Université Ibn Zohr
Faculté Polydisciplinaire
Ouarzazate, Maroc

جامعة ابن زهر
الكلية متعددة التخصصات
ورزازات، المغرب

MEMOIRE

Réalisé par

Essaâdya ALLALI et Amina SAIDI

Dans le cadre du Projet Professionnel

Filière : Technique Cinématographiques et Audiovisuelles
Année : 2008/2009

Thème

COLORIMETRIE POUR LA VIDEO

Soutenu le 25 Mai 2009 à 14H 30 devant la commission d'examen

H. Chaib	Professeur, FPO, Ouarzazate	Encadrant
N. Saffaj	Professeur, FPO, Ouarzazate	Examinateur
R. Yafia	Professeur, FPO, Ouarzazate	Examinateur

REMERCIEMENTS

Le présent travail a été réalisé au sein de la Faculté Polydisciplinaire d'Ouarzazate dans le cadre du projet de fin d'étude de la License professionnelle « Techniques Cinématographiques et Audiovisuelles : Son et Image ». Il a été dirigé par Monsieur H. Chaib, Professeur à la Faculté Polydisciplinaire d'Ouarzazate.

Nous remercions en tout premier lieu Monsieur le doyen, les enseignants ainsi que le corps administratif de la Faculté Polydisciplinaire d'Ouarzazate, qui ont veillé de près ou de loin sur notre formation avec beaucoup de patience et d'intelligence mais aussi pour avoir le mérite de nous supporter et de nous encourager au cours de ces années.

Nous tenons à remercier vivement les membres de jury qui nous ont fait l'honneur de nous bien vouloir juger ce travail.

Nous souhaitons que nos parents trouvent dans ce modeste mémoire une récompense à tout ce qu'ils ont donné d'eux-mêmes pour notre éducation. Enfin nous remercions tous nos amis qui de près ou de loin nous ont apporté leur aide au cours de nos études.

SOMMAIRE

INTRODUCTION **5**
CHAPITRE I : GENERALITE **6**
I.1 INTRODUCTION 6
I.2 DOMAINE D'APPLICATION DE LA COLORIMETRIE 6
I.3 TRIPLET DE VISION 6
CHAPITRE II : LUMIÈRE **8**
II.1 INTRODUCTION 8
II.2 COMPOSITION DE LA LUMIERE 8
II.3 SOURCES DE LUMIERE 9
II.4 PROPAGATION DE LA LUMIERE 10
CHAPITRE III : COULEUR **11**
III.1 INTRODUCTION 11
III.2 ORIGINE DE LA COULEUR 11
III.3 TEINTE, SATURATION ET LUMINANCE 12
III.4 FILTRES 12
III.5 SYNTHESES COLORIMETRIQUES 13
III.5.1 Synthèse additive 13
III.5.2 Synthèse soustractive 14
III.6 CLASSIFICATIONS RVB ET XYZ 15
III.6.1 Espace RVB 15
III.6.2 Espace XYZ 16
III.6.3 Diagramme de chromaticité 17
III.7 TEMPERATURE DE COULEUR 18
III.7.1 Corps noir 19
III.7.2 Blancs étalons 20
III.7.3 Caméra et température de couleur 20
CHAPITRE IV : ŒIL ET VISION **21**
IV.1 INTRODUCTION 21
IV.2 CONSTITUTION DE L'ŒIL 21
IV.3 PROPRIETE DE VISION 22
IV.4 ROLE DU CERVEAU 23
IV.5 COURBE DE VISIBILITE RELATIVE 23
CHAPITRE V : COLORIMETRIE ET VIDEO **24**
V.1 CHAINE DE PRISE DE VUE TRICHROME 24
V.1.1 Présentation d'une caméra 24
V.1.2 Zoom 24
V.1.3 Séparateur optique 24
V.1.4 Tubes analyseurs 25
V.1.5 Circuits du traitement vidéo 25
V.1.6 Circuits annexes 25
V.2 CORRECTION COLORIMETRIQUE D'UNE CAMERA 25

V.3 ETALONNAGE ARGENTIQUE ET NUMERIQUE 25
V.4 CORRECTEURS COLORIMETRIQUES 26
V.4.1 Correcteurs primaires 27
V.4.2 Correcteurs secondaires 27
V.4.3 Fenêtres 28
V.5 CHAINE DE PRISE DE VUE : TELEVISION 28
V.5.1 Fonctionnement d'un téléviseur couleur 28
V.5.2 Signal vidéo 29
V.5.3 Espace colorimétrique d'analyse et de synthèse 29
V.6 REPRODUCTION DE L'IMAGE VIDEO 30
V.6.1 Tube cathodique 30
V.6.2 Balayage entrelacé 31
V.6.3 Balayage progressif 31
V.7 CODAGE DE L'INFORMATION COULEUR EN VIDEO 32
V.7.1 NTSC 32
V.7.2 PAL 33
V.7.3 SECAM 33
CONCLUSION 34

INTRODUCTION

L'homme est sensible aux rayonnements lumineux dans le domaine compris entre 390 nm et 780 nm. La rétine possède trois types de cellules appelées cônes présentant des courbes spectrales différentes. Comme il y a trois types de récepteurs sensibles dans de régions différentes du spectre visible il est possible de reproduire les sensations physiologiques à la couleur à partir d'un mélange de trois couleurs de base selon un respectif de ces couleurs de base.

En effets, la couleur n'existe pas de façon intrinsèque mais c'est une sensation physiologique et psychique créée par le couple œil-cerveau. En fait, la mesure de la couleur est difficile à quantifier à cause de l'interprétation faite pour le cerveau des stimulis reçus. Apparemment, il est possible d'étudier la couleur quantitativement en se basant sur la sensation physiologique qu'elle génère pour le système visuel humain : c'est la colorimétrie.

Ce mémoire expose les notions de base de la colorimétrie qui est un passage obligé entre le monde réel et celui des systèmes de reproduction d'images que nous utilisons couramment. Après un rappel succinct de quelques généralités sur la nature de la lumière, les grandeurs permettant de la caractériser et le principe de la vision humaine, nous aborderons les propriétés de la synthèse additive et les différents espaces colorimétriques permettant de représenter les couleurs. En suite, nous verrons comment s'applique la théorie colorimétrique dans le domaine de la télévision en passant par le signal vidéo en le processus de restitution des images sur un téléviseur en couleur.

CHAPITRE I : GENERALITE

I.1 INTRODUCTION

La colorimétrie est la science de mesure de la couleur. Elle est à la base de tous les systèmes de reproduction d'images existants. Elle permet de qualifier d'une manière scientifique et rigoureuse la perception des couleurs.

La colorimétrie utilise trois paramètres pour représenter une couleur. Il existe plusieurs systèmes de représentation colorimétrique tels que les systèmes TSL, RVB, XYZ, etc. Par exemple le système TSL utilise les paramètres T, S et L qui représentent respectivement la teinte, la saturation et la luminosité. La teinte désigne la couleur, la saturation mesure la pureté de la couleur et la luminosité indique si la couleur est sombre ou claire. C'est sur ces trois paramètres auxquels l'œil humain est sensible que s'appuie la classification TSL.

I.2 DOMAINE D'APPLICATION DE LA COLORIMETRIE

En colorimétrie, on cherche à caractériser une couleur en tant que mélange de trois couleurs, par exemple rouge, vert, bleu. On ne s'attache pas à la distribution spectrale mais à la sensation physiologique. Alors, la colorimétrie est utilisée pour l'analyse physiologique des stimuli de couleur et le représenter dans différentes bases colorimétriques selon le besoin.

I.3 TRIPLET DE VISION

Le flux lumineux constitue le premier élément de la vision puisque c'est lui qui excite le système visuel humain à travers l'œil qui constitue le deuxième élément de la vision. Le troisième élément qui intervient est l'objet qui modifie la répartition spectrale de l'énergie issue de la source de lumière avant de la diffuser vers l'œil. On a parle donc du triplet de vision : lumière, œil et objet (Figure 1).

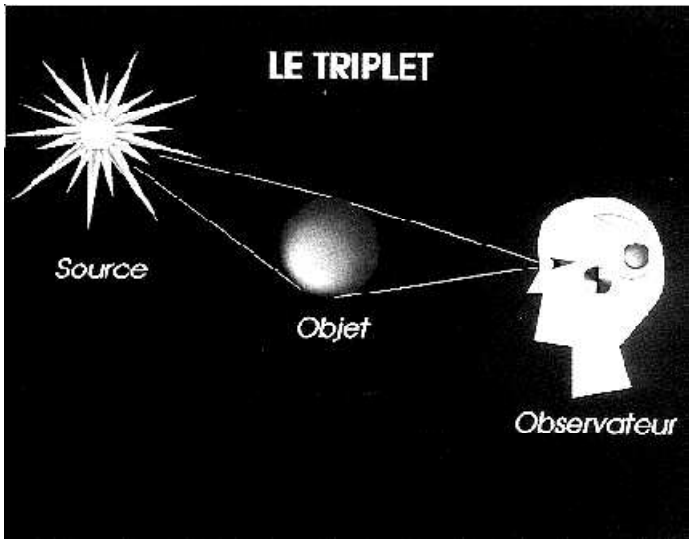

Figure 1 : Triplet de vision.

Le système de vision de l'être humain lui permet d'évaluer rapidement et en permanence l'aspect des objets et des sources lumineuses. La question qui se pose : est ce que le jugement visuel d'un observateur humain, à cause des variations physiques, physiologiques et psychologiques, peut être traduit par des valeurs numérique objectives ? C'est le but de la colorimétrie.

