

PHOTOMETRIE VISUELLE

*De Paul JEAN Professeur au lycée M.Curie 14500 VIRE
préparation au BTS Opticien Lunetier*

La majeure partie des informations que nous avons sur le monde qui nous environne nous est fournie par notre système visuel. L'élément récepteur de ce système est la rétine de l'œil, elle est sensible à la lumière visible. Pour qu'un objet soit détecté dans le monde environnant, il faut que de la lumière émise par cet objet (la source lumineuse) pénètre dans notre œil.

La lumière visible, d'un point de vue physique, n'est qu'une très petite partie de l'ensemble des radiations électromagnétiques. Ces radiations peuvent être caractérisées par leur longueur d'onde dans le vide. Ces longueurs d'ondes vont de l'ordre du kilomètre pour les ondes radio jusqu'à 10^{-6} nanomètres pour les rayons γ . La lumière visible n'en est qu'une toute petite partie, celle dont la longueur d'onde est comprise entre 400 et 800 nm. On l'a distinguée car bien sur, pour nous humains, elle a une importance considérable.

Comme toutes les ondes électromagnétiques, la lumière transporte de l'énergie. Il suffit de s'exposer à la lumière du soleil pour s'en rendre compte. Cette énergie est transportée sous forme de quantas. On peut donc étudier toute source lumineuse d'un point de vue physique à partir de l'énergie qu'elle émet. Ceci va nous permettre de définir des **grandeurs énergétiques**.

Ce point de vue d'étude est néanmoins insuffisant pour rendre compte des perceptions visuelles de l'homme face à un objet lumineux. Le récepteur rétine n'est pas un récepteur linéaire et nous verrons que deux sources lumineuses ayant la même puissance énergétique ne sont pas perçues comme aussi lumineuses si la longueur d'onde de la lumière émise est différente. Il a donc fallu définir des grandeurs caractéristiques de "la sensation visuelle" faisant appel à l'expérience vécue du sujet. Problème difficile car tous les sujets ne sont pas identiques. Cela a donné naissance à **la photométrie visuelle**.

Nous aborderons ensuite le problème de la couleur, sensation purement physiologique. Comment "mesurer" ou "définir" de façon précise une couleur? S'il est facile d'attribuer une couleur à une lumière monochromatique (ne comportant que des radiations d'une seule longueur d'onde), comment faire quand on a une lumière complexe? Est-il possible de prévoir la couleur d'une lumière à partir de son spectre énergétique? C'est à ces questions que s'efforce de répondre la **colorimétrie visuelle**.

Ce cours doit beaucoup aux ouvrages suivants :

- "**Neurophysiologie fonctionnelle**" P. Buser et M. Imbert
Editions Hermann - Collection Méthodes "
- "**Optique Physiologique**" Tome 1,2 et 3 Y. Le Grand
Editions de la Revue d'Optique

Les sources lumineuses

Comme nous l'avons dit, pour qu'un objet soit vu par l'oeil humain, il faut qu'il envoie un faisceau de lumière visible dans ce oeil. On appelle source lumineuse toute surface ou volume émettant de l'énergie rayonnante dans la bande de longueurs d'onde de la lumière visible.

1. Sources primaires et secondaires

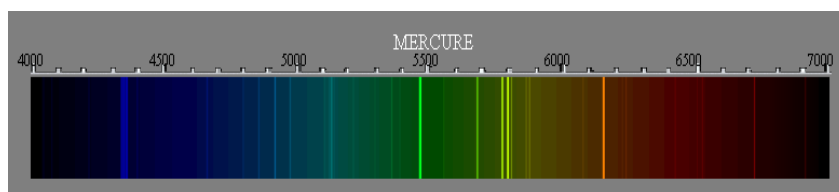
Certaines de ces sources sont productrices de lumière. Elles convertissent une autre forme d'énergie en lumière visible (lampes à incandescence, tubes à décharge, flammes...). On les appelle **des sources primaires**.

La majorité des autres sources ne produisent pas de lumière. Elles n'émettent de la lumière que si elles sont éclairées par de la lumière provenant d'une autre source. Ce sont des **sources secondaires**. C'est le cas de la majorité des objets qui la nuit, en absence de source d'éclairage, deviennent non visibles puisqu'ils ne peuvent réémettre de lumière n'étant pas éclairés. Cette lumière peut être réémise dans une direction privilégiée (réflexion spéculaire) par exemple dans le cas d'une surface brillante ou dans toutes les directions (lumière diffuse). La lumière réémise n'est, le plus souvent, pas identique à la lumière éclairante. Il y a modification de sa composition spectrale.

