
SCIENCES APPLIQUÉES

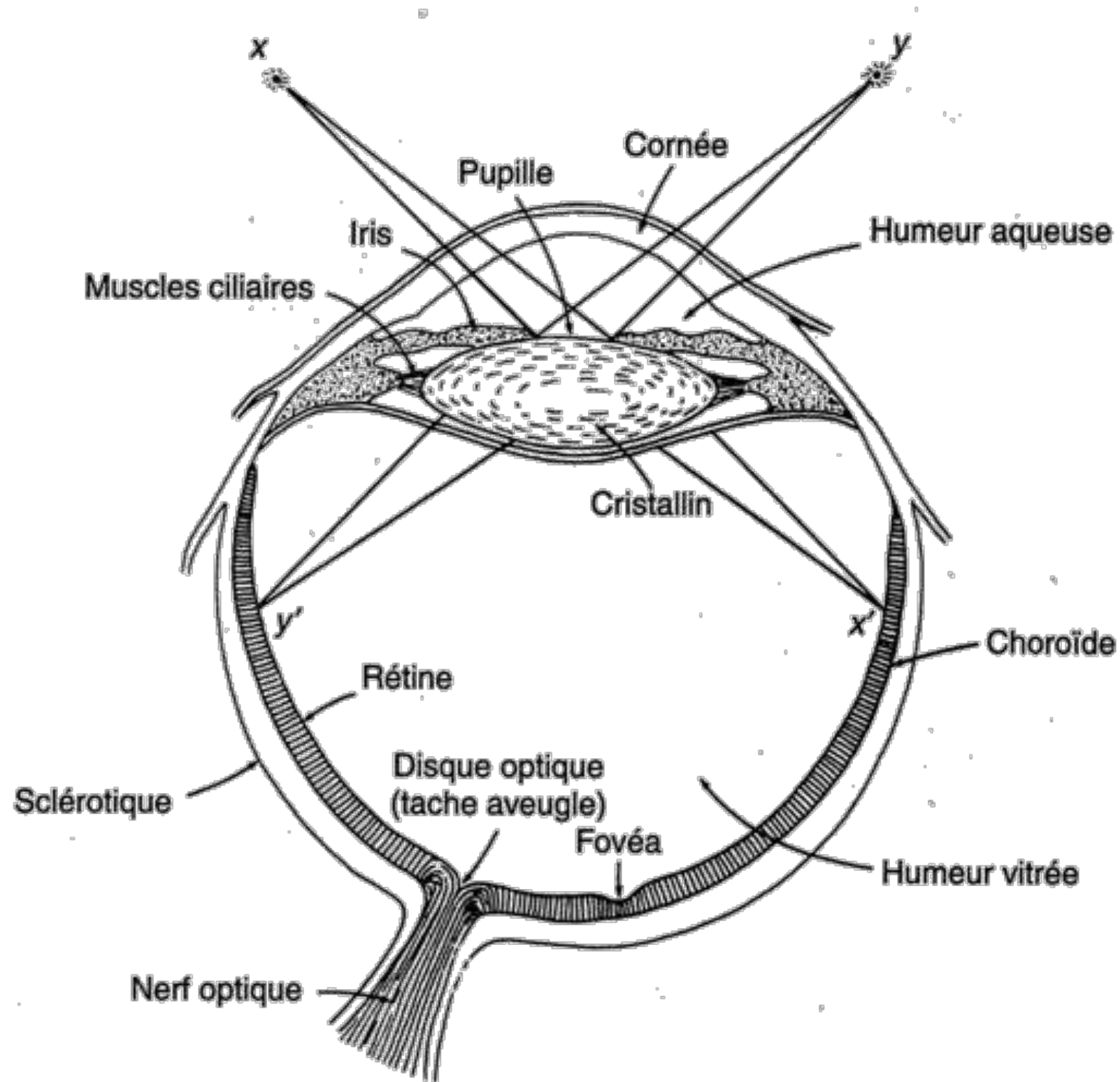
PHOTOMÉTRIE

Partie 1

LA LUMIERE

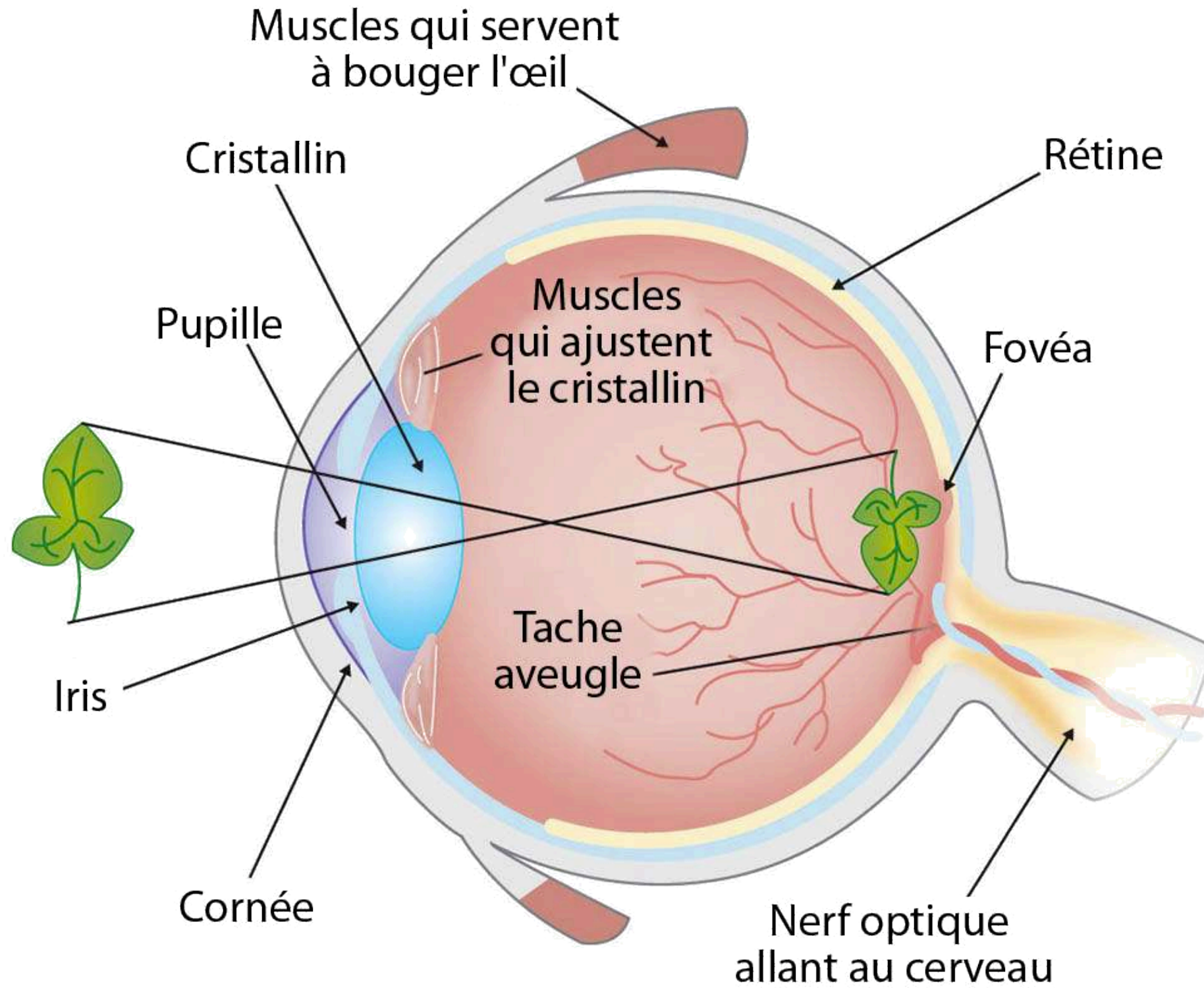
I. L'oeil et les couleurs

1. Coupe de l'oeil

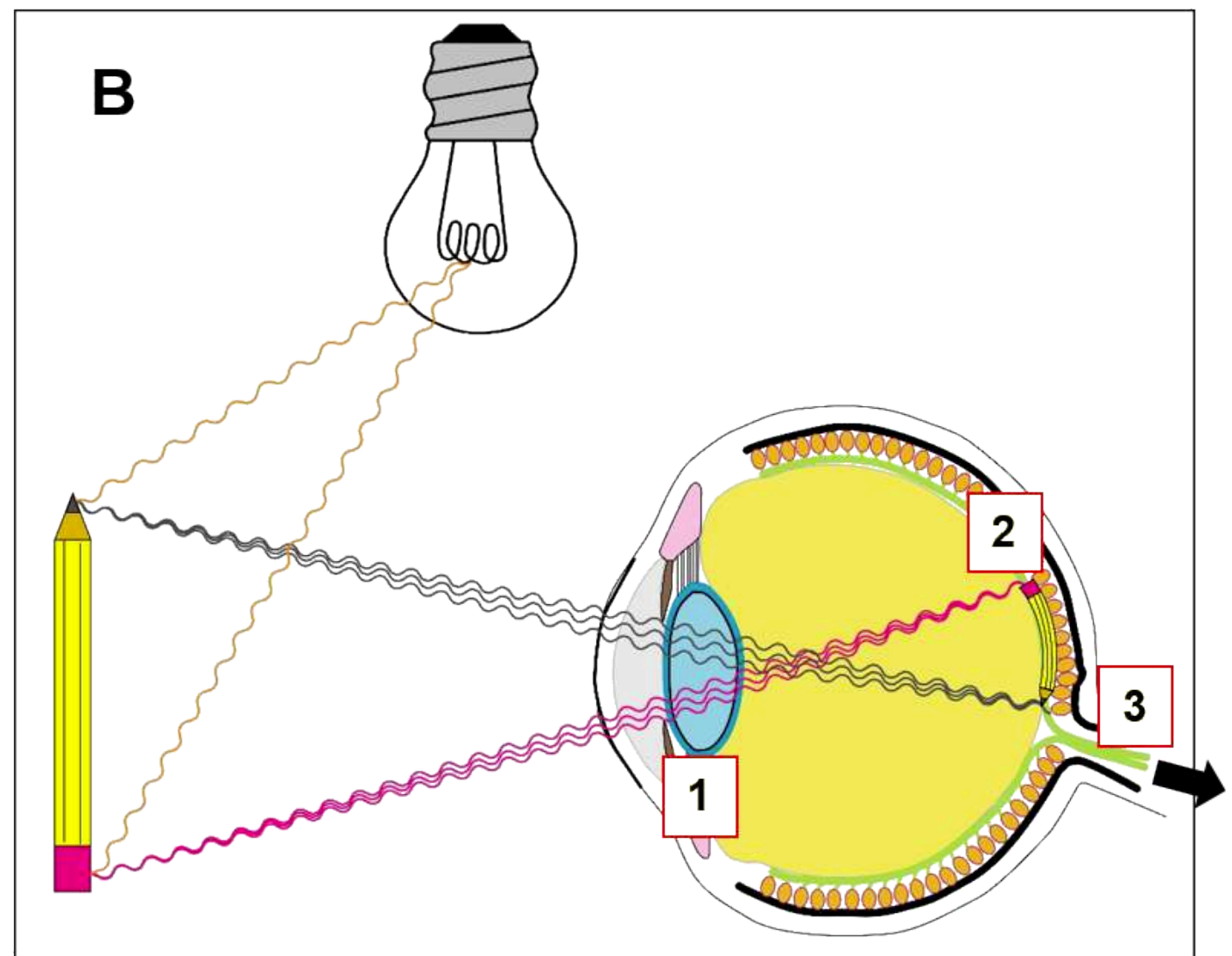
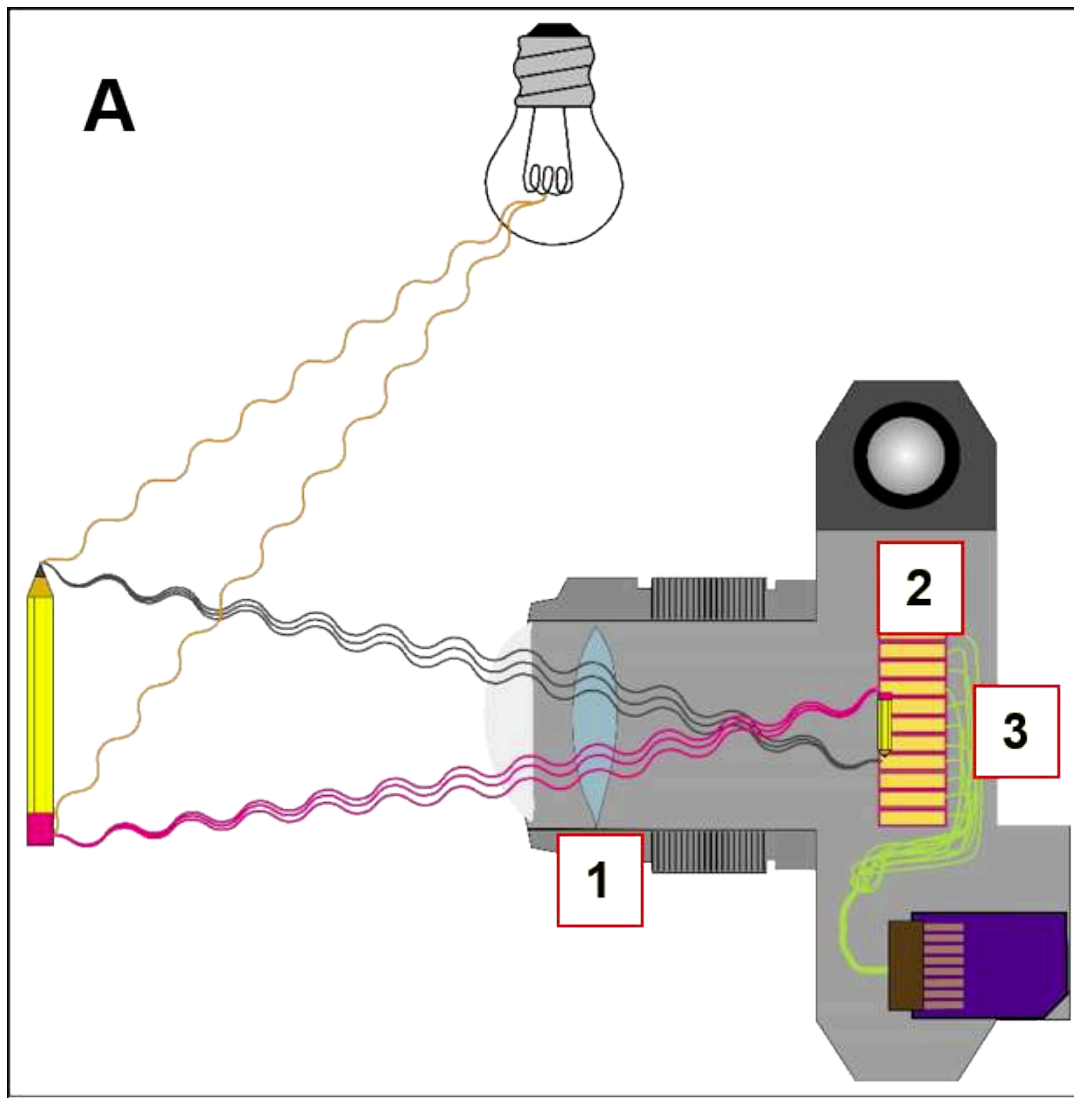


Coupe de l'œil humain. Le point x forme une image au point x' et le point y une image au point y' sur la rétine. Coren, Ward et Enns (1994, p. 68.) citée par André Delorme, Michelangelo Flückiger, Perception et réalité – Une introduction à la psychologie cognitive, Paris, De Boeck, 2003, p. 75.

