

Introduction à la colorimétrie (2^{ème} partie)

L'observateur de référence de la CIE de 1931

La CIE a réalisé une synthèse des résultats expérimentaux sur la vision et a normalisé un système qui permet d'interpréter avec précision les sensations colorées. C'est "l'Observateur de Référence" exposé en 1931, dit CEI 1931. Il correspond à une vision des couleurs sous un angle de 2°, cette valeur est considérée comme suffisante pour les applications de télévision. En 1964, la CIE a présenté un Observateur de Référence supplémentaire qui correspond à une vision sous un angle de 10°. Les valeurs obtenues sont légèrement différentes et sont indiquées avec un indice 10 (X_{10} , x_{10} , etc...). Nous ne tiendrons compte ici que des valeurs de 1931.

Il découle des paragraphes précédents que si on modifie, même légèrement, les couleurs primaires, les trois valeurs qui servaient de mesure d'une couleur vont elles aussi changer.

La CIE a donc normalisé un jeu de trois couleurs primaires, monochromatiques dont les longueurs d'ondes sont :

- 700,0 nm pour le stimulus rouge appelé R (prononcer *grand R*)
- 546,1 nm pour le stimulus vert appelé V (prononcer *grand V*)
- 435,8 nm pour le stimulus bleu appelé B (prononcer *grand B*)

La quantité, appelée *petit r*, *petit v* et *petit b*, de chacune de ces primaires nécessaire pour égaliser l'ensemble des radiations monochromatiques du spectre visible est donnée par la figure 7. Ce sont les courbes des coefficients de distribution pour les primaires R, V, B appelées aussi Composantes Trichromatiques Spectrales.

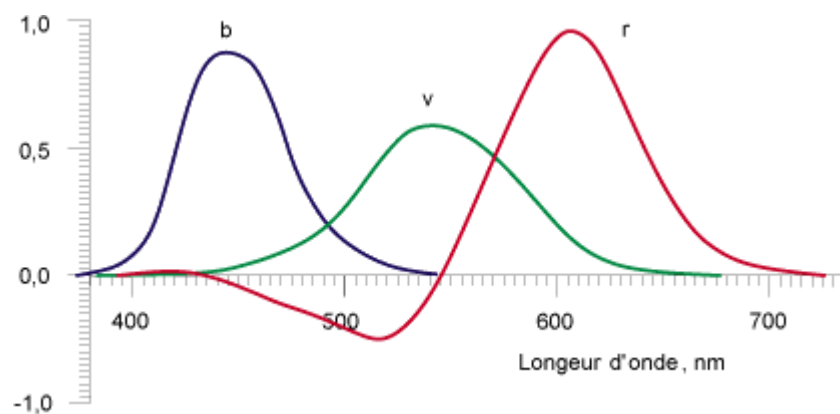


Figure 7

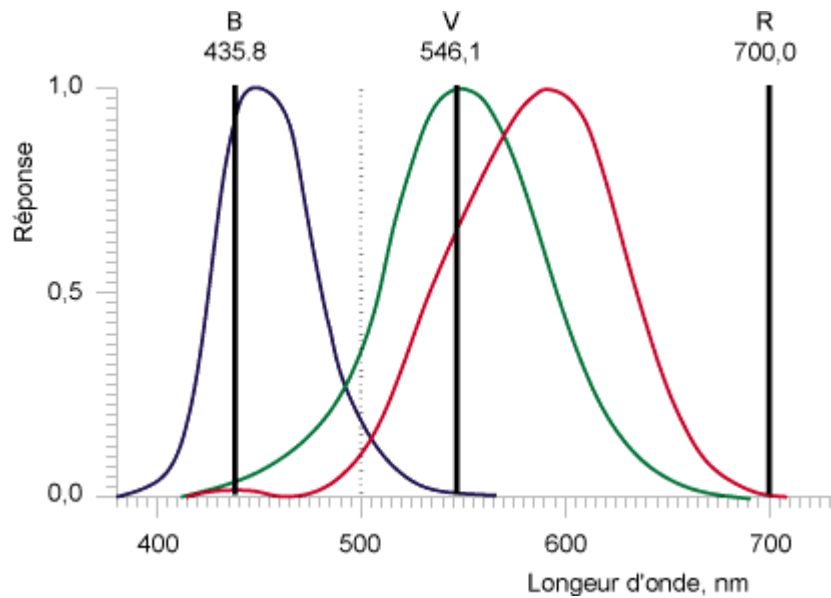


Figure 8

La courbe r présente une importante partie négative qui mérite quelques explications.