2. Nature de la lumière émise

La majorité des lumières ne sont pas monochromatiques. Elles peuvent être décomposées par des spectroscopes à prismes ou à réseaux. Deux types peuvent se rencontrer suivant la nature du spectre obtenu:

- les lumières à **spectre de raies**: la lumière ne comporte qu'un nombre limité de radiations de longueurs d'onde parfaitement déterminées. C'est le cas de la lumière émise par les lampes à décharge. Voici par exemple le spectre d'une lampe à mercure:



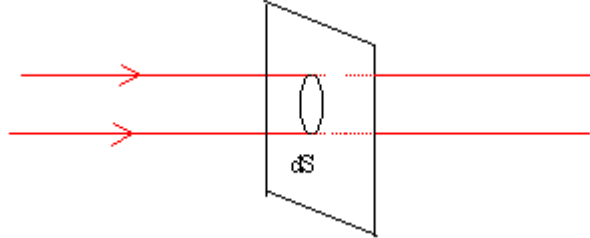
- les lumières à **spectre continu**: toutes les longueurs d'ondes sont présentes (bien sur entre deux limites). C'est le cas de la lumière émise par les lampes à incandescence par exemple.



ETUDE ENERGETIQUE DE LA LUMIERE

Pour les distinguer des grandeurs de photométrie visuelle, tous les symboles utilisés sont suivis d'un indice E pour indiquer qu'il s'agit d'une grandeur énergétique.

1. **Flux énergétique** Nous considérons un faisceau lumineux de lumière monochromatique λ limité par un diaphragme de surface dS petit.



Pendant une durée Δt , n photons vont passer dans ce diaphragme ce qui correspond à une énergie $\Delta E = n \cdot h \cdot c/\lambda$ (h : constante de Planck, c : vitesse de la lumière dans le vide).

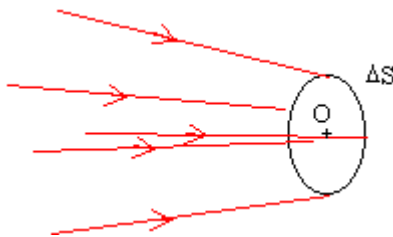
On définit le flux énergétique de ce faisceau lumineux par:

$$\Phi_E \text{ (W)} = \frac{\Delta E \text{ (J)}}{\Delta t \text{ (s)}}$$

Le flux énergétique total émis par une source sera donc la somme des flux émis par tous les faisceaux issus de cette source.

2. **Eclairement énergétique d'une surface**

On considère un élément ΔS , de centre O , d'une surface éclairée. Cet élément de surface reçoit un flux énergétique $\Delta \Phi_E$.



On va définir l'éclairement énergétique au point O de la surface éclairée par:

$$E_E = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta \Phi_E}{\Delta S} = \frac{d\Phi_E}{dS}$$

Cet éclairement énergétique mesure le flux d'énergie lumineuse reçu en chaque point de la surface éclairée. Il s'exprime en Watt par m^2 ($W \cdot m^{-2}$) quand le flux est exprimé en W et l'élément de surface en m^2 .

3. Grandeurs caractéristiques d'une source

1. Source ponctuelle

Pour caractériser une source ponctuelle, on définit une grandeur qui traduit le flux lumineux émis dans une direction donnée: **l'intensité énergétique**.

Pour définir cette grandeur, il faut d'abord rappeler la définition de l'angle solide.

L'angle solide est une portion d'espace. Si nous prenons un cône de centre C qui découpe sur la sphère, de centre C, de rayon R, une portion de surface sphérique S (fig1), la portion d'espace délimitée par ce cône est l'angle solide:

$$\Omega = \frac{S}{R^2}$$

Ω est en stéradians(sr) si S est en m² et R en m

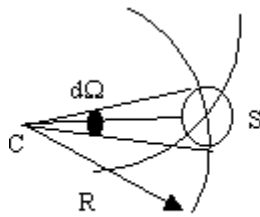


figure 1



figure 2

Pour calculer un angle solide quelconque, on passe à la définition de l'angle solide élémentaire (fig.2). Si on prend un élément de surface très petit dS perpendiculaire à la direction moyenne Ox (SO = r), l'angle solide élémentaire dΩ sous lequel on voit dS depuis O est égal à:

