

PHOTOMETRIE

1. PHOTOMETRIE ENERGETIQUE et PHOTIMETRIE VISUELLE

1_A. Définitions

1_A1. Photométrie énergétique

La photométrie énergétique évalue la **lumière visible** d'après l'énergie qu'elle véhicule.

1_A2. Photométrie visuelle

La photométrie visuelle évalue la **lumière visible** d'après son action sur l'œil.

1_B. Grandeurs

Grandeurs énergétiques G_e et grandeurs visuelles G_v

Elles sont reliées entre elles : $\frac{G_v}{G_e} = e_{(\lambda)}$

$e_{(\lambda)}$: constante qui traduit la sensation physiologique résultant de la sensibilité spectrale de l'œil.
(elle dépend de la longueur d'onde λ de l'onde électromagnétique)

Une source lumineuse rayonne un **flux Φ** , quantité de lumière.
Dans une direction donnée, ce flux a une **intensité I** .
Chaque point d'un objet interceptant ce flux, a un **éclairement E** .

1_C. Sources

Source primaire : elle « crée » la lumière

Source secondaire : elle « diffuse » ou « transmet » la lumière.

2. SOURCE PONCTUELLE S (source primaire)

2_A. Propriétés

2_A1. Lois lumineuses

La source S rayonne un flux élémentaire $d\Phi$ dans un angle solide élémentaire $d\Omega$ avec une intensité I .
A la distance R (source - point éclairé) existe un éclairement E .

θ : angle du rayon lumineux arrivant au point éclairé par rapport à la normale \vec{n} à l'élément de surface éclairée dS .

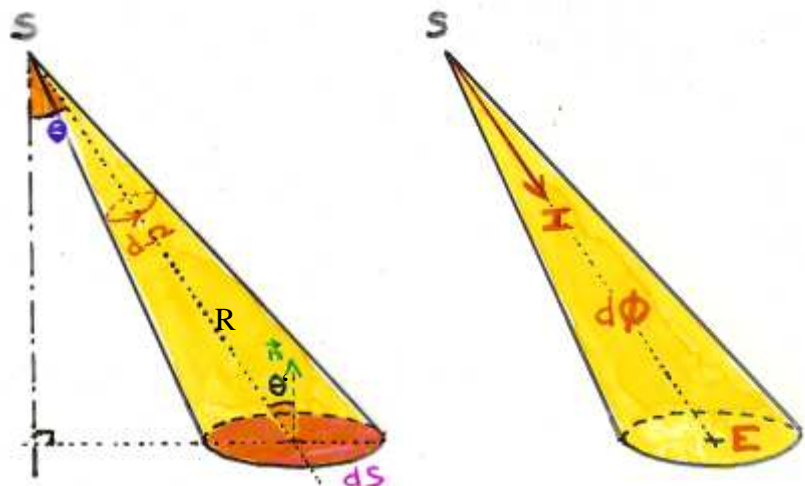
$$d\Omega = \frac{dS \cdot \cos \theta'}{R^2}$$

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I \cdot \cos \theta'}{R^2}$$

(formule de Bouguer)
($\theta = \theta'$)

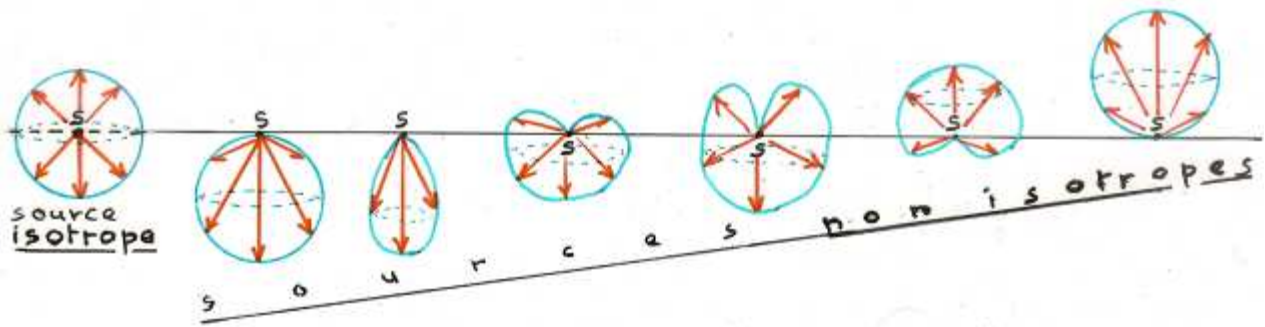
$$E = \frac{I \cdot d\Omega}{dS} = \frac{I \cdot \frac{dS \cdot \cos \theta'}{R^2}}{dS}$$



2A2. Surface indicatrice d'émission

Elle caractérise une source.

