

Chapitre 2

Message sensoriel

I - Introduction : trivariance visuelle.

II - Système monochromatique.

2.1. luminance.

2.1.1. Photométrie.

2.1.2. Résultats : courbes d'efficacité lumineuse

2.1.3. Relation photométrie - radiométrie

2.1.4. Unités photométriques

2.1.5. Effet purkinje

2.1.6. Seuil différentiel

2.1.7. Seuil absolu et adaptation (hecht)

PLAN *(suite)*

Le message sensoriel

II - Système monochromatique *(suite)*.

2.2. couleurs et saturation

2.2.1. Classement des couleurs

2.2.2. Sensibilité différentielle le long du spectre

2.2.3. Couleurs désaturées

2.2.4. Pourpres et couleurs complémentaires

2.3. lois de Grassman.

III - Système polychromatique

3.1. Espace chromatique.

3.2. Triangle des couleurs.

● I. Introduction : *notion de trivariance visuelle.*

Le message sensoriel
Introduction
Le système monochromatique

1.1 *Système monochromatique (une seule λ).*

La sensation lumineuse est liée à 3 qualités physiologiques perçues par le sujet :

- Luminance L : intensité de la lumière perçue

- Tonalité : teinte de la lumière perçue (couleur de la source) caractérisée par sa longueur d'onde λ

- Saturation : % de blanc qui “délave” une teinte donnée caractérisée par sa pureté (p)

*Qualités
chromatiques*

$$L = L_{\lambda} + L_w$$

1.1 Le système monochromatique (suite)

Le message sensoriel
Introduction
Le système monochromatique

A chacune de ces 3 qualités physiologiques , on attribue une grandeur physique équivalente :

- Luminance et brillance énergétique.
- Tonalité et longueur d'onde dominante.
- Saturation et facteur de pureté p .
(p = luminance colorée sur luminance totale)

$$p = L_{\lambda} / L_{\lambda} + L_w$$

(avec $L = L_{\lambda} + L_w$)

1.2 Le système polychromatique

Le message sensoriel

Introduction

Le système polychromatique

La sensation visuelle est la superposition de 3 teintes appelées PRIMAIRES :

R	rouge
V	vert
B	bleu

$$L = L_R + L_V + L_B$$

II. Le système monochromatique

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Luminance

2.1. Luminance.

2.1.1. Photométrie (mesure de la luminance).

a) Photométrie à papillotement = Alternance sur une même plage d'une lumière de référence et d'une lumière réglable.

Fréquence	Différence de luminance	Différence de couleur
< 6	oui	oui
$6 < < 10$	oui	non
> 10	non	non

Égalité des luminances = disparition du papillotement

2.1 Luminance

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Luminance

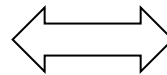
2.1.1. Photométrie (mesure de la luminance) *suite*.

b) Photométrie à plages juxtaposées

= Alternance sur deux plages voisines de 2 lumières proches en longueur d'onde

Pour les deux mesures de luminance :

$$L_{\lambda} = L_r$$

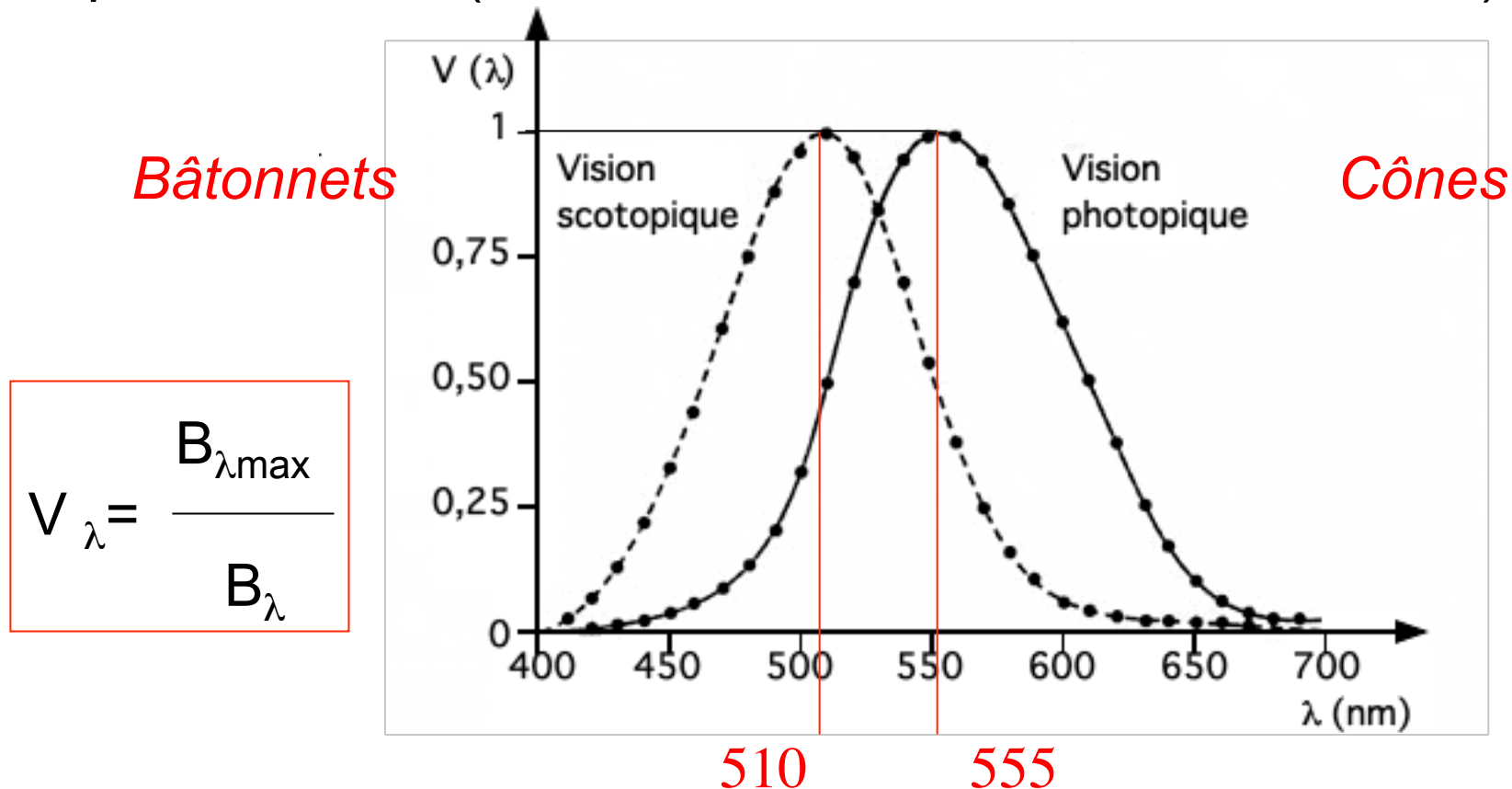


$$B_{\lambda} \neq B_r$$

2.1.2 Résultats : courbes d'efficacité lumineuse

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Luminance

Mesure photométrique pour chaque longueur d'onde dans le spectre visible. (lumière visible : $400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$)

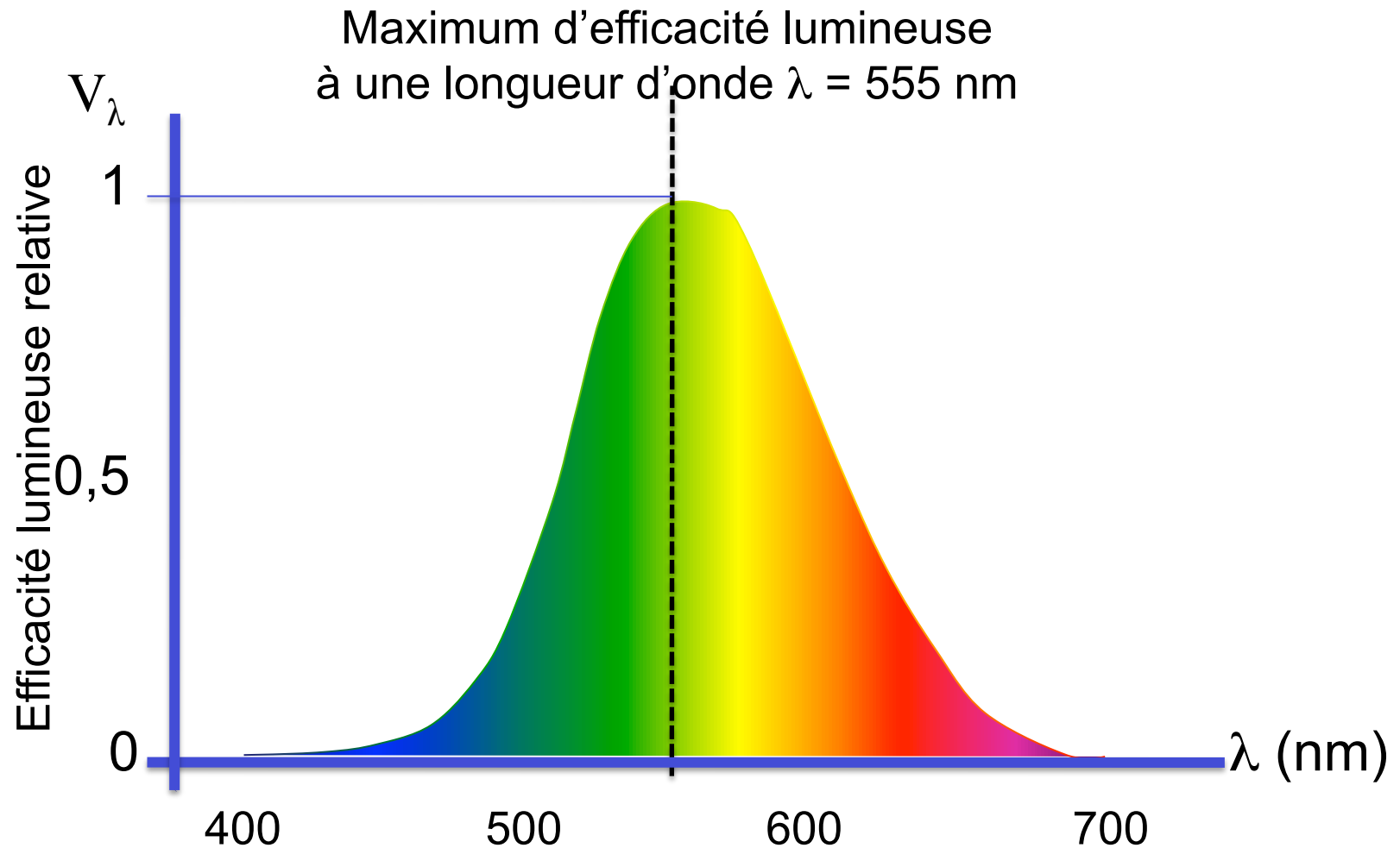


Courbes d'efficacité lumineuse : variations de la sensibilité de l'œil aux différentes λ

2.1.2 Résultats : courbes d'efficacité lumineuse

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Luminance

Vision photopique



2.1.2 Résultats : courbes d'efficacité lumineuse (suite)

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Luminance

- **V = coefficient d'efficacité lumineuse**

$$V_{\lambda} = B_{\lambda_{\max}} / B_{\lambda}$$

- V_{λ} varie de 0 à 1 selon λ
- $V_{\lambda} = 1$ lorsque la sensibilité est maximale.
 - $\lambda_{\max} = 555 \text{ nm}$ (vision diurne ou photopique)
 - $\lambda_{\max} = 510 \text{ nm}$ (vision nocturne ou scotopique)
- Certaines λ sont plus “efficaces” (plus lumineuses)

