -0,523 & 0,311 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Il est aussi possible d'exprimer les composantes Y' , I' et Q' à partir des composantes trichromatiques X , Y et Z de la CIE [18] ou à partir des composantes trichromatiques R_C , G_C et B_C de la CIE [16].

Dans le système (Y', U', V') , Y' est définie par l'équation du système (Y', I', Q') . En fait, l'expression de la luminance de la norme NTSC a été normalisée pour être utilisée par tous les systèmes, entraînant une légère erreur pour les normes PAL et SECAM [18]. L'information de chrominance correspondant à U' et V' est définie à l'aide de l'équation 16 avec $a_1 = 0$, $b_1 = 0,493$, $a_2 = 0,877$ et $b_2 = 0$ [18]. Exprimées uniquement en fonction de R_E , G_E et B_E , ces équations deviennent sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} Y' \\ U' \\ V' \end{bmatrix} = \mathbf{P} \times \begin{bmatrix} R_E \\ G_E \\ B_E \end{bmatrix}, \quad (19)$$

avec :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ -0,148 & -0,289 & 0,437 \\ 0,615 & -0,515 & -0,100 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

De même que pour le système (Y', I', Q') , il est aussi possible d'exprimer les composantes Y' , U' et V' à partir des composantes trichromatiques X , Y et Z de la CIE ou à partir des composantes trichromatiques R_C , G_C et B_C de la CIE.

Les systèmes antagonistes. Cette famille de systèmes de représentation de la couleur se base sur la théorie des couleurs opposées de Hering pour tenter de modéliser le système visuel humain. Selon cette théorie, l'information couleur captée par l'oeil est transmise au cerveau sous la forme de trois composantes, une composante achromatique, A et deux composantes de chrominance C_1 et C_2 . La composante A intègre les signaux fournis par les trois types de cônes de la rétine humaine et représente une opposition noir-blanc tandis que les composantes C_1 et C_2 intègrent uniquement les signaux fournis par certains types de cônes et correspondent respectivement à un signal d'opposition vert-rouge et à un signal d'opposition jaune-bleu. En ce sens, les systèmes (L^*, u^*, v^*) et (L^*, a^*, b^*) présentés précédemment peuvent être considérés comme des systèmes antagonistes. Afin de reproduire le fonctionnement du système visuel humain, quelques auteurs proposent différents modèles appliqués à l'analyse d'images.

Faugeras propose, en 1976, une modélisation du système visuel humain dans laquelle les composantes A , C_1 et C_2

sont évaluées à partir d'un système de trois primaires notées $[L]$, $[M]$ et $[S]$ qui correspondent aux trois types de cônes de la rétine [25]. Il propose aussi des matrices de passage permettant de transformer les composantes R , G et B issues d'un système d'acquisition en composantes L , M et S . Par exemple, le passage des composantes trichromatiques R_M , G_M et B_M d'un moniteur CRT aux composantes L , M et S avec l'illuminant C comme blanc de référence se fait par la matrice :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0,3634 & 0,6102 & 0,0264 \\ 0,1246 & 0,8138 & 0,0616 \\ 0,0009 & 0,0602 & 0,9389 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Les composantes A , C_1 et C_2 sont alors définies par les équations suivantes :

$$A = a(\alpha \log(L) + \beta \log(M) + \gamma \log(S)), \quad (22)$$

$$C_1 = u_1(\log(L) - \log(M)), \quad (23)$$

$$C_2 = u_2(\log(L) - \log(S)). \quad (24)$$

Ces équations traduisent le fait que la réponse des cônes à un stimulus de couleur n'est pas proportionnelle à son intensité. Faugeras propose ainsi de modéliser cette non linéarité par l'utilisation de la fonction logarithmique alors que la CIE utilise plutôt la fonction racine cubique. Les paramètres a , α , β , γ , u_1 et u_2 permettent de calibrer le modèle en fonction de la sensibilité spectrale relative de l'oeil (correspondant à l'information de luminance) et en fonction de son pouvoir de discrimination des couleurs (correspondant à l'information de chrominance). Faugeras propose différentes applications de son modèle et notamment, dans le cadre de l'analyse d'images couleur, il fournit les coefficients suivants : $a = 22,6$, $\alpha = 0,612$, $\beta = 0,369$, $\gamma = 0,019$, $u_1 = 64$ et $u_2 = 10$.

Dans le domaine de la vision artificielle, Garbay propose, sur la base des travaux de Faugeras, un système antagoniste simplifié qui ne tient pas compte de certaines caractéristiques du système visuel humain, notamment des sensibilités spectrales des trois types de cônes [26]. Le modèle proposé, appelé *système visuel hypothétique*, s'applique ainsi directement sur les composantes R , G et B issues du système d'acquisition. Les coefficients a , α , β et γ sont ajustés de façon à ce que l'axe achromatique porte les points dont les composantes sont telles que $R = G = B$ et les coefficients u_1 et u_2 sont ajustés de façon à ce que des couleurs de saturations identiques soient situées à égale distance de l'axe achromatique. Les composantes A , C_1 et C_2 s'écrivent alors sous la forme :

$$A = \frac{1}{3} \times (\log(R) + \log(G) + \log(B)), \quad (25)$$

$$C_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \times (\log(R) - \log(G)), \quad (26)$$

$$C_2 = \log(B) - \frac{\log(R) + \log(G)}{2}. \quad (27)$$

L'utilisation de la fonction logarithme pour modéliser la non linéarité de la réponse des cônes de la rétine humaine fait l'objet de nombreuses controverses. Ballard propose d'utiliser des relations plus simples en supposant cette réponse linéaire [27]. Les équations du système antagoniste ainsi obtenu et noté (wb, rg, by) peuvent alors s'écrire sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} A \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} wb \\ rg \\ by \end{bmatrix} = \mathbf{P} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (28)$$

avec :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}. \quad (29)$$

D'autres modèles du système visuel humain sont proposés dans la littérature [24, 28] ainsi que leur application dans le domaine de l'analyse d'images couleur [29, 30].

Autres systèmes luminance-chrominance. Les systèmes luminance-chrominance présentés ici ne peuvent être classés parmi les catégories présentées précédemment mais sont souvent utilisés en analyse d'images.

En étudiant les propriétés de différents systèmes luminance-chrominance, Carron passe du système (R, G, B) défini par une caméra à un système luminance-chrominance noté (Y, Ch_1, Ch_2) dans lequel l'équation de luminance reste inchangée par rapport à celle du système défini par les équations 28 et 29 tandis que les équations des composantes de chrominance deviennent sous forme matricielle [16] :

$$\begin{bmatrix} Y \\ Ch_1 \\ Ch_2 \end{bmatrix} = \mathbf{P} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (30)$$

avec :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}. \quad (31)$$

Il est à noter que la composante Ch_1 du système de Carron correspond à une opposition cyan-rouge et la composante Ch_2 à une opposition vert-bleu.

L'espace de couleur normalisé, noté (I, r, g) et composé d'une information de luminance I (voir équation 29) et des deux coordonnées trichromatiques r et g (voir équation 1), est également souvent employé en analyse d'images couleur [31].

La CIE préconise l'utilisation du système (Y, x, y) où Y représente la luminance lumineuse (voir équation 5) et x et y , qui sont les coordonnées trichromatiques du système (X, Y, Z) (voir équation 2), représentent la chrominance.

2.3 Les systèmes perceptuels

L'homme ne perçoit pas la couleur directement comme une combinaison de composantes trichromatiques liées à des primaires mais selon des entités plus subjectives liées à

la luminosité, la teinte et la saturation. Il est donc naturel que de nombreux systèmes de représentation de la couleur quantifiant ces informations soient proposés dans la littérature. Ils sont ici regroupés dans la famille des systèmes perceptuels. Cette approche perceptuelle permet, en outre, une communication adéquate entre l'homme et la machine quand il s'agit d'exprimer la couleur. Il existe de nombreux systèmes de ce type dans la littérature, présentés sous différentes dénominations telles que ISH, HSL, HSV, TLS, LCH, LSH, LST, ITS, ... Ces différentes dénominations désignent les même grandeurs mais se différencient par leurs calculs. Deux familles de systèmes perceptuels se distinguent :

- Les systèmes de coordonnées polaires ou cylindriques. Ils correspondent à l'expression en coordonnées polaires des composantes de systèmes luminance-chrominance et se différencient donc par le système duquel ils se déduisent.
- Les systèmes humains de perception de la couleur. Ils sont évalués directement à partir des composantes trichromatiques d'un système de primaires et se différencient par les relations exprimant la luminosité, la teinte ou la saturation.

Il est à noter que les systèmes perceptuels peuvent être considérés comme des systèmes luminance-chrominance puisqu'ils sont composés d'une information quantifiant la luminosité ainsi que de deux informations quantifiant la chrominance.