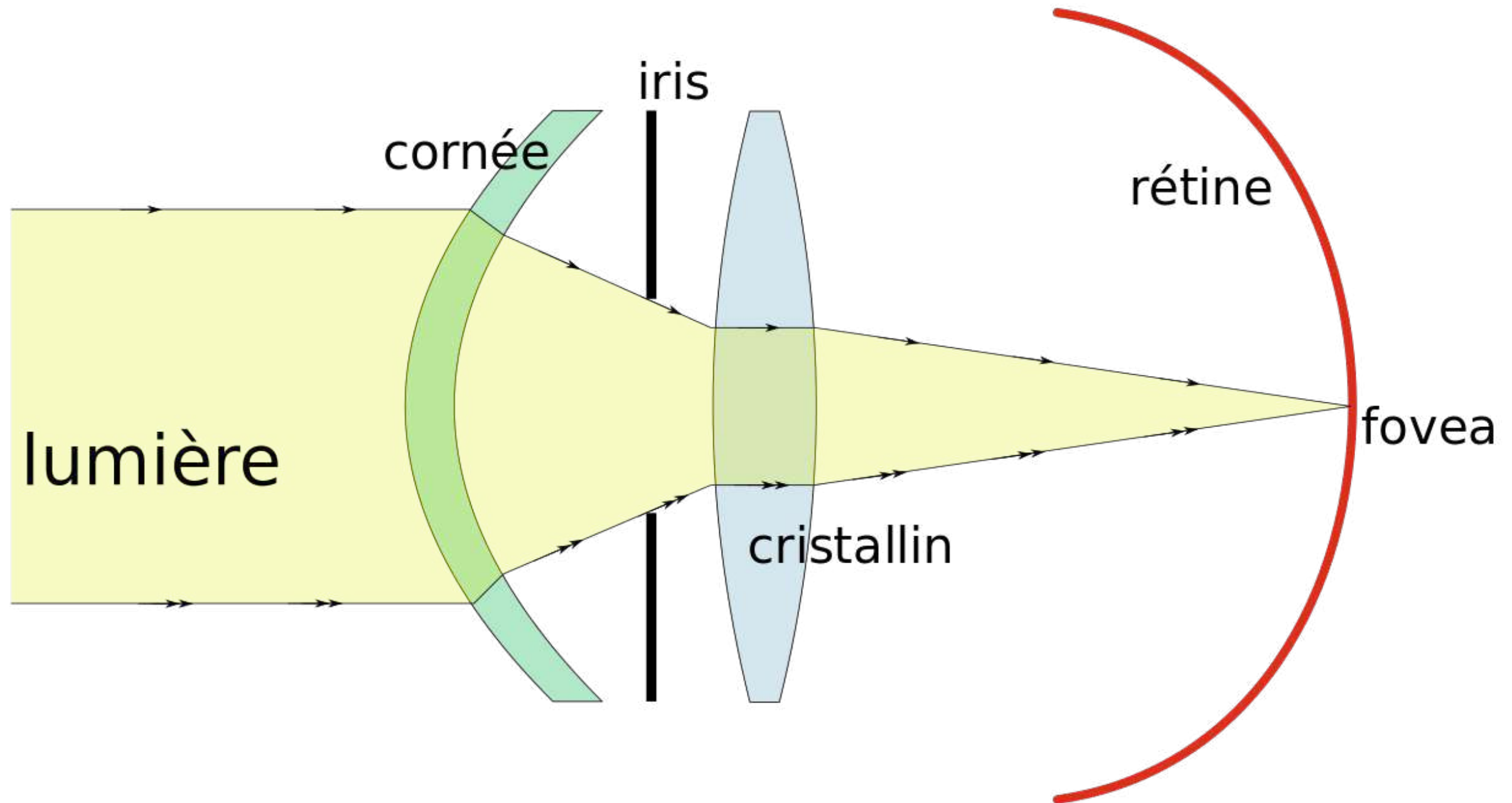
2. Formation de l'image



3. Oeil \longleftrightarrow Appareil photo



4. Cristallin ↔ Lentille



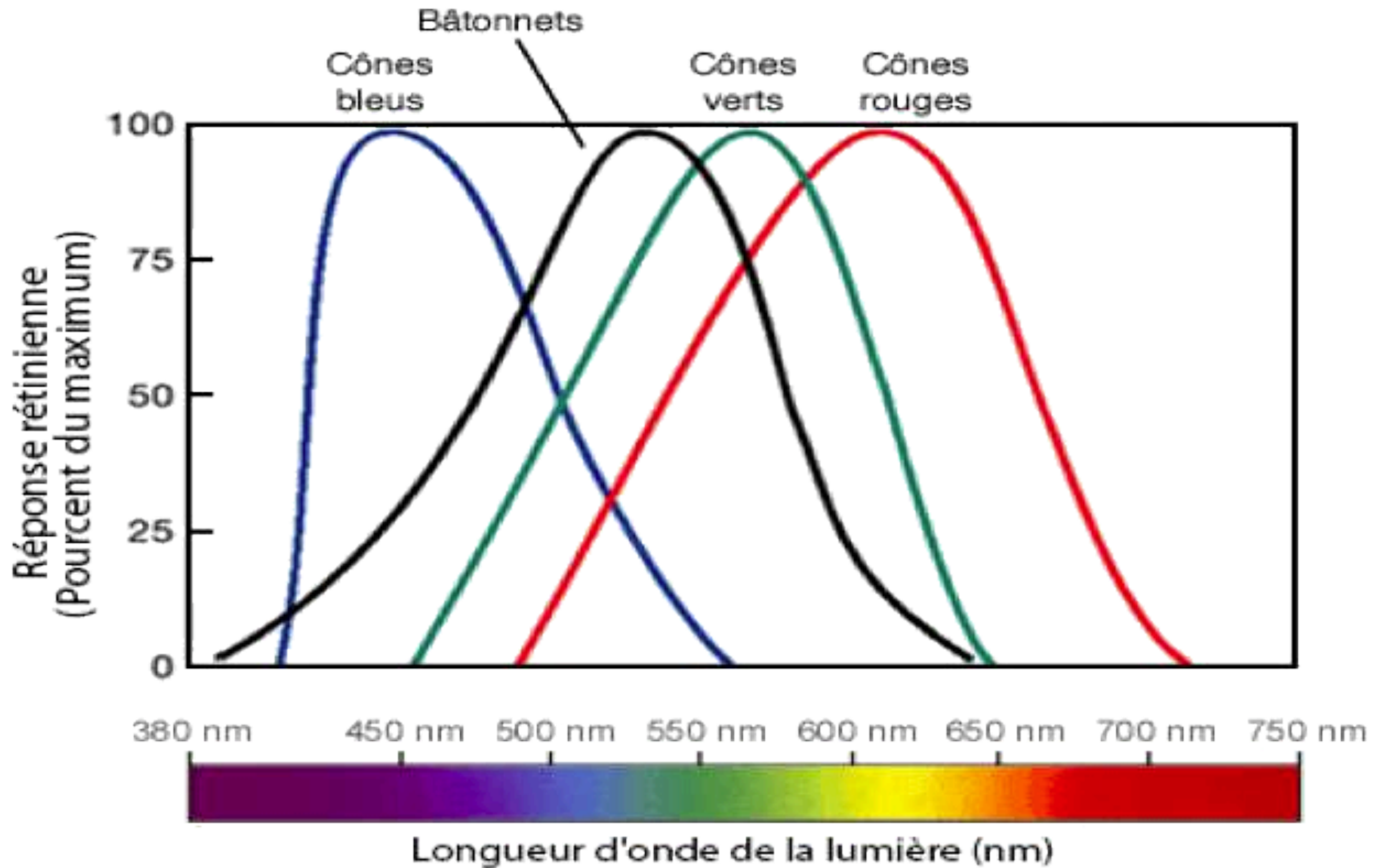
5. Iris ↔ Diaphragme



6. Deux types de visions

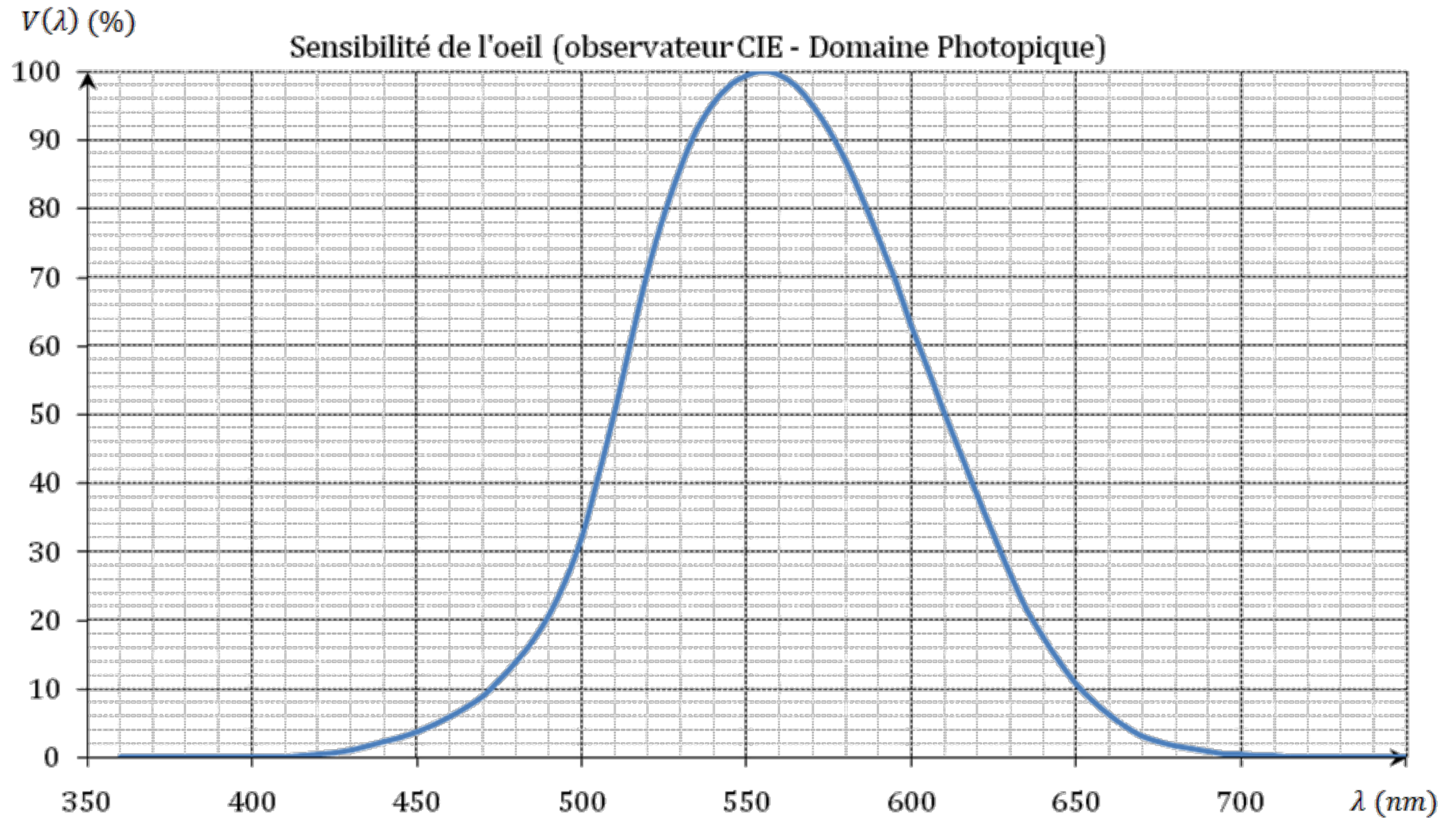
- **Vision scotopique**
- **Vision photopique**

7. Courbe des photorécepteurs de l'oeil

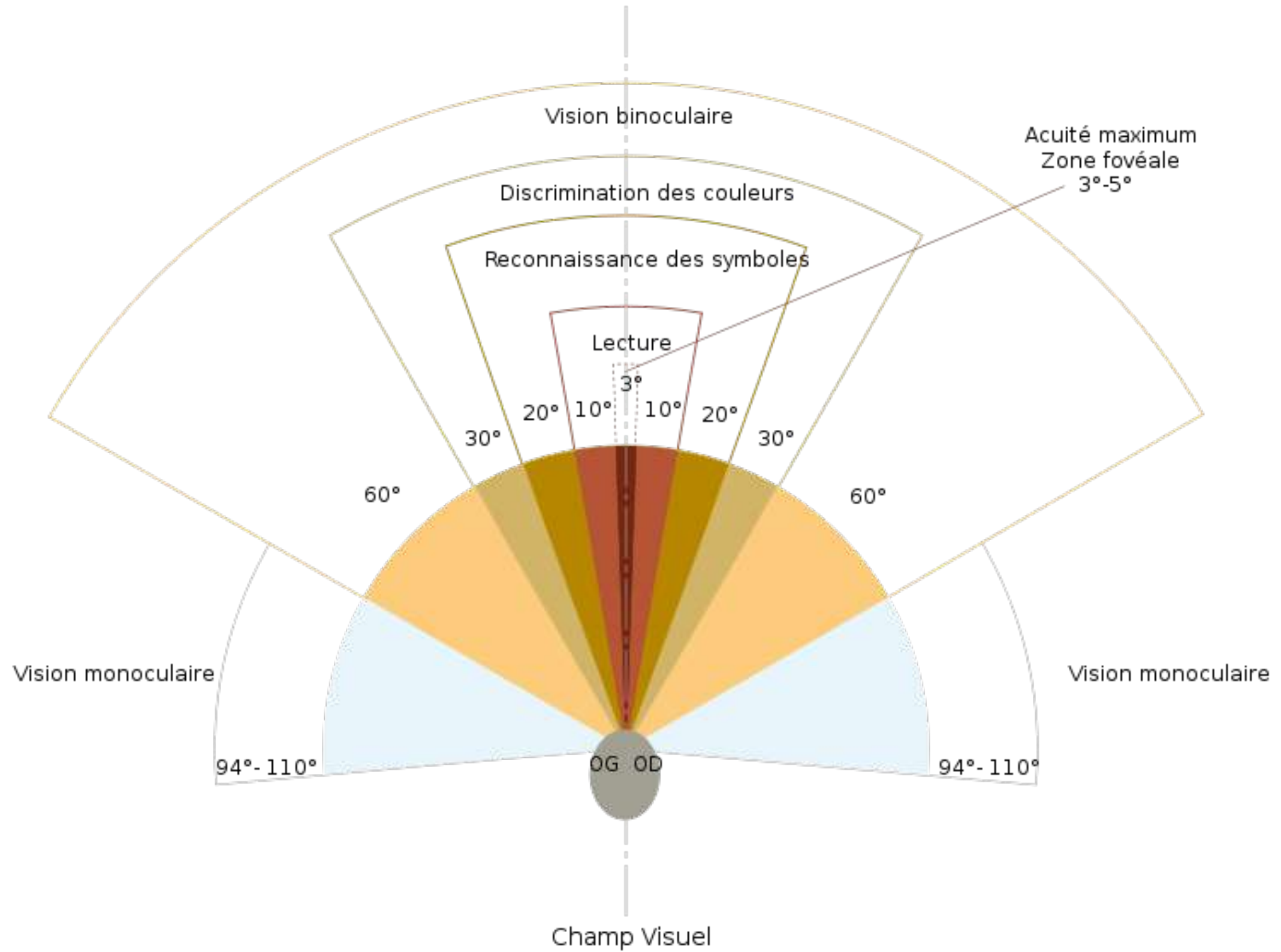


Courbes relatives d'efficacité lumineuse spectrale en vision photopique et scotopique établie par la CIE In Extrait de Rods and cones of the Human eye

8. Courbe de sensibilité de l'oeil



9. Champ Visuel



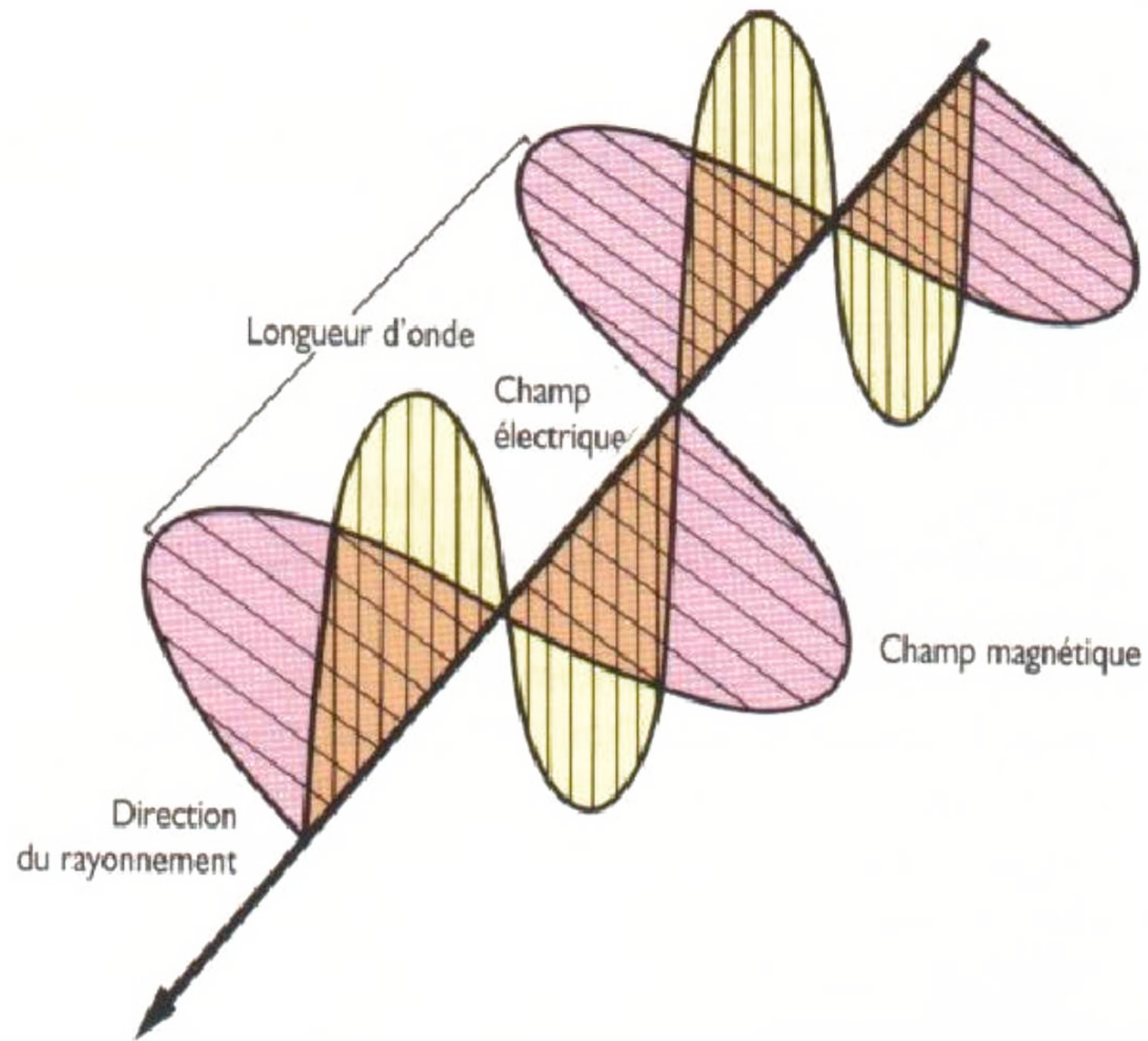
II. La lumière

1. Définition de la lumière (visible)

Subst. fém.

Rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde, comprise entre 400 et 780 nm, correspond à la zone de sensibilité de l'oeil humain, entre l'ultraviolet et l'infrarouge.

2. Aspect ondulatoire de la lumière



3. Le photon

Chaque photon possède une énergie E fixée par la relation de Broglie

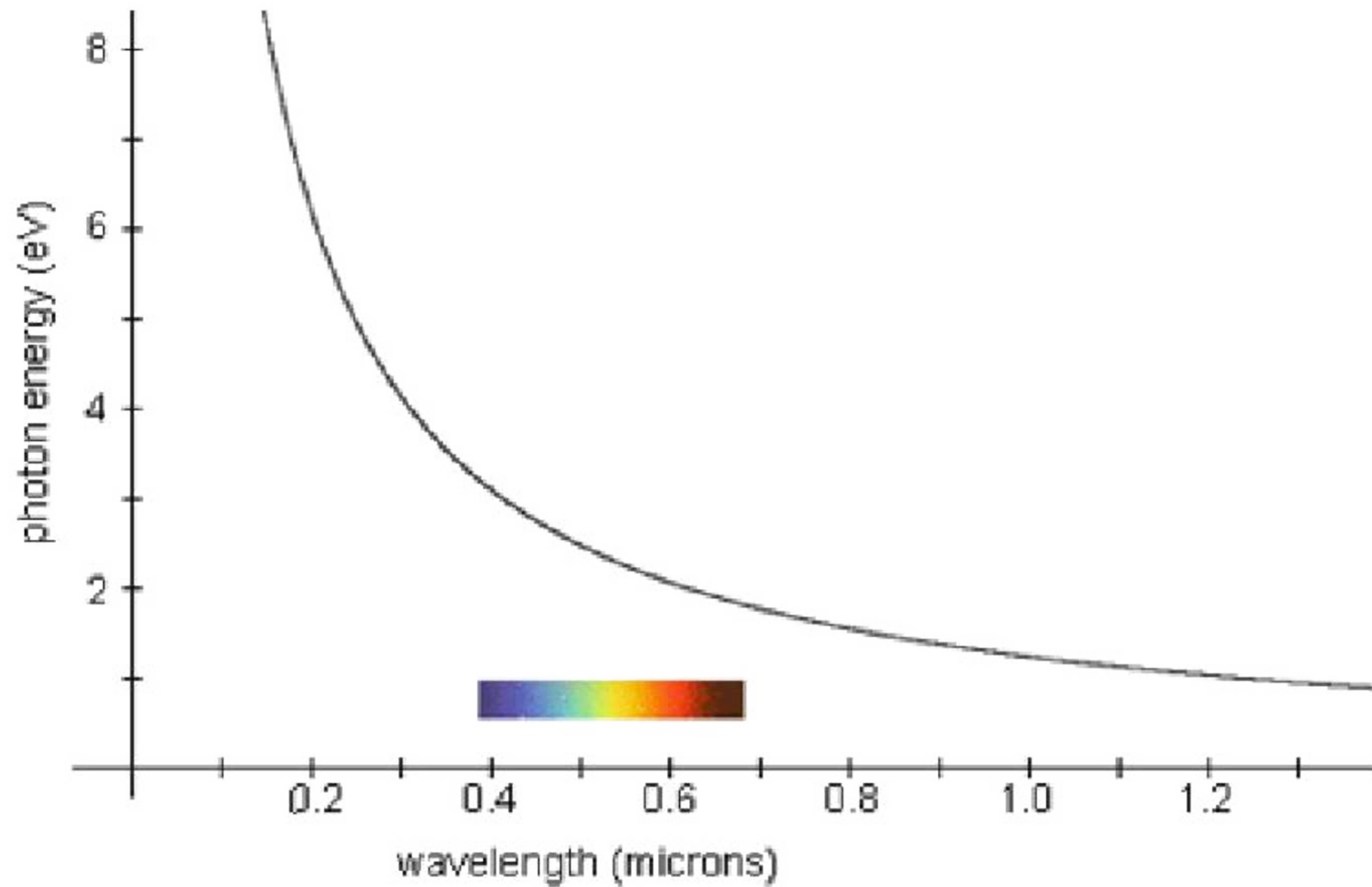
$$E = h \cdot \mu$$

E : En Joule (J)

h : Constante de planck (J.s^{-1})

μ : Fréquence de propagation en Hertz (s^{-1})

3. Le photon



4. La longueur d'onde

$$\lambda = \frac{c}{\mu}$$

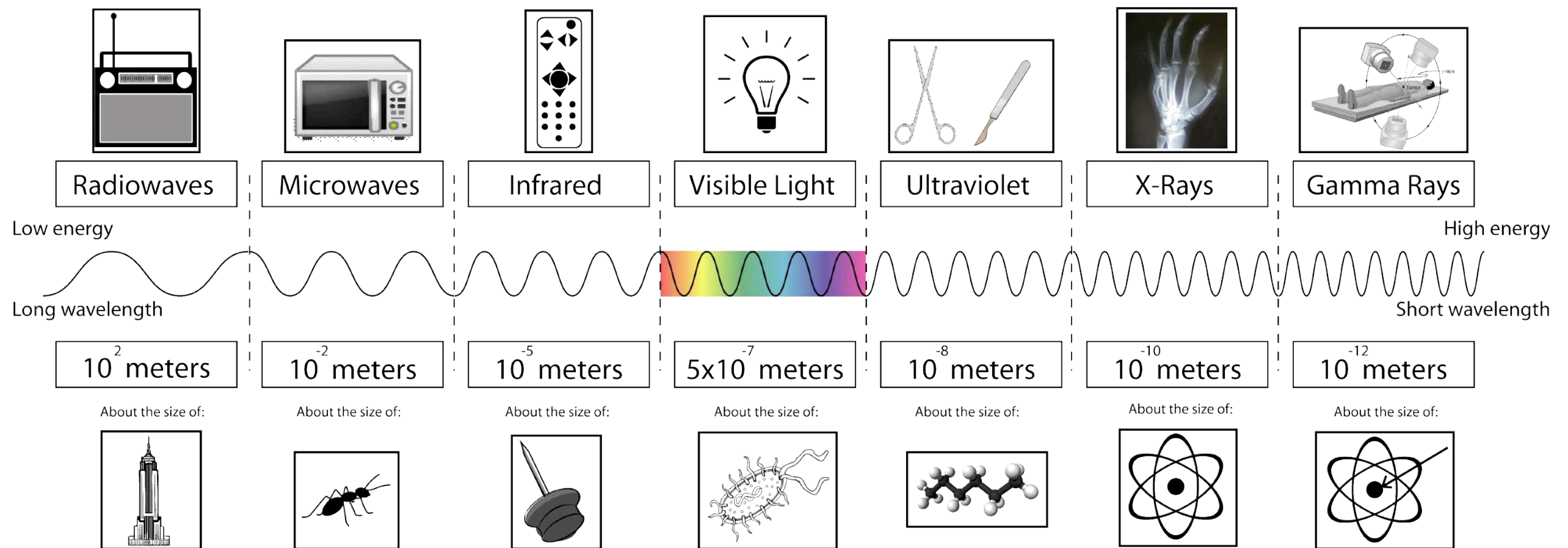
λ : Longueur d'onde (mètre)

c : Vitesse de la lumière dans le vide ou célérité

$299\,792\,458\text{ m.s}^{-1} \approx (3.10^8\text{ m.s}^{-1})$

μ : Fréquence de propagation en Hertz (s^{-1})

5. Le visible



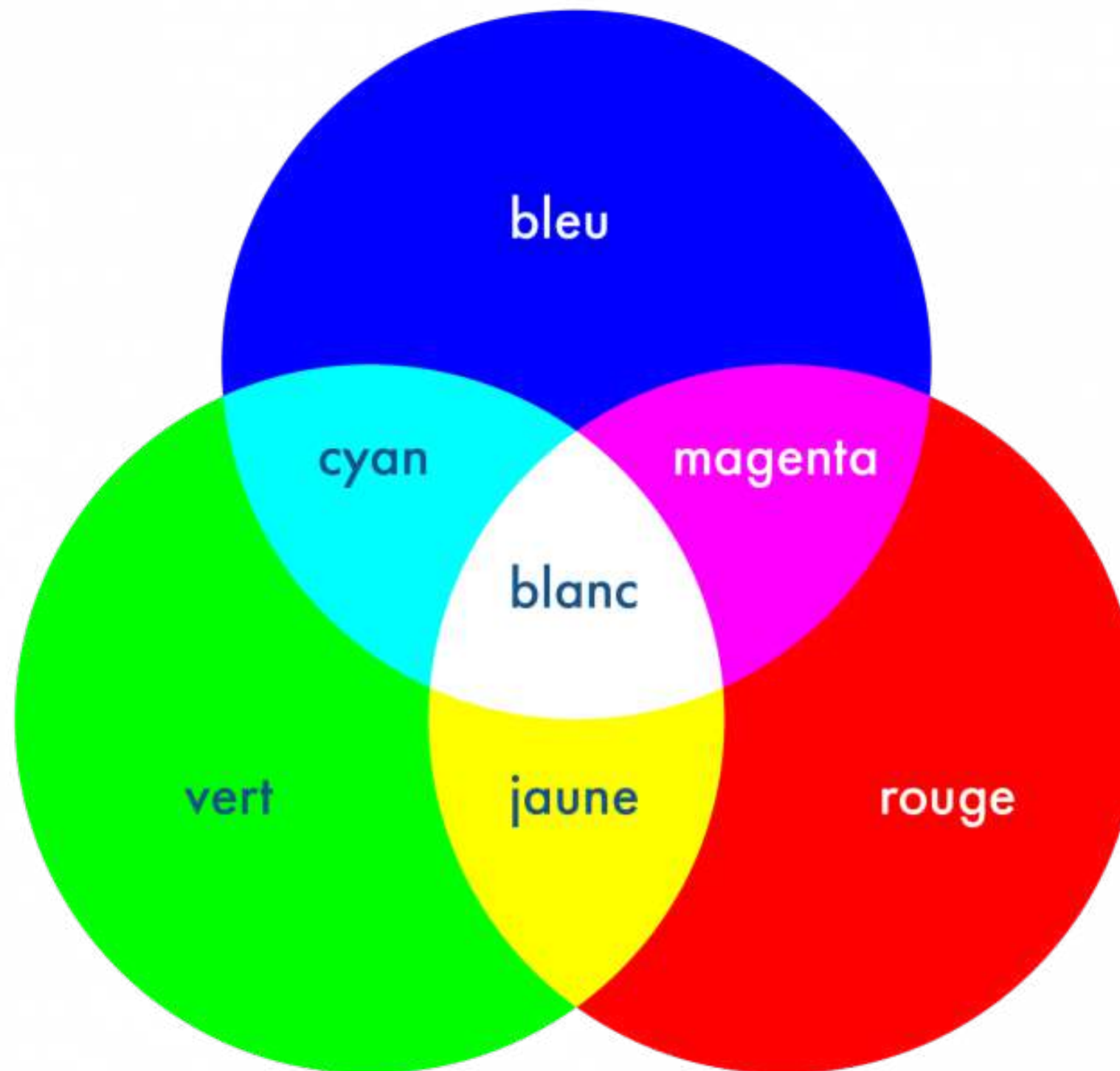
6. Synthèse Additive

Principe de la synthèse Additive :

Combinaison des lumières de plusieurs sources colorées dans le but d'obtenir une lumière colorée quelconque.

Les couleurs primaires sont le bleu, le vert et le rouge.

6. Synthèse Additive

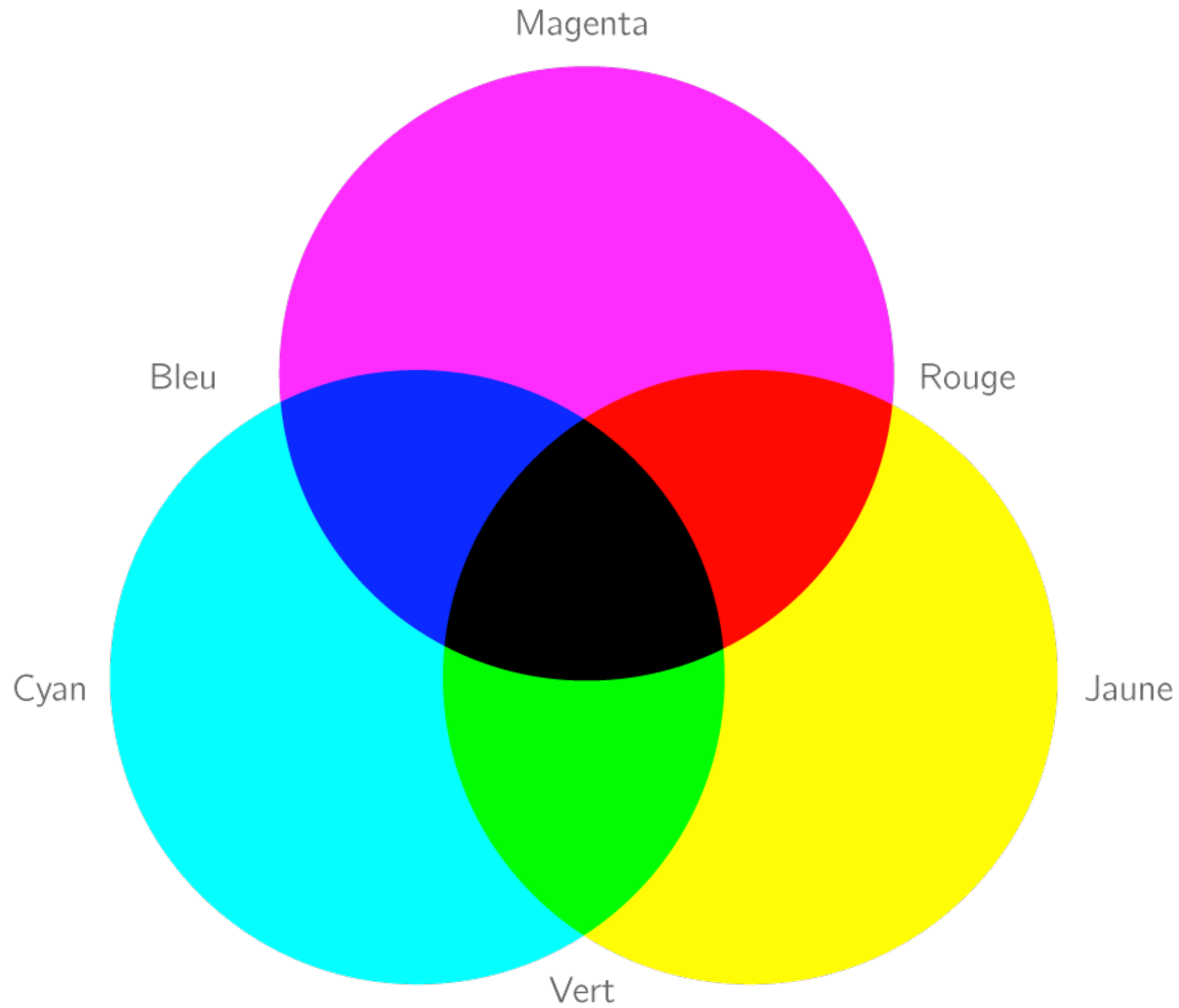


7. Synthèse Soustractive

Principe de la synthèse Soustractive :

Utilisée dans l'imprimerie (concept de la quadrichromie), les couleurs primaires sont le cyan, le magenta et le jaune.