Exemple : en vision diurne l'efficacité du vert (550 nm) > efficacité du bleu (510nm) donc pour avoir égalité des sensations de luminance : B bleu > B vert

2.1.4 Photométrie et radiométrie

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Luminance

$$L_{\lambda} = k \cdot V_{\lambda} \cdot B_{\lambda}$$

$$I_{\lambda} = k \cdot V_{\lambda} \cdot I_{\lambda}$$

$$E_{\lambda} = k \cdot V \cdot \varepsilon_{\lambda}$$

$$F_{\lambda} = k \cdot V \cdot \phi_{\lambda}$$

Dans le système international :

k vaut **683** unités photométriques pour 1 unité radiométrique (à la λ de 555 nm pour laquelle $V_{\lambda} = 1$)

2.1.3 Unités photométriques

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Luminance

Photométrie	Radiométrie
Intensité lumineuse I (en Candela)	Intensité énergétique I (en Watt . stéradian ⁻¹)
Flux lumineux F (en LUMEN = Candela . Stéradian ⁻¹)	Flux énergétique ϕ (en Watt)
Éclairement lumineux E (en LUX = Lumen . m ⁻²)	Éclairement énergétique ε (Watt . m ⁻²)
Luminance L (en NITS = Candela . m ⁻²)	Brillance énergétique B (Watt . m ⁻² .stéradian ⁻¹)

2.1.4 Photométrie et radiométrie (suite)

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Luminance

Intensité lumineuse / (en Candela = cd)

« La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence égale à $540 \cdot 10^{12}$ Hz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est de $1,464 \cdot 10^{-3}$ W.sr⁻¹. »

Remarque: si $E = hc/\lambda$ alors $\lambda = 3 \cdot 10^8 / 540 \cdot 10^{12} = 555 \text{ nm}$
et $1,464 \cdot 10^{-3} = 1 / 683$

$$I_{\lambda} = k \cdot V_{\lambda} \cdot i_{\lambda} \text{ autrement dit } U_{\text{photométrique}} = k V_{\lambda} U_{\text{radiométrique}}$$

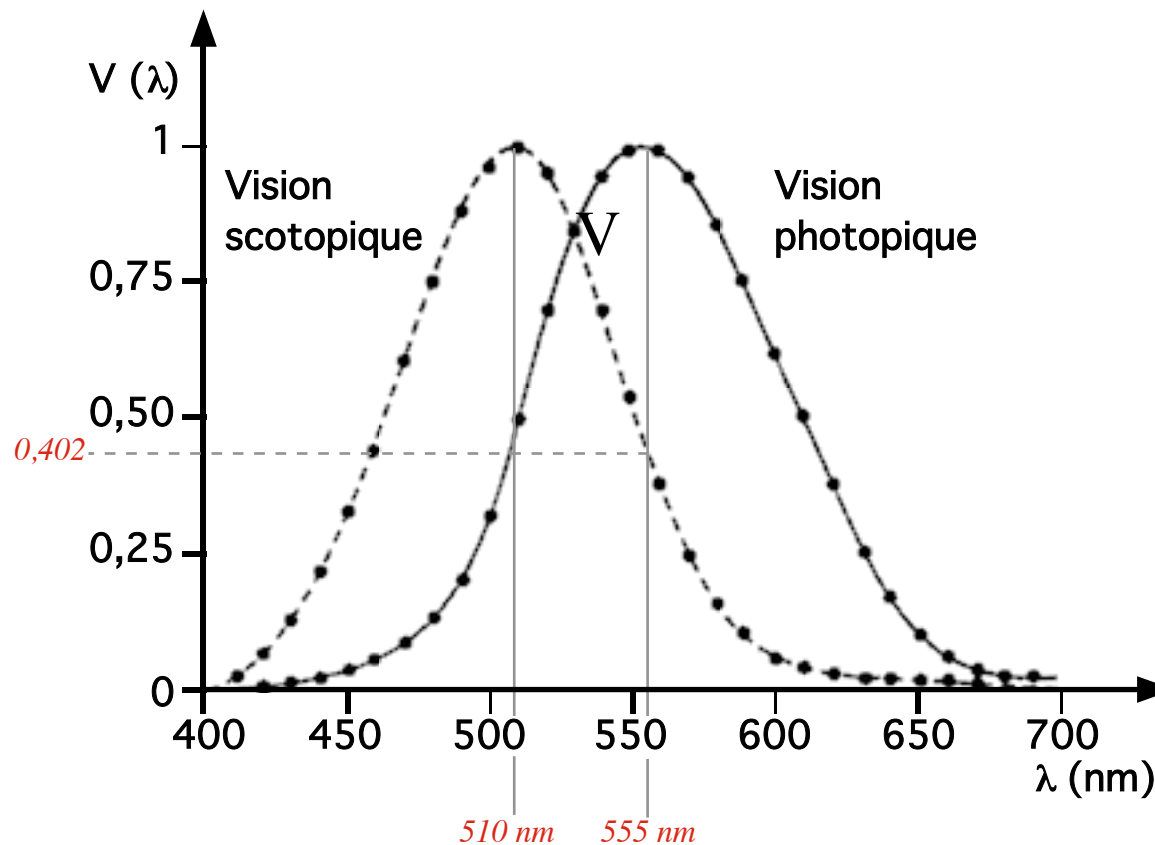
à 555 nm, $V_{\lambda} = 1$ donc :

$$1 \text{ cd} = 683 \cdot 1 \cdot 1/683 = 1 \text{ W.sr}^{-1}$$

2.1.4 Photométrie et radiométrie (suite)

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Luminance

et quid de la vision scotopique ?



$$V' = 0,402$$

2.1.4 Photométrie et radiométrie (suite)

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Luminance

Si $V' = 0,402$ alors

Le nouveau coefficient de proportionnalité **scotopique** k' est tel que :

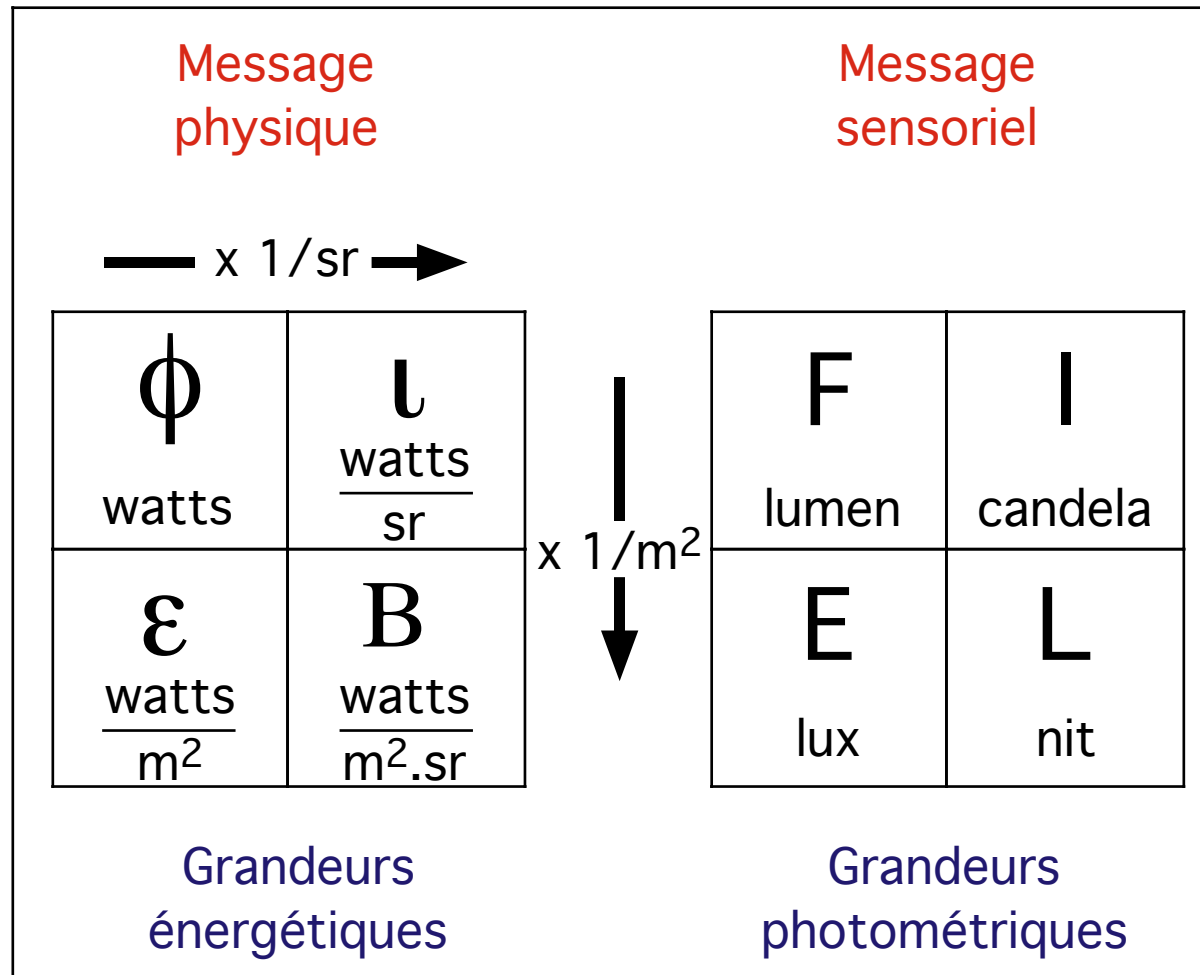
$$1 \text{ cd} = k' \cdot 0,402 \cdot 1/683 \text{ W.sr}^{-1}$$

$$\text{d'où } k' = 683 / 0,402 = \mathbf{1699}$$

L'expression des sensations visuelles nécessite donc de savoir si nous sommes en vision photopique (où $k=683$) ou en vision scotopique (où $k'=1699$)

2.1.4 Photométrie et radiométrie (suite)

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Luminance



2.1.4 Photométrie et radiométrie (suite)

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Luminance

Exemples	Situation	Éclairement
----------	-----------	-------------

Pleine lune

0,5 lx

La marche nécessite

au moins 5 lx

Lumière d'une bougie

10 lx

Rue de nuit bien éclairée

20 - 70 lx

Appartement lumière artificielle

100 lx

La lecture nécessite

environ 150 lx

Bureau, atelier

200 - 3000 lx

Grand magasin

500 - 700 lx

Stade de nuit, salle de sport

1500 lx

Cinématographe/Télévision

2000 lx

Extérieur à l'ombre

10000 - 15000 lx

Ciel couvert

25000 - 30000 lx

Soleil "moyen"

48000 lx

Plein soleil

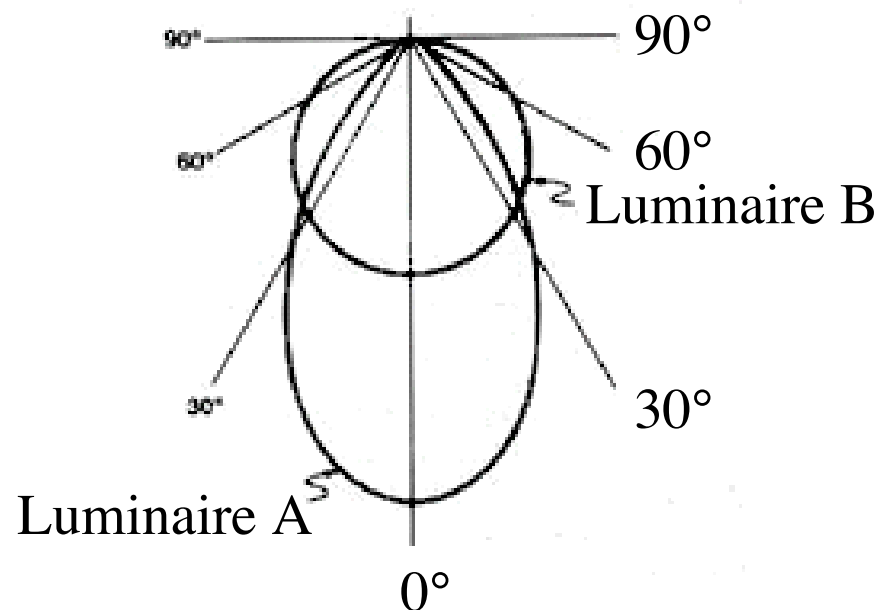
50000 - 100000 lx

2.1.4 Photométrie et radiométrie (suite)

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Luminance

Exemples : Flux lumineux

Une lampe halogène de 2000 watts (2 kW) émet, par exemple un flux de 52000 lm.