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2}$$

Si maintenant nous imaginons qu'en O se trouve une source lumineuse. Un flux lumineux $d\Phi_E$ va traverser la surface dS, on définit **l'intensité énergétique** de la source S dans la direction Ox par:

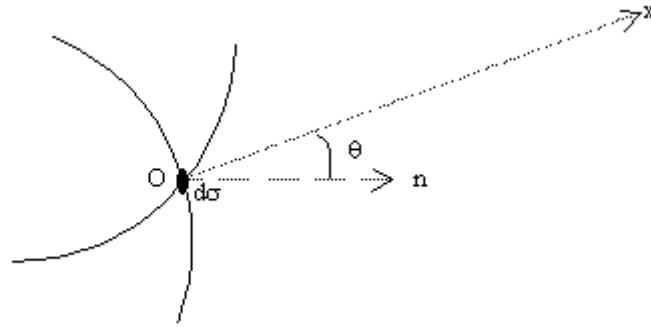
$$I_E = \frac{d\Phi_E}{d\Omega}$$

L'intensité énergétique s'exprime en W.sr⁻¹.

Si la source est isotrope, son intensité énergétique est la même dans toutes les directions de l'espace.

2. Sources étendues

Nous considérons une surface lumineuse émettant dans le demi espace situé devant elle. Nous pouvons découper sur cette surface lumineuse, en O, un élément de surface très petit $d\sigma$. Si nous considérons la source lumineuse de surface $d\sigma$, elle émet dans le demi espace situé devant elle (angle solide 2π) un flux énergétique $d\Phi_E$.



On peut d'abord définir une première grandeur **l'émittance énergétique ou excitation énergétique** de la source étendue en O:

$$M_E = \frac{d\Phi_E}{d\sigma}$$

L'émittance énergétique s'exprime en $W.m^{-2}$. C'est l'analogie d'un éclairement mais ici, il s'agit de lumière émise et non de lumière reçue.

Comme nous l'avons dit, la source $d\sigma$ est quasiment une source ponctuelle, soit dI_E son intensité énergétique dans la direction Ox. On définit alors **la brillance énergétique ou luminance énergétique** de la source étendue en O dans la direction Ox par:

$$L_E = \frac{dI_E}{dS \times \cos \theta}$$

L_E est mesurée en $W.sr^{-1}.m^{-2}$. θ est l'angle entre la direction Ox et la normale à la surface $d\sigma$.

Une source dont la luminance énergétique est la même dans toutes les directions satisfait à **la loi de Lambert**.

Photométrie visuelle

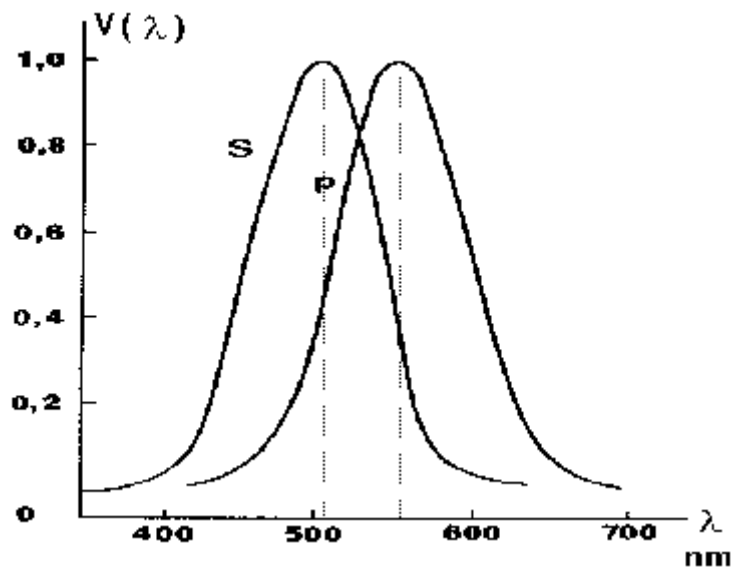
1. Efficacité visuelle

Si l'on présente à un sujet deux sources étendues émettant des radiations monochromatiques, l'une de longueur d'onde $\lambda_1 = 700 \text{ nm}$ avec une luminance énergétique L_{E1} , l'autre de longueur d'onde $\lambda_2 = 690 \text{ nm}$ avec une luminance énergétique L_{E2} . Ces deux sources semblent du même rouge mais pour qu'elles paraissent identiques à l'observateur, il faut que les luminances énergétiques soient telles que L_{E1} soit environ quatre fois plus grande que L_{E2} . On constate donc que l'égalité des luminances énergétiques n'a aucun sens au niveau visuel. L'égalisation visuelle est obtenue lorsque $V_1 \cdot L_{E1} = V_2 \cdot L_{E2}$, le rapport $V_1/V_2 = 0,24$.