Pour mesurer la couleur des objets que nous observons, les trois paramètres du triplet doivent être étudiés.

CHAPITRE II : LUMIÈRE

II.1 INTRODUCTION

La lumière peut être définie comme étant l'opposé de l'obscurité. Mais de point de vue physique, la lumière est une onde électromagnétique qui se propage dans le vide, l'air, l'eau ou certains matériaux dits transparents (comme le verre). Ce type d'ondes très particulier résulte des variations, dans l'espace et le temps, d'un champ électromagnétique. Fluide immatériel, invisible et omniprésent dans l'Univers, le champ électromagnétique est à l'origine de nombreux phénomènes comme les aurores polaires ou le comportement d'une boussole.

Mais qu'est-ce que la lumière ? D'où vient-elle ? Comment se propage-t-elle ? La question de la nature de la lumière est l'une des plus anciennes énigmes de la science.

II.2 COMPOSITION DE LA LUMIERE

En éclairant un prisme et on observa que la lumière se décomposait en bande multicolore identique à la répartition colorées de l'arc-en-ciel (Figure 2). Cette décomposition de la lumière en radiations colorées met en évidence qu'une lumière blanche résulte de l'association d'un grand nombre de radiations colorées.

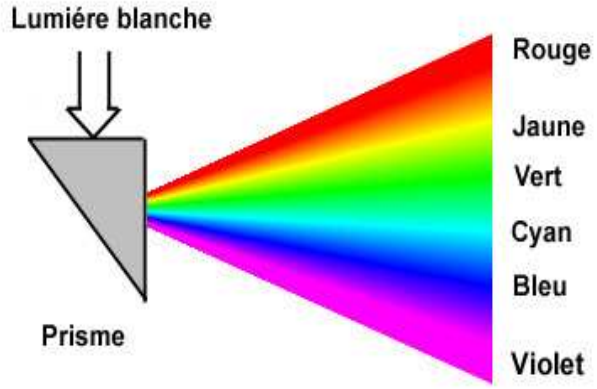

Figure 2 : Décomposition de lumière blanche.

En 1924, Louis de Broglie a démontré que les rayons lumineux sont des ondes électromagnétiques qui peuvent être caractérisées par leur fréquence ou par leur longueur d'onde.

Le spectre de la lumière visible s'étale de la limite de l'ultraviolet en 380 nm jusqu'à la limite de l'infrarouge pour une longueur d'onde d'environ 780 nm. La lumière violette

est caractérisée par des longueurs d'ondes comprises entre 380 nm et 450 nm, les longueurs d'onde comprises entre environ 450 nm à 490 nm caractérisent la lumière bleue. Celle entre 500 nm et 750 nm correspond au vert. Dans la très petite zone entre 570 nm et 590 nm se trouve les jaunes et dans la plage comprise entre 590 nm et 770 nm se situent des oranges les plus vifs. En fin, La lumière rouge est caractérisée par des longueurs d'ondes comprises entre 650 nm et 780 nm.

La lumière solaire est constituée de la superposition d'une infinité d'ondes monochromatique de différentes longueurs d'ondes. Pour une longueur d'onde comprise entre 380nm et 780nm, l'œil humain perçoit une couleur caractéristique de celle-ci.

Pour utiliser ce spectre dans la reproduction des couleurs, on admit que la lumière blanche (composée de toutes les couleurs visibles pour l'œil humain) est composé à parts égales de la lumière rouge (R), de la lumière verte (V) et de la lumière bleue (B). Ces trois couleurs constituent les couleurs de base d'un système colorimétrique qui s'appelle le système RVB et qui permet de faire une description complète de toutes les couleurs qui existent. Afin d'être complet en termes de description des couleurs, trois nouvelles couleurs sont introduite est qui sont le cyan, le magenta et le jaune. Ces couleurs sont, respectivement, les couleurs complémentaires de des couleurs primaires rouge, vert et bleu.

Remarque : Deux couleurs sont dites complémentaires si leur superposition en synthèse additive donne la couleur blanche.

II.3 SOURCES DE LUMIERE

Il y a deux types de source de lumière :

- **Source primaire :** Ce sont les sources produisent elles-mêmes la lumière qu'elles émissent comme le soleil, l'écran d'un ordinateur, l'ampoule, etc. Le soleil ou l'ampoule électrique émettent aussi de la chaleur, cependant on dit que ce sont des corps incandescents. D'autres types de sources primaires existent, comme les lasers, les lucioles ou les lampes au néon.
- **Source secondaire :** Ce sont les sources qui ne peuvent être vues que s'elles sont éclairées comme un arbre ou une personne. Quand la lumière est projetée sur un objet, ce dernier réfléchit une partie dans toutes les directions et absorbe l'autre partie, cependant on dit que la lumière est diffusée par l'objet.

Les sources secondaires ne réfléchissent pas la lumière de la même façon. Par exemple, le miroir d'un phare réfléchit dans une direction particulière toute la lumière qu'il reçoit de la lampe, nous permettant d'observer cette lumière à très grande distance. On parle dans ce cas de la réflexion de lumière. Par contre, un arbre diffuse la lumière qu'il reçoit dans toutes les directions. Dans ce cas on parle de la diffusion de la lumière. Un objet totalement noir ne réfléchit quasiment pas de lumière. La lune tire sa luminosité de la lumière du soleil qu'elle diffuse dans toutes les directions, notamment vers la terre.

II.4 PROPAGATION DE LA LUMIERE

La lumière se propage dans des milieux transparents ou translucides. Un milieu transparent, tel que l'eau ou le verre, se laisse totalement traverser par la lumière ; les objets y sont parfaitement visibles. Un milieu translucide transmet également la lumière, mais en la diffuant, empêchant ainsi d'y distinguer les objets. Un corps opaque ne laisse pas passer la lumière mais il en absorbe une partie et diffuse l'autre.

Dans un milieu transparent quelconque, le trajet de la lumière peut être représenté par une ligne appelé rayon lumineux. Si le milieu est homogène, la lumière se propage en lignes droites.

CHAPITRE III : COULEUR

III.1 INTRODUCTION

Le monde apparaît coloré pour l'œil humain, avec des teintes dont les nuances semblent infinies. La couleur est une sensation physiologique produite par la lumière diffusée par les objets, elle n'est pas une propriété physique liée aux objets. En effet, la couleur d'un objet dépend de la source qui l'éclaire, du matériau dont il est constitué, de l'œil avec ses capteurs trichromatiques et du cerveau qui interprète ces sensations.

C'est Isaac Newton est le premier qui a compris que la lumière est composée de différentes couleurs juxtaposées. Mais les peintres et les artistes ont toujours su créer et utiliser les couleurs, même sans comprendre leur origine scientifique.

III.2 ORIGINE DE LA COULEUR

La lumière blanche est composée d'un ensemble d'ondes électromagnétiques qui vibrent à différentes fréquences que l'œil humain perçoit comme différentes couleurs : du violet pour la plus petite longueur d'onde du spectre visible au rouge pour la plus grande longueur d'onde du spectre visible, en passant par le bleu, le vert, le jaune et l'orange. L'ensemble de ces bandes de lumière colorée forme le spectre lumineux qui s'appelle aussi le spectre de la lumière visible.

Ainsi, la lumière blanche comme celle du soleil est composée de toutes les couleurs du spectre lumineux. Lorsqu'elle rencontre un objet, une partie de la lumière est diffusée par cet objet qui joue le rôle d'une source secondaire de lumière, et une autre partie est absorbée par l'objet. C'est la lumière diffusée par l'objet qui lui donne sa couleur. Par exemple, si toutes les couleurs de la lumière reçue par l'objet sont absorbées sauf le bleu qui est diffusé, l'objet nous apparaîtra alors bleu. Un objet noir ne diffuse aucune composante de la lumière blanche mais il absorbe toutes les couleurs reçues. Ainsi, en optique, le noir n'est pas une couleur ; il correspond à l'absence de couleur.

Les objets diffusent la lumière d'une façon sélective du fait qu'ils absorbent certaines radiations et diffusent les autres. Cependant, les couleurs apparentes des objets sont les couleurs des radiations diffusées.

Lorsque toutes les radiations du spectre visible sont diffusées par un objet, alors ce dernier apparaît blanc. Lorsqu'un objet diffuse toutes les radiations du spectre visible avec la même proportion, alors ce dernier apparaît gris.

III.3 TEINTE, SATURATION ET LUMINANCE

La vision d'une couleur est rattachée à trois sensations distinctes traduites par des grandeurs subjectives qui sont la teinte, la saturation (ou pureté) et la luminosité (ou brillance).

La teinte est la caractéristique qui correspond dans le langage courant à la couleur et qui s'exprime par les adjectifs tels que rouge, jaune, bleu, etc. Elle est déterminée en colorimétrie par la longueur d'onde dominante de la couleur considérée.

La notion de saturation est directement liée à la pureté de la radiation. On dit qu'une couleur pure a un facteur de pureté égal à 1, quand elle ne comporte aucune trace de lumière blanche ; elle saturée à son maximum. Une couleur qui contient un taux relativement élevé de lumière blanche est dite désaturée ou lavé de blanc ; c'est le cas des teintes pastel. Le facteur de pureté caractérise donc le mélange d'une couleur avec du blanc. Par exemple, un rouge vif très saturé deviendra de plus en plus rose au fur et à mesure qu'on lui ajoutera du blanc.