Comparaison de distribution en intensité de deux luminaires A et B. Le luminaire A offre un flux lumineux de 50% plus élevé que le luminaire B. Il couvre en effet une plus grande surface sur le diagramme.

2.1.4 Photométrie et radiométrie (suite)

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Luminance

- C'est, d'une manière schématique, la quantité de lumière renvoyée par unité de surface dans une direction donnée.
- La nature des surfaces, leur couleur, leur brillance influent sur la luminance.
 - une surface blanche renvoie plus de 70% de la lumière,
 - une surface noire absorbe plus de 90% de la lumière.
- Un excès de luminance ($> 5\,000\text{ cd.m}^{-2}$) provoque une gêne, un éblouissement.
- Le contraste est défini par le rapport de luminance entre deux surfaces contiguës :
 - rapport de luminance de 1 à 3 : contraste léger,
 - rapport de luminance de 1 à 10 : contraste net,
 - rapport de luminance de 1 à 100 : éblouissement

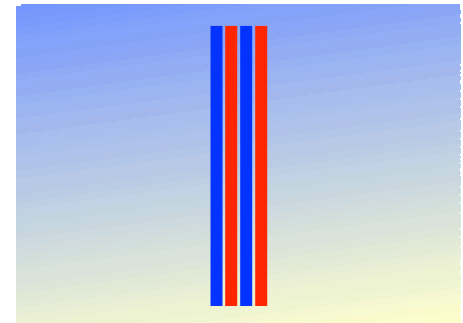
2.1.5. Effet Purkinje

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Luminance

= différence de sensibilité de l'œil en vision diurne et nocturne correspondant aux 2 types de récepteurs rétiniens.

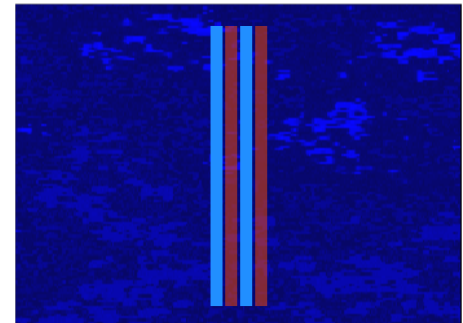
1. Vision diurne (photopique)

- $L > 10$ Nits
- Vision des couleurs (vision trivariante)
- Luminance = sensation lumineuse.



2. Vision nocturne (scotopique)

- $L < 10^{-3}$ Nits
- Pas de vision des couleurs (vision univariante)
- Luminance variable : Bleu > Rouge
c'est l'effet Purkinje.



1. Vision crépusculaire

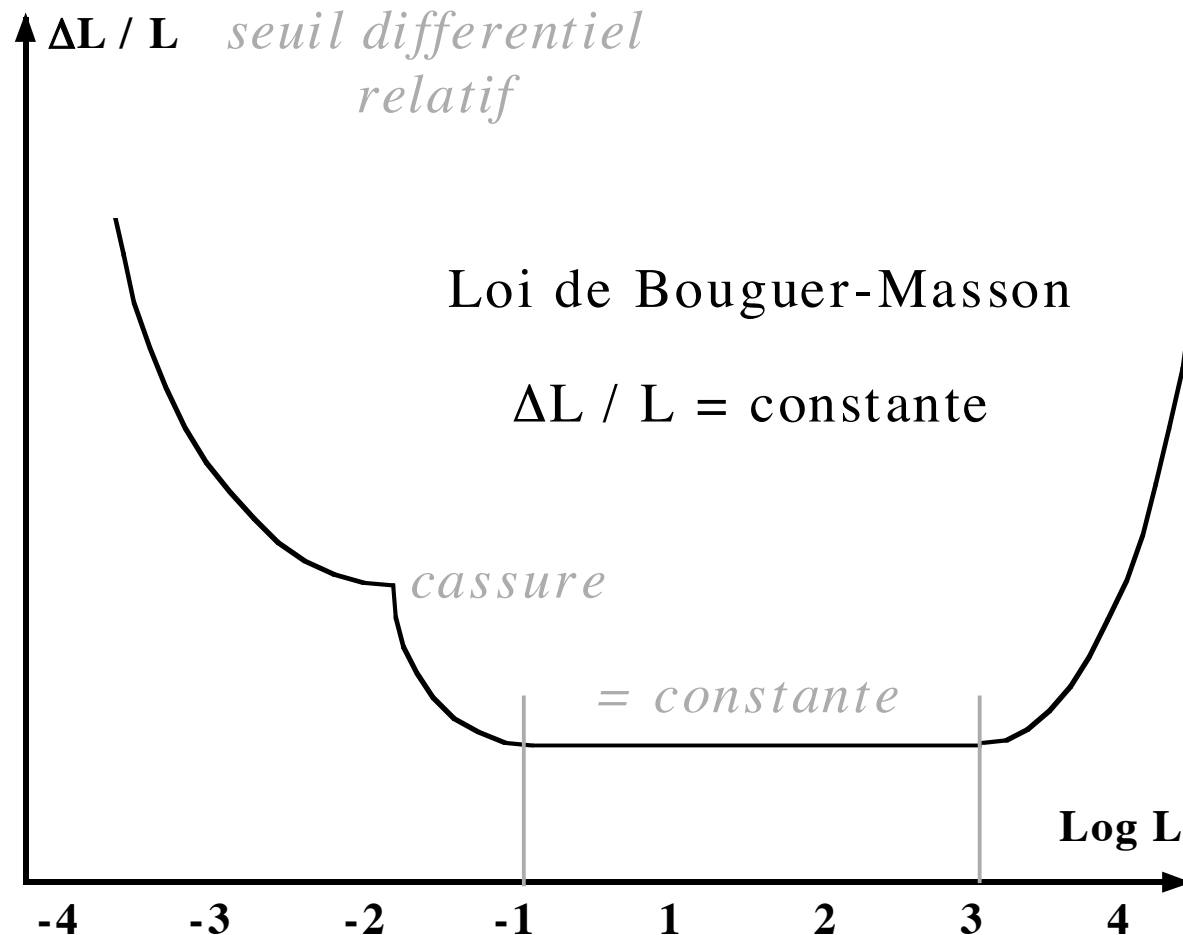
- Courbe non stable
- se déplace progressivement vers les courtes longueurs d'ondes

2.1.6 Seuil différentiel

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Luminance

ΔL tel que L perçu différemment de $L + \Delta L$

ΔL provoque l'apparition du phénomène de papillotement.



2.1.7 Seuil absolu et adaptation au niveau de luminance

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Luminance

= Lien entre la sensation lumineuse et la fonction des cellules photoréceptrices de la rétine (cônes et bâtonnets).

Phénomène d'adaptation

- Adaptation à l'obscurité.
- Adaptation plus rapide de l'ombre à la lumière vive.

Seuil absolu

- = plus petite luminance susceptible d'être perçue.
- dépend de la luminance qui excitait l'œil auparavant.

2.1.7 Seuil absolu et adaptation au niveau de luminance

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Luminance

Expériences de Hecht

- Forte luminance (5000 à 10000 NITS) puis obscurité.
- Courbe d'adaptation à l'obscurité.
- 3 expériences selon la surface de la plage éclairée et la lumière exposée (blanche ou monochromatique).
 - . Plage large : image fovéale et périphérique.
 - . Plage étroite : seulement 1 des 2 zones de la rétine.

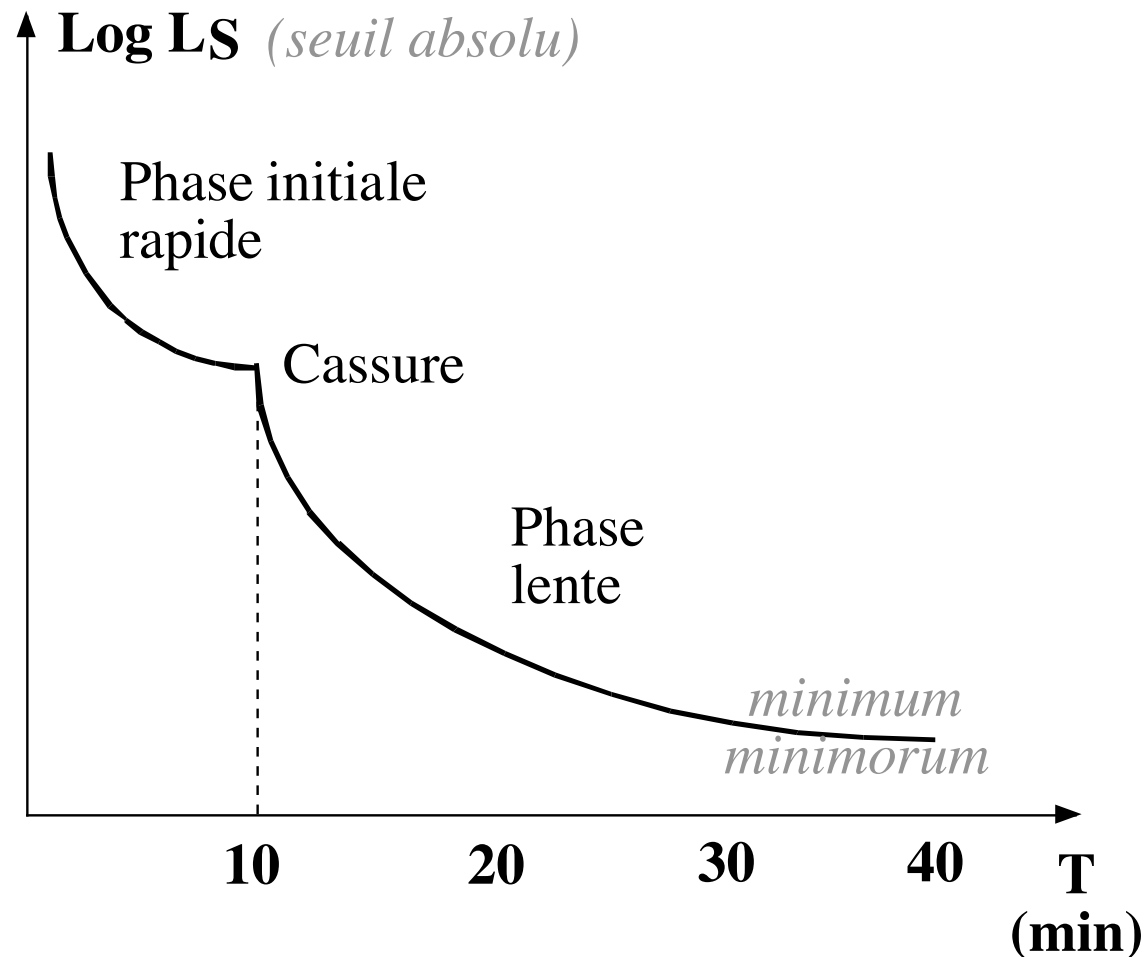
Expérience 1

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Luminance
Expériences de Hecht

Plage **large** éclairée en lumière **blanche**.

