

## COLORIMÉTRIE : Caractéristiques de l'œil humain – spectre des couleurs

### I – Caractéristiques physiques et physiologiques de la vision

Avant d'examiner les caractéristiques et phénomènes de la vision, il est nécessaire de bien connaître la constitution de l'œil.

#### A) Constitution de l'œil

L'œil est un des organes les plus importants mis à notre disposition par la nature : c'est un des organes des sens qui nous permet le mieux de connaître le monde extérieur.

Il est remarquable de constater que l'œil est un des premiers organes à apparaître sur l'embryon : cette précocité rappelle, sans doute, le rôle de la lumière dans l'origine de la vie.

Le globe oculaire de l'homme a la forme d'une sphère de 23 mm de diamètre environ (figure 1).

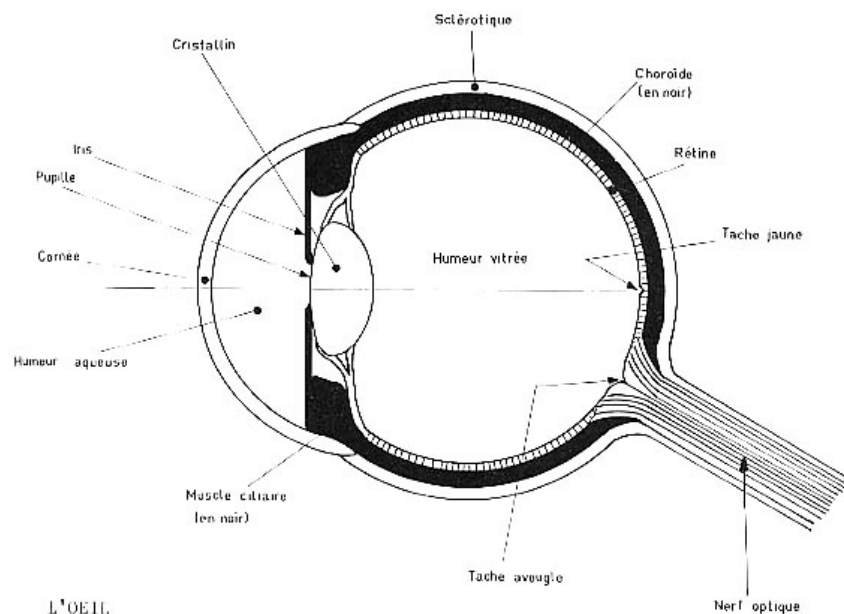


Figure 1

1) L'enveloppe de l'œil, constituée par l'enveloppe externe, la sclérotique, membrane protectrice très résistante de nature fibreuse et épaisse. Vers l'avant, elle devient plus bombée et transparente et forme la cornée.

Sur la face interne de la sclérotique se trouve la choroïde, pigmentée en noir et qui transforme l'œil en chambre noire. Vers l'avant, la choroïde prend une forme circulaire plane, l'iris, percé d'un trou appelé pupille. L'iris peut être diversement coloré (yeux bleus, verts, bruns...).

2) La cornée : calotte sphérique de 16 mm de diamètre et de 2 mm d'épaisseur d'environ.

3) L'humeur aqueuse : liquide transparent remplissant la cavité comprise entre la cornée et le cristallin. Son indice de réfraction est de 1,337. Elle est constituée d'eau et de sels minéraux.

4) Le cristallin : il forme une lentille convexe dont la convergence est commandée, selon la distance de l'objet regardé, par les contractions du muscle ciliaire situé à la périphérie. Cette souplesse de déformation diminue avec l'âge.

Le noyau central est plus réfringent que les couches externes. De l'extérieur jusqu'au noyau, l'indice croît de 1,337 (indice de l'humeur aqueuse), jusqu'à 1,437, ce qui a pour effet de corriger l'excès de convergence des bords.

5) L'humeur vitrée : elle remplit le globe oculaire entre le cristallin et la rétine. C'est un liquide transparent et gélatineux d'indice de réfraction égal à 1,35.

6) La rétine : le fond de l'œil est tapissé par une membrane très fragile, jaunâtre et transparente. C'est la partie sensible de l'œil. Cette sensibilité est due à deux sortes de cellules :

- Les bâtonnets : comme leur nom l'indique, ces cellules ont une forme allongée (figure 2). Ils sont colorés en rose par le pourpre rétinien qui les rend sensibles à la lumière. Ils ne sont pas sensibles à la couleur et travaillent essentiellement en vision crépusculaire. On compte environ 120 millions de bâtonnets dans la rétine humaine.
- Les cônes : ce sont les seuls à être sensibles à la couleur. Ils participent essentiellement à la vision diurne.

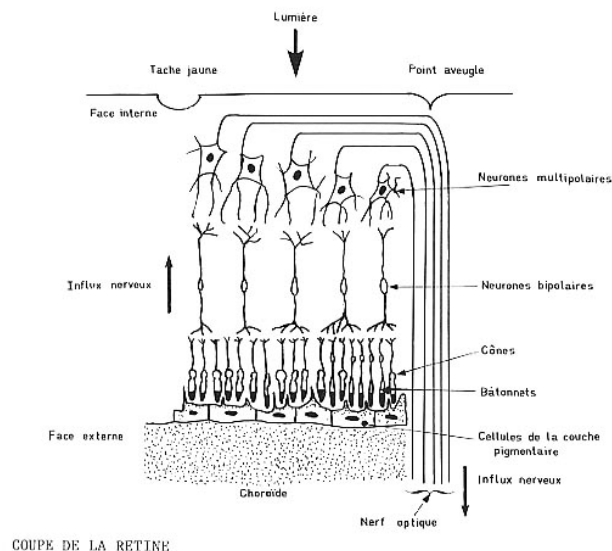


Figure 2

Les cônes ont des dimensions et des formes assez variables et sont au nombre de 7 millions seulement. Ils contiennent très peu de pourpre rétinien et sont beaucoup moins sensibles à la lumière que les bâtonnets, ils sont, par contre, sensibles aux différences de couleur.

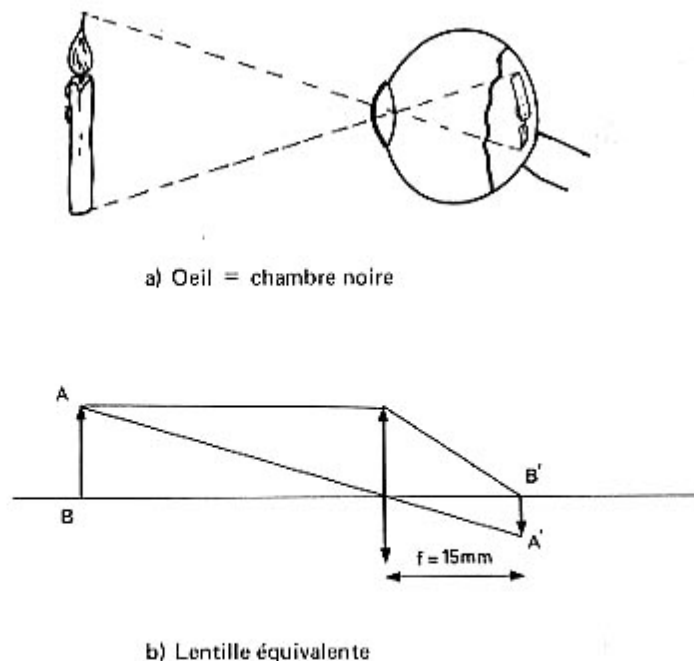
Ceci explique pourquoi à la lumière de la lune, on ne perçoit plus les couleurs, l'intensité de la lumière est trop faible pour exciter les cônes et seuls les bâtonnets sont excités.

Cônes et bâtonnets constituent donc les récepteurs de lumière de l'œil. Ceux-ci sont reliés par les neurones bipolaires et multipolaires, véritables cellules de transmission des influx nerveux au nerf optique. Ce dernier se détache du fond de l'œil à partir d'un point appelé le point aveugle (en effet, ce point n'est pas sensible aux excitations lumineuses).

## B) Fonctionnement de l'œil

### 1) formation des images

L'œil fonctionne comme un appareil photographique. Il comprend donc un objectif qui est le cristallin, un diaphragme qui est l'iris, une chambre noire, l'intérieur de l'œil, une plaque sensible, la rétine (figure 3).



## FONCTIONNEMENT DE L'OEIL

Figure 3

Il peut être assimilé à une lentille convergente dont la distance focale serait de :

$$f = 0,015 \text{ mètre (figure 3 b)}$$

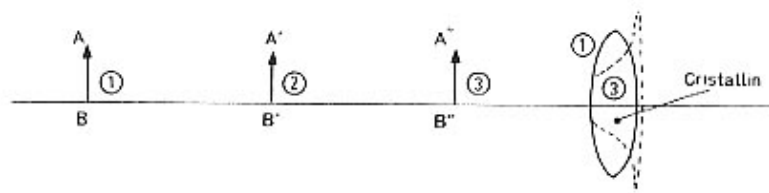
Sa convergence (inverse de la distance focale exprimée en mètre) est donc de :

$$C = \frac{1}{f} = \frac{1}{0,015} = 66 \text{ dioptries}$$

### 2) mise au point des images (accommodation)

Fonctionnement normal : un objet éloigné est vu net (par l'œil normal). Si l'on rapproche l'objet de plus en plus, on constate une variation de la courbure de la

face antérieure du cristallin qui entraîne une variation de la convergence des milieux transparents de l'œil : le cristallin se déforme (figure 4).



DEFORMATION DU CRISTALLIN

Figure 4

C'est grâce à cette déformation du cristallin que l'image reste nette sur la rétine : c'est l'accommodation.

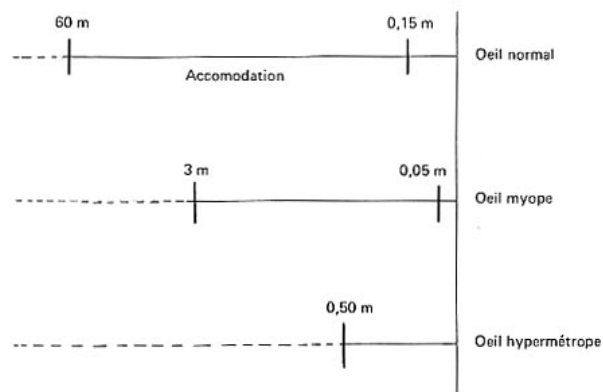
Le point le plus rapproché que l'œil peut voir nettement sans accommodation est le punctum remotum.

Le point le plus rapproché correspondant au maximum d'accommodation est le punctum proximum.

L'intervalle qui sépare le punctum remotum et le punctum proximum s'appelle l'intervalle d'accommodation.

La valeur maximum de cet intervalle est l'amplitude d'accommodation. En pratique, on ne peut soutenir longtemps, sans fatigue, qu'environ les 2/3 de l'amplitude d'accommodation.

Dans un œil normal, le punctum remotum est à 60 m environ (les objets plus éloignés sont vus sans accommodation) et le punctum proximum est à 15 cm environ, les objets plus rapprochés ne peuvent pas être vus nets (figure 5).



DISTANCES NORMALEMENT VISIBLES DANS CHAQUE CAS PARTICULIER

Figure 5

Défauts d'accommodation : deux cas peuvent se présenter :

- La myopie : l'intervalle de distance pour lequel s'effectue l'accommodation est beaucoup plus faible et variable selon le degré de myopie. La correction de ce défaut se fait par l'usage de lentilles divergentes.
- L'hypermétropie : la distance minimale de vision nette est supérieure à la normale. La correction de ce défaut s'effectue au moyen de lentilles convergentes.

### 3) Sensibilité de l'œil et action du diaphragme

L'épiderme, chez l'homme, possède une sensibilité assez développée, un aveugle par exemple, en approchant la main d'un mur sent l'obstacle par la chaleur réfléchi. Mais la sensibilité de la rétine de l'œil est environ cent milliards de fois plus grande.

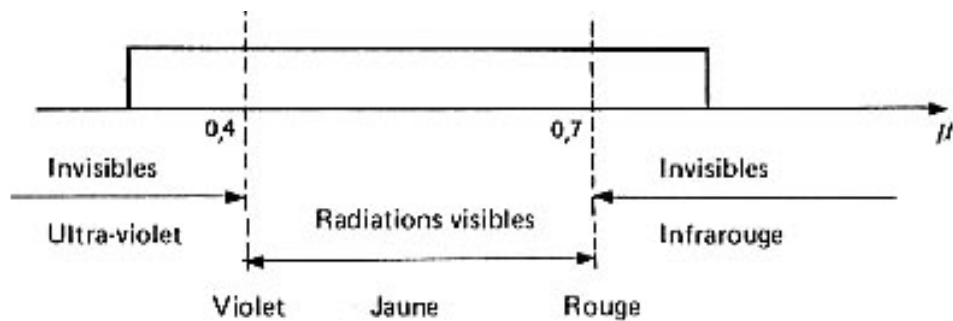
Si l'intensité lumineuse augmente, un phénomène réflexe automatique, rétrécit le diamètre de la pupille, empêchant ainsi l'éblouissement.

### 4) Facteurs d'excitation de la rétine

Les facteurs commandant l'excitation de la rétine par la lumière, sont au nombre de trois.

#### a) La longueur d'onde

Les radiations lumineuses, c'est-à-dire celles qui sont perçues par l'œil sont comprises entre 0,4 et 0,7 microns de longueur d'onde. L'œil humain distingue ainsi les radiations comprises entre le violet ( $0,4\mu$ ) et le rouge ( $0,7\mu$ ) (figure 6)



**SPECTRE VISIBLE ET INVISIBLE**

**Figure 6**

L'œil humain ne peut pas distinguer les radiations au-delà de ces limites.

Il ne peut pas voir l'ultra violet et l'infra rouge (à remarquer par exemple que l'œil de l'abeille, lui, est sensible à l'ultra violet).

b) L'intensité

Pour qu'une lumière soit perçue, il faut que son intensité lumineuse soit supérieure à un certain seuil limite.