7. Synthèse Soustractive



III. Les différentes sources lumineuses et leurs spectres

1. Les sources de lumière



1. Les sources de lumière



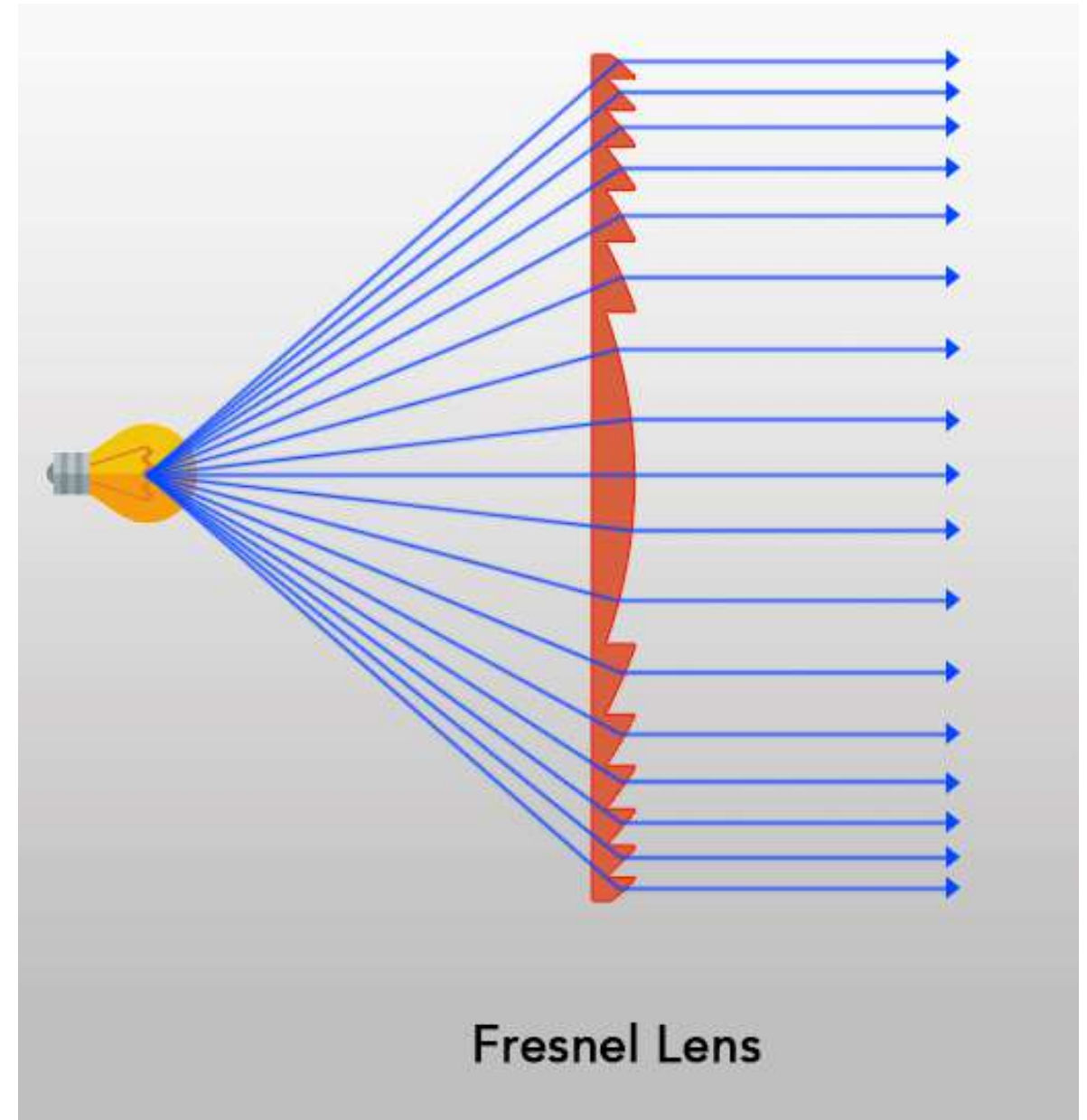
1. Les sources de lumière



2. Les modeleurs de lumière



2. Les modeleurs de lumière



3. Aspect qualitatif de la lumière

On distingue trois types qualitatifs de sources :

- **Lumière dirigée** : Caractéristique d'une lumière « dure ». Les rayons lumineux arrivent parallèles entre eux
- **Lumière semi-diffuse** : Correspond à plusieurs sources dirigées et diffuses à la fois
- **Lumière diffuse** : Caractéristique d'une lumière « douce ». Les rayons lumineux ne sont pas parallèles

3. Aspect qualitatif de la lumière



© Paul Graham

3. Aspect qualitatif de la lumière



© J. Davis

3. Aspect qualitatif de la lumière



© J. Davis

4. Les spectres lumineux

Cependant,

Toutes les sources lumineuses n'émettent pas de manière égale dans toutes les longueurs d'onde du visible.

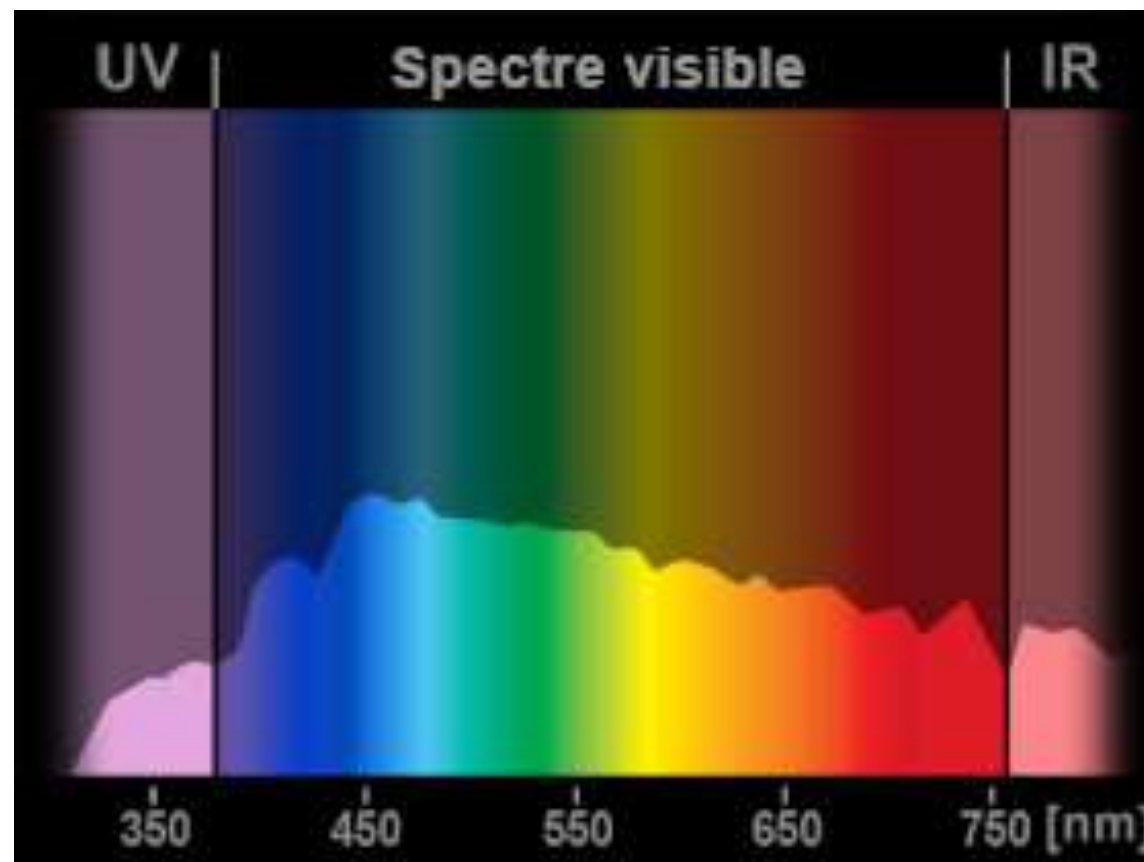
4. Les spectres lumineux

On distingue trois catégories selon le spectre d'émission :

- **Spectre continu** : La source émet de la lumière sur l'ensemble du spectre visible
- **Spectre de raie** : La source émet des radiations importantes dans des portions limitées du spectre
- **Spectre mixte** : La source émet de façon continu mais présente des raies d'émissions particulières

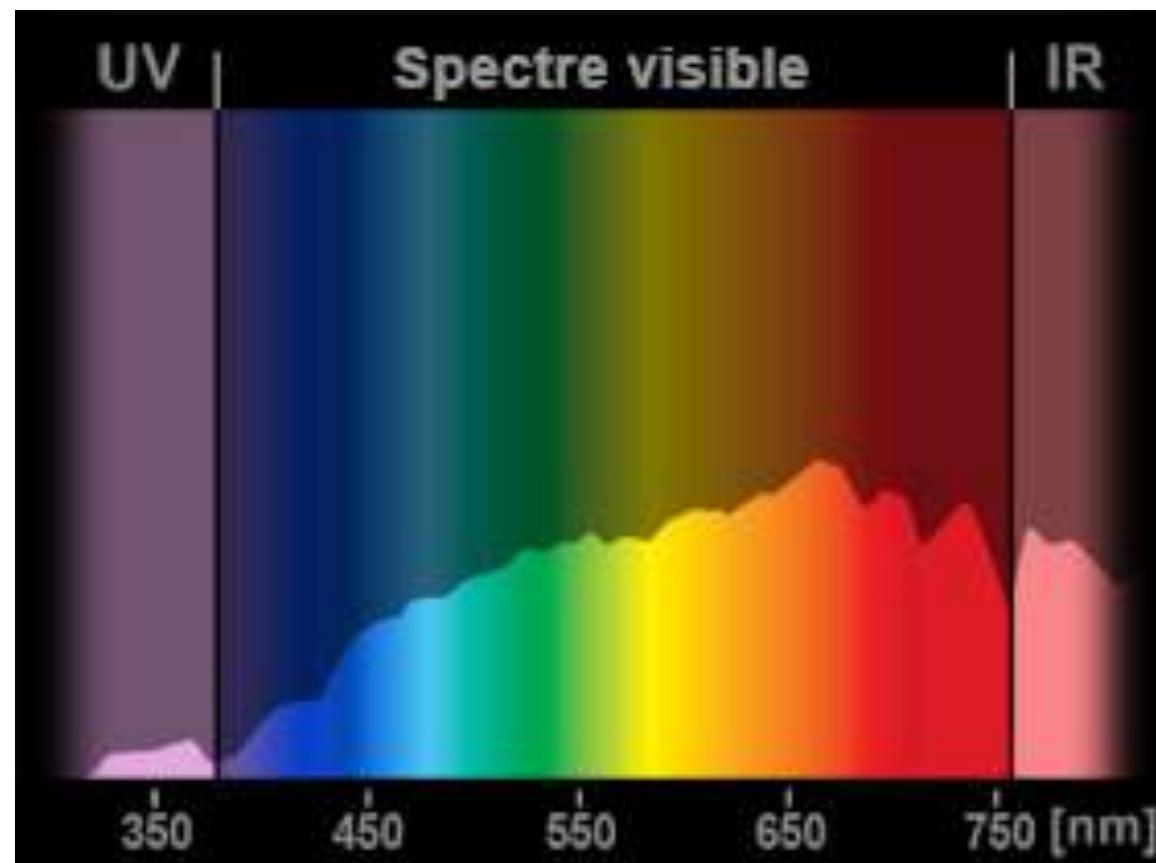
4. Les spectres lumineux

Spectre de la lumière du jour à midi



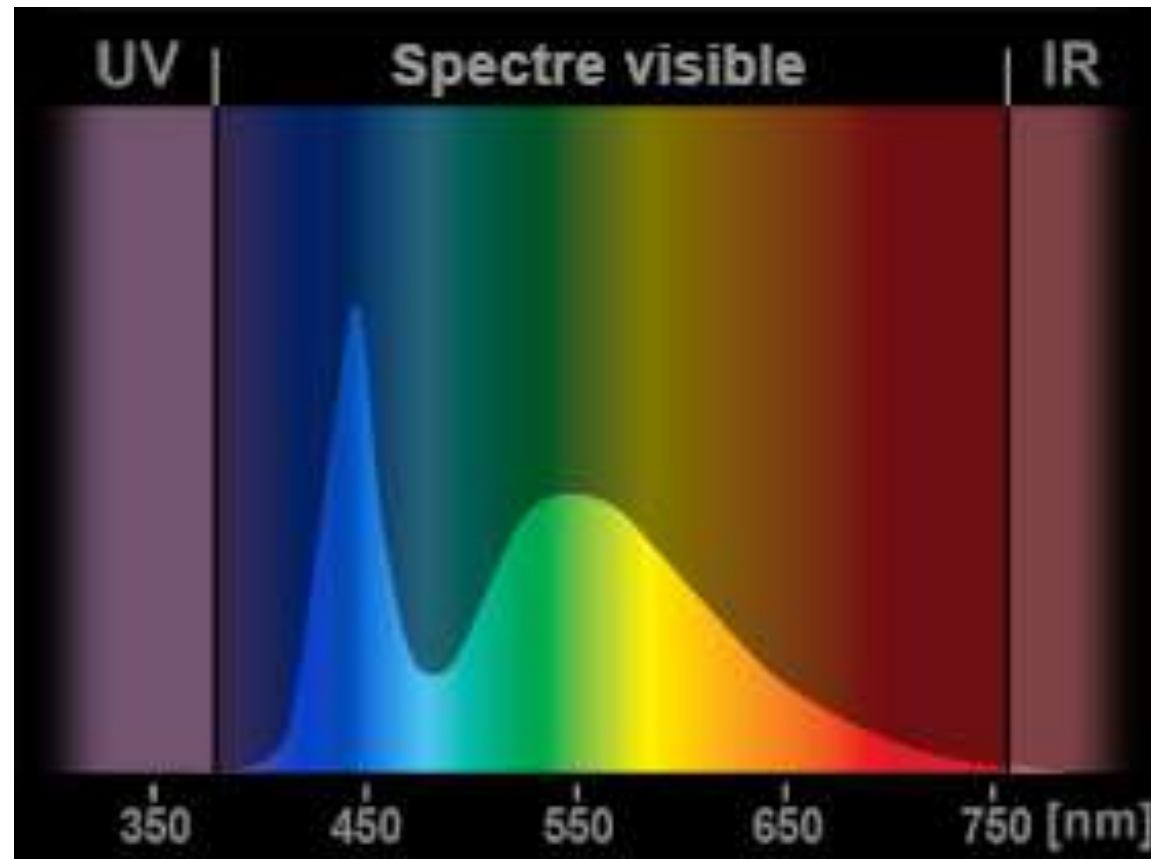
4. Les spectres lumineux

Spectre de la lumière du jour au coucher du soleil



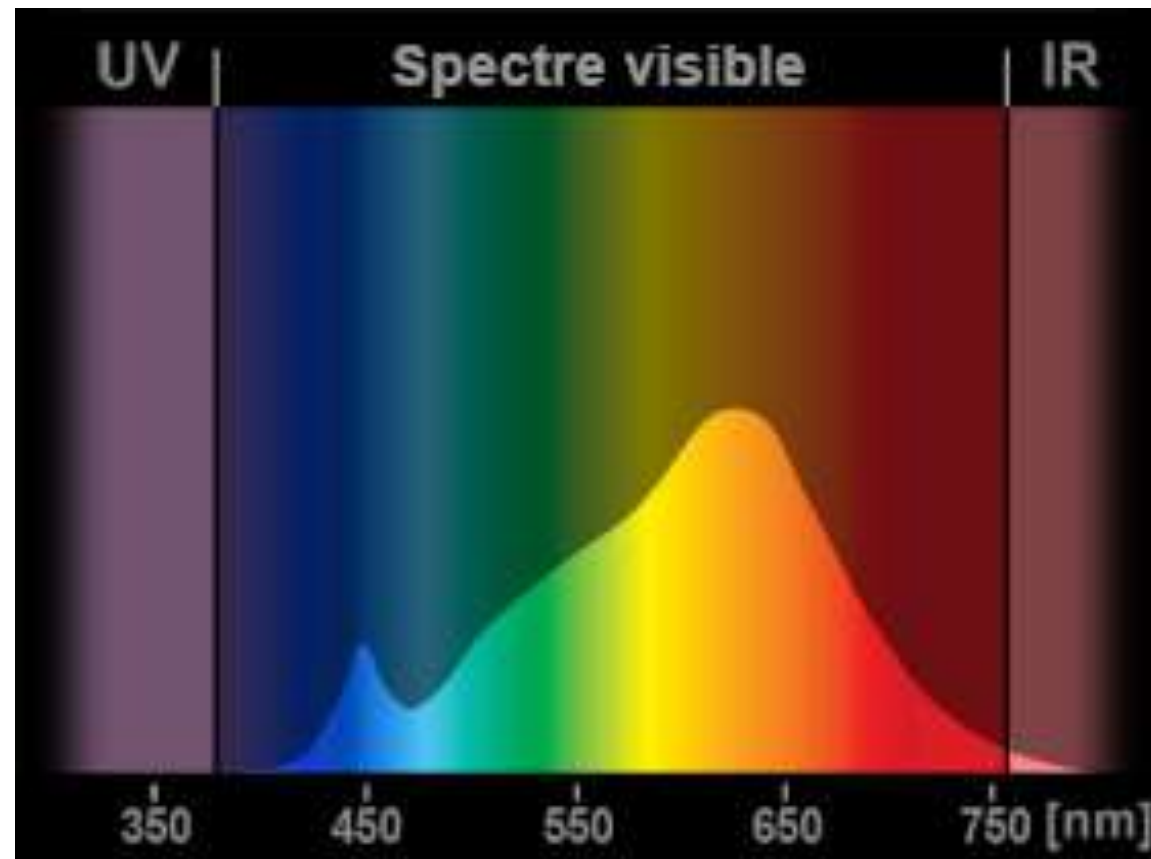
4. Les spectres lumineux

Spectre d'une lampe LED « lumière du jour » (TC : 6000°K)



