



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

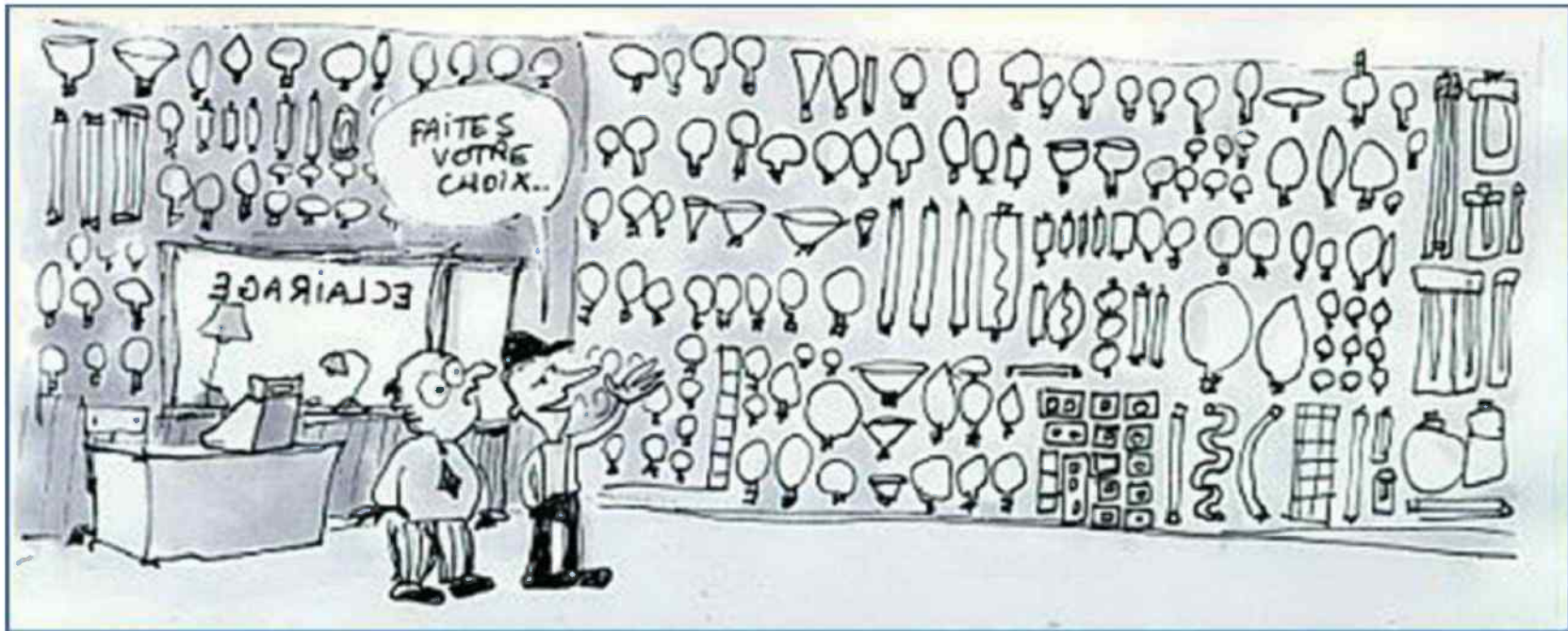
Eidgenössisches Institut für Metrologie METAS



# Les systèmes d'éclairages, de la chandelle aux LEDs

Dr Peter Blattner METAS

# Faites votre choix ...



# Contenu

- METAS
- L'histoire de la Candela
- Les quantités et unités photométriques
- Les LEDs
- Les effets photo-biologiques de la lumière

## Tâches et activités de METAS



L'Institut fédéral de métrologie (METAS) est l'institut national de métrologie de la Suisse.

Au niveau national, les instituts de métrologie sont chargés de la dissémination des unités de mesure et du raccordement de l'infrastructure métrologique au système d'unités.

METAS réalise les étalons nationaux de référence, veille à leur reconnaissance internationale et les transmet avec l'exactitude requise à la recherche, l'industrie et la société.



## Nos tâches



- Mise à disposition d'unités reconnues au niveau international avec l'exactitude requise.
- Comparaison des étalons avec d'autres instituts nationaux de métrologie

## Nos tâches



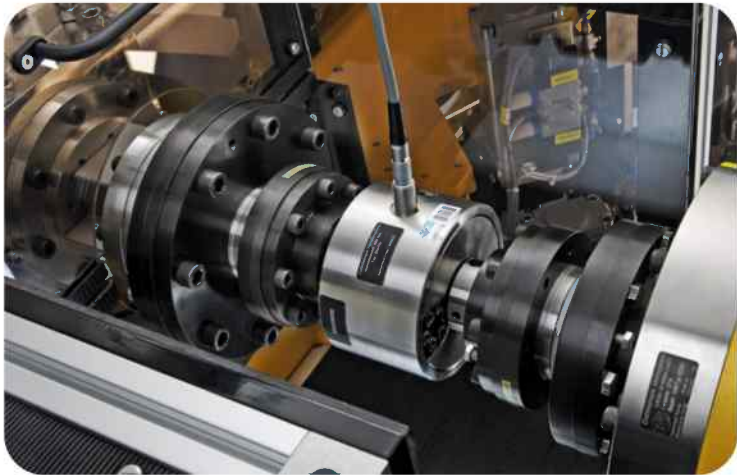
- Tâches de recherche et développement appliqué à la métrologie.
- But: évaluer les conséquences des nouvelles technologies et des techniques applicables pour offrir de nouvelles prestations en métrologie

## Nos tâches



- Dissémination de l'heure officielle en Suisse.

## Nos tâches



- Dissémination des unités par des étalonnages.
- Conseils, formation et expertises.



# Nos tâches



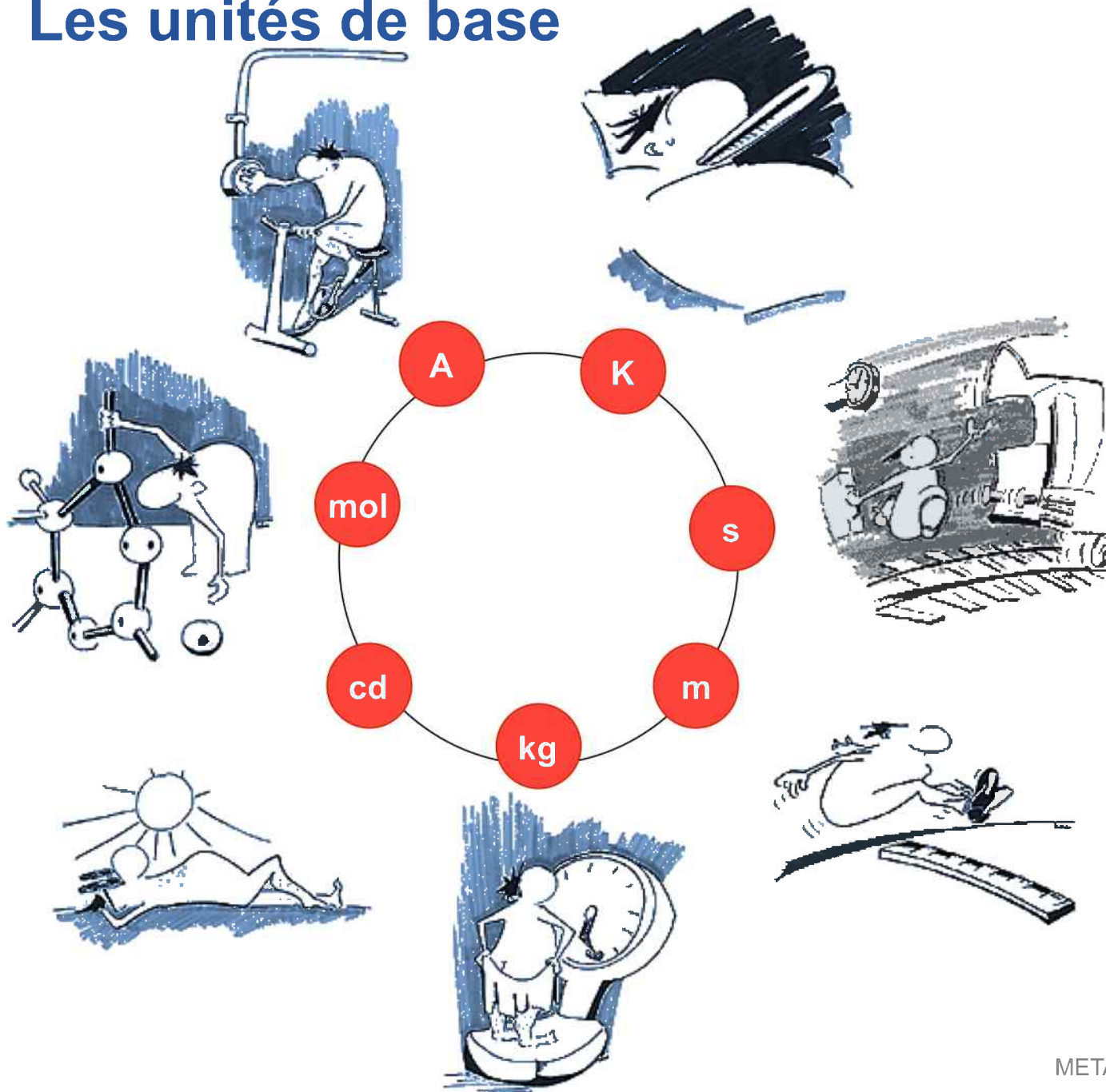
- Evaluation des instruments de mesure en vue de leur mise sur le marché.
- Décision concernant leur approbation (évaluation de la conformité)

# Collaborateurs



- 156 (182) collaborateurs
- 12 apprenants (5 domaines)
- Stagiaires
- 31% universitaires
- 9 % femmes
- 24 % francophones

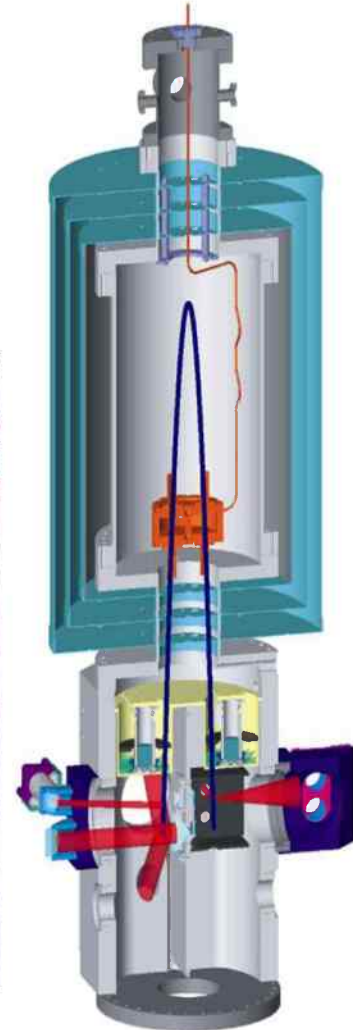
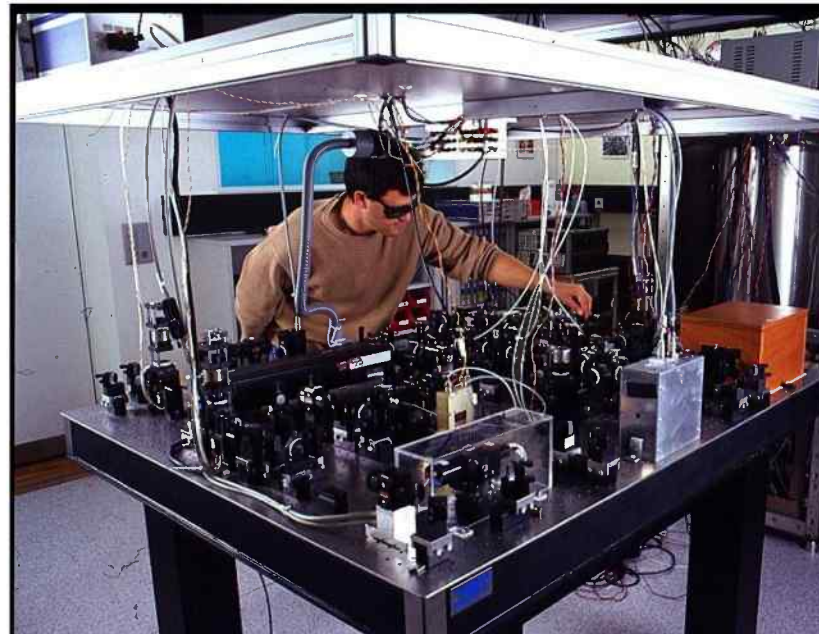
# Les unités de base



## La seconde

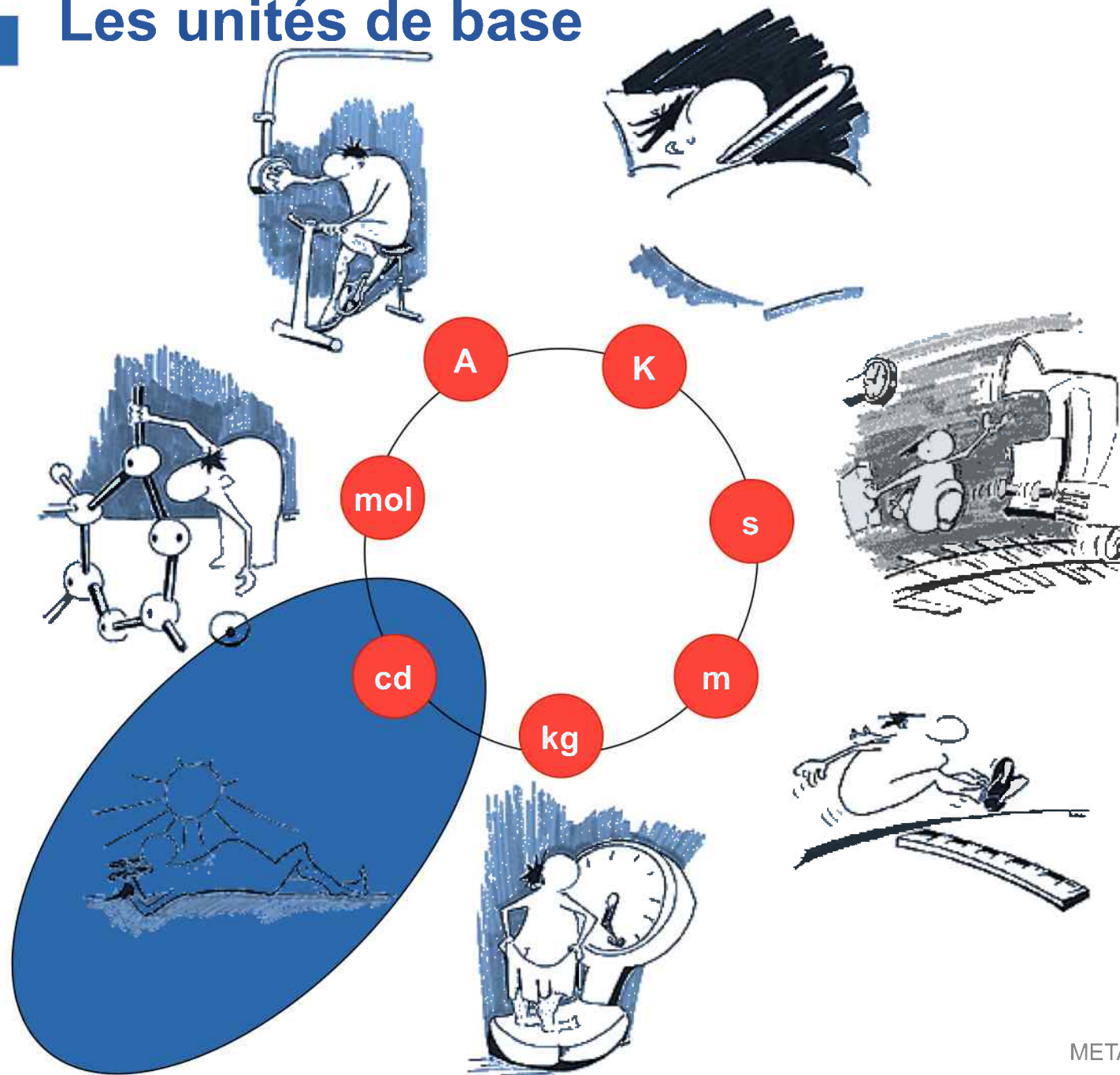
### Constantes naturelles – les nouveaux étalons: De la rotation terrestre à l'horloge atomique

La seconde (s) est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.





# Les unités de base





# L'histoire de la Candela



INTERNATIONAL  
YEAR OF LIGHT  
2015

Plusieurs génies ont étudiés les lois de la lumière, i.e.:

Euclides (300 av. J.-C.): loi de réflexion

Ptolemäos (150 av. J.-C.): la refraction

Ibn Al-Haytham (1015): camera obscura

Galileo (1564 – 1643): lentille, telescope

Kepler (1571-1630): telescope

Snellius (1580 – 1626): loi de refraction

Descartes (1596 – 1650): loi de refraction

Fermat (1608-1665): principe du chemin le plus court

Newton (1642 – 1727): optique physique

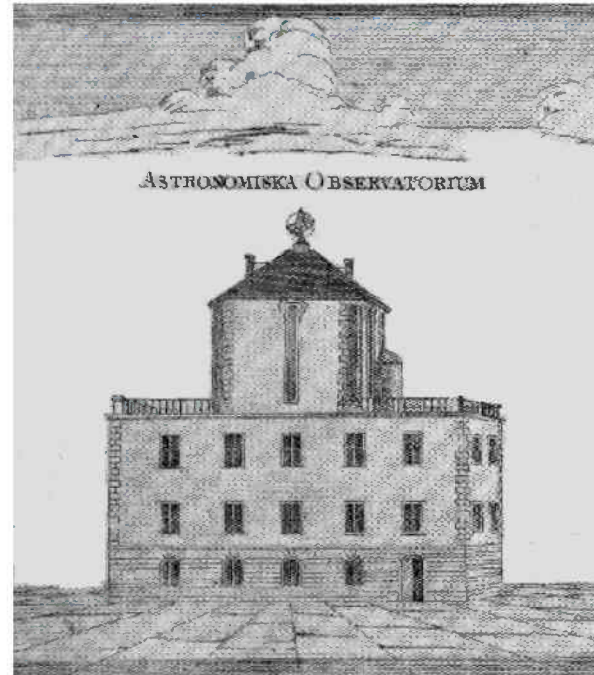
Huygens (1629 – 1695): optique ondulatoire

Mais personne essayaient de quantifier la lumière.

# Anders Celsius (1701 –1744)



wikipedia



- Celsius a fait de diverses observations astronomiques et a publiée des catalogues d'objets astronomiques y compris leur «magnitude» (clarté)

-> première échelle photométrique documentée

# Jean-Henri Lambert (1728 –1777)



## LAMBERT'S PHOTOMETRIE.

(PHOTOMETRIA SIVE DE MENSURA ET GRADIBUS  
LUMINIS, COLORUM ET UMBRAE).

(1760.)

Deutsch herausgegeben

von

E. Auling.

Erstes Heft:

Theil I und II.

Mit 35 Figuren im Text.

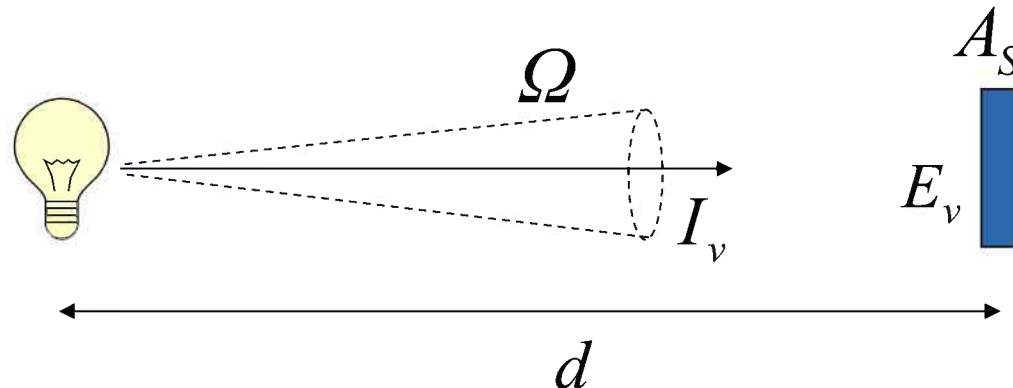
LEIPZIG

VERLAG VON WILHELM ENGELMANN

1892.

mathématicien, physicien et astronome alsacien du XVIIIe siècle, en fait suisse et allemand d'ascendance française, car né dans la république de Mulhouse, à l'époque une cité-État indépendante ayant des liens privilégiés avec la Confédération Helvétique.

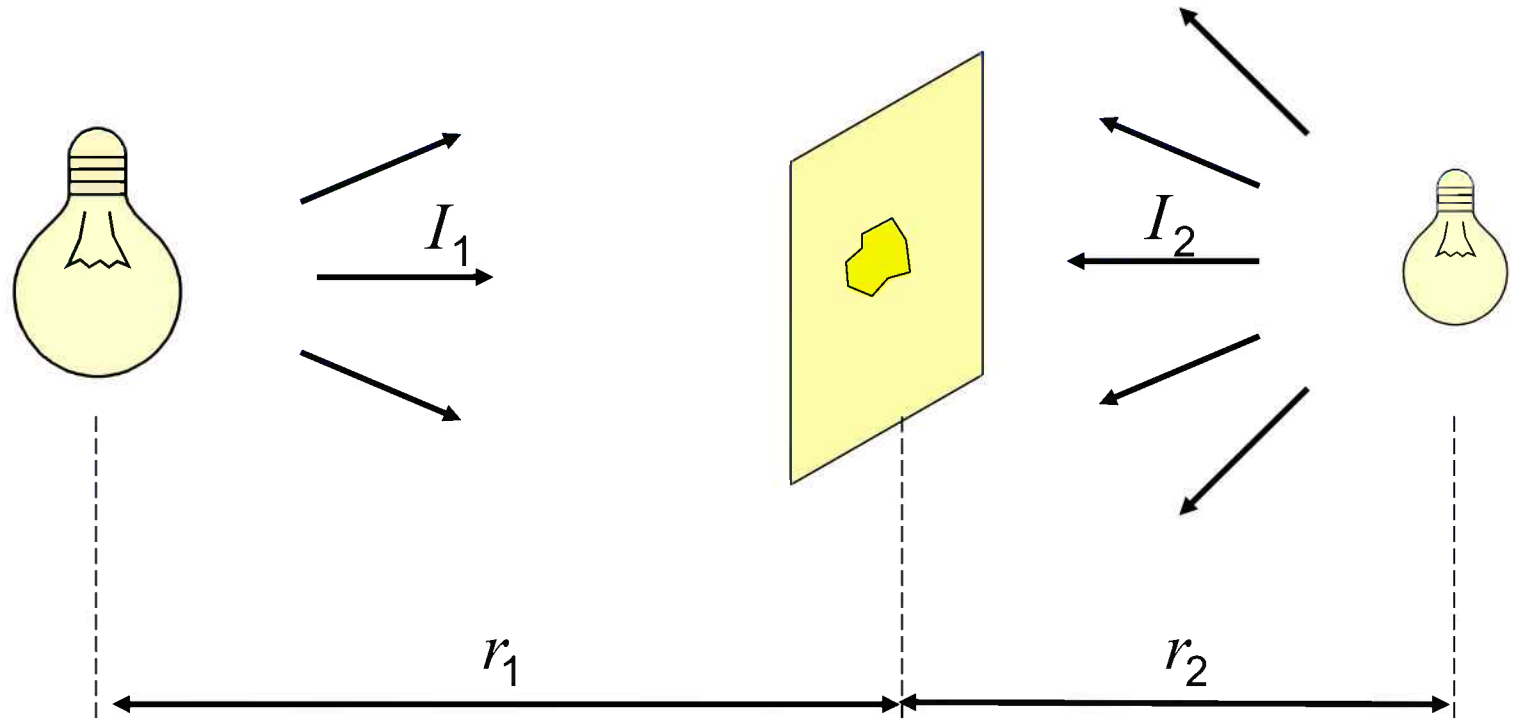
Diminution quadratique de l'éclairement, loi de distance



$$E_v = \frac{I_v}{d^2}$$

# Photomètre à tache de graisse (après Bunsen)

Papier buvard avec tache de graisse

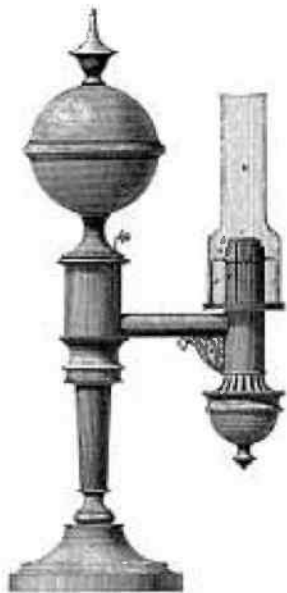


$$\frac{I_1}{r_1^2} = \frac{I_2}{r_2^2}$$

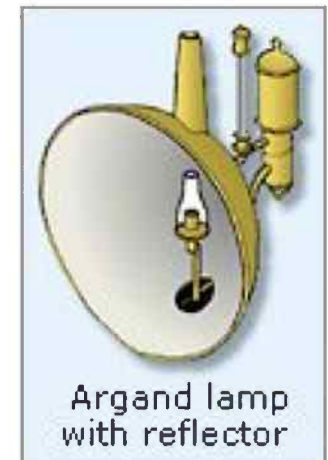
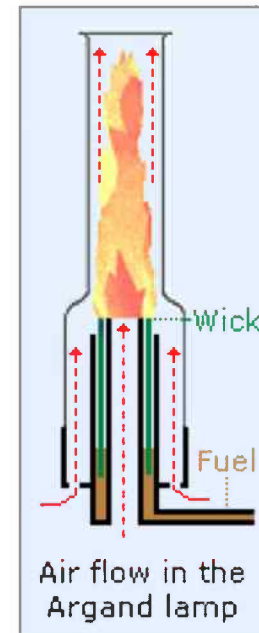
-> Il faut des sources de références dont on connaît l'intensité lumineuse

# La lampe Argand

Aimé Argand commençait à améliorer la lampe à huile en 1780. Il développait une lampe qui due à une mèche cylindrique et une cheminée de tôle (puis en verre) augmentait l'alimentation en oxygène. La flamme brûle à une température plus élevée et d'une façon plus propre.