Les systèmes de coordonnées polaires. Cette famille de systèmes découle des systèmes de représentation décomposant l'information couleur en un axe de luminosité et un plan de chrominance, par transposition des coordonnées cartésiennes en coordonnées polaires. Soit P , un point représentant une couleur dans un système luminance-chrominance (L, Chr_1, Chr_2) . Ce point est alors défini par les coordonnées du vecteur \overrightarrow{OP} dans le repère $(O, \overrightarrow{L}, \overrightarrow{Chr_1}, \overrightarrow{Chr_2})$. Soit P' , la projection de P sur le plan $(O, \overrightarrow{Chr_1}, \overrightarrow{Chr_2})$ suivant l'axe L et O' , la projection orthogonale de P sur L . Sachant que, par cette construction, les vecteurs $\overrightarrow{O'P}$ et $\overrightarrow{OP'}$ ont la même norme et la même orientation, il est alors possible de repérer le point P grâce à la norme du vecteur $\overrightarrow{OP'}$, à l'angle entre les vecteurs $\overrightarrow{OP'}$ et $\overrightarrow{Chr_1}$ et à sa coordonnée suivant l'axe L qui est égale à la norme du vecteur $\overrightarrow{PP'}$. Les trois composantes qui en découlent sont notées respectivement L , C et H et forment un système de coordonnées polaires noté (L, C, H) (voir figure 7).

La première composante d'un système de coordonnées polaires représente l'information de luminosité, L . Elle est donc identique à la première composante du système luminance-chrominance correspondant.

La norme du vecteur $\overrightarrow{OP'}$ représente le chroma, C , qui est défini par l'équation :

$$C = \|\overrightarrow{OP'}\| = \sqrt{Chr_1^2 + Chr_2^2}. \quad (32)$$

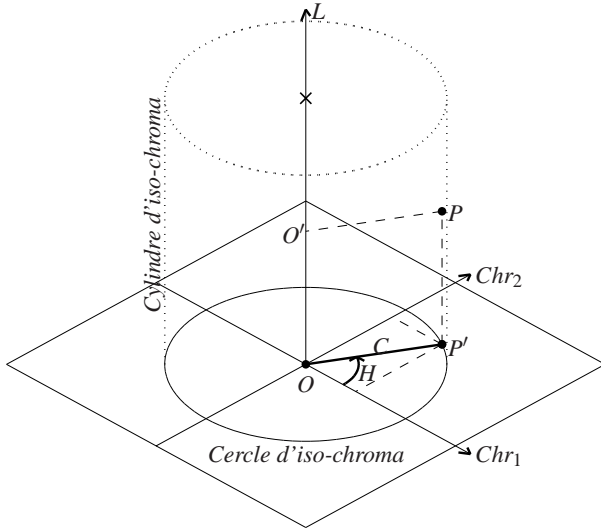


Figure 7 – Système de coordonnées polaires.

Le chroma correspond à la distance du point P à l'axe de luminance. Des points ayant un même niveau de chroma se situent sur un cylindre centré sur l'axe des luminances appelé *cylindre d'iso-chroma* sur la figure 7. Les projections de ces points sur le plan de chrominance définissent le *cercle d'iso-chroma*.

L'angle du vecteur $\overrightarrow{OP'}$ avec le vecteur $\overrightarrow{Chr_1}$ représente l'information de teinte, H . Afin d'obtenir des valeurs de H comprises dans l'intervalle $[0, 2\pi]$, son évaluation doit satisfaire aux conditions de l'équation 34.

$$H = \widehat{(\overrightarrow{Chr_1}, \overrightarrow{OP'})}, \quad (33)$$

avec :

$$\begin{cases} \text{si } Chr_1 > 0 \text{ et } Chr_2 \geq 0 \text{ alors } 0 \leq H < \frac{\pi}{2}, \\ \text{si } Chr_1 \leq 0 \text{ et } Chr_2 > 0 \text{ alors } \frac{\pi}{2} \leq H < \pi, \\ \text{si } Chr_1 < 0 \text{ et } Chr_2 \leq 0 \text{ alors } \pi \leq H < \frac{3\pi}{2}, \\ \text{si } Chr_1 \geq 0 \text{ et } Chr_2 < 0 \text{ alors } \frac{3\pi}{2} \leq H < 2\pi. \end{cases} \quad (34)$$

L'utilisation des relations de trigonométrie permet d'évaluer H qui, par exemple, peut être exprimée de la façon suivante :

$$H = \arccos\left(\frac{Chr_1}{C}\right). \quad (35)$$

Cette formulation fournit un angle compris dans l'intervalle $[0, \pi]$. Pour obtenir un angle H' dans l'intervalle $[0, 2\pi[$, il faut réaliser le test suivant : si $Chr_2 < 0$, $H' = 2\pi - H$. Une autre relation analogue à l'équation 35 est souvent utilisée pour exprimer H :

$$H = \arctan\left(\frac{Chr_2}{Chr_1}\right). \quad (36)$$

Cette relation fournit alors un angle H compris dans l'intervalle $[-\pi/2, \pi/2]$. Afin d'obtenir un angle H' compris

dans l'intervalle $[0, 2\pi[$ et de satisfaire à l'équation 34, il est nécessaire, dans un premier temps, d'obtenir un angle H'' compris dans l'intervalle $[-\pi, \pi]$ en réalisant des tests sur Chr_2 quand $Chr_1 < 0$. Ainsi, si $Chr_2 \geq 0$ alors $H'' = \pi + H$, sinon $H'' = \pi - H$ ¹³. Dans un second temps, il suffit de prendre le complément à 2π de H'' en réalisant l'opération : $H' = H'' + 2\pi$, si $H'' < 0$.

Il est possible de construire un système (L, C, H) à partir de n'importe quel système luminance-chrominance en utilisant les équations précédentes. Par exemple, en utilisant les équations 32 et 36, la CIE définit les composantes de systèmes de coordonnées polaires (L, C, H) à partir des systèmes uniformes (L^*, u^*, v^*) et (L^*, a^*, b^*) obtenant ainsi respectivement les systèmes $(L_{uv}^*, C_{uv}^*, h_{uv})$ et $(L_{ab}^*, C_{ab}^*, h_{ab})$ [15]. Les composantes de ces systèmes servent à l'évaluation des différences de couleurs [15, 21].

Les systèmes humains de perception de la couleur. Ces systèmes sont directement évalués à partir d'un système de primaires et représentent la couleur en termes d'intensité (I), de saturation (S) et de teinte (T). L'intensité correspond à l'information de luminosité mais elle est désignée ainsi principalement dans un souci de la différencier de celle des systèmes de coordonnées polaires vue précédemment. La saturation représente le niveau de coloration d'une surface indépendamment de sa luminance, au contraire du chroma. Chroma et saturation sont ainsi liés par la relation : $S = C / L$. La teinte est notée T pour la différencier de la teinte notée H vue au paragraphe précédent. Ces trois composantes forment un système (I, S, T) et rencontrent des formulations très diverses dans la littérature. Elles sont répertoriés ici en fonction des différents modèles sous-jacents.

Le modèle triangulaire Ce modèle correspond à une expression des composantes I , S et T dans le cube des couleurs d'un système (R_*, G_*, B_*) . À titre d'exemple, ce modèle est appliqué au système (R, G, B) associé à un dispositif d'acquisition. Dans la représentation du cube des couleurs (figure 2), l'axe achromatique correspond à l'axe d'intensité dans le système (I, S, T) . Tout point P représentant un stimulus de couleur dont les composantes trichromatiques sont R , G et B se situe sur un plan perpendiculaire à l'axe achromatique. Les intersections de ce plan avec les axes rouge, vert et bleu sont les sommets d'un triangle (α, β, γ) homothétique au triangle de Maxwell, justifiant ainsi la dénomination de *modèle triangulaire* (voir figure 8). Sur le triangle (α, β, γ) , il est alors possible d'évaluer la saturation et la teinte. Différentes méthodes sont proposées et de nombreuses formulations de systèmes (I, S, T) existent dans la littérature. Cependant, elles gardent toutes la même signification.

Soit O' , la projection orthogonale de P sur l'axe achromatique. L'intensité I correspond à la norme du vecteur $\overrightarrow{OO'}$. Afin que sa valeur maximale soit égale à l'unité quand

¹³En langage C, la fonction `atan2` intègre directement ces tests sur Chr_1 et Chr_2 .

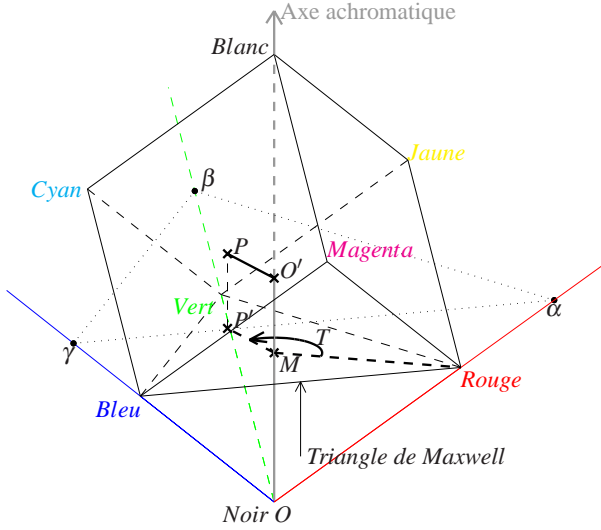


Figure 8 – Modèle triangulaire.