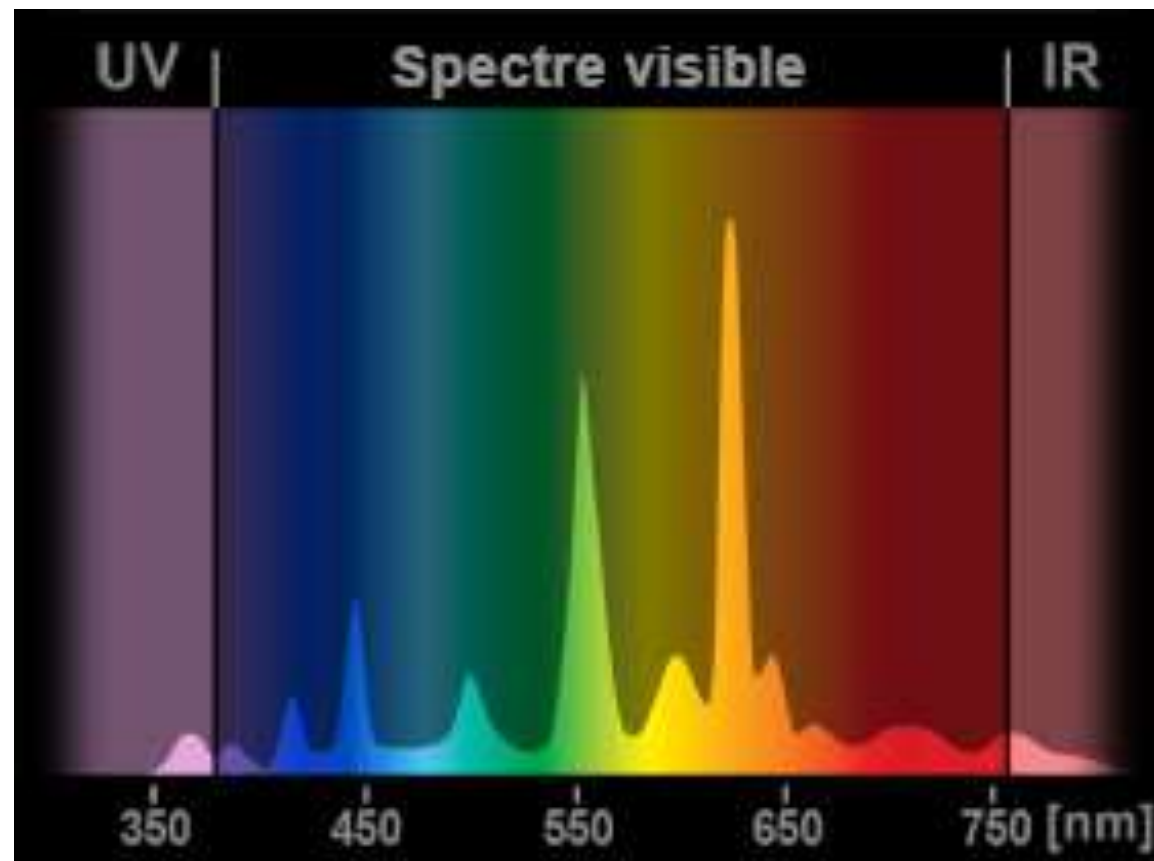
4. Les spectres lumineux

Spectre d'une lampe LED « lumière chaude » (TC : 2700°K)



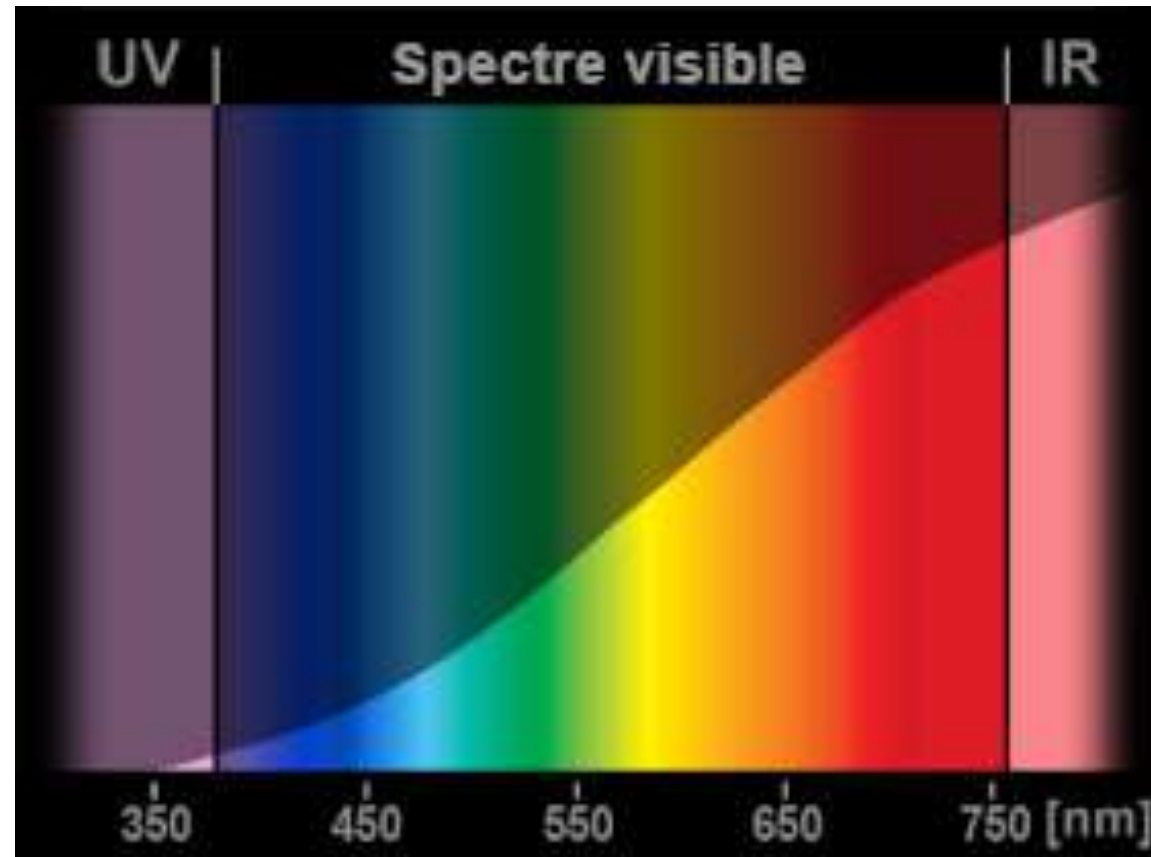
4. Les spectres lumineux

Spectre d'une ampoule fluocompacte



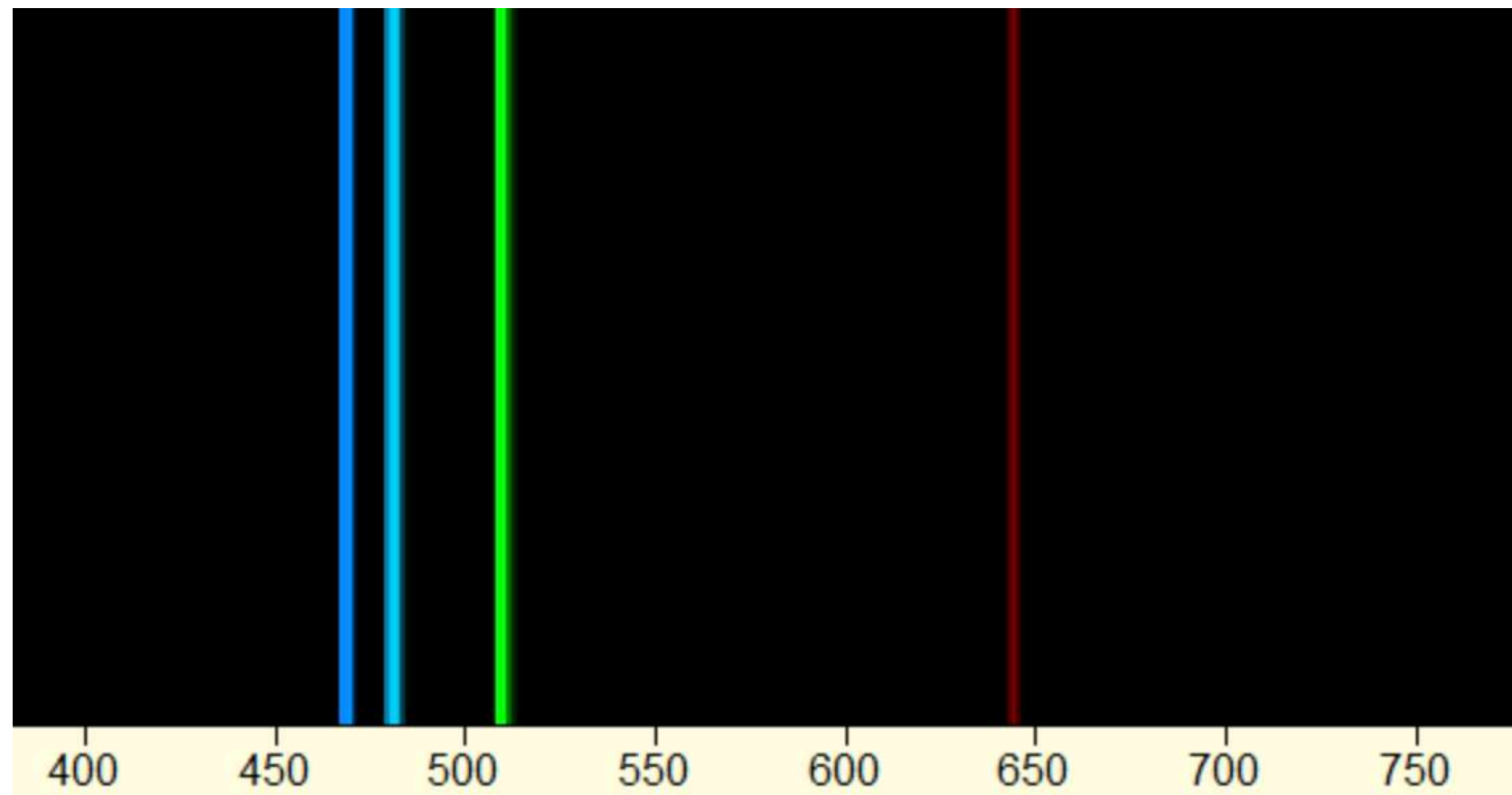
4. Les spectres lumineux

Spectre d'une lampe halogène (TC : 2800/3000°K)



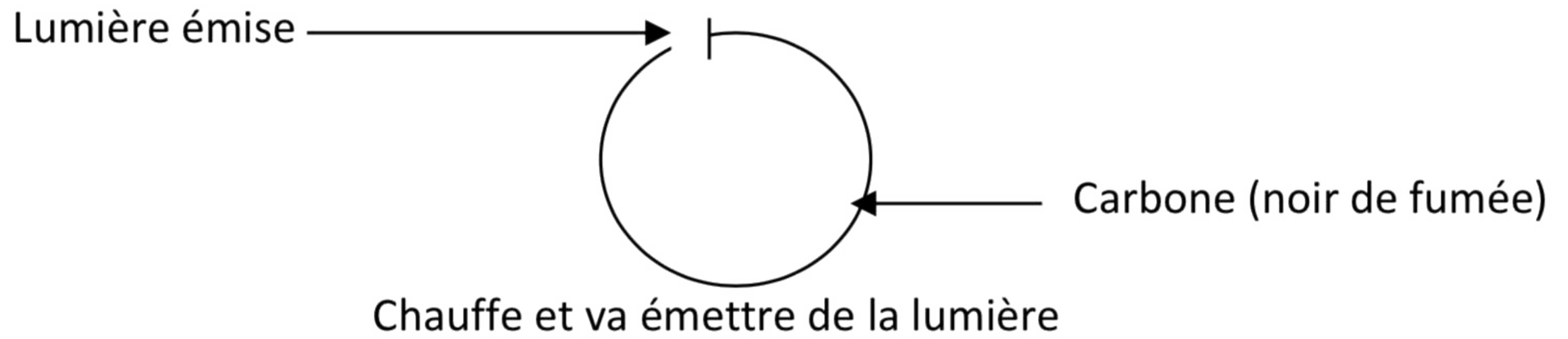
4. Les spectres lumineux

Spectre d'un atome de cadmium



IV. Le corps noir et la température de couleur

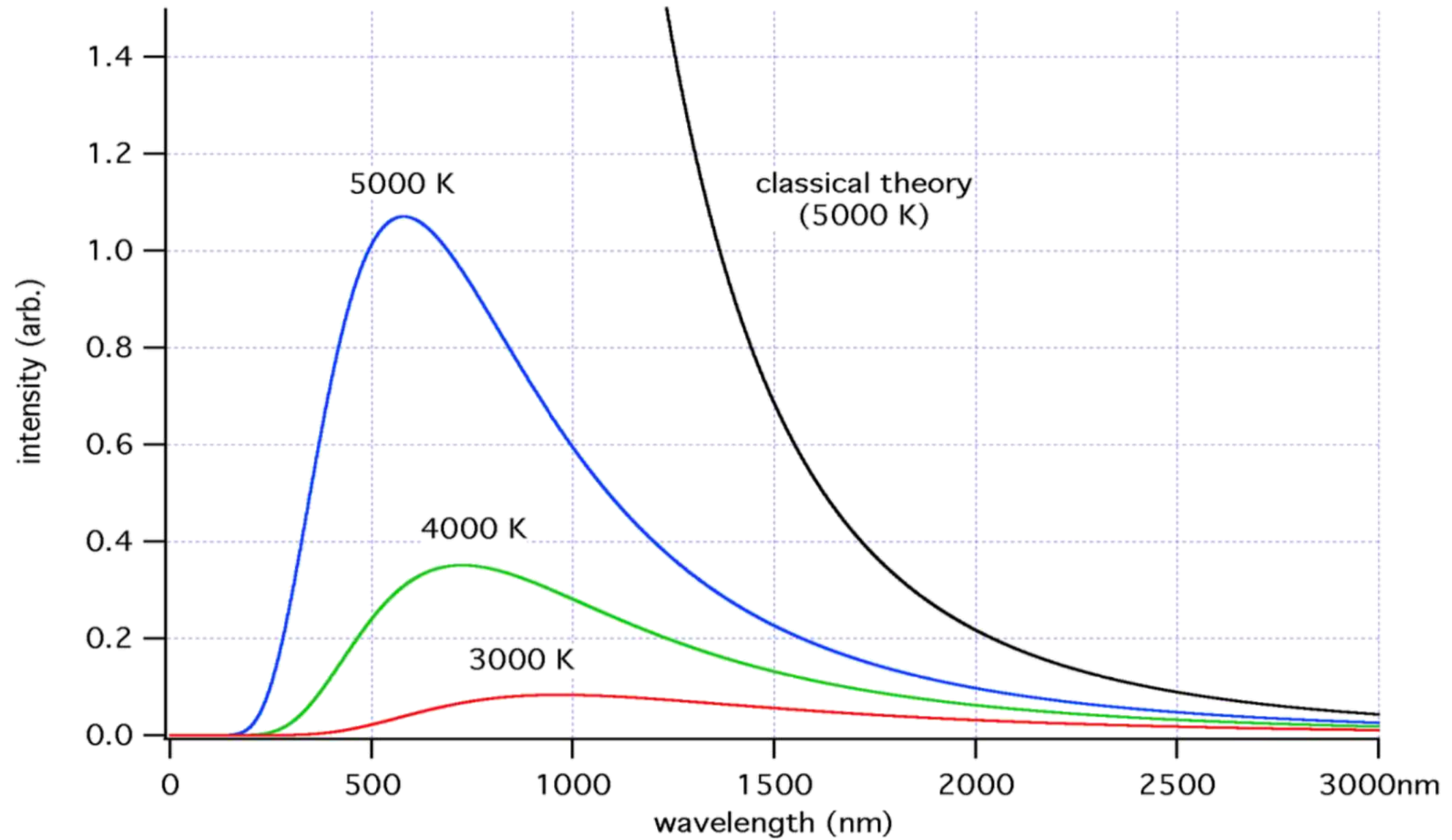
1. Le corps noir



1. Le corps noir

Description	T° (K)	Longueur d'onde d'émittante du corps noir
Zéro absolu	0 K	∞
Température du fond diffus cosmique	2,728 K	1,063 mm (Micro-ondes)
Point triple de l'eau	273,16 K	10 608,3 nm (Infrarouge lointain)
Lampe à incandescence	2500 K	1160 nm (Proche infrarouge)
Surface observable du soleil	5778 K	501,5 nm (lumière verte)
Coeur du soleil	16 MK	0,18 nm (Rayonnement X)
Explosion thermonucléaire	350 MK	$8,3 \cdot 10^{-3}$ nm (Rayonnement gamma)
Collisions proton-noyau au CERN	1 TK	$3 \cdot 10^{-7}$ nm (Rayonnement gamma)
L'univers $5,391 \times 10^{-44}$ s après le big bang	$1,417 \times 10^{32}$ K	$1,616 \cdot 10^{-26}$ nm (Fréquence de Planck)