Typical domestic lamp using Argand's principles



Grace à la lampe Argand les développements de la lampe de Carcel (France), de Lewis (US) et le bec de bunsen étaient possible

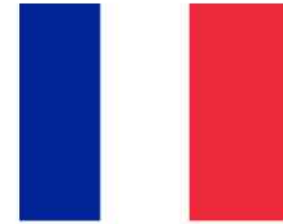


## Les premiers étalons nationaux

La bougie de Hefner  
(l'acétate d'amyle)



En Angleterre une "Candlepower" était définie en 1860 comme étant l'intensité d'une bougie à spermaceti qui brûlait 7,77 g blanc de baleine par heures



Lampe « Carcel »  
munie d'un bec de 10  
millimètres consommant 42  
grammes d'huile de colza  
par heure



# Candela Definition 1940-1979

La valeur de la **nouvelle bougie** est telle que l'intensité du radiateur à la température de solidification du platine soit de 60 bougies nouvelles par centimètre carré

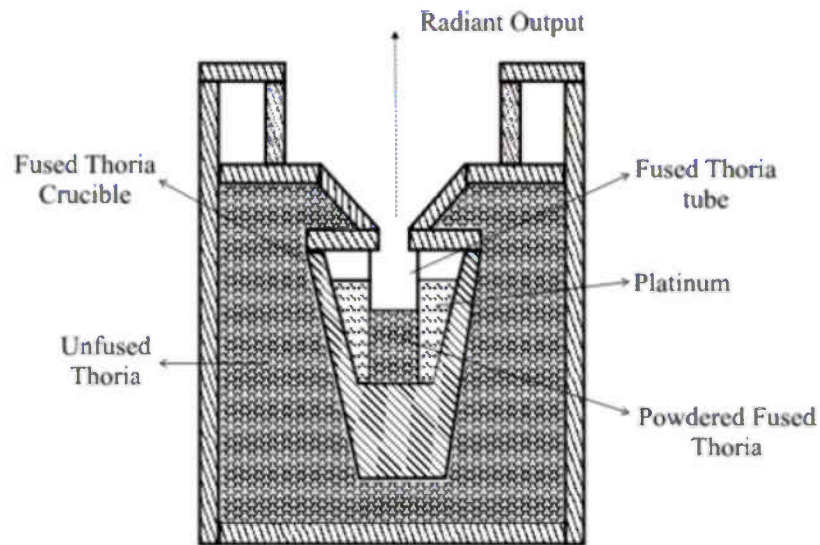
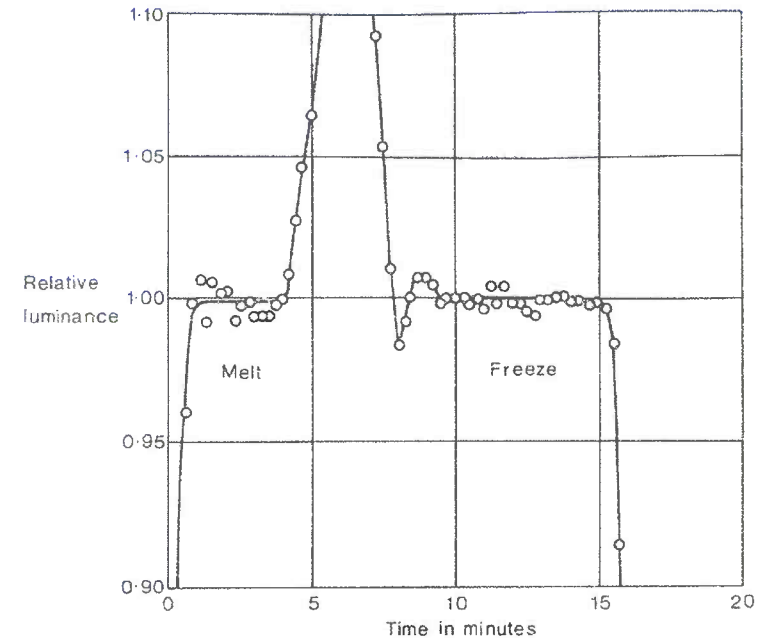


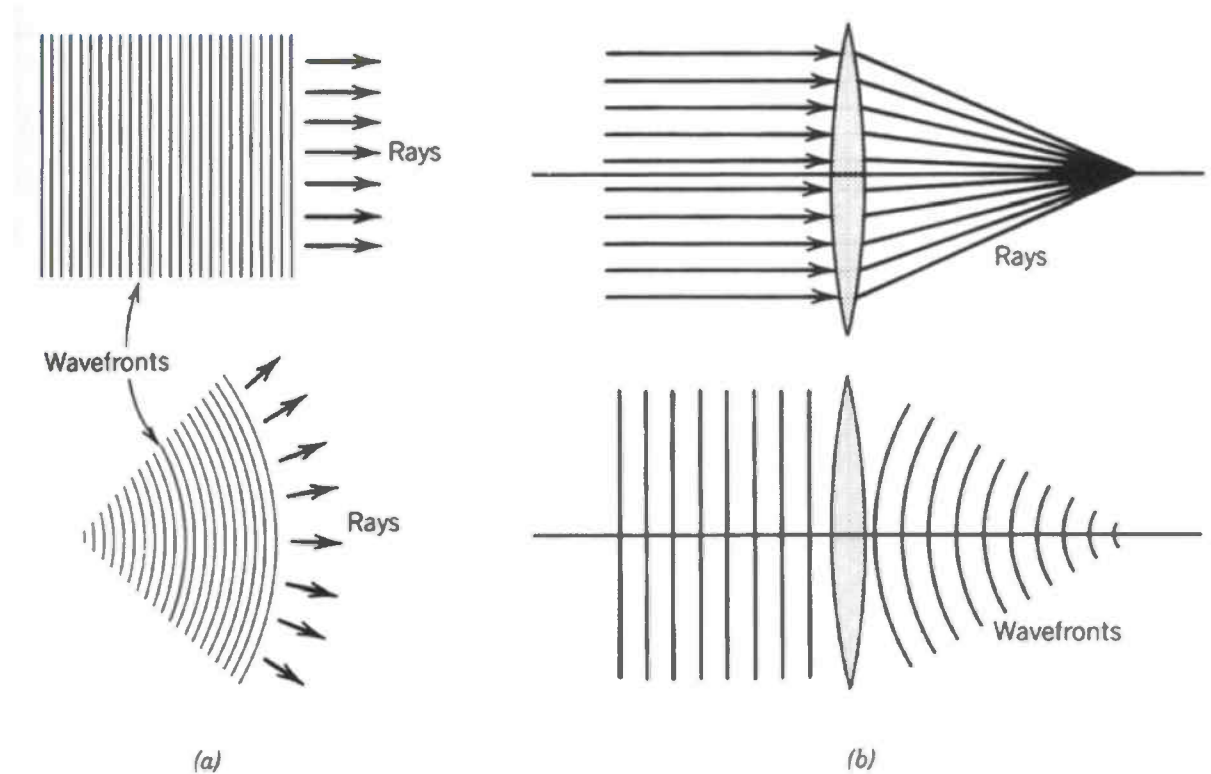
Fig 1. Primary Standard Of Light



# Aujourd'hui???

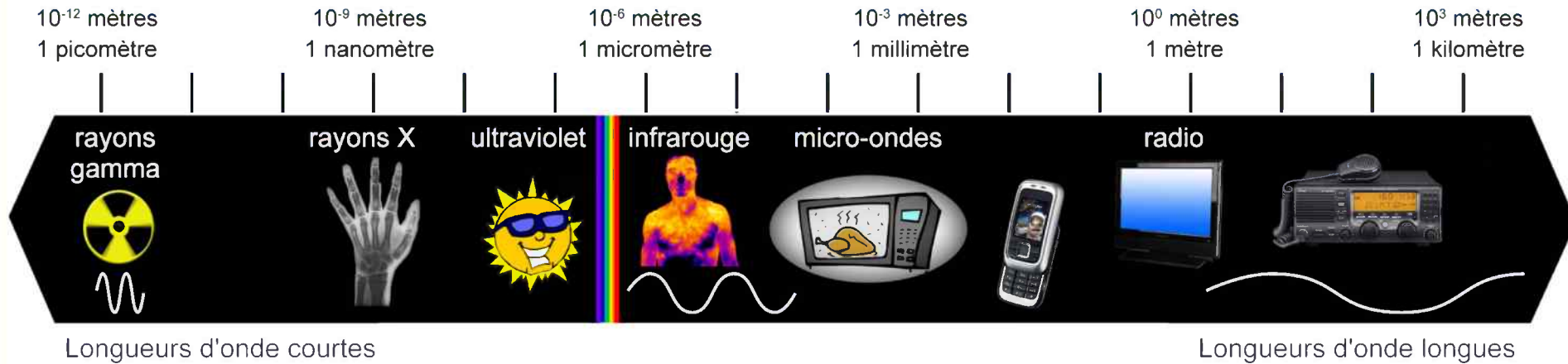
# Lois physiques???

## La lumière???



Lumière = Ondes? Rayons? Photon?

# Les ondes electro-magnétiques



Cette onde porte de l'énergie

- > unité d'énergie : J, Ws, kWh

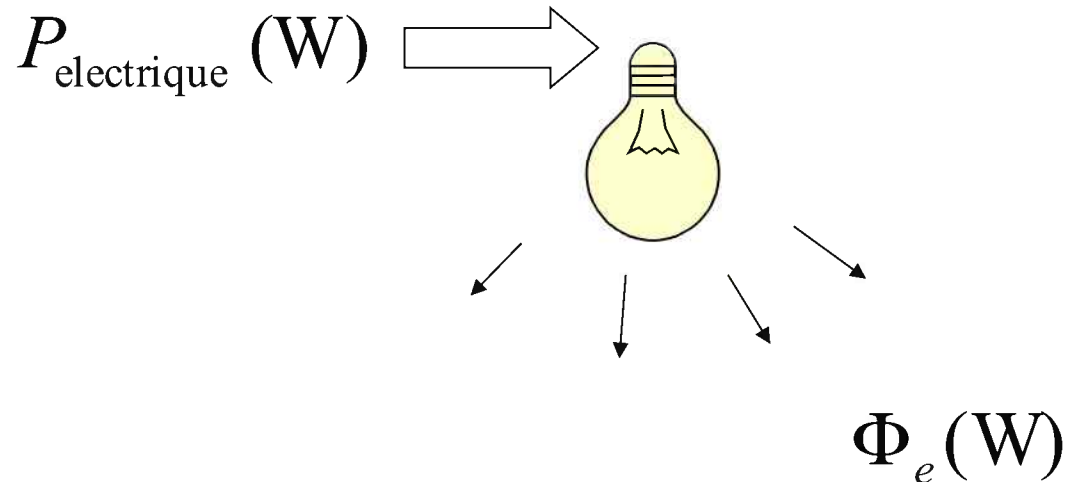
## Le flux énergétique ( $\Phi_e$ )

**flux énergétique, puissance rayonnante**

$\Phi_e$

est la puissance émise, transmise ou reçue sous forme de rayonnement

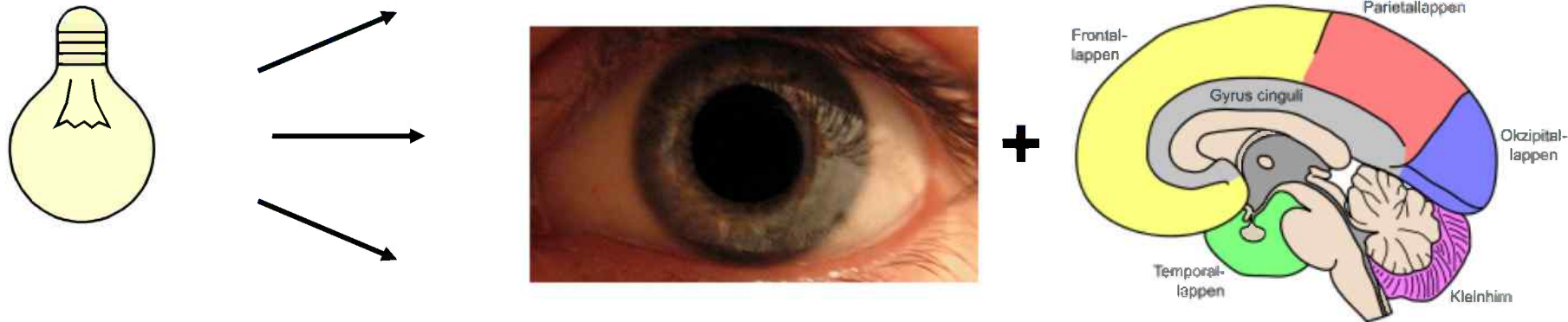
Unité SI: W (Watt)



Mais la sensation au niveau des yeux dépend du spectre de la source.  
Des parties du rayonnement (UV et IR) ne sont pas visible ->  
Le flux énergétique n'est pas la bonne quantité pour d'écrire la sensations visuelle

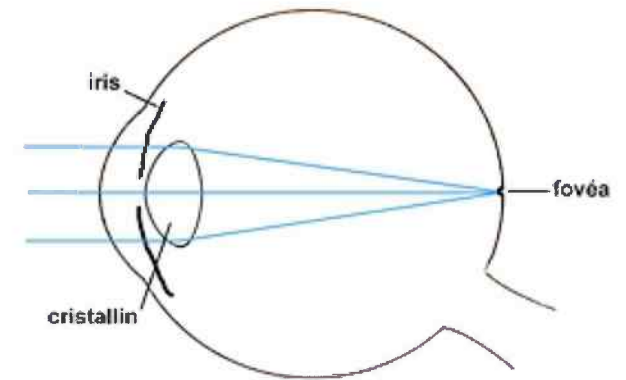
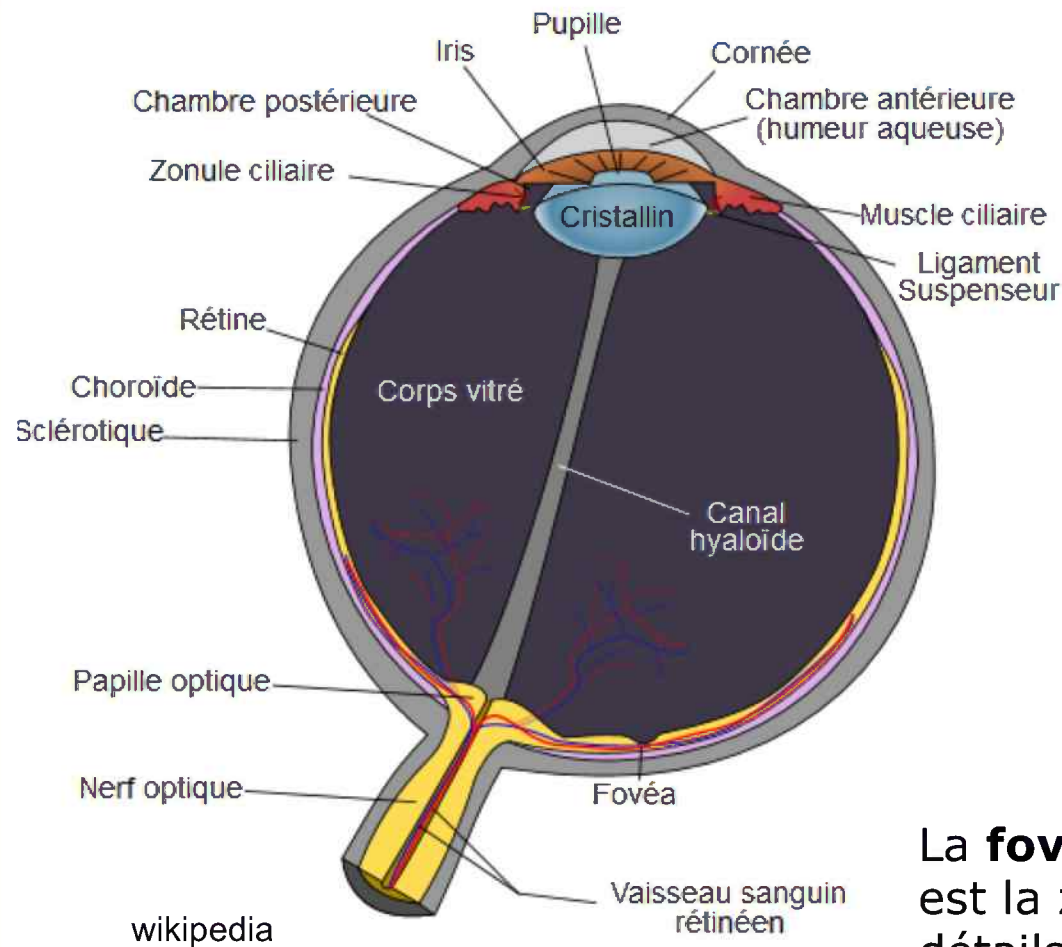


# Photométrie



- La **photométrie** est la science de mesure qui étudie le rayonnement lumineux du point de vue de la perception par l'œil humain

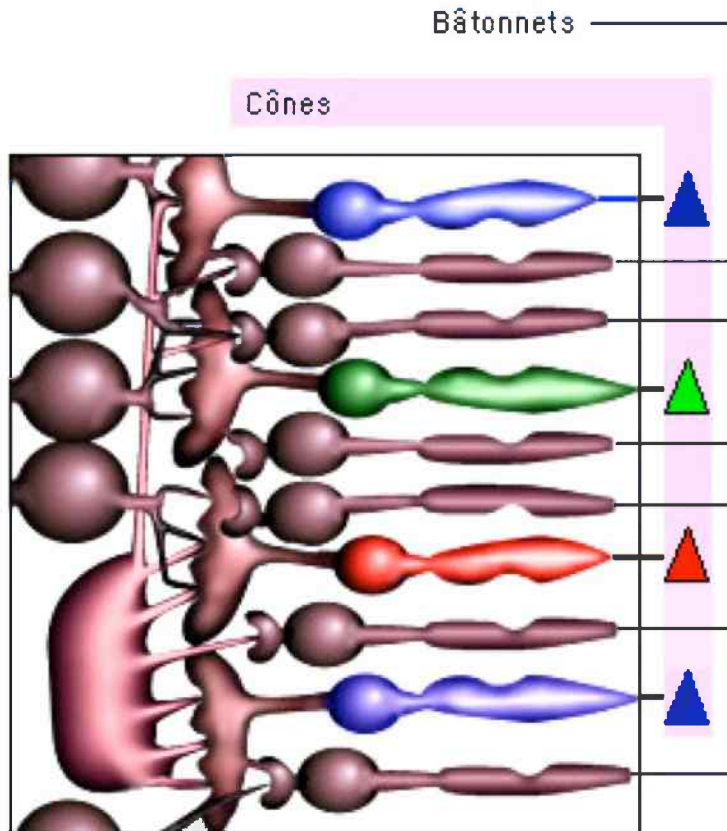
# Schéma anatomique de l'œil humain



La **fovéa**, la zone centrale de la macula, est la zone de la rétine où la vision des détails est la plus précise.

Elle est située dans le prolongement de l'axe optique de l'œil

# L'Œil -cones et bâtonnets



La vision repose sur l'analyse de l'image formée sur la rétine.

L'acuité visuelle est limitée par le nombre de prolongements des cellules nerveuses constituant le nerf optique, et est maximale dans la région de la fovéa.

Compte tenu des longueurs d'onde composant la lumière reçue, les différentes structures de ces cellules génèrent des messages sensoriels à destination du cerveau qui produit une sensation visuelle unique.

Nous possédons ainsi 120 000 000 bâtonnets et 7 000 000 de cônes.