$R = G = B = 1$, l'intensité est évaluée par la formule :

$$I = \frac{1}{\sqrt{3}} \|\overrightarrow{OO'}\| = \frac{R + G + B}{3}. \quad (37)$$

Pour simplifier le calcul de l'intensité, la forme non pondérée de l'équation précédente est le plus souvent employée :

$$I = R + G + B. \quad (38)$$

La saturation S correspond au rapport entre la norme du vecteur $\overrightarrow{O'P}$ (distance entre le point P et l'axe achromatique) et la norme du vecteur $\overrightarrow{OO'}$ qui représente l'intensité. Le calcul de la saturation se fait ainsi suivant la formule :

$$S = \frac{\|\overrightarrow{O'P}\|}{\|\overrightarrow{OO'}\|} = \sqrt{2} \times \frac{\sqrt{R^2 + G^2 + B^2 - RG - GB - RB}}{R + G + B} \quad (39)$$

Mais avec cette formulation, les couleurs de même saturation se situent sur un cône à base circulaire, centré sur l'axe achromatique et de sommet O . La saturation est ainsi maximale uniquement pour les trois couleurs primaires. Il semble préférable de définir la saturation de telle sorte qu'elle soit maximale pour tous les points appartenant aux côtés du triangle (α, β, γ) [32, 18]. De ce fait, la saturation est calculée à l'aide de la distance minimum entre le point P et un coté de ce triangle :

$$S = 1 - \frac{3 \times \min(R, G, B)}{R + G + B}. \quad (40)$$

Différentes formes de cette équation sont proposées dans la littérature et il semble important de montrer leurs liens. Ainsi, certains auteurs écrivent l'équation 40 sous la forme :

$$S = 1 - 3 \times \min(r, g, b). \quad (41)$$

Cette forme est une formulation de la saturation en fonction des coordonnées trichromatiques r, g et b et correspond à l'évaluation de la saturation dans le triangle de

Maxwell [16]. D'autres auteurs formulent la saturation en fonction de l'intensité I exprimée par l'équation 38 :

$$S = 1 - \frac{3 \times \min(R, G, B)}{I}. \quad (42)$$

La teinte correspond à l'orientation du vecteur $\overrightarrow{O'P}$. Soit M , le point d'intersection entre l'axe achromatique et le triangle de Maxwell et P' la projection de P sur ce même triangle suivant la direction de l'axe achromatique. Généralement, l'axe défini par le point M et le point Rouge de coordonnée $(1, 0, 0)$ dans le cube des couleurs est l'axe de référence utilisé pour définir l'orientation du vecteur $\overrightarrow{O'P}$ et spécifier la valeur de la teinte, soit $T = (\overrightarrow{MRouge}, \overrightarrow{MP'})$. De cette façon, la couleur rouge a une teinte nulle.

Il est alors possible d'évaluer la teinte en utilisant des relations de trigonométrie. Par exemple, dans une première formulation, la teinte est exprimée par :

$$T = \arctan \left(\frac{\sqrt{3}(G - B)}{2R - G - B} \right). \quad (43)$$

Afin d'obtenir des angles compris entre 0 et 2π , il convient de tester les signes du numérateur et du dénominateur.

Dans une autre formulation, T s'écrit :

$$T = \begin{cases} \arccos \left(\frac{\frac{1}{2}[(R-G)+(R-B)]}{\sqrt{(R-G)^2 + (R-B)(G-B)}} \right) & \text{si } B \leq G, \\ 2\pi - \arccos \left(\frac{\frac{1}{2}[(R-G)+(R-B)]}{\sqrt{(R-G)^2 + (R-B)(G-B)}} \right) & \text{si } B > G. \end{cases} \quad (44)$$

Il faut noter que le test : $B > G$ est nécessaire afin de considérer les angle compris entre π et 2π .

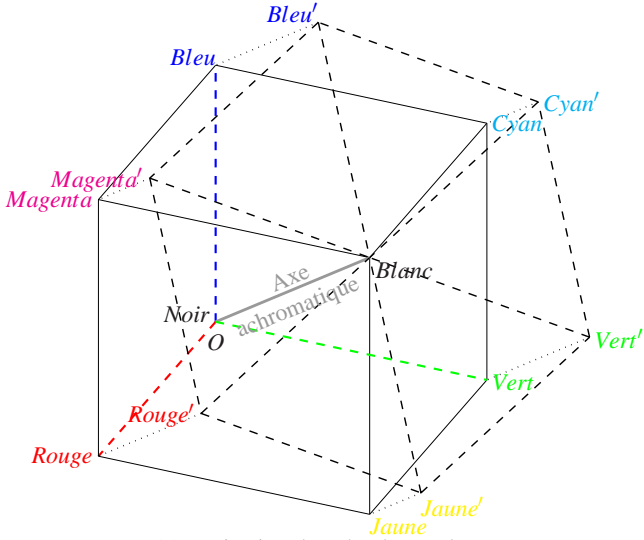
En utilisant les coordonnées trichromatiques, l'équation 44 s'écrit :

$$T = \begin{cases} \arccos \left(\frac{2r-g-b}{\sqrt{6 \times [(r-\frac{1}{3})^2 + (g-\frac{1}{3})^2 + (b-\frac{1}{3})^2]}} \right) & \text{si } b \leq g, \\ 2\pi - \arccos \left(\frac{2r-g-b}{\sqrt{6 \times [(r-\frac{1}{3})^2 + (g-\frac{1}{3})^2 + (b-\frac{1}{3})^2]}} \right) & \text{si } b > g. \end{cases} \quad (45)$$

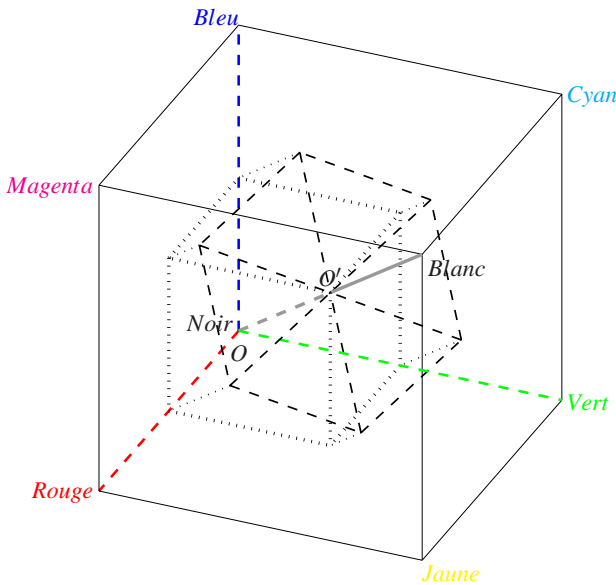
Toutes ces formules correspondent au modèle triangulaire mais, dans l'utilisation du système (I, S, T) , le choix des formules pour I, S et T varie selon les auteurs. Ainsi, ce système est souvent défini par les systèmes d'équations (38, 42, 44) [33, 34, 27], (38, 41, 45) [26, 13, 35], (37, 40, 43) [36, 31] et (37, 40, 44) [37, 38].

Le modèle de cône hexagonal La projection des points du cube des couleurs suivant l'axe achromatique sur le plan perpendiculaire à cet axe et passant par le point Blanc forme une surface fermée hexagonale dont les sommets sont les projections des primaires et de leurs complémentaires et dont le centre est le point Blanc. Sur la figure 9(a), les projections des points du cube des couleurs sont annotées d'un ' (par exemple, la projection du point Rouge est notée Rouge'). Pour tout point O' de l'axe achromatique,

il est possible de considérer un sous-cube dont deux des sommets opposés sont O et O' . Ce sous-cube peut être projeté de la même façon que celle décrite pour le cube des couleurs sur le plan perpendiculaire à l'axe achromatique et passant par le point O' (voir figure 9(b)). Si cette projection est réalisée pour des sous-cubes construits à chaque niveau d'intensité, une pyramide hexagonale de sommet O est alors formée.



(a) Projection du cube des couleurs.



(b) Projection d'un sous-cube.

Figure 9 – Formation de la pyramide hexagonale.