Tout d'abord, ces courbes ne correspondent pas à des filtres mais à un tableau de valeurs normalisées, soit, pour chaque longueur d'onde dont on souhaite égaliser l'impression visuelle, la quantité lumineuse de la primaire considérée. D'autre part, compte tenu du recouvrement très important entre les cônes sensibles au rouge et au vert, il est impossible d'égaliser l'impression visuelle de toutes les longueurs d'ondes pures uniquement par la combinaison des trois primaires.

Voici un exemple : On veut égaliser une radiation monochromatique de 500 nm, voir la figure 8.

La figure 8 montre la sensibilité spectrale des trois familles de cônes et les primaires normalisées CIE. A 500 nm la proportion des stimuli est environ $\frac{1}{2}$ pour le vert, $\frac{1}{4}$ pour le rouge et $\frac{1}{4}$ pour le bleu. Même avec une composante rouge égale à zéro la primaire verte provoque un stimuli trop important sur les cônes sensibles au rouge. Cette couleur ne peut donc pas être égalisée par la synthèse additive des primaires CIE. La seule solution consiste à ajouter du rouge à la couleur de départ, pour ensuite trouver une équivalence possible. Une fois que cela est fait, la quantité de rouge ajoutée est comptée en négatif pour la couleur considérée, ici 500 nm. Les courbes r, v, b et le tableau des valeurs associées à ces courbes sont fondamentaux pour la colorimétrie puisqu'elles permettent de calculer les coordonnées R, V, B de tout spectre lumineux connu.

Connaissant l'énergie rayonnée P_1, P_2, P_3, \dots aux longueurs d'ondes 1, 2, 3, ... et les coefficients de distribution des primaires $r_1, r_2, r_3, \dots, v_1, v_2, v_3, \dots$ et b_1, b_2, b_3, \dots à ces mêmes longueurs d'ondes, les coordonnées R, V, B, sont données par les équations :

- $R = k(P_1 r_1 + P_2 r_2 + P_3 r_3 + \dots)$
- $V = k(P_1 v_1 + P_2 v_2 + P_3 v_3 + \dots)$
- $B = k(P_1 b_1 + P_2 b_2 + P_3 b_3 + \dots)$

Le coefficient k est choisi pour que R, V et B soit égal à 100 si l'échantillon de couleur est parfaitement réfléchissant (ou transparent) pour l'illuminant E, d'égale énergie.

Exprimer les couleurs par un jeu de coordonnées permet de les placer dans un espace géométrique, sorte de carte des couleurs. Pour exprimer uniquement la couleur, et pas l'intensité lumineuse, on change l'échelle des trois valeurs de façon à ce que leur somme soit l'unité. De la sorte, si deux valeurs (x & y) sont connues, la troisième z est obtenue par $1 - (x + y)$, et le tout est représentable sur un plan.

Cette représentation est la projection de l'espace initial à trois dimensions dans un espace à deux dimensions,

voir la figure 9.