# Répartition des cônes et de bâtonnets

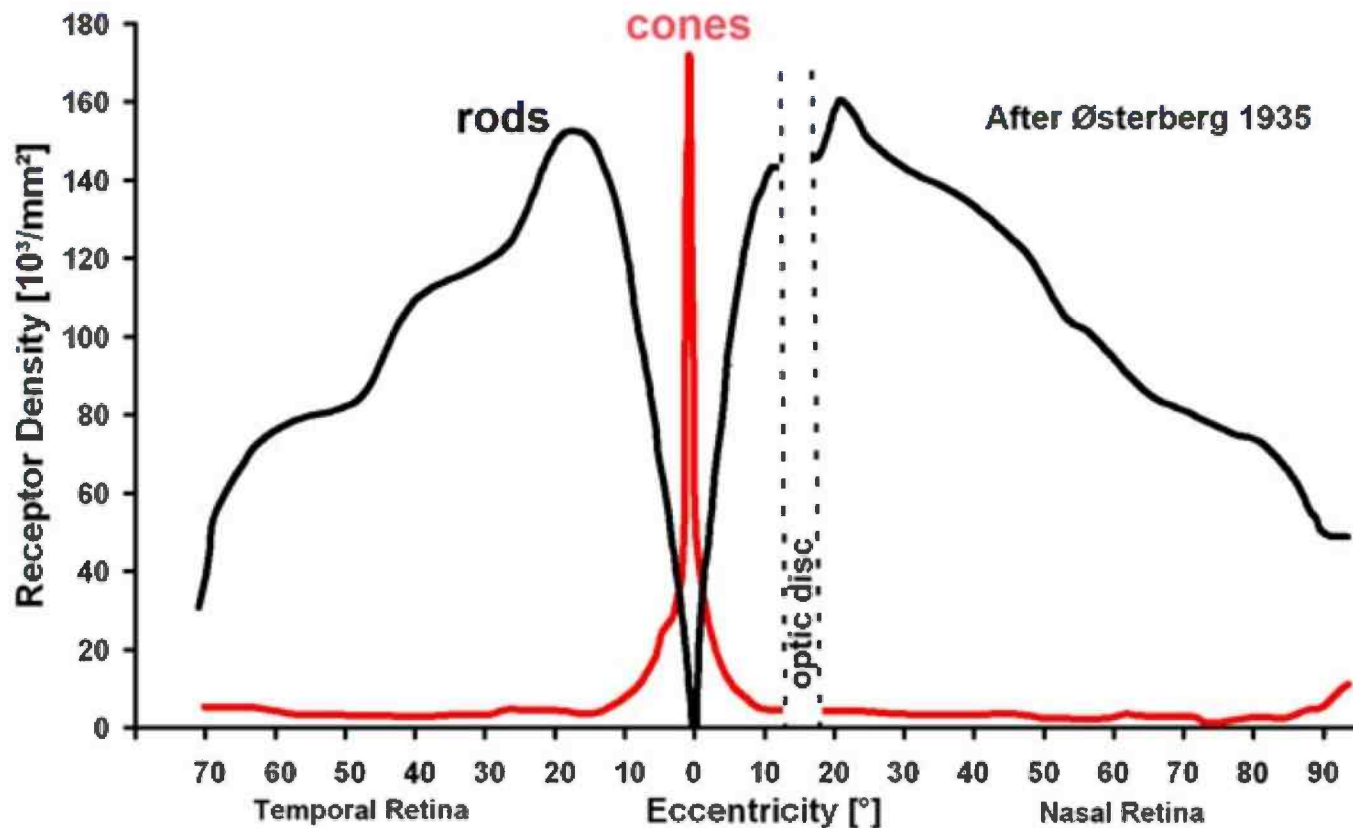
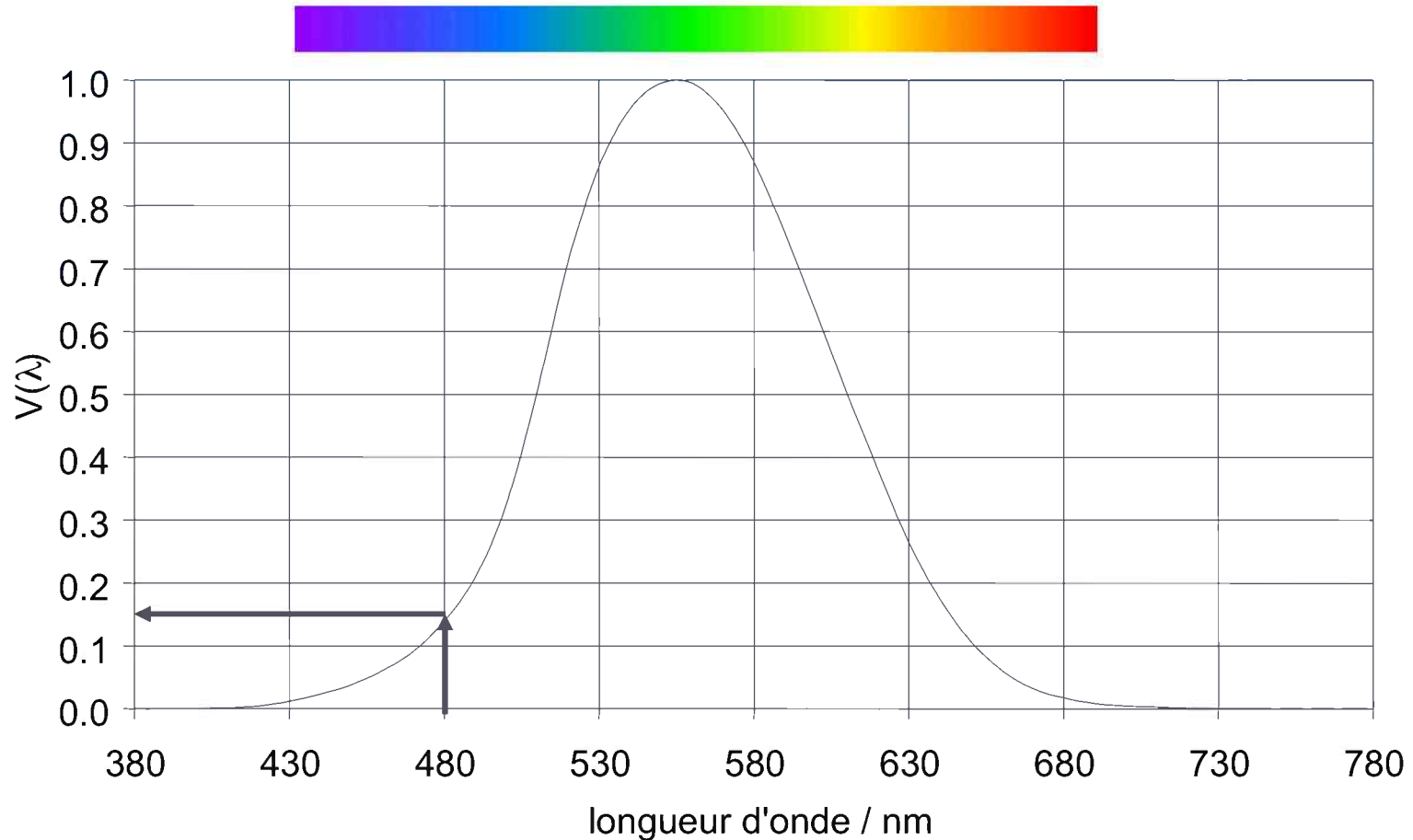


Fig. 20. Graph to show rod and cone densities along the horizontal meridian.

# efficacité lumineuse relative spectrale de l'oeil humain (vision photopique, cônes)

$V(\lambda)$



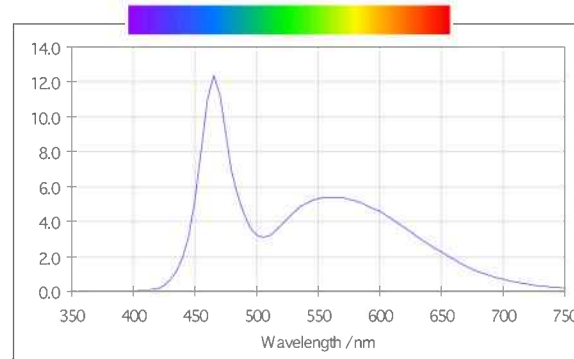
La sensibilité lumineuse à 480 nm n'est que 15% de celle à 555nm



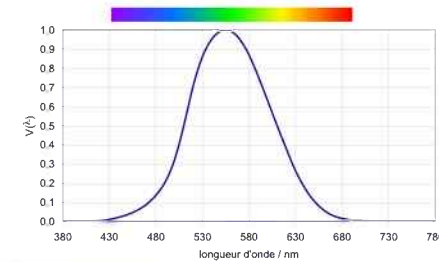
# La photométrie est basé sur la radiométrie

Grandeur spectrale (i.e. flux énergétique spectral)

**Radiométrie**



L'oeil humain  
Pondération avec la courbe  
 $V(\lambda)$ , Sommation



**Photométrie**

Flux lumineux:

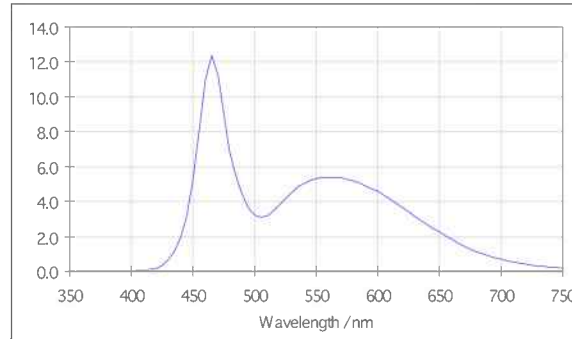
$$\Phi_v = 683 \text{ lm/W} \int V(\lambda) \Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda$$

# La photométrie est basé sur la radiométrie

Grandeur spectrale (i.e. flux énergétique spectral)

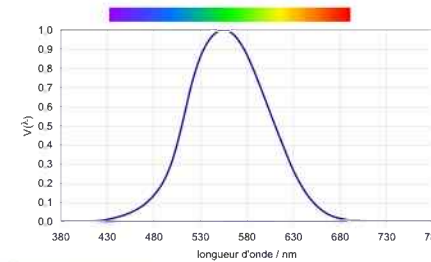
$$\Phi_{e,\lambda}$$

**Radiométrie**



$$\Phi_e = \int \Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda$$

L'oeil humain  
Pondération avec la courbe  
 $V(\lambda)$ , Sommation



$$V(\lambda_i)$$

**Photométrie**

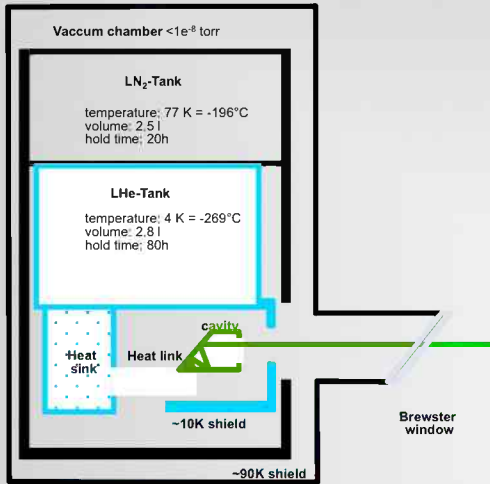
Flux lumineux: 
$$\Phi_v = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \int V(\lambda) \Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda$$

L'efficacité lumineuse d'un  
rayonnement

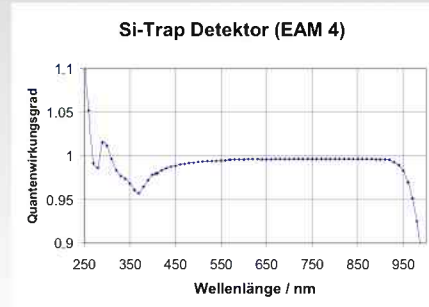
$$K = \frac{\Phi_v}{\Phi_e}$$

# Réalisation de la Candela en Suisse

Cryogenic radiometer ( $W_{el} \rightarrow W_{opt}$ )



Si-Trap detector



**Radiometry**



( $W_{opt} \rightarrow I_x$ )

Si-Trap detector +  $V(\lambda)$  + aperture



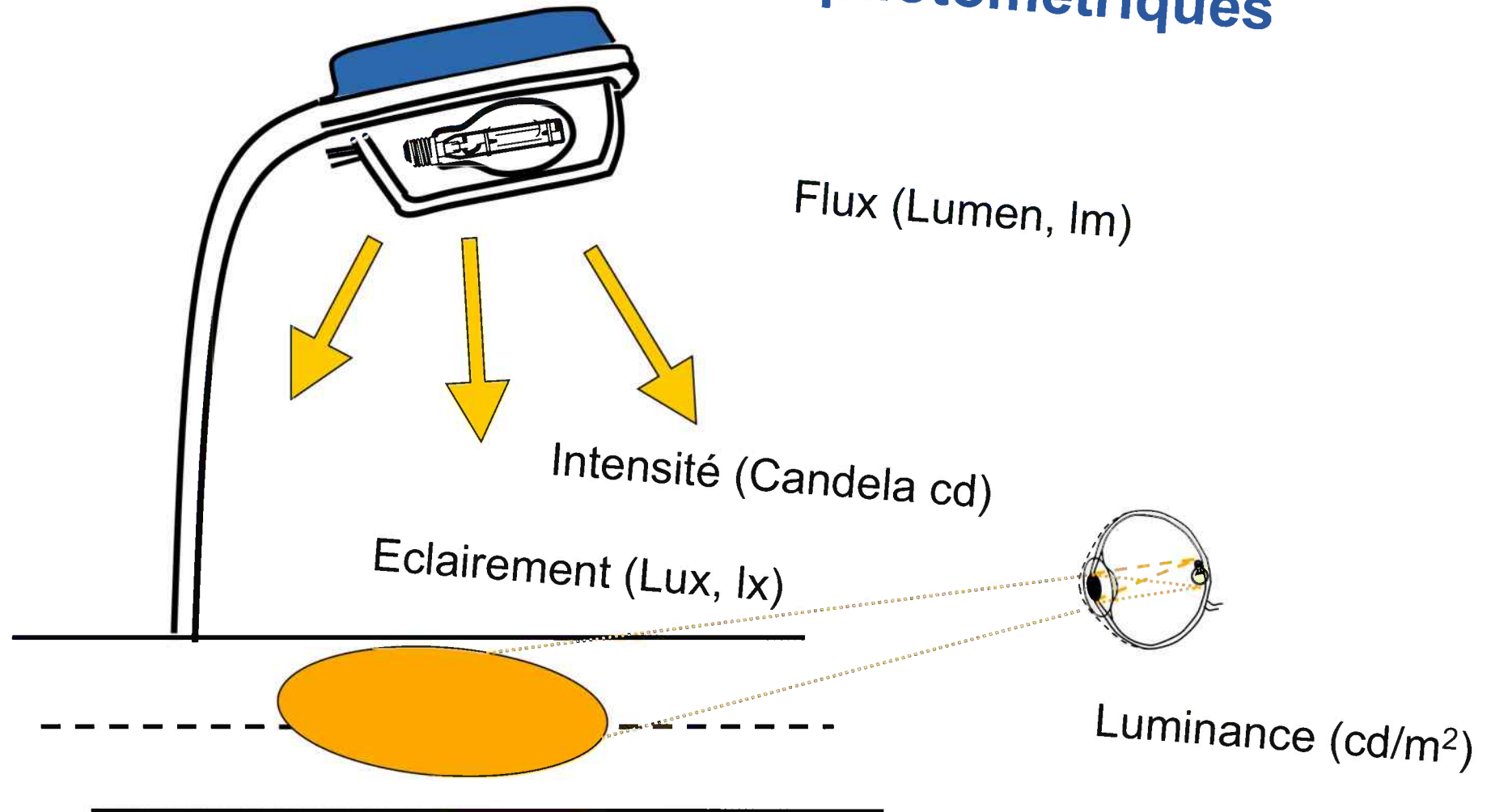
**Photometry**

Set of standard lamps



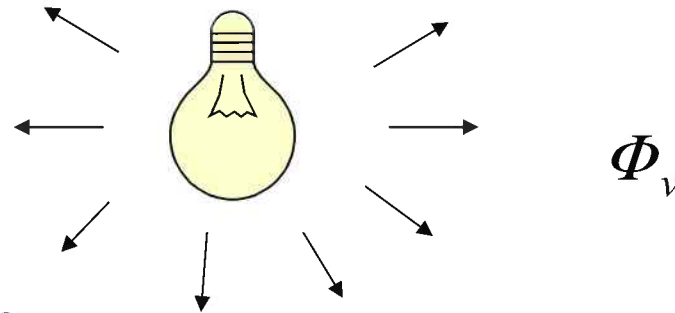
( $I_x \rightarrow cd$ )

# Les quantités et unités photométriques



# Le flux lumineux

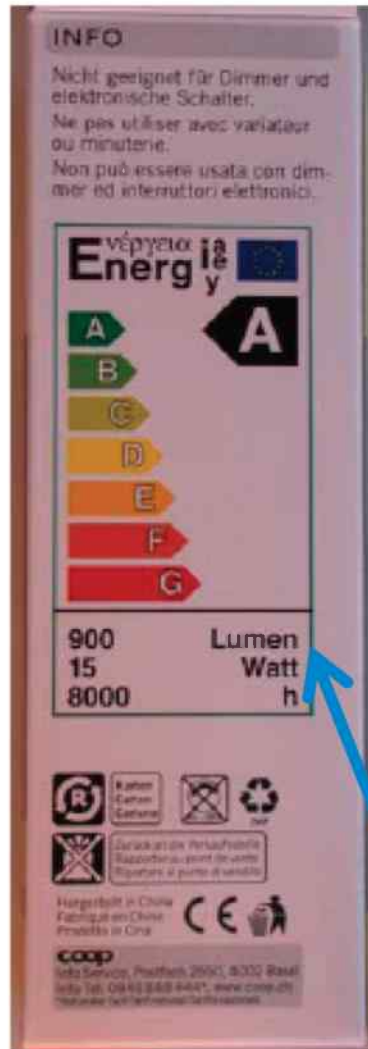
Puissance (totale) de rayonnement comme *perçue par l'œil humain*



Unité SI: [ $\Phi_v$ ] = Lumen, lm

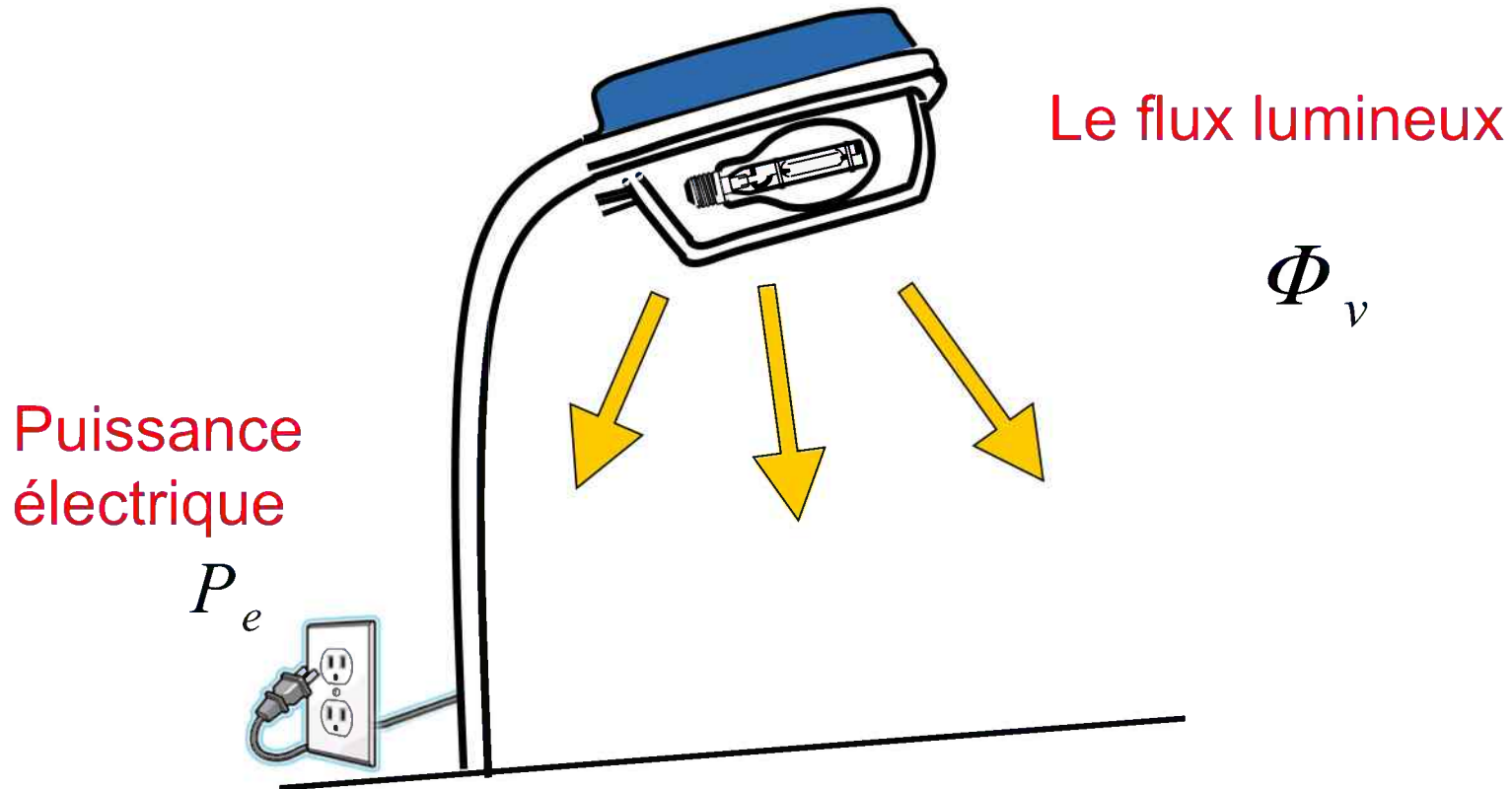
lampe à incandescence 230 V/40 W	410 lm
Lampe à incandescence 230 V/ 60W	800 lm
lampe à incandescence 230 V/100 W	1380 lm
lampe à fluorescence 230 V/36 W	3450 lm
lampe à valeur de sodium haute pression 230 V/100 W	10000 lm





**LUMEN**

# efficacité lumineuse



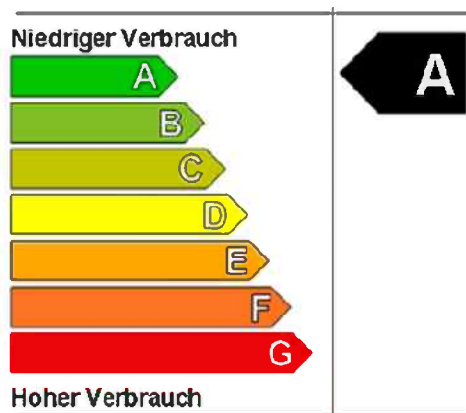
efficacité lumineuse d'une source :

$$\eta_v = \frac{\Phi_v}{P_e}, \quad [\eta_v] = \frac{\text{lm}}{\text{W}}$$

# efficacité lumineuse: valeurs typiques

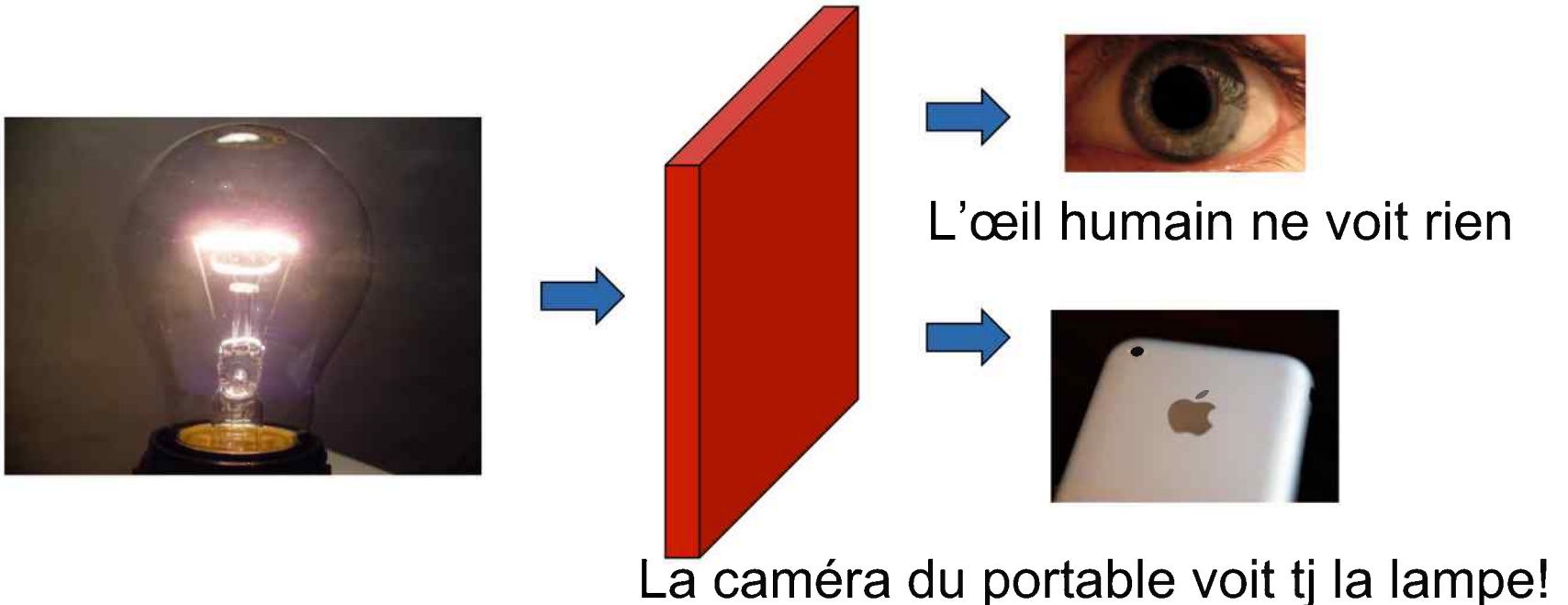
Valeurs pour lampes modernes:

- lampes à incandescence (10 ... 15) lm/W
- lampes à halogénure (15 ... 25) lm/W
- tubes fluorescents (60 ... 100) lm/W
- lampes à vapeur de sodium haute pression NaH (100 ... 140) lm/W
- lampes LEDs (80 ... 142) lm/W