- Phase initiale d'adaptation rapide
- Phase plus lente qui tend vers le minimum minimorum

Vision large
en lumière blanche

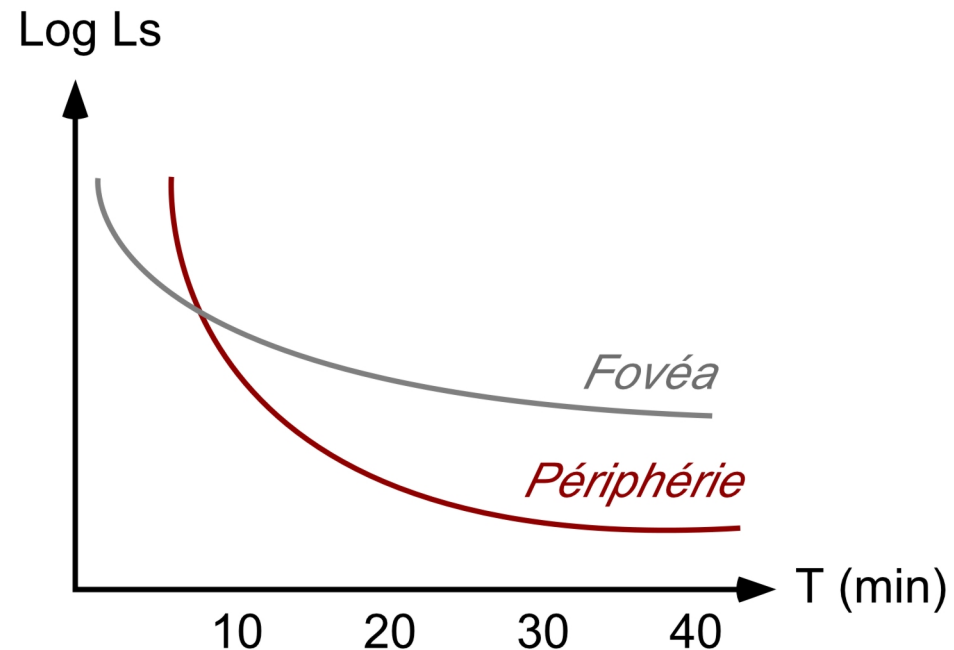


Expérience 2

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Luminance
Expériences de Hecht

- Plage **étroite** éclairée en lumière **blanche**.
- 2 courbes distinctes (fovéale et périphérique) :
 - Cônes (fovéa) : adaptation rapide mais incomplète
 - Bâtonnets (périphérie) : adaptation plus lente mais plus complète
- La fovéa est donc plus sensible que la périphérie à forte luminance et beaucoup moins sensible à faible luminance.

Vision étroite
en lumière blanche

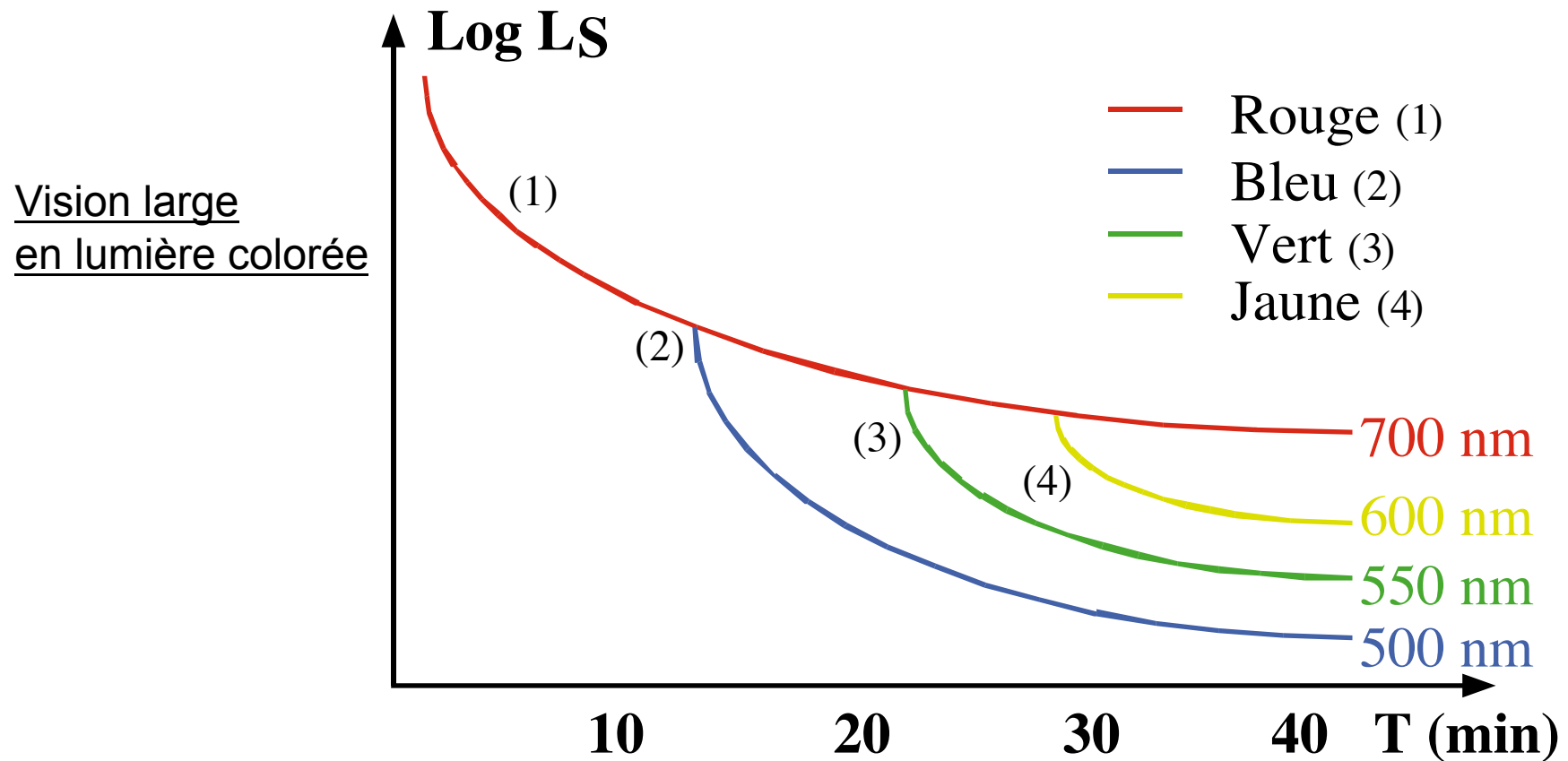


Expérience 3

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Luminance
Expériences de Hecht

Plage **large** éclairée en lumière **chromatique**.

- pas de cassure pour le rouge
- pour les autres couleurs, cassure d'autant plus précoce que λ est petite.



Interprétation des expériences de Hecht

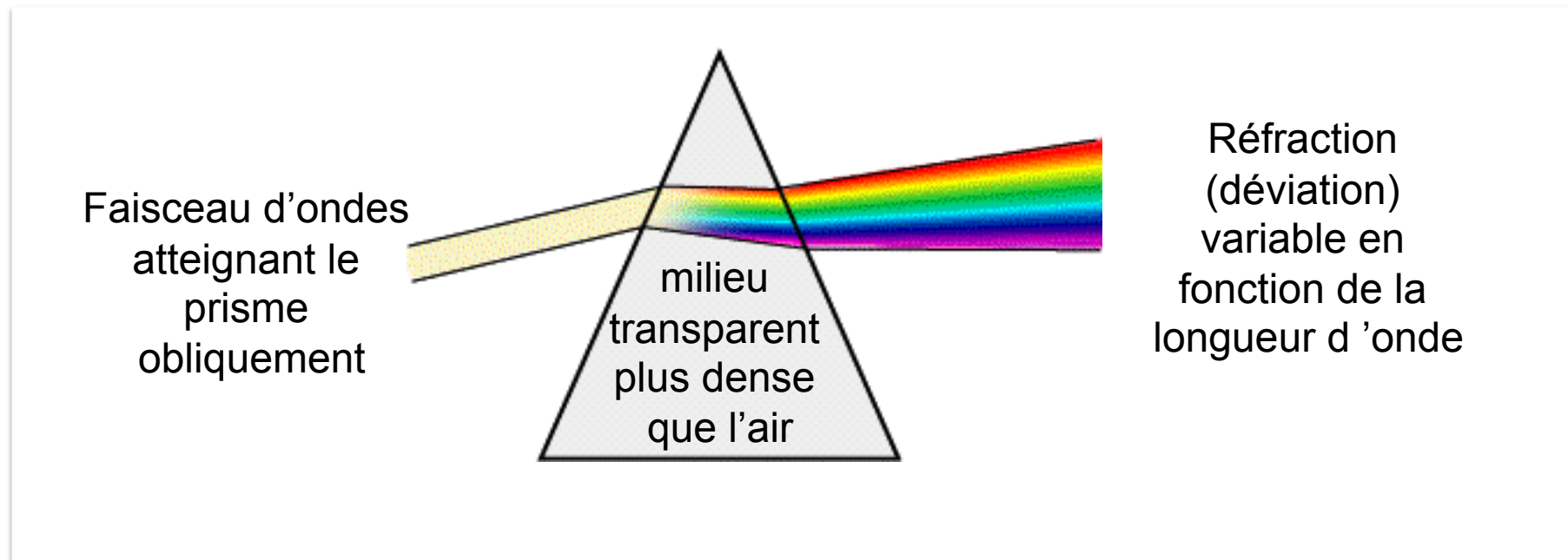
Le message sensoriel
Le système monochromatique
Luminance
Expériences de Hecht

- Comportements indépendant des cônes et des bâtonnets (2 courbes totalement individualisées)
- Rupture de pente = relais entre l'adaptation des cônes et celle des bâtonnets.
- Les bâtonnets :
 - vision scotopique
 - ne sont pas sensibles à la vision des couleurs
 - ne perçoivent que des contrastes de luminosité.
- Le rouge n'excite que les cônes (vision photopique) :
- la courbe obtenue en lumière rouge est superposable à celle de la fovéa en lumière blanche.