La luminosité qualifie l'impression d'intensité ou de brillance d'une lumière, que l'on exprime par les adjectifs « clair » ou « foncé » et par le substantif « clair ». La luminosité est liée à la puissance du rayonnement reçu par l'œil, et bien sûr, à la sensibilité de celui-ci en fonction de la longueur d'onde.

Une couleur peut être vive (claire et saturée), pâle (claire et désaturée), profonde (foncée et saturée) ou rabattre (foncée et désaturée).

III.4 FILTRES

Un filtre est un corps qui absorbe une partie de la lumière qu'il reçoit et émit l'autre partie soit par diffusion soit par transmission. On distingue deux catégories de filtres : les filtres neutres et les filtres colorés.

Un filtre neutre absorbe toutes les composantes de la lumière incidente avec la même proportion. Après avoir être émis par le filtre, le faisceau lumineux perd en intensité mais conserve sa composition spectrale, donc sa teinte. Un filtre coloré modifie les proportions relatives des composantes de la lumière en interceptant certaines longueurs d'onde et en émettant d'autres. Par exemple, un filtre rouge absorbe presque toutes les radiations autres que celles correspondant aux longueurs d'onde du rouge. Si l'on projette sur ce filtre rouge une lumière exemptée de rouge, aucune lumière ne doit théoriquement le traverser.

On distinguera les types de filtres suivant :

- **filtre neutre** : ce filtre consiste à retrancher la même proportion de toutes les composantes de la lumière (couleurs primaires et complémentaires). Après avoir traversé ce filtre le faisceau est donc moins lumineux, mais n'a pas changé de composition. On trouve ces filtres apparaissent de couleur gris, d'où leur appellation de « gris filtre ».

- **Filtre coloré** : c'est un filtre qui laisse passer de façon fréquentielle certains constituants de la lumière et retient les autres. Par exemple, un filtre jaune laissera passer complètement le vert et le rouge dont le mélange donne la sensation du jaune et retiendra complètement le bleu.
- **Filtre compensateur de couleur (CC)** : ce filtre peut retenir une portion déterminée de certains constituants de la lumière et laissera passer les autres. Ainsi, un filtre « CC-30Y » jaune (Y pour Yellow) retient la moitié du bleu, laisse passer l'autre moitié du bleu ainsi que la totalité du vert et de du rouge. Le chiffre 30 correspond à la densité du filtre (logarithme de l'opacité). Un filtre ne laissant passer que la moitié de la lumière (opacité 2, ou 1 diaphragme) aura pour densité de log2=0,30 et sera caractérisé par ce chiffre.
- **Filtre correcteur de lumière** : il s'agit progressivement du bleu vers le rouge ou du rouge vers le bleu. Il permet de simuler de la lumière artificielle à partir de la lumière du jour. Il existe une grande variété de filtres qui absorbe ou atténuent les radiations de bandes du spectre, plus ou moins large. Citons encore les filtres ultraviolets ou infrarouges qui agissent sur des radiations auxquelles l'œil n'est pas sensible, mais auxquelles certaines émulsions peuvent réagir et qu'il est par conséquent nécessaire, dans certaines applications, d'éliminer.

III.5 SYNTHESES COLORIMETRIQUES

On distingue deux types de synthèses colorimétriques qui sont la synthèse additive et la synthèse soustractive.

III.5.1 Synthèse additive

Il est possible de recréer n'importe quelle couleur en projetant sur une feuille de papier ou sur un écran des faisceaux lumineux rouge, vert et bleu. Ce sont les trois couleurs primaires du spectre lumineux auxquelles est sensible l'œil humain. C'est ainsi que lorsque du vert et du rouge sont superposés, il apparaît du jaune ; tandis que du bleu et du vert donnent du cyan et que du bleu et du rouge donnent du magenta : c'est la synthèse additive de la couleur. Lorsque l'on superpose les trois couleurs primaires avec la même proportion on obtient la couleur blanche (Figure 3). C'est l'opération inverse de la décomposition de la lumière par un prisme.

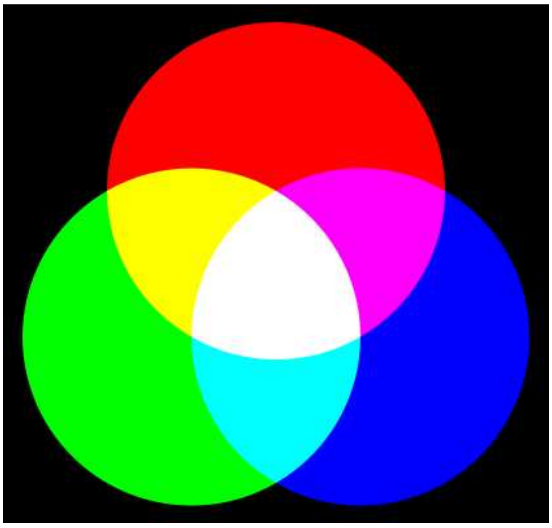

Figure 3 : Mélange additive des couleurs rouge, vert et bleu.

III.5.2 Synthèse soustractive

Les couleurs primaires du physicien (rouge, vert, bleu) ne sont pas les mêmes que celles du peintre (magenta, jaune, cyan). Les peintres n'utilisent pas des faisceaux de lumière pour fabriquer les couleurs, mais ils mélangent des pigments colorés qui diffusent certaines couleurs.

Par exemple, un pigment magenta absorbe toutes les couleurs du spectre lumineux sauf le rouge et le bleu qu'il diffuse et qui lui donnent sa couleur (rose foncé). Lorsqu'un pigment jaune, qui ne diffuse que du rouge et du vert, est ajouté au pigment magenta, la combinaison des deux ne diffuse plus que du rouge c'est à dire le bleu initialement diffusé par le pigment magenta et le vert diffusé par le pigment jaune ne sont plus diffusés par le mélange des deux pigments. C'est ainsi que l'on obtient la synthèse soustractive du rouge du faite que toutes les couleurs du spectre sont absorbées par le mélange sauf le rouge qui est diffusé.

Lorsque l'on mélange des pigments magenta, jaune et cyan alors plus aucune couleur n'est diffusée et par conséquent le mélange apparait noir (Figure 4).

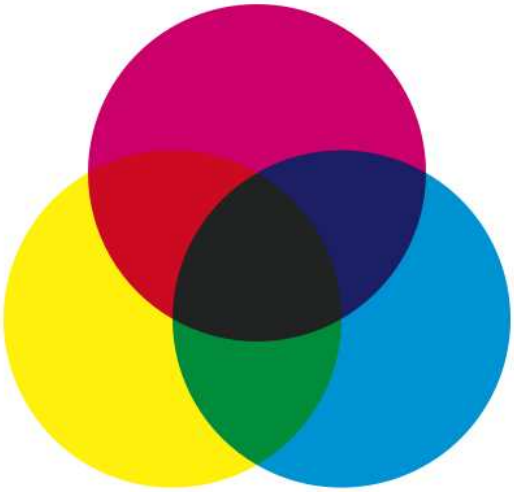

Figure 4 : Mélange soustractive des couleurs cyan, magenta et jaune.

III.6 CLASSIFICATIONS RVB ET XYZ

III.6.1 Espace RVB

Une analyse plus précise de la vision montre que les trois types de cônes répondent plus spécifiquement à trois couleurs qui sont rouge, verte et bleue, ce qui est à l'origine du système naturel RVB.

Dans la représentation RVB, on caractérise une couleur par les paramètres R, V et B définis ci-dessous. En effet, en 1931, la Commission Internationale d'Eclairage (CIE) a adopté, par convention, une représentation des couleurs, en imposant une valeur constante de la luminosité. Pour des raisons de commodité, on a considéré les radiations rouge, verte et bleue de longueurs d'onde suivantes :

$$\lambda_r = 700 \text{ nm} \qquad \lambda_v = 546 \text{ nm} \qquad \text{et} \qquad \lambda_b = 436 \text{ nm}$$

ainsi que les quantités R, V et B qui sont reliées aux luminances associées L_r, L_v et L_b par :

$$R = L_r \qquad V = L_v / 4{,}59 \qquad \text{et} \qquad B = L_b / 0{,}06$$

Les facteurs 4,59 et 0,06 sont choisis de telle sorte qu'un observateur moyen voit du blanc pour R = V = B.

Cependant, les quantités R, V et B de la représentation RVB sont liées directement aux luminances partielles des trois couleurs de base qui sont les couleurs primaires de la synthèse additive.

Cependant, une couleur C quelconque peut être décrite comme la combinaison linéaire des trois couleurs primaires [R], [V] et [B] :

$$C = R[\mathbf{R}] + V[\mathbf{V}] + B[\mathbf{B}]$$

où R, V, B représentent les composantes trichromatiques de la couleur C. On note que toutes les couleurs sont caractérisées par des composantes trichromatiques. Sur la

figure 5 sont représentées les trois fonctions $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{v}(\lambda)$ et $\bar{b}(\lambda)$ qui donnent les valeurs de ces coefficients (R, V, B) pour reproduire une couleur de longueur d'onde donnée.