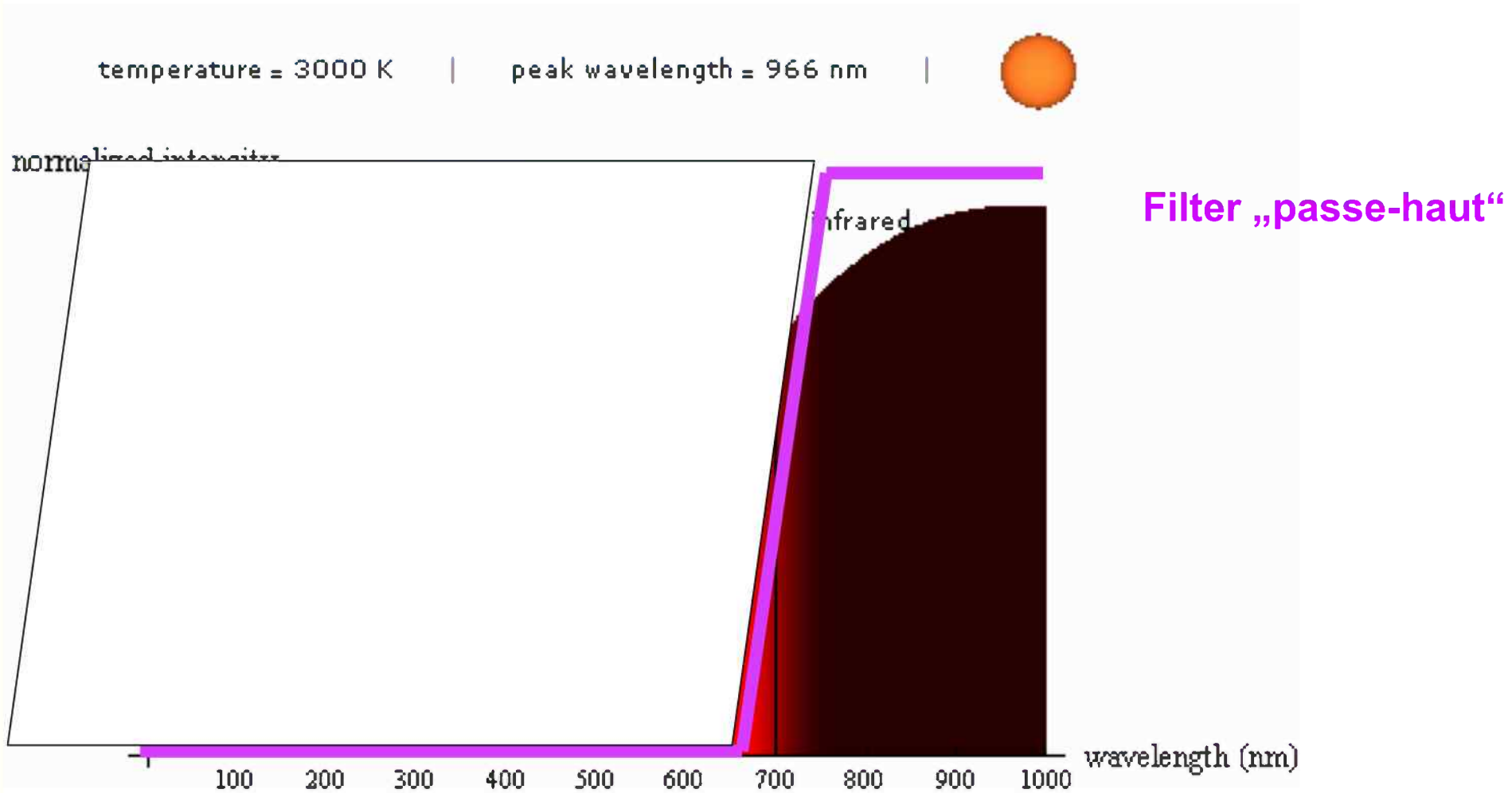
# Pourquoi la lampe à incandescence est moins efficace?

- Expérience pratique: Observer la lampe à travers un filtre qui bloque la partie visible de la lumière



- Apparemment il existe des rayonnements qui ne sont pas visible pour les yeux
- La lampe à incandescence en émet (au contraire des autres types de lampes)

