

Introduction to Colorimetry

J.J. Embrechts

University of Liège

Department of Electrical Engineering and Computer Science

2 mars 2010

Chapitre 1

Colour Vision and Perception

1.1 Colour perception

Colour is a visual sensation, a subjective interpretation of some elements of the physical world we're living in.

Colour originates from the analysis of luminous stimuli by our visual system. Luminous stimuli are in fact light radiations, and colour vision is more particularly related to the spectral distribution of radiated power within these radiations : the so-called light spectrum.

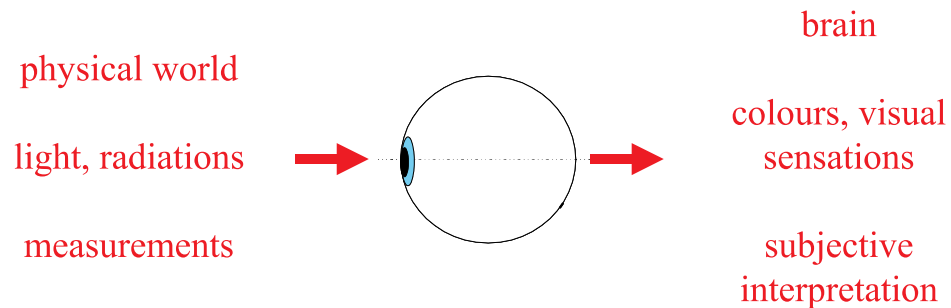


FIG. 1.1 – Colour is sensation.

A first important conclusion is that COLOUR should not be confused with its COLOUR STIMULUS, a confusion which often occurs and which of course can lead to wrong conclusions and misinterpretations. In particular, the tristimulus values (X,Y,Z) do not represent a colour, but they are three characteristics of the colour STIMULUS (i.e. of the luminous radiation) which are related to the colour sensation.

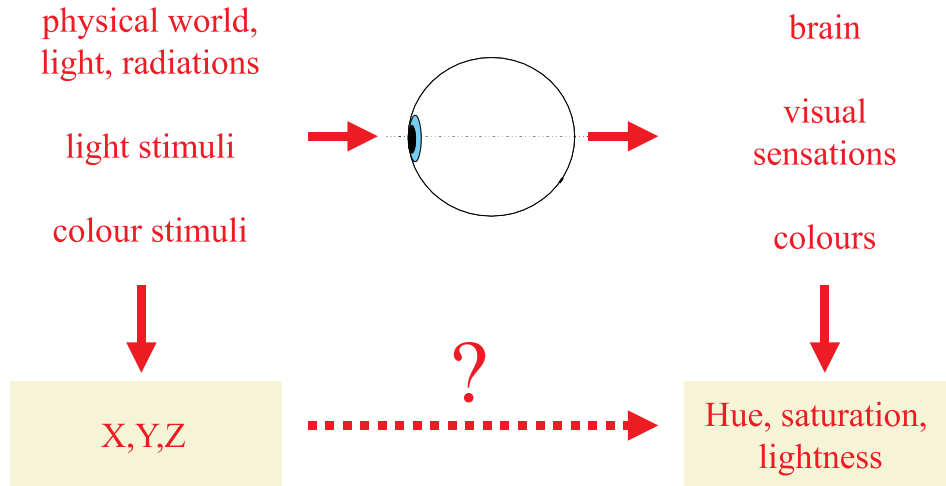


FIG. 1.2 – Tristimulus values are NOT colours.

Colour sensation is described by words like "red", "light blue", "olive green", "dark brown", These attributes can be classified into *colour attributes* of hue, saturation and lightness.

Following the *International Lighting Vocabulary* [5], hue is the attribute of a visual sensation according to which an area appears to be red, yellow, green, blue, or a combination of two of them (for example, orange is a hue since it is a "visual" combination of red and yellow, meaning that orange resembles red and yellow and lies somewhere in between).

Lightness is the brightness of an area judged relative to a similarly illuminated white area. Attributes of lightness are "dark" or "light".

The accurate definition of saturation is more complex and will not be reproduced here, but we can imagine that saturation describes the "density" of the hue contained within the colour. Colours for which the hue is well pronounced are called highly saturated ("vivid", "deep"). On the contrary, as the hue fades away, less saturated colours tend to gray or white: "pale" colours, "pastels" are such colours.

Three-dimensional colour systems and atlases have been created, based on this 3D interpretation of colour in hue, saturation and lightness. One of the most famous is the Munsell atlas, from the name of its inventor, A. Munsell (beginning of 20th century).

In this atlas, a colour is identified by comparison with a 3D arrangement of several *reference* colored samples (see figure 1.3). Three parameters define a color: H, V and C. V (Value) is a parameter similar to the colour lightness, on

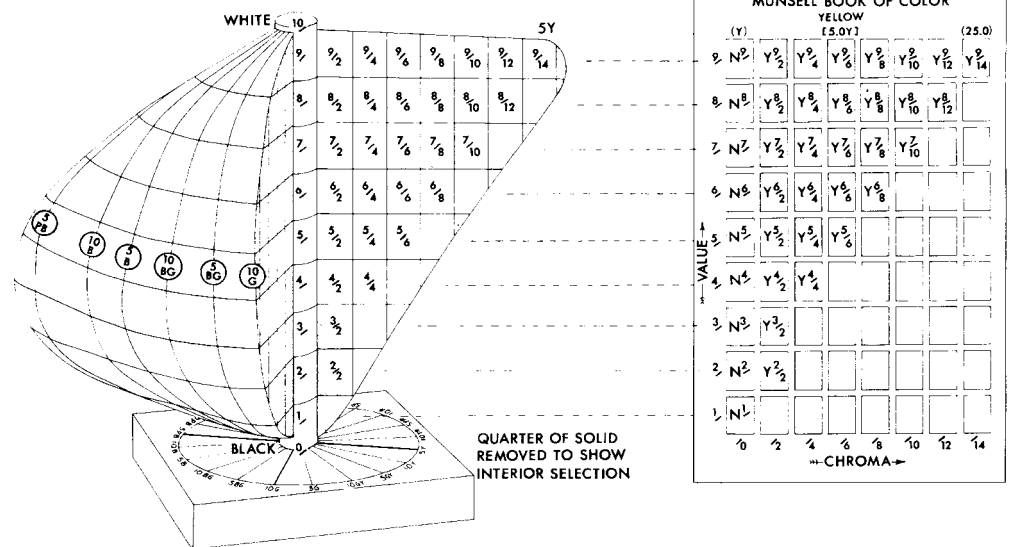
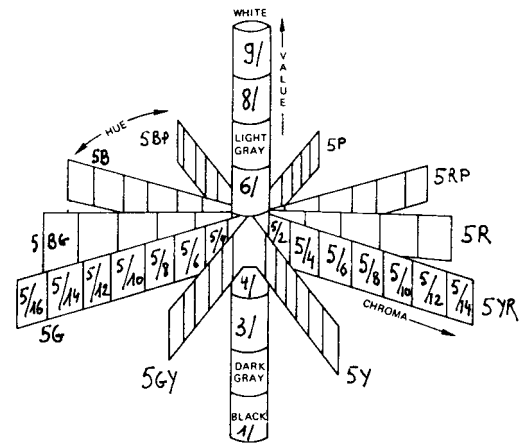


FIG. 1.3 – Munsell colour system.

a scale going from *black* ($V=0$) to *white* ($V=10$). On figure 1.3, the V axis is the vertical axis of the colour solid.

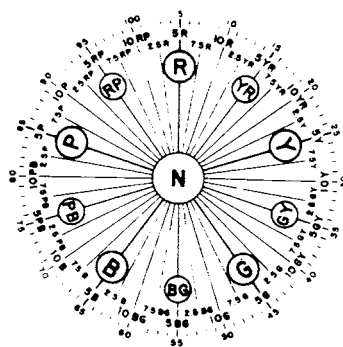


FIG. 1.4 – Munsell hue circle.

The hue "circle" is defined in the horizontal plane of the solid, with H as parameter. Principal hues are $H=Y$ (yellow), G (green), B (blue), P (purple) and R (red) : Munsell indeed considered that *five* fundamental hues were necessary to describe colour vision, instead of four as it is commonly accepted today. For example, in the Munsell notation, "5YR" is used to define an "orange" just between red and yellow.

Finally, the radial coordinate of the hue circle (distance to vertical axis) represents the saturation, which Munsell calls the Chroma (C) : $C=0$ represents an *achromatic* colour (completely desaturated, gray, black or white), while $C=10$ or more represents highly saturated colours.

Example : 5YR 6/8 is the Munsell code for a colour which is :
 – orange in hue (at mid "visual" distance from red and yellow)
 – of moderate lightness ($V=6$)
 – and quite high saturation ($C=8$)

Remark : it is important to note that the visual task of finding the Munsell code of a colour should be performed under well defined illumination, since it is known that the spectral nature of the light source influences our colour perception : this effect is called *colour rendering* and it will be explained at the end of this chapter.

Another reference colour atlas of the same family is the Swedish NCS Natural Colour System (more recent, 1975). Based on the Hering's opponent colours theory (see next section), this system is rather founded on the assumption of *four* fundamental hues (B, G, Y and R) instead of five.

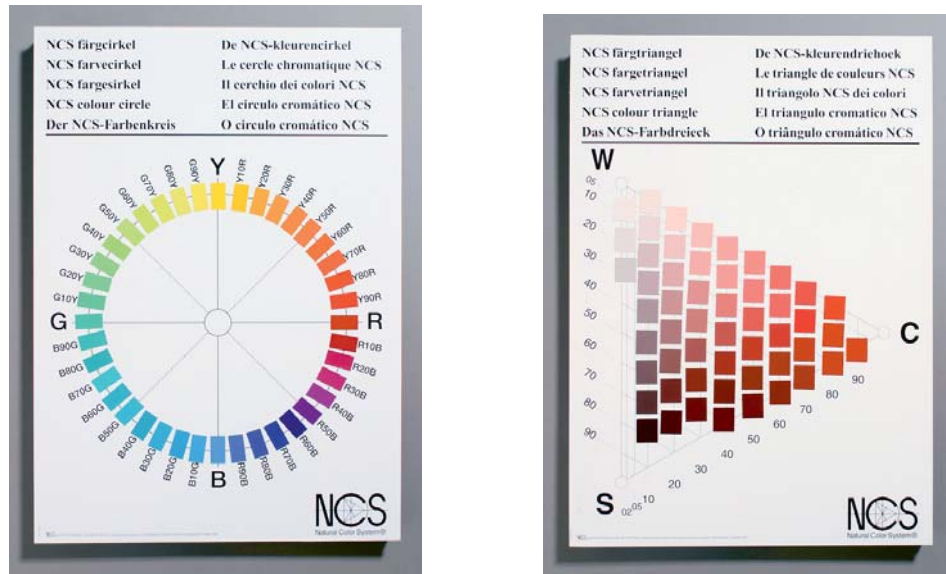


FIG. 1.5 – NCS atlas.

1.2 Colour vision

1.2.1 The cones

Colour originates from the analysis of light radiation by our visual system. The light stimulus or radiation is first directed to the retina, through the optical system of the eye. The retina is covered with sensitive cells which are able of translating light information into electrical signals. These signals are then sent to the brain through the optic nerve.