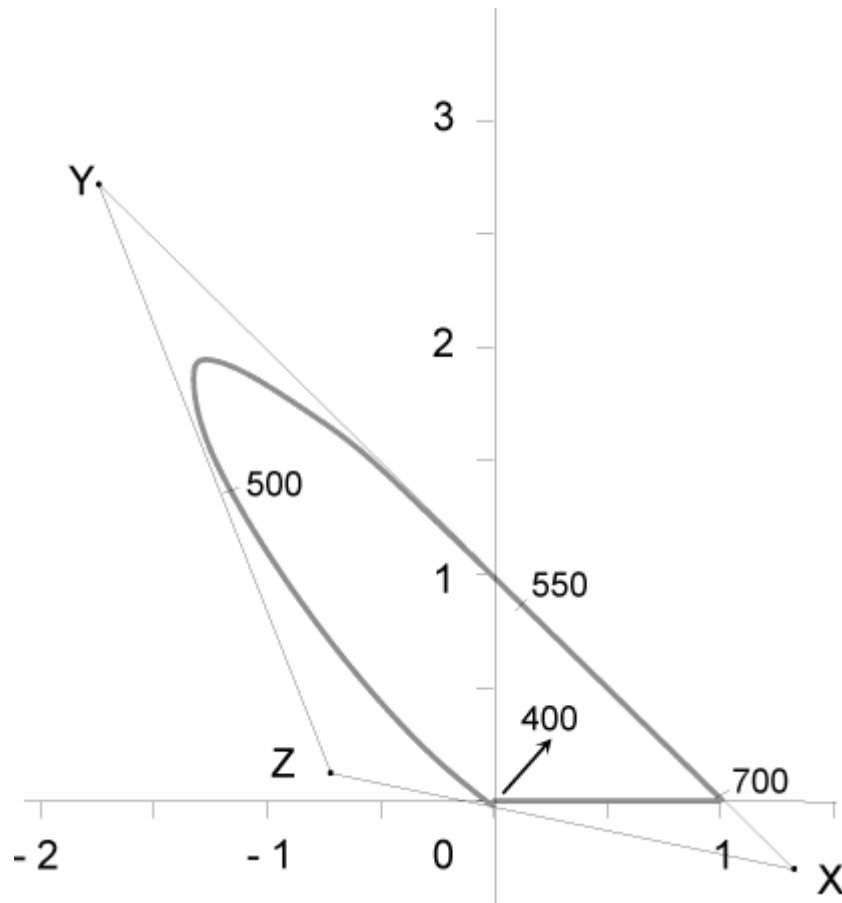


Figure 9

La courbe de 400 à 700 nm représente le lieu de toutes les longueurs d'ondes pures et la ligne droite qui la referme représente la ligne des magenta, pourpre, violet, ..., issue du mélange du bleu et du rouge. Là encore on retrouve la partie négative de la courbe r de la figure 7.

Cette représentation est un premier pas très utile, puisque deux couleurs représentées par le même point seront perçues comme identiques même si leurs spectres ne le sont pas (métamères). Avec les coordonnées trichromatiques il est possible d'envisager plusieurs espaces de représentation. Comme en cartographie, où plusieurs projections sont possibles selon l'utilisation de la carte, plusieurs espaces colorimétriques ont été normalisés pour des utilisations distinctes. La première transformation fondamentale a été proposée par Judd en 1930. Il s'agit d'une transformation linéaire dont les coefficients sont choisis pour supprimer, à toutes les longueurs d'ondes, les valeurs négatives de $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ et $\bar{z}(\lambda)$ et pour que la fonction $\bar{y}(\lambda)$ soit égale à la luminance visuelle.

Le nouveau jeu de primaires, X, Y et Z, est obtenu à partir des primaires R, V, B, par les équations suivantes :

- $X = 0,49000R + 0,31000V + 0,20000B$
- $Y = 0,17697R + 0,81240V + 0,01063B$
- $Z = 0,00000R + 0,01000V + 0,99000B$

Ces primaires sont dites irréelles, puisqu'elles ne correspondent pas à une lumière que l'on puisse générer. Le système X, Y, Z présente les particularités suivantes :

- Le coefficient de Y est proportionnel au flux lumineux, ce qui permet de représenter la couleur dans un plan avec deux coordonnées.
- Les trois coefficients X, Y et Z sont égaux pour l'illuminant E.

- Les coordonnées x et y des couleurs réelles sont comprises entre 0 et 1.

Les mêmes équations permettent de calculer les coefficients de distribution \bar{x} , \bar{y} et \bar{z} .

La figure 10 montre les coefficients de distribution pour les primaires X, Y et Z.