En opérant de proche en proche, on peut définir successivement ces rapports. On est obligé d'opérer de proche en proche car pour que la comparaison soit possible, il faut que les deux sources lumineuses soient perçues d'une couleur très voisine. En choisissant pour la source de longueur d'onde λ_m la plus efficace le coefficient $V = 1$, la grandeur $V(\lambda)$ ainsi définie est **l'efficacité lumineuse relative spectrale**. Cette méthode de détermination est dite méthode du pas à pas car on opère de proche en proche.

Tous les observateurs n'étant pas rigoureusement identiques, à partir d'études portant sur plus de 200 sujets, la commission internationale de l'éclairage (CIE) a défini ces coefficients pour un sujet moyen: **l'observateur de référence photométrique**.

La rétine ayant deux types de photorécepteurs: les cônes actifs en vision photopique et les bâtonnets en vision scotopique, il y a en fait deux observateurs de référence. Voici les courbes donnant l'efficacité lumineuses des radiations monochromatiques pour ces observateurs.



On constate qu'en vision photopique (p), l'efficacité maximum (=1) est celle d'une lumière de longueur d'onde 556 nm (jaune citron) et qu'en vision scotopique (s) c'est celle d'une lumière de longueur d'onde 507 nm (vert bleu).

2. Grandeurs de la photométrie visuelle

Considérons une source ponctuelle de longueur d'onde λ et de luminance énergétique dans la direction Ox L_E on définit sa **luminance** visuelle dans la direction Ox par:

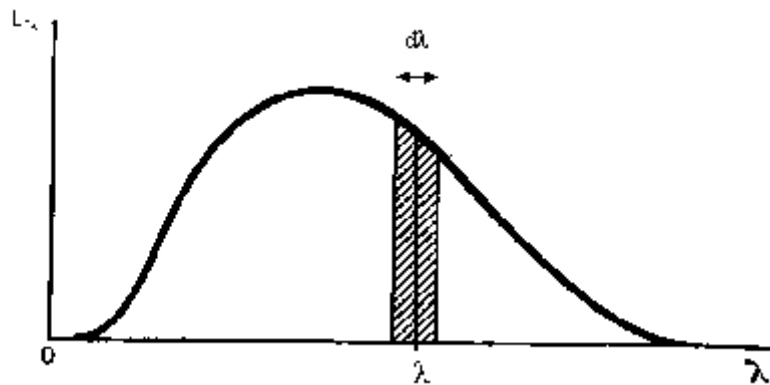
$$L = V_\lambda \times L_E = V_\lambda \times \frac{dI_E}{dS \times \cos \theta} = \frac{dI}{dS \times \cos \theta}$$

dI est l'intensité visuelle de l'élément de surface dans la direction Ox. L'unité d'intensité visuelle est la **candela**.

L'unité de luminance est donc le **candela par mètre carré** (cd.m^{-2}) appelée le **nit**. On utilise aussi une sous unité: le stilb ($1 \text{ sb} = 1 \text{ cd.cm}^{-2}$).

Si la source est une source à spectre continu, on peut définir sa luminance spectrale énergétique $l_{E\lambda}$ telle que la luminance $dL_{E\lambda}$ due aux radiations comprises dans une petite bande $d\lambda$ autour de λ soit égale à:

$dL_{E\lambda} = l_{E\lambda} \cdot d\lambda$. Le rayonnement émis par la source est représenté par $l_{E\lambda} = f(\lambda)$



L'expression de la luminance énergétique de la source est :

$$L_E = \int l_{E\lambda} \cdot d\lambda$$

Si V_λ est l'efficacité de la radiation λ , on en déduit l'expression de la luminance visuelle de cette source en appliquant la loi d'Abney:

$$L = \int V_\lambda \cdot l_{E\lambda} \cdot d\lambda$$

Nous venons de montrer comment on passe de la grandeur luminance énergétique à la grandeur luminance visuelle. On pourrait faire de même pour les grandeurs flux, intensité et éclairement.