Each point of the retina represents a "pixel" of the image which is sent to the brain, just like a point on a photographic film or the photosensitive cell of a CCD sensor in a camera. In particular, the sensitive cells present at that point of the retina are responsible of giving the colour of the corresponding pixel (see figure 1.6).

Sensitive cells named *cones* are responsible for colour vision. More densely distributed in the centre of the retina (the fovea), they belong to three subclasses : the B-cones are more sensible to the short wavelengths, the G-cones to the mid ones and the R-cones to the longer wavelengths : see figure 1.7.

Each cone therefore acts as a *photoelectric cell*, associated with an *optical filter*. For each "pixel" of the image, three different signals will reach the brain which therefore will be able to perform a sort of *spectral analysis* of the corresponding light stimulus : see figure 1.6.

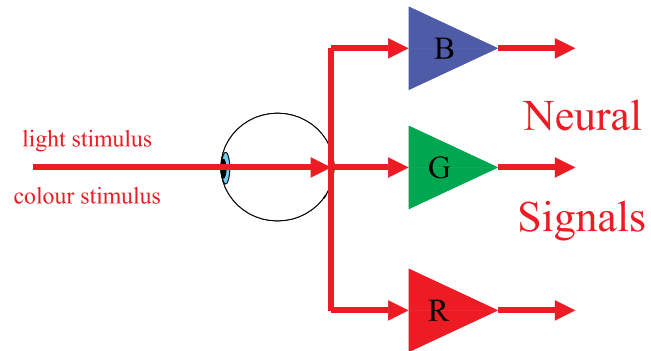


FIG. 1.6 – Cones.

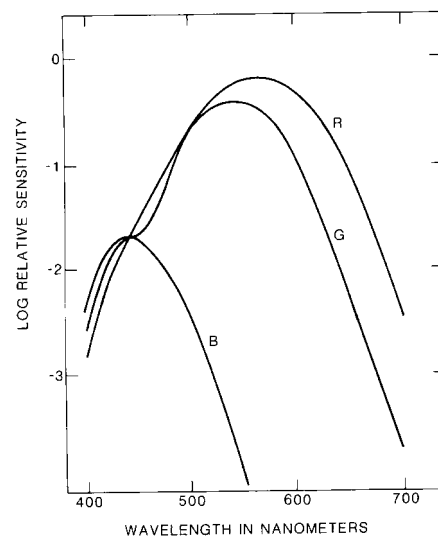


FIG. 1.7 – Cones spectral sensitivity.

How this analysis is performed is not fully understood, even today.

1.2.2 The opponent channels

After the *cones stage*, it is presently admitted that the cones signals are grouped into *opponent pairs* : this results from a theory and experiments initiated by Hering in 1872, the so-called *opponent-colors theory*.

Following Hering, the hue information is perceptually coded by the intervention of two mechanisms, two *opponent channels* : the R/G (red/green) channel and the Y/B (yellow/blue) channel. These two channels are *opponent* in the sense that they can respond to a stimulus by two possible states *that inhibit each other* : for example, the R/G channel can be activated to signal "RED" or "GREEN", but not "RED and GREEN". This leads to an impossibility for our colour interpretation system to "sense" a colour which would at the same time resemble red and green, while it is so easy to imagine a colour resembling red and yellow (orange) or red and blue (magenta) . The same conclusion stands for the yellow/blue channel.

This theory is nowadays supported by physiological evidence, since at least two anatomical structures have been found significant for this process : some retinal ganglion cells and the parvocellular area V1 of the brain [12]. This theory also supports the assumption of FOUR fundamental hues (blue, green, yellow and red) which are here clearly identified as the four primary responses of both opponent channels.

And what about the other hues ?

Let's take again "orange" as an example : in that case, the R/G channel would send the response "RED" and the Y/B channel the response "YELLOW", both responses with about the same *amplitude*, meaning that the colour lies between red and yellow, at about the same "visual" distance of both fundamental hues.

Now, what is the connection between the *cones stage* and the *opponent channels stage* ?

Figure 1.8 gives us a proposed scheme, in which it is seen that the "yellow" information is created by an association of the G- and R-cones signals. In this figure, the "minus" sign must not be interpreted as a usual arithmetic subtraction, but rather as an *opponent comparison* of two signals.

It is also seen that the two opponent channels are completed by a third *achromatic* or *luminance* or *light/dark* channel, indicating the level of lighness of the colour.

1.2.3 Cognitive colour

"Perceived" colours are then transmitted from the output of the opponent channels to some specific area of the brain where they are interpreted.

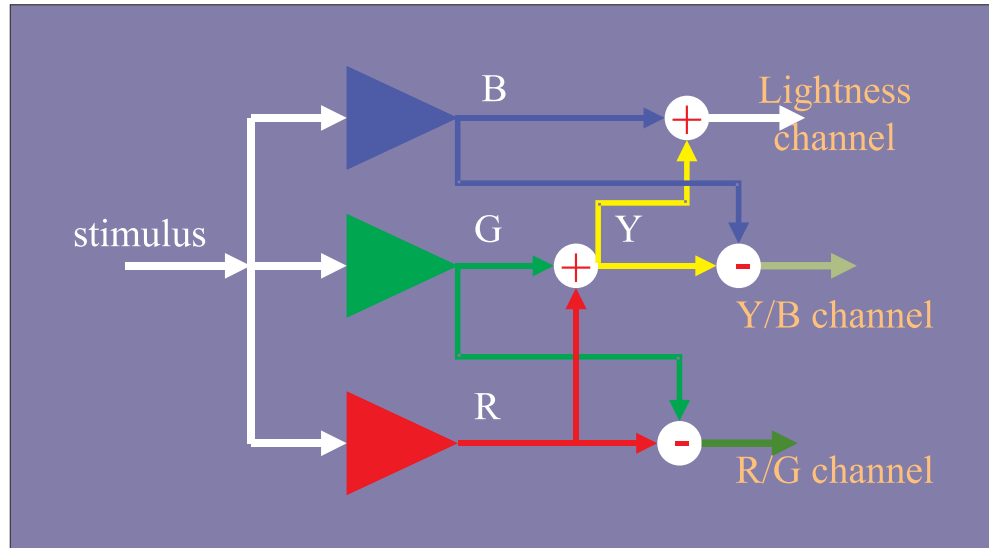


FIG. 1.8 – Colour vision scheme including the cones stage and the opponent channels stage.

For some visual tasks, colour information is *compressed* : the colour perception is classified into a semantic category. Examples of these tasks are colour naming, colour coding and colour memory.

A cognitive colour is one representative of such a category. Following some studies [12], the number of cognitive colours is much lower (approximately 30!) than the number of perceived colours.

1.3 Factors influencing the colour of a stimulus or an object

1.3.1 The colour of a stimulus depends on the observation conditions

- The colour of an object depends on its size : if too small on the retina, the image of this object will not influence the B-cones, since their density drops to zero at the very centre of the fovea. Colour vision becomes therefore 2D instead of 3D for very small objects ;
- The colour of an object depends on the dominant colour of the previous visual field. This is illustrated by the experience of *phantom images* : if we fix a vivid red drawing during one or two minutes (for example a red cross), and then suddenly look at a white paper, the same drawing will appear as

a silhouette on the white paper, but in the complementary colour (light cyan);

- The colour of an object depends on the dominant colour of the surrounding visual field. This is known as *simultaneous contrast*. For example, the same grey line will appear yellowish against a blue background and bluish against a yellow background.

In all these visual experiments, the luminous stimulus is unchanged. For example, in the *phantom images* experiment, when the silhouette appears on the white paper, the light reflected by the paper in the direction of the observer's eye is always the same. A tristimulus colorimeter would not "see" the *phantom images*, it will always measure the same tristimulus values X, Y and Z for the white paper.

This is well an "internal" effect in our visual system that influence our colour perception. This effect is generated by factors other than the colour stimulus itself, that's why we talk about *observation conditions*.

1.3.2 Chromatic adaptation

In the *phantom images* experiment, during the one or two minutes adaptation, the R-cones are strongly excited by the red stimulus, causing some sort of fatigue or under-sensibility (compared with the B- and G-cones).

Turning to the white paper, the three cones should deliver the same signal in order to indicate the white colour. However, as the R-cones have lost some sensitivity, the complementary colour (blue-green, or cyan) appears for that part of the retina (image) that was strongly exposed to the red stimulus.

After some minutes, the R-cones recover their normal sensitivity, and all the paper area becomes white again (the silhouette disappears).

The process of chromatic adaptation is also active during the everyday life. Indeed, our coloured environment has a permanent influence on our cones' sensitivity and, therefore, on our chromatic adaptation state. Mathematical models have been developed to predict colour changes due to chromatic adaptation : these are called *chromatic adaptation transforms* [13].

1.3.3 Lighting conditions influence the colour of an object

Light falling on an object is partly reflected by this object to the observer's eye. The reflected light entering the eye is what we have called the luminous or colored *stimulus*.

In the previous subsections, it has been shown that the colour associated with that stimulus depends on the observation conditions, and in particular on the chromatic adaptation state of the eye.

Now, it is clear that the colour is NOT an intrinsic property of one object, as the light reflected from it does not only depend on its nature but also on the

incident light characteristics.

The colour of the object depends on :

- the spectral power distribution of the light source ;
- the spatial distribution of the incident light.

Just have a look at some colored objects illuminated by a low pressure sodium lamp. Under this monochromatic light, no blue, red or even green colours : everything seems of the same yellow-orange colour, more or less dark, more or less light. Of course, these are quite unusual lighting conditions, but it can be shown that even with "white" illuminants, the colour of the same object is more or less changed by the spectral nature of the light source.

The fact that the spatial distribution of the incident light influences the colour of an object is not so obvious. Consider therefore the following experiment.

Let's illuminate a glossy red paper with a directional halogen projector. If we look at it outside the specular direction, the paper appears to be red. But, close to and in the specular direction, the paper appears white.

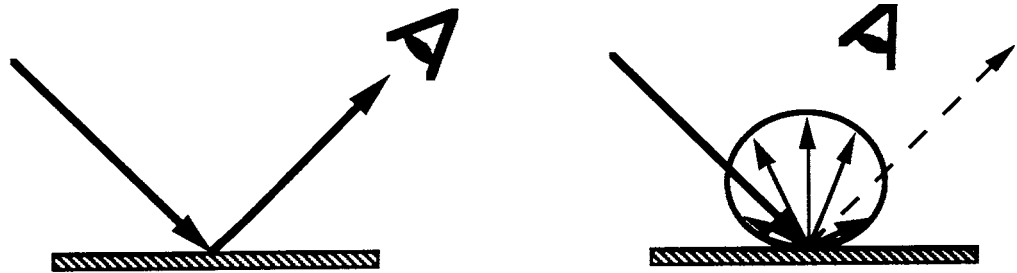


FIG. 1.9 – Specular and diffuse reflections.

Figure 1.9 illustrates this : light reflected by an object contains a surface- and a volume-component. The part which is reflected by the surface has not penetrated the material, and therefore is not influenced by the "nature" of the object (exceptions are metallic surfaces which can color the reflected light). The surface component only contains the "colour" properties of the light source. On the contrary, the volume-component contains the "colour" information of that object.