Dans ce modèle, représenté sur la figure 10, il est alors possible d'exprimer les composantes I , S et T . À tout point P de coordonnées (R, G, B) , correspond donc un sous-cube dont son sommet O' correspond au maximum de R , G et B . L'intensité, connue également sous le nom de *value* et notée V , est donc représentée par ce point achromatique et

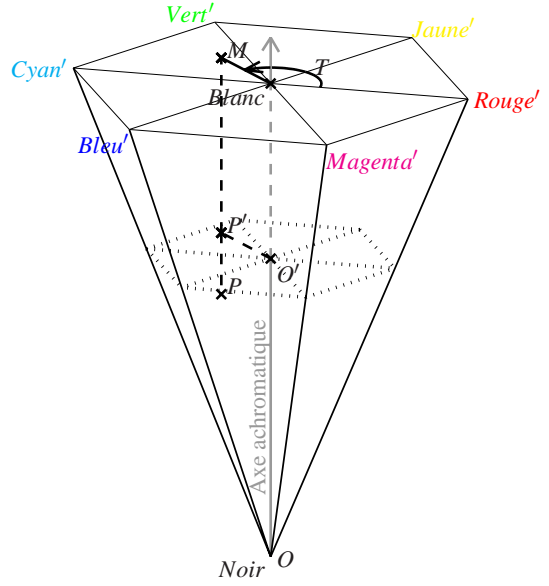


Figure 10 – Modèle de cône hexagonal.

s'écrit :

$$I = V = \frac{1}{\sqrt{3}} \|\overrightarrow{OO'}\| = \max(R, G, B). \quad (46)$$

La projection sur le plan perpendiculaire à l'axe achromatique et passant par le sommet O' du sous-cube ainsi construit définit un hexagone dans lequel est situé P' , la projection de P . La saturation correspond alors à la longueur du segment $O'P'$ divisée par la longueur maximale pour une même teinte et se calcule donc de la même façon que dans le modèle triangulaire, par une formule similaire à celle de l'équation 42 :

$$S = \frac{V - \min(R, G, B)}{V}. \quad (47)$$

Dans le cas où l'intensité est nulle ($V = 0$) la saturation n'est pas définie. Dans ce cas, $S = 0$.

Par construction, le point *Blanc* est aussi le projeté du point *Noir*. La projection du vecteur $\overrightarrow{NoirRouge}$ est donc le vecteur $\overrightarrow{BlancRouge}$. Soit M , la projection de P' sur le plan perpendiculaire à l'axe achromatique passant par le point *Blanc*. La teinte est alors définie comme l'angle entre les vecteurs \overrightarrow{BlancM} et $\overrightarrow{BlancRouge}$, soit $T = (\overrightarrow{BlancRouge}, \overrightarrow{BlancM})$. Elle est ainsi évaluée pour tout $S \neq 0$ de la façon suivante :

$$T = \begin{cases} \frac{G-B}{V-\min(R,G,B)} & \text{si } V = R, \\ 2 + \frac{B-R}{V-\min(R,G,B)} & \text{si } V = G, \\ 4 + \frac{R-G}{V-\min(R,G,B)} & \text{si } V = B. \end{cases} \quad (48)$$

Si $S = 0$, c'est-à-dire $R = G = B$ alors la teinte n'est pas définie. De plus, si $V = R$ et $\min(R, G, B) = G$ alors T est négative.

C'est donc sous la forme du système d'équations (46, 47, 48) que le modèle hexagonal est le plus souvent présenté [39, 40].

Le modèle de cône hexagonal double Ce modèle est construit sur le même principe que le modèle précédent, excepté que les projections des sous-cubes sont réalisées sur le plan perpendiculaire à l'axe achromatique et passant par le milieu de cet axe. Sa construction n'est donc pas détaillée ici [40].

Une représentation du modèle de cône hexagonal double est présentée figure 11. En posant $min = \min(R, G, B)$ et

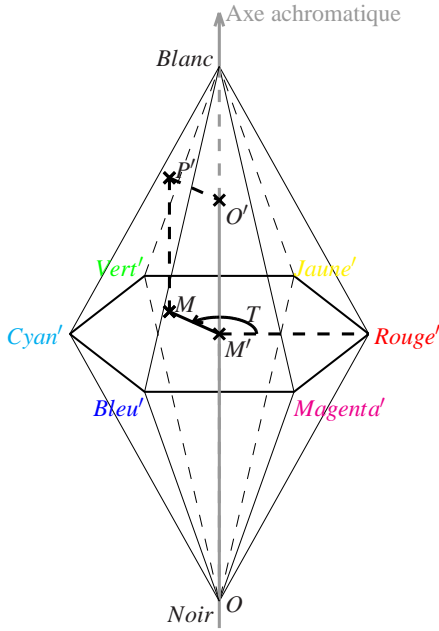


Figure 11 – Modèle de cône hexagonal double.

$max = \max(R, G, B)$, l'intensité se calcule par la relation suivante :

$$I = \frac{max + min}{2}. \quad (49)$$

Soit I_{max} , la valeur maximum de l'intensité. La saturation est alors évaluée pour toute $I \neq 0$ de la façon suivante :

$$S = \begin{cases} \frac{max-min}{max+min} & \text{si } I \leq \frac{I_{max}}{2}, \\ \frac{max-min}{2 \times I_{max} - max - min} & \text{si } I > \frac{I_{max}}{2}. \end{cases} \quad (50)$$

La saturation est nulle ($S = 0$) si $I = 0$ et la teinte n'est pas définie si $S = 0$ ($R = G = B$). Dans le cas contraire, les relations permettant de calculer la teinte sont les mêmes que pour le modèle de cône hexagonal simple (voir équation 48).

Le système $(L_{uv}^*, S_{uv}^*, h_{uv})$ Ce système a été défini par la CIE en même temps que les systèmes $(L_{uv}^*, C_{uv}^*, h_{uv})$ et $(L_{ab}^*, C_{ab}^*, h_{ab})$. Dans le système (L^*, u^*, v^*) , la CIE définit la saturation comme le rapport :

$$S_{uv}^* = \frac{C_{uv}^*}{L_{uv}^*}. \quad (51)$$

L_{uv}^* et h_{uv} sont respectivement définis par les équations 6 et 32.

2.4 Les systèmes d'axes indépendants

Un des inconvénients des systèmes (R_*, G_*, B_*) est que les trois composantes sont fortement corrélées, c'est à dire qu'elles portent en elle une information commune. En effet, elles possèdent un fort facteur de luminance réparti sur chacune d'entre elles [41, 24]. Cette corrélation peut être plus ou moins importante selon les cas. Ainsi, de nombreux auteurs ont tenté de déterminer des systèmes de représentation de la couleur dont les composantes sont indépendantes, c'est-à-dire des composantes qui portent des informations différentes et non redondantes. La principale solution consiste à réaliser l'analyse en composantes principales d'un système de représentation et d'appliquer la transformation de Karhunen-Loeve. Cette transformation est donc présentée ici ainsi que les systèmes qui en découlent.

Analyse en composantes principales. L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode d'analyse de données et plus particulièrement de l'analyse factorielle [42]. Son but est d'analyser un ensemble de données quantitatives représentées dans un espace multidimensionnel afin d'obtenir un espace de représentation de dimension éventuellement réduite dont les composantes, appelées *composantes principales* (ou *axes factoriels*), sont décorréelées, c'est-à-dire qu'elles ne portent pas le même type d'information. Dans le cas où les données sont les composantes trichromatiques R, G et B des pixels d'une image, l'analyse en composantes principales fournit un système de représentation de la couleur dont les composantes sont non corrélées et qui peuvent être traitées indépendamment.

Pour cela, l'ensemble des données traitées, à savoir l'ensemble des vecteurs couleur associés aux pixels d'une image, est caractérisé par sa matrice de covariance qui est modifiée de telle sorte que toutes les covariances croisées soient nulles. Il s'agit donc de diagonaliser la matrice de covariance pour en calculer les valeurs propres notées λ_i , et d'extraire les vecteurs propres correspondants notés w_i . Le calcul des nouvelles composantes X_i se fait donc par la relation : $X_i = w_i [R \ G \ B]^T$. La transformation de Karhunen-Loeve consiste ainsi à appliquer cette relation à chacune des nouvelles composantes. C'est donc une transformation linéaire qui conserve la métrique du système (R, G, B) . La valeur propre correspondant à la première composante est maximale, ce qui signifie que cette composante porte le maximum d'information. Elle est donc la plus discriminante. Les composantes sont ainsi ordonnées en fonction de leur pouvoir discriminant décroissant qui est quantifié par les valeurs propres λ_i .

Dans le domaine de l'analyse d'images, il n'est pas rare que certains auteurs utilisent la transformation de Karhunen-Loeve afin, soit de réduire la dimension de l'espace de représentation, soit de disposer d'un système d'axes indépendants. Cette transformation s'applique prin-

cipalement à partir du système (R, G, B) [35] bien qu'elle puisse être appliquée à partir de n'importe quel système. Le problème de l'analyse en composantes principales est qu'elle dépend des propriétés statistiques d'un ensemble de données. En analyse d'images, il faudrait donc réaliser l'ACP de chaque image pour déterminer la transformation de Karhunen-Loeve correspondante, ce qui est fort coûteux en temps de calcul. Pour éviter ce problème, il est possible d'évaluer un système de représentation de la couleur basé sur l'analyse en composantes principales d'images différentes. Ainsi, pour un ensemble d'images liées à une application spécifique, quelques auteurs tentent de déterminer des systèmes d'axes indépendants par approximation de la transformation de Karhunen-Loeve [40, 18].