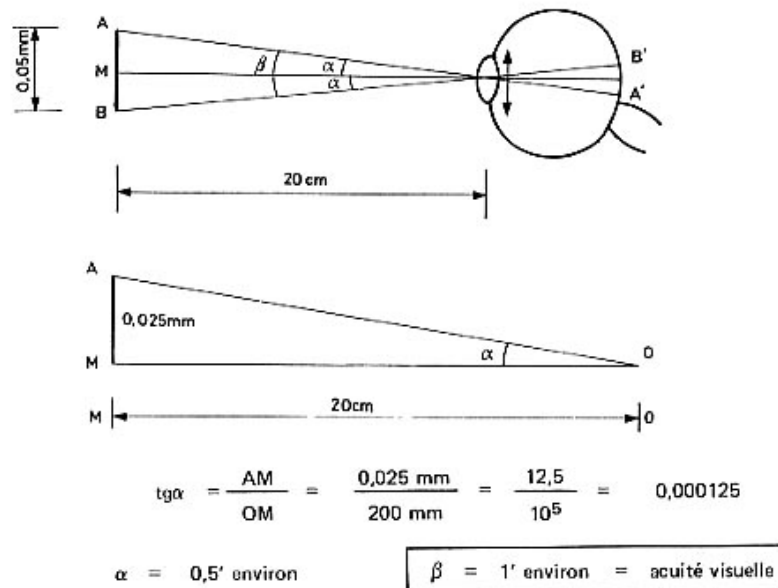
c) La durée

Pour qu'un éclat lumineux soit perçu, il faut que sa durée soit au minimum de  $1 \mu\text{s}$  (c'est-à-dire un millionième de seconde :  $1 \mu\text{s} = 10^{-6}$  seconde).

5) Propriétés de la vision

a) Acuité visuelle

La tache jaune, approximativement dans l'axe de l'œil, est le point sensible de la rétine. Lorsque nous fixons un objet, nous dirigeons instinctivement nos yeux de façon que l'image se forme sur la tache jaune. Dans ces conditions, un œil normale est capable de distinguer à une distance de 20 cm, deux points distants de 0,05 mm. Ceci correspond à un angle de 1 minute (figure 7).



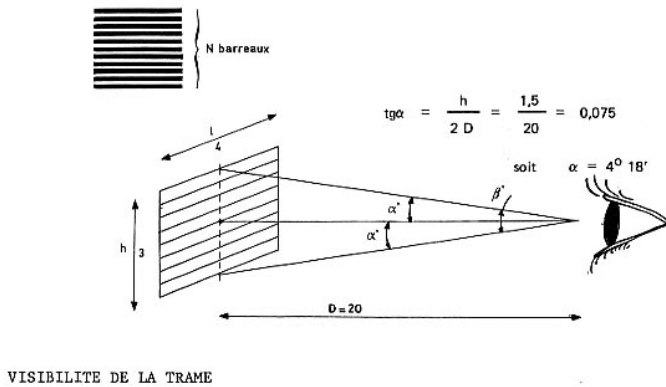
ACUITE VISUELLE

Figure 7

Les images de ces deux points sur la rétine sont séparées alors par un intervalle de  $4 \mu$  qui est de l'ordre de grandeur du diamètre d'un cône. Ainsi donc, pour que deux points soient vus distinctement, il faut que leurs images sur la rétine soient séparées au moins par un cône non excité.

L'angle  $\beta$  de la (figure 7) mesure donc l'acuité visuelle (on dit aussi pouvoir séparateur) de l'œil au niveau de la tache jaune.

Si l'on s'éloigne de la tache jaune, l'acuité visuelle diminue et devient environ 150 fois plus faible.



VISIBILITE DE LA TRAME

Figure 8

De cette propriété de l'œil, il découle immédiatement que le nombre de lignes qui composent une image de télévision devra être égal ou supérieur à un certain minimum. Pour que la trame de la (figure 8) ne soit pas visible, il faudra que le nombre de lignes soit supérieur à un certain nombre. Si l'on nomme  $\beta'$ , l'angle sous lequel un observateur voit son écran de

téléviseur de hauteur égale à trois et placé à une distance  $D = 20$  de celui-ci, on a :

$$\alpha' = \frac{\beta'}{2} \quad \text{et} \quad \tan \alpha' = \frac{\frac{h}{2}}{D} = \frac{1,5}{20} = 0,075$$

Soit  $\alpha' = 4^\circ 18'$  soit 258 minutes.

L'angle  $\beta'$ , est donc de 516 minutes soit 516 fois le pouvoir séparateur de l'œil.

Le nombre de lignes minimum visibles devra donc être de 516 environ et comme le total de lignes est environ 10 % supérieur, on devra avoir :  $L \cong 516 + 51 = 567$  lignes environ.

C'est pourquoi on a choisi 625 lignes pour le standard européen.

#### b) Persistence rétinienne

Sous l'action de la lumière, des influx nerveux apparaissent au niveau de la rétine. Ces influx persistent sur celle-ci pendant 1/50 à 1/30ème de seconde après la fin de l'excitation lumineuse.

Ceci est en parfait accord avec l'hypothèse d'une excitation chimique qui nécessite une certaine durée.

La persistance rétinienne permet en particulier la cinématographie et la télévision. En effet, une succession rapide d'images fixes donne l'illusion du mouvement.

Ainsi par exemple, le cinéma d'amateur utilise une succession de 16 images par seconde (ce qui correspond à un temps de 1/32ème de seconde de projection par image) tandis que le cinéma professionnel utilise une succession de 24 images par seconde (temps de projection de chaque image 1/48<sup>ème</sup> de seconde).

#### c) Appréciation des contrastes

La rétine est sensible aux différences d'intensité lumineuse.

On appelle contraste, la différence d'impression lumineuse produite sur l'œil par deux éléments de surface différemment illuminés (on dit de luminance différente).

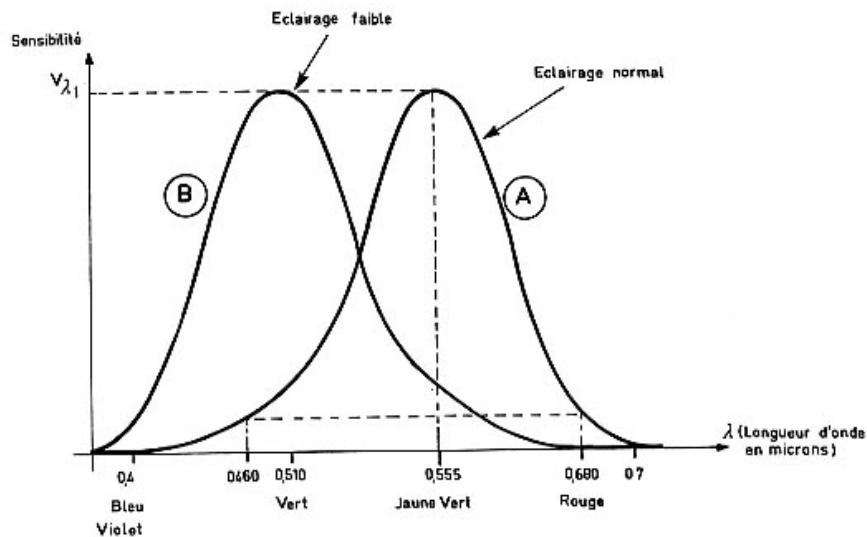
On a déterminé, expérimentalement, que pour percevoir cette différence, il fallait que les deux luminances diffèrent d'au moins 1 %.

#### d) Appréciation des couleurs

C'est la présence des cônes dans la rétine qui permet la perception des différentes couleurs.

Ces couleurs ne sont perçues qu'à partir d'une certaine intensité du faisceau lumineux appelée seuil chromatique.

D'autre part, la sensibilité de l'œil en fonction de la longueur d'onde de la radiation perçue, n'est pas constante tout au long du spectre visible, qui s'étend, nous l'avons vu, d'environ 0,4 à 0,7 microns (figure 6).



COURBE DE SENSIBILITE CHROMATIQUE DE L'OEIL

Figure 9

La figure 9A montre que cette réponse est en forme de cloche avec un maximum de sensibilité pour la lumière jaune vert et deux minima pour les lumières rouge et bleue.

Cette courbe est valable pour un éclairage moyen normal. Lorsque l'intensité de l'éclairage diminue, on s'aperçoit que la réponse de l'œil se décale vers la gauche, c'est dire que le maximum de sensibilité correspond alors à la couleur verte (figure 9 B).

Lorsque l'éclairage diminue encore (vision nocturne), toute notion de couleur disparaît : on ne perçoit plus alors le monde qu'en noir et gris.

Signalons enfin que les daltoniens sont aveuglent à toutes les couleurs puisque leur rétine ne possède pratiquement pas de cônes. Ils ne voient les images qu'en noir, gris et blanc uniquement. Ces cas extrêmes sont assez rares.

## II – Définition de la couleur

La définition de la couleur n'est pas la même pour un physiologiste, un physicien ou un peintre.

Pour un physiologiste qui étudie les fonctions organiques de la vision, la couleur est une sensation colorée.

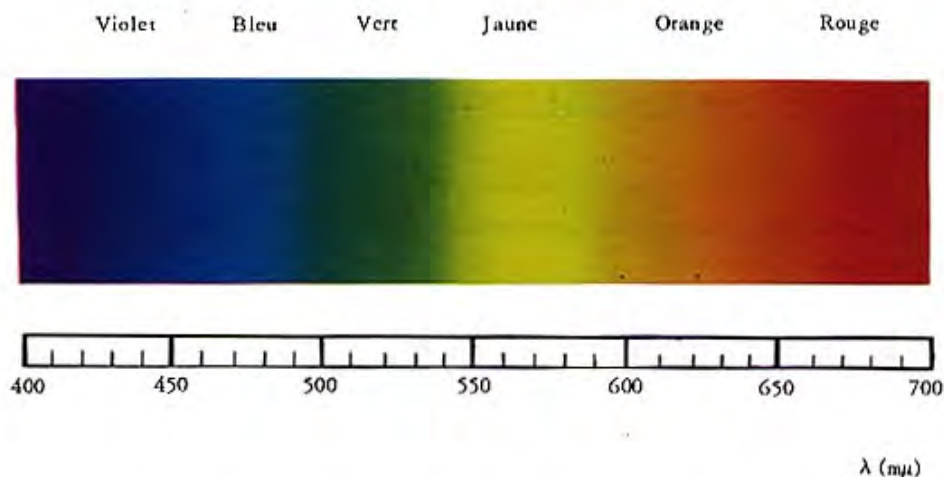
Pour un physicien, la couleur n'est que le résultat de la décomposition de la lumière blanche. Pour lui, la couleur est donc synonyme de lumière colorée. Cette lumière colorée est définie par sa longueur d'onde exprimée en microns ( $\mu$ ) ou Angström symbole Å ( $10^{-10}$  m).

La longueur d'onde, la fréquence et la période d'une onde électromagnétique sont liées par la relation :

$\lambda = C \cdot T = \frac{C}{F}$  où C est la vitesse de la lumière dans le vide ( $C \cong 300\ 000$  Km/s). T la période de la vibration lumineuse et F sa fréquence.

Pour un peintre, un teinturier, un imprimeur, la couleur est la matière colorée utilisée pour produire la colorisation.

## III – Dispersion de la lumière par un prisme



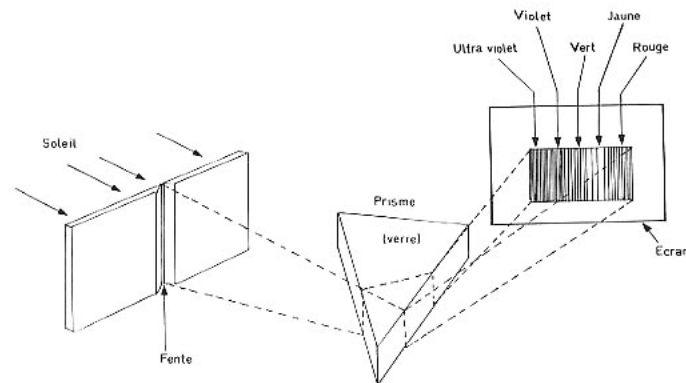
SPECTRE DE COULEURS DONNE PAR UN PRISME

1  $\mu$  = 1000 nm

Figure 10

Prenons un prisme et projetons sur celui-ci de la lumière blanche, provenant par exemple d'une fente éclairée par le soleil. Un magnifique spectre coloré

(figure 10) apparaît alors sur l'écran (feuille de papier blanc) que nous aurons pris soin de disposer derrière le prisme (figure 11).



DECOMPOSITION DE LA LUMIERE BLANCHE PAR UN PRISME

Figure 11

Les radiations qui traversent la substance transparente, en l'occurrence notre prisme (en verre par exemple) prennent des vitesses différentes selon leur longueur d'onde. Les vitesses sont de plus en plus faibles lorsque la longueur d'onde de la radiation diminue.

Le prisme est caractérisé par son indice de réfraction  $n$  qui croît du rouge au violet. On appelle indice de réfraction  $n$ , le rapport des vitesses de la lumière dans le vide et dans le milieu considéré :

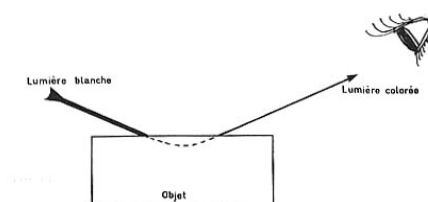
$$n = \frac{C}{V} = \frac{\text{Vitesse dans le vide}}{\text{Vitesse dans le milieu considéré}}$$

#### IV – Couleur des objets

La couleur, telle qu'elle est perçue par le cerveau est une sensation physiologique impérativement liée à trois facteurs :

##### 1) Nature de l'objet

Si nous regardons en lumière blanche différents papiers colorés et que nous disons que l'un est rouge, l'autre jaune et le troisième bleu, cela veut dire tout simplement que le premier absorbe toutes les radiations sauf le rouge, que le second de même renvoie uniquement les radiations jaunes après avoir absorbé toutes les autres et de même pour le papier bleu (figure 12).



COULEUR D'UN OBJET

Figure 12

Une feuille de papier blanc, renvoie en principe toutes les radiations. Un corps de couleur noir absorbe au contraire toutes les radiations.

## 2) Nature de la lumière qui éclaire cet objet et permet à l'œil d'en recevoir le message

La couleur d'un objet est liée à la lumière qui l'éclaire. En effet, prenons par exemple un objet qui paraît de couleur jaune à la lumière du jour. Eclairé par une lumière rouge, ce corps paraîtra rouge clair. Eclairé par une lumière verte, il paraîtra brun.