In the case of a glossy paper, the surface being very flat, the surface-component is strongly directed in the specular direction, while the volume-component is more diffuse.

Conclusion.

When lighting conditions influence the colour of an object, a *tristimulus*

colorimeter would also see the effect! This is a major difference with observation conditions' effects, for which the stimulus is unchanged, inducing no influence on the colorimeter.

1.3.4 Colour rendering

The colour rendering of an illuminant or a light source is *its effect on the colour appearance of objects by conscious or subconscious comparison with their colour appearance under a reference illuminant* (International Lighting Vocabulary [5]).

The effect we want to highlight here is the *spectral* effect of the illuminant.

The colour rendering is evaluated by the *colour rendering index* R_a , which equals 100 if there's no perceptible effect on the colour appearance of objects. A common value for interior lightings (offices, classrooms, working spaces with "comfortable" colour vision) is $R_a = 85$.

It is interesting to note that the evaluation of this colour rendering index takes into account chromatic adaptation effects induced by the test illuminant. Indeed, in an interior lit by this illuminant, all objects in the visual field will reflect in some way the "colour of the source", which would therefore influence the cones' adaptation state of the observer such that *a white sheet of paper still appears white, under any illuminant*.

Not taking this chromatic adaptation effect into account would lead to a wrong evaluation of colour rendering

Chapitre 2

Les systèmes colorimétriques

2.1 Définitions et lois

2.1.1 couleur

Composante de la perception visuelle qui permet de distinguer les radiations lumineuses par leurs différences spectrales. La couleur, au sens large, inclut la sensation subjective de luminosité ou de clarté, liée à l'intensité de la radiation lumineuse.

2.1.2 teinte

Attribut de la sensation visuelle, décrit par un seul des adjectifs suivants : bleu, vert, rouge ou jaune, ou par une combinaison de deux d'entre eux. Dans la majorité des cas, la teinte permet de faire correspondre la couleur d'une radiation lumineuse avec celle d'une radiation monochromatique.

2.1.3 saturation

Attribut de la sensation visuelle décrivant la prédominance de la teinte dans la sensation de couleur : une couleur désaturée (pâle) se rapproche du blanc, noir ou gris (couleurs achromatiques). Une couleur saturée possède au contraire une teinte bien marquée.

2.1.4 colorimétrie

Ce n'est pas la mesure de la couleur, qui est une sensation, mais plutôt la mesure de paramètres physiques permettant de repérer un stimulus de couleur donné dans un système référencié, en correspondance avec la sensation de couleur.

Note : La colorimétrie peut également être "visuelle", auquel cas l'oeil est utilisé pour faire des comparaisons entre des stimulus de couleur et opérer le classement dans un système référencié.

2.1.5 mélange (synthèse) additif(ve) des couleurs

Création d'une couleur par la superposition de plusieurs radiations lumineuses, chacune ayant sa couleur propre.

Exemple : une lumière rouge + une lumière verte, projetées sur le même écran blanc, donnent une plage jaune (figure 2.1)¹.



FIG. 2.1 – Les mélanges additifs de couleur (réf. figure Wikipedia).

2.1.6 mélange (synthèse) soustractif(ve) des couleurs

Création d'une couleur par le retrait de composantes spectrales dans la lumière de départ.

Par exemple, partant d'une lumière "blanche" (figure 2.2), on interpose un filtre jaune, puis un filtre magenta, et on obtient, à la sortie, une lumière "rouge".

Le mélange de pigments colorés (peintures, encres) fonctionne selon les mêmes principes de synthèse soustractive évoqués ci-avant pour les filtres optiques : chaque pigment du mélange absorbe une partie du spectre de la lumière incidente.

¹ Les figures en couleur seront avantageusement consultées dans le fichier *pdf*, disponible auprès de l'enseignant.

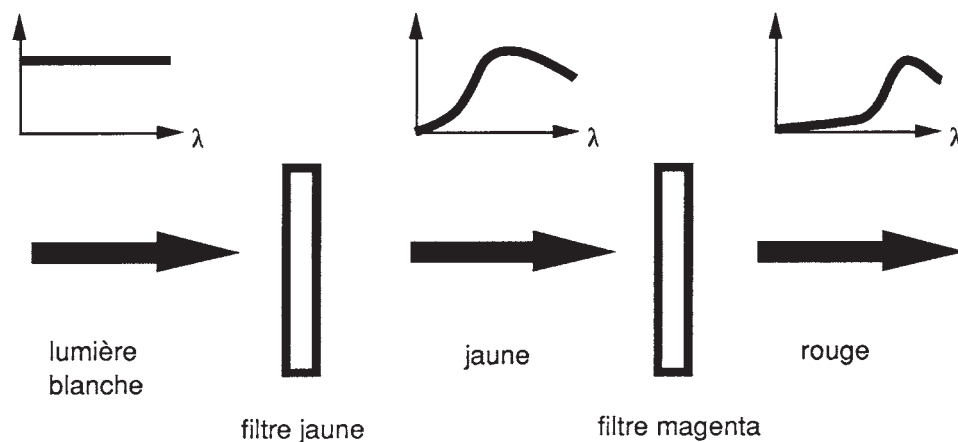


FIG. 2.2 – Exemple de mélange soustractif de couleurs : les spectres illustrent schématiquement la composition spectrale de la lumière après chaque étape du filtrage.

2.1.7 lois de Grassmann

Au 19ème siècle, le mélange additif des couleurs fait l'objet de nombreuses expériences par H. Von Helmholtz et H. Grassmann. Ce dernier énonce en 1853 les lois expérimentales qui sont à la base de la colorimétrie.

Si l'on dispose de trois sources lumineuses colorées (en général : une bleue, un verte et une rouge, appelées couleurs primaires), on peut reproduire la majorité des couleurs observables par synthèse additive des trois primaires, prises dans des proportions adéquates.

Pour toute couleur $[C]$, il existe des proportions R, G, B telles que :

$$[C] \equiv R[R] + G[G] + B[B] \quad (2.1)$$

Cette équation entre couleurs signifie que toute couleur $[C]$ peut être imitée ($\equiv$) par le **mélange additif** (+) des trois couleurs primaires ($[R], [G], [B]$) prises dans les proportions R, G, B .

Ces dernières sont les **composantes trichromatiques** de la couleur $[C]$ dans le système de référence $[R, G, B]$.

L'équation 2.1 exprime la première loi de Grassmann, qui stipule que pour caractériser une égalisation de couleur (*colour matching*), trois couleurs primaires **indépendantes** sont nécessaires et suffisantes. Par trois couleurs *indépendantes*, on signifie que chacune ne peut être "égalée" par un mélange additif des deux autres.

Les deux autres lois de Grassmann stipulent que :

- dans un mélange additif de couleurs, seules importent les composantes trichromatiques, non les composantes spectrales ;
- dans un mélange additif de couleurs, si une ou plusieurs des composantes de ce mélange sont graduellement modifiées, les composantes trichromatiques résultantes sont aussi graduellement modifiées.

Remarques

- La figure 2.1 montre que le blanc est la synthèse additive des trois primaires ([R],[G],[B]) dans des proportions plus ou moins identiques.
- En synthèse soustractive, les couleurs primaires sont le jaune, le magenta(pourpre) et le cyan (bleu-vert). La superposition de trois filtres "primaires" (ou le mélange de trois pigments "primaires") donne, dans ce cas, le noir.

2.1.8 principe d'additivité et de linéarité

Ce principe est une conséquence directe des lois de Grassmann :

Si :

$$[C_1] \equiv R_1[R] + G_1[G] + B_1[B]$$

et

$$[C_2] \equiv R_2[R] + G_2[G] + B_2[B]$$

alors :

$$a[C_1] + b[C_2] \equiv (aR_1 + bR_2)[R] + (aG_1 + bG_2)[G] + (aB_1 + bB_2)[B] \quad (2.2)$$

2.1.9 généralisation des lois de Grassmann

La figure 2.3 illustre le type de test utilisé lors des expériences de Grassmann. Le but de l'expérience est de réaliser l'égalité des couleurs sur les deux plages [?] et [C], en ajustant l'intensité des trois primaires, intensités représentées par les **composantes trichromatiques** R, G et B.

Cependant, il y a toujours des couleurs pour lesquelles l'expérience décrite ci-dessus ne peut réussir. Par exemple, certaines couleurs cyan très saturées ne peuvent être reproduites.

Afin de généraliser la première loi de Grassmann à (vraiment) toutes les couleurs observables, il faut considérer un second type de mélange (cfr. figure 2.4) dans lequel un des primaires ([R] dans l'exemple) est mélangé avec la couleur [C] pour la *désaturer*, jusqu'à ce qu'il soit possible d'imiter le résultat $[C] + R[R]$ par un mélange des primaires bleu et vert :

$$[C] + R[R] \equiv G[G] + B[B] \quad (2.3)$$

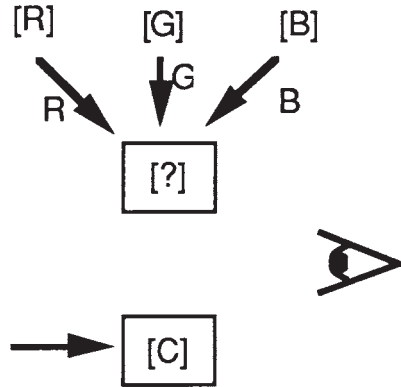


FIG. 2.3 – Test visuel de type I : ajustement des proportions R, G et B pour imiter [C].

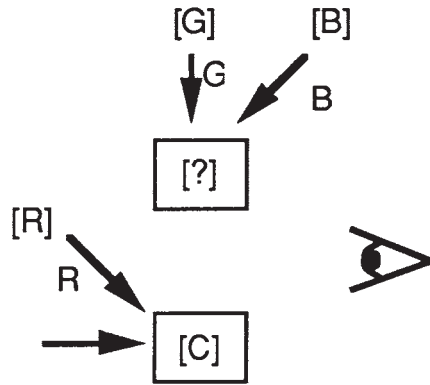


FIG. 2.4 – Test visuel de type II : ajustement des proportions R, G et B pour que le mélange de [C] et d'un primaire imite le mélange des deux autres.

L'équation (2.3) s'écrit, par convention :

$$[C] \equiv (-R)[R] + G[G] + B[B] \quad (2.4)$$

On constate donc qu' **une composante trichromatique négative correspond à un mélange additif de type II**. Ceci est purement symbolique : en effet, il est impossible de concevoir physiquement une intensité lumineuse négative pour l'une des sources primaires.

2.1.10 loi d'Abney

Si L_R , L_G et L_B sont les luminances de quantités unitaires des primaires [R], [G] et [B], on peut écrire qu'à l'équilibre décrit par (2.1), la luminance L_C de la couleur [C] vaut :

$$L_C = RL_R + GL_G + BL_B \quad (2.5)$$

2.1.11 conditions de validité des lois

Les lois de Grassmann et la loi d'Abney ne s'appliquent pas dans toutes les conditions d'observation. Des conditions de luminances trop faibles (mésopique) ou trop élevées peuvent les mettre en défaut.