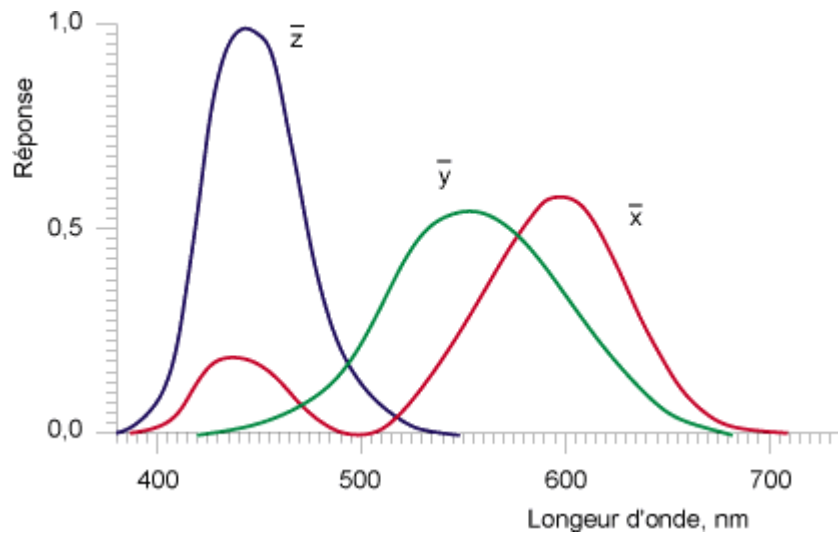


Figure 10

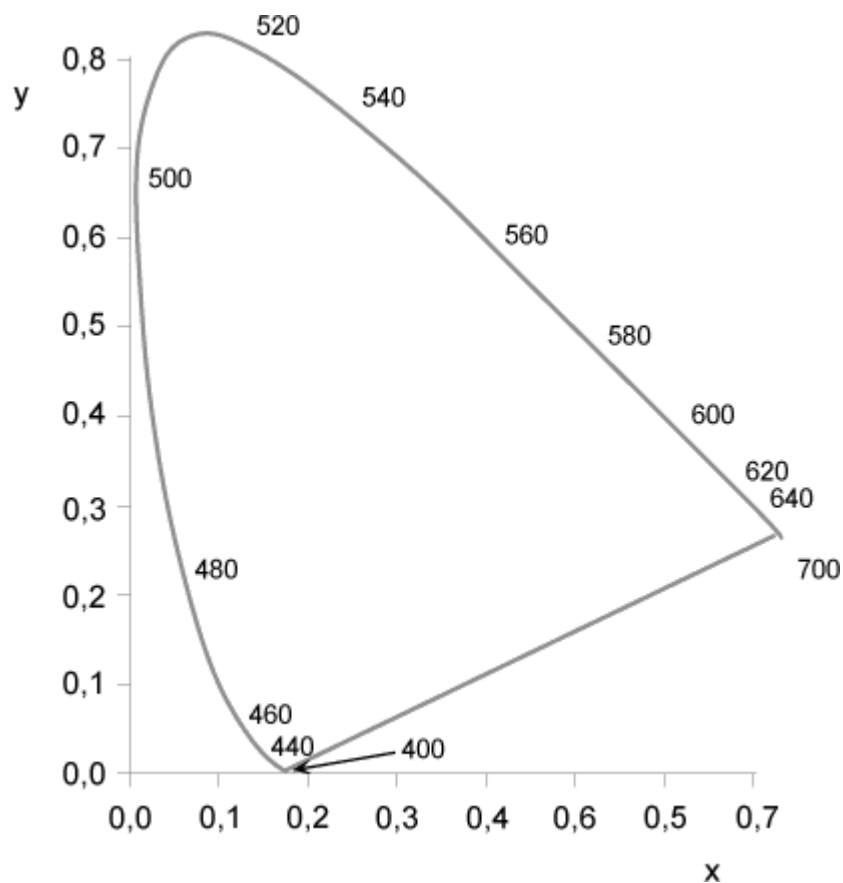


Figure 11

La figure 11 montre le "fer à cheval" des couleurs, dit CIE 1931, produit par cette transformation. Cette représentation sert de base à beaucoup de calculs colorimétriques. Comme dans la figure 9, la courbe de 400 à 700 nm représente le lieu de toutes les longueurs d'ondes pures, la ligne droite qui la referme représente la ligne des magenta, pourpre, violet..., issue du mélange du bleu et du rouge. Mais ici toutes les couleurs réelles sont exprimées avec des coordonnées positives. Tout mélange de 3 couleurs C_1 , C_2 , C_3 est situé à l'intérieur du triangle C_1 , C_2 , C_3 , voir la figure 12.