## 3) Propriétés de l'œil qui perçoit le message et le transmet au cerveau

Jusqu'à présent, nous avons considéré que l'œil de l'observateur était normal.

Le sujet normal est considéré comme trichromatique, c'est-à-dire que son œil est sensible à trois couleurs fondamentales (rouge, vert et bleu), ce qui lui suffit pour avoir la sensation de toutes les couleurs.

Il existe par ordre de gravité croissante, les anomalies suivantes :

- Le trichromatisme anormal : le sujet conserve la vision de trois couleurs fondamentales, mais la courbe spectrale de son œil s'écarte beaucoup de la moyenne. C'est souvent vers les couleurs rouge et rouge orangé que se manifestent les déficiences.
- Le dichromatisme : le sujet ne voit plus que deux des couleurs fondamentales. Il présente une cécité totale soit au vert, soit au rouge.
- L'achromatisme : le sujet ne perçoit le monde qu'en noir, gris et blanc. Ce cas est extrêmement rare.

Ces anomalies de la vision ont été étudiées par le célèbre chimiste Dalton, d'où le nom de daltoniens donné aux malades les plus marqués.

## V – Vision des couleurs

### 1) Contraste des couleurs

Nous savons que lorsque notre œil perçoit une couleur, il l'enregistre et en transmet un message codé par les nerfs optiques. Ainsi par exemple, si la vision est prolongée, il apparaît une sorte de fatigue des éléments photosensibles de la rétine.

Notre œil ne voit donc pas de la même manière, une surface colorée au début et au bout d'un certain temps.

Pour appuyer cette affirmation, réalisons l'expérience suivante : la (figure 13) représente un rond de couleur rouge vif sur un fond blanc.

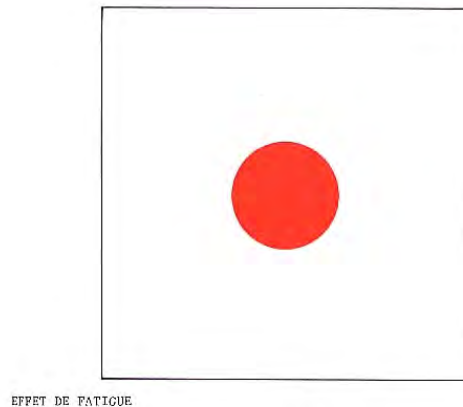


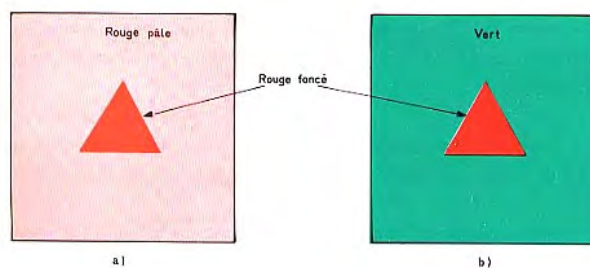
Figure 13

Fixons le attentivement pendant environ 30 secondes, puis, brusquement, détournons le regard pour fixer une feuille de papier blanc. Un rond de couleur bleu vert (couleur complémentaire apparaît après quelques secondes.

Ce phénomène est celui des contrastes successifs. Il est du au fait que pendant le temps de la vision du cercle rouge, les éléments sensibles au rouge de la rétine se sont fatigués, pendant que les éléments sensibles au vert se sont reposés. La couleur verte se trouve alors exaltée. Ce phénomène fondamental de l'adaptation visuelle est très important.

Voyons maintenant un autre phénomène voisin. La juxtaposition de deux couleurs produit des effets différents, selon que les teintes sont voisines ou au contraire opposées.

Plaçons un objet rouge foncé sur un fond de grande surface de couleur rouge pâle par exemple (figure 14 a).



EFFET DE CONTRASTE

Figure 14

Les couleurs sont voisines : il va en résulter un effet très doux.

La couleur rouge foncé va paraître moins sombre que si le corps était placé sur un fond blanc.

Par contre, si nous plaçons le même objet rouge foncé sur un fond vert, le contraste va être violent, le fond vert semblant devenir plus vert et le rouge foncé plus rouge encore (figure 14 b).

C'est ce que l'on appelle le contraste simultané. La vision simultanée de deux surfaces différentes colorées qui se touchent, modifie réciproquement les sensations colorées : la plus claire apparaît plus claire qu'elle ne l'est réellement et la plus foncée paraît se foncer davantage.

## 2) Teinte – Pureté – Intensité

L'œil rattache à une couleur quelconque les trois facteurs suivants :

- La teinte : c'est la caractéristique qui se traduit dans le langage courant par des adjectifs tels que : rouge, vert, jaune, pourpre, etc. ou par des combinaisons telles que : bleu vert, rouge orange, vert jaune, etc.

Elle est déterminée en colorimétrie par une longueur d'onde dominante de la couleur considérée.

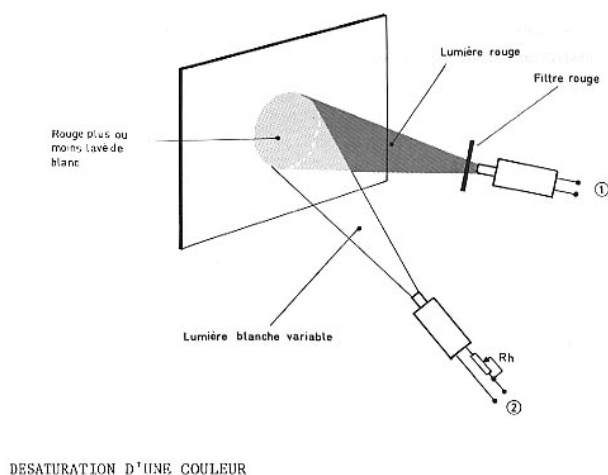
Par exemple, la couleur jaune vert a une longueur d'onde de 0,555 microns.

La teinte d'une couleur indique celle des couleurs pures dont la couleur se rapproche le plus. Par exemple, une certaine couleur de teinte bleu vert se rapproche de la couleur bleu vert pure de l'arc en ciel (ou celle du spectre coloré donné par le prisme).

- La pureté : indique comment la couleur considérée se rapproche plus ou moins de la couleur pure correspondante. Dans le langage courant, la pureté se traduit par les adjectifs pur (ou saturé) ou lavé de blanc (ou lavé tout simplement).

La pureté est également appelé saturation. Prenons par exemple une couleur rouge vif et ajoutons-y par mélange, de plus en plus de blanc.

Notre magnifique rouge vif va devenir de plus en plus rose, au fur et à mesure que la proportion de blanc va augmenter.



La (figure 15) représente une expérience permettant de le vérifier.

Le projecteur 1 donne la lumière désirée (par exemple rouge vif), le projecteur 2 donne une lumière blanche variable en intensité par l'intermédiaire du rhéostat Rh.

On obtient ainsi toute une gamme de rouges plus ou moins lavés de blanc.

On suppose que le fait de faire varier le rhéostat ne modifie pas la qualité de la lumière blanche, c'est-à-dire on suppose que la

lumière reste toujours blanche, mais que seul son intensité varie (ce n'est pas tout à fait exact, car en réalité, la lumière blanche devient plus rouge quand son intensité diminue).

■ L'intensité : se traduit dans le langage courant pour une source, par des adjectifs intense (ou faible) et par des substantifs luminosité ou brillance.

Pour un objet, on traduira par l'adjectif clair ou foncé et par le substantif clarté.

La caractéristique d'intensité peut être mesurée avec une cellule photoélectrique par exemple. C'est la luminance ou le facteur de luminance.

Si vous lisez votre journal éclairé par une lampe de 25 watts ou par une lampe de 100 watts, l'effet est totalement différent. De même, si vous faites varier à l'aide d'un rhéostat, l'intensité lumineuse de votre projecteur rouge (figure 15) (le projecteur de lumière blanche étant éteint maintenant), vous pouvez obtenir toute une gamme d'intensité différentes quoique de même couleur fondamentale. Le rouge passera par exemple du foncé (lorsque l'intensité de la lumière sera faible) au rouge clair (lorsque la lumière sera intense).

### 3) Bases de la colorimétrie

Afin de pouvoir reproduire une couleur avec une précision suffisante comme l'exigeaient de nombreuses techniques (photographie, cinématographie, télévision en couleurs ...), on a cherché à la caractériser plus rigoureusement par des données numériques.

Nous avons vu précédemment que la vision colorée pouvait différer d'un individu à l'autre. Il n'est donc pas question de comparer entre elles les sensations de deux observateurs. Mais par contre, nous pouvons demander à chacun d'eux de régler séparément la composition et l'intensité d'une (ou plusieurs) lumière (s), de façon à équilibrer pour que deux plages voisines, vues simultanément, paraissent identiques.

Comme nous allons le voir très bientôt, il est possible de représenter presque n'importe quelle couleur de la nature, en mélangeant dans des proportions bien déterminées trois couleurs seulement, judicieusement choisies parmi toutes les couleurs du spectre.

Comme nous venons de le voir, l'œil, dans une couleur, distingue trois qualités : la teinte, la pureté et la brillance(ou intensité).

Un mélange de trois couleurs bien déterminées permet de reproduire les trois qualités d'une couleur quelconque : on dit que l'on fait alors de la synthèse trichrome.

La représentation trichromatique des couleurs repose sur trois principes fondamentaux que nous allons voir maintenant et qui sont encore connus sous le nom de lois de Grassmann.

## VI – Lois de Grassmann

### 1<sup>ère</sup> loi

On peut reproduire n'importe quelle couleur (ou presque) par un mélange additif de trois couleurs (dites primaires).

Les quantités de chacune des trois primaires définissent la couleur reproduite.

2<sup>ème</sup> loi : Principe d'additivité :

Soit une couleur C **1** obtenue par un mélange additif de trois couleurs primaires en quantités m, n et p.

Soit une autre couleur C **2** obtenue par un mélange additif des trois couleurs primaires en quantités m', n' et p'.

On mélange maintenant les couleurs C **1** et C **2** pour obtenir une couleur C **3**.

La couleur C **3** peut être reproduite directement par un mélange additif des trois couleurs primaires en quantités :

$$\begin{aligned}m'' &= m + m' \\n'' &= n + n' \\p'' &= p + p'\end{aligned}$$

3<sup>ème</sup> loi : Principe de multiplicité :

Soit une couleur C **1** obtenue par un mélange additif de trois couleurs primaires en quantités m, n et p.

Soit une autre couleur C **2** définie par km, kn et kp (k est un nombre positif pouvant être plus grand (>) ou plus petit (<) que 1.

La couleur C **2** possède la même teinte et la même pureté que la couleur C **1**, mais elle a une brillance différente.

■ Si  $k > 1$  la couleur C **2** est plus brillante que C **1**

■ Si  $k < 1$  la couleur C **2** est moins brillante que C **1**

Il en résulte de ces trois lois que la qualité d'une couleur (teinte et pureté) ne dépend que des proportions relatives des primaires :

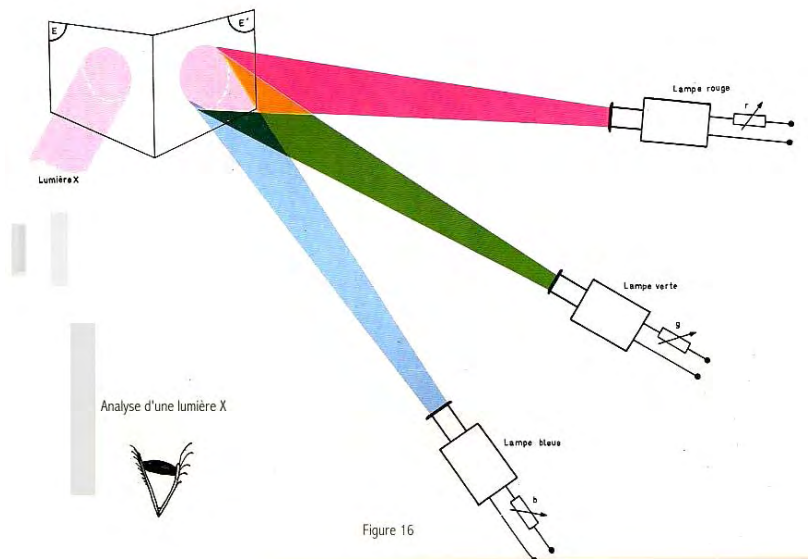
La couleur dépend de :  $\frac{m}{m + n + p}$   $\frac{n}{m + n + p}$   $\frac{p}{m + n + p}$

L'intensité de la couleur (brillance), dépend de chacune des quantités des primaires. L'intensité de la couleur dépend de km, kn et kp. Une couleur quelconque se trouve ainsi entièrement caractérisée par trois nombres.

## VII – Reproduction d'une couleur quelconque à l'aide de la synthèse trichromatique additive

L'expérience réalisant une synthèse additive des trois couleurs rouge, vert et bleu est représentée (figure 16). Les trois couleurs ont été choisies judicieusement. Elles correspondent aux longueurs d'ondes suivantes :

Lumière rouge	$\lambda$	R = 0,630 microns
Lumière verte	$\lambda$	G = 0,528 microns
Lumière bleue	$\lambda$	B = 0,457 microns



On projette sur l'écran E la lumière colorée X que l'on désire reproduire.

Sur l'écran E', on superpose trois faisceaux R, G et B, dont on peut régler l'intensité lumineuse, à l'aide de rhéostats en série avec les lampes. On règle ces trois faisceaux de façon à obtenir la même impression lumineuse que sur l'écran E.

Si l'on a pris soin de munir les trois rhéostats d'une échelle graduée divisée en 100 parties égales par exemple, on pourra admettre en première approximation que l'intensité lumineuse est donnée par le nombre indiqué par la position du curseur du rhéostat (0 indiquant que la lampe est éteinte, 100 que la lampe est complètement illuminée, rhéostat hors circuit).

Si on obtient l'équilibre avec le curseur du rhéostat rouge réglé sur 60 par exemple, on pourra dire qu'il y a 60% de lumière rouge émise.

Si le curseur du rhéostat bleu est sur 30, on dira qu'il y a 30% de la lumière bleue et 20% de lumière verte, si au même moment le curseur du rhéostat vert est sur la graduation 20. On aurait dans ce cas :

$$X = 0,6 r + 0,3 b + 0,2 g$$

Bien entendu, ces chiffres sont pour le moment arbitraires (graduation des rhéostats).