De même, pour des champs d'observation trop petits (inférieurs à 0.3 degrés), la zone rétinienne couverte (centre de la fovea) devient déficitaire en cônes bleus, ce qui tend à supprimer un degré de liberté dans la vision des couleurs.

La publication CIE 185 :2009 [3] fait le point sur la validité des lois de Grassmann, et en particulier sur la propriété d'additivité. Dans les conclusions de ce rapport technique, la Commission constate que certains résultats expérimentaux restent encore inexpliqués. Elle recommande de poursuivre les recherches afin de parfaire les connaissances dans ce domaine.

2.2 Les espaces colorimétriques

2.2.1 l'espace colorimétrique RGB de la C.I.E.

Le principe de trichromaticité nous indique que toute couleur est repérable dans un système à trois dimensions (R,G,B), à condition que les couleurs primaires soient bien définies.

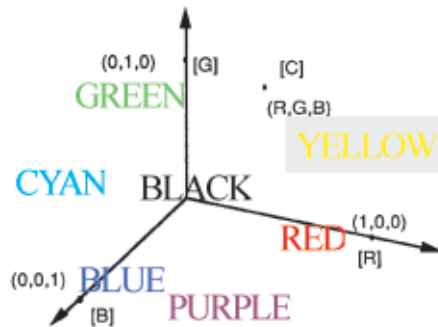


FIG. 2.5 – Repérage d'une couleur [C] dans l'espace colorimétrique RGB.

La C.I.E. (Commission Internationale de l'Eclairage) a défini un ensemble de trois primaires $[R, G, B]$:

- $[R]$ est une radiation monochromatique à 700nm,
- $[G]$ est une radiation monochromatique à 546.1nm (raie de l'atome de mercure),
- $[B]$ est une radiation monochromatique à 435.8nm (raie de l'atome de mercure).

Les luminances de ces trois primaires correspondant à des quantités unitaires ($R=1$, $G=1$, $B=1$) ont également été fixées de manière relative :

$$L_R = 1, L_G = 4.5907, L_B = 0.0601 \quad (2.6)$$

Avec cette définition des primaires $[R]$, $[G]$ et $[B]$, la couleur blanche créée par un illuminant dont l'énergie est constante à toutes les longueurs d'onde (le **blanc colorimétrique**) est caractérisée par l'égalité des composantes trichromatiques : $R=G=B$.

2.2.2 le triangle des couleurs rgb

Si l'on applique la seconde loi de Grassmann au mélange additif de la couleur $[C]$ avec elle-même, on obtient :

$$2[C] \equiv [C] + [C] \equiv (2R)[R] + (2G)[G] + (2B)[B] \quad (2.7)$$

et la loi d'Abney (2.5) nous indique que la luminance de $2[C]$ est deux fois la luminance de $[C]$.

La couleur $2[C]$ n'est donc que la couleur $[C]$ "renforcée en luminance", mais de même teinte et de même saturation que $[C]$: en un mot, sans altération de sa chromaticité.

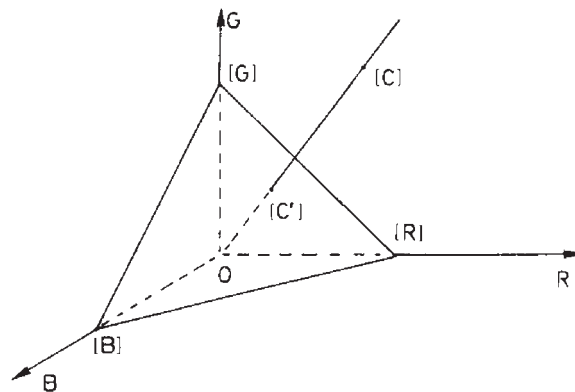


FIG. 2.6 – Définition du triangle des couleurs (plan d'équation $R+G+B=1$) dans l'espace colorimétrique RGB.

Par conséquent, à la figure 2.6, toutes les couleurs dont les points représentatifs sont situés sur une même demi-droite partant de l'origine "O" sont de **même chromaticité** (même teinte et même saturation), mais de **luminances différentes**.

La chromaticité d'une couleur [C] peut dès lors être représentée dans l'espace colorimétrique RGB par le point de percée de la demi-droite [O][C] dans le triangle s'appuyant sur les points représentatifs des trois primaires [R], [G] et [B] : à la figure 2.6, les coordonnées du point de percée [C'] représentent la chromaticité de la couleur [C].

Ces coordonnées sont notées par les lettres minuscules (r,g,b) : ce sont les **coordonnées trichromatiques** de la couleur [C] :

$$r = \frac{R}{R+G+B} \quad g = \frac{G}{R+G+B} \quad b = \frac{B}{R+G+B} \quad (2.8)$$

Les coordonnées trichromatiques sont liées par l'équation :

$$r + g + b = 1 \quad (2.9)$$

Le triangle contenant les points [C'] est appelé **triangle des couleurs**. A chaque point de ce triangle correspond une chromaticité donnée, c'est-à-dire un couple (teinte, saturation). Le Vocabulaire International de la C.I.E. [5] recommande plutôt le terme **diagramme de chromaticité**.

2.2.3 l'espace colorimétrique XYZ de la C.I.E.

Dans l'espace colorimétrique RGB, certaines couleurs ont au moins une composante trichromatique négative : il s'agit des couleurs pour lesquelles un mélange de type II (cfr. figure 2.4) est nécessaire. L'exemple du cyan saturé (le cyan "de l'arc-en-ciel") a été cité précédemment.

Pour des raisons qui apparaîtront plus loin, liées à la *mesure* des composantes trichromatiques, il est souhaitable de définir un espace colorimétrique dans lequel **toutes** les couleurs observables ont des composantes trichromatiques positives.

Comme tout nouvel espace, XYZ est défini par ses couleurs primaires. La différence avec l'espace RGB, c'est que les trois primaires [X], [Y] et [Z] ne sont pas définies de manière *physique*, par des illuminants réels, mais comme des mélanges de [R], [G] et [B] :

$$[X] \equiv a[R] + b[G] + c[B]$$

$$[Y] \equiv d[R] + e[G] + f[B]$$

$$[Z] \equiv g[R] + h[G] + i[B]$$

et pour les luminances :

$$L_X = L_Z = 0 \quad L_Y = 1 \quad (2.10)$$

A noter que la dernière équation permet, via (2.6) et la loi d'Abney, de déterminer une relation liant (d,e,f) :

$$L_Y = dL_R + eL_G + fL_B = d + 4.5907e + 0.0601f = 1 \quad (2.11)$$

et de même, $L_X = L_Z = 0$ permet de déterminer des relations équivalentes liant (a,b,c) et (g,h,i).

Les 9 coefficients (a ...i) de la matrice définissant les primaires [X], [Y] et [Z] doivent en outre respecter les impositions suivantes :

- les composantes trichromatiques de **toutes** les couleurs observables sont positives ;
- le **blanc colorimétrique**, caractérisé par $R=G=B$, est aussi caractérisé par l'égalité des composantes trichromatiques $X=Y=Z$.

La valeur de ces 9 coefficients peut être trouvée dans la publication de la C.I.E. 15.3 :2004 intitulée "*Colorimetry. Third edition*" [1].

Notons enfin la relation intéressante qui relie la composante trichromatique Y d'une couleur donnée et sa luminance. En effet, si :

$$[C] \equiv X[X] + Y[Y] + Z[Z]$$

définit les composantes trichromatiques de [C] dans l'espace XYZ, la loi d'Abney (2.5) et la relation (2.10) appliquées à cette définition nous donnent la luminance de [C] :

$$L_C = XL_X + YL_Y + ZL_Z = Y \quad (2.12)$$

La composante Y est donc égale à la luminance de la couleur.

2.2.4 les fonctions colorimétriques $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ et $\bar{z}(\lambda)$

Toute radiation lumineuse **monochromatique**, de longueur d'onde λ , crée une sensation de couleur $[C_\lambda]$, que l'on pourrait appeler une *couleur spectrale*. Nous retrouvons l'ensemble des couleurs spectrales dans un arc-en-ciel.

Comme toutes les couleurs, les couleurs spectrales peuvent être caractérisées par des composantes trichromatiques. Par définition, $[C_\lambda]$ représentera la couleur de la radiation monochromatique de luminance $V(\lambda)$, dans l'unité utilisée pour exprimer la luminance des couleurs primaires, et on notera ses composantes trichromatiques : $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ et $\bar{z}(\lambda)$. Nous pouvons donc écrire :

$$[C_\lambda] \equiv \bar{x}(\lambda)[X] + \bar{y}(\lambda)[Y] + \bar{z}(\lambda)[Z]$$

L'équation (2.12) nous indique que la composante Y de toute *couleur spectrale* est égale à sa luminance, dans l'unité utilisée pour exprimer la luminance des couleurs primaires. Il en résulte que :

$$\bar{y}(\lambda) = V(\lambda) \quad (2.13)$$

Les fonctions de la longueur d'onde $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ et $\bar{z}(\lambda)$ sont appelées les **fonctions colorimétriques** de l'espace colorimétrique XYZ. Ainsi que le montre la figure 2.7, ces fonctions sont positives pour chaque longueur d'onde, puisque, par définition de l'espace XYZ, les composantes trichromatiques de toutes les couleurs observables (en particulier les *couleurs spectrales*) sont positives.

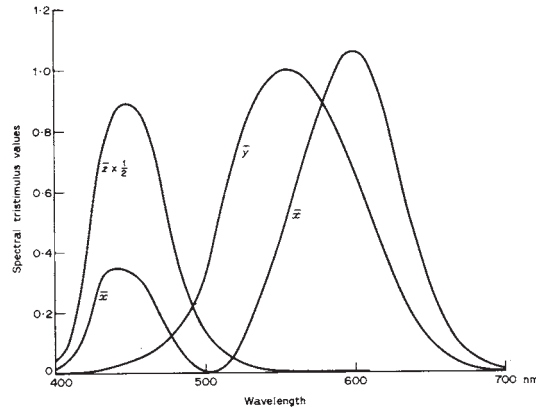


FIG. 2.7 – Fonctions colorimétriques de l'espace colorimétrique XYZ.

Les fonctions colorimétriques jouent un rôle essentiel en colorimétrie. En effet, on peut démontrer la propriété suivante : si $e(\lambda)$ représente le spectre de puissance d'un stimulus de couleur quelconque [C] en W/nm, les composantes trichromatiques de [C] sont telles que :

$$\begin{aligned} X &= \int_{380nm}^{780nm} e(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= \int_{380nm}^{780nm} e(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= \int_{380nm}^{780nm} e(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (2.14)$$

La démonstration résulte du découpage du spectre de puissance en radiations lumineuses monochromatiques, de longueurs d'onde λ_i , chacune d'entre elles étant caractérisée par ses composantes $\bar{x}(\lambda_i)$, $\bar{y}(\lambda_i)$ et $\bar{z}(\lambda_i)$. Si l'on considère la couleur quelconque [C] comme étant le résultat du *mélange additif* de toutes ces radiations monochromatiques élémentaires, prises dans des proportions $e(\lambda_i)\Delta\lambda$ (voir figure 2.8), les lois de Grassmann impliquent que la composante X de [C] peut s'écrire :

$$X = \sum_i e(\lambda_i) \bar{x}(\lambda_i) \Delta\lambda$$

Le passage à la limite (pour $\Delta\lambda$ tendant vers 0) permet d'obtenir (2.14).