# Spectre d'une lampe à incandescence





# Exercice pratiques: rendement



$E_v$

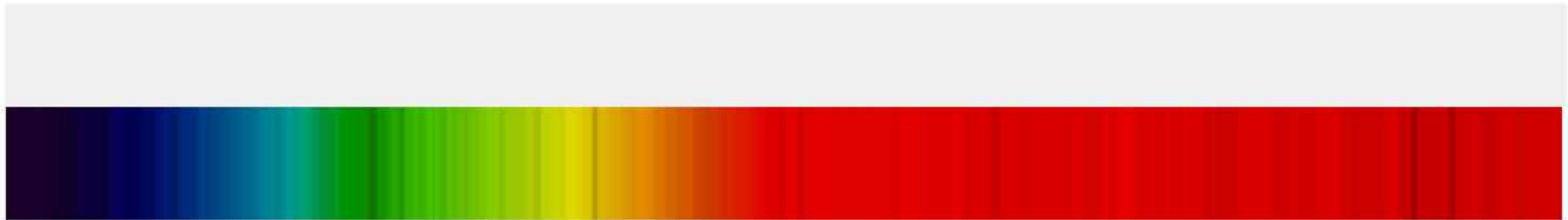


$E_v$



$E_v$

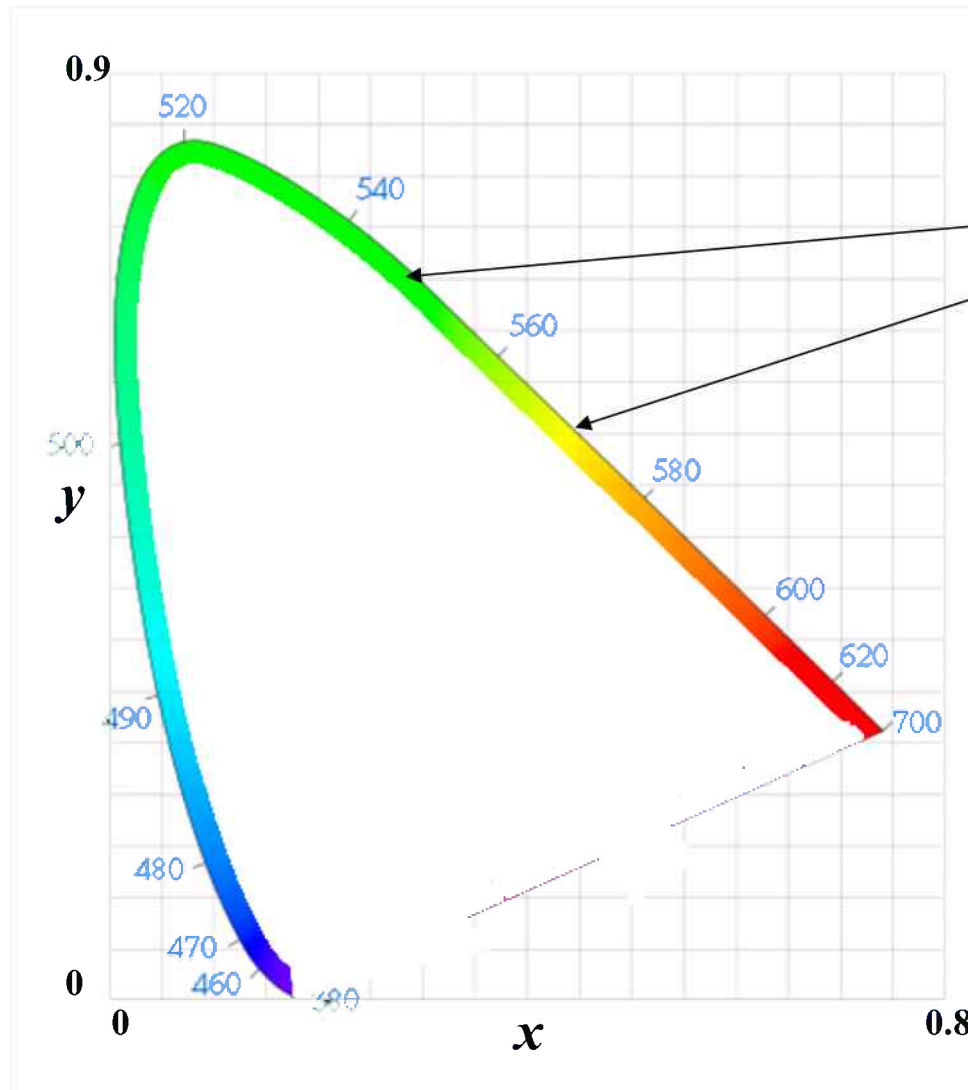
# Lumière monochromatique



400nm 450nm 500nm 550nm 600nm 650nm 700nm 750nm 800nm 850nm

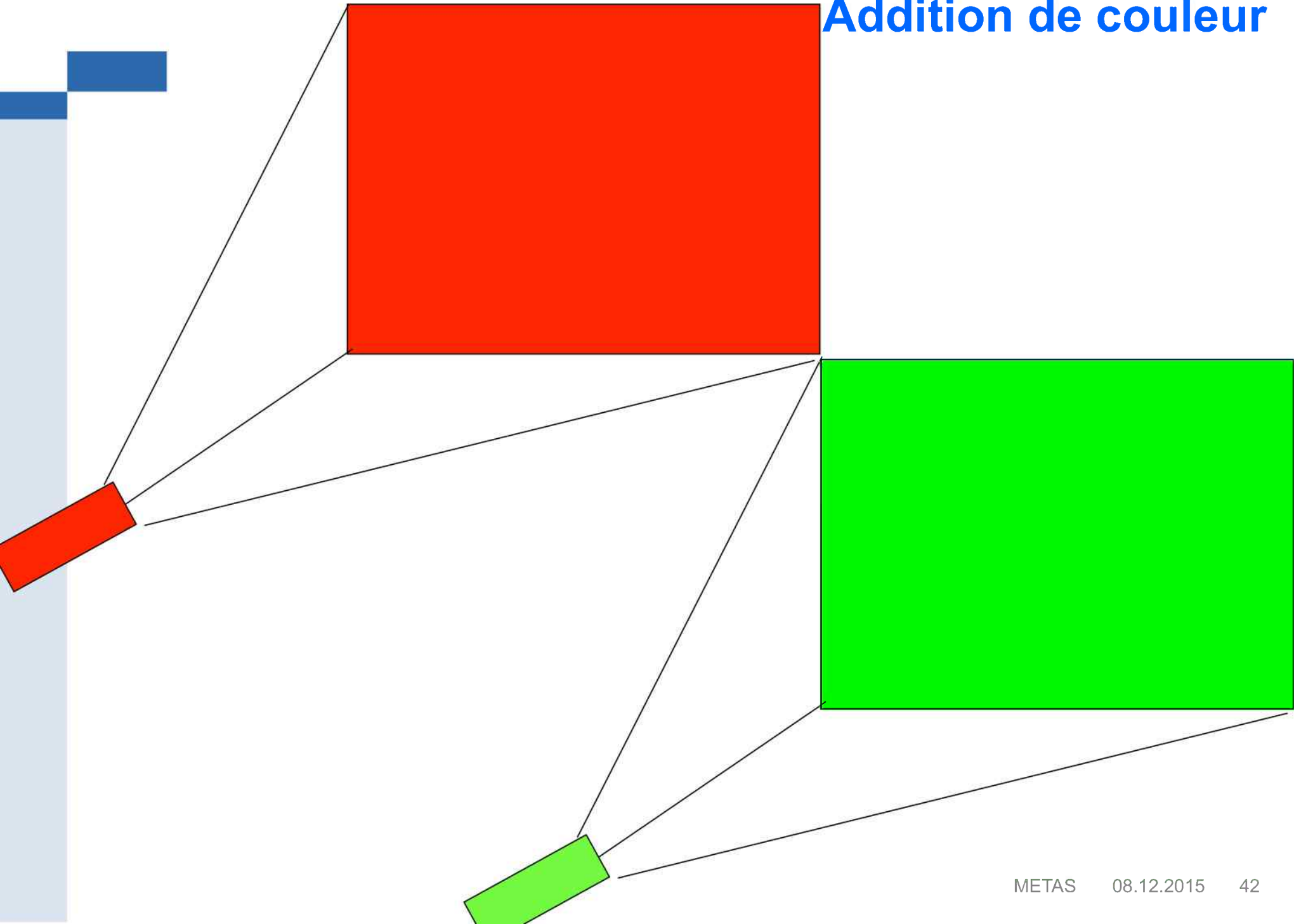
**OU EST LA LUMIÈRE BLANCHE?**


# Diagramme de chromaticité CIE 1931



Couleur "monochromatique"  
lieu spectral

# Addition de couleur

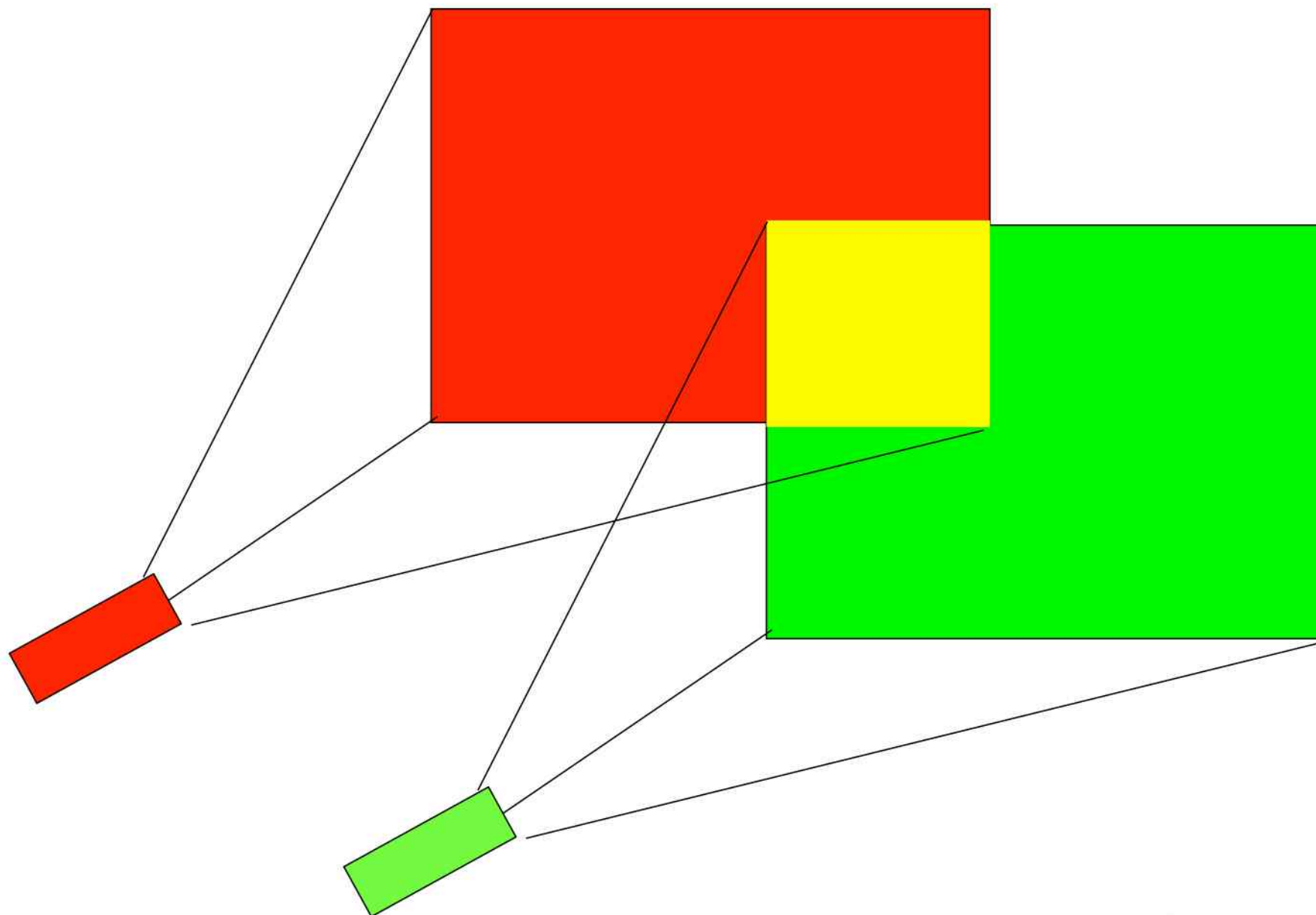




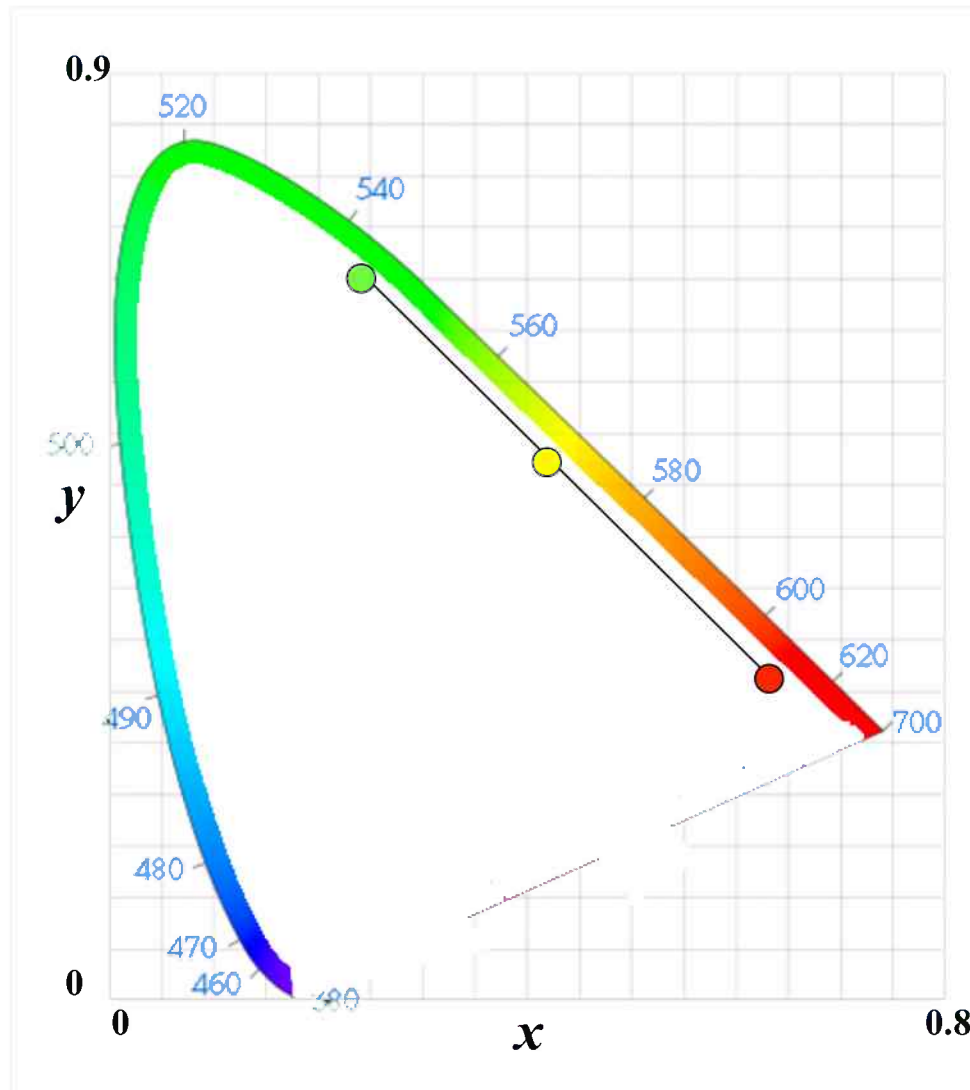
LED - Box



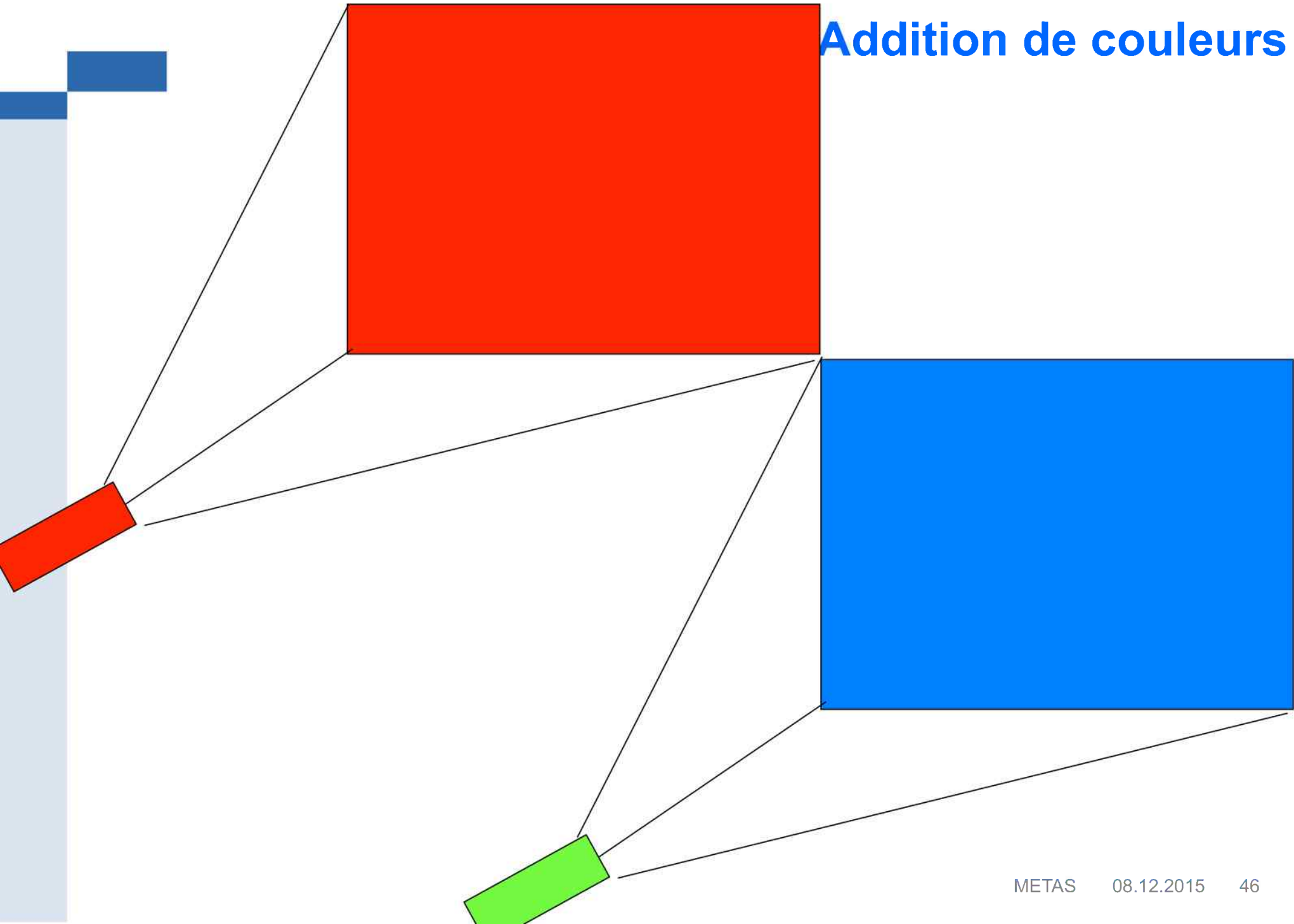
# Addition de couleur



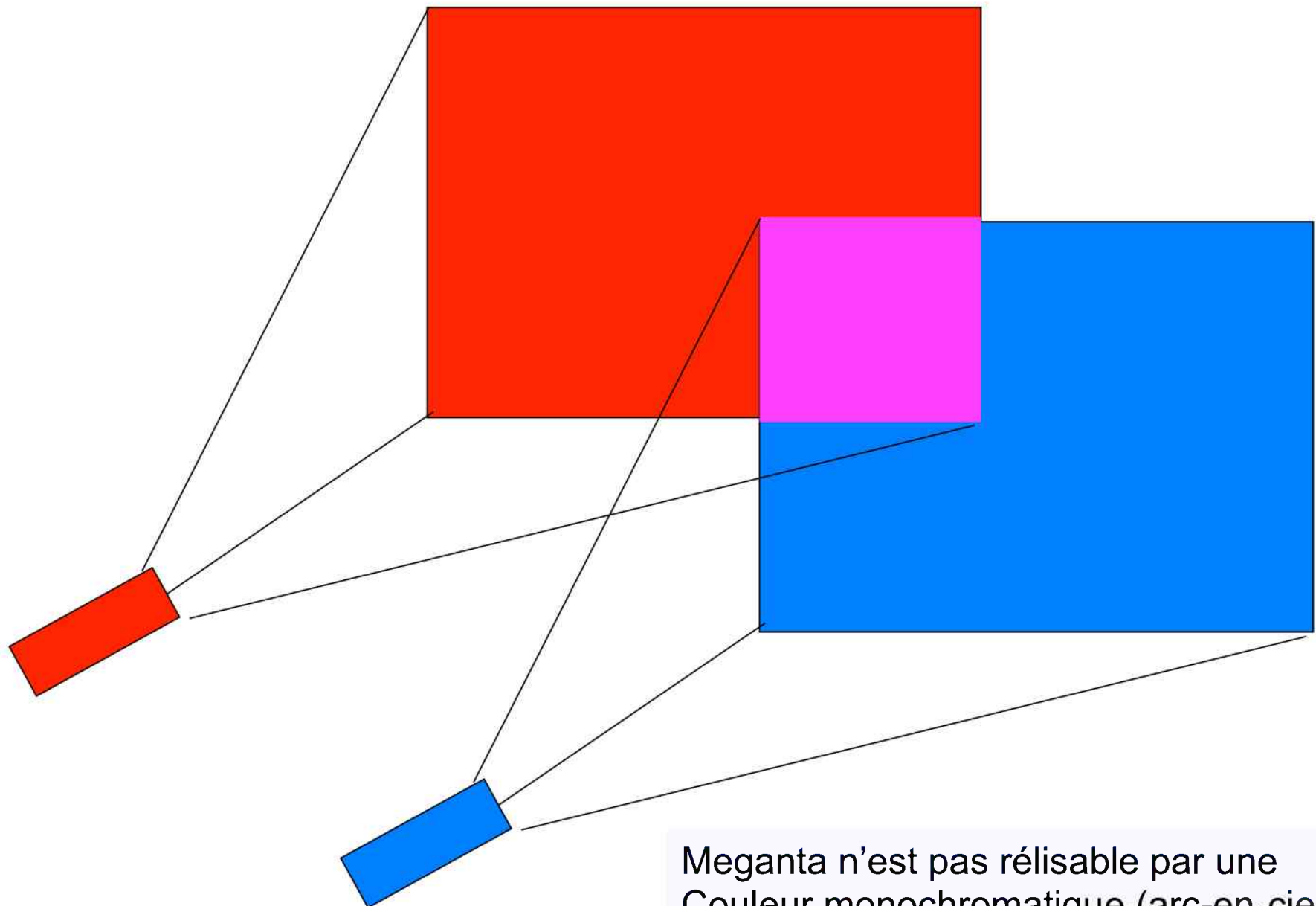
# Diagramme de chromaticité



# Addition de couleurs

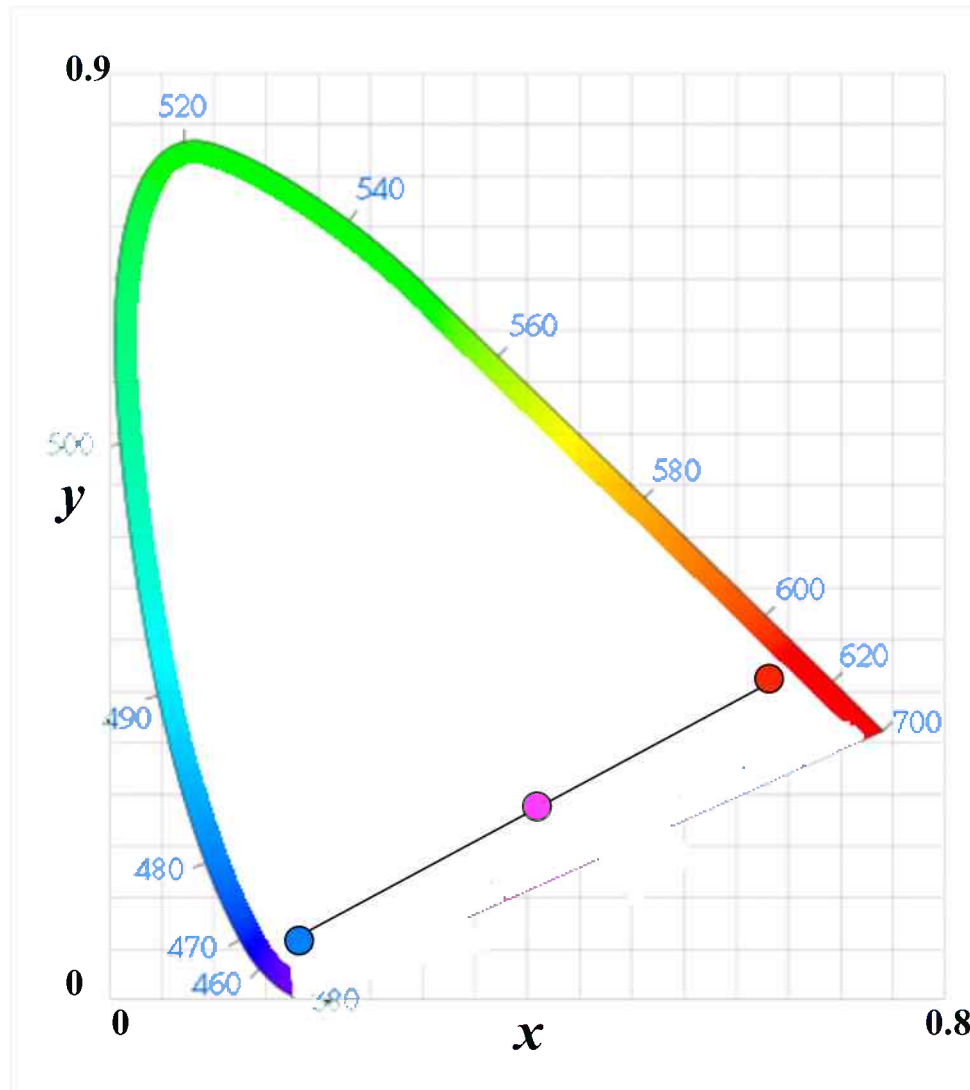


# Addition de couleurs



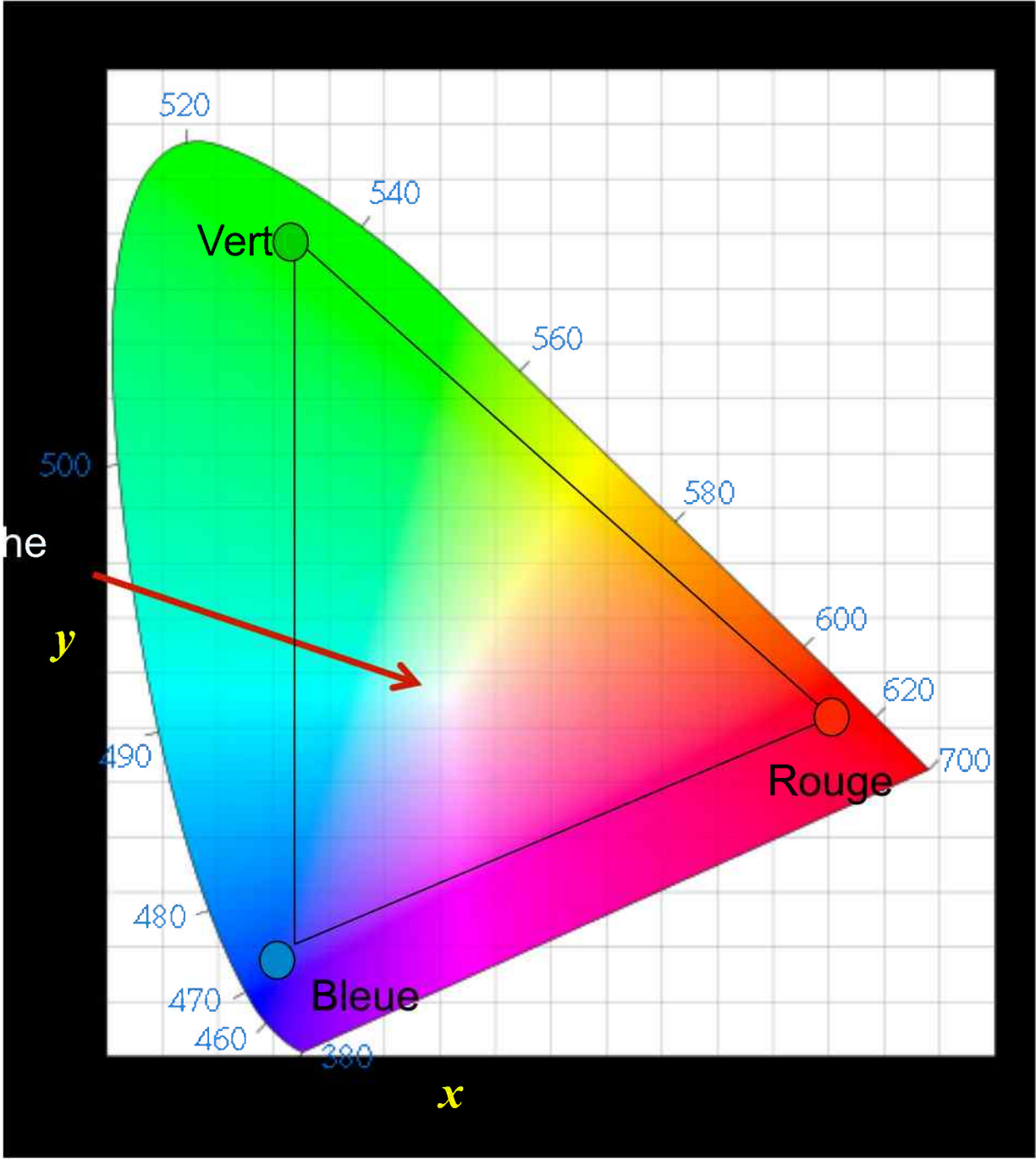
Meganta n'est pas réalisable par une  
Couleur monochromatique (arc-en-ciel)

# Diagramme de chromaticité CIE 1931



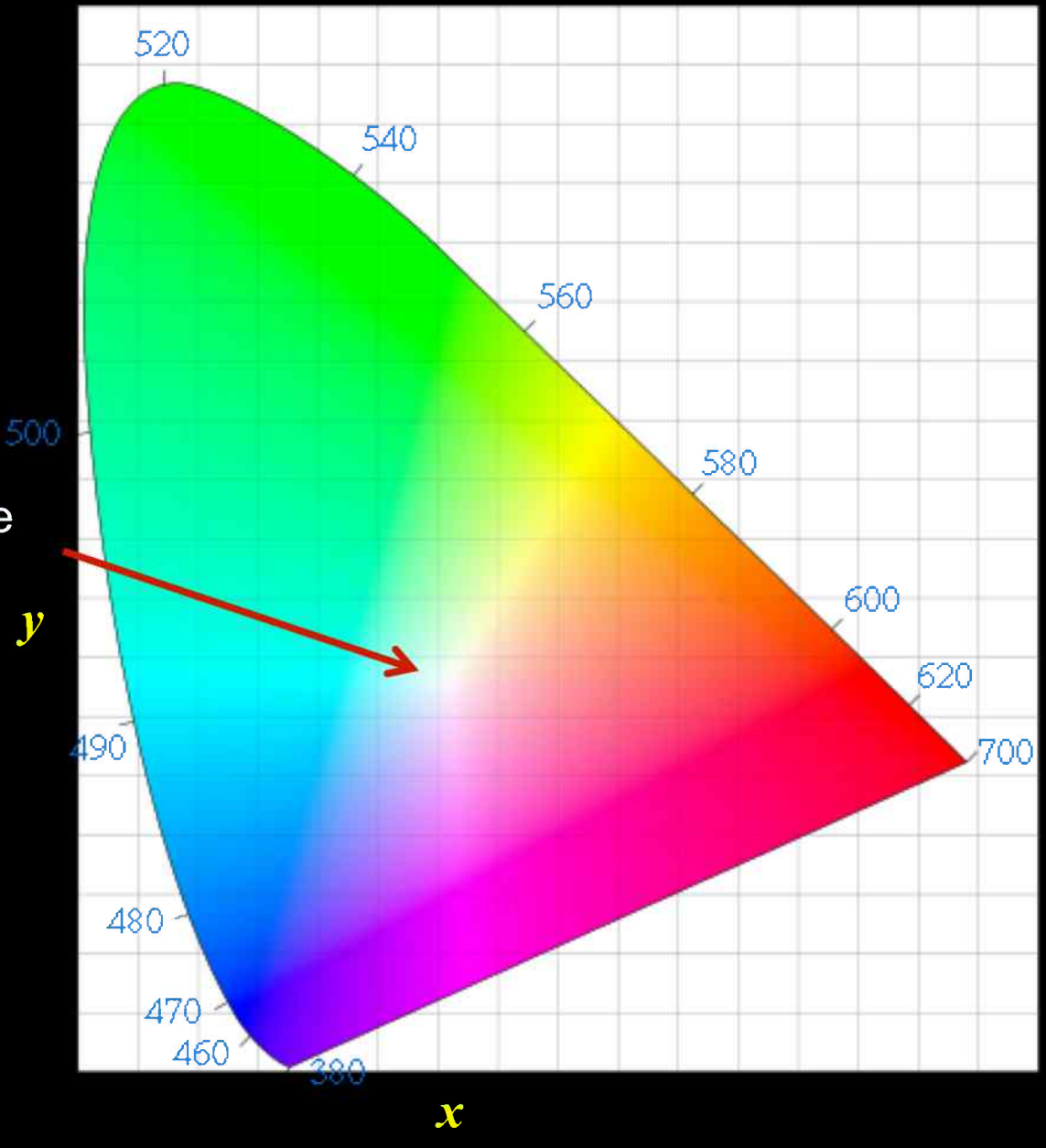
Il y a d'avantage de couleurs!





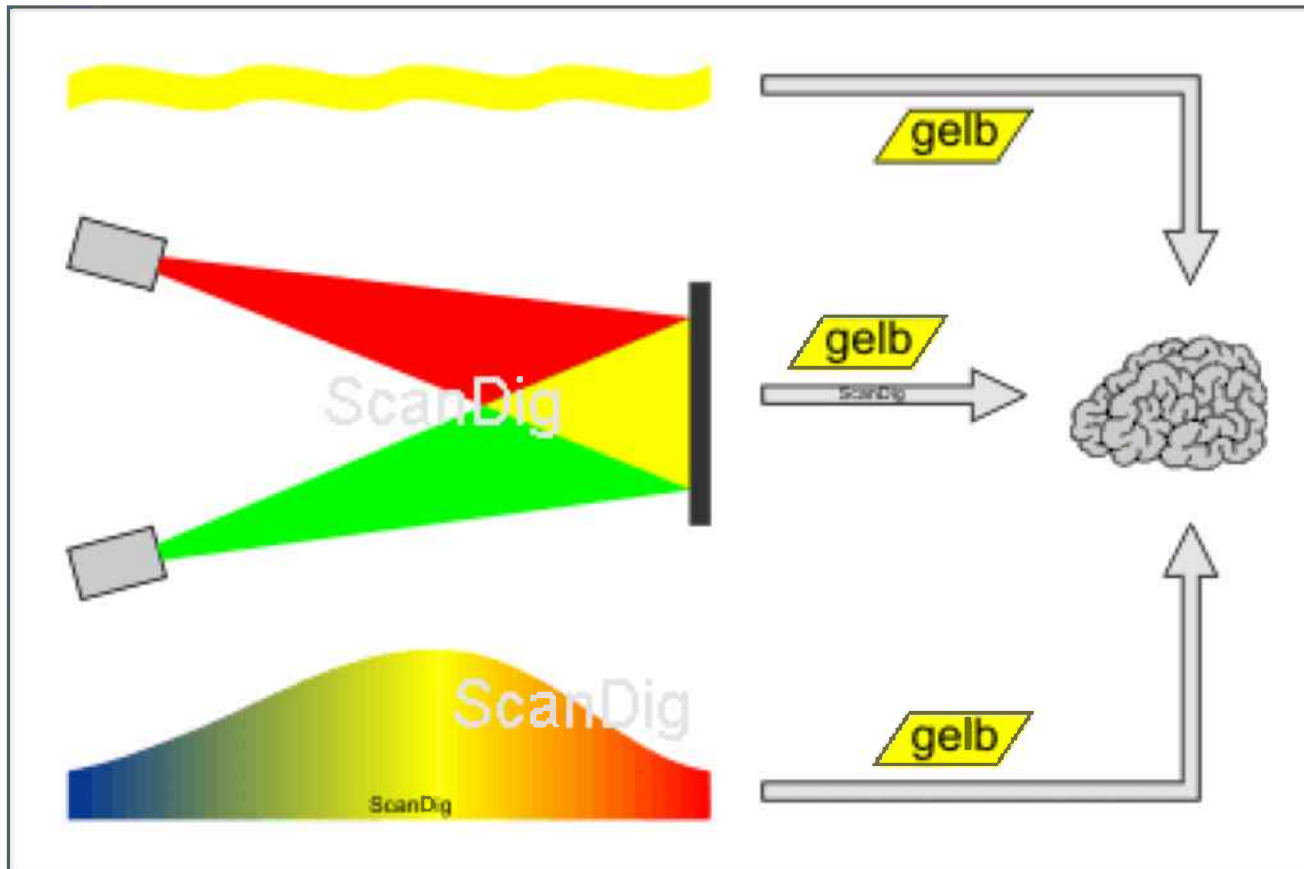


La l... he



# métamères

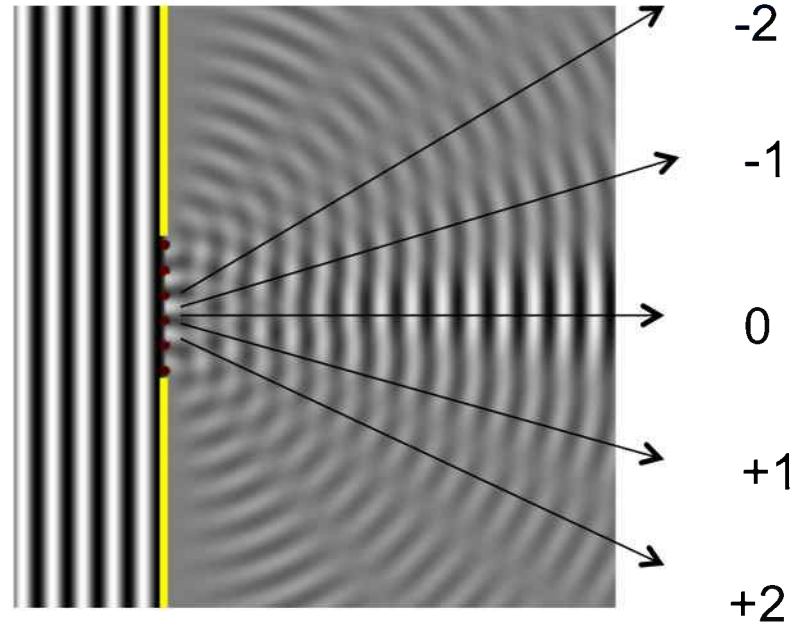
stimulus de couleur de compositions spectrales différentes  
qui ont les mêmes composantes trichromatiques



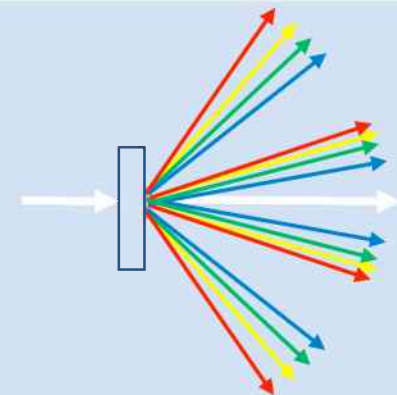
> Analyse spectrale

# Comment visualiser un spectre?

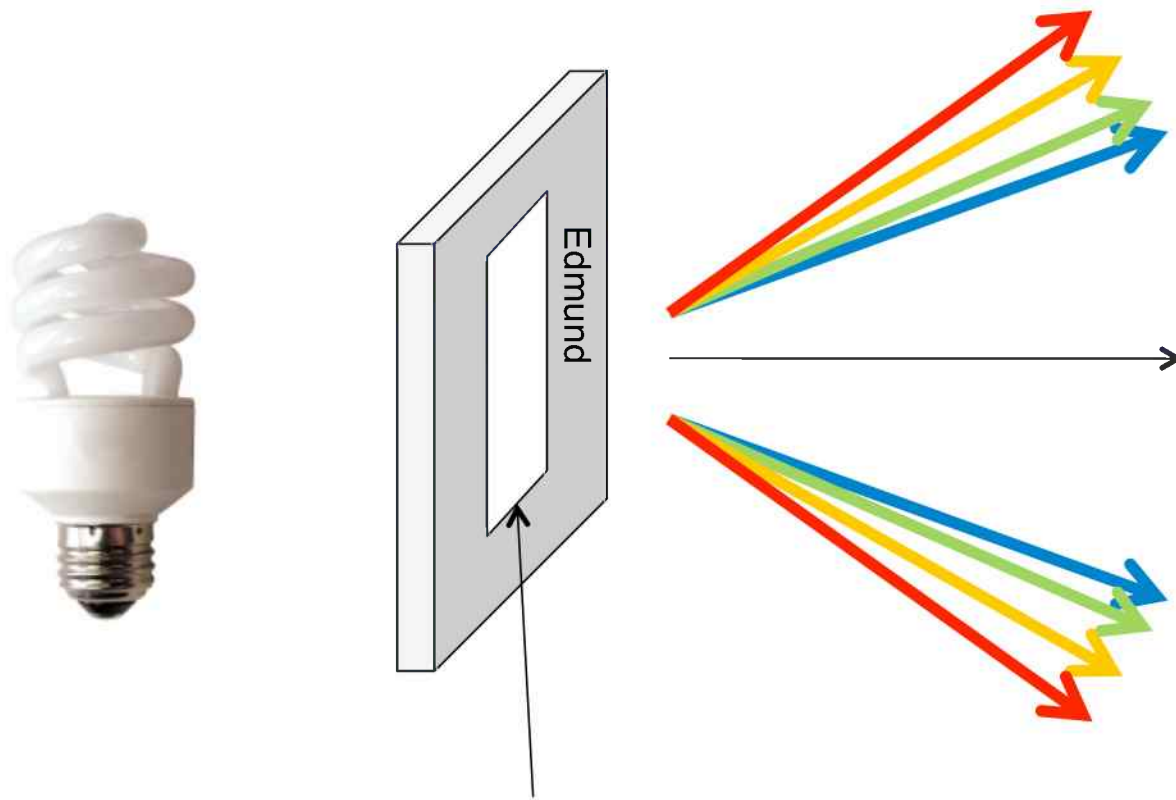
## Reséau de diffraction



L'effet de diffraction  
dépend de la longueur d'onde



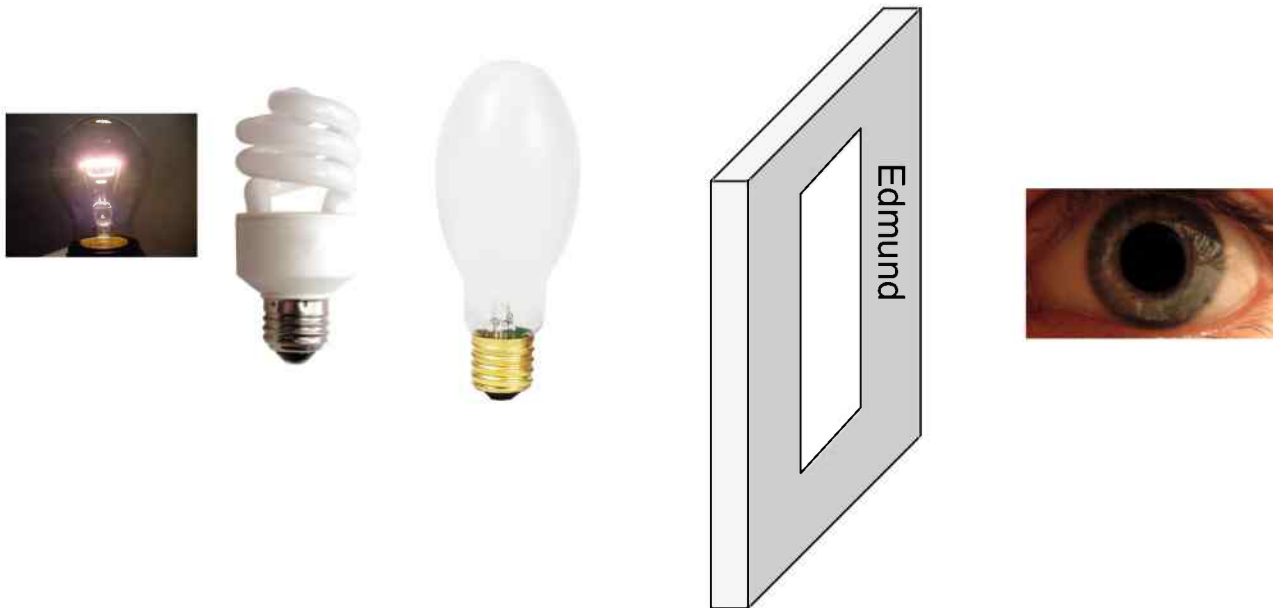
# Analyse la lumière avec un réseau de diffraction