C'est un **graphe représentant l'intensité I en fonction de la direction.**



direct intensif - direct extensif - semi-direct – mixte - semi-indirect - direct

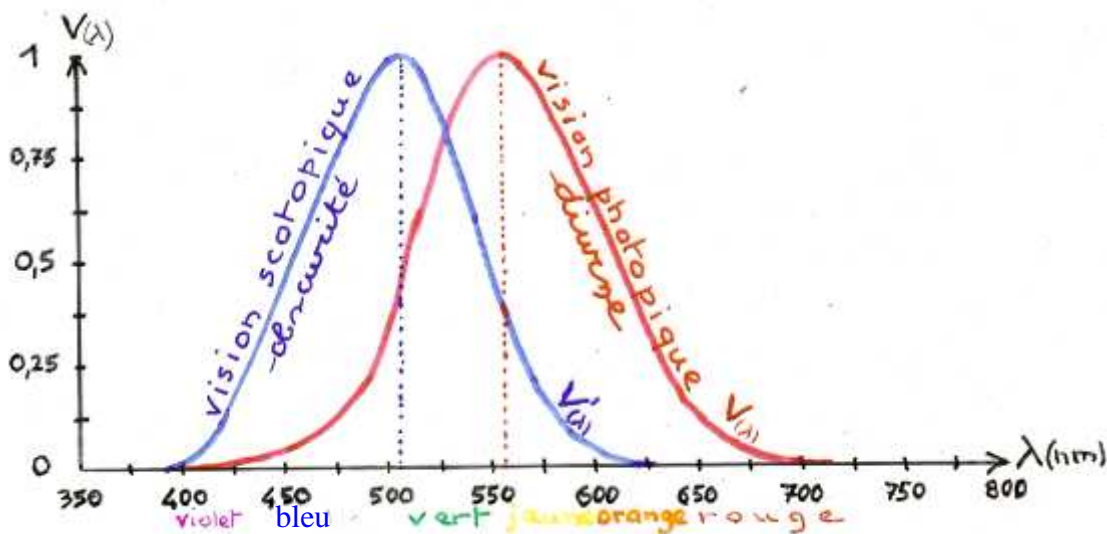
2A3. Sensibilité de l'œil

En photométrie visuelle, le détecteur de référence est l'œil.

Il se comporte comme un filtre vis-à-vis des ondes électromagnétiques visibles.

Il possède un maximum de sensibilité vers $\lambda \approx 555 \text{ nm}$ en vision **diurne**, tandis que ce maximum se situe vers $\lambda \approx 507 \text{ nm}$ dans l'**obscurité**.

V_λ et V'_λ représente la sensibilité spectrale de l'œil pour les deux visions :



La source lumineuse, à sa température d'équilibre, réémet sous forme d'ondes électromagnétiques, une puissance lumineuse égale à la puissance électrique consommée P .

Le flux énergétique Φ_e représente la puissance totale émise par la source par la **lumière visible**, uniquement.

Des sources électromagnétiques peuvent avoir le même flux énergétique, tout en émettant dans des domaines de longueur d'onde différents.

Pour un même flux énergétique, la sensation lumineuse (couleur) dépend fortement de la longueur d'onde.

Le flux lumineux Φ_l est une grandeur qui dérive du flux énergétique adaptée à la vision de l'œil humain.

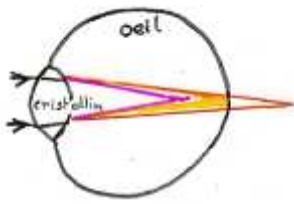
Par définition : pour la longueur d'onde $\lambda \approx 555 \text{ nm}$, un flux énergétique de 1 W correspond à un flux lumineux $\Phi_l \approx 683 \text{ lumens}$.

Pour les autres longueurs d'onde, il faut multiplier par V_λ correspondante.