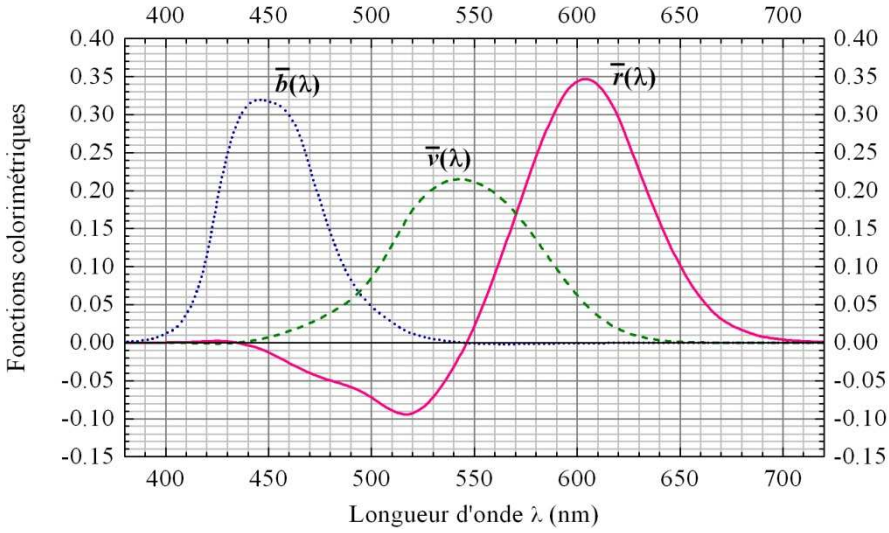

Figure 5 : Représentation graphique des trois fonctions colorimétriques $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{v}(\lambda)$ et $\bar{b}(\lambda)$ du système colorimétrique RVB du CIE 1931.

En fait, ce système présente un inconvénient majeur en raison de l'impossibilité de reconstituer par synthèse additive une couleur correspondant à la longueur d'onde λ = 500 nm par exemple, car dans ce cas le coefficient correspondant à la couleur rouge est négatif :

$$C_{500} = -0,07[\mathbf{R}] + 0,08[\mathbf{V}] + 0,04[\mathbf{B}]$$

Pour remédier à cet inconvénient, la CIE (Commission Internationale de l'´eclairage) a défini en 1931 un autre repère : la base (X, Y, Z).

III.6.2 Espace XYZ

Le système colorimétrique XYZ a été mis au point par la CIE après que celle-ci eut étudié en détail le système RVB qui permettait de reproduire toutes les couleurs de lumières en jouant sur les intensités des trois composantes R, V et B. La nouvelle base (X, Y, Z) permet de décrire toutes les couleurs perçues avec des coefficients positifs. Le passage de la base (R, V, B) à la base (X, Y, Z) se fait à travers la transformation linéaire suivante :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2,769 & 1,752 & 1,130 \\ 1,000 & 4,591 & 0,060 \\ 0,000 & 0,056 & 5,594 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R \\ V \\ B \end{pmatrix}$$

Les trois nouvelles fonctions colorimétriques $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ et $\bar{z}(\lambda)$ qui donnent les valeurs des coefficients (X, Y, Z) pour reproduire une couleur de longueur d'onde donnée peuvent être déduites des courbes fonctions $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{v}(\lambda)$ et $\bar{b}(\lambda)$ (Figure 5) et de la transformation précédente. Ces nouvelles fonctions sont représentées sur la figure 6.

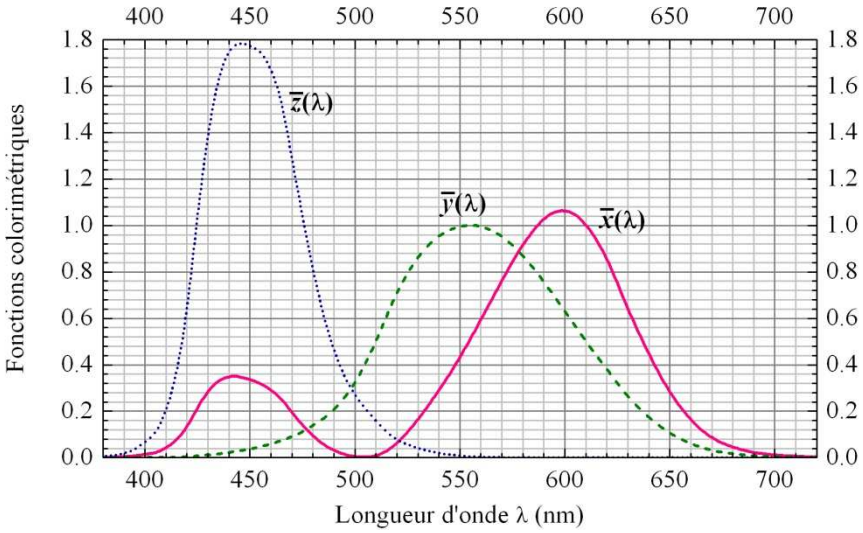

Figure 6 : Représentation graphique des trois fonctions colorimétriques $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ et $\bar{z}(\lambda)$ du système colorimétrique XYZ du CIE 1931.

Ce nouveau système de couleurs XYZ présente trois avantages par rapport au système RVB :

- Les composantes trichromatiques X, Y et Z sont toujours positives ;
- La composante Y correspond à la luminance de la source ce qui permet de faire un lien avec la photométrie puisque la courbe $\bar{y}(\lambda)$ coïncide avec la courbe de la réponse de l'œil humain ;
- L'illuminant de couleur blanche a sensiblement pour coordonnées trichromatiques (1/3, 1/3, 1/3).

III.6.3 Diagramme de chromaticité

L'espace de couleur XYZ défini par la CIE permet de caractériser toute couleur visible par trois intensités lumineuses X, Y et Z. La division de ces trois nombres par leur somme fait apparaître trois autres nombres x, y, z qui sont indépendants des intensités lumineuses et reliés par x + y + z = 1. Soit :

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

L'idée de base derrière ce changement est de pouvoir représenter une couleur par sa luminance Y qui caractérise luminance subjective (indépendante de la couleur) et deux des valeurs précédentes x et y qui définissent la chrominance. La couleur devient alors indépendante de la luminance. Cependant toutes les couleurs distinguées par l'œil humain peuvent être représenté sur un diagramme dans le plan (x, y). Ce diagramme qui s'appelle le diagramme de chromaticité est représenté par la figure 7.

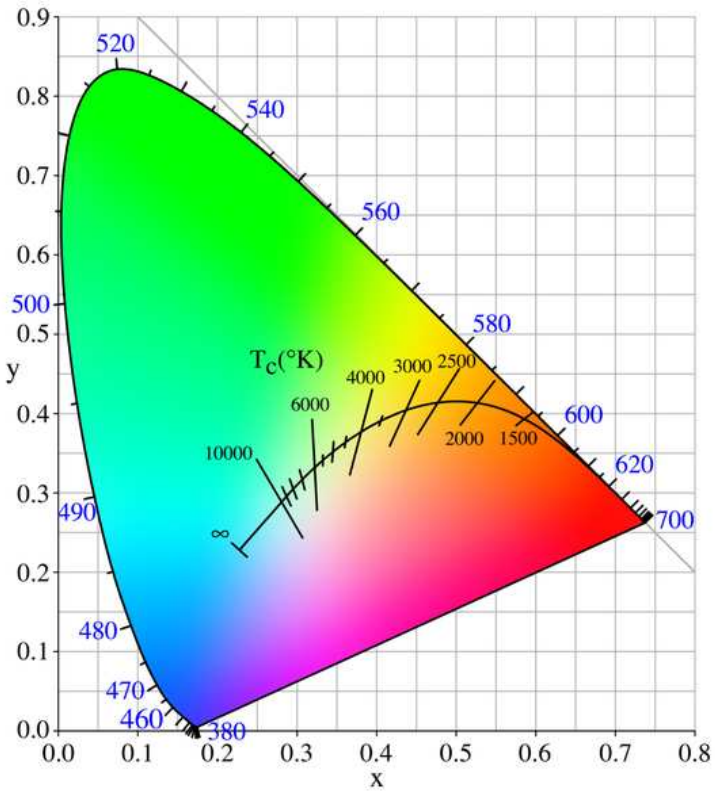

Figure 7 : Diagramme de chromaticité xy du CIE 1931. Ce diagramme montre aussi les chromaticités des corps noirs ayant différentes températures ainsi que les lignes de températures de couleurs constantes.

Si deux points représentent chacun une couleur, le segment qui les joint représente les mélanges de ces deux couleurs en proportions variables.

III.7 TEMPERATURE DE COULEUR

La température de couleur est une caractéristique de la lumière visible qui a des applications importantes dans domaines d'éclairage, de photographie, de vidéographie, d'édition, et autre. La température de couleur d'une source lumineuse est déterminée en comparant sa chromaticité à celle d'un corps noir idéal. La température (habituellement mesurée en kelvins (K)) de la couleur d'une source lumineuse coïncide avec celle d'un corps noir chauffé ayant la même chromaticité (voir figure 7).

Sur le tableau 1 sont reportées les températures de couleurs de quelque lumières :

Tableau 1 : Températures de couleur de quelques lumières.

T (K)	lumière
1700	Flamme d'allumette
1850	Bougie
2000	Soleil à l'horizon
2800	Lampe de tungstène
3350	Lumière de studio
5000	Soleil du jour
5800	Soleil au Zénith
5500	Flash électrique
9300	Ecran TV analogique

III.7.1 Corps noir

En physique, un corps noir désigne un objet idéal dont le spectre électromagnétique ne dépend que de sa température. En pratique, un tel objet matériel n'existe pas, mais il représente un cas idéalisé servant de référence pour les physiciens. Contrairement à ce que son nom suggère, un corps noir n'apparaît pas forcément noir. En effet l'adjectif « noir » signifie ici que l'objet lui-même absorbe toute la lumière extérieure qui tomberait sur lui, et ne reflète aucune radiation non plus. La seule radiation provenant du corps noir est la radiation thermique, ne dépendant que de la température du corps. Le nom corps noir a été introduit par le physicien Gustav Kirchhoff en 1860.