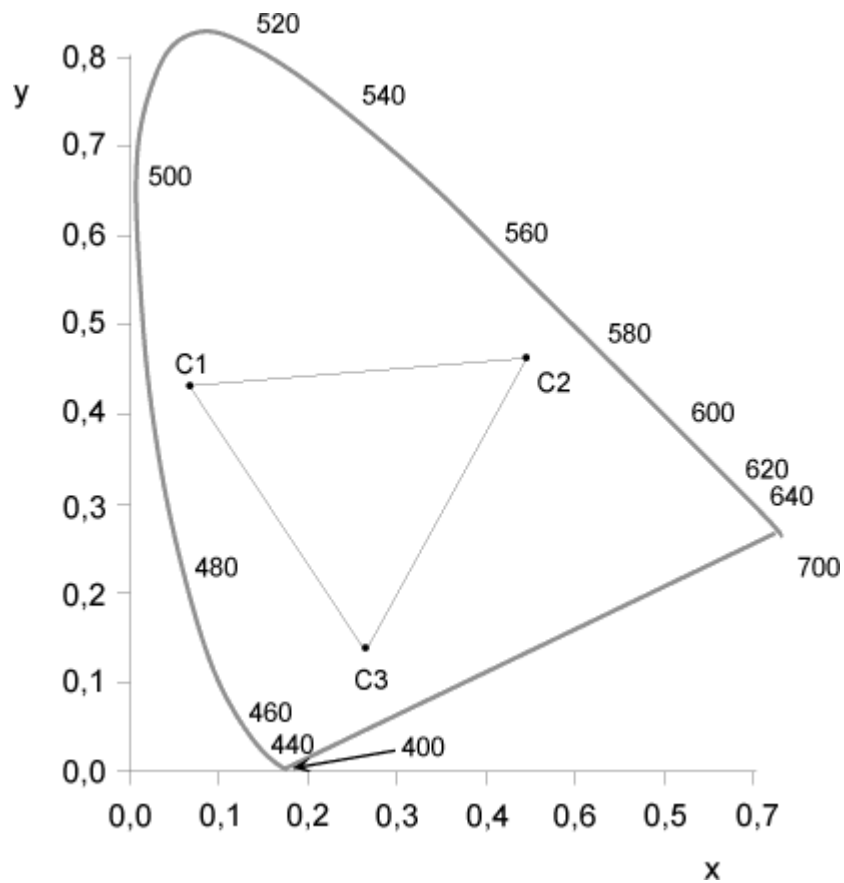


Figure12

Le diagramme chromatique x, y indique uniquement les proportions des coefficients tristimulus. Ainsi des couleurs sombres ou claires ayant les mêmes proportions sont représentées par le même point. La figure 13 montre la répartition des couleurs dans l'espace x, y . Le blanc, ou les différents niveaux de gris, puisque la luminance est absente de cette représentation, sont situés dans la zone centrale.