Note : le standard CIE S 014-3 (en préparation) recommande :

- le calcul numérique des intégrales (2.14) par sommation tous les 1nm,
- et l'extension des bornes d'intégration à 360nm et 830nm.

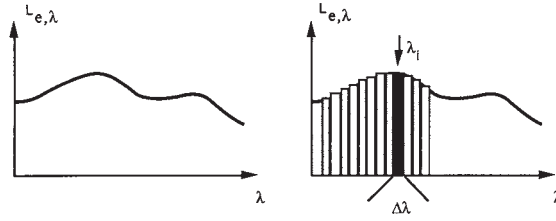


FIG. 2.8 – Décomposition du spectre de luminance énergétique $L_{e,\lambda}$ en radiations lumineuses monochromatiques de même largeur $\Delta\lambda$.

Les relations (2.14) sont essentielles, car elles nous permettent à présent de **calculer** les composantes trichromatiques, sans passer par un test visuel :

- si l'on connaît (par exemple, par la mesure) la composition spectrale du stimulus de couleur,
- et si les fonctions colorimétriques sont normalisées (ce qui est le cas, cfr [1,6]).

De plus, si l'on dispose d'un appareil équipé de trois cellules photoélectriques, dont les sensibilités spectrales sont proportionnelles aux trois fonctions colorimétriques (voir figure 2.9), tout stimulus coloré incident de spectre $e(\lambda)$ générera trois photocourants dont les intensités seront proportionnelles aux composantes trichromatiques X, Y et Z de ce stimulus. Nous sommes donc capables de **mesurer** les composantes trichromatiques : c'est le principe du **colorimètre**.

2.2.5 le triangle des couleurs (x,y)

Par analogie avec l'espace RGB, nous pouvons définir les coordonnées trichromatiques x, y et z :

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (2.15)$$

Elles sont liées par l'équation :

$$x + y + z = 1 \quad (2.16)$$

Colorimeter cell

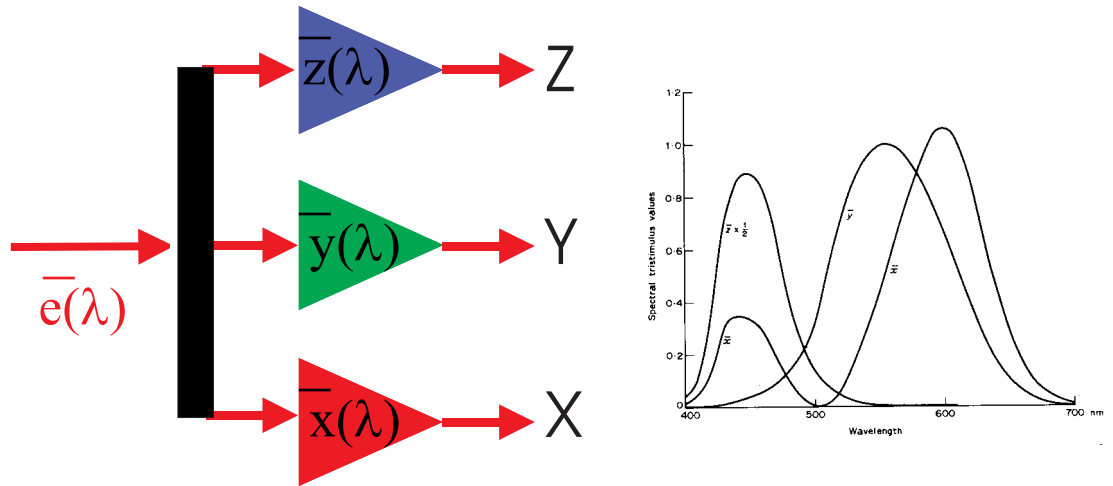


FIG. 2.9 – Principe du colorimètre.

Le triangle des couleurs ou **diagramme de chromaticité (x,y)** est représenté aux figures 2.10 et 2.11. Ses propriétés principales sont les suivantes :

- le lieu "en fer à cheval" gradué en nm est le lieu des points de coordonnées (x,y) représentatifs des *couleurs spectrales* : on l'appelle le **spectrum locus** ;
- si l'on se base sur les couleurs de l'arc-en-ciel, nous pouvons observer que les couleurs bleues sont situées dans le coin inférieur gauche du diagramme, les vertes dans la partie supérieure et les rouges dans la partie inférieure droite ;
- le blanc colorimétrique, caractérisé par $X=Y=Z$, a pour coordonnées $x = y = 1/3$. Les stimulus de couleur blanche (ou, plus généralement, achromatique) sont donc situés au centre du diagramme ;
- le mélange additif de deux couleurs $[C_1]$ et $[C_2]$ est sur le segment de droite joignant leurs points représentatifs de coordonnées (x_1, y_1) et (x_2, y_2) : cela résulte du principe d'additivité et de linéarité (2.2) ;
- par la propriété précédente, les points situés sur la droite joignant les couleurs spectrales bleues de 380nm et celles (rouges) de 780nm sont représentatifs de couleurs pourpres : c'est la droite des **pourpres saturés** ;
- toujours par la propriété de linéarité, toute couleur observable est représentée par un point compris dans le domaine fermé par le lieu des mo-

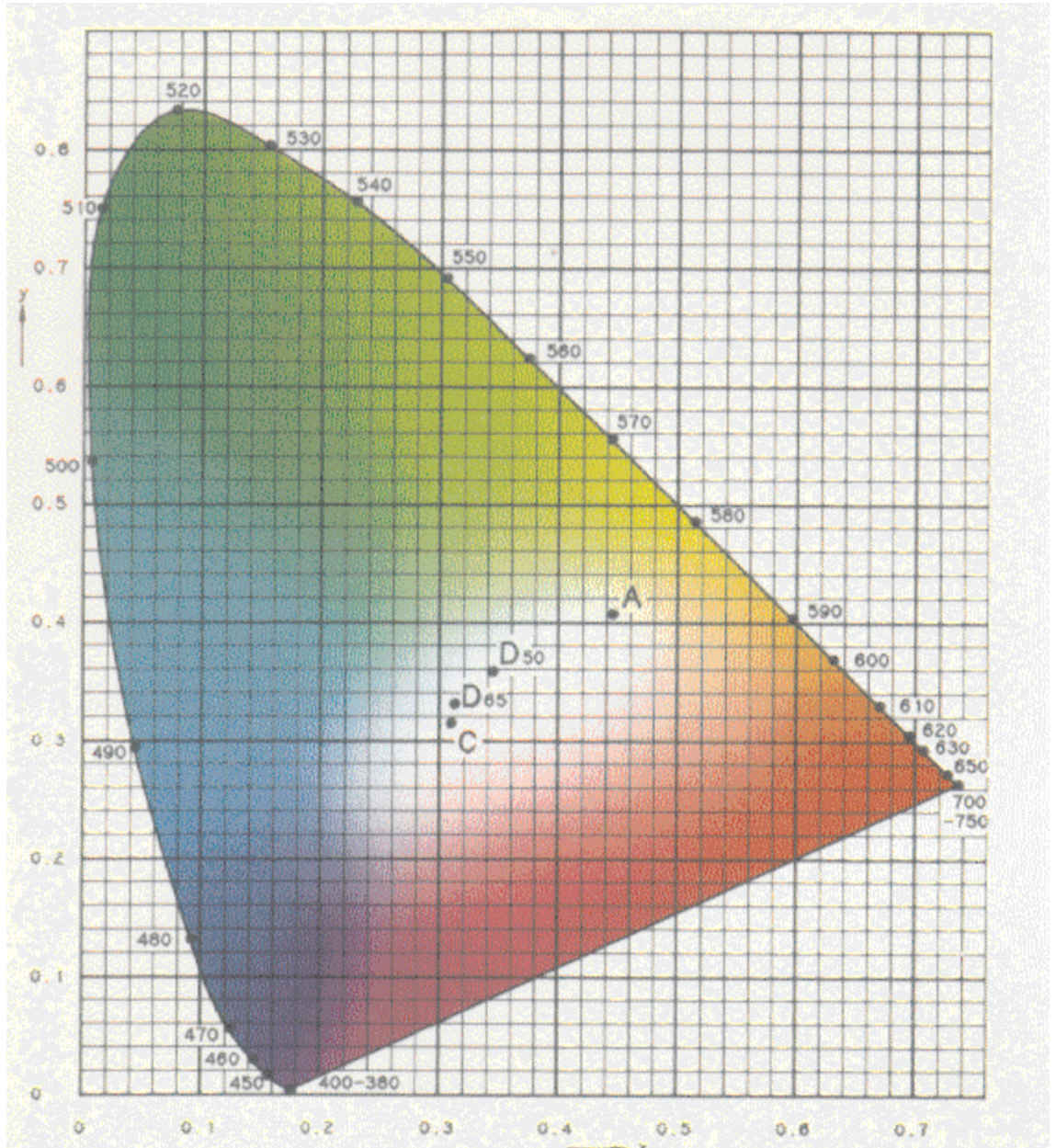


FIG. 2.10 – Diagramme de chromaticité (x,y)

nochromatiques et la droite des pourpres saturés, car toute couleur observable provient d'un stimulus dont le spectre peut être décomposé en radiations monochromatiques. Les mélanges deux à deux de radiations monochromatiques conduisent inévitablement à des points représentatifs situés à l'intérieur de ce lieu *convexe* ;

- par la propriété précédente, les primaires [X], de coordonnées (x,y)=(1,0), [Y] (x,y = 0,1) et [Z] (x,y = 0,0) sont des couleurs *fictives*, auxquelles ne correspondent aucune couleur observable. En effet, leurs points représentatifs sont à l'extérieur du spectrum locus ;
- l'ensemble des couleurs obtenues par synthèse additive des primaires [R], [G] et [B] est contenu dans le triangle BGR (fig. 2.10). On voit ici pourquoi certaines couleurs saturées ne peuvent être obtenues par un mélange de type I, notamment dans la zone des cyans saturés ;
- définitions de la **longueur d'onde dominante** (λ_d) et de la **pureté** (voir fig. 2.11) : soit [W], le point du triangle des couleurs représentatif d'un stimulus achromatique (blanc). Soit [C], le point représentatif d'une couleur quelconque. L'intersection [D] de la droite WC et du spectrum locus détermine la longueur d'onde dominante de la couleur [C] : c'est une image de sa teinte. Le rapport des segments WC/WD est la pureté d'excitation p_e , qui est corrélée à la saturation de la couleur [C].

Note : les couleurs [C] situées entre le blanc [W] et la droite des pourpres saturés sont caractérisées par la longueur d'onde complémentaire [1]. Pour la définition de leur pureté p_e , [D] est alors sur la droite des pourpres saturés.

2.2.6 luminance caractéristique de la chromaticité : l_c

Il s'agit, par définition, de la luminance attachée au point du "triangle des couleurs" dont les composantes trichromatiques sont (r,g,b) dans l'espace colorimétrique RGB ou (x,y,z) dans l'espace XYZ.