Mais l'étude la plus poussée concernant la détermination d'un système d'axes indépendants est celle réalisée par Ohta en 1980 [41] qui est maintenant présentée plus en détail.

Le système d'Ohta. Dans le domaine de l'analyse d'images couleur, une expérience menée par Ohta en 1980 sur une série de huit images différentes a permis de déterminer un système de représentation de la couleur basé sur la transformation de Karhunen-Loeve [41]. Il propose de segmenter ces images en régions par une méthode de seuillage récursif et d'appliquer la transformation de Karhunen-Loeve à chaque itération de l'algorithme. Il montre alors qu'il existe une transformation unique appelée (I_1, I_2, I_3) modélisant la transformation de Karhunen-Loeve et se montrant tout aussi efficace que cette dernière. Cette transformation est définie, sous forme matricielle, par les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \mathbf{P} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (52)$$

avec :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{4} & \frac{1}{2} & -\frac{1}{4} \end{bmatrix}. \quad (53)$$

La première composante, qui est aussi la plus discriminante, représente une information de luminance puisqu'elle vérifie l'équation 37. Les deux autres composantes représentent respectivement une opposition bleu-rouge et une opposition magenta-vert. Elles apportent moins d'information si bien que la troisième composante peut même être négligée car la valeur propre associée est très faible devant celle des deux autres. En somme, il est possible de considérer le système (I_1, I_2, I_3) comme un système luminance-chrominance.

Analyse en composantes indépendantes. Liu propose de transformer les composantes trichromatiques R, G et B d'une image couleur par un algorithme permettant l'analyse en composantes indépendantes (ACI) de signaux multidimensionnels par réseaux de neurones [38]. Il obtient ainsi un système de représentation dont les composantes

sont statistiquement indépendantes mais sur lesquelles l'information est répartie au mieux au contraire de l'ACP où la première composante porte le maximum d'information.

2.5 Synthèse

La multitude et la diversité des systèmes de représentation de la couleur nécessitent de les regrouper en différentes familles [14, 40, 17]. Cependant, il semble judicieux de faire une synthèse des différents systèmes présentés. Sur

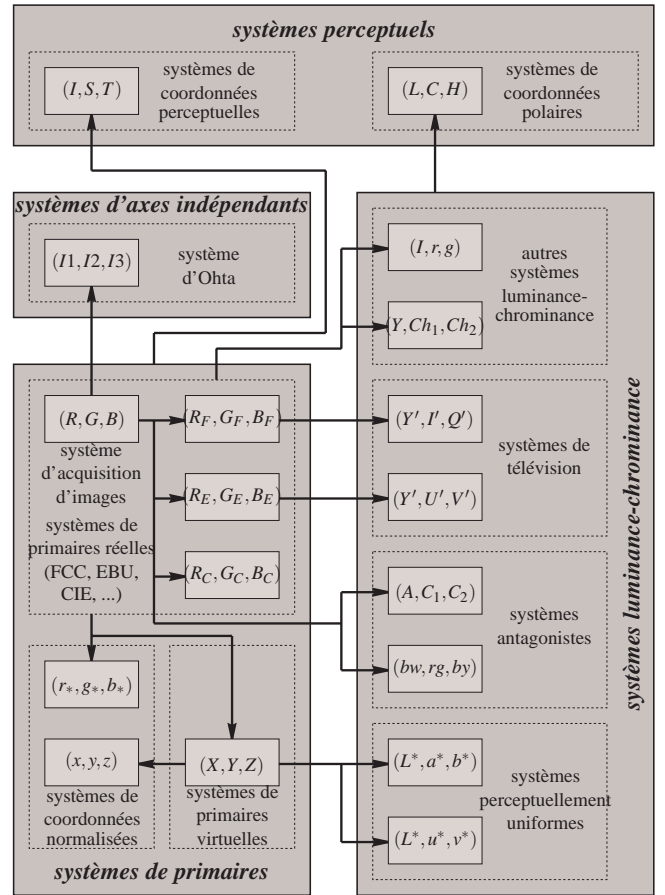


Figure 12 – Les familles de systèmes de représentation de la couleur.

la figure 12, les systèmes sont regroupés en quatre familles telles qu'elles ont été présentées dans cet article :

- les systèmes de primaires,
- les systèmes luminance-chrominance,
- les systèmes perceptuels,
- les systèmes d'axes indépendants.

Les rectangles grisés correspondent à ces quatre familles et les flèches indiquent les transformations qui ont été présentées. Chacun des systèmes présentés est relié directement ou indirectement par ces flèches au système d'acquisition de l'image (R, G, B) . Au sein de chaque famille se distinguent des sous-familles qui sont représentées par des rectangles aux contours discontinus.

Un certain nombre de systèmes de représentation de la couleur viennent d'être présentés, chacun ayant des pro-

propriétés particulières. Il faut savoir que cette liste est loin d'être exhaustive car il existe de nombreux autres systèmes parfois spécifiques à une application particulière. Actuellement, la CIE travaille sur un modèle d'apparence colorée (CIECAM) qui tente de prendre en compte les divers mécanismes visuels jouant un rôle sur la perception humaine de la couleur [43]. Ce modèle empirique permet d'exprimer la couleur d'un objet observé en tenant compte de son voisinage. Dans le domaine de l'analyse d'images couleur, l'utilisation future de ce modèle se traduit par la prise en compte de la couleur et de la taille des régions adjacentes à une région de l'image, ce qui pourrait apporter de nombreux changements dans les algorithmes de traitement. Cette multitude de systèmes de représentation de la couleur rend difficile le choix et l'utilisation des systèmes de représentation.

3 Images couleur numériques et systèmes de représentation

Dans la première partie de cet article, les solutions existantes pour représenter la couleur ont été présentées. La deuxième partie de cet article détaille comment la couleur peut être exploitée dans le cadre de l'analyse d'images.

Lorsque qu'il faut traiter, stocker ou afficher des données dans différents systèmes de représentation de la couleur, il est souvent nécessaire que ces données, qui appartiennent initialement à des domaines de définition différents, soient manipulées dans un même domaine de valeurs. C'est pourquoi chaque système de représentation de la couleur doit être codé pour satisfaire à ce principe tout en conservant les propriétés qui le définissent. Une méthode de codage des différents systèmes de représentation de la couleur est tout d'abord proposée.

La multitude des systèmes de représentation de la couleur pousse de nombreux chercheurs à déterminer quel est le système le mieux adapté face à un problème d'analyse d'images. Les approches pour juger dans quelle mesure la couleur et, notamment ses systèmes de représentation, apportent une amélioration des résultats pour de nombreuses applications de la vision artificielle sont présentées [44].

3.1 Codage des systèmes de représentation de la couleur

La couleur des pixels est généralement codée sur 3×8 bits. Les valeurs des pixels d'une image appartiennent donc à l'intervalle de valeurs entières non signées $[0, 255] \times [0, 255] \times [0, 255]$. Lorsque une image est convertie dans un autre système de représentation de la couleur, apparaît le problème de la dynamique des valeurs transformées. En effet, si les composantes trichromatiques d'une couleur codée sur 8 bits varient entre 0 et 255, il n'en est pas forcément de même lorsqu'elles ont subi une transformation. Il se peut qu'une valeur transformée soit supérieure à 255 ou inférieure à 0 et qu'elle appartienne à un intervalle de valeurs réelles signées. Après avoir montré, dans un premier temps, que cette non homogénéité peut poser plusieurs

types de problèmes en traitement d'images, une méthode de codage qui tient compte des propriétés intrinsèques des systèmes de représentation de la couleur est présentée dans un second temps afin de pallier ces problèmes.

Principe du codage. La transformation du système (R, G, B) en un système quelconque noté ici (T_1, T_2, T_3) où T_1, T_2 et T_3 sont les composantes transformées, modifie souvent la dynamique des composantes couleur. Ainsi, l'intervalle de valeurs entières non signées $[0, 255]$ auquel appartiennent les valeurs de chaque composante R, G et B se transforme en un intervalle de valeurs réelles signées ayant d'autres bornes. Ceci peut poser plusieurs types de problèmes en traitement d'images tels que :

- le stockage en mémoire : les composantes des pixels d'une image couleur sont stockées sur 3×8 bits. Afin de stocker des images dont la couleur des pixels est représentée selon un système de représentation quelconque, il faut donc s'assurer que la transformation associée au système fournisse des valeurs entières codables sur 8 bits.
- l'affichage : dans la mémoire d'une carte vidéo, les valeurs numériques des couleurs à afficher sont stockées sur 3×8 bits. Afin d'afficher des images couleur en utilisant différents systèmes de représentation, il faut coder ces images de sorte qu'elles respectent le format de la mémoire de la carte vidéo.
- l'évaluation d'histogrammes couleur : la comparaison d'histogrammes couleur dans différents systèmes de représentation de la couleur ne peut s'effectuer que si les modalités de ces histogrammes appartiennent au même domaine.
- le calcul de distances euclidiennes : la distance euclidienne est très utilisée aussi bien en traitement d'images qu'en colorimétrie. Elle permet d'évaluer les différences de couleurs et a servi comme métrique pour la conception de plusieurs systèmes de la CIE. La comparaison de distances euclidiennes entre deux couleurs codées selon différents systèmes de représentation ne peut s'effectuer que si les axes de l'espace de représentation ont une dynamique comparable.