Le rayonnement émis par un corps noir obéit lois :

- **Loi de Sytefan-Boltzmann** : L'exitance énergétique M(T) (en W m-2) émis par le corps noir varie en fonction de sa température absolue T (exprimée en kelvin) selon la formule :

$$M = \sigma\, T^4$$

où σ est la constante de Stefan-Boltzmann qui vaut environ $5{,}67.10^{-8}$ $Wm^{-2}K^{-4}$.

- **Loi de Planck** : L'exitance énergétique monochromatique M_λ pour une longueur d'onde λ donnée est donnée par la loi :

$$M_\lambda = \frac{dM}{d\lambda} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\mathrm{e}^{hc/\lambda kT} - 1}$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide, h est la constante de Planck et k_b est la constante de Boltzmann.

- **Loi de Wien** : La longueur d'onde λ_{max} pour laquelle le corps noir rayonne le plus d'énergie est donnée par la loi :

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{4,965 \cdot kT} = \frac{2,898\ 10^{-3}}{T}$$

avec λ_{max} en mètres et T en kelvins.

Cette loi très simple permet ainsi de connaître la température d'un corps assimilé à un corps noir par la seule forme de son spectre et de la position de son maximum.

III.7.2 Blancs étalons

Les lumières fournies par le soleil et les lampes d'éclairage sont différentes, et pourtant elles donnent toutes cette sensation d'absence de couleur, autrement dit de blanc. C'est pourquoi il convient de les différencier par leur température de couleur. La Commission Internationale de l'Eclaire (CIE) a normalisé 3 étalons de blancs dits A, B et C auxquels est venu s'ajouter le D65 défini spécialement pour la télévision en couleurs.

III.7.3 Caméra et température de couleur

Notre cerveau se charge d'intégrer les différences de températures de couleur des sources lumineuses en effectuant la transposition adéquate lorsque nous passons par exemple d'une pièce éclairée par une ampoule électrique à une zone ensoleillée. Ce n'est cependant pas le cas d'une caméra vidéo broadcast qui ne sait pas s'adapter toute seule à un changement de température de couleur. Elle capte sans intelligence l'image qu'elle reçoit et la traite en fonction de ses préréglages. Certes, la caméra est conçue pour fournir une bonne image avec les couleurs justes sous les éclairages les plus divers. Mais pour qu'elle restitue fidèlement les couleurs de la scène cadrée sans y ajouter de dominante elle doit être étalonnée en colorimétrie en fonction de la température de couleur de la lumière ambiante. En studio, la référence de blanc est une surface incolore, éclairée par un projecteur dont la température de couleur est de 3200K. Ainsi, par exemple, une caméra étalonnée à 3200K fournira une image bleutée si elle cadre une scène en plein jour à 5600K. Inversement, une caméra étalonnée sur la lumière du jour donnera une image jaune-orangée d'une scène éclairée par une source de lumière artificielle.

CHAPITRE IV : ŒIL ET VISION

IV.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre un aperçu sur le fonctionnement de l'œil humain qui est le plus perfectionné de tous les récepteurs de lumière. Cet aperçu reste très limité du fait qu'il ne rend pas compte des phénomènes chimiques ni des phénomènes neurologiques qui donnent à l'œil des performances qu'aucune technologie actuelle n'approche.

IV.2 CONSTITUTION DE L'ŒIL

L'œil humain est un organe qui perçoit les ondes émises par une source lumineuse. Il est constitué anatomiquement de (Figure 8) :

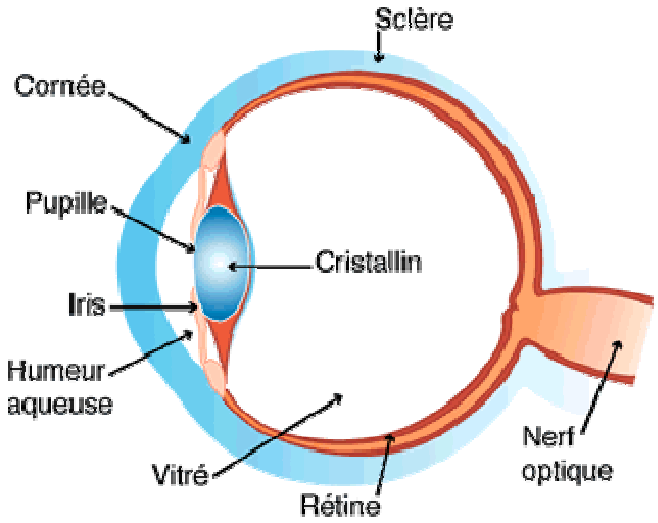

Figure 8 : Schéma anatomique de l'œil humain.

- **La cornée** : C'est une membrane transparente qui oriente les rayons lumineux vers le centre de l'œil. L'image sera mise au point et retournée par le cristallin (lentille biconvexe).
- **L'iris** : Il permet de recevoir la quantité de lumière nécessaire en se rétrécissant ou en s'agrandissant. Il est notable que plus il fera sombre, plus l'iris sera grand.
- **La rétine** : Elle transforme les rayons lumineux en excitations physiologiques qui sont transmises au nerf optique par l'intermédiaire de liaisons nerveuses. La rétine est formée de trois couches distinctes dont la première est composée de cônes et de bâtonnets. Les bâtonnets permettent de distinguer les lumières de faible intensité et les cônes permettent de distinguer la lumière vive. Ce sont les

cônes qui vont permettre la reconnaissance des couleurs. La deuxième couche, qui est située au centre de la rétine, est appelée tâche jaune ou fovéa, c'est elle qui permet de déterminer le mouvement et le détail des couleurs. La troisième couche est formée d'un grand nombre de cellules ganglionnaires terminées par des fibres nerveuses reliées entre elles, il s'agit du nerf optique.

- **Le nerf optique** : Il apporte l'influx au cerveau où il est transformé en sensations chromatiques qui donnent naissance au phénomène de la vision. Le cerveau reconstitue la sensation visuelle en couleur et profondeur.

L'œil se présente sous la forme d'une cavité sphérique d'environ 24 mm de diamètre et se comporte de manière comparable à une caméra ou un appareil photographique. Il comprend un objectif formé par le cristallin d'une distance focale d'environ 15mm, un iris qui joue le rôle d'un diaphragme et son orifice (entrée ou ouverture) central la pupille et une plaque photosensible qui s'appelle la rétine. L'ensemble baigne dans un corps gélatineux et transparent appelé humeur vitrée, qui contient 99% d'eau et représente 60% du volume oculaire. Les rayons lumineux qui pénètre dans l'œil sont d'abord déviés par la cornée puis traversent l'iris qui dose leur intensité. La rétine, qui tapisse le fond de l'œil, recueille une image renversée de la scène observée. Elle renferme une multitude de cellules photosensibles qui convertissent le stimulus lumineux en un influx nerveux. Ce dernier est codé en fréquence et transmis au cerveau via les fibres du nerf optique. La zone optique du cerveau décode les impulsions et les interprète sous forme de sensations subjectives traduites par les notions de luminosité et couleur.

IV.3 PROPRIETE DE VISION

L'œil a un contrôle volontaire de la mise au point par un phénomène d'accommodation du cristallin. De forme biconvexe, transparent et mou, celui-ci se déforme par les contractions des muscles ciliaires situés à son pourtour pour adapter sa puissance dioptrique à la distance de l'objet observé, afin d'en fournir une image nette sur la rétine. Sans accommodation, un œil normal perçoit une image nette d'un point situé à l'infini jusqu'à une distance de 60 cm. L'image est alors formée sur la rétine, l'œil est au repos et le cristallin reste normal. Pour tout objet placé à moins de 60 cm, le cristallin se bombe et devient plus convergent jusqu'à une certaine valeur.

Enfin, l'œil possède un pouvoir de résolution beaucoup plus faible pour les détails de couleurs que pour les détails de luminosité. Cette imperfection est pleinement exploitée par les systèmes de codage de l'image vidéo, dont certains réduisent jusqu'à 75% la quantité d'informations de chrominance par rapport aux informations de luminance.

IV.4 ROLE DU CERVEAU

Il est absolument impossible ici de rendre compte du rôle du cerveau qui fait de l'œil humain le récepteur le plus perfectionné. C'est lui qui nous permet de reconnaître les objets par leurs formes et leurs couleurs. C'est lui qui nous permet de rectifier certaines insuffisances de notre vision. Par exemple, les sujets dont la perception du relief est insuffisante (par la perte d'un œil, par exemple), restituent bien le relief d'un monument, parce qu'ils peuvent en imaginer la structure, alors que cela n'est pas possible avec le feuillage d'un arbre dont la structure est aléatoire. C'est le cerveau qui redresse les images qui se forment à l'envers sur notre rétine.

On a fait porter à un groupe de volontaires des lunettes prismatique qui renversaient les images. Après quelques jours, les sujets porteurs de ces lunettes, voyaient le monde à l'endroit. La suppression des lunettes entraîna, pendant quelques jours, une vision à l'envers. La vision redevint ensuite parfaitement normale.

Rappelons que les nerfs optiques s'entrecroisent au niveau du chiasma optique, et qu'ainsi l'œil droit est commandé par l'hémisphère cérébral gauche et vice-versa.

L'excitation de certaines cellules cérébrales se traduit par des sensations visuelles. On travaille sur ce sujet afin de dotes les non-voyants de caméras vidéo qui filment et transmettent un signal à des électrodes. Celles-ci, convenablement placées, excitent le cerveau ce qui se traduit par « la vision» du paysage filmé. Très loin d'être au point, ce dispositif est un grand espoir.