2.2 Couleurs et saturation

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Couleurs et saturation

Dispersion de la lumière blanche par un prisme



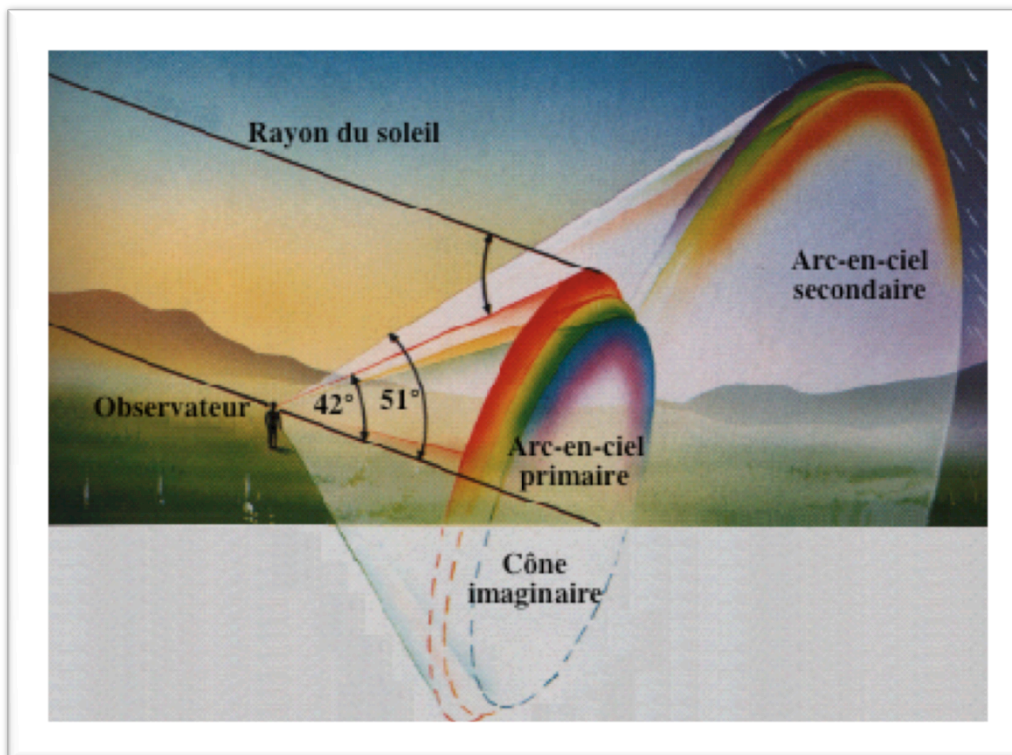
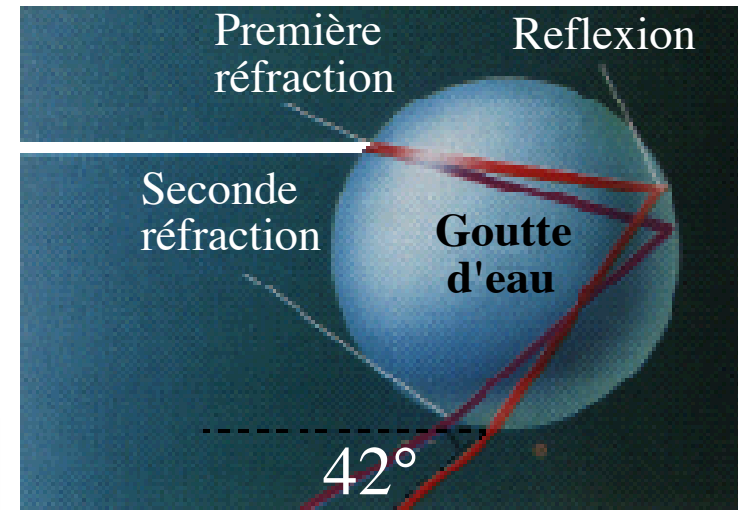
Donc....séparation de la lumière solaire !

2.2 Couleurs et saturation (suite)

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Couleurs et saturation

L'arc en ciel

Trajet de la lumière



2.2 Couleurs et saturation (suite)

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Couleurs et saturation

= Qualités chromatiques de la trivariance visuelle

2.2.1. Classement des couleurs : sensation de tonalité et saturation

- **6 couleurs fondamentales**

violet, bleu, vert, jaune, orangé, rouge.

soit environ 200 couleurs spectrales selon λ .

- **Pourpres** : environ 200 échelons de pourpre

- **Teintes rabattues** :

Obtenues par contraste avec une couleur de forte luminance

exemples : Brun / Orange , Gris / Blanc

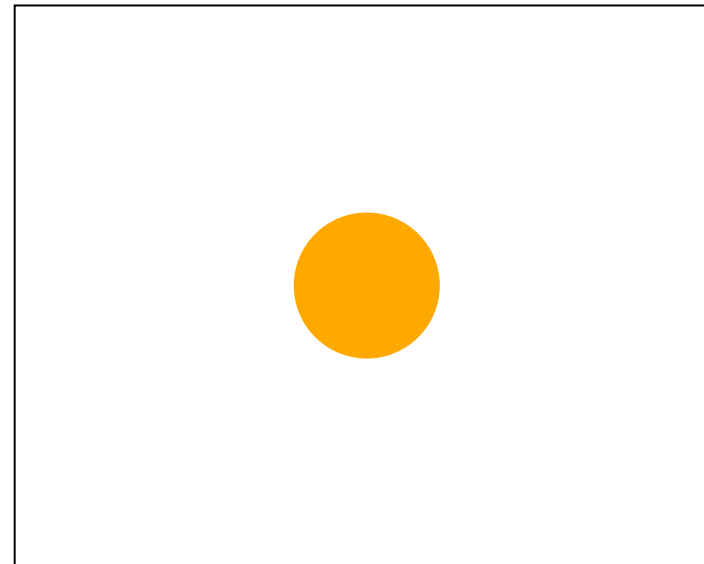
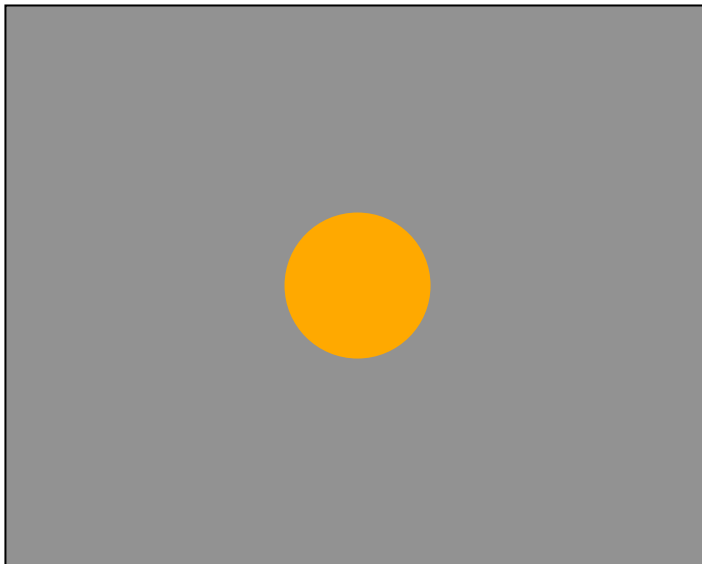
Soit au total **17000 teintes**
(mélange de lumières monochromatiques).

2.2 Couleurs et saturation (suite)

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Couleurs et saturation

- Teintes rabattues :

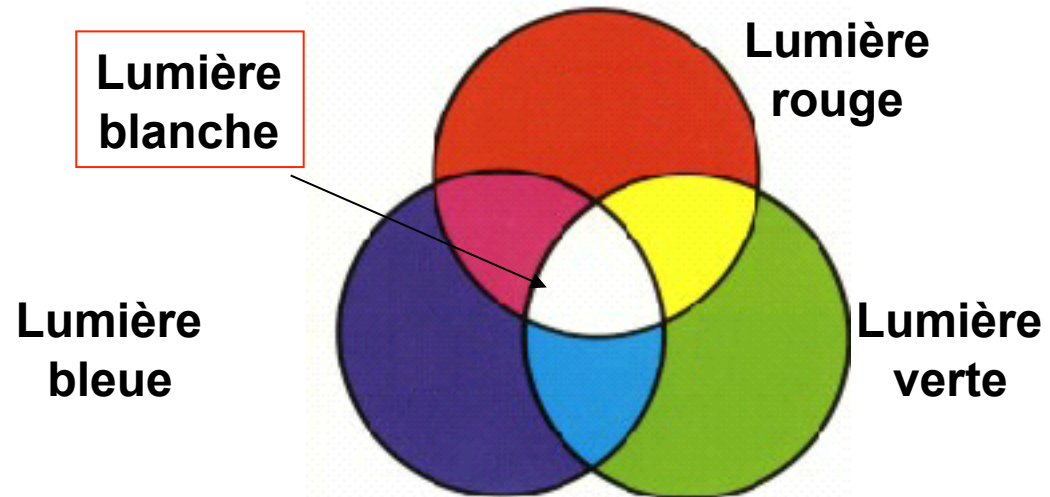
Obtenues par contraste avec une couleur de forte luminance
exemples : Brun / Orange , Gris / Blanc



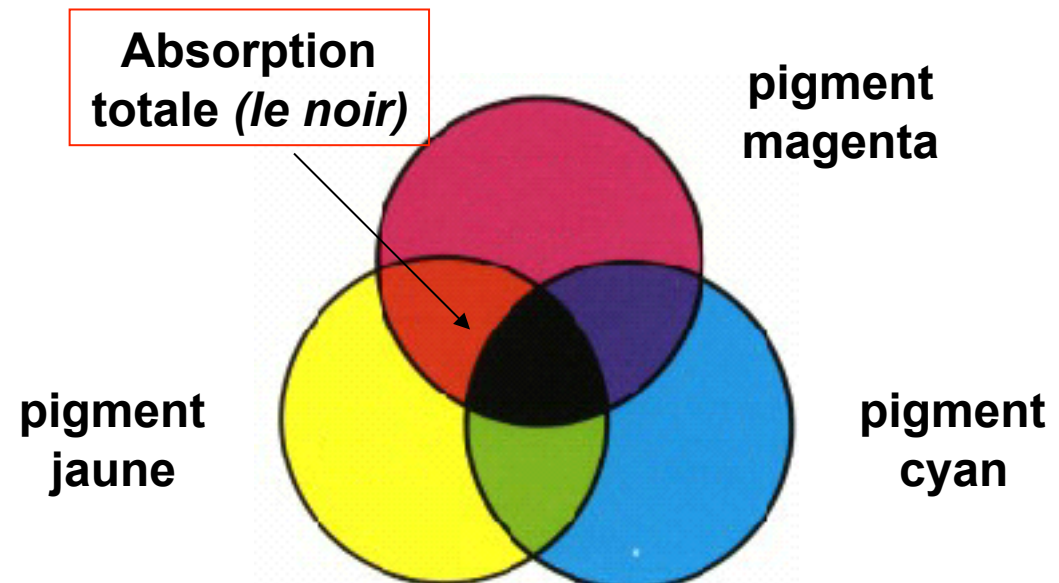
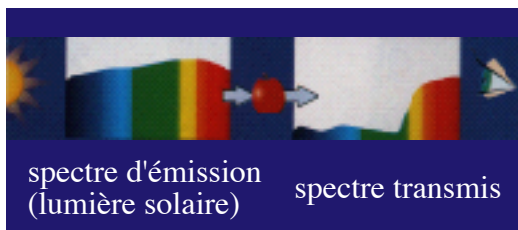
2.2 Couleurs et saturation (suite)