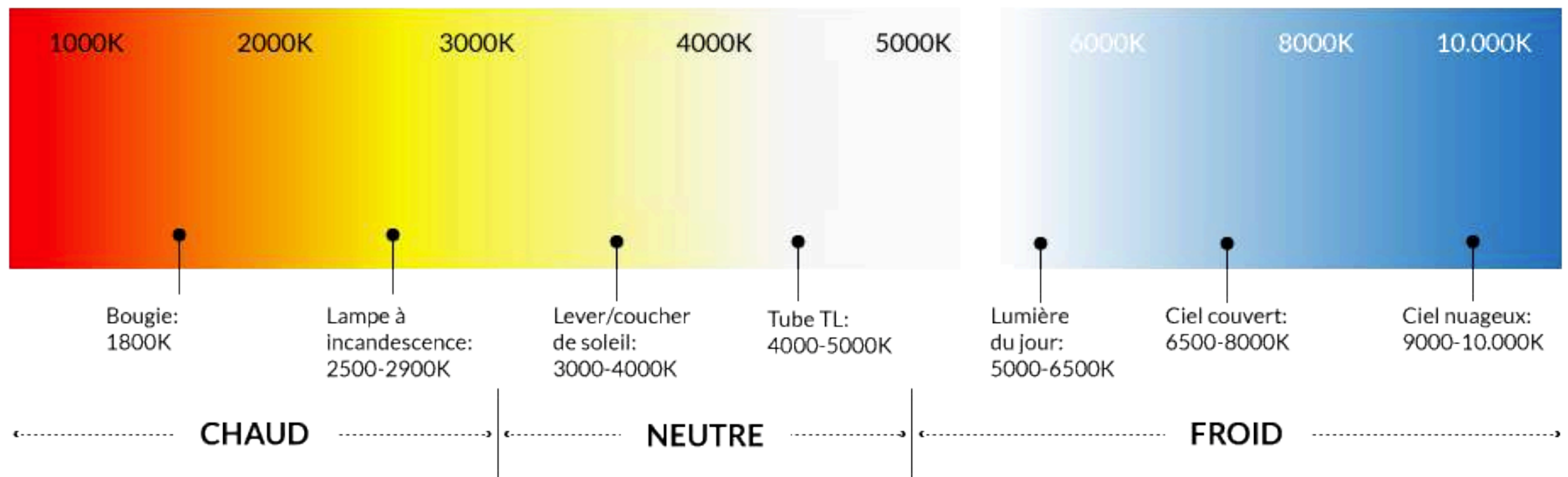
1. Le corps noir



2. La température de couleur

La température de couleur correspond à la coloration donnée à une source lumineuse selon la chaleur qu'elle diffuse, dont l'unité de mesure est le Kelvin.

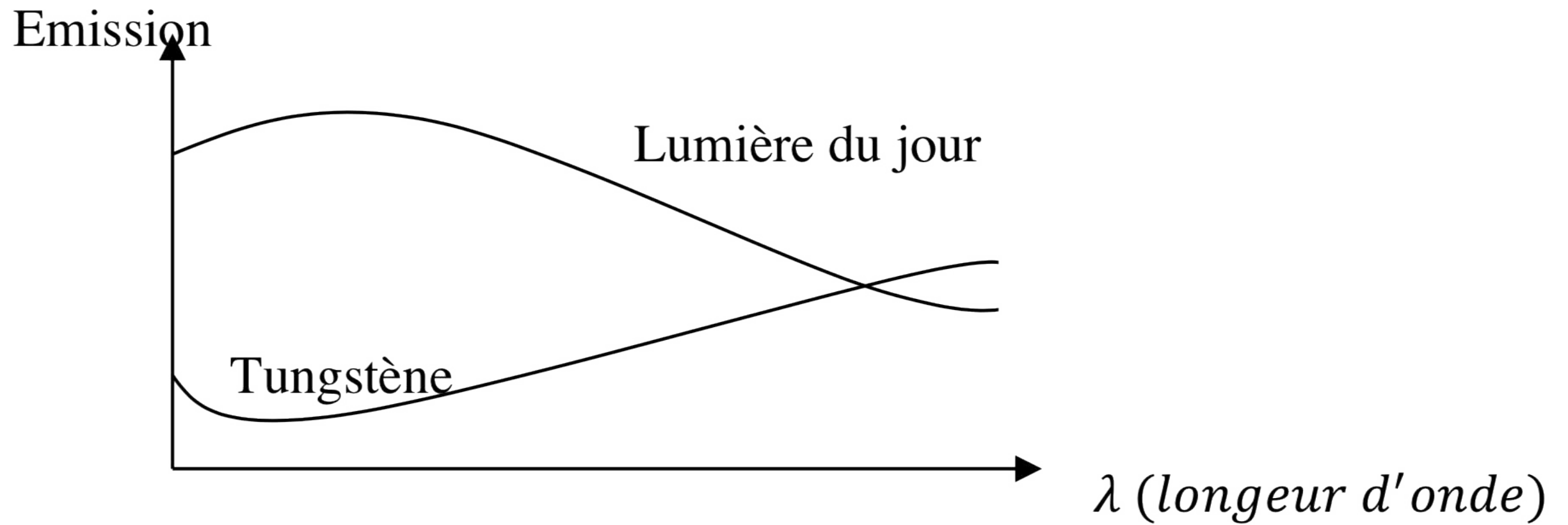
2. La température de couleur



2. La température de couleur



2. La température de couleur



3. La mesure de la TC

Le thermocolorimètre

Mesure la température de couleur. La valeur est exprimée en Kelvins ou en Mireds

$$M = \frac{10^6}{T_c}$$



Partie 2

PHOTOMETRIE

I. Définition

1. Caractéristique de la lumière

On peut définir la lumière selon trois facteurs :

- **Quantité** : Mesure physique quantifiable par le biais de la photométrie
- **Couleur** : La température de couleur de la source, en Kelvin
- **Qualité** : Modulation de la source en fonction de ses caractéristiques d'émission

2. Définition

Nom. Féminin

Mesure des grandeurs relatives aux rayonnements, évaluées selon l'impression visuelle produite par ceux-ci et sur la base de certaines conventions.

II. Les grandeurs photométriques

1. La candela

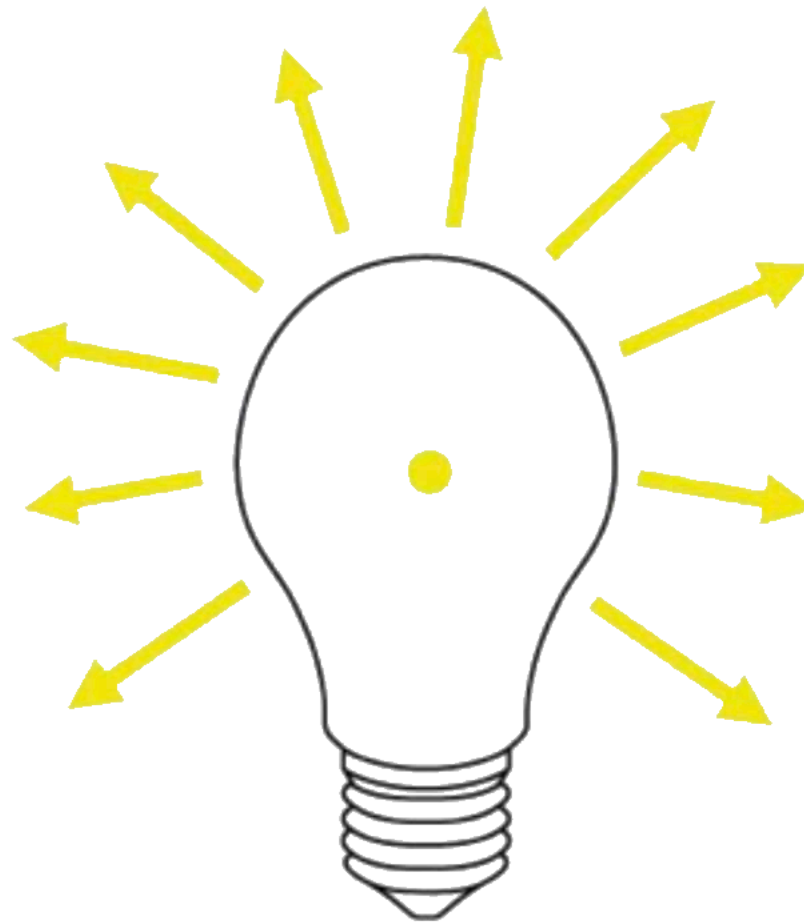
La candela

Une candela correspond à l'éclairement d'une bougie (1 cd), elle est basée sur une lumière de 555 nm de longueur d'onde (correspondant au pic de sensibilité des cônes, donc en vision photopique)



2. Le flux Lumineux

Le flux lumineux : exprimé en Lumen, correspond au flux total émis par une source



3. Efficacité lumineuse d'une source

L'efficacité d'une source est le flux lumineux émis $\Phi_{\text{émis}}$ par unité de puissance de la source en Watt.

Elle s'exprime en lumen par watt (lm/W ou encore lm.W⁻¹)

$$\text{efficacité} = \frac{\Phi_{\text{émis}}}{\text{puissance de la source}}$$

efficacité en lm/W
 $\Phi_{\text{émis}}$ en lumen (lm)
puissance en Watt (W)

4. L'intensité lumineuse

L'intensité lumineuse : exprimée en candela (cd) en U.V, unité du système international. Dans une direction donnée, I est le flux par unité d'angle solide. Il peut aussi être exprimé en Watt / Stéradian en U.E

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

Cette unité est utilisée pour quantifier la quantité de lumière fournie par une source directive. Elle ne dépend pas de la distance d'observation.

4. L'intensité lumineuse

Formule de l'intensité lumineuse

$$I = \Phi_{\text{émis}} / \Omega \quad \text{avec} \quad \Omega = \frac{S \cdot \cos(\alpha)}{d^2}$$

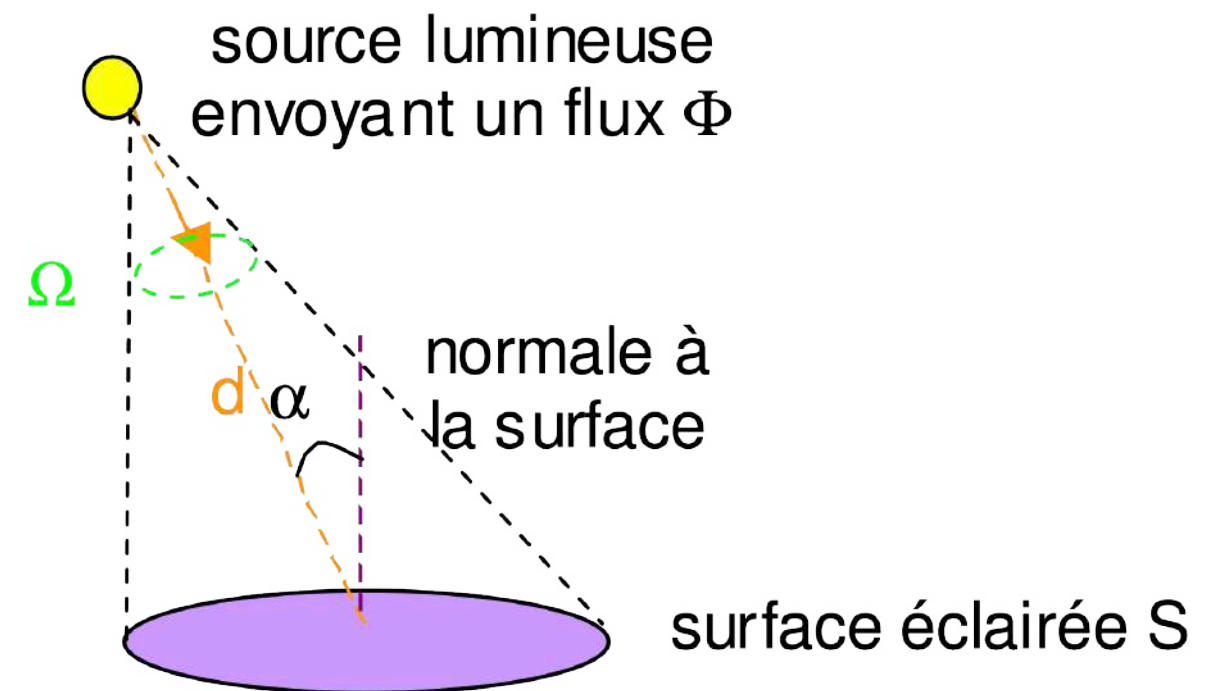
I : Intensité en Candela (cd)

Ω : Angle solide (pour une sphère, 4π)

S : en m^2

d : distance entre la source et la surface (m)

α : Angle entre la direction d'émission et la normale à la surface éclairée



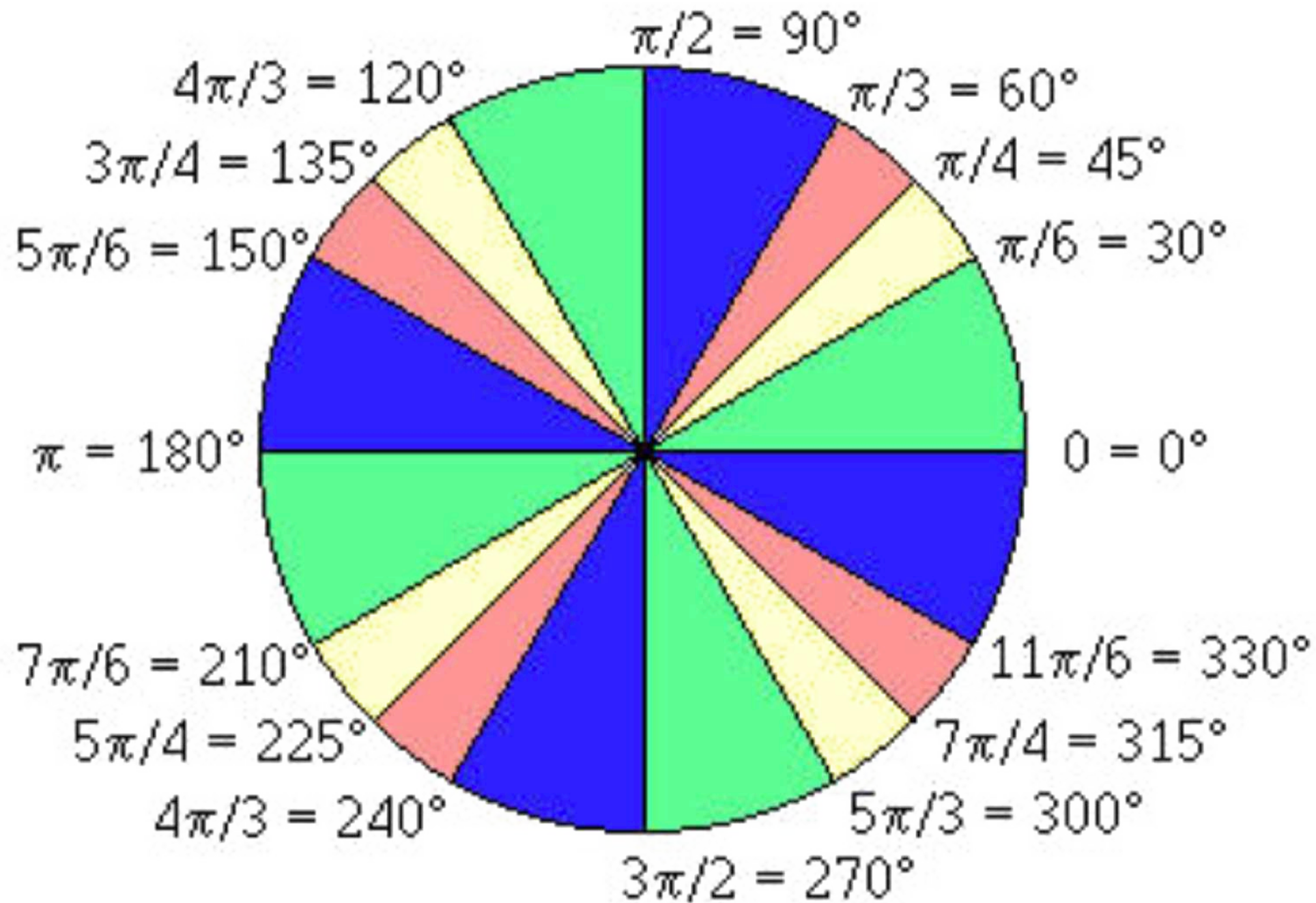
A. Le radian

Le radian

Le radian est une unité de mesure pour mesurer les angles, comme le degré, la minute d'arc, le grade ou le millième.