500 lignes par mm

## Exercice pratique:

Observer le spectre des différentes sources à travers le réseau de diffraction



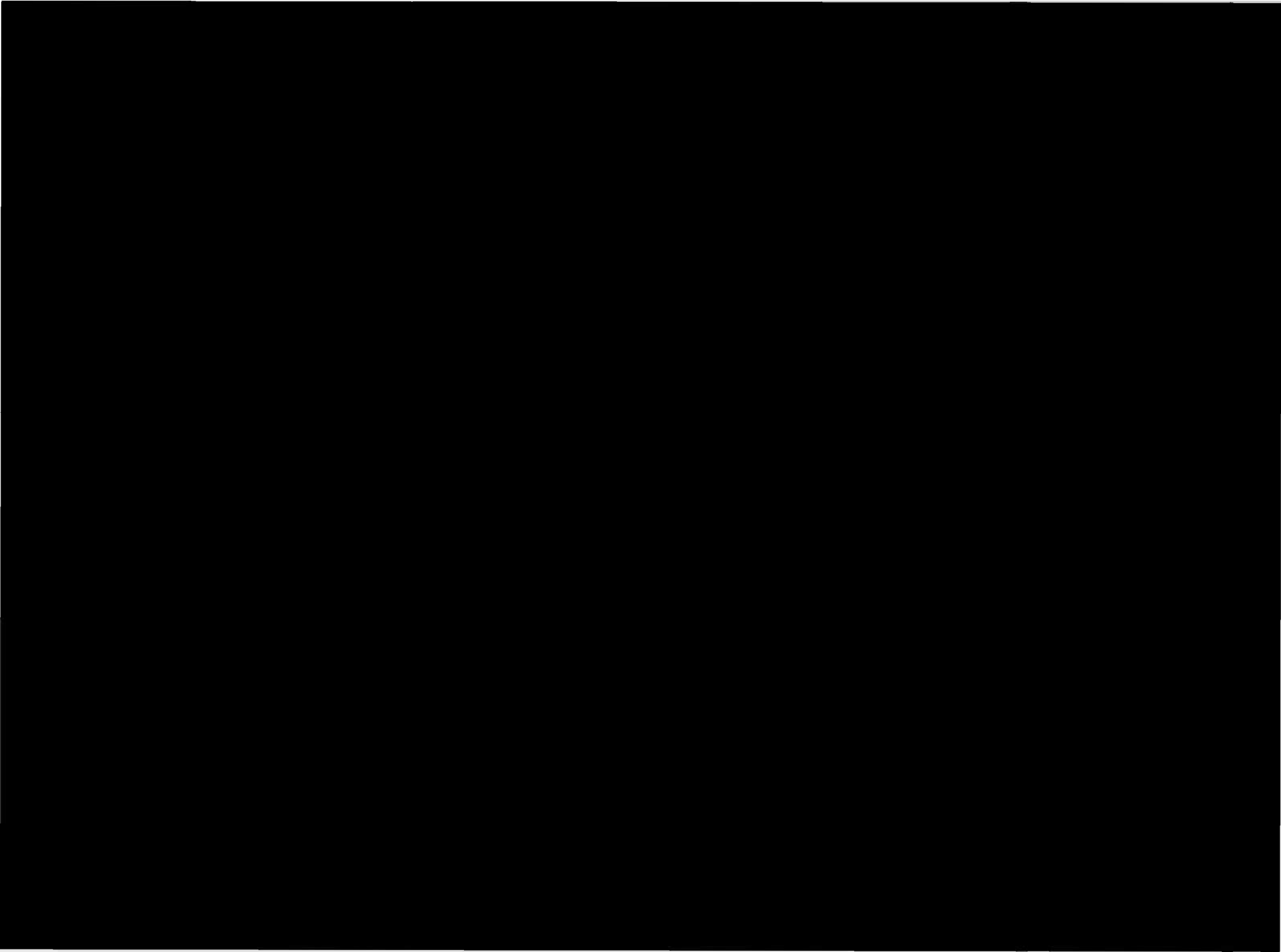
Lampe à incandescence, LED



Lampe fluorescent

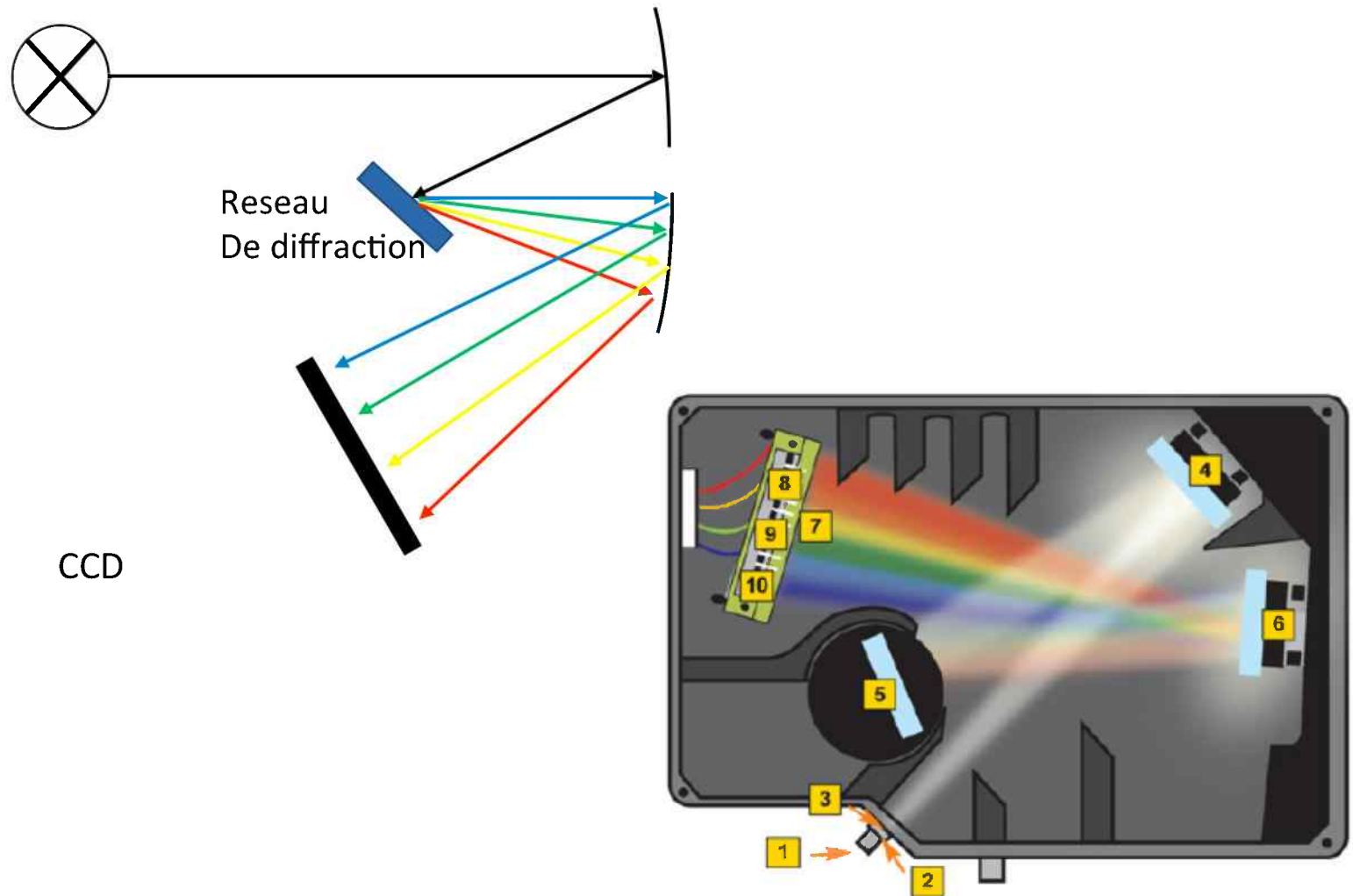






# Comment mesurer un spectre?

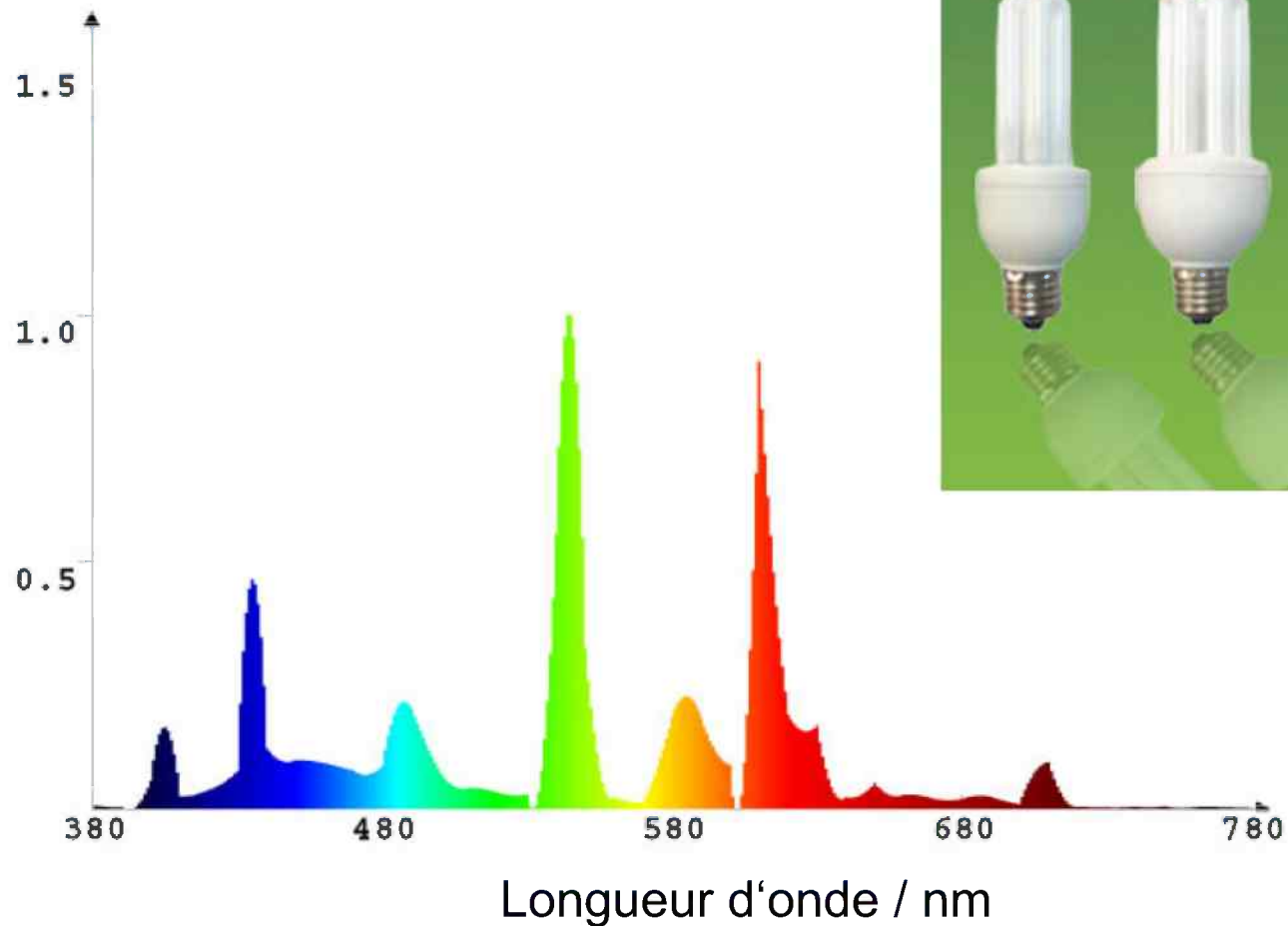
## Spectromètre



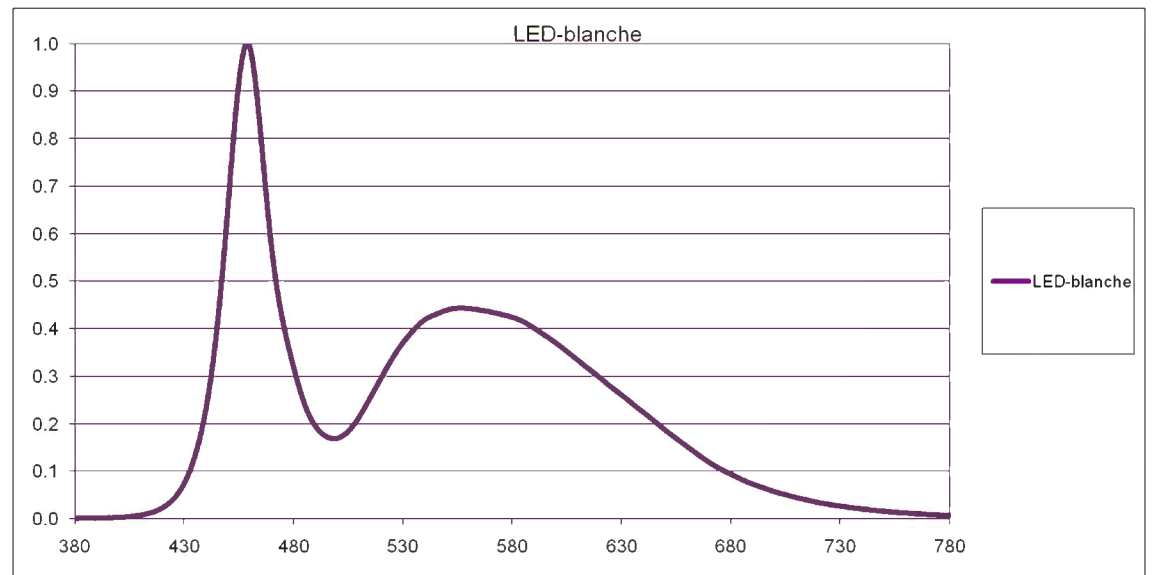
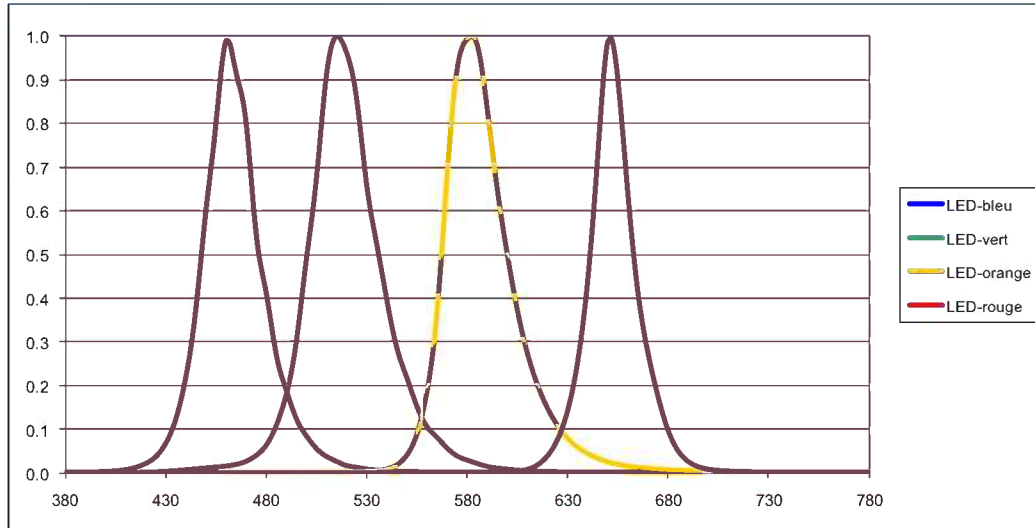