Toutes ces raisons montrent la nécessité de réaliser un codage des systèmes de représentation de la couleur de telle sorte que la dynamique des composantes codées notées T'_1, T'_2 et T'_3 soit la même que celle des composantes R, G et B . Le principe de ce codage est illustré sur la figure 13.

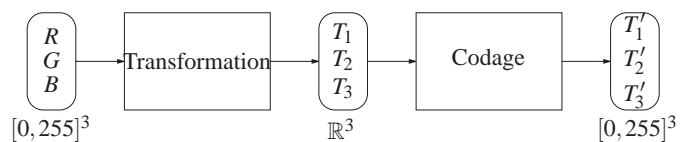


Figure 13 – Codage des systèmes de représentation de la couleur.

Le codage d'un système de représentation de la couleur (T_1, T_2, T_3) s'effectue en plusieurs étapes successives. Il

s'agit de :

- *décaler* les valeurs des composantes de telle sorte qu'elles soient non signées. Cette opération nécessite de connaître la valeur minimale que peut prendre chacune des composantes du système considéré.
- *normaliser* les valeurs décalées des composantes de telle sorte qu'elles appartiennent à l'intervalle $[0, 255]$. Cette opération nécessite de connaître la dynamique de chacune des composantes du système considéré, c'est-à-dire leurs valeurs minimales et maximales.
- *arrondir* les valeurs décalées et normalisées des composantes afin d'obtenir des valeurs entières. Ces valeurs sont arrondies à l'entier le plus proche.

Soit m_k la valeur minimale de la composante T_k ($k = 1, 2, 3$) du système considéré et M_k , sa valeur maximale. La grandeur m_k permet de déterminer la valeur du décalage à effectuer. La grandeur $\Delta_k = M_k - m_k$ représente la dynamique de la composante considéré et permet de déterminer un coefficient de normalisation en fonction de la dynamique des valeurs des composantes R , G et B (en général, 255).

Un système de représentation de la couleur peut nécessiter plusieurs transformations à partir des composantes R , G et B . Par exemple, le système (L^*, a^*, b^*) est évalué à partir des composantes X , Y et Z qui sont elles-mêmes déduites des composantes R , G et B . Dans ce cas, il est considéré que les composantes L^* , a^* et b^* sont calculées à partir des composantes R , G et B sans codage intermédiaire des composantes X , Y et Z .

Le codage qui doit conserver la forme du gamut associé à chaque système est souvent négligé lors de la présentation par les auteurs de leur algorithme d'analyse d'images. Les quelques auteurs qui ont abordé le codage des systèmes de représentation de la couleur ont proposé des solutions qui ne concernent que quelques systèmes ou qui en modifient certaines propriétés colorimétriques [41, 39, 45]. Une méthode générale qui s'applique aux systèmes des familles présentées figure 12 et qui s'attache à conserver leurs propriétés est ici présentée [46].

Méthode de codage. La figure 12 indique comment sont regroupés par familles les systèmes de représentation de la couleur en fonction de leurs propriétés. Tous ces systèmes de représentation et leurs transformations respectives sont définis en prenant comme hypothèse que la couleur est représentée par trois entités non dissociables qui respectent des propriétés physiques, psychologiques et physiologiques. La phase de codage d'un système doit s'effectuer de telle sorte que le calcul d'une distance euclidienne entre deux points représentant deux couleurs soit cohérent avec les propriétés du système considéré. L'enveloppe, le lieu, le solide et le gamut associés à un système de représentation ne doivent pas être déformés par le codage. Ainsi, le calcul des valeurs de normalisation et de décalage doit être réalisé en considérant l'ensemble des trois composantes d'un système. Un tel codage est appelé *codage non séparé*.

Ce codage ne peut pas s'appliquer aux systèmes percep-

tuels car la distance euclidienne n'y a pas de sens. En effet, la composante de teinte, représentée par un angle, est périodique. Un codage appelé *codage séparé* et dans lequel les valeurs de normalisation et de décalage sont évaluées séparément pour les trois composantes, leur est donc appliqué.

Codage séparé Le codage séparé consiste à coder chaque composante T_k indépendamment des deux autres selon l'équation :

$$T'_k = (T_k - m_k) \times \frac{255}{\Delta_k}. \quad (54)$$

L'application du codage séparé implique que les valeurs des composantes sont multipliées par un coefficient de normalisation qui est propre à chacune des composantes, ce qui est intéressant lorsque les dynamiques des composantes d'un système sont très différentes. Le codage séparé est appliqué exclusivement à la famille des systèmes perceptuels. D'autres auteurs ont choisi d'appliquer ce type de codage à d'autres familles de système. Ohta, par exemple, propose une transformation « normalisée » permettant de passer des primaires $[R_F]$, $[G_F]$ et $[B_F]$ de la norme NTSC aux primaires $[X]$, $[Y]$ et $[Z]$ avec comme blanc de référence, l'illuminant C [41, 39, 16, 31, 40]. Cette normalisation est réalisée en multipliant chaque ligne de la matrice de passage de l'équation 5 par un coefficient spécifique à la ligne, ce qui modifie ainsi la dynamique des composantes trichromatiques X , Y et Z . Ces coefficients sont choisis de telle sorte que les valeurs des composantes trichromatiques X , Y et Z aient la même échelle que les valeurs des composantes trichromatiques R_F , G_F et B_F . Cette transformation est définie par la matrice de passage \mathbf{P} suivante :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0,618 & 0,177 & 0,205 \\ 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ 0,000 & 0,056 & 0,944 \end{bmatrix}. \quad (55)$$

Cette normalisation permet aux dynamiques des valeurs de X , Y et Z d'être respectivement égales à celles de R_F , G_F et B_F . Cependant, la multiplication de chaque ligne de la matrice de passage par un coefficient différent revient à ne plus tenir compte du choix du blanc de référence ni des primaires initialement choisies puisque cette opération engendre un changement des valeurs de leur coordonnées trichromatiques.

En effet, en calculant les coordonnées trichromatiques x et y des primaires $[R_F]$, $[G_F]$ et $[B_F]$ après avoir réalisé un codage séparé, les valeurs des coordonnées trichromatiques sont : $x_r = 0,674$ et $y_r = 0,326$ pour la primaire $[R]$, $x_g = 0,224$ et $y_g = 0,743$ pour $[G]$ et $x_b = 0,162$ et $y_b = 0,090$ pour $[B]$. De même, les coordonnées trichromatiques de l'illuminant C sont alors $x_w = 0,333$ et $y_w = 0,333$. Force est de constater qu'en appliquant un codage séparé au système (X, Y, Z) , ces coordonnées ne correspondent plus à celles présentées dans les tableaux 2 et 3. Ceci est dû au fait qu'un coefficient de normalisation différent est appliqué sur chaque ligne de la matrice de passage.

Cela revient à considérer un autre blanc de référence et d'autres primaires. Les propriétés colorimétriques du système ainsi codé ne sont donc plus respectées.

Les systèmes perceptuellement uniformes tentent à réduire les disproportions des ellipses de MacAdam qui représentent des ensembles de couleur pour lesquelles aucune différence colorimétrique n'est perçue par l'homme. En réalisant un codage séparé sur ce type de système, un coefficient de normalisation différent sur les transformations correspondantes est en fait appliqué. Les ellipses de MacAdam se trouvent alors modifiées et peuvent être à nouveau disproportionnées. Il faut donc prendre garde à ne pas appliquer un tel type de codage aux systèmes perceptuellement uniformes. C'est pourquoi il est nécessaire d'appliquer un codage non séparé à de tels systèmes. Afin d'illustrer ce phénomène, une ellipse représentée dans le système (a^*, b^*) dont les composantes sont codées avec un codage séparé est tracée sur la figure 14(b). En comparant cette figure avec la figure 14(a), où l'ellipse est tracée dans le plan (a^*, b^*) non codé, il est évident que les proportions de l'ellipse ainsi que son orientation ont été modifiées par le codage séparé.