Le flux lumineux s'exprime en **lumen** ($1 \text{ lm} = 1 \text{ cd.sr}$), l'éclairement en **lux** ($1 \text{ lx} = 1 \text{ lm.m}^{-2}$) ou en phot ($1 \text{ ph} = 1 \text{ lm.cm}^{-2}$).

3. **Ordres de grandeur**

Donnons pour terminer des valeurs indicatives des luminances de sources réelles:

- domaine photopique
 - surface du soleil à midi : 10^6 lm
 - filament de tungstène d'une ampoule: 10^3 lm
 - neige au soleil: 10^2 lm
 - papier blanc au soleil: 10 lm
 - ciel couvert: 1 lm
 - niveau de lecture aisée: 10^{-2} lm
- domaine scotopique (limite à environ 10^{-3} lm)
 - papier blanc à la lumière de la pleine lune: 10^{-5} lm
 - ciel couvert de nuit sans lune: 10^{-8} lm

4. **Propriétés des grandeurs photométriques:**

Elles découlent d'observations effectuées sur un grand nombre de sujets et peuvent être considérées comme des propriétés de base de la perception visuelle.

Les grandeurs photométriques satisfont les lois:

- de transitivité: Si une plage de luminance L_1 et une plage de luminance L_2 paraissent identiques et si la plage de luminance L_2 paraît identique à une plage de luminance L_3 , on peut affirmer que les plages L_1 et L_3 paraîtront identiques.
- de proportionnalité: Si deux plages de luminance L_1 et de luminance L_2 paraissent identiques, elles paraîtront toujours identiques si on multiplie leurs luminances par un même nombre.
- d'additivité: C'est la loi d'Abney que nous avons déjà appliquée. La luminance totale de la source est égale à la somme des luminances pour chaque petit intervalle des longueurs d'onde présentes.

Les grandeurs colorimétriques

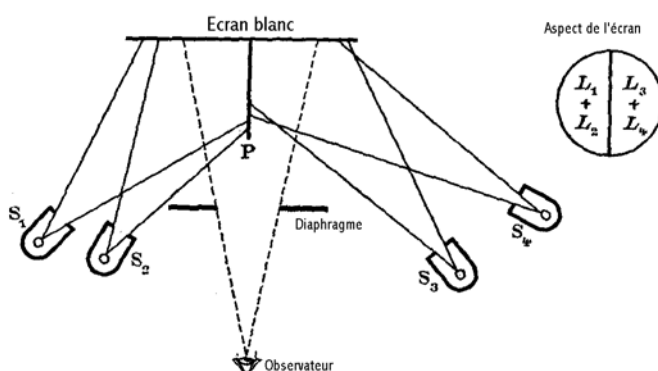
On appelle variance d'un système le nombre de grandeurs indépendantes qu'il faut donner pour le définir totalement. Une source monochromatique est définie par sa longueur d'onde et sa luminance, sa variance physique est donc 2 (L_E et λ). L'œil dans ce cas se comporte comme un récepteur bivariant (la longueur d'onde perçue comme une couleur et la luminance). Pour une lumière complexe, l'œil va se comporter comme un récepteur trivariant: trois grandeurs devront être données pour caractériser la perception visuelle de la source.

Nous nous limiterons aux résultats principaux. Pour une étude plus approfondie de cette question, il faut vous reporter aux ouvrages cités en référence qui dépassent le cadre du BTS.

1. *Trivariance visuelle*

Si nous réalisons une source complexe à partir de plusieurs lumières monochromatiques (écran blanc éclairé par plusieurs faisceaux monochromatiques: synthèse additive) l'œil perçoit une couleur mais ne peut reconnaître les couleurs (longueurs d'onde) des faisceaux monochromatiques qui la composent.

On fait observer à un sujet deux plages l'une éclairée par deux sources (L_1, λ_1) et (L_2, λ_2), l'autre par les deux autres sources (L_3, λ_3) et (L_4, λ_4).