# Mesures avec le spectrometre

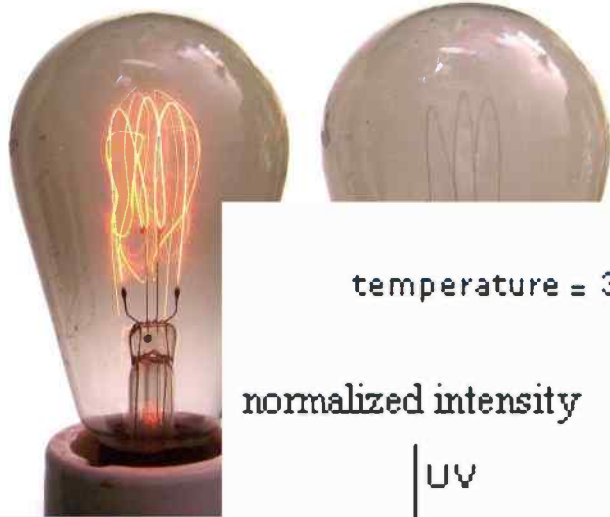
# Spectre de lampe fluorescente



# Spectre d'une LED



# Spectre d'une lampe à incandescence

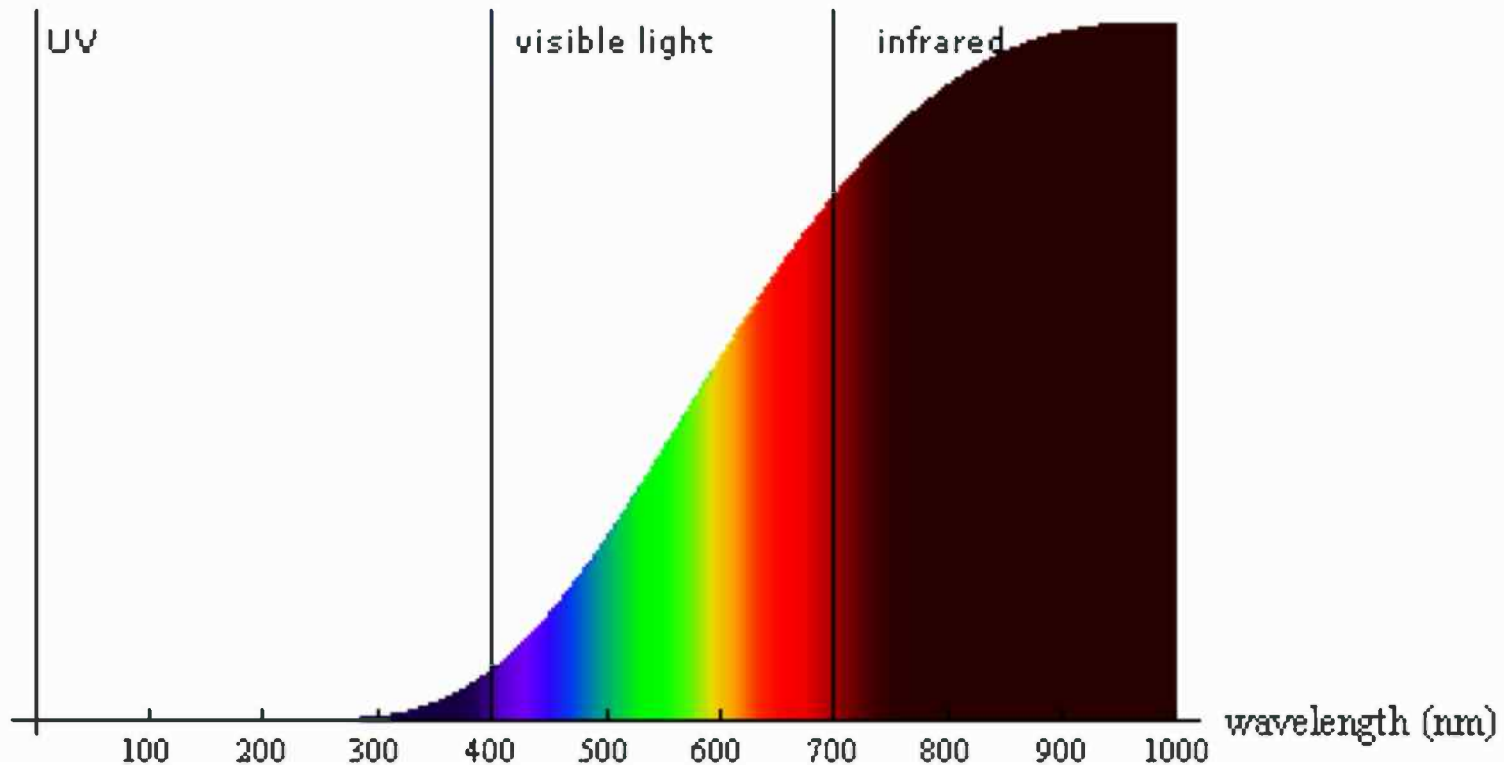


temperature = 3000 K

peak wavelength = 966 nm

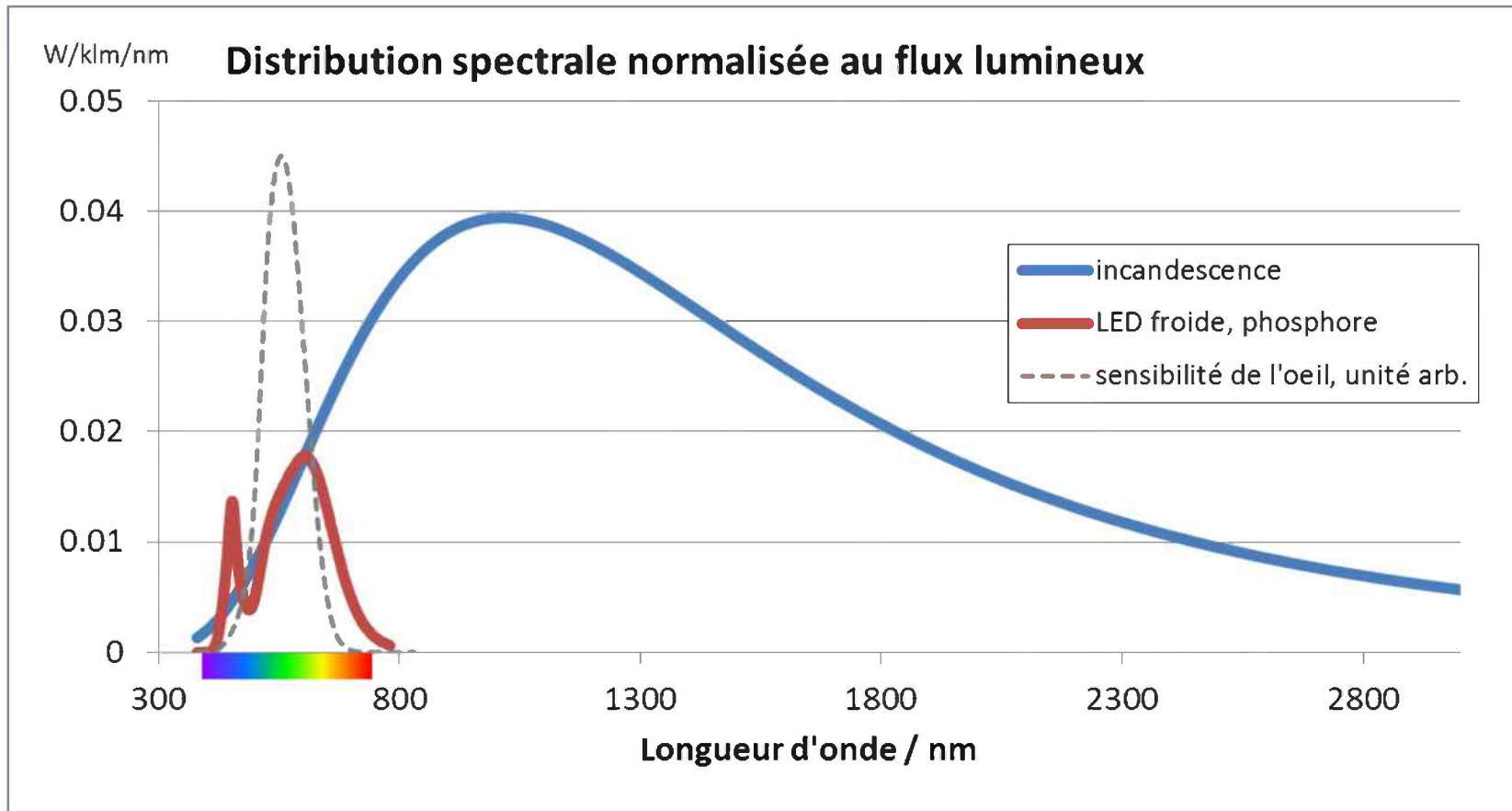


normalized intensity

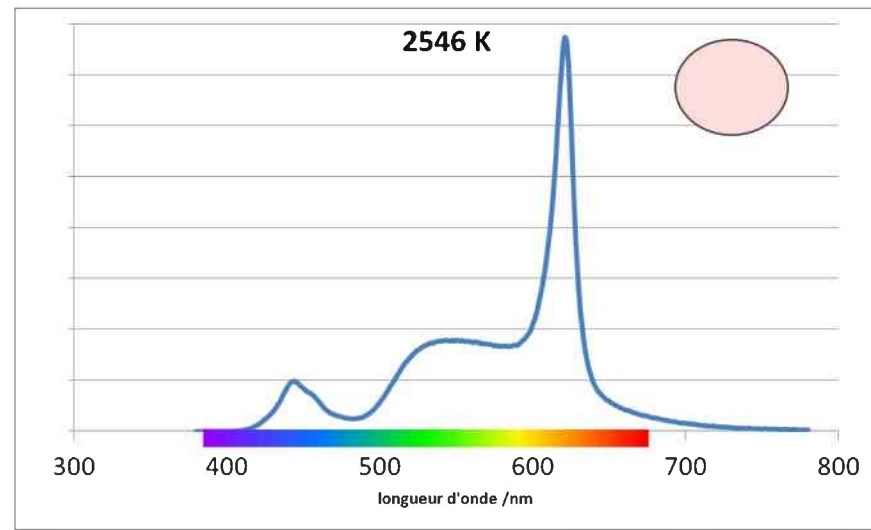
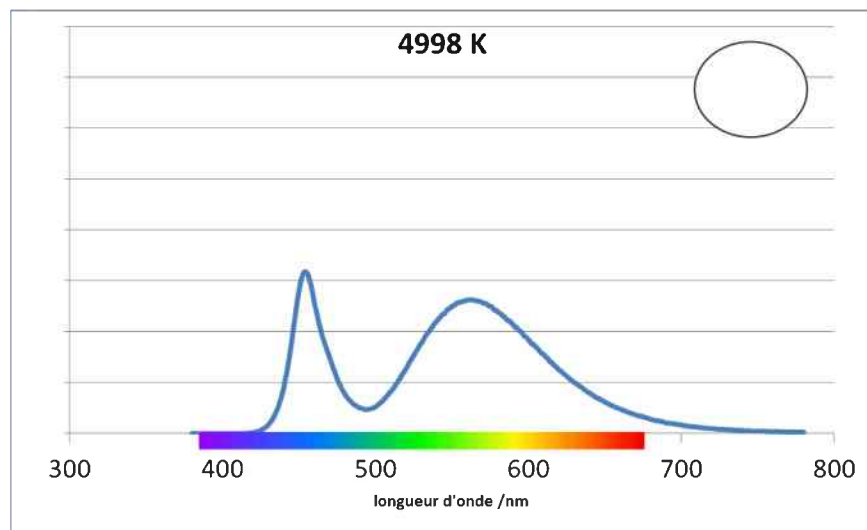
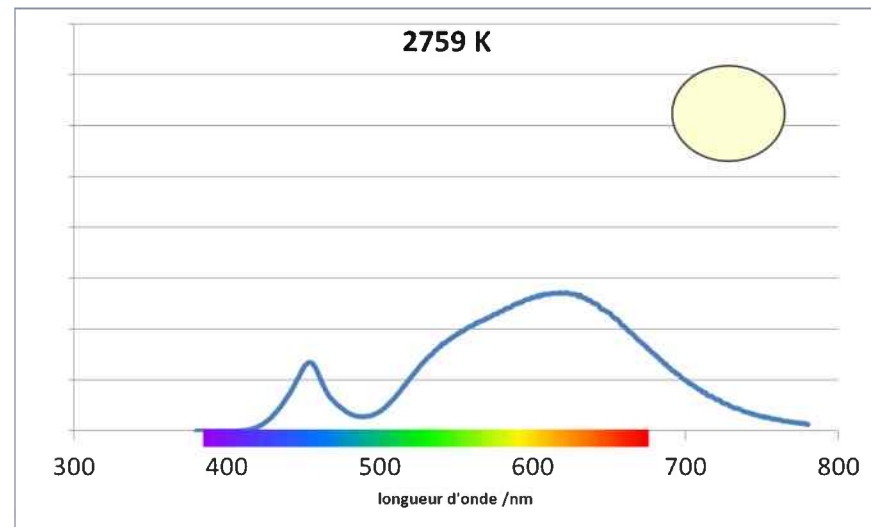
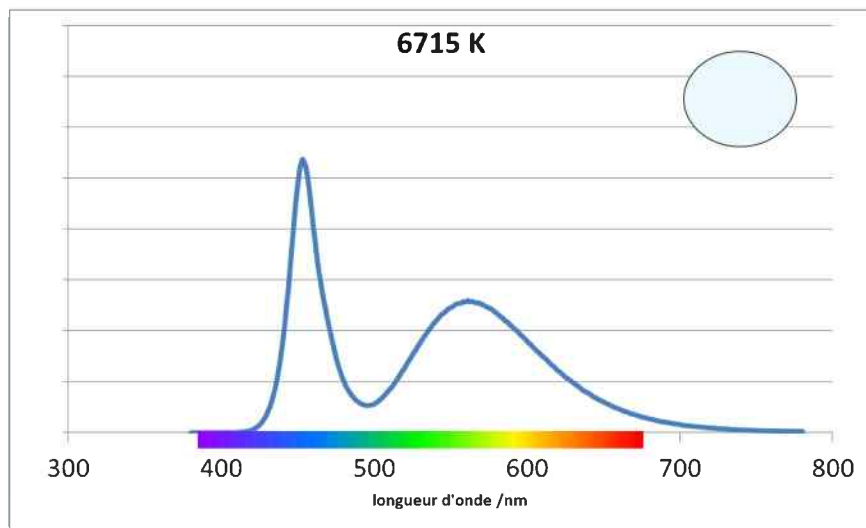




# Comparaison de l'efficacité des sources



# LEDs blanches à phosphore





# Les LEDs

# Oleg Vladimirovich Losev (1927)

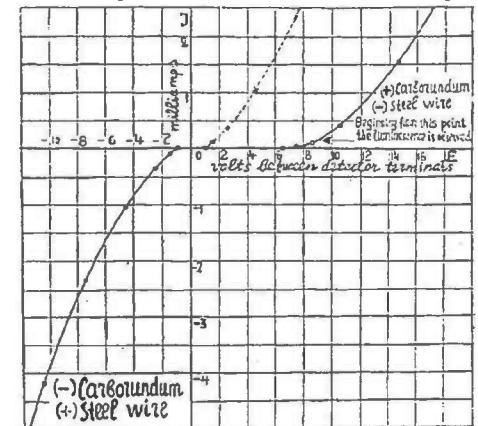


1903-1942

observait l'émission de lumière dans des **diodes** redresseurs utilisées dans les récepteurs de radio quand un courant est passé à travers (d'oxyde de zinc et de carbure de silicium cristal).

-> « décharge électrique froide »

Il a utilisé la théorie quantique d'Einstein pour expliquer l'action de la LED et a appelé le processus d'émission «l'effet photo-électrique inverse».



Losev, O. V. *Phil. Mag.* **6**, 1024–1044 (1928).

## Années 1955 à 1990: époque américaine

- 1955 Rubin Braunstein. Radio Corporation of America : **IR-LED (GaAs,...)**
- 1962 Nick Holonyak, Jr. of General Electric and Robert Hall: **LED rouge (GaAsP,...)** .
- 1968 Hewlett-Packard: **LED rouge** plus efficace
- 1972 M. George Craford (étudiant de Holonyak) : **LED orange & LED rouge** plus efficace
- 1974 Thomas Brandt (Fairchild Optoelectronics «chip»
- 1990 **orange, jaune, vert** GaAsP, GaP,...



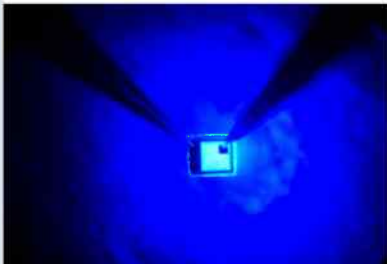
# Découverte de la LED bleue



1993 Shuji Nakamura, Nichia Corporation (Japan)

GaNN: Nitrure de gallium-indium

« Une des plus importante découverte en science des matériaux de semi-conducteur des derniers années »

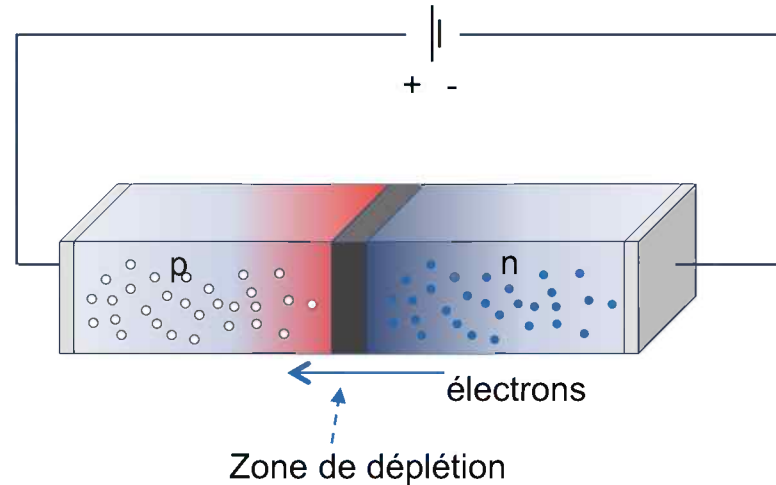


**La base pour créer la lumière blanche, les displays, les diodes laser bleues, les Blu-Rays**



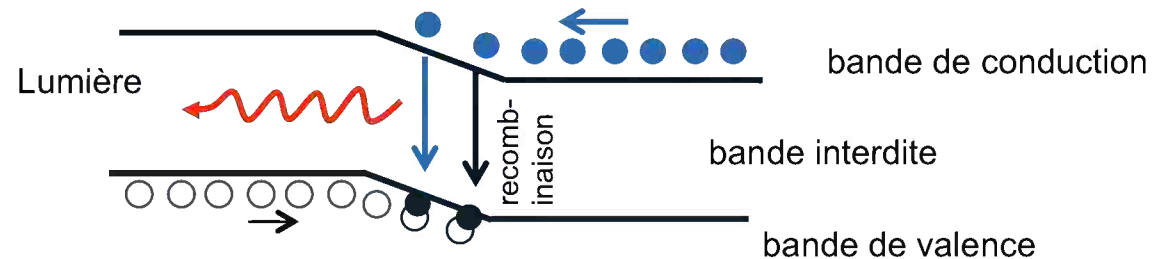
# Fonctionnement des LEDs (1)

Jonction semi-conducteur



1.5 V à 4.0 V  
tension de jonction

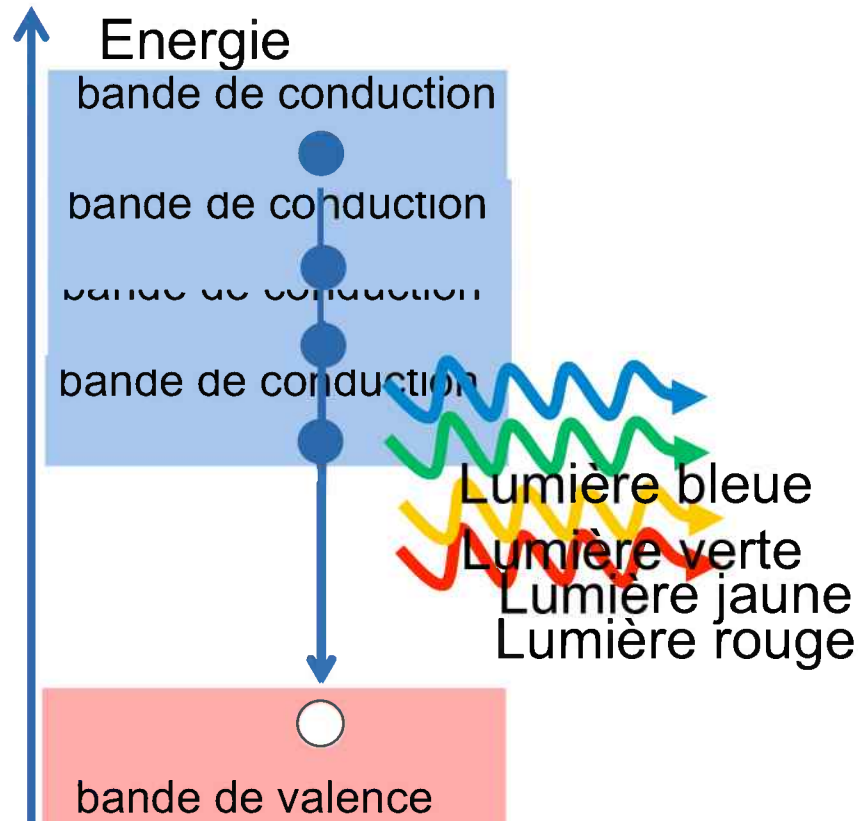
Modèle des bandes d'énergies



NB: le spectre d'émission d'une jonction est quasi monochromatique

## Fonctionnement des LEDs (2)

La hauteur du saut détermine la longueur d'onde de la lumière émise



Saut plus haut

-> plus d'énergie

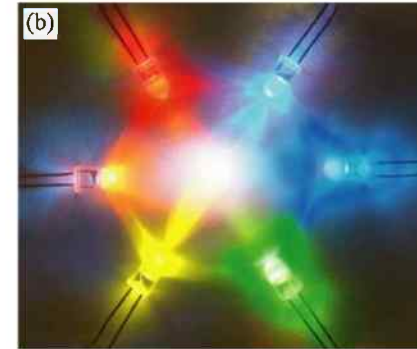
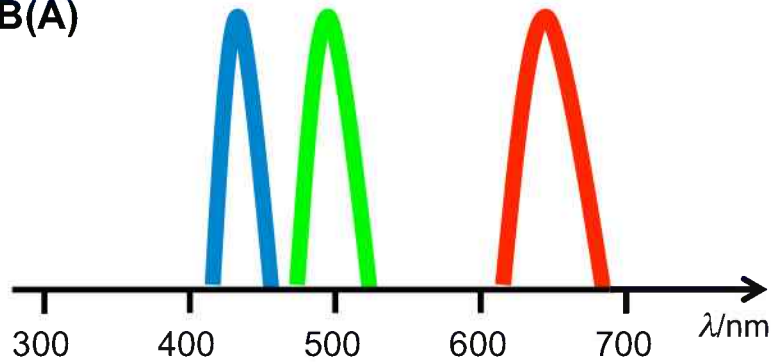
-> plus grande fréquence

-> plus petite longueur d'onde

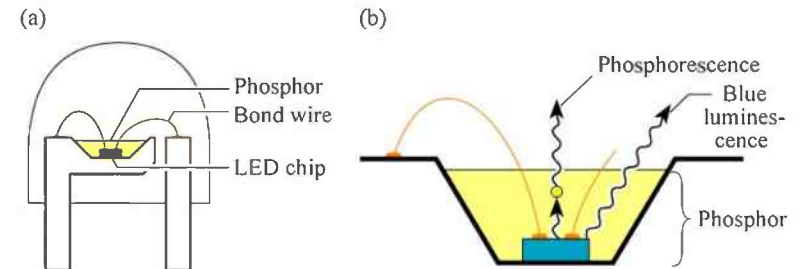
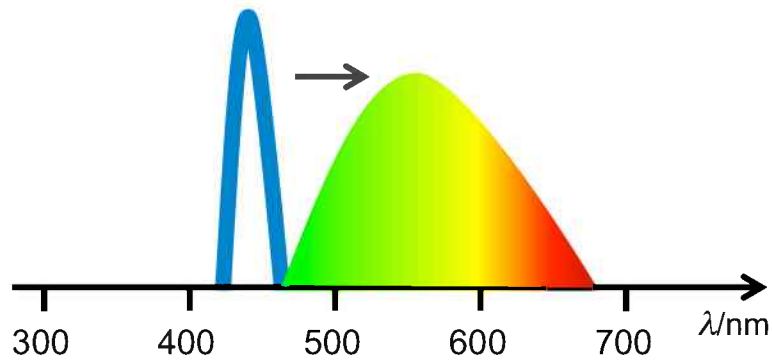
La hauteur du saut est déterminée par le choix du matériau des semi-conducteurs

# Comment faire la lumière blanche?

RGB(A)



Bleue + 1 phosphore

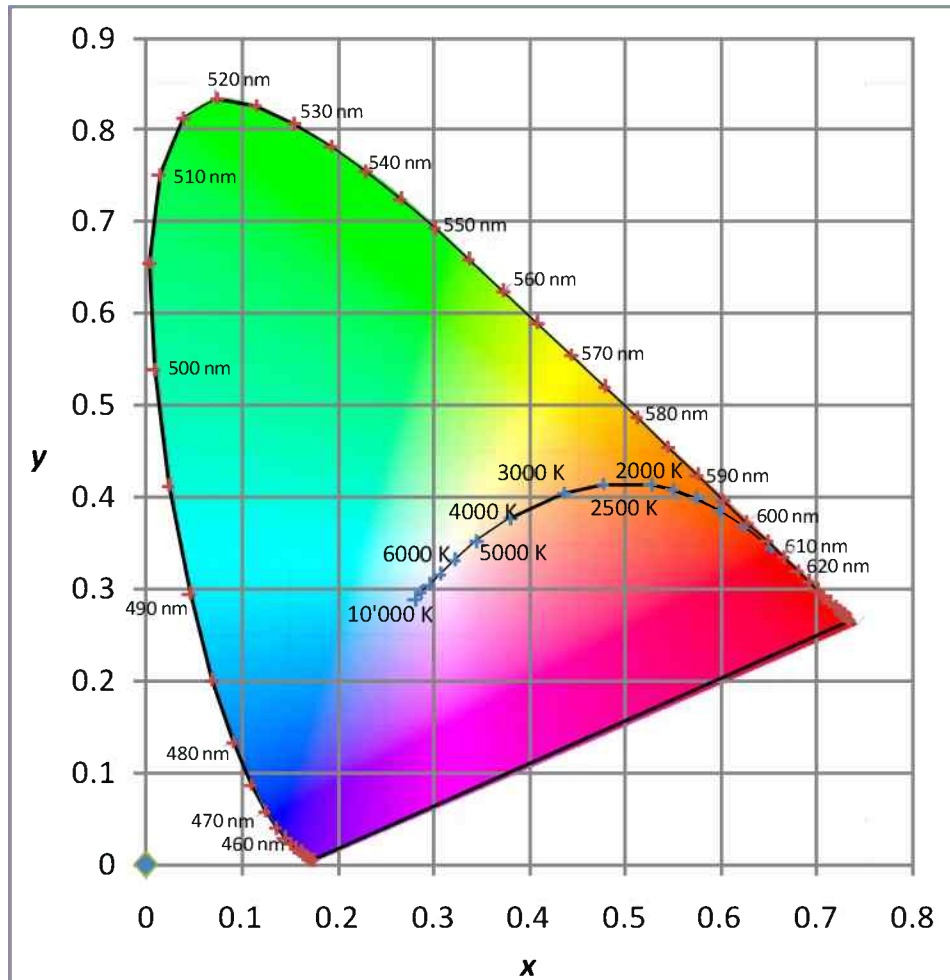


# température de couleur proximale

## température de couleur proximale

température du radiateur de Planck dont la couleur perçue ressemble le plus, dans des conditions d'observation spécifiées, à celle d'un stimulus donné de même luminosité

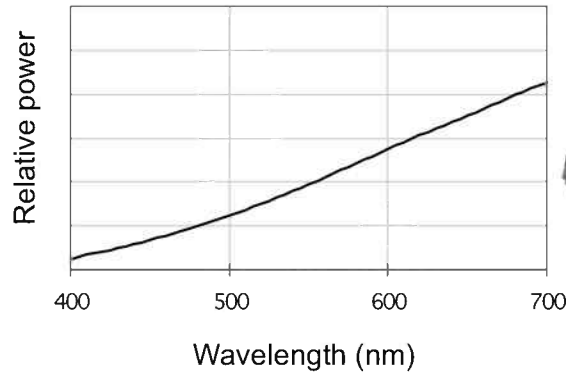
Unite SI :  $[T_{cp}] = K$



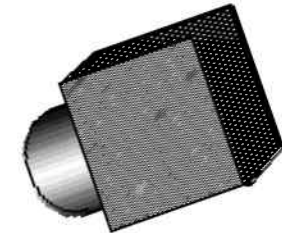
Différentes spectres peuvent provoquée les mêmes sensations de couleurs

# Couleur d'objet

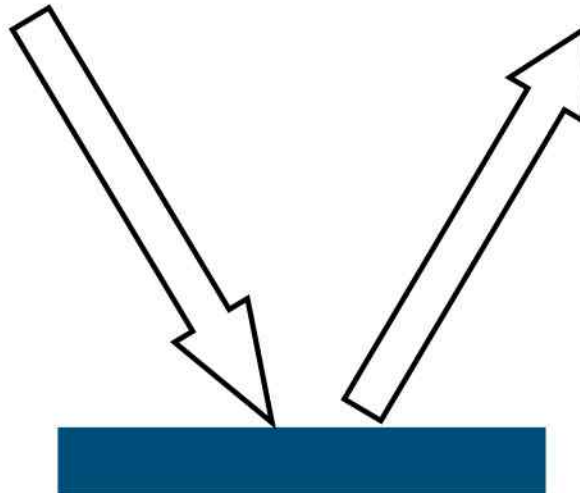
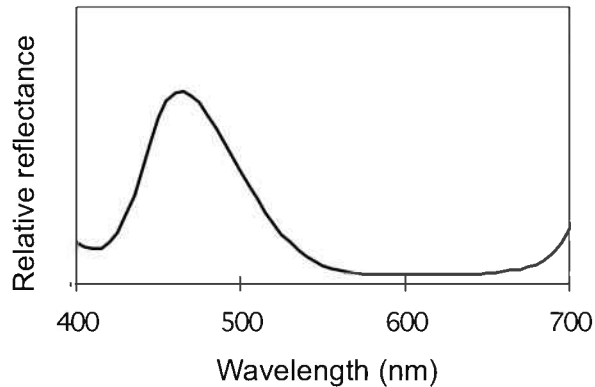
Source de lumière  $S(\lambda)$



yeux

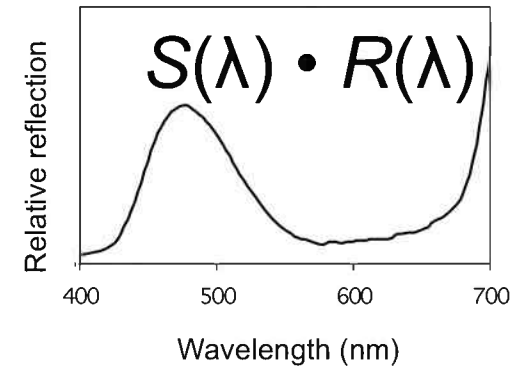


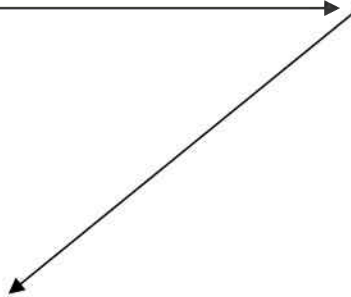
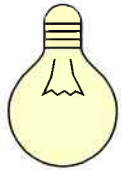
Spectre de reflection  $R(\lambda)$



sample

Lumière réfléchie





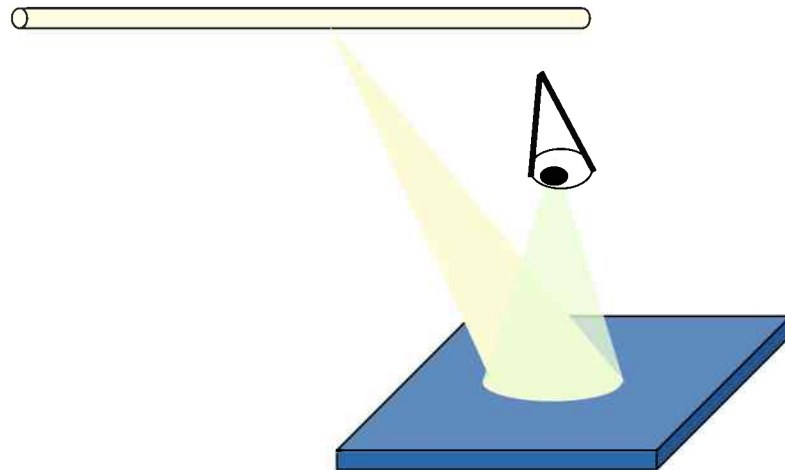
Conditions pour qu' un objet (en réflexion) apparait bleu:

- l'objet doit réfléchir surtout les longueurs d'onde 460 nm à 480 nm
- l'objet doit absorber les autres longueurs d'onde
- et** le spectre de la source doit contenir du bleu

-> l'apparence de l'objet dépend aussi de la source !!