Codage non séparé Le codage non séparé consiste à coder chaque composante T_k en tenant compte des deux autres. Pour cela, il faut d'abord déterminer la composante T_k du système de représentation considéré qui présente la dynamique la plus élevée parmi les trois, notée Δ_{max} , telle que :

$$\Delta_{max} = \max_{k=1}^3 (\Delta_k). \quad (56)$$

Le codage de chaque composante est alors réalisé selon l'équation suivante :

$$T'_k = (T_k - m_k) \times \frac{255}{\Delta_{max}}. \quad (57)$$

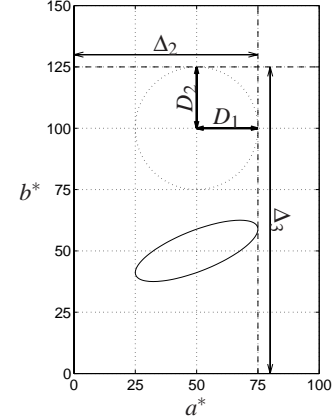
Le codage non séparé permet d'appliquer un coefficient de normalisation identique sur chacune des composantes du système de représentation de la couleur considéré.

Par exemple, en appliquant le codage non séparé au système (X, Y, Z) précédent, la matrice de passage (équation 5) devient :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0,514 & 0,147 & 0,169 \\ 0,253 & 0,497 & 0,096 \\ 0,000 & 0,056 & 0,944 \end{bmatrix}. \quad (58)$$

Avec cette matrice, les valeurs des coordonnées trichromatiques sont : $x_r = 0,67$, $y_r = 0,33$, $x_g = 0,21$, $y_g = 0,71$, $x_b = 0,14$, $y_b = 0,08$, $x_w = 0,310$ et $y_w = 0,316$, ce qui correspond bien aux valeurs des tableaux 2 et 3.

De même, en appliquant un tel codage aux systèmes perceptuellement uniformes, la forme des ellipses de MacAdam est conservée tandis que leurs proportions et leurs orientations peuvent être modifiées. Sur la figure 14(c), où un codage non séparé du système (L^*, a^*, b^*) a été appliqué, ni l'orientation ni les proportions des ellipses ne sont modifiées. Elles ont simplement subi une homothétie.



(a) ellipse dans le plan (a^*, b^*) .

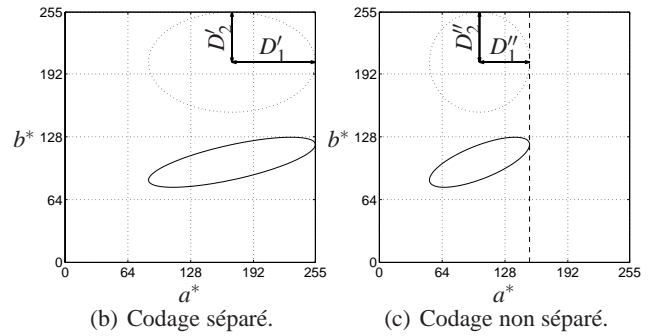


Figure 14 – Application des codages séparé et non séparé à une ellipse représentée dans le système (a^*, b^*) $((T_1, T_2, T_3) = (L^*, a^*, b^*))$. Ainsi, Δ_2 et Δ_3 correspondent respectivement à la dynamique de valeurs des composantes a^* et b^* . Les distances D_1 et D_2 sont égales dans le système (a^*, b^*) (figure 14(a)), ce qui signifie qu'il n'y a pas de différences perceptibles entre les couleurs correspondantes. Le codage séparé (figure 14(b)) modifie cette propriété ($D'_1 \neq D'_2$) alors que le codage non séparé (figure 14(c)) la conserve ($D''_1 = D''_2$).

Ainsi deux couleurs qui sont à égale distance d'une autre couleur, restent à égale distance de cette couleur après codage, ce qui n'est pas le cas en utilisant un codage séparé.

Afin de respecter leurs propriétés colorimétriques, il est nécessaire d'appliquer le codage non séparé aux familles des systèmes de primaires, des systèmes luminance-chrominance et aux systèmes d'axes indépendants.

Il peut cependant paraître paradoxal d'appliquer le codage non séparé aux systèmes d'axes indépendants. La transformation du système (R, G, B) vers un tel type de système s'effectue grâce à une matrice de passage. Le codage non séparé consiste donc à normaliser, avec le même coefficient, chaque ligne de la matrice, ce qui permet de la conserver à un facteur de normalisation près. Un codage séparé aurait modifié la matrice de passage par l'application d'un coefficient de normalisation différent sur chaque ligne, et donc, le système en découlant.

3.2 Choix du système de représentation

La couleur des pixels pouvant être codée selon différents systèmes de représentation de la couleur, il semble intéressant de mesurer l'influence d'un système de représentation sur les traitements de bas-niveau appliqués aux images couleur. Ainsi, plusieurs auteurs ont comparé différents systèmes de représentation de la couleur afin de déterminer celui qui permet le traitement d'une image le plus satisfaisant suivant des critères définis. Deux principales approches se présentent. La première consiste à traiter une ou plusieurs images par une ou plusieurs méthodes en utilisant différents systèmes de représentation de la couleur. Les images résultantes sont ensuite comparées à des images de référence qui correspondent aux résultats souhaités pour l'application considérée. Les critères de comparaison peuvent alors être qualitatifs s'ils correspondent à une appréciation subjective par un ou plusieurs experts de la qualité de l'image traitée ou quantitatives s'ils sont fondés sur une mesure effectuée sur l'image traitée. L'autre approche consiste, non pas à évaluer le résultat d'un traitement sur une image codée dans différents système de représentation de la couleur, mais à réaliser différentes mesures soit, sur une ou plusieurs images indépendamment des traitements, soit sur un ensemble de couleurs. Ces mesures sont ensuite analysées afin d'en déduire le meilleur système de représentation de la couleur au sens d'un critère.

Les différents travaux publiés ne permettent pas de dégager un système de représentation de la couleur adapté à tous les traitements et à toutes les images [17]. Bien au contraire, force est de constater que le choix d'un système est d'abord fonction de l'application considérée, c'est-à-dire du type d'image traitée. Ainsi de nombreux auteurs réalisent une étude préalable sur les images qu'ils doivent analyser en vue de déterminer le système de représentation le plus adéquat, puis ils se limitent à l'utilisation de ce système.

Les critères utilisés sont soit visuels, soit numériques et se limitent au cas des images analysées et aux algorithmes utilisés. En effet, la démarche souvent employée est de traiter une image par un algorithme puis de juger des résultats soit visuellement soit par la mesure d'un taux d'erreur ou l'évaluation d'un critère. L'algorithme utilisé et le critère d'évaluation de la qualité d'un système influencent donc aussi le choix de celui-ci. Le temps de traitement lié à la transformation de l'espace (R, G, B) est souvent aussi un critère de choix.

Enfin, plusieurs auteurs constatent que le caractère tridimensionnel de la représentation de la couleur n'est pas toujours nécessaire et que deux composantes peuvent suffire pour le traitement des images couleur.

4 Conclusion

Cet article est consacré à la représentation de la couleur par un système d'analyse d'images. La première partie de cet article porte sur la chaîne d'acquisition et d'affichage d'images couleur. Deux points essentiels se dégagent de cette partie :

- la connaissance des conditions d'acquisition des images couleur nécessite de spécifier le blanc de référence utilisé, l'éclairage employé et les paramètres d'acquisition de la caméra, comme le gain, l'offset ou la correction gamma.
- un calibrage colorimétrique de la chaîne d'acquisition des images couleur est recommandé pour que les couleurs des objets observés par une caméra soient correctement représentées dans les images acquises.

Il existe un grand nombre de systèmes de représentation de la couleur respectant chacun des propriétés physiques, physiologiques et psychologiques. Une liste non exhaustive de différents systèmes de représentation de la couleur est dressée dans la seconde partie de l'article. Cette présentation met évidence que la majorité de ces systèmes n'ont pas été initialement conçus et développés pour être appliqués à l'analyse d'images numériques. Ainsi, leur exploitation par un dispositif d'analyse d'images numériques couleur requiert de respecter certaines conditions. La connaissance des conditions d'acquisition et un calibrage colorimétrique adéquat sont nécessaires pour utiliser correctement les transformations du système (R, G, B) d'acquisition vers d'autres systèmes de représentation de la couleur.

La troisième partie de cet article évoque les contraintes d'utilisation des systèmes de représentation de la couleur sur les algorithmes de codage de la couleur des pixels qui suivent l'acquisition. Deux méthodes de codage ont été présentées, chacune étant adaptée à différentes familles de systèmes de représentation de la couleur.

Enfin, se pose le délicat problème du choix du système de représentation de la couleur qui soit adapté à l'application considérée. De nombreuses études ont porté sur les méthodes et critères utilisés pour déterminer le système de représentation de la couleur le mieux adapté à une application. Il n'existe malheureusement pas de système de représentation qui soit adapté à toutes les applications. Le choix d'un système pour une application de vision reste complexe de part la multitude des systèmes existants et de part la pertinence des critères de comparaison de ces systèmes.