En dehors de l'intervalle $[380\text{nm}; 780\text{nm}]$, visible, les valeurs de V_λ seront prises nulles.

Pour le spectre continu, on prend $V_\lambda = 0,3$.

La **sensibilité de l'œil** dépend de la longueur d'onde.



Les rayons lumineux de faible λ (violet) sont plus déviés lors de la traversée du cristallin (double réfraction et dispersion) que les rayons de plus grande λ (rouge).

Les rayons dont $\lambda \approx 555 \text{ nm}$ convergent exactement sur la rétine. C'est à cette λ que l'œil a la plus grande sensibilité.

2A4. Unités

Grandeurs physiques	Unités énergétiques	Unités lumineuses
Flux : Φ (ou F)	W	lumen (lm)
Intensité : I	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$	candéla (cd)
Eclairement : E	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	lux (lx)

$$\frac{G_\ell}{G_e} = e_{(\lambda)}$$

$$\frac{\Phi_\ell}{\Phi_e} = \frac{I_\ell}{I_e} = \frac{E_\ell}{E_e} = e_{(\lambda)} = 683 \cdot V_{(\lambda)} \quad (\text{efficacité lumineuse de l'œil})$$

($\approx 205 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ pour le spectre visible)

Le **lux** est une unité très petite (Eclairement moyen d'une surface de 1 m^2 placée à 1 m d'une bougie. Le flux reçu par cette surface de 1 m^2 est de 1 lm).

Lumen et candéla respectivement : lumière et chandelle en latin.

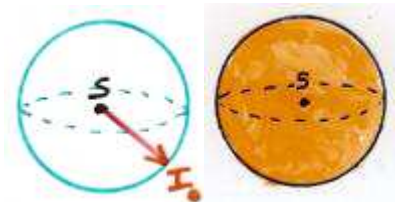
2B- Source isotrope

2B1. Définition

(du grec « isos » : semblable et « trephô » : je fais tourner)

Elle rayonne dans toutes les directions de l'espace avec la **même intensité I_0** .

2B2. Espace total



L'angle solide d'émission vaut $\Omega = 4\pi$ sr. (espace total)
 $\Phi = 4\pi \cdot I_0$

2B3. Espace réduit

La concentration du faisceau dans une zone de l'espace réduit cette valeur Φ .

C'est le cas d'une source comportant un défecteur, surface réfléchissante qui entoure la source, qui en limitant l'angle solide permet pour un même flux émis d'avoir une intensité plus grande dans l'espace restreint de propagation.

$\Omega = 2\pi$ sr (semi-espace)

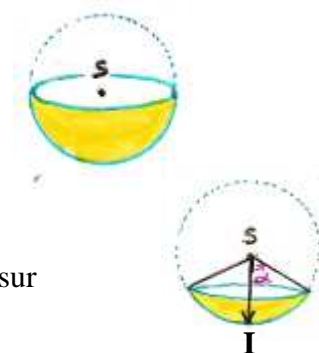
La surface indicatrice d'émission est une demi-sphère centrée sur la source S.

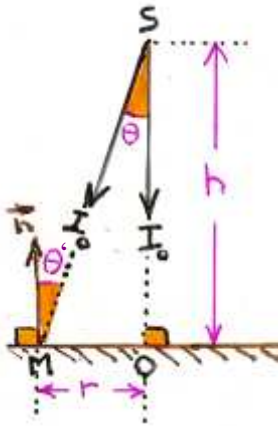
$$\Phi = 2\pi \cdot I_0$$

$\Omega = 2\pi (1 - \cos \alpha)$ sr (espace quelconque)

La surface indicatrice d'émission est une portion de sphère centrée sur la source S, interceptée par le cône d'émission de la source.

$$\Phi = 2\pi (1 - \cos \alpha) \cdot I_0$$



2_{B4}. Lois

La hauteur de la source est h .

• Le plan à éclairer est perpendiculaire à la verticale passant par la source.

• L'éclairement se mesure avec un luxmètre.