En ajustant convenablement les luminances des sources éclairantes, le sujet peut percevoir les deux plages de même couleur et avec des luminances identiques, on a réalisé une équation colorimétrique que l'on écrira:

$$L_1 + L_2 \equiv L_3 + L_4 .$$

Le signe \equiv indique que la luminance et la couleur des deux plages sont identiques. On dira aussi que l'on a réalisé des stimuli **métamères**. N'oublions pas que la loi d'Abney nous permet d'écrire: $L_1 + L_2 = L_3 + L_4$.

L'addition de certains couples de lumières monochromatiques λ_1 et λ_2 permet d'obtenir une impression de blanc si les luminances de chacun des faisceaux sont correctement réglés. On dit que les couleurs (λ_1 et λ_2) sont complémentaires. Ceci se traduit par l'équation colorimétrique : $L_1 + L_2 \equiv L_W$ où L_W désigne la luminance de la lumière blanche. Cette **lumière blanche** est une sensation nouvelle qui n'existe pas dans le spectre. Ce n'est pas la seule nouvelle sensation colorée que l'on puisse obtenir par addition de deux lumières monochromatiques. Si les composantes (λ_1 et λ_2) sont proches des extrémités du spectre (400 nm pour le violet et 700 nm pour le rouge), le mélange est un **pourpre** couleur intermédiaire entre le rouge et le violet qui n'existe pas dans le spectre.

Si les luminances ne sont pas correctement réglées, le sujet percevra une couleur délavée ou non saturée correspondant à une lumière monochromatique à laquelle on aurait ajouté de la lumière blanche ce qui se traduit par l'équation colorimétrique: $L_1 + L_2 \equiv L_W + L_R$ ou (L_R, λ_R) caractérise la lumière monochromatique qu'il faut ajouter au blanc.

En généralisant, on montre que pour une source comprenant un grand

nombre de lumières monochromatiques, elle est toujours perçue comme une teinte non saturée:

$$L = \sum L_i(\lambda_i) = L_W + L_R$$

On constate que cette perception visuelle est définie par trois grandeurs: deux luminances L_W et L_R et la longueur d'onde λ_R . On parle de la trivariance visuelle.

On peut aussi choisir d'autres grandeurs pour traduire cette perception: la longueur d'onde λ_R dite longueur d'onde dominante, la luminance totale du mélange L et le facteur de pureté p défini par $p = L_R/L_W$.

2. *L'espace des couleurs*

Comment mesurer une couleur ? Comment garantir de façon objective que deux couleurs sont identiques? C'est pour répondre à ce problème qu'ont été définis les systèmes de coordonnées chromatiques.

Nous allons nous contenter de quelques notions sans aucune démonstration.

On peut montrer que toute lumière monochromatique peut être métamère d'une somme algébrique de trois flux lumineux dits primaires convenablement choisis. La notion algébrique a ici un sens particulier puisqu'il n'existe pas de flux lumineux négatif. Elle signifie que si le flux d'une des primaires est affecté du signe négatif, on réalise le métamérisme entre la lumière monochromatique et ce flux primaire avec les deux autres flux primaires.

Par contre, on montre que l'on peut réaliser pratiquement le métamérisme de n'importe quelle lumière pourvu que son coefficient de pureté ne soit pas trop proche de l'unité, puisque les trois flux de primaires sont positifs. Cette synthèse additive de la couleur est réalisée dans tous les écrans de télévision couleur où la lumière émise par chaque pixel est composée de l'émission de trois composantes (non monochromatiques) par les photophores rouge, vert et bleu.