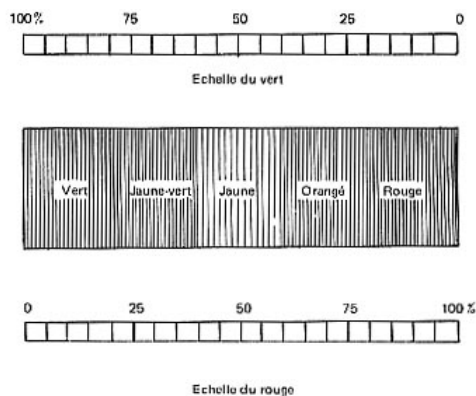
### A) Première série d'expériences

Voyons ce que nous pouvons obtenir déjà comme reproductions colorées, en utilisant par exemple deux projecteurs seulement.

Eteignons donc pour commencer le projecteur bleu (rhéostat sur 0) et examinons les couleurs que nous pouvons obtenir avec les projecteurs vert et rouge seuls.

1) Si le projecteur rouge est seul allumé, nous avons évidemment la couleur rouge seule ( $r = 100\%$ ,  $g = 0$ ).

2) Si le projecteur vert est seul allumé, nous avons la couleur verte seule ( $r = 0$ ,  $g = 100\%$ ).



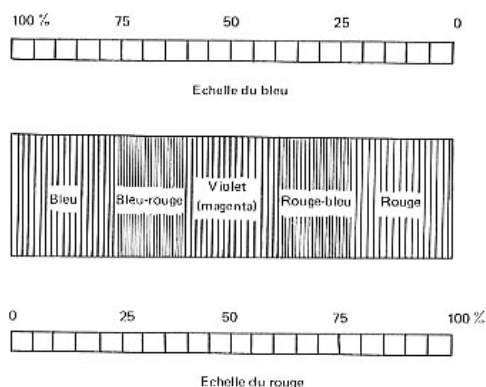
3) Si ces deux projecteurs rouge et vert sont allumés et si les deux curseurs sont simultanément réglés sur 50, nous obtenons une lumière jaune (l'expérience le prouve,  $r = 50\%$ ,  $g = 50\%$ ).

4) Si les curseurs sont réglés comme sur la (figure 17), nous obtenons les différentes couleurs s'étendant du vert au rouge, en passant par le vert jaune, le jaune et l'orange.

ECHELLE DES COULEURS OBTENUES PAR MELANGE DES LUMIERES ROUGE ET VERTE

Figure 17

### B) deuxième série d'expériences

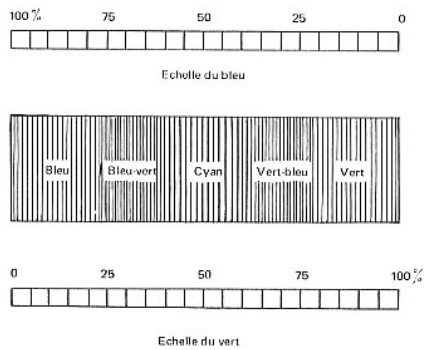


Nous utiliserons maintenant, seulement les projecteurs bleu et rouge (le vert sera constamment éteint). Nous obtiendrons une nouvelle échelle des teintes (figure 18), s'échelonnant du bleu au rouge, en passant par les pourpres.

ECHELLE DES COULEURS OBTENUES PAR LE MELANGE DES LUMIERES ROUGE ET BLEUE

Figure 18

### C) troisième série d'expériences



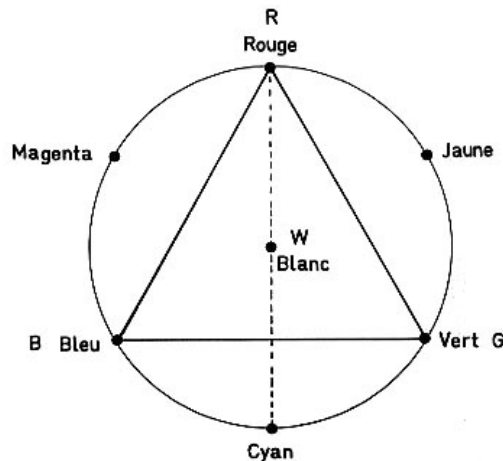
ECHELLE DES COULEURS OBTENUES PAR LE MELANGE DES LUMIERES VERTE ET BLEUE

Figure 19

Si nous éteignons maintenant le projecteur rouge en utilisant uniquement les projecteurs bleu et vert, nous obtiendrons une autre gamme de teintes, comprises entre le bleu et le vert, en passant par les bleu-vert (figure 19).

### D) Cercle de couleurs

Portons sur un cercle les trois primaires : rouge vert et bleu aux sommets d'un triangle équilatéral. Nous voyons que par combinaison de deux d'entre elles, nous obtenons les teintes intermédiaires : jaune, cyan et magenta (figure 20)



SYNTHESE ADDITIVE

Figure 20

Exemple : Rouge + vert = jaune  
 Bleu + vert = cyan (ou bleu vert)  
 Bleu + rouge = magenta (ou pourpre)

Si nous allumons maintenant les trois projecteurs simultanément, les trois curseurs réglés sur 100 par exemple, la superposition des trois faisceaux colorés va nous donner du blanc.

Si nous déplaçons simultanément et de la même façon les trois curseurs, nous constatons que nous avons toujours de la lumière blanche, mais de moins en moins lumineuse.

Il est évident que la lumière blanche, dans ce cas, étant la somme de trois lumières de couleur primaire, sera d'autant plus intense (lumineuse, brillante) que les trois lumières qui la composent sont elles mêmes plus intenses.

On a pris l'habitude de placer la couleur blanche au centre du cercle, c'est-à-dire au centre du triangle équilatéral RGB : le blanc est repéré par W (White = blanc en anglais).

Ce cercle permet de se rappeler facilement les résultats des mélanges aditifs. En effet, lorsque l'on a placé les trois couleurs primaires rouge, verte et bleue, les couleurs complémentaires seront obtenues par mélange additif des couleurs primaires prises deux à deux.

Ensuite, en mélangeant une couleur primaire (par exemple, rouge), avec sa couleur complémentaire (par exemple cyan), on obtiendra du blanc, il suffit de joindre par la pensée les points rouge et cyan du cercle. Cette droite passant par le centre, le milieu tombe bien au centre du cercle qui est le blanc.

De même : Vert + magenta = blanc  
Bleu + jaune = blanc

On a démontré, en effet, que la lumière jaune par exemple pouvait être réalisée par un mélange additif du rouge et du vert. On revient donc bien à une synthèse additive trichrome et si les quantités de lumière sont égales, on retrouve bien du blanc.

Bleu + jaune = bleu + (rouge + vert) = blanc

On peut, de même, retrouver facilement les résultats de mélanges de couleurs complémentaires prises deux à deux, en se rappelant le cercle des couleurs, ainsi par exemple :

Cyan + jaune = vert  
Cyan + magenta = bleu  
Jaune + magenta = rouge

On dit alors que les couleurs rouge, bleue et verte sont des couleurs primaires.

On appelle couleurs complémentaires, les couleurs cyan, magenta et jaune. Ainsi, la couleur complémentaire de la couleur rouge est le cyan.

#### Couleurs primaires-

Rouge  
Bleu  
Vert

#### Couleurs complémentaires

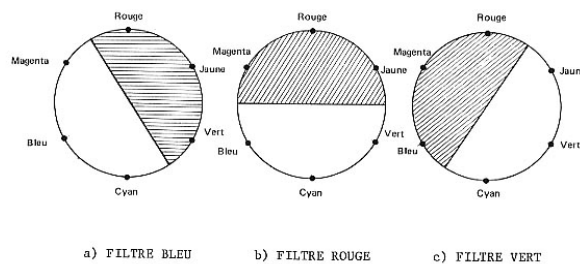
cyan ou bleu vert  
jaune  
magenta ou pourpre

## VIII – Synthèse soustractive

Nous avons vu jusqu'à maintenant les résultats que l'on pouvait obtenir en superposant (en additionnant) des lumières. Voyons maintenant ce que nous allons obtenir en soustrayant plusieurs couleurs de la lumière blanche.

Supposons trois filtres : rouge, vert et bleu.

- Le filtre bleu soustrait à partir de la lumière blanche, les lumières rouge, jaune et verte (figure 21 a).
- Le filtre rouge soustrait à partir de la lumière blanche, les lumières verte, cyan et bleue (figure 21 b).
- Le filtre vert soustrait à partir de la lumière blanche, les lumières rouge, bleue et magenta (figure 21 c).



LEGENDE { Supprime   
 { Laisse passer   
 Figure 21

Si nous superposons maintenant un filtre bleu et un filtre rouge et que nous regardons au travers de cet ensemble, la lumière blanche, que verrons-nous ?

Il suffit pour cela de superposer par la pensée, les surfaces des filtres bleu et rouge de la (figure 21). On voit que seule la lumière magenta passera.

- Lumière blanche + filtre rouge + filtre bleu : reste lumière magenta.
- Lumière blanche + filtre rouge + filtre vert : reste lumière jaune.
- Lumière blanche + filtre bleu + filtre vert : reste lumière cyan.

En superposant maintenant les trois filtres :

Lumière blanche + filtre bleu + filtre vert + filtre rouge : reste zéro.

Dans la synthèse soustractive, la superposition des trois filtres supprime toutes les radiations : plus rien ne passe.

Donc : Rouge + vert + bleu = noir  
 De même : Cyan + magenta + jaune = noir

Le mélange des encres colorées, des peintures, des vernis, ne conduit pas à des résultats aussi nets que ceux obtenus à l'aide de filtres.

Ainsi, le mélange de couleurs rouge, bleue et verte, à partir d'une boîte d'aquarelles, ne donnera pas tout à fait une couleur noire, mais plutôt un brun très foncé. Ceci est dû au simple fait que les courbes d'absorption de ces encres

ne sont pas aussi bonnes que celles des filtres précédents, et par conséquent, la soustraction des lumières n'est plus parfaite.

La (figure 22 a) représente en couleurs, la synthèse additive et la (figure 22 b), la synthèse soustractive.

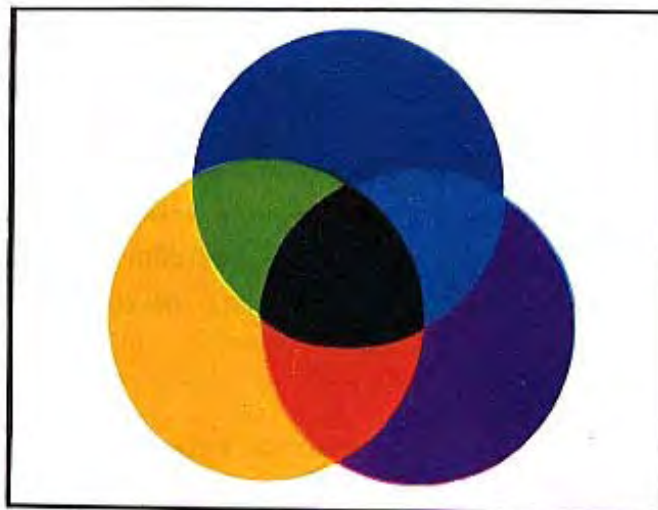


**SYNTHESE ADDITIVE**

Par addition en proportion convenable et projetés sur un écran blanc, trois faisceaux lumineux, bleu, vert et rouge restituent le blanc et les teintes complémentaires.

**SYNTHESE ADDITIVE**

Figure 22-a



**SYNTHESE SOUSTRACTIVE**

La superposition, sur un support opaque blanc, de trois couches colorées en cyan, jaune et magenta, permet d'obtenir, par soustraction, les couleurs primaires ainsi que le noir.

**SYNTHESE SOUSTRACTIVE**

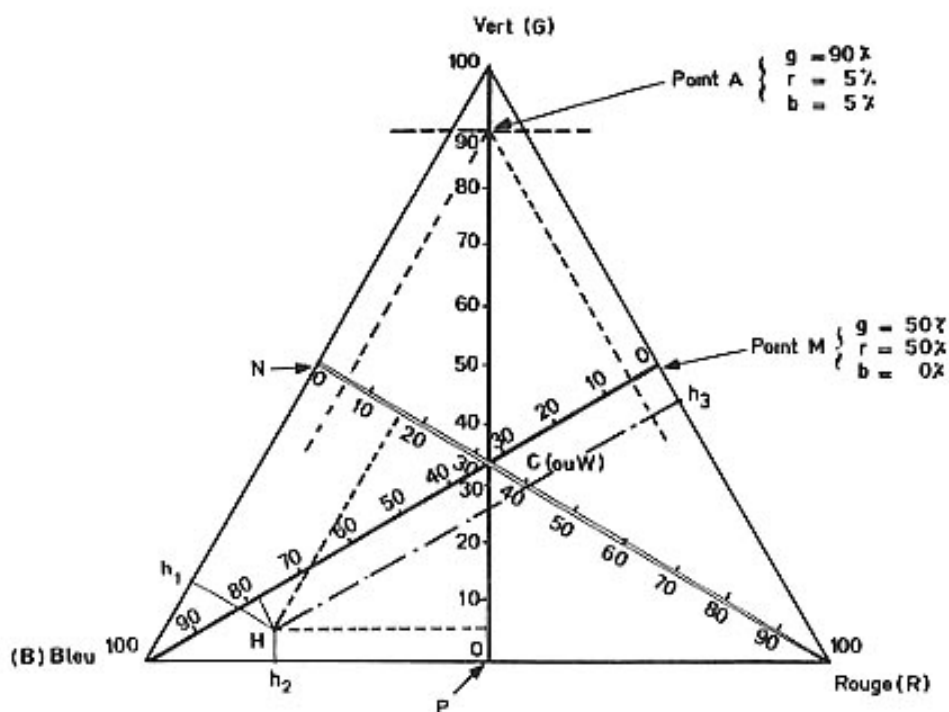
Figure 22-b

## IX – Triangle des couleurs

Nous avons vu que nous pouvions représenter pratiquement toutes les teintes en mélangeant de façon appropriée, trois couleurs fondamentales, appelées aussi primaires.

Supposons que nous ayons choisi, comme couleurs primaires, les couleurs rouge, bleu et vert et que nous obtenions à partir de trois projecteurs dont les intensités sont réglables par rhéostats comme nous l'avons fait précédemment.