IV.5 COURBE DE VISIBILITE RELATIVE

En photométrie et colorimétrie, le but est de définir des rayonnements interprété par notre sens de vision, et plus exactement par la vision moyenne d'un observateur de référence et on ne considère que le spectre de la lumière visible.

La visibilité dépend de deux facteurs suivants :

- Sensation de luminosité : c'est-à-dire la luminance ;
- Sensation colorée ou chromatique : la chrominance.

CHAPITRE V : COLORIMETRIE ET VIDEO

V.1 CHAINE DE PRISE DE VUE TRICHROME

V.1.1 Présentation d'une caméra

La camera TV couleur a pour but de transformer les énergies lumineuses de couleurs rouge, verte et bleue en signaux électriques R, V et B (Figure 9).

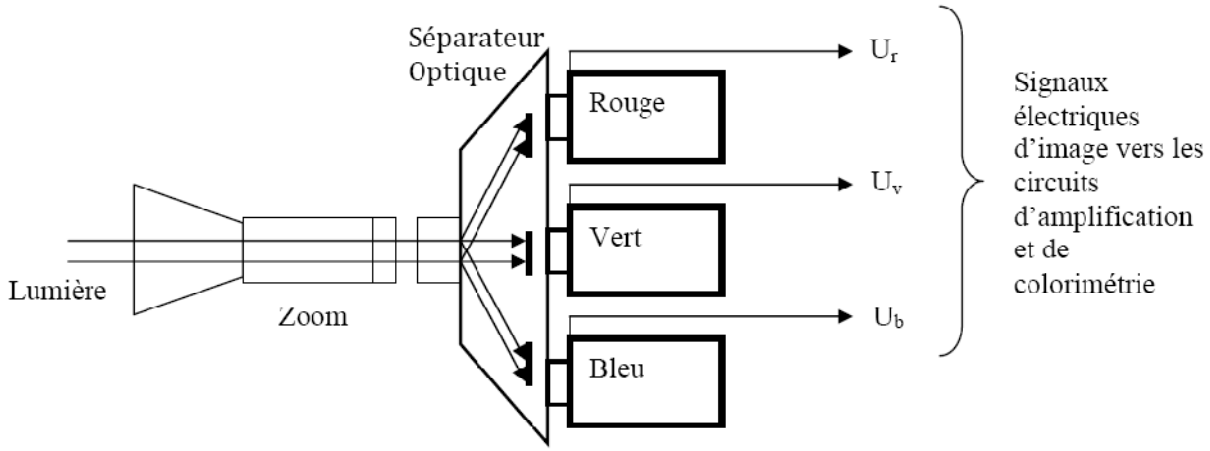

Figure 9 : Schématisation de transformation d'une image lumineuse en signaux électriques U_r, U_v et U_b.

Cette caméra comporte un seul objectif (Zoom) est un dispositif d'aiguillage et le filtrage de la lumière (Séparateur optique) qui envoie les parties du spectre lumineux correspondant aux informations colorimétriques rouge, vert et bleu de l'image aux trois CCD où (tubes analyseurs).

V.1.2 Zoom

C'est un objectif à focal variable qui transmet avec le minimum de déformation et de perte lumineuse l'image au séparateur.

V.1.3 Séparateur optique

Il donne trois images de forme identique mais de couleur différente (R, V et B) de la même scène. La séparation des couleurs se fait à l'aide d'un prisme, filtres ou miroirs dichroïques.

On note qu'un corps dichroïque laisse passer une partie du spectre lumineux et réfléchit l'autre.

V.1.4 Tubes analyseurs

Tubes analyseurs ou capteurs CCD transforment l'énergie lumineuse reçue en une énergie électrique.

V.1.5 Circuits du traitement vidéo

Ils réalisent les corrections électriques nécessaires à l'obtention de signaux (R, V et B) de qualité professionnelle. Puis ces signaux seront distribués vers une utilisation composante ou composite (codé).

V.1.6 Circuits annexes

L'apport d'énergie provient d'alimentation, un générateur de synchronisation élabore tous les ordres de fonctionnement et microprocesseur réalise et gère les réglage de la camera en automatique.

V.2 CORRECTION COLORIMETRIQUE D'UNE CAMERA

L'analyse d'une image couleur dépend de paramètres suivants :

- Type d'illumination de la scène (pour le blanc).
- Réponse spectrale des trois tubes de prise de vue.

La synthèse de cette même image sur le poste TV est fixée par trois luminophores du type image et réglage du blanc.

Cette correction colorimétrique ou masking a pour but d'adapter l'espace colorimétriques rendu par les trois CCD ou (tubes d'analyse) de la caméra, à l'espace colorimétrique de synthèse des trois luminophores du tube image TV.

De plus, toutes les couleurs ne peuvent être restituées à la synthèse par l'adition de certaines quantités des trois primaires. Les teintes extérieures au triangle de synthèse nécessite des coefficients négatifs irréalisable par le tube TV mais facilement concevable électroniquement.

Le matriçage colorimétrique élabore ces coefficients négatifs à restituer électroniquement des couleurs extérieures au triangle de synthèse et par là, de supprimer les erreurs de teintes à l'intérieur de ce même triangle.

V.3 ETALONNAGE ARGENTIQUE ET NUMERIQUE

L'étalonnage est une opération qui concerne les appareils de mesure ou de restitution de données. Deux appareils différents (de conception différente, mais aussi deux appareils de la même gamme même marque, même modèle) ne réagissent pas exactement de la même manière. Il faut donc une procédure permettant d'obtenir le même résultat à partir de la même situation initiale.

Étalonnage argentique : ne permet que la modification du dosage des trois couleurs de base (rouge, vert, bleu) et de la lumière totale, et ce pour l'ensemble de l'image. En outre, sa précision est de l'ordre de 4 %. Enfin, il faut effectuer le tirage d'une nouvelle copie pour voir le résultat.

Étalonnage numérique : offre une palette d'outils beaucoup plus vaste. Il permet d'agir sur le contraste, la lumière et les dominantes, et ce pour toute l'image pour une zone spécifique, que celle-ci soit définie par un masque, par une couleur ou par un niveau de luminance.

V.4 CORRECTEURS COLORIMETRIQUES

Le correcteur colorimétrique numérique, ou blanc d'étalonnage, est un outil essentiel en sortie d'une chaîne de production de qualité.

Selon leur type, les correcteurs colorimétriques peuvent avoir source d'une émulsion argentique, une bonde vidéo, un disque dur. Ils peuvent travailler en sorties sur disque dur ou sur bonde vidéo. Ils peuvent également, selon leur type, gérer plusieurs formats donnés et diverses résolutions d'image, vidéo numérique standard, vidéo HD, etc. Les principales machines disponibles sur le marché sont le Da Vinci 2KTM , le Megadef TM de Pogle, le LustreTM de DiscreetvLogic, le IQ de Quantel, le BaselightTM de FilmLightTM, et pour un étalonnage *tape to tape* uniquement, le ValhalTM de Digital Vision. Ces correcteurs peuvent travailler en vidéo numérique standard ou en haute définition.

Les correcteurs colorimétriques possèdent un certain nombre des caractéristiques communes :

- Un moniteur de référence de très grande qualité et parfaitement calibrés ;
- Une interface dédiée, principalement constituée de trackballs, permettant d'effectuer les corrections on gardant les yeux fixés sur l'image ;
- Un circuit de correction dit primaire équivalant au noir, gammas et gains de la caméra ;
- Un circuit de correction dit secondaire équivalant au multimatrix d'une caméra et permettant de remplacer une couleur par une autre ;
- Des circuits de corrections de texture, débruiteur, soft effect, permettant par exemple d'adoucir les traits d'un personnage ;
- Une ou plusieurs fenêtres permettant d'appliquer une correction spécifique sur une partie seulement de l'image.

Le correcteur colorimétrique *tape to tape* temps réel comporte tous les éléments constitutifs d'une table de montage. Il permet d'importer l'EDL d'un montage terminé et peut piloter deux magnétoscopes, l'un en lecteur du master non étalonné, l'autre en enregistrement. Un correcteur colorimétrique ne stock aucune image et n'enregistre que les paramètres de correction dont il simule, en temps réel, les effets pondant la lecture

de la bonde. A la fin de l'étalonnage, l'opérateur lance, à travers le banc d'étalonnage, une recopie au cours de laquelle la machine applique les corrections définitives pour obtenir, en sortie, le master étalonné.

Les correcteurs de type data process travaillent selon un principe différent : les données image sont d'abord stockés sur disque dur, comme pour un montage virtuel, mais sans compression. Les corrections se font en suite en ne stockant que les paramètres de correction plan par plan. Il est nécessaire de lancer au final un rendu, c'est-à-dire de calculer les images définitives. Ces systèmes :

- sont des systèmes plus économiques ;
- permettent des corrections plus poussées par superposition de couches ;
- demandent de très grosses capacités de disque dur se qui nécessite, pour un produit long, de procéder en plusieurs fois ;
- ont des temps de rendu qui ne sont plus temps réel mais peuvent être très longs, les calcules sont en général effectués la nuit.

V.4.1 Correcteurs primaires

Organisés pour autour de trois trackballs, les correcteurs primaires permettant de gérer les noir, les gammas et les gains (blancs) de l'image. Chaque Trackball possède souvent un anneau, ou ring, permettant de régler le master (noir, gamma, ou gain).

Les boules, rétro éclairées selon la teinte de travail, permettent d'ajuster les balances partielles (noir, gamma et blanc).