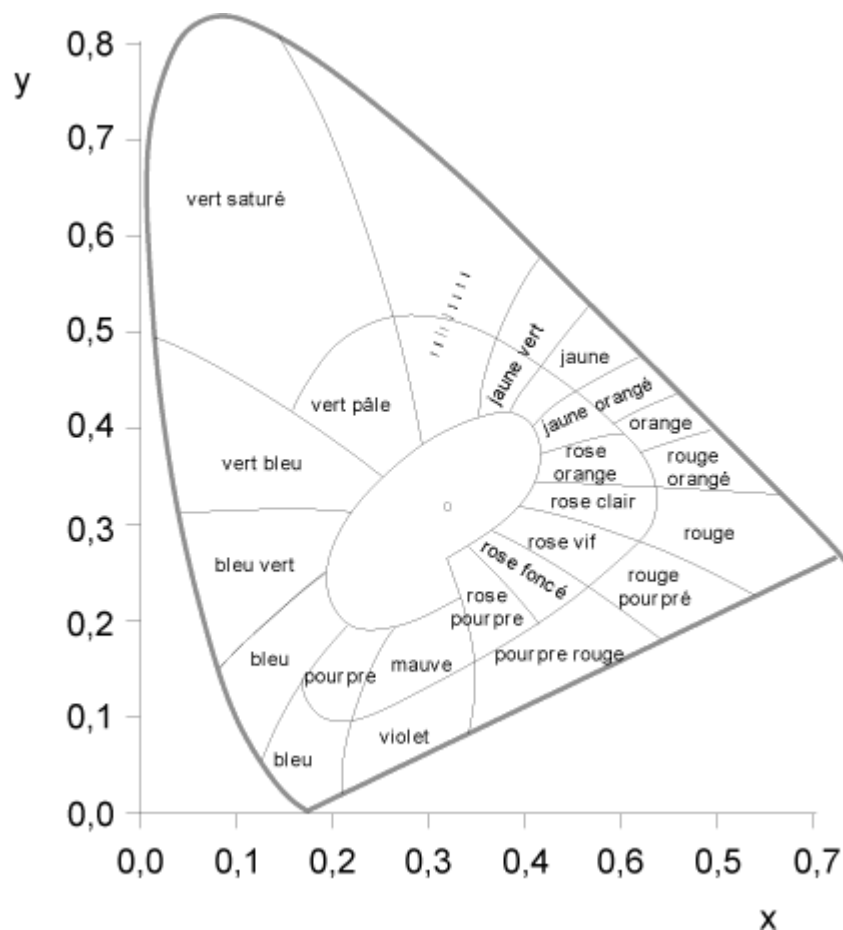


Figure 13

Les espaces de représentation à écarts chromatiques uniformes

Dans l'espace x, y , les études de Mac Adam ont montré que des différences de couleurs perçues comme constantes étaient représentées par des ellipses de tailles très différentes selon la teinte considérée, voir la figure 14. Il n'est donc pas possible de fixer des tolérances uniques $\Delta x, \Delta y$ pour une chaîne de reproduction colorimétrique, ou pour la fabrication d'une peinture.

Après de longues recherches, la CIE n'a pas pu normaliser un seul espace, mais a cependant limité ses recommandations à deux systèmes de représentation :

1. L'espace $L^*u^*v^*$ CIE 1976 (CIELUV) qui est obtenu par une transformation linéaire du système X, Y, Z . C'est-à-dire que des droites sont transformées en droites. Ce système est très utilisé pour les applications de télévision.
2. L'espace $L^*a^*b^*$ CIE 1976 (CIELAB). Plus précis que le précédent, cet espace est obtenu par une transformation non linéaire du système X, Y, Z .

Aucun de ces deux espaces n'est complètement linéaire par rapport à notre perception, et la CIE continue à étudier d'autres formes de représentations.