En faisant varier les intensités lumineuses entre 0 et 100, nous pouvons reporter les résultats obtenus sur le triangle de la (figure 23), ce triangle prend alors le nom de triangle des couleurs ou encore triangle R.G.B. ou encore, triangle de Maxwell.

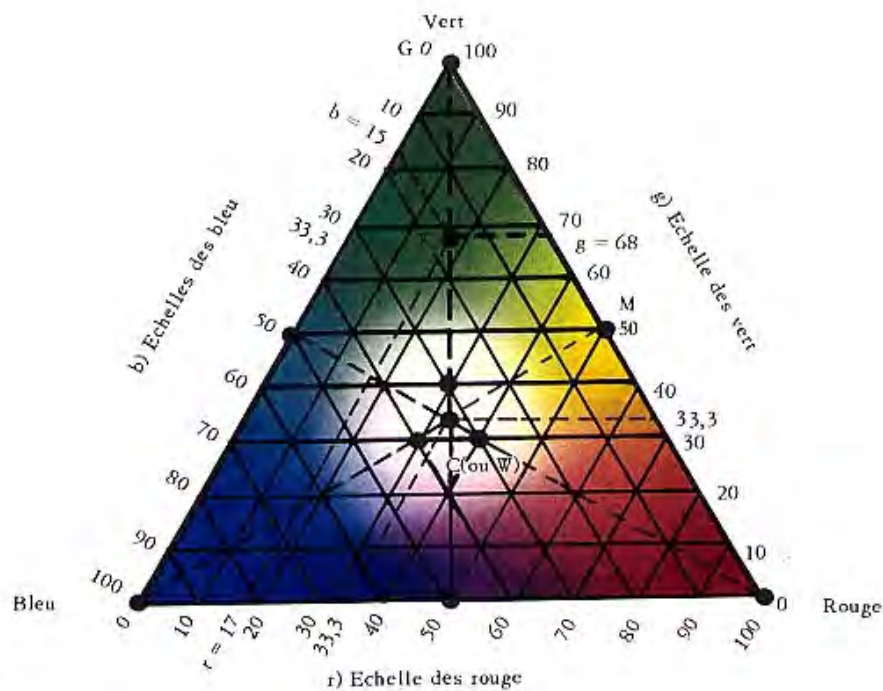


TRIANGLE DES COULEURS R.G.B.

Figure 23

L'échelle rouge est la hauteur du triangle partant du sommet R (rouge).  
L'échelle bleue est la hauteur du triangle partant du sommet B (bleu).  
L'échelle verte est la hauteur du triangle partant du sommet G (vert).

La (figure 24) donne la version en couleurs de ce triangle R.G.B.



TRIANGLE DES COULEURS

Figure 24

Une couleur quelconque peut être représentée par trois pourcentages déterminés. Par exemple la couleur A (figure 23) peut être réalisée par 90% de lumière verte ( $g = 0,9$ ), 5% de lumière rouge ( $r = 0,05$ ) et 5% de lumière bleue ( $b = 0,05$ ).

L'équation colorimétrique s'écrit donc (pour la couleur A) :

$$A = 0,05 R + 0,90 G + 0,05 B$$

La couleur au centre du triangle (point W) se trouve sur l'intersection des trois hauteurs. Ses coordonnées sont donc :

$$r = g = b \ 1/3 \ (= \ 0,33)$$

Dans un triangle équilatéral, la somme des trois perpendiculaires abaissées d'un point du triangle est égale à la hauteur du triangle (une des propriétés fondamentales du triangle équilatéral).

Ainsi, dans l'exemple du point W, on a :

$$r + g + b = 1/3 + 1/3 + 1/3 = 1$$

## A) Exemples

1) Soit à chercher le point représentatif d'une couleur pour laquelle  $r = 100\%$  et  $g = b = 0$ .

C'est évidemment le sommet rouge du triangle qui représente la couleur recherchée (figure 23).

2) Soit le point M, pour lequel :

$$r = 50\% \quad g = 50\% \quad b = 0\%$$

On trace la droite perpendiculaire à l'échelle rouge au point 50%.

On trace la droite perpendiculaire à l'échelle verte au point 50%.

Ces deux droites se coupent au point M qui correspond bien à  $b = 0\%$

On sait d'ailleurs que le point M représente la couleur jaune.

3) Soit à rechercher le point H pour lequel :

$$r = 17\% \quad g = 5\% \quad b = 78\%$$

On trace la droite perpendiculaire à l'échelle rouge au point 17%.

On trace la droite perpendiculaire à l'échelle verte au point 5%.

Par l'intersection de ces deux droites (point H), la droite perpendiculaire à l'échelle bleue, passe bien par le point 78%.

Ces résultats sont très intéressants. On voit en effet que la somme des trois coefficients  $r$ ,  $g$  et  $b$  est toujours égale à 1 comme nous l'avons vu ci-dessus.

📌 Dans le 1<sup>er</sup> cas on a :  $r + g + b = 100\% + 0\% + 0\% = 100\% = 1$

📌 Dans le 2<sup>ème</sup> cas on a :  $r + g + b = 50\% + 50\% + 0\% = 100\% = 1$

📌 Dans le 3<sup>ème</sup> cas on a :  $r + g + b = 17\% + 5\% + 78\% = 100\% = 1$

Et pour le point W (blanc) :

$$r + g + b = \frac{1}{3} 100\% + \frac{1}{3} 100\% + \frac{1}{3} 100\% = 100\% = 1$$

D'où le résultat fondamental suivant :

Dans une couleur (du triangle), il suffit de connaître deux coefficients quelconques, pour déterminer immédiatement le troisième.

Si on connaît :  $r$  et  $g$ , on aura  $b = 1 - (r + g)$

Si on connaît :  $b$  et  $g$ , on aura  $r = 1 - (b + g)$

Si on connaît :  $r$  et  $b$ , on aura  $g = 1 - (r + b)$

De toute façon, on a toujours :  $r + g + b = 1$  (équation 1)

Et l'équation colorimétrique pour une couleur C quelconque s'écrira :

$$C = rR + gG + bB \text{ (équation 2)}$$

En désignant par R, G et B, les quantités de lumière rouge, verte et bleue, les pourcentages des couleurs primaires sont donc définies comme ci-dessous :

$$\text{■ Pourcentage de rouge : } r = \frac{R}{R + G + B} \times 100$$

$$\text{■ Pourcentage de vert : } g = \frac{G}{R + G + B} \times 100$$

$$\text{■ Pourcentage de bleu : } b = \frac{B}{R + G + B} \times 100$$

### B) Reproduction des couleurs spectrales

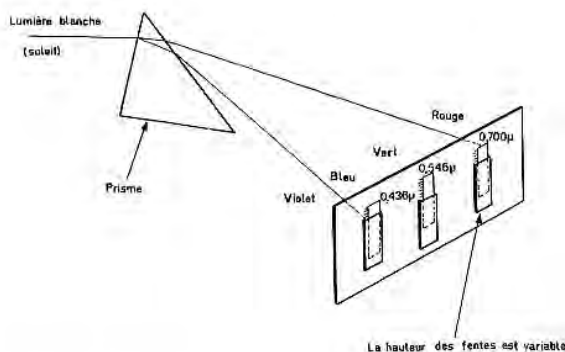
On se propose de reproduire n'importe quelle couleur du spectre solaire, à l'aide d'un mélange additif de trois couleurs primaires.

Pour cela, il faut commencer par définir exactement les couleurs primaires que l'on se propose d'utiliser.

Mesures de Wright : En 1929, Wright entreprend des mesures colorimétriques fort précises. Il commence par définir exactement, les longueurs d'onde des trois couleurs primaires qu'il décide d'utiliser.

Il choisit une couleur rouge dont la longueur d'onde est 0,7 microns.  
 Il choisit une couleur verte dont la longueur d'onde est 0,546 microns.  
 Il choisit une couleur bleue dont la longueur d'onde est 0,436 microns.

Ces couleurs spectrales sont choisies à partir d'un spectre solaire à l'aide de fentes étroites sélectionnant exactement la raie spectrale désirée. La quantité de lumière monochromatique ainsi choisie, peut être rendue variable par la hauteur de la fente (figure 25).



Il est évident que si la fente est complètement découverte, une grande quantité de lumière monochromatique sera disponible. Si la fente est complètement fermée, la lumière monochromatique correspondante, sera alors nulle.

CHOIX DES RAIES SPECTRALES

Figure 25

Les volets qui permettent de faire varier la hauteur des fentes, se déplacent devant une échelle graduée. Si la fente est fermée, le volet se trouve devant la graduation zéro.

Si la fente est complètement ouverte, le volet se trouve devant la graduation 100. Une position intermédiaire sera indiquée par un chiffre compris entre 0 et 100.

En utilisant une boîte à lumière du type colorbox, on peut donc comparer une lumière spectrale quelconque et le mélange des trois lumières monochromatiques primaires.

La position des trois volets indiquera les proportions nécessaires pour obtenir l'identité des deux lumières.

A l'aide d'une fente étroite, on sélectionne dans le spectre, la couleur que l'on désire reproduire et on dirige cette lumière sur un écran E. L'écran E' est éclairé, lui, par les trois sources de lumières spectrales définies plus haut (figure 26).

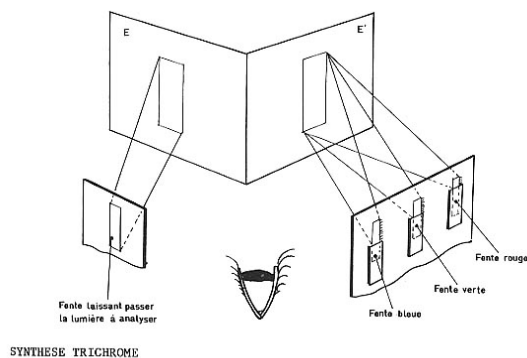


Figure 26

On règle les volets de façon à obtenir la même impression colorée. A l'équilibre, on note les pourcentages des lumières rouge, verte et bleue ainsi utilisés.

Toutes les teintes comprises entre  $0,700 \mu$  (c'est-à-dire le rouge) et  $0,546 \mu$  (vert) peuvent ainsi être reproduites à l'aide des trois lumières primaires, R, G et B, soigneusement dosées.

Par contre, si l'on désire reproduire les teintes comprises entre le vert et le bleu, on s'aperçoit que l'on ne peut pas y réussir en mélangeant ces trois couleurs primaires.

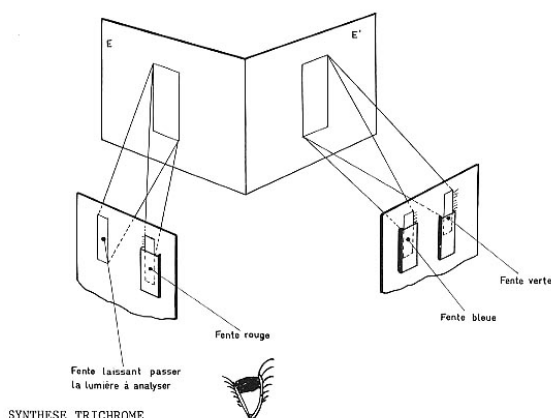


Figure 27

On peut tourner cependant la difficulté de la façon suivante : on enlève une lumière fondamentale (l'expérience montre que c'est la lumière rouge qu'il faut enlever) et on la place du côté de la lumière analysée. Et on s'aperçoit alors que l'on peut à nouveau, obtenir l'équilibrage (figure 27).

Placer la lumière rouge du côté de la lumière analysée revient, dans notre équation colorimétrique (2) vue précédemment, à considérer maintenant la lumière rouge comme étant négative.

Dire qu'une lumière est négative n'a évidemment aucun sens physique mais dire que dans une équation colorimétrique la lumière rouge est négative, indique que cette lumière se trouve du côté de la lumière à analyser.

Si la lumière à analyser est C, l'équation colorimétrique s'écrit (2) :

$$C = rR + gG + bB$$

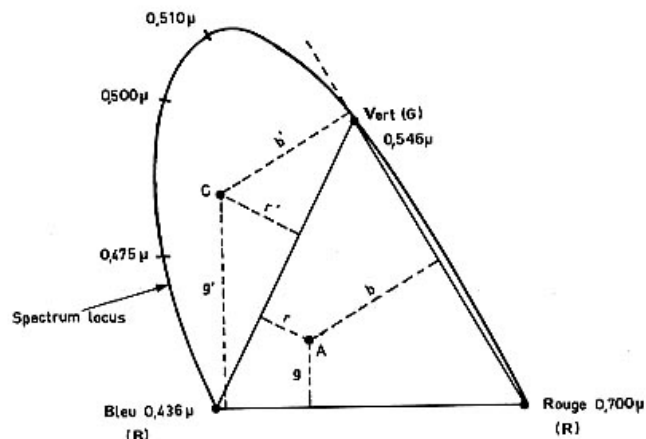
Lorsque les trois lumières primaires sont du même côté (c'est-à-dire pour toutes les teintes comprises entre le rouge et le vert). Mais si la teinte C à reproduire est comprise entre le vert et le bleu (nous savons alors que la lumière rouge doit être déplacée du côté de la lumière à analyser) l'équation colorimétrique s'écrit :

$$C + rR = gG + bB \text{ (équation 3) ou}$$

$$C = -rR + gG + bB \text{ (équation 4)}$$

Dans cette dernière équation, on voit très bien que la lumière rouge est prise avec son signe négatif qui indique que cette lumière doit être soustraite du mélange trichrome. C'est-à-dire, tout simplement être ajoutée du côté de la couleur à analyser.

La (figure 28) indique le lieu de toutes les couleurs spectrales dans la représentation graphique par le triangle R.G.B. Ce lieu est appelé le Spectrum Locus. On voit bien que du côté des couleurs rouge et verte, le spectrum locus se confond pratiquement avec la droite RG.



#### LIEU DES COULEURS SPECTRALES

Figure 28

Ceci indique que les couleurs sur le spectrum locus, entre le rouge et le vert, peuvent être reproduites à l'aide d'un mélange additif trichrome, puisque les trois coordonnées ( $r$ ,  $g$  et  $b$  sont positives).

On considère que les coordonnées d'un point sont positives, lorsque celui-ci se trouve à l'intérieur du triangle R.G.B. ou du même côté de la droite des couleurs que le sommet correspondant.