Des points limites, ou seilles, peuvent être placées sur la courbe ce qui permet de n'agir que sur des parties spécifique de l'image, zones de base, moyennes ou hautes lumière, de plus des effets particulier peuvent être utilisés, telle le mode lift qui permet de déplacer les courbes verticalement en les gardant parallèles les unes aux autres. Ce mode remplace le réglage habituel du niveau du noir.

Qu'elle qu'en soient leurs extraordinaires possibles, les correcteurs colorimétriques ne peuvent travailler que sur le signal existant et sont incapables de ressusciter miraculeusement l'information perdue à la prise de vue. Pour se laisser la plus grande marge de manœuvre lors de l'étalonnage, l'opérateur veillera donc particulièrement a optimiser l'exposition de l'image, la compression des blancs et à se garder d'enterrer les niveaux de noir même si l'image peut, lors de cette étape, apparaître moins flatteuse. Dans le même esprit, il faut considérer que les corrections colorimétriques fantastiques, à la prise de vue, peuvent constituer des voies sans retour.

V.4.2 Correcteurs secondaires

Les correcteurs secondaires permettent de remplacer un certains nombre de couleurs dans l'image d'une façon analogue à la fonction « remplacement de couleur » de

Photoshope ou à la « carte des teintes » de Paint Shop Pro. Les correcteurs secondaires travailleront mieux avec des zones de couleurs relativement saturées. Un facteur de progressivité peut être défini se qui permet d'estomper le conteur des zones corrigées.

V.4.3 Fenêtres

Les fenêtres, en forme d'ellipse ou de rectangle, permettent de n'effectuer les corrections que sur une partie de l'image. On peut ainsi augmenter la densité d'un ciel, réaliser des dégradés, éclaircir un visage ou en adoucir les traits. On peut également déterminer la progressivité du contour de chaque fenêtre.

Des effets d'éclairage simples peuvent également réalisés et des zones d'ombre et de lumière définies permettent d'améliorer la mise en lumière d'une image. Les choix essentiels concernant notamment les directions de lumière et leur niveau de diffusion restent cependant à déterminer à la prise de vue.

V.5 CHAINE DE PRISE DE VUE : TELEVISION

V.5.1 Fonctionnement d'un téléviseur couleur

Un poste de télévision couleur contient un tube-image trichrome muni de trois canons à électrons, un pour chaque couleur primaire (Figure 10). Des électroaimants de déflexion projettent les trois faisceaux d'électrons sur le fond du tube, recouvert d'une couche de matière électroluminescente. Cette couche se compose de luminophores, petits grains qui émettent de la lumière lorsqu'ils sont bombardés par des électrons. Grâce à un masque perforé, chaque faisceau d'électrons vient frapper les luminophores correspondants à leur couleur. La réunion de ces taches de couleur forme l'image observée sur un écran de télévision.

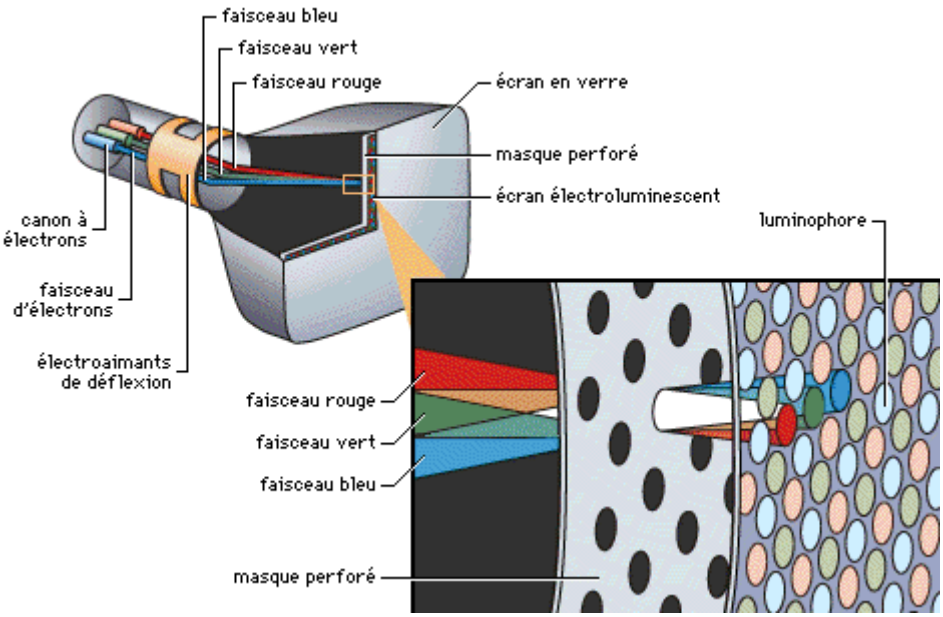

Figure 10 : Constituants d'un téléviseur couleur.

V.5.2 Signal vidéo

Lorsque les normes de la télévision en couleurs ont été définies, il est apparu indispensable de leur faire respecter certains critères de compatibilité avec l'infrastructure du système en noire et blanc existant. Les récepteurs monochromes devient pouvoir, sans aucune modification, utiliser les signaux codés de la télévision en couleur et afficher une image en noir et blanc cohérente et de qualité convenable. Réciproquement, les récepteurs en couleur deviennent capables de reproduire une image en noir et blanc lors de la diffusion d'anciens films ou d'émissions d'archives par exemple. Il a logiquement été décidé de séparer les informations de luminosité (luminance) des informations des couleurs (chrominance).

Les variations de la luminosité de l'image sont donc traduites par un signal de luminance, obtenu à partir d'une pondération introduite au cours du mélange électrique des signaux primaires E_r, E_v, E_b. Cette pondération est définie par l'équation fondamentale de la colorimétrie appliquée à la télévision :

$$E_y = 0{,}30\ E_r + 0{,}11\ E_v + 0{,}11\ E_b$$

Précisons que cette équation a été établie a partir des primaires utilisés en NTSC. Cependant, lorsque l'EUR a définie les systèmes PAL et SECAM avec ses propres primaires, il a été jugé préférable de conserver la même équation, malgré les légères différences de blanc que ce choix implique.

La nécessité de transmettre ce signal de luminance rend inutile la transmission de l'ensemble des trois signaux portant les informations de chrominance.

Les signaux de chrominance sont en fait des signaux de différence des couleurs E_r-E_y et E_b-E_y, communément notés D_r et D_b. Leur particularité est de s'annuler pour le blanc de référence et plus généralement pour toute image monochrome. Le choix de la couleur à ne pas transmettre a été porté sur le vert. Les variations de cette couleur étant proches de celles de la luminance, le signal différence E_v-E_y auraient en effet souvent été faibles. Les signaux de base utilisés par tous les systèmes de codage de télévision en couleur sont donc Ey, E_r-E_y, E_b-E_y. Un récepteur en noir et blanc ne traite que le signal E_y.

V.5.3 Espace colorimétrique d'analyse et de synthèse

La caméra a pour rôle de capter les informations lumineuses issues de la scène cadrée, et de les transformer en signaux électriques représentatifs. Le flux lumineux incident recueilli par l'objectif est décomposé par un séparateur optique (ou séparateur dichroïque) en trois composante colorées correspondant aux trois couleurs primaire d'analyse R, V, B. Ces trois flux lumineux sont projetés sur les surfaces photosensibles des capteurs CCD. Ces dernier les convertissent en signaux électriques, que nous noterons E_{r1}, E_{v1}, E_{b1}, et dont les variations traduisent les intensités lumineuses rouge, vert et bleu reçue. Nous sommes dans l'espace colorimétrique d'analyse. Les primaires

sont donnés pour la caméra et le blanc de référence pour l'environnement de la scène, soit typiquement 3200 K en studio.

Au niveau du récepteur, les triplets de luminophores rouges, vert et bleu constituent chaque point élémentaire de l'écran sont de dimensions trop faible pour être distingués à distance normale d'observation par notre œil. Celui-ci les confond est réalise ainsi la synthèse colorimétrique additif trichrome grâce à la quelle est constituée l'image vidéo en couleurs. Nous sommes en espace colorimétrique de synthèse. Les primaires sont des luminophores du tube récepteur et le blanc de référence est de D65 à 6500 K.

La différence entre les primaires de l'analyse et celles de synthèse implique une correction colorimétrique dite de masking dans la chaîne de traitement des signaux. La fidélité des couleurs de l'image finale restituée sur l'écran de télévision dépond essentiellement de la qualité de cette conversion d'un espace à l'autre.

Pour résumer, la correction de masking, qui est effectuée dans la caméra, a pur but d'une part d'éviter les erreurs dues au changement des primaires à l'intérieur du triangle des couleurs, et d'autre part de restituer les teintes extérieures a ce même triangle. A l'issue de la correction du masking, les trois signaux primaires d'analyse Er_1, Ev_1, E_{b1} sont transformées en trois signaux primaires de synthèse E_r, E_v, E_b. Ceux-ci sont dès lors considérés, avec les approximations adéquates, comme représentant les composantes trichromatiques du système de synthèse constitué par les luminophores du tube récepteur. Ainsi, si $E_r = E_v = E_b$, l'écran affiche le blanc de référence D65 à 6500 K.