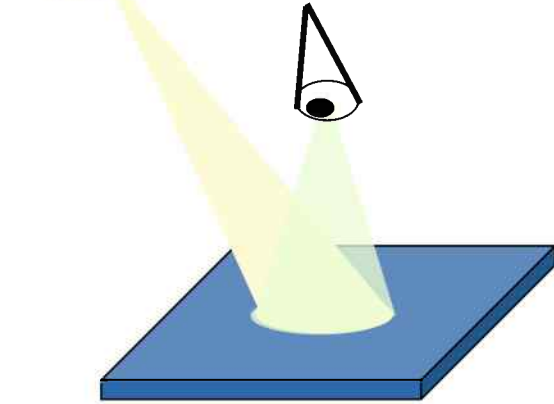
# Définition: L'indice de rendu de couleur

Lampe de test



Échantillon de couleur  
8 + 6 couleur de test

Lampe de référence



Échantillon de couleur

**L'indice de rendu de couleur** spécifique

$$R_i = 100 - 4.6 \Delta E_i$$

$$\Delta E_i$$

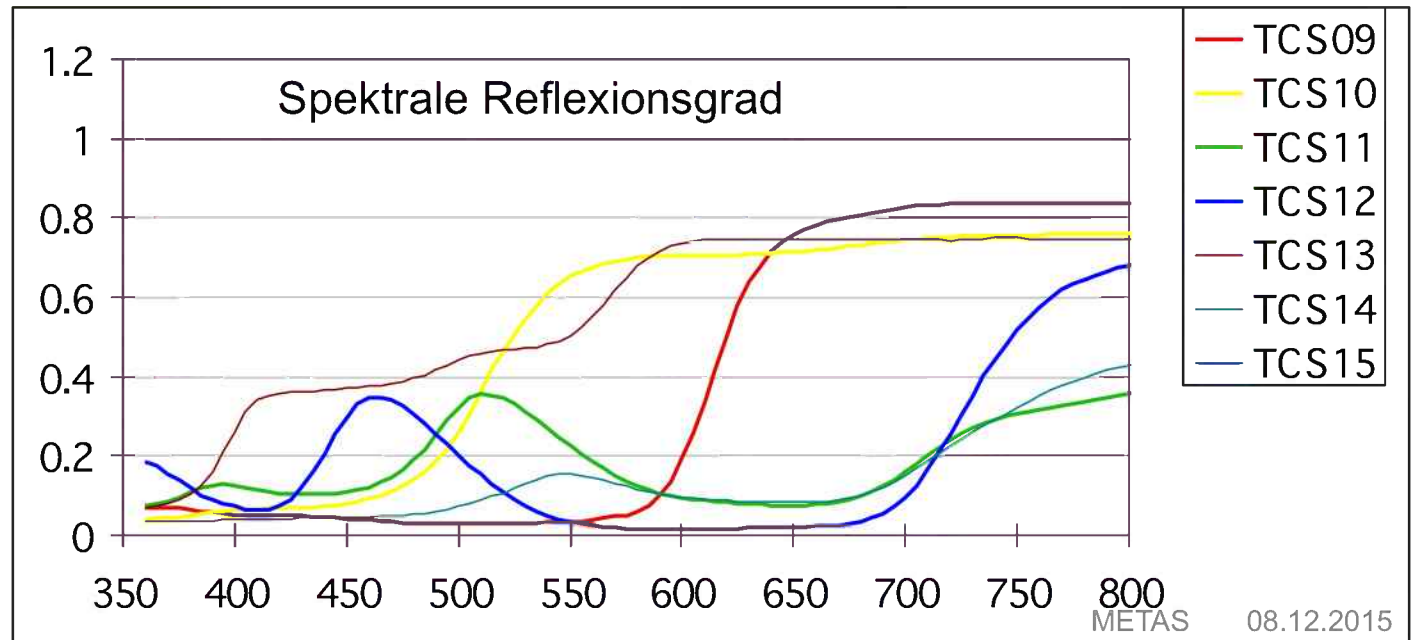
Différence de perception colorimétrique entre illumination de test et illumination de référence

**L'indice de rendu de couleur** générale

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i$$



# L'indice de rendu de couleur: couleurs de test



Caractéristique de rendu des couleurs	Niveau de rendu des couleurs	Indice de rendu des couleurs Ra	Exemples de lampes
Très bonne	1A	$\geq 90$	Lampes à incandescence, lampes à fluorescence 900,
			lampes à
Bonne			tallique
			tallique
Suffisante	3	40 ...59	lampes à vapeur de mercure
Insuffisante	4	<39	Lampes à vapeur de sodium à basse pression

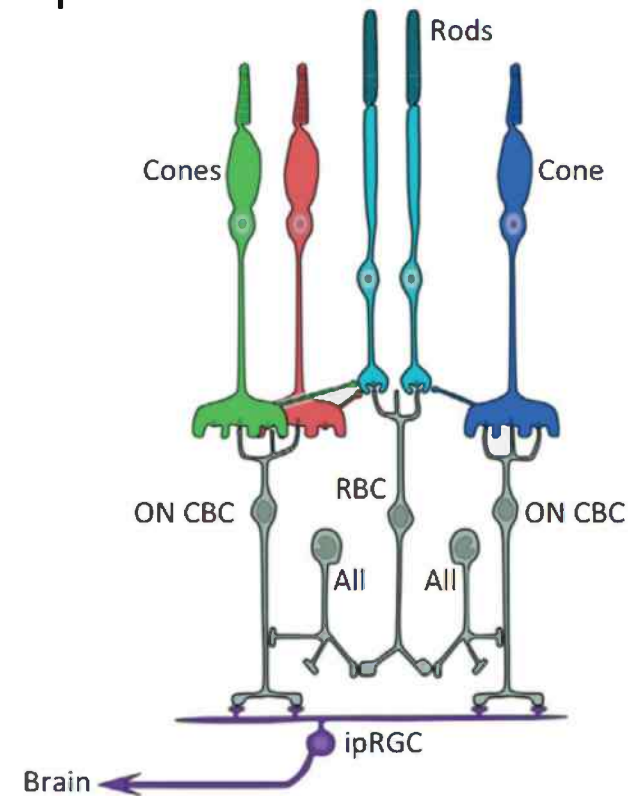
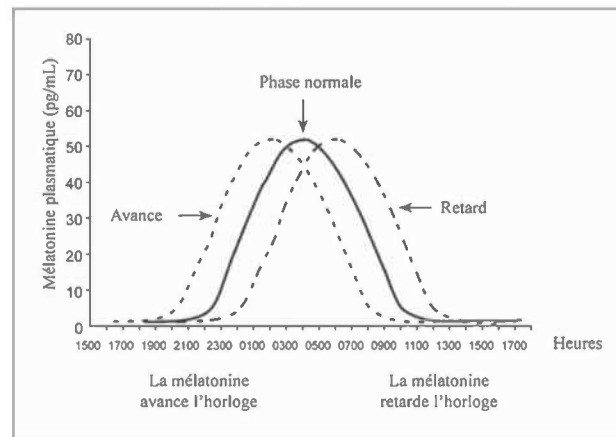


# Effets biologiques de la lumière

Découverte en 1990 par Professeur Russell Foster:

Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells (ipRGC)  
cellules rétiniennes ganglionnaires intrinsèquement photosensibles

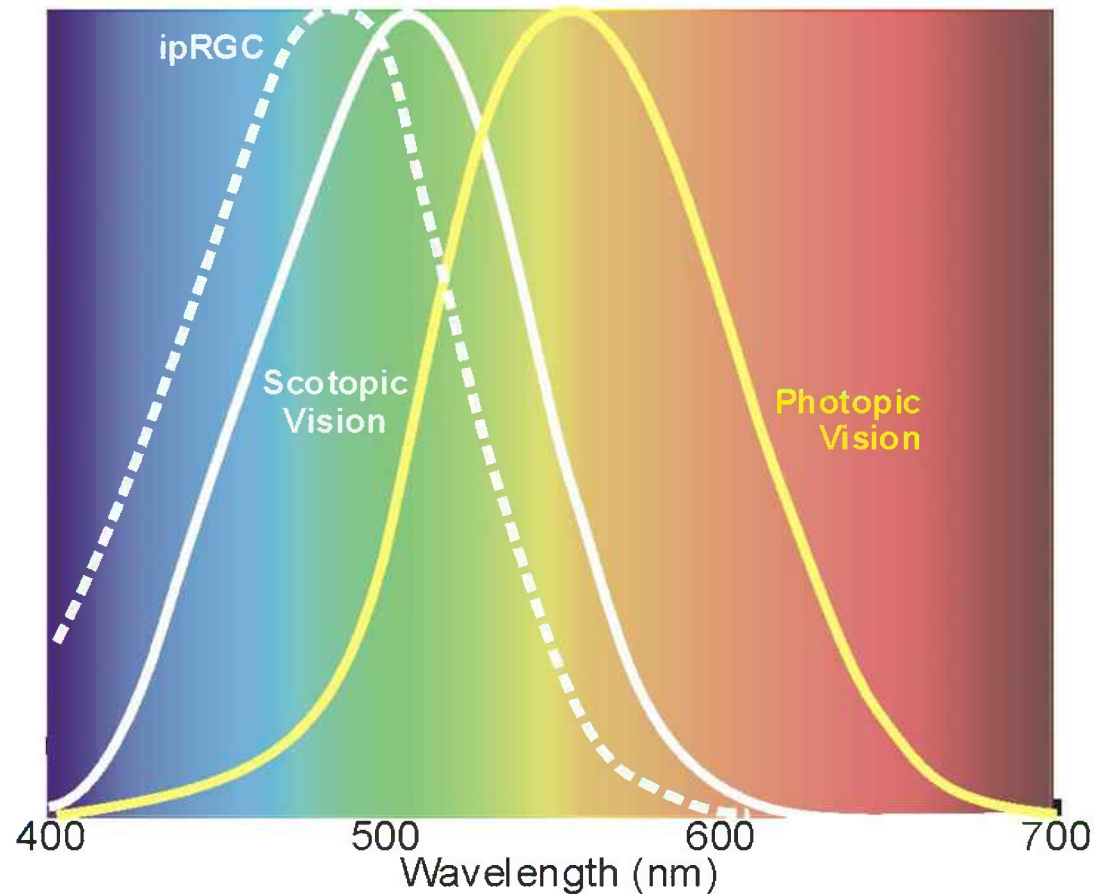
Régulation du taux de mélatonine



Rythme circadien

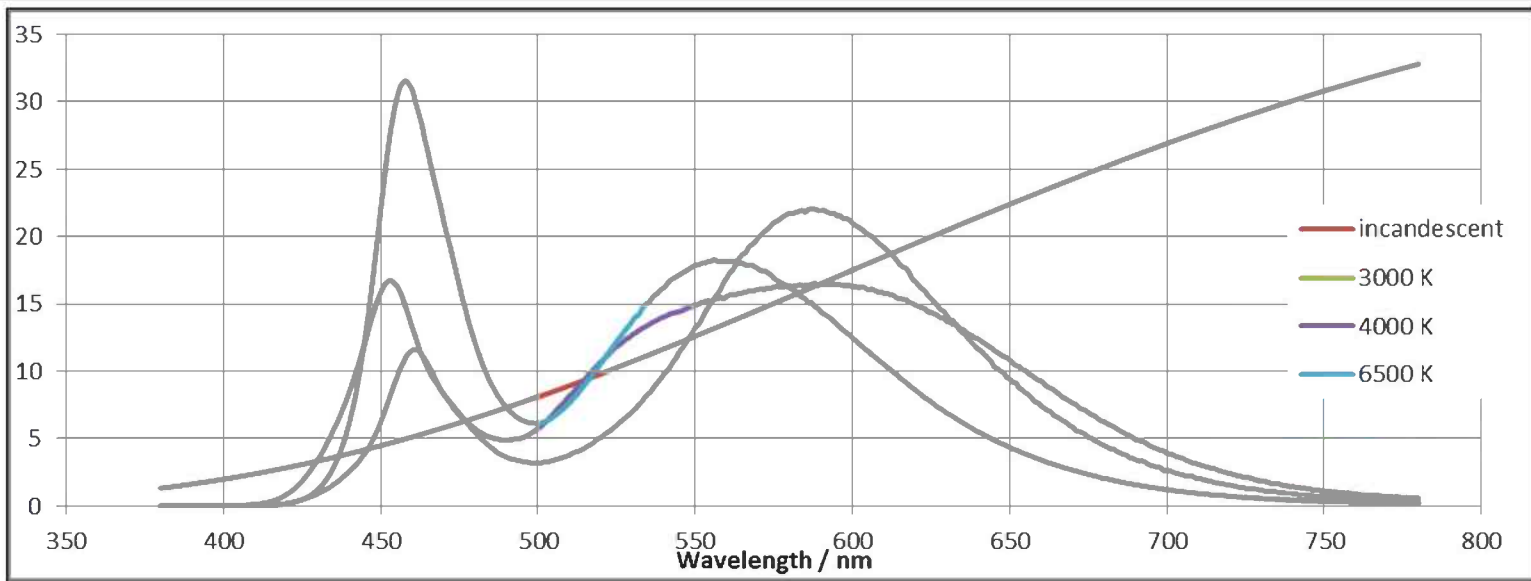
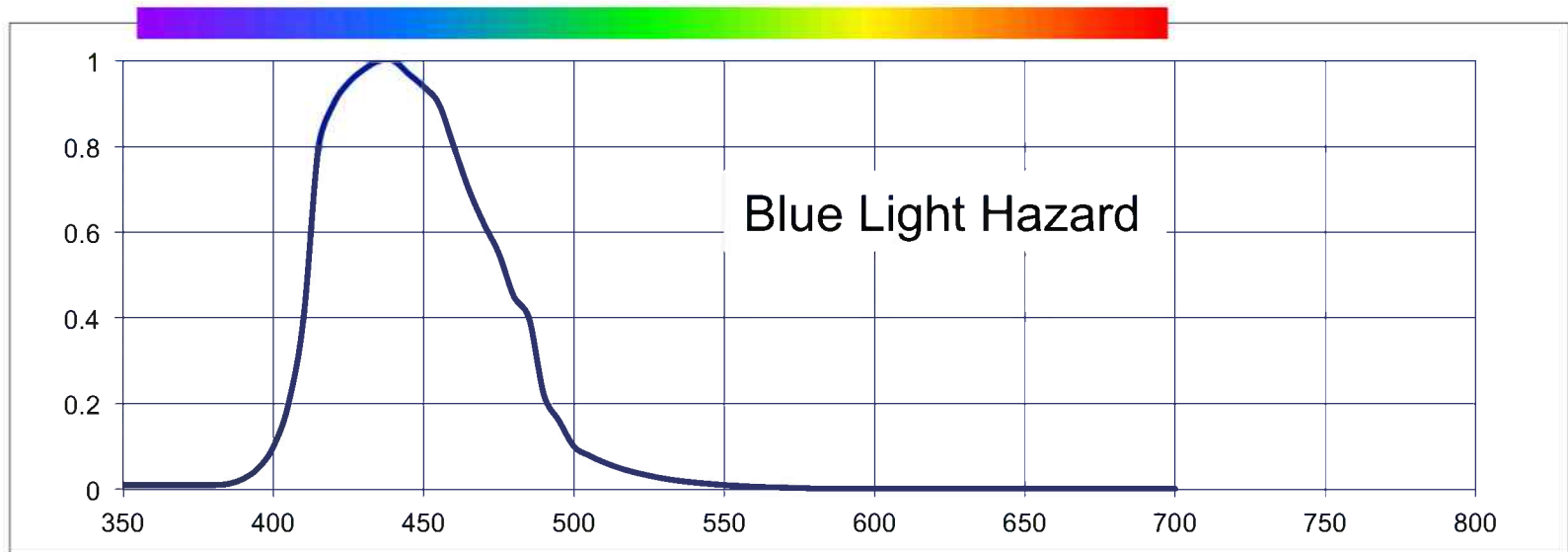


# Sensibilité spectrale des cellules ipRGC

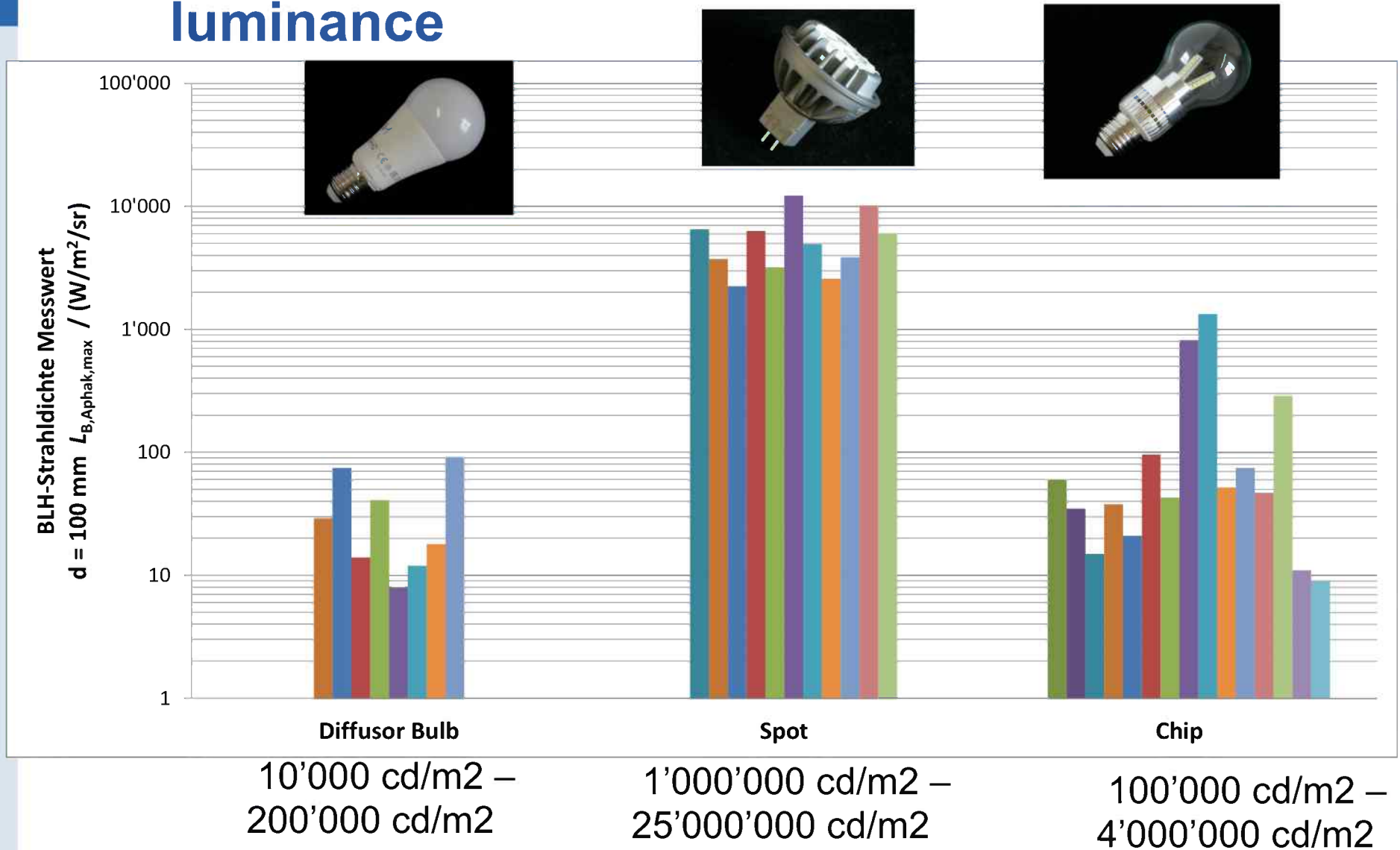


Lumière bleue: mais attention  
à la quantité à la heures d'exposition

# Trop de rayonnement peut nuire



# Mais: Cela dépend de la couleur et de la luminance



Reflection from white paper (500 lx): 150  $cd/m^2$



Merci pour votre attention







# Reserves

## Définition actuelle de la Candela

La candela(cd) est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian.

Die Candela (cd) ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle die monochromatische Strahlung der Frequenz  $540 \cdot 10^{12}$  Hertz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung 1/683 Watt pro Steradian beträgt.

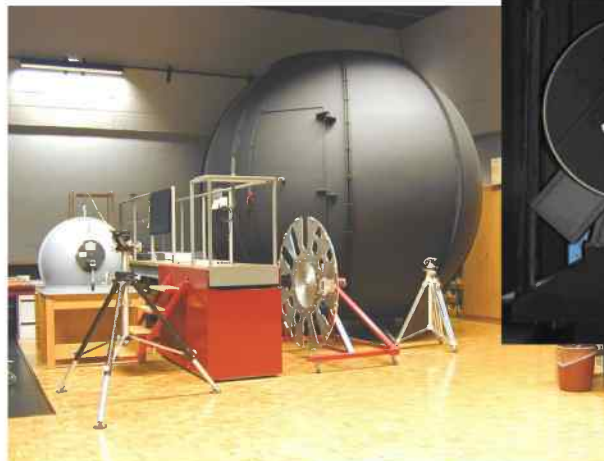
La candela (cd) è l'intensità luminosa, in una determinata direzione, di una sorgente che emette una radiazione monocromatica di frequenza  $540 \cdot 10^{12}$  hertz e la cui intensità energetica in tale direzione è di 1/683 watt per steradiante.

# Compétence clé du labo optique



Radiométrie  
Laser, UV...

Photométrie  
Lampes, Luminaires



Evaluation des dangers liés aux sources optiques (Laser, UV, LED, ....)



# Le laboratoire optique

- Réalisation de l'unité de base Candela et les autres unités photométriques et radiométriques
- Etalonnages, Mesurages et tests pour l'industrie et les autorités
- Etroite collaboration avec les partenaires des institutions publiques (OFSP, OFROU, OFEV, OFEN, SUVA,...)
- Contribution active à la normalisation nationale et internationale (SNV, CEN, ISO, CIE)
- Système qualité, entretien, amélioration
- Divers projets de recherche et de développement

# Brightness vs luminance