Un exemple facilitera la compréhension : les coordonnées du point A (figure 28) sont toutes positives (A, intérieur du triangle).

Les coordonnées du point C sont telles que  $g'$  et  $b'$  sont positives tandis que  $r'$  est négative. En effet,  $g'$  se trouve du même côté de la droite RG que le sommet B,  $b'$  se trouve du même côté de la droite BR que le sommet G,  $r'$  se trouve de l'autre côté de la droite BF par rapport au sommet R.

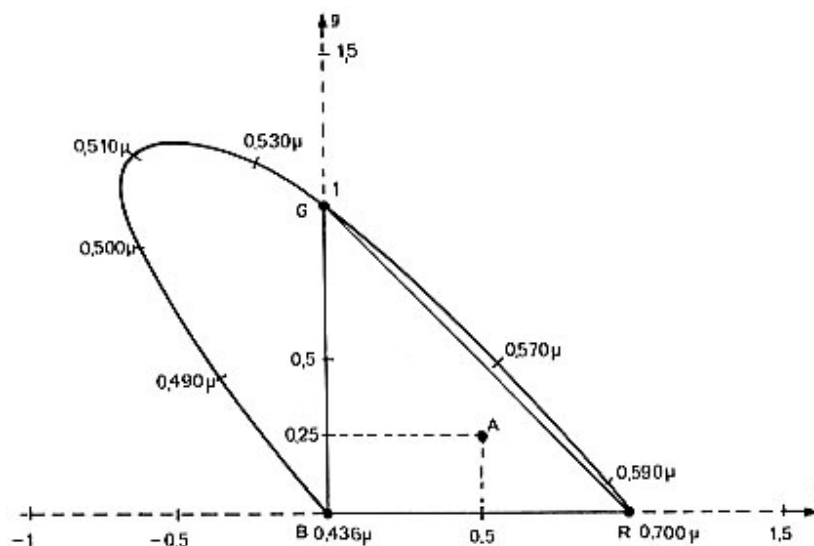
Ceci indique par conséquent que pour reproduire la couleur du point A, les trois sources primaires R.G.B. se trouvent mélangées, tandis que pour reproduire la couleur la couleur du point C, la lumière rouge ( $r'$  négatif) a du être placée du côté de la lumière à analyser.

### C) Autre représentation du triangle R.G.B.

Nous avons vu précédemment, qu'une couleur quelconque pouvait être représentée par une équation colorimétrique du type (2). Nous avons dit aussi qu'il suffisait d'indiquer deux coefficients quelconques seulement, le troisième se déduisant immédiatement de la relation (1).

Au lieu d'utiliser un triangle équilatéral qui nécessite trois coordonnées, on peut tout aussi bien utiliser un triangle rectangle R.G.B., ne nécessitant alors que deux coordonnées, sachant que la troisième coordonnée est déterminée immédiatement par la relation (1).

La (figure 29) montre ce triangle et le spectrum locus qui s'y appuie.



TRIANGLE RECTANGLE RGB ET SPECTRUM LOCUS CORRESPONDANT

Figure 29

Les coordonnées du point A sont dans ce triangle :

$$r = 0,5 \text{ et } g = 0,25$$

La troisième coordonnée s'en déduirait immédiatement :

$$B = 1 - (r + g) = 1 - (0,5 + 0,25) = 0,25$$

## D) Le système international R.G.B.

### 1) Nature

En 1931, la commission internationale de l'Eclairage (C.I.E.) a adopté le triangle rectangle. Dans ce système les fondamentales sont les radiations monochromatiques de longueur d'onde  $0,700\mu$  (rouge),  $0,546\mu$  (vert) et  $0,436\mu$  (bleu).

L'unité du flux lumineux de la primaire rouge a été choisie par convention égale à un lumen. Dans ce cas, pour que le point représentatif de la lumière blanche (W) soit au centre du triangle, il faut que l'unité du flux lumineux de la primaire bleue soit égale à  $0,0601$  lumen, et celle de la primaire verte égale à  $4,5907$  lumen.

La faible valeur du flux lumineux de bleu nécessaire, nous montre déjà dès maintenant les propriétés colorantes intenses des courtes longueurs d'onde.

Ainsi, une lumière colorée C ayant pour coordonnées :

$r = 0,243$  et  $g = 0,410$  (d'où  $b = 0,347$ ) signifie qu'en additionnant :

$$\begin{array}{rcl}
 0,243 \times 1 & = & 0,243 \text{ lumen de primaire rouge (à } 0,700\mu) \\
 0,410 \times 4,59 & = & 1,882 \text{ lumen de primaire verte (à } 0,546\mu) \\
 0,347 \times 0,0601 & = & 0,021 \text{ lumen de primaire bleue (à } 0,436\mu) \\
 \hline
 & = & 2,146 \text{ lumen}
 \end{array}$$

On reconstitue l'aspect de  $2,146$  lumen de lumière colorée C. La détermination du spectrum locus a été effectuée point par point (c'est-à-dire couleur spectrale par couleur spectrale) par Guild et par Wright en prenant les résultats moyens d'une vingtaine de collaborateurs.

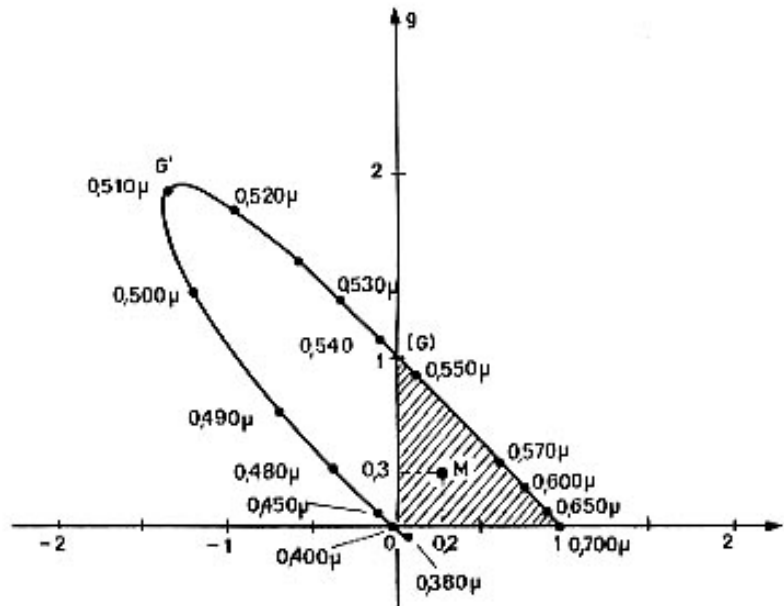
Sur deux axes rectangulaires Or (axe des abscisses) et Og (axe des ordonnées), on porte donc les coordonnées r et g des couleurs du spectrum locus.

$\lambda$ ( $\mu$ )	r	g	$b = 1 - (r + g)$
0,380	0,0272	- 0,0115	0,9843
0,400	0,0247	- 0,0112	0,9865
0,450	- 0,0390	0,0218	1,0172
0,480	- 0,3667	0,2906	1,0761
0,490	- 0,7150	0,6996	1,0154
0,500	- 1,1685	1,3905	0,7780
0,510	- 1,337	1,9318	0,4053
0,520	- 0,9830	1,8534	0,1296
0,530	- 0,5159	1,4761	0,0398
0,540	- 0,1707	1,1628	0,0079
0,550	0,0974	0,9051	- 0,0025
0,570	0,4973	0,5067	- 0,0040
0,600	0,8475	0,1537	- 0,0012
0,650	0,9888	0,0113	- 0,0001
0,700	1	0	0

COORDONNEES DES COULEURS DU SPECTRUM LOCUS

Figure 30

Dans la (figure 30) sont représentées les coordonnées pour quelques longueurs d'onde du spectrum locus.



LOCALISATION DU TRIANGLE R.G.B. DANS LE SPECTRUM LOCUS

Figure 31

La (figure 31) montre comment la courbe du spectrum locus enveloppe le triangle R.G.B.

Toutes les valeurs de la nature se trouvent à l'intérieur du spectrum locus. Maintenant, les couleurs qui se trouvent à l'intérieur du triangle R.G.B., sont représentées par des coordonnées r, g et b positives (aire hachurée).

Toutes les couleurs extérieures au triangle, mais à l'intérieur du spectrum locus sont représentées par des coordonnées dont l'une est négative.

Exemples :

Point M :

$$r = 0,2$$

$$g = 0,3$$

$$b = 1 - (0,2 + 0,3) = 0,5$$

les trois coordonnées sont positives

$$\lambda = 0,400 \mu$$

$$r = 0,0247$$

$$g = -0,0112$$

$$b = 0,9865$$

g est négative

$$\lambda = 0,510 \mu$$

$$r = -1,3371$$

$$g = 1,9318$$

$$b = 0,4053$$

r est négative

$$\lambda = 0,650 \mu$$

$$r = 0,9888$$

$$g = 0,0113$$

$$b = -0,0001$$

b est négative

Vous vérifierez que le spectrum locus se confond pratiquement avec la droite RG, entre  $0,546\ \mu$  et  $0,700\ \mu$ , ce qui indique que la coordonnée « b » est presque nulle (en fait très légèrement négative).

La forme du spectrum locus et sa façon d'englober le triangle R.G.B. indiquent que toutes les couleurs spectrales comprises entre  $0,700\ \mu$  et  $0,546\ \mu$  pourraient être reproduites à l'aide d'un mélange additif de deux couleurs seulement (le rouge et le vert).

Nous avons déjà remarqué cette possibilité précédemment. Si l'on désirait parfaire la reproduction, il suffirait de mélanger un peu de lumière bleue avec la couleur à analyser (coordonnée b légèrement négative).

## 2) Détermination expérimentale des composantes et des coefficients chromatiques

Les composantes chromatiques d'une lumière quelconque sont désignées par R, G et B, comme vous le savez déjà. Il est intéressant de montrer comment on peut déterminer ces composantes expérimentalement.

Pour cela, il suffit de savoir combien il faut mélanger de lumière r et de lumière B pour réaliser une couleur spectrale quelconque.

Supposons que nous voulions réaliser une couleur spectrale bleu vert de longueur d'onde exacte de  $0,500\ \mu$ . C'est une couleur parfaitement définie dans le spectre et si nous voulions la réaliser exactement, nous devons connaître d'une façon certaine, le pourcentage de rouge (à  $0,700\ \mu$ ), de vert (à  $0,546\ \mu$ ) et de bleu (à  $0,436\ \mu$ ) à mélanger.

Pour ce faire, reprenons la boîte à lumière et notons la largeur des fentes respectives R, G et B.

Supposons que pour réaliser l'équilibrage de la couleur bleu vert de  $0,500\ \mu$ , nous ayons eu besoin de 0,08536 de lumière verte, de 0,04776 de lumière bleue. D'autre part, pour obtenir l'équilibre exact, nous avons dû déplacer la lumière rouge du côté de la lumière à analyser et la proportion du rouge a été alors de 0,07173.

Nous dirons donc que nous avons besoin de :

G = 0,08536 de lumière verte  
 B = 0,04776 de lumière bleue  
 R = - 0,07173 de lumière rouge

Nous pouvons donc maintenant calculer les coefficients chromatiques r, g et b de notre lumière colorée à  $500\ \mu$ .

$$r = \frac{\mathbf{R}}{\mathbf{R + G + B}} \quad g = \frac{\mathbf{G}}{\mathbf{R + G + B}} \quad b = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{R + G + B}}$$

$$r = \frac{R}{R + G + B} = \frac{-0,07173}{(-0,07173) + (0,08536) + (0,04776)} = \frac{0,07173}{0,06139} = -1,1685$$

$$g = \frac{G}{R + G + B} = \frac{0,08536}{0,06139} = +1,3905$$

$$b = \frac{B}{R + G + B} = \frac{0,04776}{0,06139} = +0,7780$$

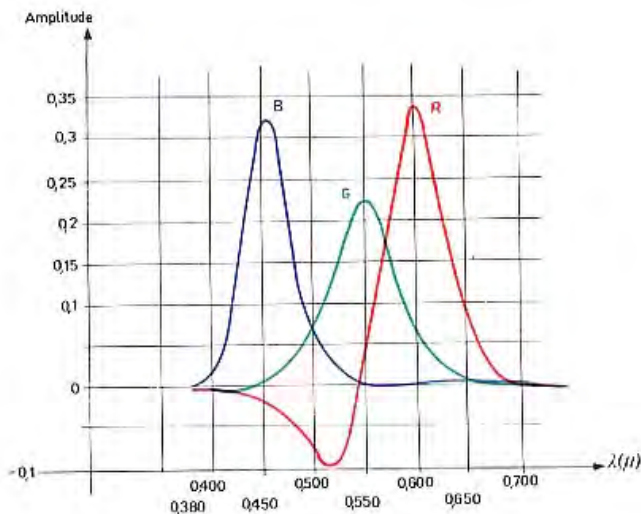
Vous vérifierez sans peine que les valeurs des coefficients r, g et b sont les mêmes que celles indiquées pour le spectrum locus du tableau de la (figure 30). Vous noterez encore que l'on a bien :

$$r + g + b = 1$$

$$r + g + b = \frac{R}{R + G + B} + \frac{G}{R + G + B} + \frac{B}{R + G + B} = \frac{R + G + B}{R + G + B} = 1$$

$\lambda$ ( $\mu$ )	R	G	B
0,380	0,00003	-0,00001	0,00117
0,400	0,00030	-0,00014	0,01214
0,450	-0,01213	0,00678	0,31670
0,480	-0,04939	0,03914	0,14494
0,490	-0,05814	0,05689	0,08257
0,500	-0,07173	0,08536	0,04776
0,510	-0,08901	0,12860	0,02698
0,520	-0,09264	0,17468	0,01221
0,530	-0,07101	0,20317	0,00549
0,540	-0,03152	0,21466	0,00146
0,550	0,02279	0,21178	-0,00058
0,570	0,16768	0,17087	-0,00135
0,600	0,34429	0,06246	-0,00049
0,650	0,10167	0,00116	-0,00001
0,700	0,00410	0,00000	0,00000

Sur la (figure 32) un tableau représente les valeurs de R, G et B obtenues pour quelques longueurs d'ondes.



Et sur la (figure 33) sont tracé les variations de R, G et B en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  et donne ainsi la forme des courbes obtenue.