V.6 REPRODUCTION DE L'IMAGE VIDEO

V.6.1 Tube cathodique

Dans un tube cathodique, trois canons à électrons, commandés par les trois signaux primaires E_r, E_v, E_b, projettent sous vide trois faisceaux électroniques (les rayons cathodiques) sur la surface interne de l'écran. Le flux de faisceau est dévie par des bobines de réflexion a fin de balayer toute la surface de l'écran haute en bas et de gauche à droite. L'écran est tapissé d'une multitude de triplet des luminophores (rouge, vert, bleu), chaque triplet étant perçu par l'œil par un seul et unique pixel, formé de la synthèse additive des trois couleurs primaires. Devant cet ensemble d'éléments microscopiques, est placée une grille (ou un masque) perforée d'autant de trous qu'il y a de triade colorées de luminophores. Ses trous sont disposés de telle sorte que chacun des trois faisceaux électronique ne puisse atteindre que le luminophore de la couleur correspondante. La distance entre deux trous consécutifs est appelée « pitch » ou « pas » de l'écran ; plus elle est faible, plus l'image reproduite est fine. Chaque luminophore réagie alors à la quantité de charge portée par le faisceau qui le bombarde et s'illumine avec une intensité répondant à la loi de gamma. Cette technique possède une faiblesse majeure : la grille perforée occupe un fort pourcentage de l'écran, nuisant à la luminosité de l'image. A la fin des années 1960, Sony a inventé un tube particulier appelé Trinitron dont la principale originalité est d'utiliser des bondes verticales ininterrompues de

luminophores, alignées par couleurs. Du coup, la grille est cotée de fentes verticales également continues (elle est en fait constituée de millier de filaments fins), et présente une surface beaucoup moins importante que la grille à trous, ce qui engendre un gain sensible en luminosité. Il existe d'autres technologies de tubes, mais toutes sont dérivées de ces deux-ci.

V.6.2 Balayage entrelacé

La mosaïque de points élémentaires qui forment l'image vidéo est explorée selon des lignes quasiment horizontales et strictement parallèles. Le nombre de ces lignes a été établi en fonction du format de l'image et du pouvoir séparateur de l'œil. L'angle de vision verticale considéré comme confortable pour visualiser une image de format 4/3 à une distance de quatre fois la diagonale de l'écran est de 8°33'. Ainsi, le nombre minimales de lignes horizontales que doit afficher cette image est de 8°33/0°01 = 512. En Europe, en Asie et en Afrique, le nombre total de lignes de l'image de télévision est de 625 (576 visible), tandis qu'au Etats-Unis et en Japon, il est de 525 (480 visible).

D'autre part, compte tenue de la persistance rétinienne, le nombre d'images à transmettre par seconde pour que l'œil perçoive une impression de continuité à partir d'une succession d'images fixes doit dépasser 10. Les systèmes à 625 lignes utilisent 25 images par seconde, et les systèmes à 525 lignes, 30. Ces deux valeurs sont des sous-multiples des fréquences du courant alternatif en vigueur dans les pays concernés, ce qui évite des phénomènes de battement de fréquence balayage/secteur.

Cependant, il s'avère qu'à 25 ou 30 images par seconde, il se produit un effet de papillotement assez insupportable du à la forte luminosité d'un écran de télévision. C'est pourquoi un artifice astucieux a été imaginé pour augmenter la fréquence de rafraîchissement de l'écran, sans pour autant accroître le volume d'information transmis. Il consiste à effectuer le balayage de l'image non pas dans l'ordre manuel des lignes, mais de façon dite entrelacé, les lignes impaires sont balayées d'abord pour former une première trame, puis vient le tour des lignes paires, qui tracent une seconde trames. De ce fait, le nombre de trames est deux fois plus élevé que le nombre d'images. Et notre système visuel se laisse tromper par ce procédé. Il voit en réalité 50 trames de 312,5 ligne en une seconde, chaque trame n'affichant qu'une ligne sur deux de l'image, mais il a l'impression de percevoir une image nouvelle tous les 1/50s.

V.6.3 Balayage progressif

Le mode de balayage progressif, universellement répondue en informatique, et utilisé en vidéo uniquement par les standards à haute définition. Il affiche l'image en une seule passe, dans son intégralité. A chaque instant, toutes les lignes de l'image sont donc présentes, ce qui élimine totalement le défaut de scintillement interligne propre au balayage entrelacé. En revanche, la bande passante requise pour transmettre le signal progressif est deux fois plus élevée. En informatique, cela n'est pas un problème car le

signal n'est pas diffusé sur des longues distances, mais simplement acheminé par câble entre l'unité centrale et le moniteur. En vidéo, Cependant, l'utilisation du balayage progressif avec des infrastructures standard impose de travail sur un signal qui occupe la même bande passante que son équivalent entrelacé. La solution actuellement adopté consiste tous simplement à choisir une fréquence de l'image égale à environ la moitié de la fréquence trame. C'est ainsi qu'on été définie les standards de la production a haute définition de 24 et 25 images progressives par seconde.

V.7 CODAGE DE L'INFORMATION COULEUR EN VIDEO

Il existe différents types de codage vidéo tel que NTSC, PAL, SECAM, etc.

V.7.1 NTSC

Le National Television Systems Commettee a défini pour la télévision américaine, selon les recommandations de la FCC, un système à 525 lignes et 59,94 trames par seconde, chaque image étant entrelacée sur deux trames. L'échelle de signal de Luma s'étend de 0 à 714 mV et celle du signal de suppression de 0 à -286 mV, ce qui représente une amplitude de 1 V crête a crête. La salve de référence, d'une amplitude crête à crête de 286 mV, située 180° sur l'axe D_b.

En se basant sur les travaux de MacAdam sur la non-uniformité de perception visuelle humaine, il a été décédé de déphaser les signaux D_b et D_r pour créer deux signaux I pour *In Phase* et Q pour *Quadrature*, I étant l'axe verticale et Q l'axe horizontal. Le but est de déduire la bande passante de l'axe représentant la moindre sensible différentielle. De plus l'axe I est particulièrement représentatif des teintes des couleurs.

$$I = \cos(33°)\, D_b + \sin(33°)\, D_r$$

$$Q = \sin(33°)\, D_b + \cos(33°)\, D_r$$

Bande passante I = 1,3 MHz

Bande passante Q = 0,5 MHz

Nous pouvons convertit cette relation en matriçage linéaire :

$$I = 0{,}736\,(R - Y) - 0{,}268\,(B - Y)$$

$$Q = 0{,}478\,(R-Y) + 0{,}413\,(B - Y)$$

Le codage de la luminance est celui déterminé par les matrices de passage retenues par la FCC pour un espace colorimétrique particulièrement optimisé, à l'origine de la télévision couleur. Les trois équations de codage obtenu peuvent donc s'écrire sous la forme :

$$\begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0{,}299 & 0{,}589 & 0{,}114 \\ 0{,}596 & -0{,}274 & -0{,}322 \\ 0{,}212 & -0{,}532 & 0{,}311 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ V \\ B \end{pmatrix}$$

Tel qu'il se présente, le signal NTSC est extrêmement sensible aux variations de phase, c'est-à-dire à tout problème d'avance ou de retard du signal du chroma par rapport au signal du référence.

V.7.2 PAL

Mis en place par l'EBU-UER en 1962, les systèmes PAL (Phase Alternate Line) reprend les bases du NTSC en ce qui concerne le codage des composantes colorimétriques.

L'amplitude maximale du signal de luminance est de 700 mV. Celle du signal de la suppression est de – 300 mV ce qui fait un signal 1 volt crête à crête. Le système repose sur une fréquence de 50 trames par seconde, chaque image étant entrelacée par 2 trames. Chacune est composée de 625 lignes dont 575 utiles.

L'originalité du système PAL est de présenter une inversion de phase sur D_r entre les lignes de chaque trame, l'inversion étant annulée lors du décodage. Une erreur de phase sur le signal engendre donc, pour chaque paire de ligne, deux erreurs de couleur inversées que l'œil lira comme une seule et même couleur, dans l'alignement correct de teinte. La limite du système réside dans l'apparition de lignes sombres en cas d'erreur trop prononcé avec effet de persiennes caractéristiques dans le cas d'une erreur dépassant 20°.

V.7.3 SECAM

Le système SECAM, séquentiel à mémoire, s'est développé en France en concurrence avec le système PAL. Il n'est employé dans ce pays que pour la diffusion.

L'origine du système consiste à transmettre séquentiellement le signal de chroma. D_b et D_r sont ainsi transmis séparément, en décodage, une ligne sur deux, en modulation de fréquence.

Le système SECAM n'est cité ici que pour mémoire, la mise en place de distribution numérique puis l'arrivée en France de la TNT et, maintenant, de la haute définition signal probablement la fin de ce système.

CONCLUSION

La colorimétrie est la science qui s'intéresse à l'étude des couleurs. Il existe deux types de synthèses : additives et soustractives. La synthèse additive a pour couleurs primaires le rouge, le vert et le bleu et a pour couleurs secondaires : le jaune, le cyon et le magenta. Les couleurs primaires de chacune des deux synthèses sont les couleurs secondaires de l'autre. Il y a plusieurs représentations de couleurs dont la représentation RVB, TSL et XYZ qui sont décrites.

En près de 80 ans nous sommes passés d'une télévision blanc et noir à une télévision en couleur et maintenant à des systèmes numériques, des écrans plats et des projections à haute définition qui ambitionnent à terme de se rapprocher de la qualité du cinéma. Au cours de cette évolution, et depuis l'appariation des premiers systèmes colorimétriques au début des années 30, il apparaît un très grand nombre de systèmes de représentation colorimétriques. Selon le domaine d'application, chacun de ces systèmes présente des avantages et des inconvénients. Dans ce mémoire, nous avons abordé la colorimétrie à travers ses systèmes de représentation de base, à savoir RVB et XYZ, ainsi que son application pour la vidéo et la télévision.