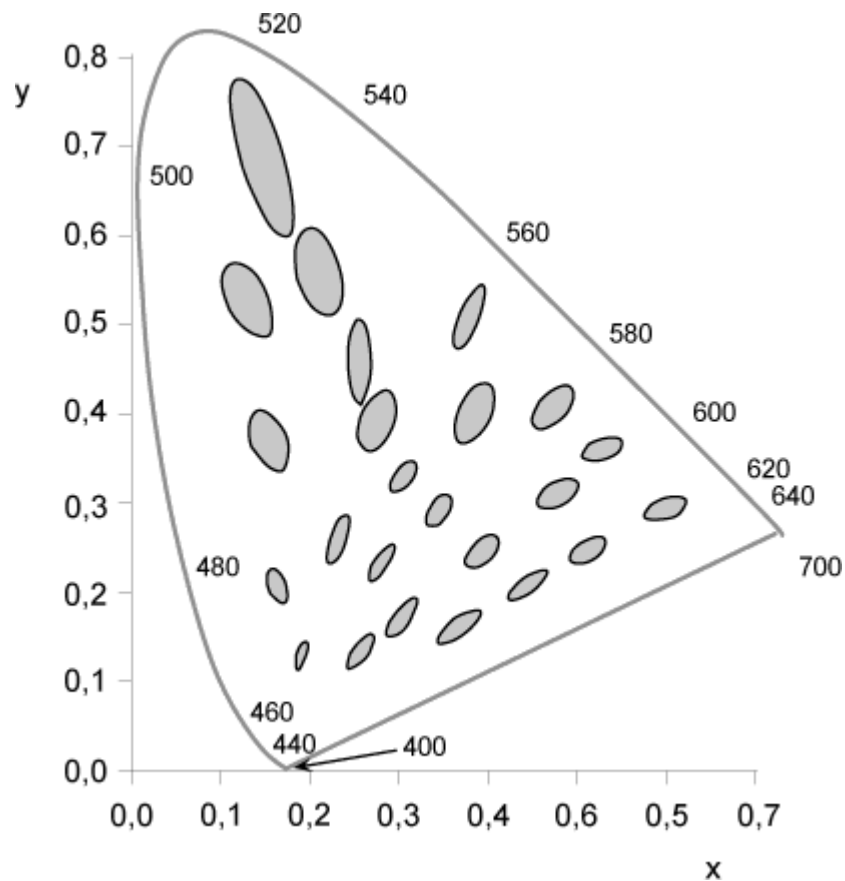


Figure 14 : Les ellipses de Mac Adam grossies 10 fois dans le diagramme x, y.

Conclusion

Ce rappel succinct sur les notions de base de la colorimétrie montre toute l'importance de la perception dans la conception des systèmes de reproduction des couleurs que nous utilisons couramment. Pour l'utilisateur, ces notions se font oublier tant que l'on reste à l'intérieur d'un système normalisé et calibré comme la vidéo par exemple. Lorsqu'il y a un mélange de technologies, film, infographie et vidéo, ce qui devient fréquent, il est nécessaire de savoir comment sont effectuées les conversions des informations de couleur et quelles sont les conséquences des actions sur les images. Dans ce cas, la calibration d'une chaîne de travail hybride impose, à chaque maillon, une référence aux couleurs réellement perçues (dans l'espace CIELUV ou CIELAB) comme le propose l'ICC (International Color Consortium).

Cela devrait permettre d'éviter de compenser les caractéristiques du périphérique d'entrée en jouant sur le périphérique de sortie, et d'obtenir des éléments qui soient interchangeables. C'est-à-dire qu'un élément scanné chez un prestataire devrait être directement utilisable chez un autre, grâce aux informations de calibration colorimétrique qui l'accompagne.

Pour en arriver là, un long travail devra être effectué pour adapter des machines qui n'ont pas été conçues pour être interopérables. Gageons que la colorimétrie jouera un rôle essentiel dans cette démarche.

Bibliographie (consultable à la CST) :

- Norme CIE/ISO 10527 : *Observateur de référence colorimétrique CIE*
- CIE : *Technical Report - Colorimetry second edition*
- Charles Poynton :

A Technical Introduction to Digital Video
Wide Gammut Device-Independent Colour Image Interchange
Frequently asked question about Colour

- Siggraph 97 : *Course Notes - Scanning and Recording of motion Picture Film*
- IBA : *Technical Review - Light and Colour Principles*
- NAB 95 : *Pixels, Pictures and Perception*
- A. Pouyferrié : *ORTF, Service des Etudes - Colorimétrie*
- L. Gousot : *Ecole Supérieure d'Electricité - Photométrie et Colorimétrie*

WWW :

- Charles Poynton : [Color technology](#), [Color links](#)

Rédaction : [Matthieu Sintas](#)

©1998, [Commission Supérieure Technique de l'Image et du Son](#)