VARIATIONS DES FONCTIONS R.G.B.

Figure 33

### 3) Remarques sur le triangle R.G.B.

Vous devez sans doute vous dire en observant le triangle rectangle R.G.B. normalisé par la C.I.E., que les trois couleurs fondamentales ont été mal choisies car le triangle ainsi formé ne couvre même pas la moitié de la surface à l'intérieur du spectrum locus. Il semble en effet, qu'une grande gamme de teintes ne puisse être reproduite avec ces primaires, car on ne peut pas utiliser de lumière négative.

On peut le faire à l'analyse, en plaçant la lumière négative du côté de la couleur à analyser. Mais si maintenant nous voulons créer une sensation colorée à l'aide de trois lumières primaires, toutes les couleurs à l'extérieur du triangle R.G.B., seront inaccessibles.

On pourrait croire ainsi, qu'en choisissant une primaire verte G' ( $\lambda = 0,510\mu$ ) au lieu de G ( $\lambda = 0,546\mu$ ), le triangle R, G', B serait beaucoup plus grand et permettrait ainsi de réaliser beaucoup plus de teintes.

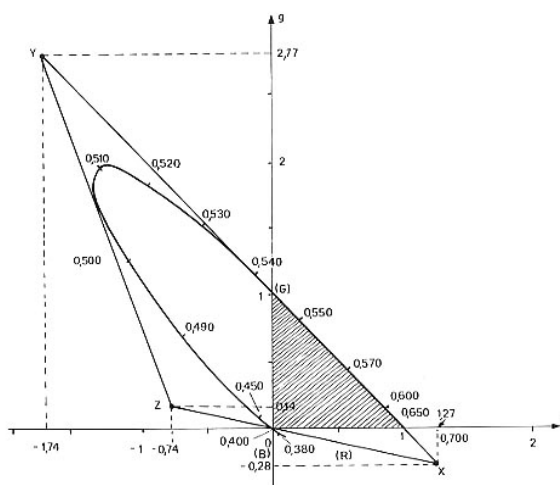
C'est vrai, mais la différence obtenue en pratique est cependant très faible, car toutes les teintes se trouvant à gauche de l'axe Og diffèrent très peu des couleurs se trouvant sur ce même axe et que l'on obtient facilement par mélange du bleu et du vert.

Mais par contre, le choix des primaires R.G.B. (0,700, 0,546 et 0,436 $\mu$ ) n'est pas heureux en lui-même. En effet, ces radiations sont contenues dans la valeur de mercure et il est exceptionnel d'utiliser ces radiations dans colorimètre. On a donc cherché à améliorer le système de représentation des couleurs et l'on a abouti à la représentation internationale dite XYZ.

## X – Représentation XYZ

### A) Définition

Pour remédier à ces inconvénients, la CIE a proposé en 1931, un système déduit du précédent par une transformation homographique.



CHOIX DES POINTS XYZ

Figure 34

On a cherché un triangle XYZ (figure 34) qui englobe entièrement le spectrum locus.

On a donc tracé pour cela une droite XY qui soit tangente sur une longueur la plus grande possible au spectrum locus.

On a tracé ensuite la droite YZ, tangente elle aussi à la courbe spectrale dans la région la plus intéressante, c'est-à-dire 0,500–0,510  $\mu$ .

La droite XZ, par contre, est tangente à la courbe spectrale pratiquement en un seul point ( $\lambda = 0,380\mu$ ).

Les trois droites ainsi déterminées se coupent aux points X, Y et Z, dont les coordonnées dans la représentation R.G.B. sont :

$$X : r = + 1,27 - g = - 0,28$$

$$Y : r = - 1,74 - g = + 2,77$$

$$Z : r = - 0,74 - g = + 0,14$$

Mais les points X, Y et z représentent maintenant des couleurs fictives, n'ayant aucune existence réelle puisqu'elles sont en dehors du spectrum locus. Il n'est donc pas possible de déterminer au colorimètre, les quantités nécessaires de ces couleurs fictives pour former une teinte donnée.

Comment allons-nous procéder ? Nous analyserons une couleur comme précédemment, en déterminant les quantités R, G et B nécessaires. Ensuite, au moyen d'un calcul simple, nous déterminerons les proportions nécessaires des nouvelles primaires X, Y et Z.

Les relations que nous utiliserons sont :

$$\begin{aligned} X &= 2,77 R + 1,75 G + 1,13 B \\ Y &= 1,00 R + 4,59 G + 0,06 B \\ Z &= \quad \quad 0,06 G + 5,59 B \end{aligned} \quad (\text{équation 7})$$

Nous allons prendre un exemple qui nous fera mieux comprendre tout cela. Reprenons notre couleur bleu vert dont la longueur d'onde est  $0,500 \mu$ . Les valeurs des composantes chromatiques que nous avons obtenues étaient :

$$G = 0,08536 \quad - \quad B = 0,04776 \quad - \quad R = - 0,07173$$

En portant ces valeurs dans les relations (7), nous obtiendrons :

$$X = 2,77 \times (- 0,07173) + 1,75 \times (0,08536) + 1,13 \times (0,04776) = 0,005$$

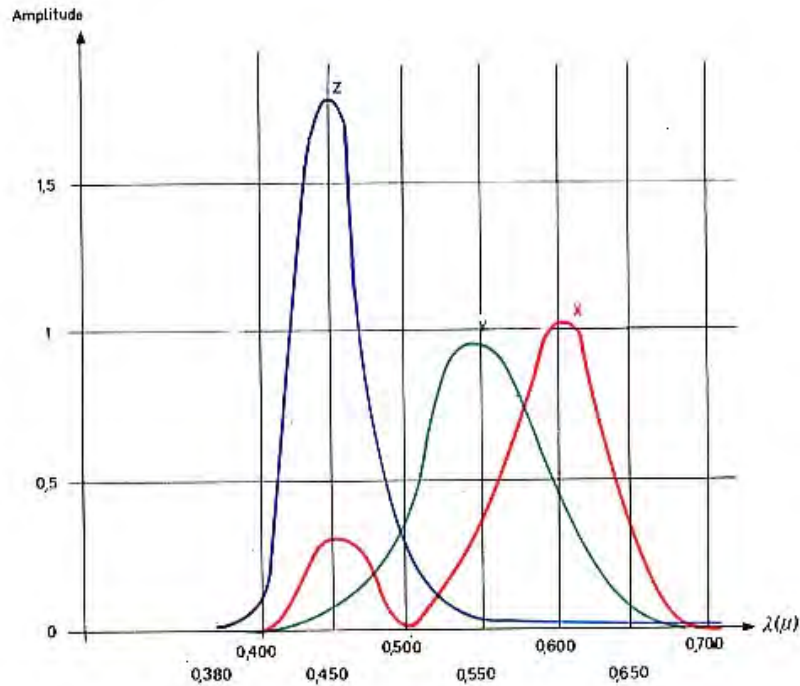
$$Y = 1,00 \times (- 0,07173) + 4,59 \times (0,08536) + 0,06 \times (0,04776) = 0,323$$

$$Z = 0,06 \times (0,08536) + 5,59 \times (0,04776) = 0,272$$

$\lambda$ (μ)	X	Y	Z
0,380	0,0014	0,0000	0,0065
0,400	0,0143	0,0004	0,0679
0,450	0,3362	0,0380	1,7721
0,480	0,0956	0,1390	0,8130
0,490	0,0320	0,2080	0,4652
0,500	0,0049	0,3230	0,2720
0,510	0,0093	0,5030	0,1582
0,520	0,0633	0,7100	0,0782
0,530	0,1655	0,8620	0,0422
0,540	0,2904	0,9540	0,0203
0,550	0,4334	0,9950	0,0087
0,570	0,7621	0,9520	0,0021
0,600	1,0622	0,6310	0,0008
0,650	0,2835	0,1070	0,0000
0,700	0,0114	0,0041	0,0000

Les trois valeurs X, Y et Z ainsi obtenues sont toutes trois positives. On peut donc ainsi transformer toutes les valeurs R, G et B du spectrum locus, afin de les transformer en X, Y et Z. Ce travail a été effectué par la CIE. Et le tableau de la (figure 35) donne les valeurs ainsi obtenues tandis que la (figure 36) indique les variations des courbes X, Y et Z, en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ .

Figure 35



VARIATIONS DES FONCTIONS X, Y et Z

Figure 36

Nous pouvons maintenant déterminer les coefficients chromatiques  $x$ ,  $y$  et  $z$ , de façon analogue.

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (\text{équation 8})$$

Vous remarquerez encore une fois que la somme de  $x$ ,  $y$  et  $z$ , est égale à 1. De cette façon, il suffira de connaître seulement deux coefficients quelconques, le troisième s'en déduisant immédiatement.

### B) Représentation du spectrum locus

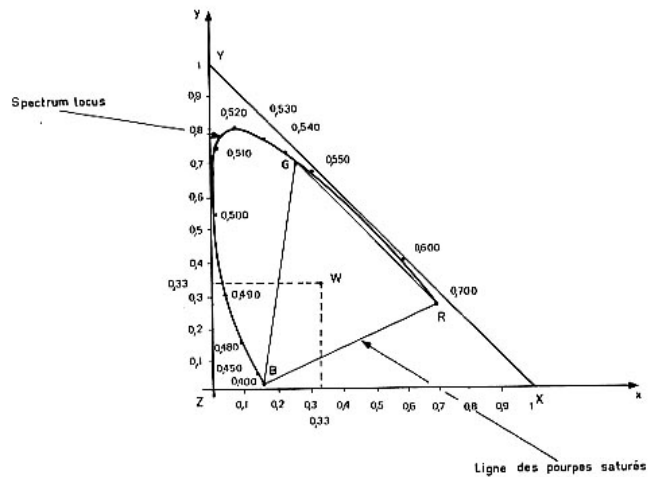
Avant de tracer le spectrum locus, nous devons commencer par représenter le triangle XYZ. Pour cela, traçons deux axes de coordonnées  $x$  et  $y$ . Graduons ces deux axes arbitrairement et plaçons le point X à l'abscisse  $x = 1$  et le point  $y$  à l'ordonnée  $y = 1$ .

Pour chaque longueur d'onde  $\lambda$  du spectrum locus, calculons les coordonnées  $x$  et  $y$  à l'aide des relations (8). Le tableau de la (figure 37) donne les valeurs ainsi déterminées. Nous pouvons alors tracer la courbe spectrale point par point (figure 38).

$\lambda$ ( $\mu$ )	x	y	$z = 1 - (x + y)$
0,380	0,1741	0,0050	0,8209
0,400	0,1733	0,0048	0,8219
0,450	0,1566	0,0177	0,8257
0,480	0,0913	0,1327	0,7760
0,490	0,0454	0,2950	0,6596
0,500	0,0082	0,5384	0,4534
0,510	0,0139	0,7502	0,2359
0,520	0,0743	0,8338	0,0919
0,530	0,1547	0,8059	0,0394
0,540	0,2296	0,7543	0,0161
0,550	0,3016	0,6923	0,0061
0,570	0,4441	0,5547	0,0012
0,600	0,6270	0,3725	0,0005
0,650	0,7260	0,2740	0,0000
0,700	0,7347	0,2653	0,0000

COORDONNEES DU SPECTRUM LOCUS DANS LE SYSTEME INTERNATIONAL XYZ

Figure 37



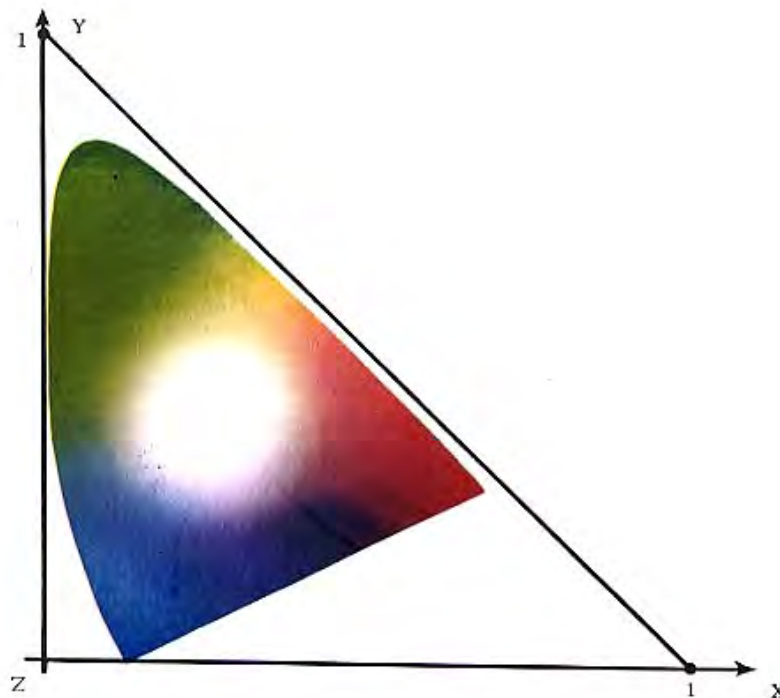
SPECTRUM LOCUS DANS LA REPRESENTATION XYZ

Figure 38

Plaçons maintenant les points R ( $0,700\mu$ ), G ( $0,546\mu$ ) et B ( $0,436\mu$ ).

Le triangle R.G.B., ainsi déterminé, n'est autre que le triangle R.G.B. vu précédemment mais transformé dans le système XYZ.

Le spectrum locus est maintenant à l'intérieur du triangle XYZ (figure 39).



REPARTITION DES COULEURS DANS LE DIAGRAMME XYZ

Figure 39

Les couleurs de la nature se trouvent dans le domaine limité par le spectrum locus.

Les côtés XY et YZ du triangle des primaires sont tangents au lieu spectral, ce qui permet, comme nous vous l'avons dit, d'avoir des primaires le moins irréelles possible.

Le point W (spectre d'égal énergie : blanc) se trouve au centre du diagramme.

### XI – Lieu du corps noir

Le corps noir (ou radiateur intégral) est un corps fictif dont le coefficient d'absorption est égal à 1 pour toutes les longueurs d'onde : un tel corps absorberait intégralement toutes les radiations reçues quelle que soit leur longueur d'onde, d'où son nom de corps noir.

Inversement, porté à une certaine température, un tel corps rayonnerait plus d'énergie que n'importe quel corps réel porté à la même température.