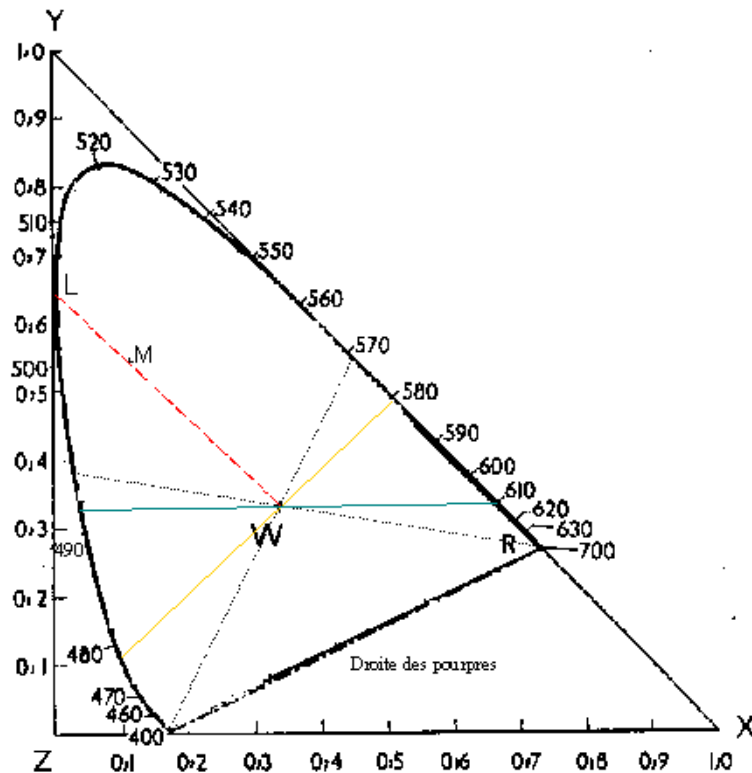
Le choix des trois primaires est totalement arbitraire. Un premier système basé sur des primaires R, G et B coexiste encore avec le système international XYZ. Dans ce dernier, les trois primaires ne sont plus des lumières réelles ce qui n'a pas d'importance car il ne s'agit que d'un système de représentation.

A partir de valeurs issues de l'expérience, la CIE a choisi les primaires et donné les tables des coordonnées chromatiques de toutes les radiations monochromatiques par pas de 5 nm. Des appareils automatiques utilisant ces tables mesurent maintenant automatiquement les coordonnées trichromatiques d'une lumière quelconque.

Nous allons donner quelques applications du diagramme XYZ. Bien qu'il y ait trois coordonnées trichromatiques, le diagramme est un diagramme plan XY puisque par convention la somme des trois coordonnées trichromatiques est égale à 1 donc : $Z = 1-X-Y$.

Sur ce diagramme, l'ensemble des radiations monochromatiques visibles forme une courbe allant de 400 nm à 700 nm. Cette courbe est fermée par la droite des pourpres. Toutes les lumières réelles ont leur point représentatif à

l'intérieur de cette aire. Figure aussi le point W qui est caractéristique de la lumière blanche de l'étalon W défini lui aussi par convention.



Couleurs monochromatiques complémentaires: Le segment joignant les deux longueurs d'ondes complémentaires passe par le point représentatif de la source W. On voit par exemple que le jaune 580 nm a pour complémentaire un bleu de 478 nm et le bleu vert 495 nm un rouge 610 nm.

Longueur d'onde dominante: Si M est le point représentatif d'une lumière complexe, la longueur d'onde dominante de cette lumière est le point de concours L de la courbe des lumières monochromatiques et de la droite WM. Ici la longueur d'onde dominante est d'environ 505 nm. Cette lumière aura une teinte verte non saturée

Pureté d'excitation: $p_e = WM/WL$. Il ne faut pas la confondre avec la pureté colorimétrique qui peut aussi se déduire du diagramme. Si L (x_λ, y_λ), M (x, y), W(x_0, y_0), la valeur de p_c est égale à:

$$p_c = \frac{y_\lambda}{y} \times \frac{y - y_0}{y_\lambda - y_0}$$

A partir du diagramme, on peut aussi prévoir quelle sera la couleur dominante d'une lumière obtenue à partir du mélange de deux autres lumières.

3. *Filtres colorés*

On appelle filtre coloré tout corps transparent qui modifie la répartition spectrale d'une lumière quand celle-ci le traverse. Il y a absorption sélective dans la matière constituant le filtre.

Si une lumière monochromatique de longueur d'onde λ arrive sur le filtre avec un flux F , le flux $\rho_\lambda F$ sera réfléchi et un flux $\tau_\lambda F$ sera transmis. ρ_λ est le facteur spectral de réflexion et τ_λ le facteur spectral de transmission.

On définit aussi la densité optique spectrale: $D_\lambda = -\log \tau_\lambda$.

Rappelons deux lois essentielles:

Loi de Bouguer: Pour un filtre solide homogène d'épaisseur l , la densité spectrale est proportionnelle à l .

Loi de Beer: Pour un filtre constitué d'une solution de concentration c de matière colorante, la densité spectrale $D_\lambda = \epsilon_\lambda \cdot c \cdot l$ où l est la longueur de solution traversée par la lumière et ϵ_λ le coefficient d'extinction qui dépend du colorant.