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Couleurs et saturation

Les mélanges additifs



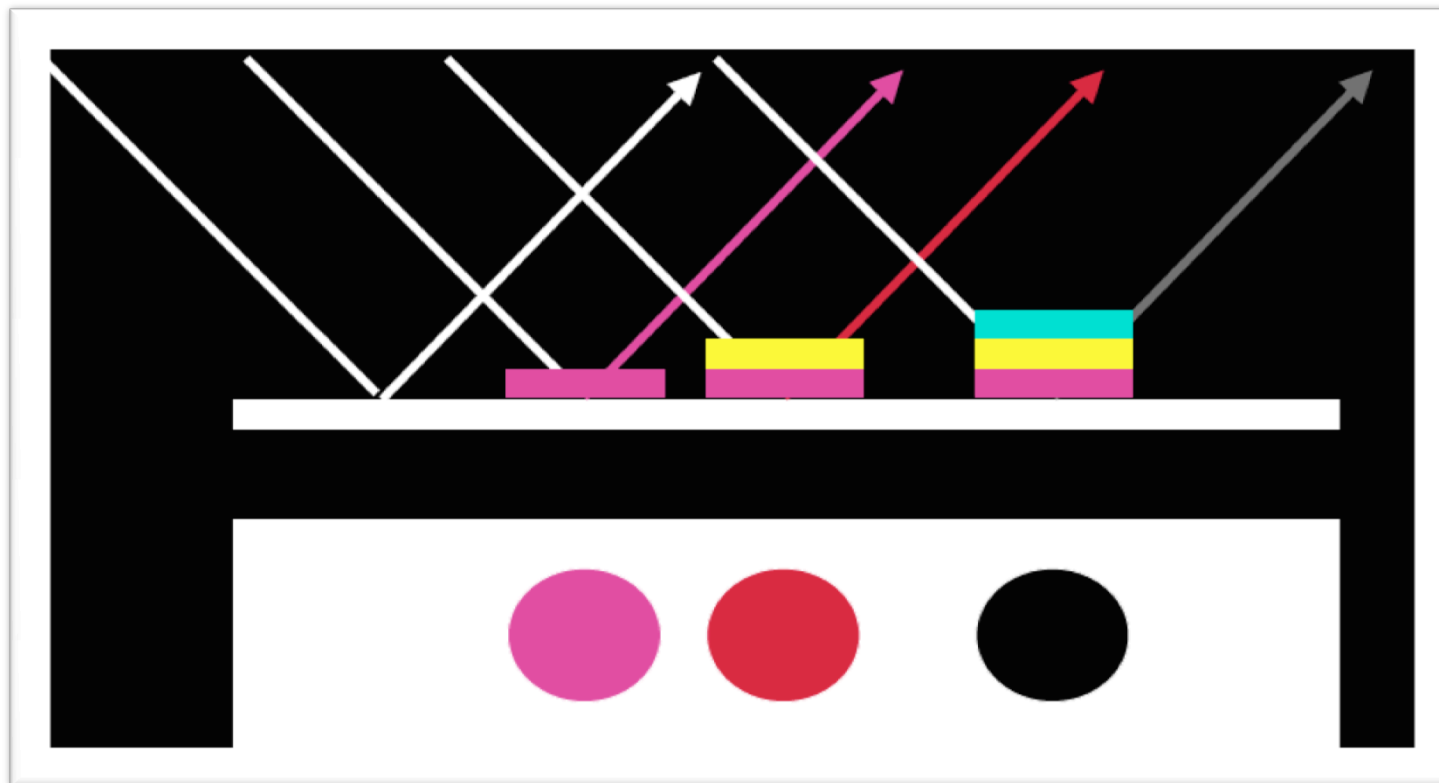
Les mélanges soustractifs



2.2 Couleurs et saturation (suite)

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Couleurs et saturation

Couleurs soustractives : impression du papier



2.2 Couleurs et saturation (suite)

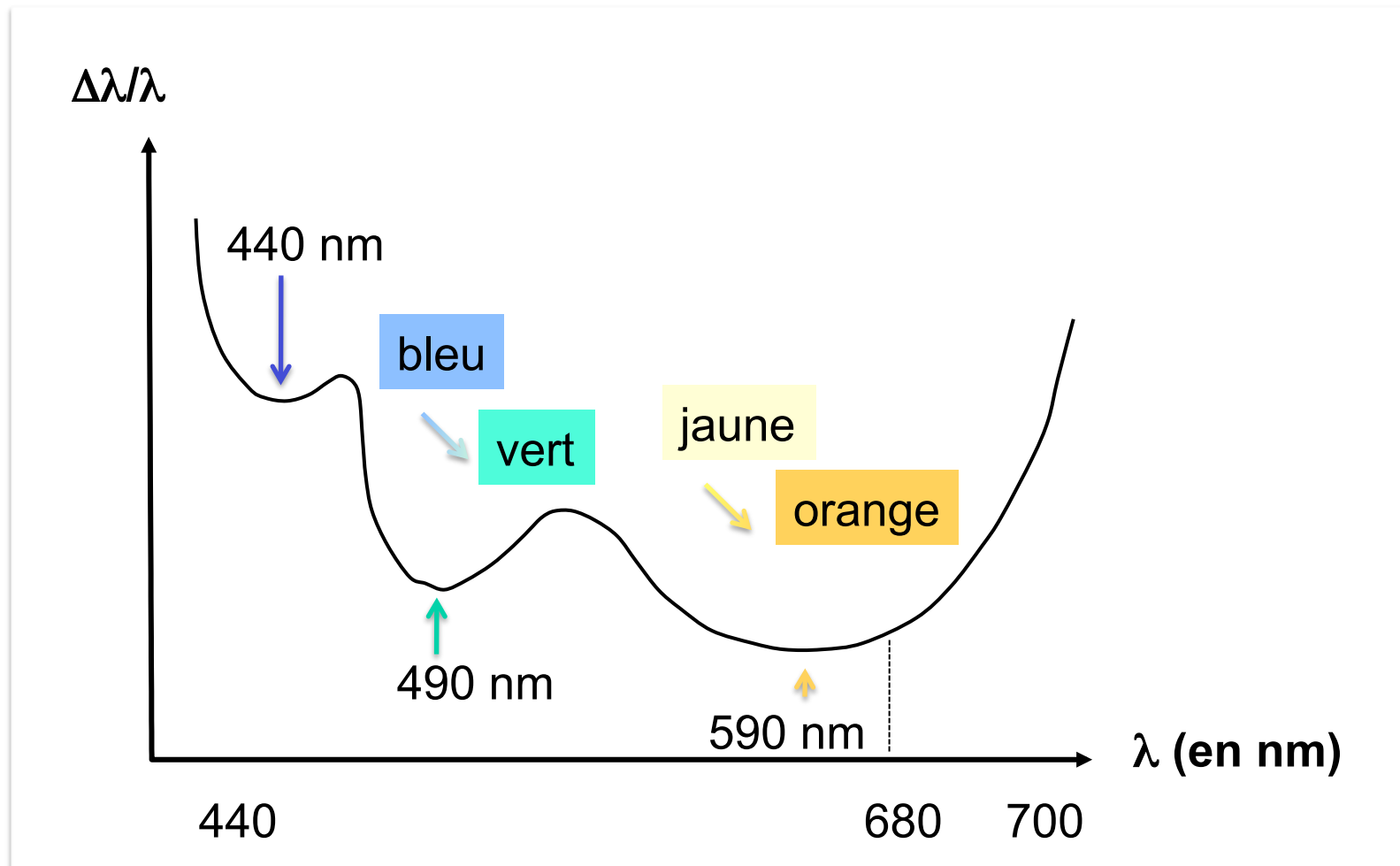
Le message sensoriel
Le système monochromatique
Couleurs et saturation

Couleurs	Longueur d'ondes (nm)
Violet	390 - 455
Bleu	455 - 492
Vert	492 - 577
Jaune	577 - 597
Orangé	597 - 622
Rouge	622 - 780

2.2.2 Sensibilité différentielle le long du spectre

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Couleurs et saturation

= plus petite différence $\Delta\lambda/\lambda$ de tonalité



2.2.3 Couleurs désaturée

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Couleurs et saturation

Couleurs désaturée = délavées de blanc

Équation colorimétrique fondamentale :

$$L = L_{\lambda} + L_W$$

Avec L : Luminance de la lumière complexe
 L_{λ} : Luminance de la lumière colorée
 L_W : Luminance de la lumière blanche

Sensation colorée trivariante car dépend de :

- la luminance de la sensation (intensité).
- la longueur d'onde dominante de la sensation.
- le facteur de pureté p (saturation).

2.2.4 Pourpres et couleurs complémentaires

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Couleurs et saturation

- Superposition 2 lumières monochromatiques λ_1 et λ_2 .
 - La sensation visuelle résultante : $L = L_{\lambda_1} + L_{\lambda_2}$
 - dépend de l'écart entre λ_1 et λ_2 : $\Delta\lambda$
- 1 • Sensation = couleur blanche :
les 2 lumières sont **complémentaires**.
- 2 • $\Delta\lambda < \Delta\lambda$ de 2 complémentaires : tonalité d'une couleur spectrale (dont la longueur d'onde est dite dominante).
- 3 • $\Delta\lambda > \Delta\lambda$ de 2 complémentaires : **tonalité pourpre**.
exemple : Pourpres = rouge + violet

Pourpres et verts sont complémentaires

2.3 Lois de Grassman

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Lois de Grassman

$$L = L_1 + L_W \text{ ou } L = L' \quad (1)$$

- L'égalité de 2 sensations lumineuses correspond à leur indiscernabilité par l'œil humain.

Première loi de Grassman

$$kL = kL' \quad (2)$$

- L'addition de 2 sensations lumineuses correspond à leur superposition.

Deuxième loi de Grassman

$$L + L'' = L' + L'' \quad (3)$$

2.3 Lois de Grassman (suite)

Le message sensoriel
Le système monochromatique
Lois de Grassman

- Validité des lois de Grassman

œil normal au repos
vision diurne
pas de teintes rabattues

- Notion de soustraction

Si $L_W = L_{\lambda_2} + L_{\lambda_1}$ alors $L_{\lambda_1} = L_W - L_{\lambda_2}$

Par extension :

$$L_{\text{pourpre}} = L_W - L_{\lambda_{\text{vert}}}$$

III - SYSTEME POLYCHROMATIQUE : SYNTHESE TRICHROME

Le message sensoriel
Le système polychromatique

- Sensation colorée = superposition des 3 couleurs primaires.

$$L = L_R + L_V + L_B \quad (4)$$

λ Rouge = 700 nm

λ Vert = 546 nm

λ Bleu = 436 nm

- L'addition de 2 primaires ne peut pas produire la troisième.
- L'addition des 3 primaires peut supprimer la sensation colorée (blanc).
- Le mélange trichrome est toujours moins saturé que la couleur qu'il veut reproduire.

$$L_\lambda + L_W = L_R + L_V + L_B \quad (5)$$

3.1 Espace chromatique

Le message sensoriel
Le système polychromatique
Espace chromatique

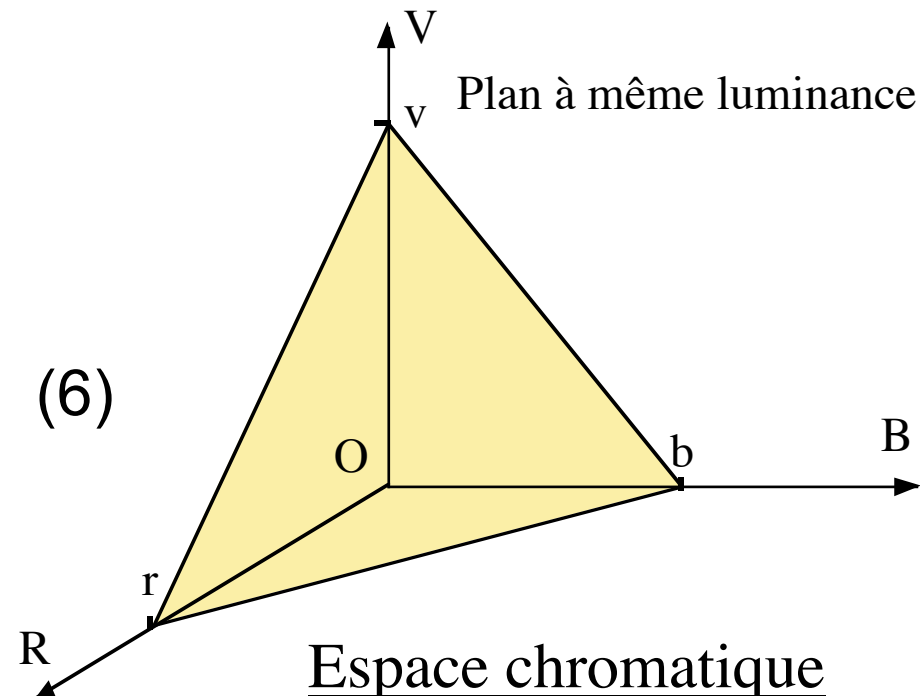
- Espace à 3 dimensions.
- 3 axes correspondant aux 3 primaires.
- Sur chaque axe, on reporte la luminance de la primaire.
- A chaque point de cet espace correspond une lumière égale à la somme des coordonnées de ce point (L_R , L_V , L_B).