Par définition et par la loi d'Abney :

$$l_c = rL_R + gL_G + bL_B$$

et (par 2.12) :

$$l_c = yL_Y = y \quad (2.17)$$

On peut démontrer que les coordonnées trichromatiques du mélange de plusieurs stimulus de couleur (de luminances L_i) s'expriment simplement par une somme pondérée des coordonnées trichromatiques de chaque stimulus. Ainsi, pour un mélange de n stimulus de couleur :

$$r_{mélange} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i \frac{L_i}{l_{c,i}}}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{l_{c,i}}} \quad (2.18)$$

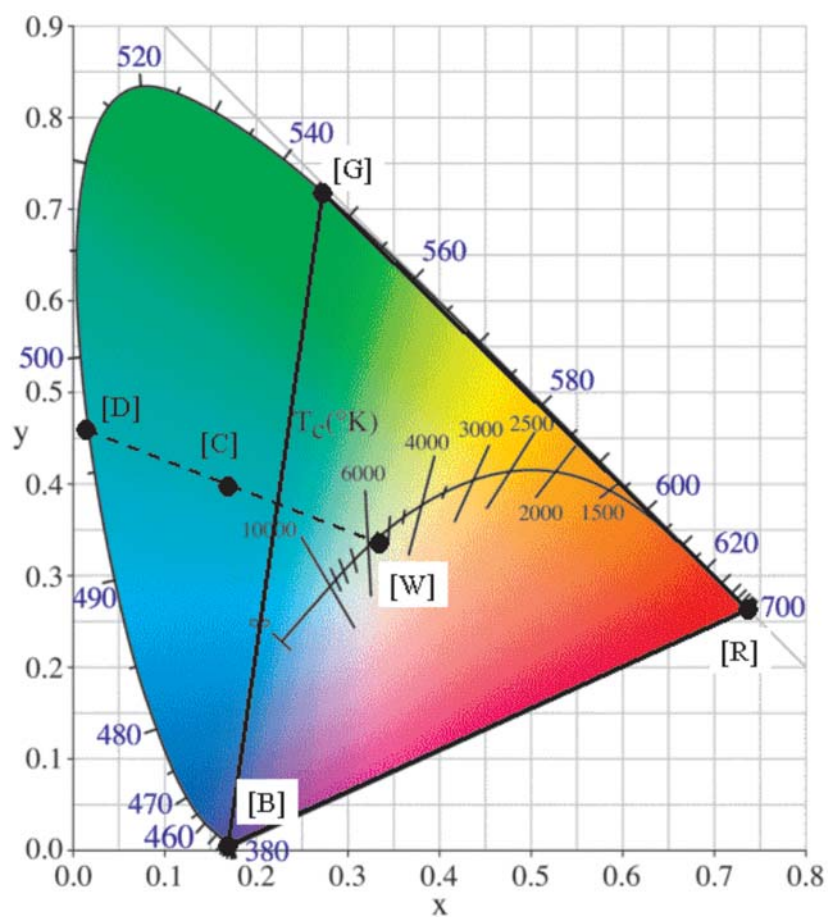


FIG. 2.11 – L'ensemble des couleurs obtenues par synthèse additive des primaires [R], [G] et [B] est contenu dans le triangle BGR. Cette figure illustre également le lieu des corps noirs, gradué en Kelvins, ainsi que la construction permettant de déterminer la longueur d'onde dominante d'une couleur [C], à partir du blanc colorimétrique [W].

2.2.7 le lieu des corps noirs et les illuminants de type D (daylight)

Dans le triangle des couleurs (x,y), il s'agit du lieu des chromaticités d'un corps noir porté à des températures croissantes, depuis (théoriquement) 0K jusqu'à des températures infinies. Ce lieu est donc gradué en Kelvins (K) : voir figure 2.11. Rappelons que le corps noir est un illuminant dont le spectre est défini par la loi de Planck.

Remarquons que ce lieu traverse la zone *blanche* du triangle des couleurs. Nous verrons plus loin qu'il permet de définir la **température de couleur** pour les sources de lumière blanche.

On remarque également, à proximité du lieu des corps noirs, les points représentatifs de la famille des illuminants "D" (daylight) : il s'agit d'illuminants de référence, représentant la lumière naturelle, et dont le spectre a été normalisé par la C.I.E. [1,7].

Ils sont notés D_t , où t est la température de couleur (K) de l'illuminant.

La figure 2.10 illustre les points représentatifs de deux d'entre eux dans le triangle des couleurs : D_{50} (abrégé de D_{5003}) et D_{65} (ou D_{6504} , le plus utilisé).

2.2.8 observateurs de référence colorimétriques

L'observateur de référence colorimétrique C.I.E. 1931 est un observateur idéal dont les propriétés colorimétriques sont conformes aux fonctions colorimétriques $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ et $\bar{z}(\lambda)$. Ces fonctions sont valables pour un champ d'observation défini par un angle de 1 à 4 degrés (typiquement 2 degrés).

Pour les angles supérieurs à 4 degrés, la C.I.E. recommande l'utilisation de l'observateur de référence colorimétrique C.I.E. 1964 (*10 degrees standard colorimetric observer*). Celui-ci est un observateur idéal dont les propriétés colorimétriques sont conformes aux fonctions colorimétriques $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$ et $\bar{z}_{10}(\lambda)$.

Les composantes trichromatiques calculées par (2.14) avec ces trois fonctions colorimétriques sont symbolisées par X_{10} , Y_{10} et Z_{10} . De même, les coordonnées trichromatiques x_{10} et y_{10} définissent le diagramme de chromaticité CIE 1964.

Remarques :

- les fonctions $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$ et $\bar{z}_{10}(\lambda)$ sont valables dans des conditions de vision où les cellules de type "bâtonnets" n'ont pas d'effet significatif (par exemple, lorsque la luminance est supérieure à 10 cd/m^2);
- les fonctions colorimétriques des observateurs de référence sont définies par pas de 1nm dans le standard CIE S 014-1 [6] et par pas de 5nm dans la publication CIE 15.3 [1];
- dans sa publication CIE 165 :2005 [2], la C.I.E. recommande l'utilisation de la fonction $\bar{y}_{10}(\lambda)$ comme fonction d'efficacité lumineuse relative spectrale ($\bar{y}_{10}(\lambda) = V_{10}(\lambda)$) pour les champs d'observation compris entre 4 et 30 degrés et pour des conditions de vision photopique.

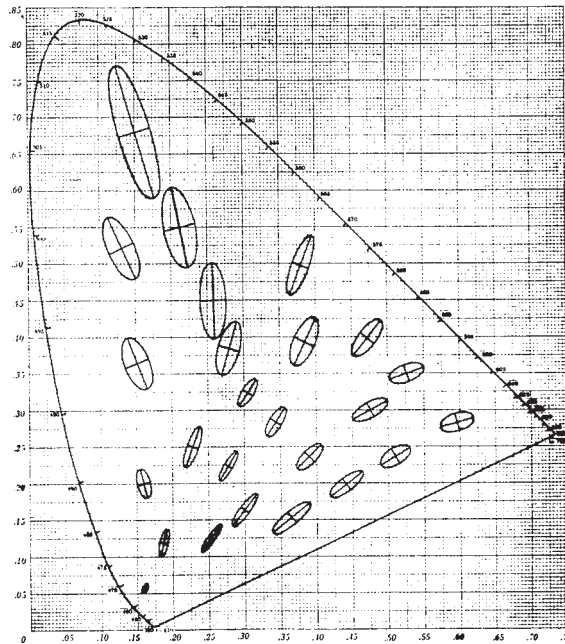


FIG. 2.12 – Ellipses de Mac Adam reliant les chromaticités "juste perceptibles" par rapport à la chromaticité centrale (1942). Pour des raisons de lisibilité, ces ellipses ont été dilatées d'un facteur 10 [10].

2.3 Les espaces chromatiques uniformes

2.3.1 définition

Il s'agit d'espaces chromatiques (ou espaces colorimétriques) dans lesquels la distance entre deux points est censée représenter l'amplitude des écarts observés entre les couleurs correspondantes.

2.3.2 diagramme de chromaticité uniforme CIE 1976

Vers le milieu du 20ème siècle, Mac Adam s'intéresse aux écarts observés entre différentes couleurs, et en particulier aux écarts "juste perceptibles". Partant d'une couleur de référence donnée $[C_r]$, dont il détermine la chromaticité (x_r, y_r) , ce scientifique définit le lieu des points représentatifs des couleurs voisines de $[C_r]$ et qui en diffèrent d'un écart "juste perceptible" (tout en conservant la luminance sensiblement constante). Ces lieux sont représentés par des ellipses à la figure 2.12.

Mac Adam constate donc que le diagramme de chromaticité (x, y) n'est pas

uniforme car, d'une part, les écarts "juste perceptibles" correspondent à des distances différentes selon la direction (dans un diagramme uniforme, les ellipses devraient être des cercles) et, d'autre part, ces distances varient fortement selon la zone du triangle des couleurs (deux points voisins de chromaticités différentes sont beaucoup mieux discernables dans le bleu que dans le vert).

Mac Adam a donc recherché une transformation mathématique du diagramme de chromaticité permettant d'uniformiser les distances entre couleurs "juste perceptibles". En 1960, la C.I.E. recommande ainsi une première transformation, basée sur les travaux de Mac Adam. En 1976, cette même commission en propose une version légèrement modifiée, qui est toujours d'application aujourd'hui (en 2010) :

$$\begin{aligned} u' &= \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \\ v' &= \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \end{aligned} \quad (2.19)$$

La figure 2.13 nous donne un aperçu du diagramme de chromaticité uniforme défini par ces nouvelles coordonnées. Dans ce diagramme, les ellipses de Mac Adam se transforment en lieux *approximativement* circulaires et de tailles *similaires*, principalement dans la zone du diagramme entourant le lieu des corps noir, c'est-à-dire la zone incluant les chromaticités des illuminants émettant de la lumière blanche.

Note :

- si l'angle de vision sous-tendu par les échantillons colorés est supérieur à 4 degrés, alors les composantes trichromatiques X, Y et Z doivent être remplacées par X_{10} , Y_{10} et Z_{10} .

2.3.3 l'espace colorimétrique uniforme CIELUV 1976 [9]

L'ajout de la luminance (ou plus exactement du facteur de luminance, correspondant de la *clarté* d'une couleur) au diagramme de chromaticité uniforme permet de définir **l'espace colorimétrique uniforme**.