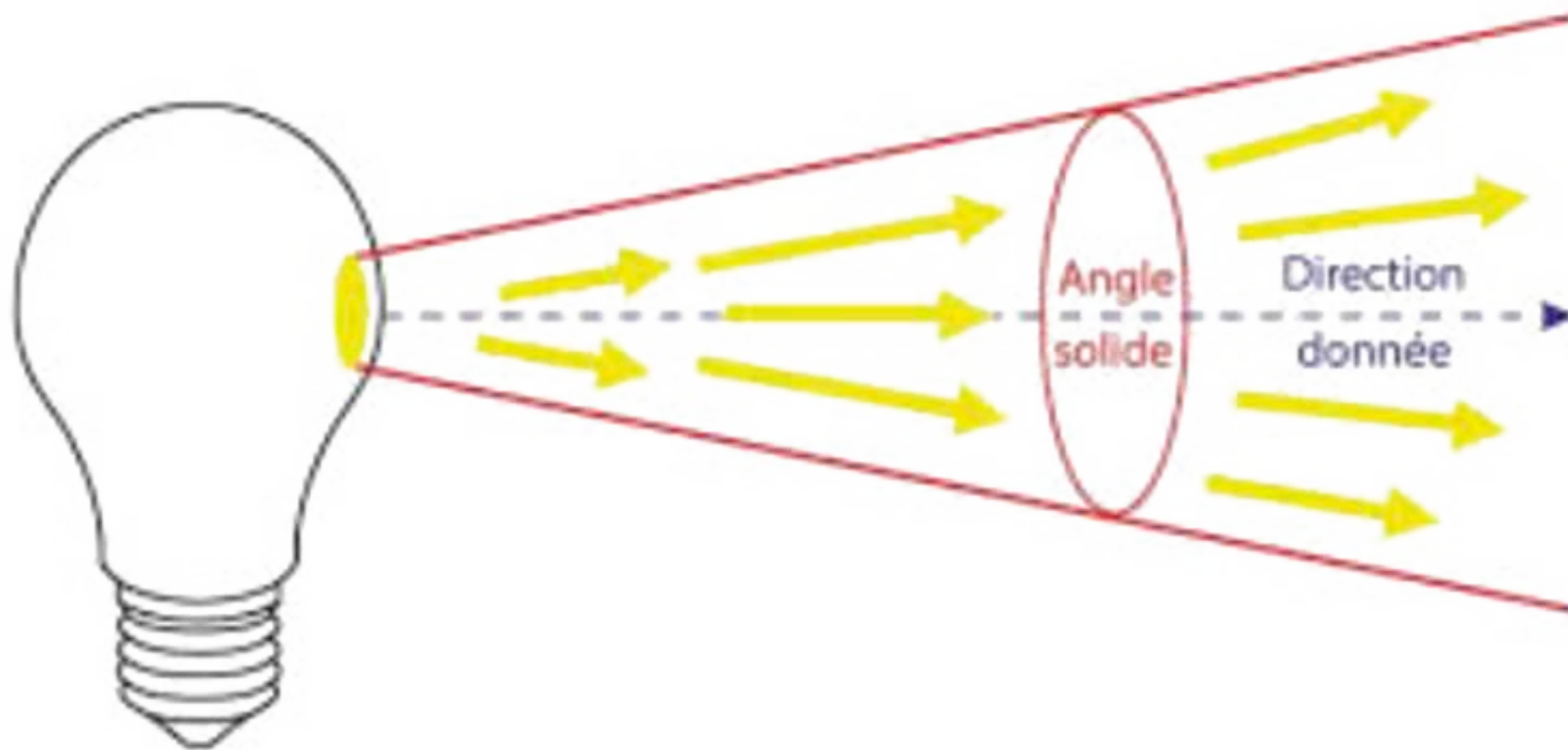
Un angle d'1 radian est un angle qui délimite un arc de cercle d'une longueur égale au rayon du cercle.

B. Correspondance radian/degré



C. Angle solide

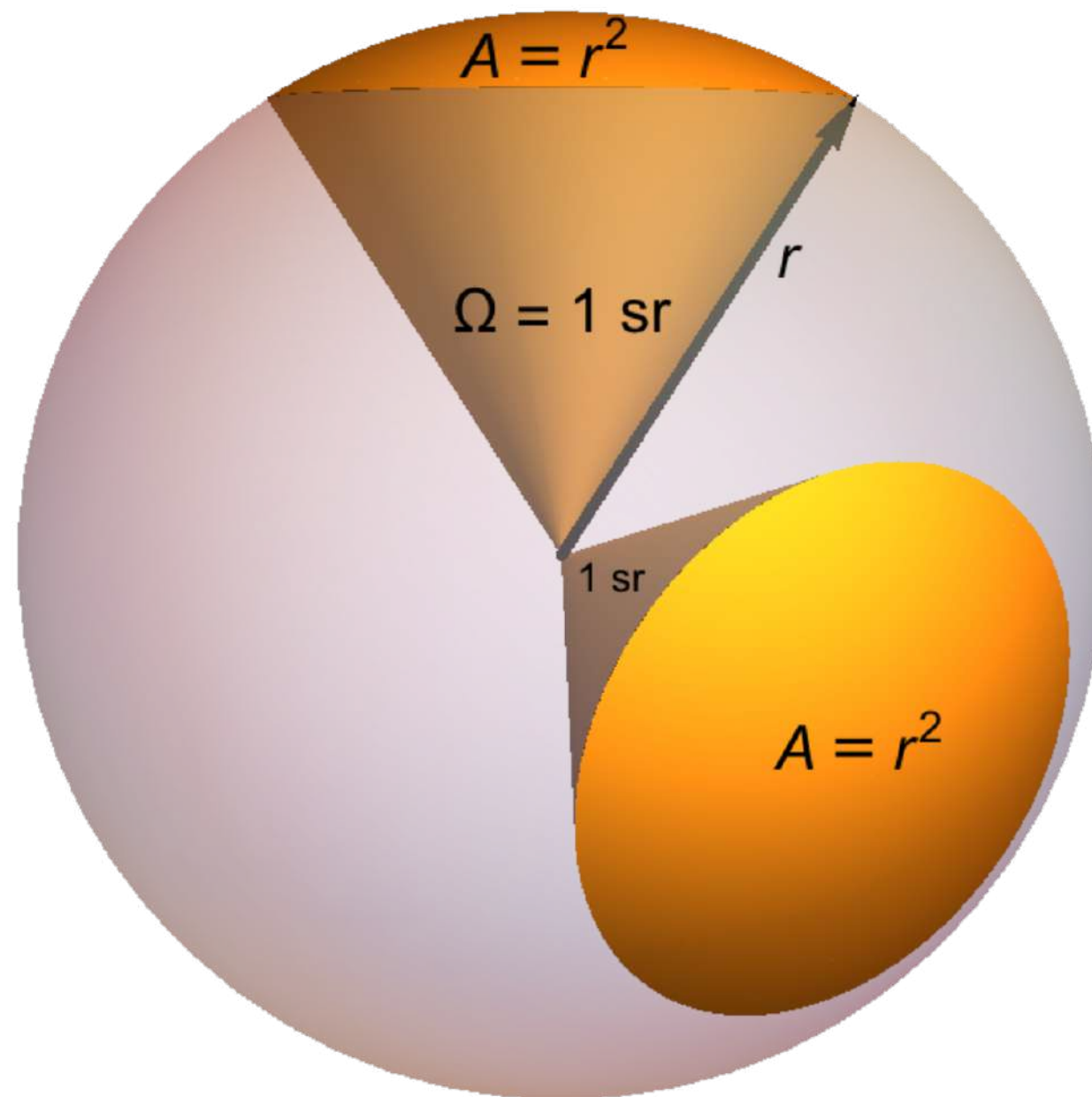
L'angle solide noté Ω en stéradian (sr) représente la surface interprétée par le cône lumineux émis par la source sur une surface sphérique de rayon r



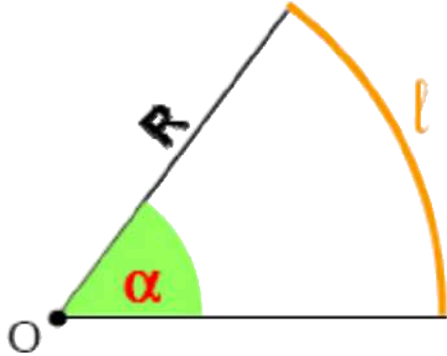
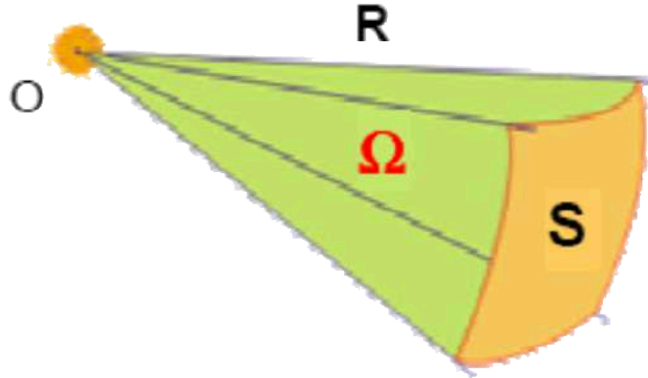
Le stéradian

Unité d'angle solide correspondant à un angle solide ayant son sommet au centre d'une sphère et découpant sur la surface de cette sphère une aire égale à celle d'un carré qui aurait pour côté le rayon de la sphère.

D. Le stéradian

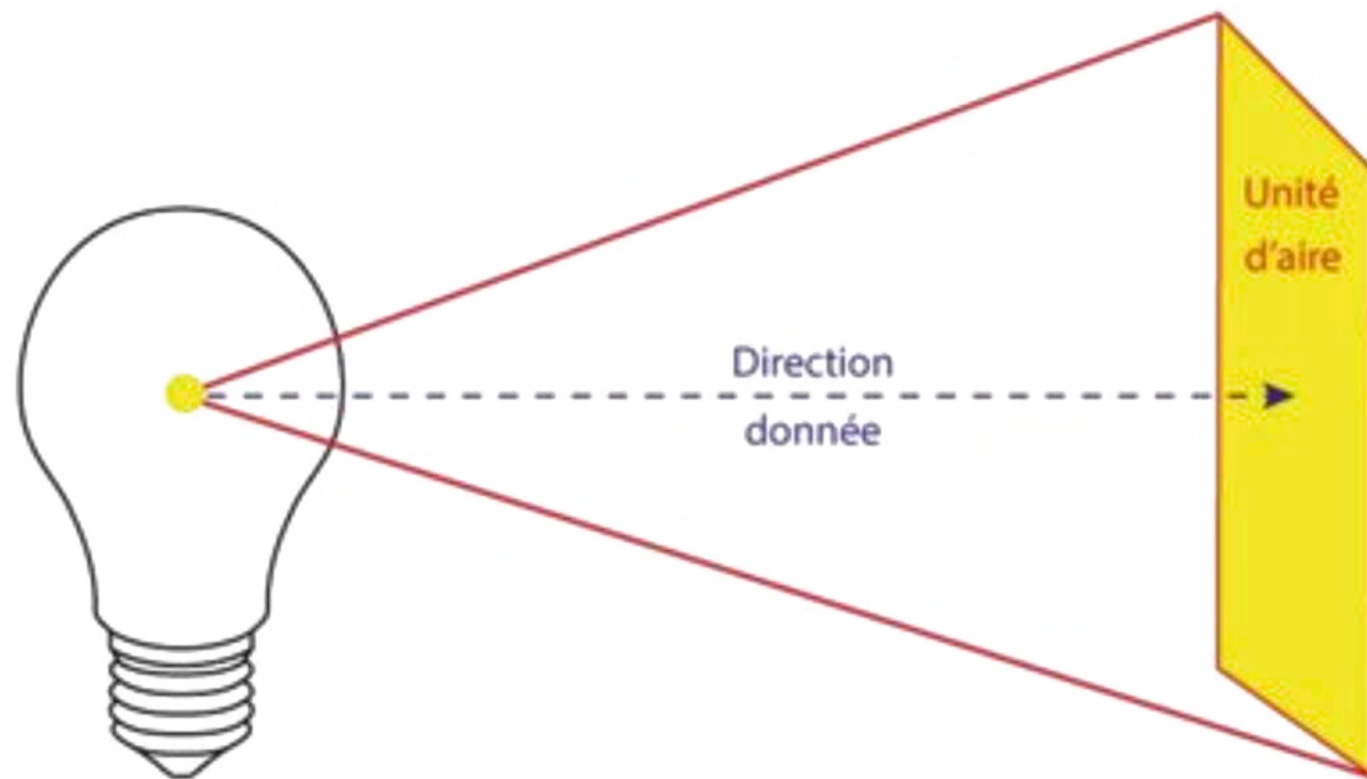


E. Radian / Stéradian

Angle plan α (radian)	Angle solide Ω
<p>L'angle α en radian (rad) est défini sur le cercle par la longueur de l'arc ℓ divisé par le rayon R :</p> $\alpha = \frac{\ell}{R}$ 	<p>L'angle Ω en stéradian (st) est défini sur la sphère par la surface sphérique S divisée par le rayon au carré :</p> $\Omega = \frac{S}{R^2}$ 
<p><u>Définition du radian</u> :</p> <p>Un angle de 1 radian correspond à une longueur d'arc ℓ égale au rayon R.</p>	<p><u>Définition du stéradian</u> :</p> <p>Un angle solide de 1 stéradian correspond à une surface S sphérique égale au rayon au carré R^2.</p>
<p><u>Remarques</u> :</p> <p>① Le cercle complet correspond à</p> $\alpha_{\text{cercle}} = \frac{2\pi R}{R} \text{ soit } \alpha_{\text{cercle}} = 2\pi \text{ rad}$	<p><u>Remarques</u> :</p> <p>① La sphère complète correspond à</p> $\Omega_{\text{sphère}} = \frac{4\pi R^2}{R^2} \text{ soit } \Omega_{\text{sphère}} = 4\pi \text{ st}$

5. L'éclairement

L'éclairement : exprimé en Lux, correspond à la quantité de lumière souhaitée sur une surface



5. L'éclairement

Formule de l'éclairement

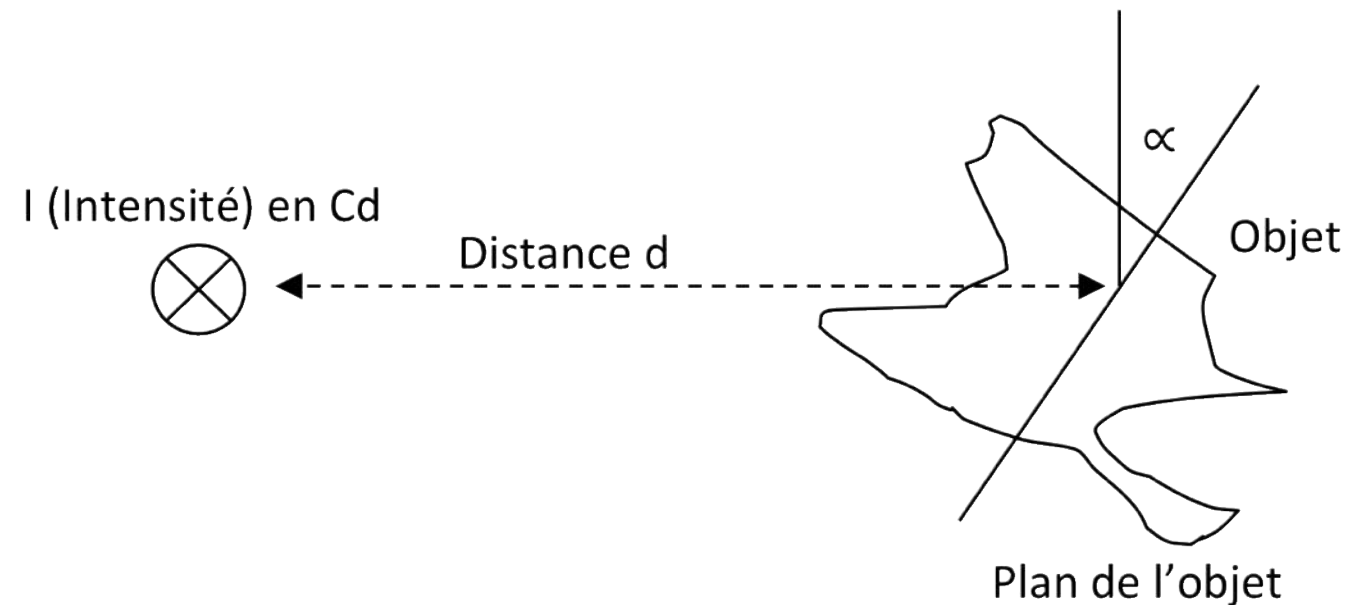
$$E(\text{lx}) = \frac{I}{D^2} \cos(\alpha)$$