Loi de Grassman

$$L_R + L_V + L_B = L_\lambda + L_W$$

$$kL_R + kL_V + kL_B = kL_\lambda + kL_W$$

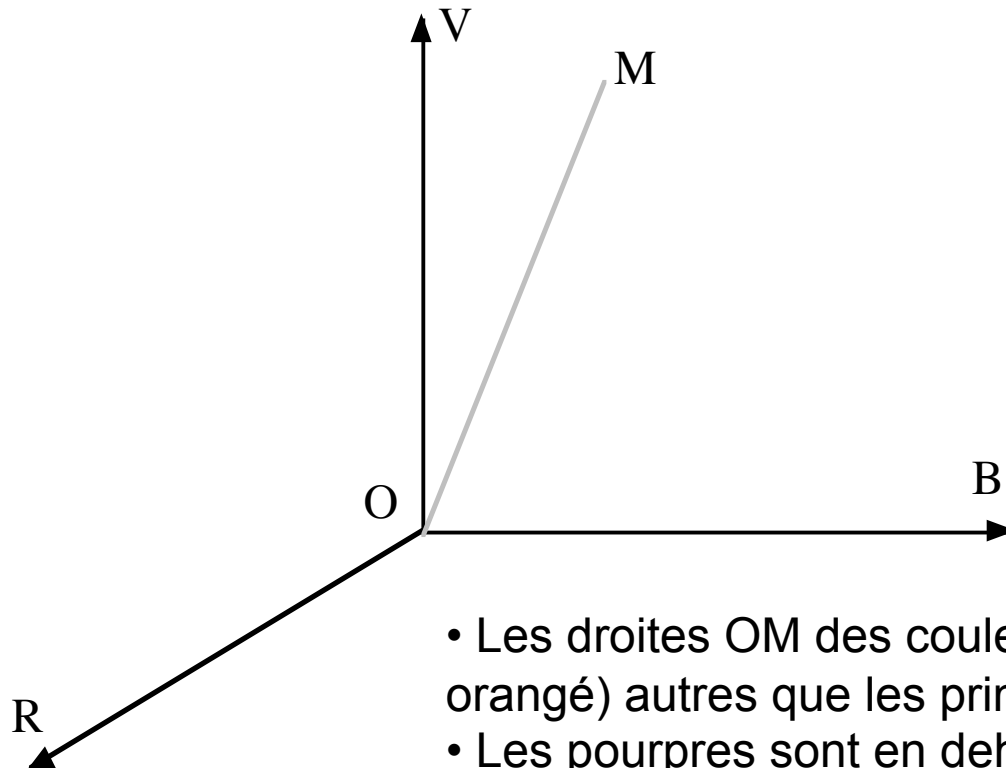
(6)



3.1 Espace chromatique (suite)

Le message sensoriel
Le système polychromatique
Espace chromatique

- Tous les points d'une même droite OM passant par l'origine:
 - mêmes qualités chromatiques (tonalité et saturation)
 - mais luminance \neq
- A chaque lumière spectrale correspond une droite OM.

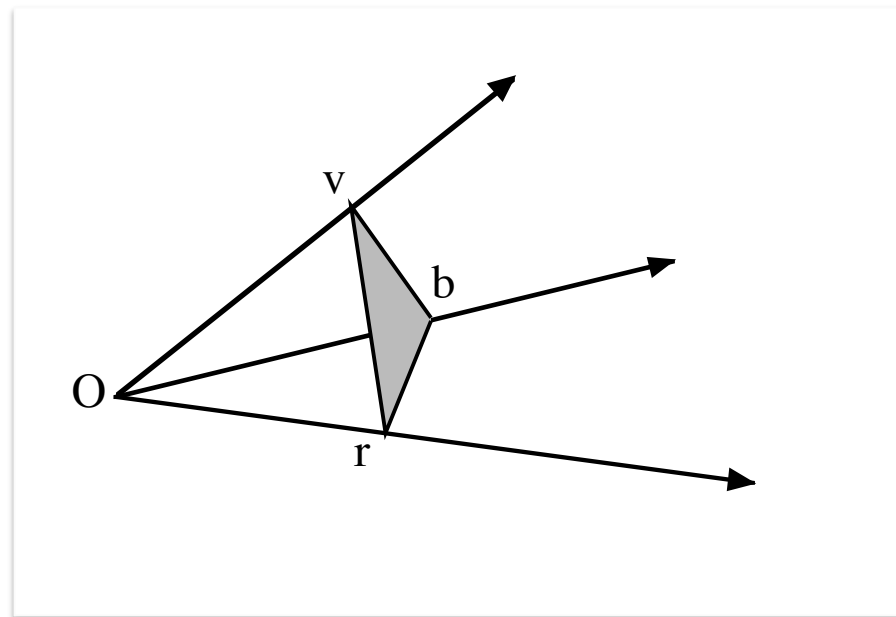


- Les droites OM des couleurs spectrales (violet, jaune, orangé) autres que les primaires, sont en dehors du trièdre.
- Les pourpres sont en dehors du trièdre.

3.2. Triangle des couleurs

Le message sensoriel
Le système polychromatique
Triangle des couleurs

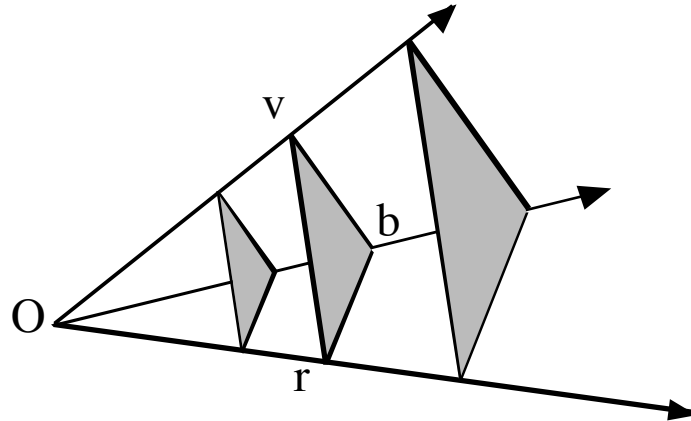
Il permet le passage de l'espace 3D à un plan 2D (triangle)
Un triangle des couleurs pour chaque valeur de luminance.



Points du triangle rvb : même luminance

3.2. Triangle des couleurs (suite)

Le message sensoriel
Le système polychromatique
Triangle des couleurs



Points du triangle rvb : même luminance

- Sur chacun des triangles, un même point correspond à 2 sensations de même couleur (tonalité et saturation).
- Un point est caractérisé à l'aide de 3 grandeurs : les coefficients trichromatiques (I_R , I_V et I_B) :
= contributions respectives des 3 primaires à la couleur

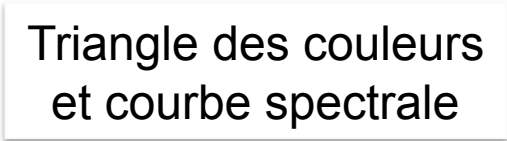
$$I_R = L_R / L_R + L_V + L_B \quad (7)$$

$$I_V = L_V / L_R + L_V + L_B \quad (8)$$

$$I_B = L_B / L_R + L_V + L_B \quad (9)$$

$$I_R + I_V + I_B = 1 \quad (10)$$

3.2. Triangle des couleurs (suite)



Couleurs complémentaires = positions opposées.

- ex : verts complémentaires des pourpres

Les droites joignant les complémentaires passent par W.

Blanc (W) : à l'intérieur du triangle mais très excentré.

Courbe spectrale : en dehors du triangle des couleurs.

= courbe de toutes les couleurs saturées.

3.2 Triangle des couleurs (suite)

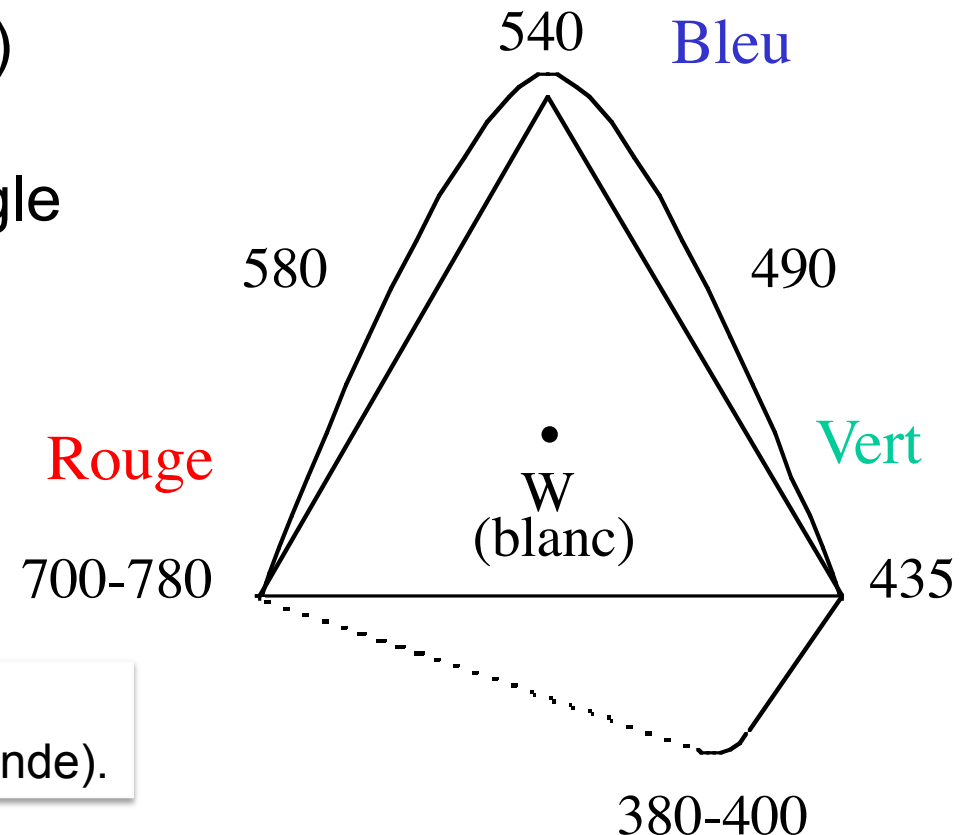
Le message sensoriel
Le système polychromatique
Triangle des couleurs