En 1976, la C.I.E. recommande l'espace CIELUV, qui est une extension du diagramme de chromaticité (u', v') :

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \\ u^* &= 13L^*(u' - u'_n) \\ v^* &= 13L^*(v' - v'_n) \end{aligned} \quad (2.20)$$

Remarques :

- Y, u' et v' définissent le stimulus de couleur considéré ;

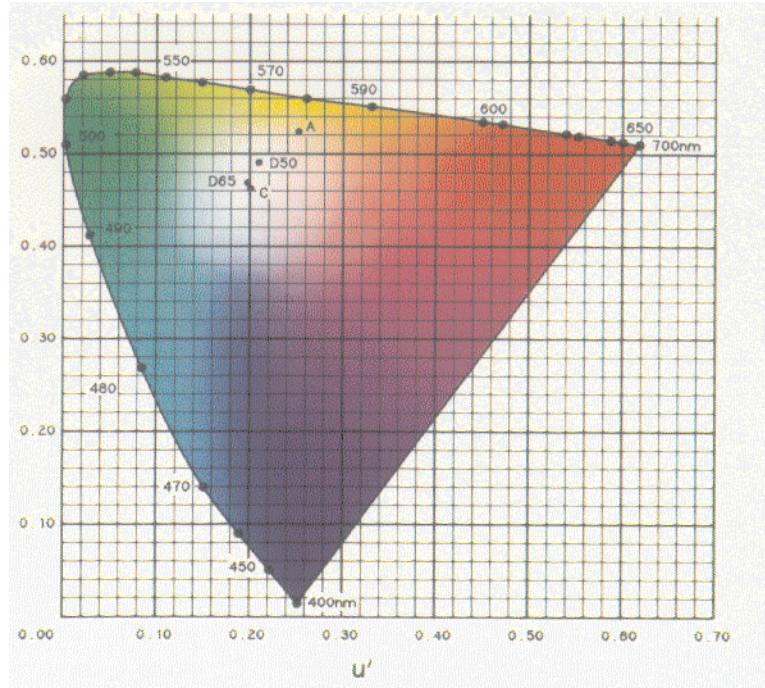


FIG. 2.13 – Diagramme de chromaticité uniforme CIE1976

- Y_n , u'_n et v'_n définissent un stimulus de couleur blanche (référence). Pour les couleurs de type *surfaces*, il s'agira d'une surface de facteur de réflexion spectral égal à 1 à toutes les longueurs d'onde (réflecteur parfait) et éclairée avec le même niveau d'éclairement que la couleur surface considérée ;
- pour les couleurs de type *surfaces*, le rapport $\frac{Y}{Y_n}$ représente le *facteur de luminance* de la surface considérée ;
- L^* correspond approximativement à la *clarté* de la couleur considérée ;
- pour les faibles valeurs du facteur de luminance $\frac{Y}{Y_n} \leq \left(\frac{24}{116}\right)^3$, le facteur $\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3}$ doit être remplacé dans l'équation de la clarté par : $\frac{841}{108} \frac{Y}{Y_n} + \frac{16}{116}$.

Cet espace peut être utilisé pour comparer et estimer les différences de couleur entre des échantillons de même taille et de même forme, observés sur des environnements (visuels) de couleur achromatique (*white to middle grey*), par un observateur adapté à un champ lumineux de chromaticité proche de celle de la lumière du jour moyenne.

Si l'angle du champ de vision est supérieur à 4 degrés, les composantes X_{10} , Y_{10} et Z_{10} doivent être utilisées en lieu et place de X , Y et Z pour calculer toutes les coordonnées de l'équation (2.20).

Dans ces conditions, la différence de couleur suivante peut être calculée

(différence de couleur CIELUV) :

$$\Delta E_{uv}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2} \quad (2.21)$$

où ΔL^* est la différence entre les "clartés" des deux couleurs et Δu^* et Δv^* sont, respectivement, les différences entre les coordonnées u^* et v^* de ces mêmes deux couleurs.

2.3.4 l'espace colorimétrique uniforme CIELAB 1976 [8]

En 1976, la C.I.E. recommande également un autre espace colorimétrique uniforme, issu d'autres expérimentations que celles de Mac Adam, et utilisé principalement dans le milieu industriel. Il s'agit de l'espace CIELAB :

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \\ a^* &= 500 \left(\left(\frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right) \\ b^* &= 200 \left(\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right) \end{aligned} \quad (2.22)$$

On constate de nouveau l'accouplement de la variable L^* (identique au CIELUV), représentative de la clarté, avec deux composantes de chromaticité a^* et b^* . La figure 2.14 donne une illustration de cet espace pour un niveau de clarté constant.

Les figures 2.15 et 2.16 donnent deux autres représentations de cet espace.

De nouveau, X, Y et Z définissent le stimulus de couleur considéré et X_n , Y_n et Z_n sont les composantes trichromatiques d'un stimulus de couleur blanche, constituant la référence (souvent, une surface parfaitement réfléchissante éclairée comme l'échantillon de couleur considérée, et pour laquelle Y_n est égal à 100 par convention.

Les autres remarques énoncées pour l'espace CIELUV sont également d'application. En particulier, les fonctions du type $\left(\frac{\psi}{\psi_n} \right)^{1/3}$, où ψ représente l'une des trois composantes X, Y ou Z, sont remplacées par des fonctions linéaires du rapport $\frac{\psi}{\psi_n}$ lorsque celui-ci devient trop faible (inférieur ou égal à $\left(\frac{24}{116} \right)^3$).

Cet espace peut être utilisé pour comparer et estimer les différences de couleur entre des échantillons de même taille et de même forme, observés sur des environnements (visuels) de couleur achromatique (*white to middle grey*), par un observateur adapté à un champ lumineux de chromaticité proche de celle de la lumière du jour moyenne. Comme pour CIELUV, les composantes X_{10} , Y_{10} et Z_{10} remplacent X, Y et Z si l'angle du champ de vision est supérieur à 4 degrés.

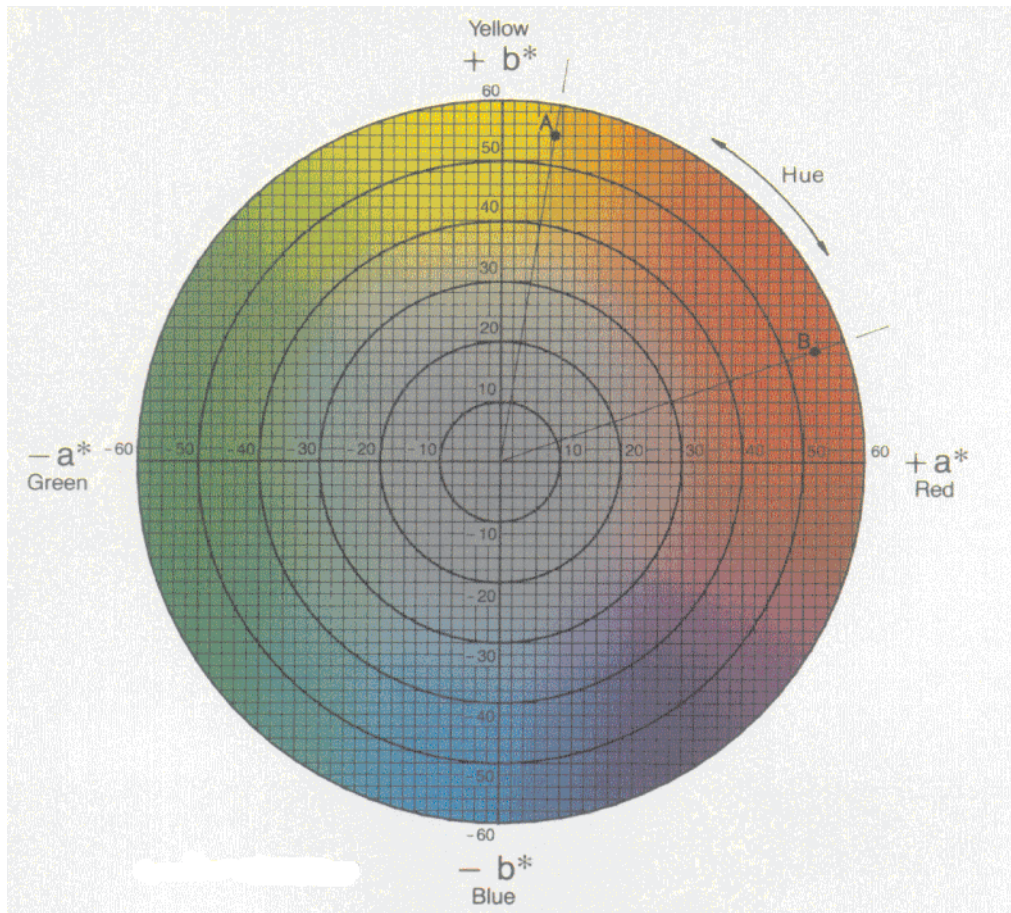


FIG. 2.14 – Espace CIELAB : représentation pour un niveau de clarté constant.

Dans ces conditions, la différence de couleur suivante peut être calculée (**différence de couleur CIELAB**) :

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2.23)$$

Note :

- la C.I.E. recommande également une formule de différence "améliorée" entre couleurs (*Improved industrial colour difference evaluation*). Le lecteur intéressé est invité à consulter à ce propos la publication CIE 15.3 :2004 [1].

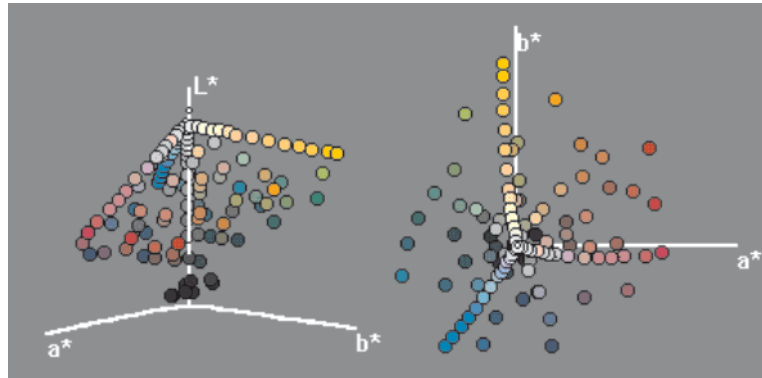


FIG. 2.15 – Espace CIELAB : représentations en couleur de l'espace 3D.

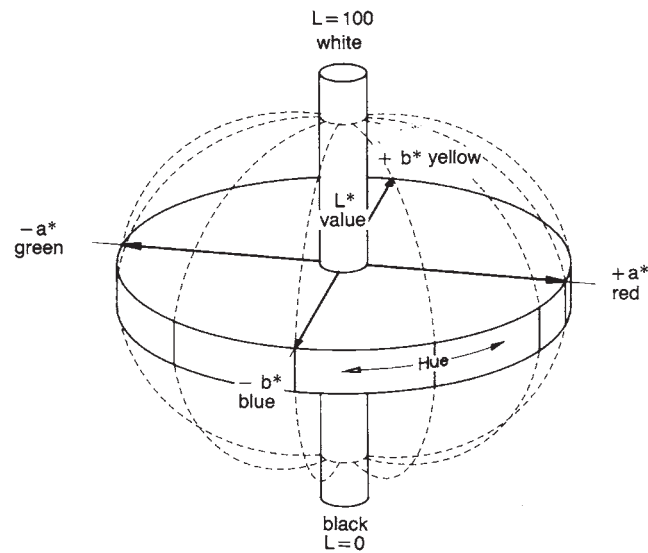


FIG. 2.16 – Espace CIELAB : représentation des 3 axes de référence de l'espace.

2.4 Température de couleur, rendu des couleurs et autres indices dérivés de la colorimétrie

2.4.1 température de couleur [1]

La température de couleur (proximale) d'un illuminant T_{cp} (ou plus simplement T_c) est la température du *corps noir* ayant la chromaticité **la plus proche** de celle de l'illuminant testé, dans un diagramme de chromaticité uniforme dont

les coordonnées sont (u,v) telles que :

$$u = u' \quad v = \frac{2}{3}v' \quad (2.24)$$

Dans ce diagramme de chromaticité, les coordonnées (u, v) du lieu des corps noirs peuvent être calculées selon les prescriptions de la publication 15.3 :2004 [1].