Ces conclusions nous amènent à proposer un nouveau système de représentation de la couleur appelé l'*espace couleur hybride* [17, 47]. En effet, au lieu de chercher le système de représentation de la couleur le mieux adapté à un problème de traitements d'images, il peut être judicieux de construire un espace couleur hybride, composé de composantes couleur n'appartenant pas forcément toutes au même système de représentation de la couleur. Ces composantes sont sélectionnées de telle sorte qu'elles permettent la meilleure discrimination possible entre les classes de pixels en présence au sens d'un critère de discrimination basé sur des mesures de dispersion et de compacité des classes. Par ailleurs, ces composantes sont sélectionnées de sorte qu'elles soient le moins corrélées possible au sens d'une mesure de corrélation. Pour cela, une procédure de sélection itérative est proposée. Cette procédure consiste,

étant donné un ensemble d'attributs (ici, les composantes couleur) évalués sur une population d'individus (ici, les pixels), à se restreindre au meilleur attribut, puis l'associer à chacun des attributs restants et se restreindre au meilleur couple d'attributs, puis l'associer à chacun des attributs restants et se restreindre au meilleur triplet d'attributs, jusqu'à atteindre la dimension souhaitée au sens d'un critère informationnel. Ce système de représentation de la couleur a été validé dans le cadre de la segmentation d'images couleur de matchs de football où, pour chaque match, il est nécessaire de déterminer un espace couleur hybride adapté afin de distinguer les joueurs des deux équipes [48].

Références

- [1] R. Sève. *Physique de la couleur. De l'apparence colorée à la technique colorimétrique*. Masson, 1996.
- [2] A. Trouvé. *La mesure de la couleur : principes, technique et produits du marché*. Afnor-Cetim, 1991.
- [3] P. Kowaliski. *Vision et mesure de la couleur*. Masson, seconde édition, 1990.
- [4] Y. Dordet. *La colorimétrie : principes et applications*. Eyrolles, 1990.
- [5] Association Française de NORmalisation. *Couleur, Colorimétrie*. AFNOR, 1989.
- [6] Y. Grall. La fonction visuelle. *Techniques de l'ingénieur*, TE(E5175) :1–12, 11 1997.
- [7] D. Dupont et D. Steen. Colorimétrie : éléments théoriques. *Techniques de l'ingénieur*, R7(R6440) :1–, 2003.
- [8] M. Henry. Optique quantitative - Photométrie. Colorimétrie. Spectrométrie. *Techniques de l'ingénieur*, AF(A192) :1–21, 02 1982.
- [9] J.-P. Belan. Analyseurs d'images. *Techniques de l'ingénieur*, TE(E5520) :1–24, 11 1997.
- [10] J. Bajon. Vision 2D en robotique. *Techniques de l'ingénieur*, S(R7749) :1–19, 03 1998.
- [11] A. Trémeau et B. Laget. Quantification couleur et analyse d'image. *Traitement du Signal*, 12(1) :1–29, 1995.
- [12] V. Lozano. *Contribution de l'analyse d'images couleur au traitement des images textile*. Thèse de doctorat, Université Jean Monnet de Saint-Etienne, janvier 1998.
- [13] L. Liang. *Contribution à la segmentation chromatique des images. Application à l'identification d'objets colorés*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, juillet 1987.
- [14] C. A. Poynton. *A technical introduction to digital video*. John Wiley and Sons, 1996.
- [15] Commission Internationale de l'Éclairage. Colorimetry. Rapport technique 15.2, Bureau central de la CIE, Vienna, 1986.
- [16] T. Carron. *Segmentations d'images couleur dans la base Teinte-Luminance-Saturatuiion : approche numérique et symbolique*. Thèse de doctorat, Université de Savoie, décembre 1995.
- [17] N. Vandebroucke. *Segmentation d'images couleur par classification de pixels dans des espaces d'attributs colorimétriques adaptés. Application à l'analyse d'images de football*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, décembre 2000.
- [18] S. Galichet. *Etude d'un système d'incrustation d'images vidéo couleur*. Thèse de doctorat, Université de Technologies de Compiègne, décembre 1989.
- [19] A. Trémeau. *Contribution des modèles de la perception visuelle à l'analyse d'image couleur*. Thèse de doctorat, Université Jean Monnet de Saint Etienne, octobre 1993.
- [20] D. Dupont et D. Steen. Application de la colorimétrie aux contrôles des couleurs de surface. *Techniques de l'ingénieur*, R7(R6442) :1–, 2003.
- [21] Commission Internationale de l'Éclairage. Industrial colour-difference evaluation. Rapport technique 116, Bureau central de la CIE, 1995.
- [22] G. Raffy. *Vision numérique couleur appliquée à l'évaluation de la qualité de carcasses de dindes*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, mars 1999.
- [23] D. L. MacAdam. *Color measurement, theme and variation*. Optical Sciences. Springer-Verlag, second revised édition, 1985.
- [24] L. Bedat. *Aspects psychovisuels de la perception des couleurs. Application au codage d'images couleur fixes avec compression de l'information*. Thèse de doctorat, Université de Nantes, octobre 1998.
- [25] O. D. Faugeras. *Digital color image processing and psychophysics within the framework of a human visual model*. Ph. D. dissertation, University of Utah, juin 1976.
- [26] C. Garbay. *Modélisation de la couleur dans le cadre de l'analyse d'images et de son application à la cytologie automatique*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, décembre 1979.
- [27] D. H. Ballard et C. M. Brown. *Computer vision*. Prentice-Hall, New Jersey, 1982.
- [28] V. Rodrigues. *L'analyse du mouvement dans les images couleurs*. Thèse de doctorat d'état, Université Paul Sabatier de Toulouse, novembre 1985.
- [29] L. Brun. *Segmentation d'images couleur à base topologique*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, décembre 1996.
- [30] P. Colantoni. *Contribution des structures de données à la segmentation d'images couleur - Elaboration d'un outil d'infographie textile*. Thèse de doc-

torat, Université Jean Monnet de Saint-Etienne, novembre 1998.

- [31] V. Coutance. *La couleur en vision par ordinateur. Application à la robotique*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, janvier 1991.
- [32] G. Claramont. *Développement de techniques de segmentation chromatique et implantation dans un module de vision*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, décembre 1984.
- [33] Q.-T. Luong. La couleur en vision par ordinateur : une revue. *Traitement du Signal*, 8(1) :3–34, 1991.
- [34] D. Sage. *Poursuite d'objets par analyse d'une séquence d'images couleur*. Thèse de doctorat d'état, Institut National Polytechnique de Grenoble, avril 1989.
- [35] I.-A. Ocadiz Luna. *Analyse en composantes principales d'une image couleur*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, octobre 1985.
- [36] M. Adel. *Détection de défauts de placage d'Okoumé par traitement d'images couleur et analyse de texture*. Doctorat 3ème cycle, Institut National Polytechnique de Lorraine, janvier 1994.
- [37] A. Giralt. *Classification chromatique en temps réel sur des images. Application à l'aide à la conduite par suivi des feux arrières de véhicules*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, novembre 1992.
- [38] X. Liu. *Analyse d'images couleur en composantes indépendantes par réseau de neurones*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, décembre 1991.
- [39] P. Pujas. *Analyse d'images couleur et fusion d'images 3D et couleur*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc, février 1996.
- [40] A. Guzman de Leon. *Etude d'espaces couleur pour la segmentation et l'aide à l'analyse d'images colposcopiques*. Thèse de doctorat, Université de Technologies de Compiègne, juillet 1997.
- [41] Y. I. Ohta, T. Kanade, et T. Sakai. Color information for region segmentation. *Computer Graphics and Image Processing*, 13 :222–241, 1980.
- [42] G. Celeux, E. Diday, G. Govaert, Y. Lechevallier, et H. Ralambondrainy. *Classification automatique des données*. Dunod informatique, 1989.
- [43] Commission Internationale de l'Éclairage. A colour appearance model for colour management systems : CIECAM02. Rapport technique 159, Bureau central de la CIE, Vienna, 2004.
- [44] A. Trémeau, C. Fernandez-Maloigne, et P. Bonton. *Image numérique couleur : de l'acquisition au traitement*. Dunod, 2004.
- [45] O. Lezoray. *Segmentation d'images couleur par morphologie mathématique et classification de données par réseaux de neurones : application à la classification de cellules en cytologie des séreuses*. Thèse de doctorat, Université de Caen, janvier 2000.
- [46] N. Vandenbroucke, L. Macaire, et J.-G. Postaire. Color systems coding for color image processing. Dans *International Conference on Color in Graphics and Image Processing*, volume 1, pages 180–185, Saint-Etienne, 2000.
- [47] N. Vandenbroucke, L. Macaire, et J.-G. Postaire. Color image segmentation by pixel classification in an adapted hybrid color space. Application to soccer image analysis. *Computer Vision and Image Understanding*, 90(2) :190–216, 2003.
- [48] N. Vandenbroucke, L. Macaire, et C. Vieren. Suivi automatique de personnes en mouvement par analyse d'images couleur successives. Application au suivi de joueurs de football. Dans *Seizième Colloque sur le Traitement du Signal et des Images*, volume 2, pages 917–920, Grenoble, 1997.