En effet, le rayonnement des corps réels, qui sont toujours plus ou moins relatifs et jamais parfaitement noirs, dépend de la température et de leurs propriétés absorbantes, variables avec la longueur d'onde : par contre, celui du corps noir ne dépend que de sa température.

Une très petite ouverture percée dans un four représente assez bien un corps noir. Un rayon lumineux qui pénètre dans ce four par la petite ouverture n'a pratiquement aucune chance d'en ressortir (absorption totale). Réciproquement, le rayonnement sortant de l'orifice suit très sensiblement les lois du rayonnement d'un corps noir à la température du four.

Lorsque la température du corps noir augmente, sa couleur change : elle passe du rouge sombre pour les basses températures + 500° Kelvin au blanc pour des températures plus élevées.

La Commission Internationale de l'Eclairage a normalisé quatre sources étalon de blanc, dites A, B, C et W.

- Etalon A : lumière blanche émise par le corps noir, dont la température est égale à 2850° K.
- Etalon B : lumière blanche émise par le corps noir, dont la température est égale à 4800° K.
- Etalon C : lumière blanche émise par le corps noir, dont la température est portée à 6500° K.

On peut obtenir encore ces étalons A, B et C de la manière suivante :

- Etalon A : c'est la lumière délivrée par une lampe à incandescence, à filament de tungstène, en atmosphère gazeuse et de température de couleur égale à 2850° K.
- Etalon B : source précédente A munie d'un filtre Davis et Gibson amenant sa température de couleur à 4800° K.

■ Etalon C : source A munie d'un autre filtre Davis et Gibson amenant sa température de couleur à 6500° K.

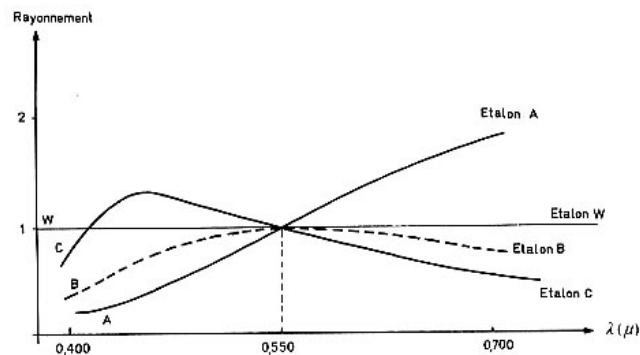
L'étalon A représente l'éclairage artificiel par incandescence.

L'étalon B représente sensiblement dans le spectre visible, la qualité de la lumière provenant directement du soleil.

L'étalon C représente la moyenne des températures de couleur du ciel bleu.

Les filtres établis par Davis et Gibson du national Bureau Of Standards, sont des solutions convenables de sulfate de cuivre et de cobalt.

L'étalon W (W = White = blanc) est une source fictive dite à spectre d'égale énergie, et qui rayonnerait la même quantité d'énergie pour toutes les longueurs d'onde.



REPARTITION SPECTRALE DES DIVERSES LUMIERES BLANCHES CONVENTIONNELLES DE LA C.I.E.

Figure 40

Comme on peut le constater sur la (figure 40), la source A comprend plus de radiations rouges, que de radiations bleues, ce qui est bien la caractéristique d'une source à incandescence.

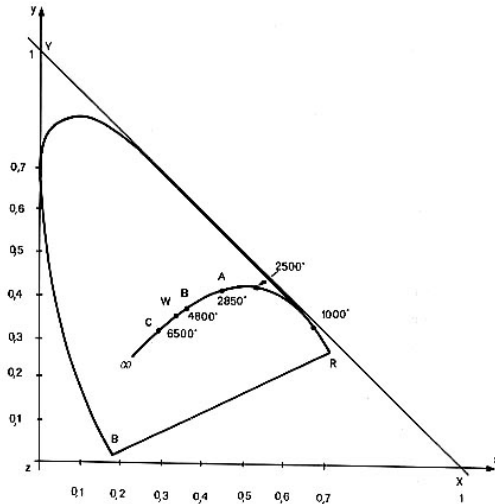
La source B est presque la source idéale, quoique comportant un peu moins de rayons bleus et rouges que de rayons de longueur d'onde moyenne.

La source C (ciel bleu) comporte beaucoup plus de rayonnements dans le bleu que dans le rouge.

La source W théorique idéale est évidemment une droite (même rayonnement dans tout le spectre visible).

Ces quatre sources, bien différentes les unes des autres, sont toutes dites blanches. On comprend facilement maintenant pourquoi il est nécessaire de préciser de quelle sorte de blanc il s'agit.

Pour la télévision en couleurs, comme blanc de référence, on utilise le blanc étalon C.

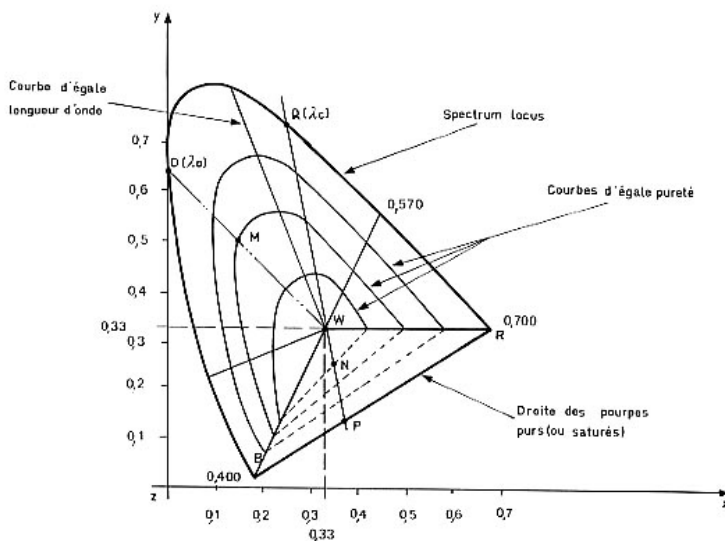


LIEU DU CORPS NOIR (POUR DIFFERENTES TEMPERATURES)

Figure 41

Sur la (figure 41) est représenté les variations du point représentatif du corps noir lorsque sa température varie de 700° K à une valeur extrêmement grande (repérée par  $\infty$  ).

## XII – Longueur d'onde dominante – Facteur de pureté



FACTEUR DE PURETE

Figure 42

Soit une couleur dont le représentatif est M (figure 42). Traçons la demi-droite Wm, celle-ci coupe le spectrum locus en un point D, correspondant à la longueur d'onde  $\lambda_D$ . Nous dirons que la longueur d'onde dominante de la couleur M est  $\lambda_D$ .

Toutes les couleurs dont les points représentatifs sont sur la demi-droite WD ont la même longueur d'onde dominante  $\lambda_D$ . On appelle facteur de pureté p, le rapport de la longueur de la droite WM à la longueur de la droite WD.

$$p = \frac{WM}{WD} \quad (\text{équation 9})$$

Soit une couleur N, la demi-droite WN ne rencontre pas le spectrum locus. En effet, il ne faut pas oublier que la droite RB (figure 42) n'appartient pas au lieu spectral, et que sur cette droite, il n'y a pas de longueur d'onde. Cette droite est dite des pourpres saturés.

La demi droite WN coupe donc la droite RB en un point P. Mais nous ne pouvons pas maintenant définir une longueur d'onde dominante, car il n'y a pas de longueur d'onde sur la ligne RB.

Nous pouvons, par contre, tourner la difficulté et prolonger la demi-droite NW, qui elle, coupe le spectrum locus en un certain point Q.

Le point correspondant à la longueur d'onde complémentaire que nous appellerons  $\lambda_c$ .

Toutes les couleurs situées entre W et P n'auront donc pas de longueur d'onde dominante, mais pourront être définies par la même longueur d'onde complémentaire  $\lambda_c$ . Par convention, on lui affecte le signe négatif  $-\lambda_c$ .

Le facteur de pureté pour les couleurs N pourra être défini comme précédemment.

$$p' = \frac{WN}{WP} \quad (\text{équation 10})$$

La figure précédente représente dans le diagramme x, y, diverses courbes d'égales puretés p ou p'.

Les courbes d'égale longueur d'onde dominante (ou complémentaire) sont des droites passant par W.

Cette figure permet par interpolation, de déterminer rapidement les coefficients  $\lambda_D$  (ou  $-\lambda_c$ ) et p d'une couleur, lorsque l'on connaît ses coordonnées x et y.

$$p = \frac{WM}{WD} = \frac{y - 0,33}{y_D - 0,33} \quad (\text{équation 11})$$

y étant l'ordonnée du point M,  $y_D$  étant l'ordonnée du point D et 0,33 étant l'ordonnée du point W.

$$\text{Ou bien : } p' = \frac{WN}{WP} = \frac{y - 0,33}{y_P - 0,33} \quad (\text{équation 12})$$

$y_P$  étant l'ordonnée du point P.

Le facteur de pureté est toujours compris entre 0 et 1.

■ Si le point M se trouve en W (M = blanc), on aura :

$$p = \frac{WM}{WD} = \frac{0}{WD} = 0. \text{ La pureté de la couleur est dans ce cas nulle.}$$

■ Si le point M se trouve en D (couleur saturée), on aura :

$$p = \frac{WM}{WD} = \frac{WD}{WD} = 1, \text{ la pureté d'une couleur saturée est donc toujours égale à 1.}$$

■ une couleur de plus en plus lavée de blanc, voit son facteur de pureté diminuer et devenir nul, lorsque la couleur se trouve au centre W (blanc de référence).

### XIII – Retour sur l'acuité visuelle

#### A) Généralités

Nous savons déjà que le pouvoir de résolution de l'œil est beaucoup plus faible pour la chrominance que pour la luminance. Des expériences très intéressantes montrent cette propriété

On prend pour cela une feuille de papier blanc et on la ponctue de petits points colorés de toutes les couleurs. A faible distance, on distingue parfaitement la couleur de chaque point.

Eloignons lentement la feuille, tout d'abord, les points bleus deviennent impossibles à distinguer des gris, puis les points bruns se confondent avec les roses.

Jusqu'à maintenant, on distingue encore les rouges et les verts. Puis en s'éloignant, la dimension des points décroît encore, et les rouges finissent par disparaître, se confondant avec les gris de luminance équivalente. Si l'on s'éloigne encore, les verts finissent eux aussi par se confondre avec les gris.

L'ordre de disparition des couleurs est donc le suivant :

D'abord les bleus, puis les rouges enfin les verts.




D'autre part, on remarque aussi que l'œil n'est pas sensible à la couleur pour les petites surfaces. Nous pouvons donc tirer une conclusion très importante de ces remarques (et qui est largement mise à profit en télévision couleurs).

L'ordre de disparition des couleurs montre, que pour les petites surfaces colorées, il n'est même pas nécessaire de réaliser une synthèse trichrome pour obtenir une sensation visuelle équivalente : deux couleurs fondamentales suffisent.

On peut donc faire de la bichromie (au lieu de la trichromie). Il suffit pour cela de choisir un rouge orange et un bleu vert (qui sont d'ailleurs les dernières à disparaître dans notre expérience précédente).

D'autre part, comme l'acuité visuelle est beaucoup plus faible pour le bleu que pour le rouge ou le vert, on pourra se contenter d'une bande passante quinze à vingt fois plus réduite pour le bleu que pour les autres couleurs fondamentales.

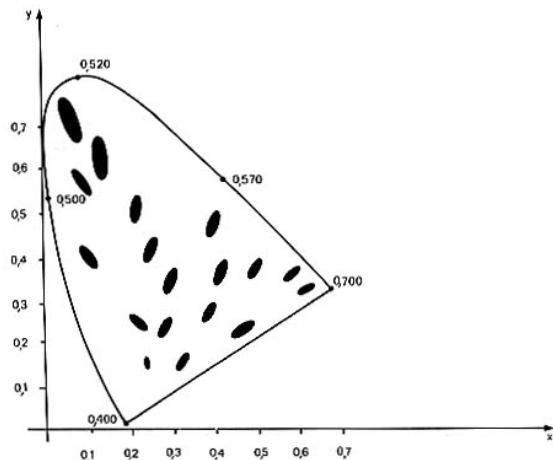
Si on voulait, par conséquent, exploiter au maximum toutes les propriétés de l'œil, le procédé de télévision en couleurs idéal serait :

-  Trichrome (rouge, vert et bleu) pour les gros détails.
-  Bichrome (rouge-orange, vert-bleu) pour les détails moyens.
-  Monochrome (noir et blanc) pour les détails fins.

#### B) Tolérances admissibles dans la reproduction des couleurs

Dans le cas où l'on désire reproduire les couleurs de façon qu'on puisse les distinguer de celles du modèle, quelles sont les tolérances admissibles ?

Mac Adam a essayé de déterminer quels étaient les écarts maxima non perceptibles. Il a déterminé que ces écarts affectaient approximativement la forme d'ellipses (figure 43).



ELLIPSES DE MAC ADAM

Figure 43

Ces ellipses indiquent que dans toute la surface d'une ellipse, l'œil ne distingue pas de variation de couleur par rapport à la couleur au centre de l'ellipse.

Cette remarque est d'une extrême importance. On peut voir, en effet, que si les tolérances dans le bleu violet sont faibles (ellipses de petite surface), elles sont très grande dans le jaune vert.

Ainsi donc, si la couleur doit être assez rigoureusement respectée dans les rouges et les bleus, il suffira de

faire une approximation assez large pour les longueurs d'ondes moyennes.

Cette propriété (approximation dans les couleurs) est exploitée systématiquement dans la télévision en couleurs.

#### XIV – Conclusion

- On peut reproduire pratiquement n'importe quelle couleur, à l'aide d'une synthèse trichrome, puisque la vision humaine peut être considérée comme trichrome.
- Les grandes surfaces colorées devront être reproduites en trichromie.
- Les petites surfaces colorées pourraient se contenter d'une reproduction bichrome.
- Les détails fins n'auront pas à être colorés : ils seront reproduits en noir et blanc tout simplement.

Ces trois derniers points sont possibles, grâce à l'acuité visuelle plus faible pour les couleurs que pour le noir et blanc.

- L'acuité visuelle est plus faible pour le bleu que pour le rouge et le vert (la bande passante du canal bleu pourra de ce fait, être plus réduite).
- Les tolérances dans les couleurs étant assez grandes certaines approximations pourront être apportées dans la reproduction des couleurs.