Quelques remarques :

- pour la température de couleur, l'observateur de référence CIE 1931 (angle de vision de 2 degrés) est d'application ;
- l'adjectif "proximale" n'est en général pas utilisé (il est sous-entendu) ;
- le concept de température de couleur est réservé aux illuminants émettant de la lumière blanche (la distance entre le lieu des corps noirs et le point représentatif de l'illuminant, dans le diagramme (u,v), ne peut dépasser 0.05).

La température de couleur (proximale) T_c d'une lampe est une indication de la couleur de la lumière émise par cette lampe. Il s'agit bien entendu de lumière blanche, mais on distingue :

- le type "blanc chaud" : $T_c \leq 3000K$,
- le type "blanc" : $3500K < T_c < 5000K$,
- le type "blanc froid" ou "lumière du jour" : $T_c \geq 5000K$.

Le diagramme de Kruithoff (fig. 2.17) donne une illustration des températures de couleur préférées en fonction de l'éclairement dans un local.

2.4.2 le rendu des couleurs

Le rendu des couleurs d'un illuminant est son effet sur la couleur des objets qu'il éclaire, par comparaison avec la couleur des mêmes objets éclairés par un illuminant de référence.

Cet illuminant de référence est, soit le corps noir ($T_c \leq 5000K$), soit l'illuminant de type D ($T_c > 5000K$) ayant la même température de couleur T_c que l'illuminant testé.

La C.I.E. a défini 8 couleurs-tests normalisées permettant de tester le rendu des couleurs des sources lumineuses utilisées en éclairage. Chaque couleur-test est observée sous la lumière de l'illuminant testé et celle de l'illuminant de référence. Les écarts de couleur observés pour la couleur numéro i sont traduits dans un indice R_i qui vaut 100 lorsqu'aucune différence n'est observée, et qui s'en écarte ($R_i < 100$) d'autant plus que les écarts de couleur sont importants.

L'indice général de rendu des couleurs d'une lampe R_a est la moyenne arithmétique des huit indices R_i . On peut trouver dans les recommandations officielles des valeurs minimales d'indice R_a à respecter dans les lieux de travail en fonction des tâches visuelles à exécuter.

Exemple : voir le tableau 2.1, inspiré de [11].

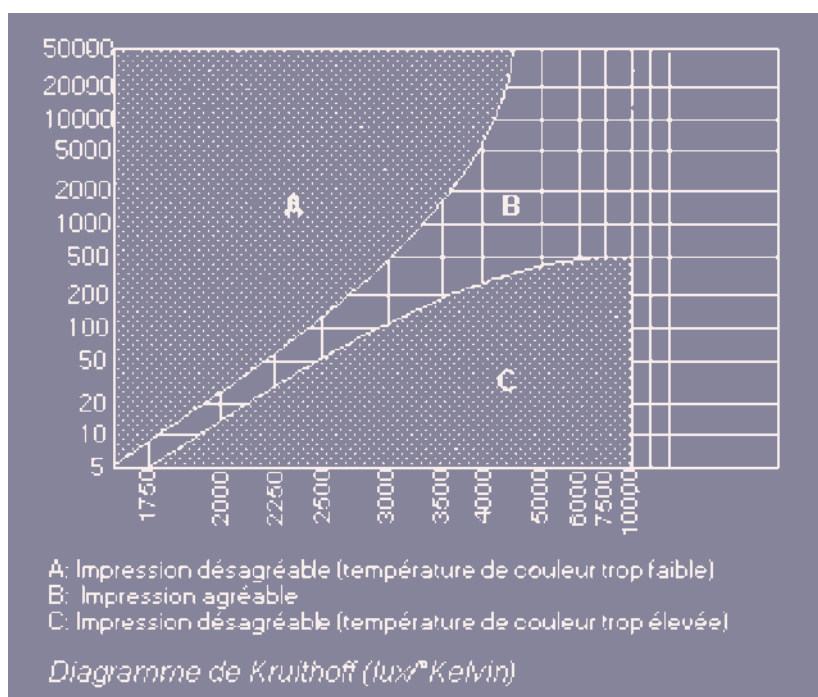


FIG. 2.17 – Diagramme de Kruithoff (éclairagements en lux / températures de couleur en Kelvins) : en pointillés (A et C), la zone des impressions désagréables

$R_a \geq 90$	inspection des couleurs (avec $T_c > 4000K$, voire $6000K$ dans certains cas) salles d'examens et d'opérations dans les hôpitaux salles d'art dans les écoles ($T_c > 5000K$) salons de coiffure, travail des pierres précieuses, ...
$R_a \geq 80$	bureaux, restaurants et hôtels, locaux scolaires bibliothèques, théâtres, hôpitaux (chambres et éclairage général) industrie textile (tâches courantes), industrie automobile (tâches courantes), fabrication du papier, industrie alimentaire de luxe, magasins de vente au détail, ...
$R_a \geq 60$	magasins et entrepôts, zones de manutention, usinage du métal, ...
$R_a \geq 40$	locaux de circulation, quais de gares, trains de laminage, ...
$R_a \geq 20$ (*)	souterrains, caves, parkings installations sidérurgiques sans opération manuelle, fourneaux, ...

TAB. 2.1 – Indice de rendu des couleurs minimal pour certaines tâches visuelles
 (*) : les couleurs de sécurité doivent être identifiables

Afin d'objectiver la procédure d'évaluation de l'indice de rendu des couleurs, l'observateur de référence CIE 1931 est utilisé pour la comparaison des échantillons [4].

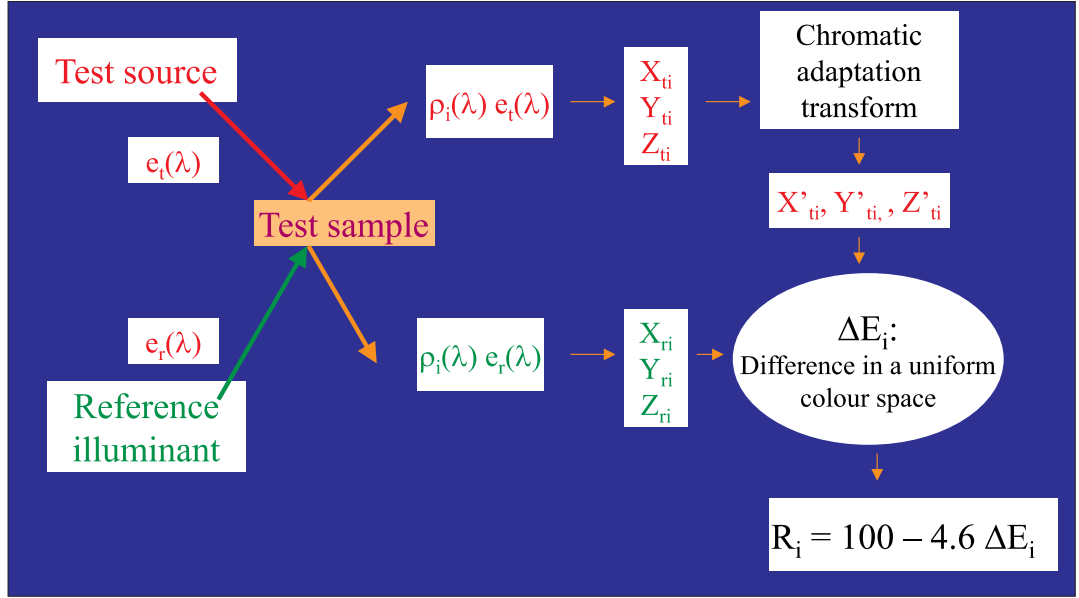


FIG. 2.18 – Algorithme du calcul de l'indice de rendu des couleurs

A titre indicatif, la figure 2.18 illustre le schéma de calcul utilisé pour déterminer les indices R_i pour une lampe de spectre $e_t(\lambda)$ éclairant la couleur-test de facteur de réflexion spectral $\rho_i(\lambda)$. L'illuminant de référence est représenté par son spectre $e_r(\lambda)$.

2.4.3 la blancheur

La publication CIE 15.3 [1] définit la notion de blancheur pour des couleurs de type surfaces vues sous l'illuminant D_{65} . Le lecteur intéressé est invité à consulter cette publication.

2.4.4 le métamérisme

Deux échantillons de couleur présentant les mêmes composantes trichromatiques, pour un même observateur de référence colorimétrique et un même illuminant de référence, sont appelés "métamères" si leurs spectres de luminance sont différents.

La publication CIE 15.3 [1] définit des indices de métamérisme.

2.5 Références pour les 2 chapitres

- [1] CIE Technical Report 15 :3 :2004, Colorimetry (3rd edition), Commission Internationale de l'Eclairage (Vienna), 2004.
- [2] CIE Technical Report 165 :2005, CIE 10 degree photopic photometric observer, Commission Internationale de l'Eclairage (Vienna), 2005.
- [3] CIE Technical Report 185 :2009, Reappraisal of colour matching and Grassmann's laws , Commission Internationale de l'Eclairage (Vienna), 2009.
- [4] CIE Technical Report 13.3 :1995, Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources, Commission Internationale de l'Eclairage (Vienna), 1995.
- [5] Joint CEI Publication 50(845)/CIE Publication No. 17.4, International Lighting Vocabulary, Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale (Genève), 1987.
- [6] ISO 11664-1 :2008(E)/CIE S 014-1/E :2006 : Joint ISO/CIE Standard : CIE Colorimetry - Part 1 : Standard Colorimetric Observers, Commission Internationale de l'Eclairage (Vienna), 2006.
- [7] ISO 11664-2 :2008(E)/CIE S 014-2/E :2006 : Joint ISO/CIE Standard : CIE Colorimetry - Part 2 : Standard Illuminants for Colorimetry, Commission Internationale de l'Eclairage (Vienna), 2006.
- [8] ISO 11664-4 :2008(E)/CIE S 014-4/E :2007 : Joint ISO/CIE Standard : CIE Colorimetry - Part 4 : 1976 $L^*a^*b^*$ Colour Space, Commission Internationale de l'Eclairage (Vienna), 2007.
- [9] ISO 11664-5 :2009(E)/CIE S 014-5/E :2009 : Joint ISO/CIE Standard : CIE Colorimetry - Part 5 : CIE 1976 $L^*u^*v^*$ Colour Space and u' , v' Uniform Chromaticity Scale Diagram, Commission Internationale de l'Eclairage (Vienna), 2009.
- [10] Mac Adam, D.L., Visual Sensitivities to color differences in daylight, Jnl Optical Society of America, 32(5), 1942, 247-274.
- [11] Norme belge NBN-EN 12464-1 : Eclairage des lieux de travail - Partie 1 : Lieux de travail intérieur, 2003.
- [12] CIE Technical Report 166 :2005, Cognitive colour, Commission Internationale de l'Eclairage (Vienna), 2005.
- [13] CIE Technical Report 160 :2004, A review of chromatic adaptation transforms, Commission Internationale de l'Eclairage (Vienna), 2004.