E : éclairement en Lux (lx)

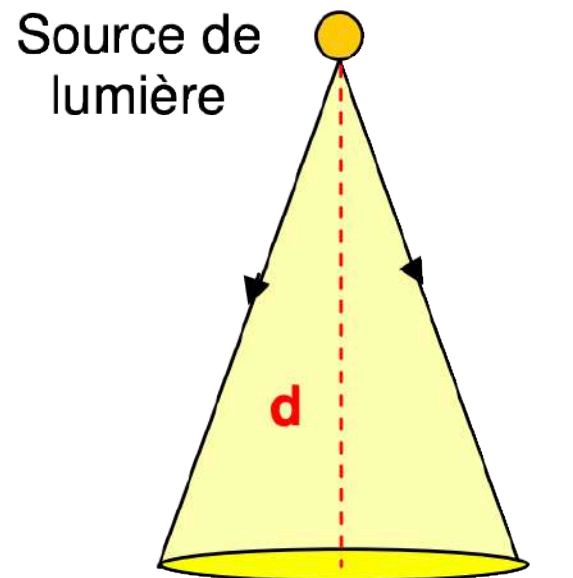
I : intensité en candela (cd)

D : distance entre la source et la surface (m)

α : Angle entre la direction d'émission et la normale à la surface éclairée

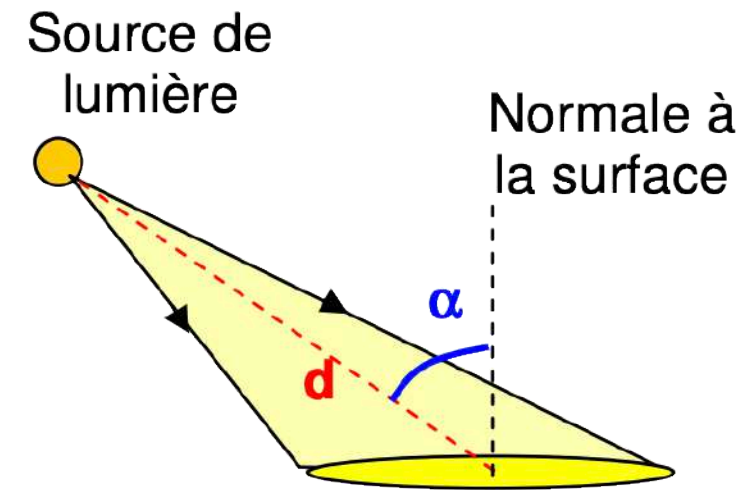


5. L'éclairement



Surface éclairée S

$$E = \frac{\Phi_{\text{reçu}}}{\text{Surface}} = \frac{I}{d^2}$$



Surface éclairée S

$$E = \frac{\Phi_{\text{reçu}}}{\text{Surface}} = \frac{I \cos \alpha}{d^2}$$

E en lux (lx)

I intensité en candela (cd)

S : surface éclairée en m²

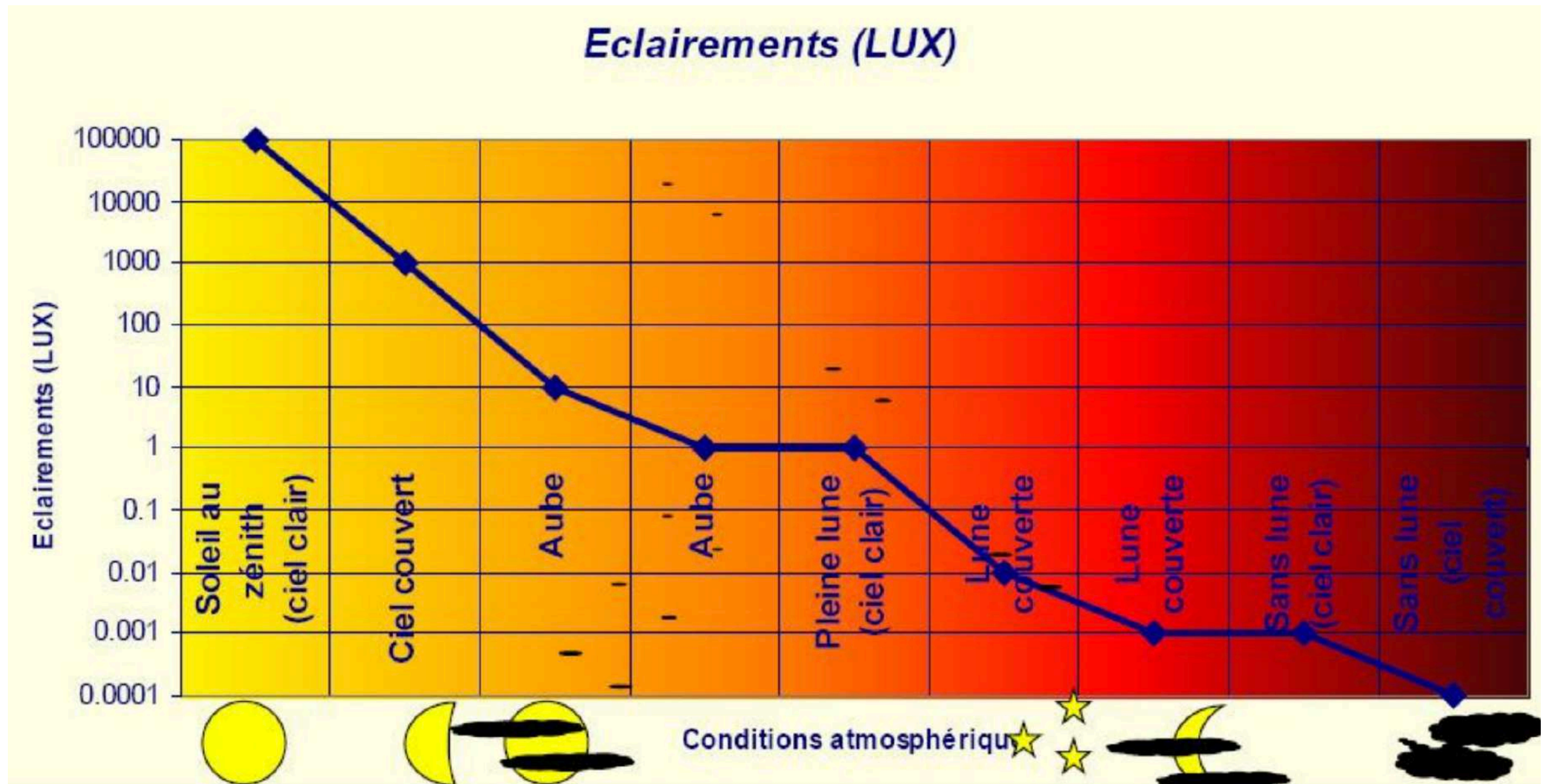
d : distance entre la source et la surface en m

α : angle entre la direction principale d'émission et la normale à la surface éclairée

6. Exemples d'éclairement

Situation	Eclairement
Pleine Lune	0,5 lux
Rue de nuit bien éclairée	20 - 70 lux
Appartement lumière artificielle	100 - 400 lux
Bureau, atelier	200 - 300 lux
Grand magasin	500 - 700 lux
Stade de nuit, salle de sport	1500 lux
Studio ciné	2000 lux
Extérieur à l'ombre	10000 - 15000 lux
Ciel couvert	25000 - 30000 lux
Plein soleil	50000 - 100000 lux

6. Exemples d'éclairement



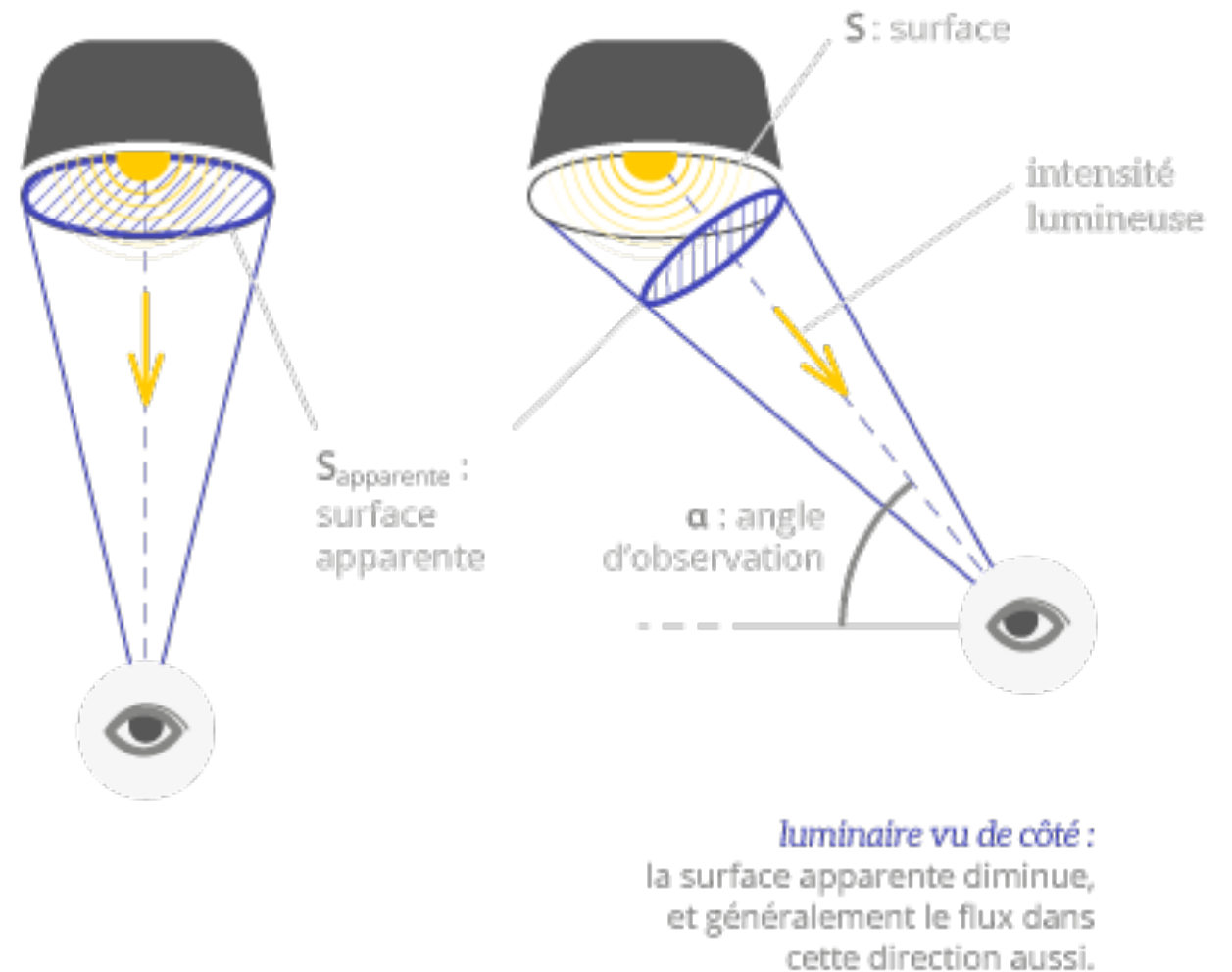
7. La luminance

La luminance : exprimée en candela/m^2 , seule grandeur directement perceptible par l'oeil humain

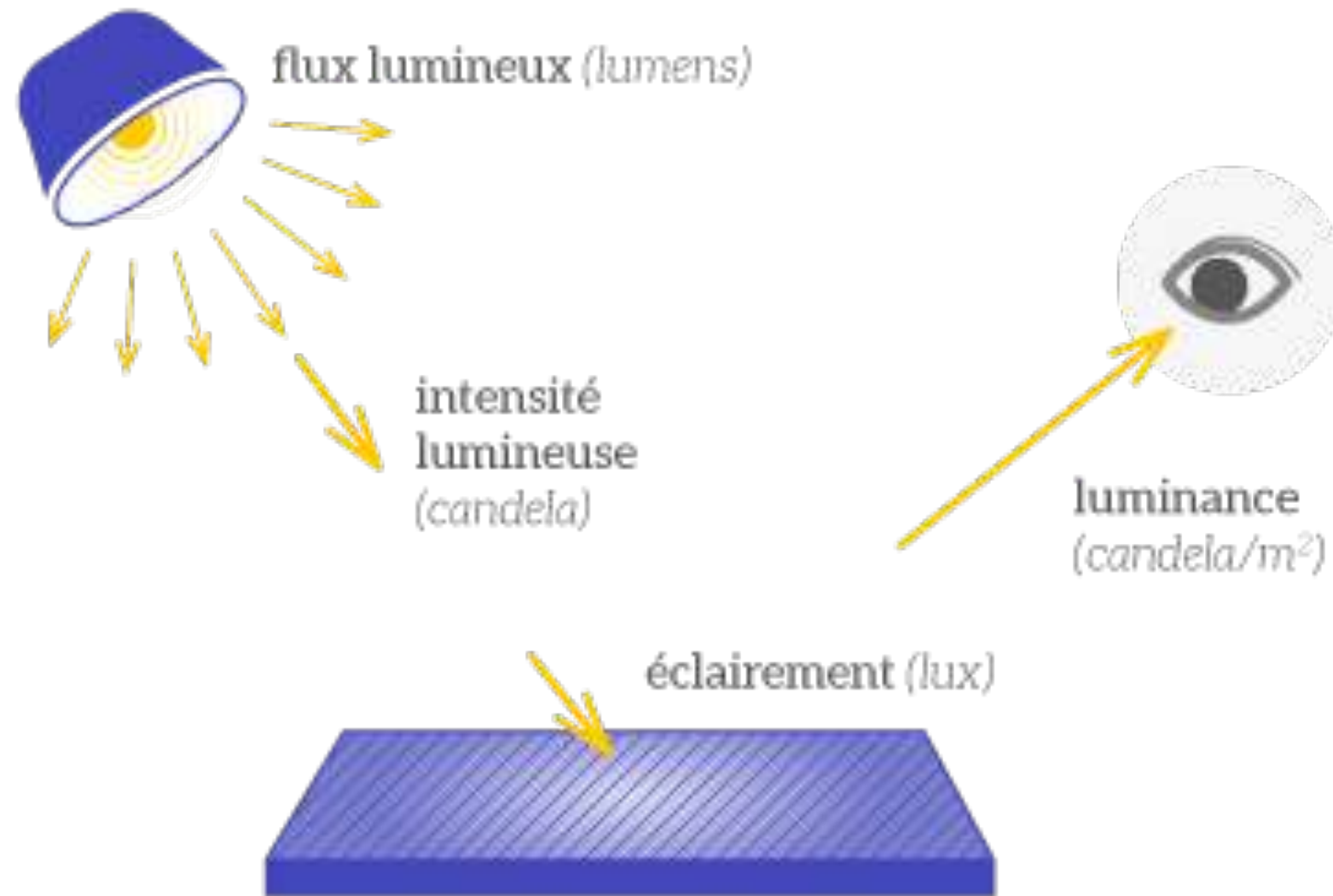
7. La luminance

La luminance

Grandeur exprimée en cd/m^2 , correspondant à la sensation visuelle de luminosité d'une surface. Elle ne dépend pas de la distance d'observation.



8. Synthèse photométrique



8. Synthèse photométrique

Grandeur	Unité	Définition	Abréviation	Utilisation
Intensité lumineuse	Candela	Flux lumineux par angle solide	Cd	Mesure du flux émis par une source ou un luminaire dans une direction. Est particulièrement approprié pour les sources ou luminaires directifs.
Flux lumineux	Lumen	Flux lumineux total	Lm	Mesure du flux total émis par une source ou un luminaire.
Eclairement lumineux	Lux	Flux lumineux par surface (Lm/m ²)	Lx	Mesure du flux sur une surface (au sol, sur un bureau...) Utilisé notamment pour préciser les valeurs exigées dans les différentes pièces d'un bâtiment, voir norme d'éclairage intérieur
Luminance lumineuse	Candela par m ²	Flux lumineux par angle solide divisé par la surface apparente de la source	Cd/m ²	Seule grandeur perceptible par l'œil. L' UGR est calculé à partir de cette grandeur fondamentale pour évaluer l'éblouissement.

9. La lumination

La lumination : Elle représente la quantité de lumière incidente lors d'une exposition

9. La lumination

$$H = E \times t$$

E : Eclairement reçu (lux), réglé par le diaphragme

t : Temps d'exposition (seconde), réglé par la vitesse d'obturation

10. Types de sources

On distingue deux types de sources :

- **Les sources primaires** : elles émettent de la lumière dans toutes les directions, leurs intensités se mesurent en candela. Ex : Soleil, bougie, ampoule ...
- **Les sources secondaires** : elles réfléchissent la lumière en direction de l'observateur. Ce flux lumineux correspond à la luminance, et s'exprime en candela/m^2

11. La mesure de la lumière

Le luxmètre

Mesure l'éclairement dans le spectre visible. Son unité de mesure est le Lux.



11. La mesure de la lumière



Le luminance mètre

Mesure de la lumière réfléchie par un objet avec un angle de champ très réduit.