Couleurs complémentaires = positions opposées.
En modifiant les unités des axes des 3 primaires, tel que les coefficients trichromatiques de W soient :

$$I_R = I_V = I_B = 1/3 \quad (11)$$

W = centre de gravité du triangle

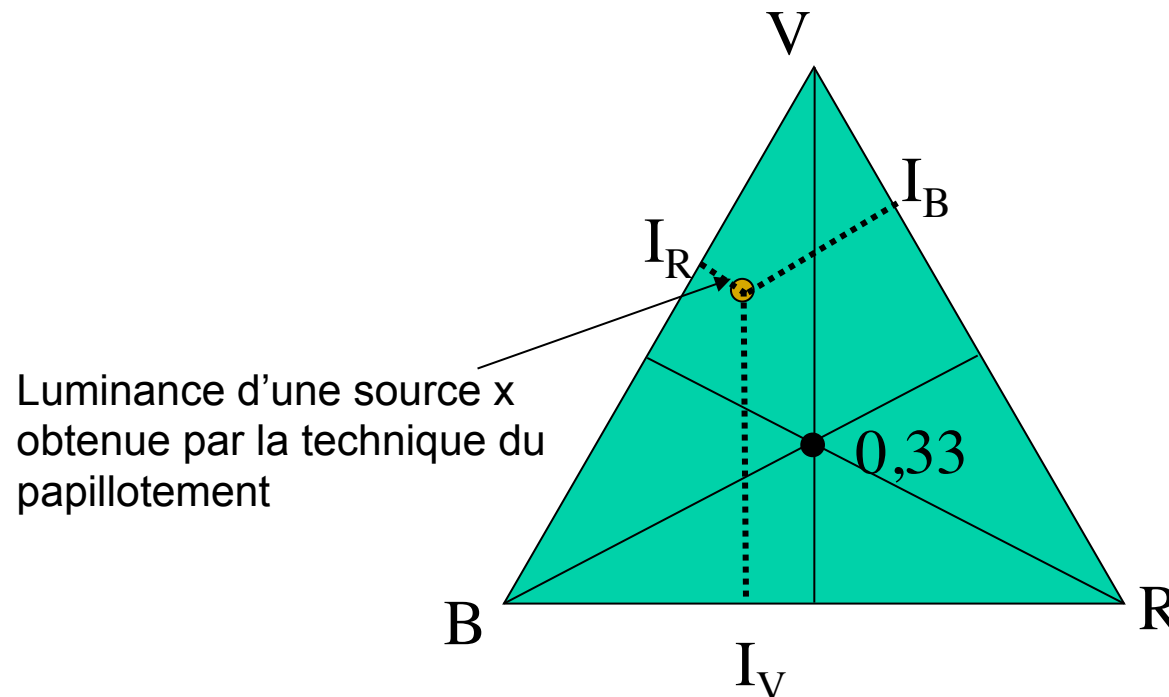
Triangle des couleurs modifié
(tonalités données par leur longueur d'onde).



3.2 Triangle des couleurs (suite)

Le message sensoriel
Le système polychromatique
Triangle des couleurs

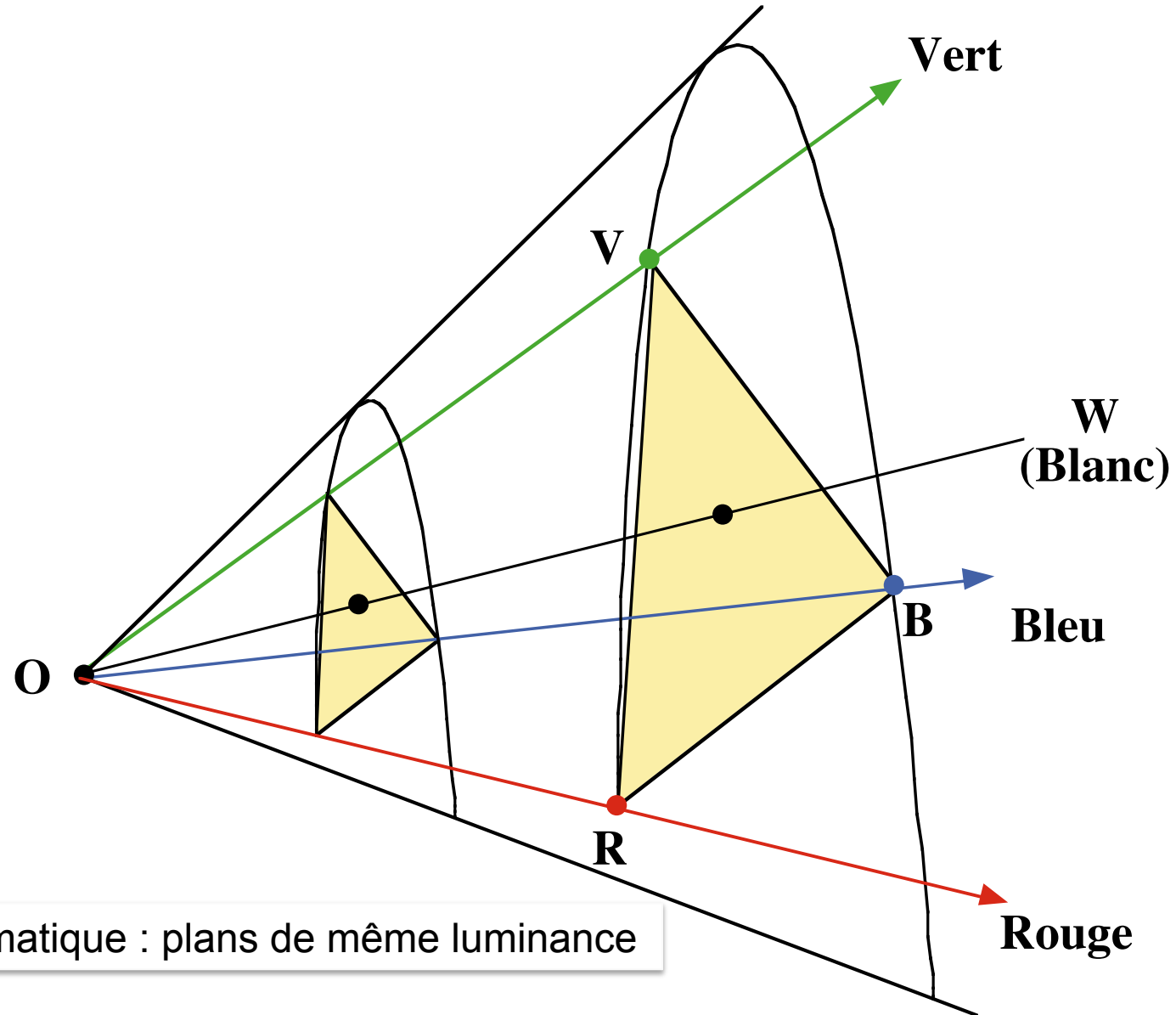
Pour normaliser le triangle des couleurs, et placer le blanc au centre de gravité du triangle, on a affecté un coefficient pondérateur à la luminance mesurée pour les lumières primaires :



$$\begin{aligned}k_R &= 1 \\k_V &= 4,6 \\k_B &= 0,06\end{aligned}$$

3.2. Triangle des couleurs

Le message sensoriel
Le système polychromatique
Triangle des couleurs



Espace chromatique : plans de même luminance

3.2. Triangle des couleurs

Le message sensoriel
Le système polychromatique
Triangle des couleurs

Diagramme de la Commission
internationale de l'éclairage

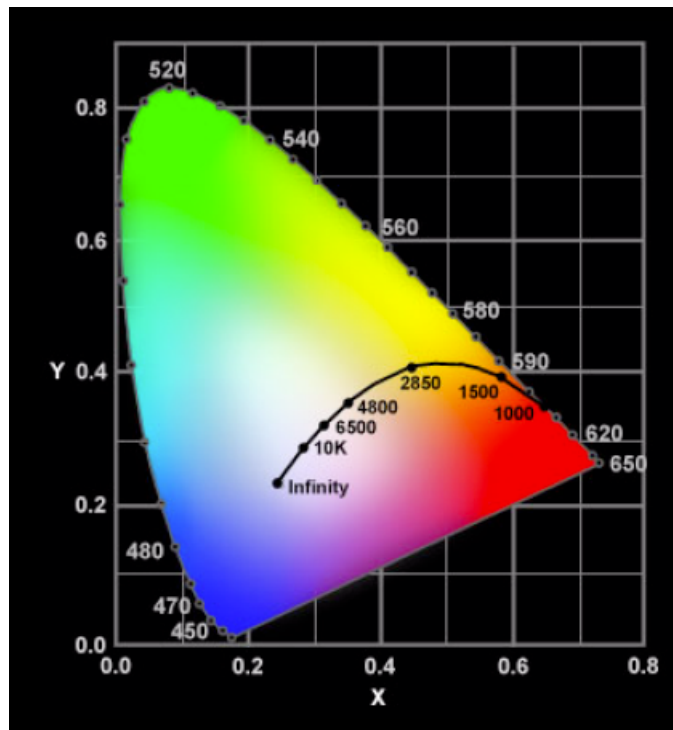
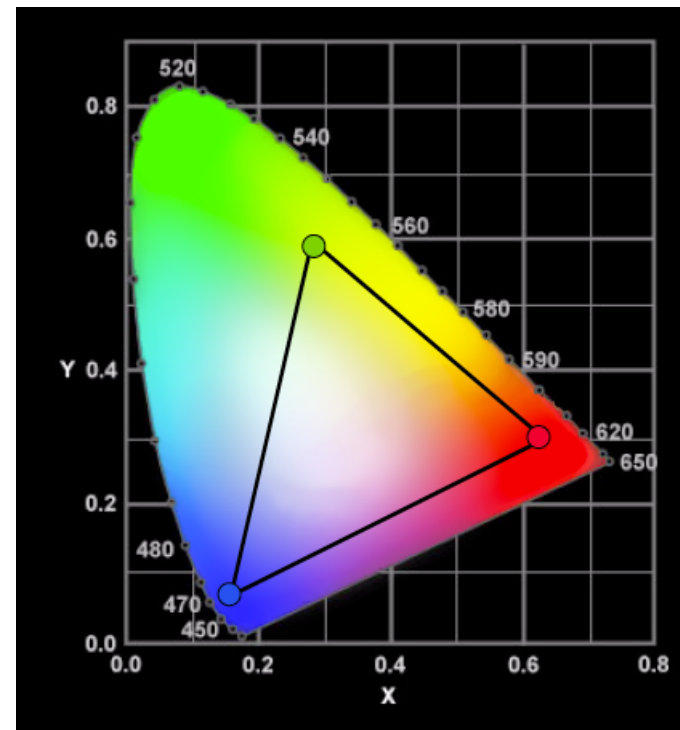


Diagramme de la CEI
Chromophores PAL/SECAM



3.3. Triangle des couleurs Test d'Ishihara

Le message sensoriel
Le système polychromatique
Triangle des couleurs



- Ce test a été inventé en 1917 par Shinobu Ishihara
 - Recueil de 38 planches utilisé pour dépister les anomalies de la vision des couleurs.
 - Il permet de détecter toutes les déficiences dyschromatiques sauf la tritanopie et la trianomalie, (très rares).
 - test est exclusivement qualitatif
 - Très performant
- Règles d'utilisation
 - Une correction optique en verres non teintés
 - L'éclairage par lampe fluorescente ou simplement par la lumière du jour

3.3. Triangle des couleurs Test d'Ishihara

Le message sensoriel
Le système polychromatique
Triangle des couleurs

- Vous devez voir des numéros dans les 2 figures ci-dessous !
- Si vous n'en voyez pas, c'est que vous êtes porteur d'une **dyschromatopsie** (anomalie de la vision des couleurs, qui se retrouve chez 8% des garçons).