La surface indicatrice d'émission est une **sphère centrée sur la source S** et de rayon I_0 .

$$\eta = \frac{\Phi_e}{P_{\text{électrique}}} : \text{rendement de la source}$$

$$k = \frac{\Phi_\ell}{P_{\text{électrique}}} : \text{efficacité lumineuse de la source (lm.W}^{-1}\text{)} \left(\frac{k}{\eta} = e \right)$$

$$e_{(\lambda)} = \frac{\Phi_\ell}{\Phi_e} : \text{efficacité lumineuse de l'œil : } e = 683 \cdot V \text{ (lm.W}^{-1}\text{)} \left(e = \frac{I_\ell}{I_e} = \frac{E_\ell}{E_e} \right)$$

$P_{\text{électrique}}$: puissance électrique consommée par la source (W) et réémise sous forme de **lumière visible** et de lumières invisibles (UV et IR).

Φ_e : flux énergétique émis par la source (W) – (**lumière visible**)

Φ_ℓ : flux lumineux rayonné par la source (lm) – (**lumière visible**)

$$I_0 = \frac{\Phi_\ell}{\Omega} \quad \Omega : \text{angle solide d'émission (sr)}$$

I_0 : intensité lumineuse constante *rayonnée dans Ω* (cd) (*toute direction comprise*)

$$E = \frac{I_0 \cdot \cos \theta'}{R^2} \quad (SM^2 = r^2 + h^2 ; SO = h ; OM = r ; \cos \theta = \frac{h}{R} ; \theta = \theta')$$

(R : distance entre la source S et le point éclairé)

$$E_0 = \frac{I_0}{h^2} ; E_M = \frac{I_0 \cdot h}{(r^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{I_0 \cdot \cos^3 \theta}{h^2}$$

θ : angle du rayon lumineux par rapport à la verticale à la source : $\theta = \tan^{-1} \frac{r}{h}$

E_M : éclairement lumineux *en un point de la surface situé à la distance r du centre O de la surface éclairée* (lx)

E_0 : éclairement *au centre de la surface éclairée* (lx)

Surface éclairée **uniformément** : $E_\ell = \frac{\Phi_\ell}{S}$

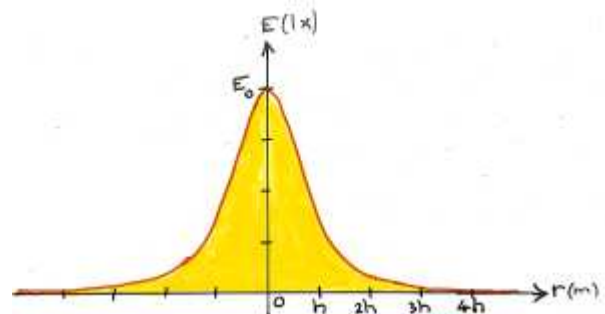
2_{B5}. Eclairement...

a- le plan à éclairer est perpendiculaire à la verticale passant par la source

• L'éclairement E_0 est maximal au centre O.

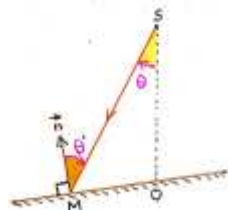
Il décroît très rapidement quand on s'en éloigne du centre.

$$E_M = \frac{I_0 \cdot h}{(r^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{I_0 \cdot \cos^3 \theta}{h^2} \quad \text{et} \quad E_0 = \frac{I_0}{h^2}$$



b- le plan à éclairer n'est pas perpendiculaire à la verticale passant par la source

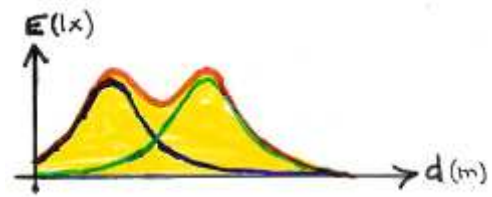
$$E = \frac{I \cdot \cos \theta'}{SM^2}$$



c- avec plusieurs sources

Il est nécessaire d'utiliser de nombreuses sources lumineuses quand on désire obtenir un éclairage à peu près constant.

$$E_{total} = \sum_{i=1}^n E_i$$



Exercice 1 :

Une lampe de puissance électrique 150 W a une efficacité lumineuse égale à 40 lm.W⁻¹.
Calculer le **flux lumineux** émis par cette lampe.

Exercice 2 :

Un faisceau issu d'une source S (angle solide $\Omega = 7,86 \cdot 10^{-6}$ sr) transporte un flux lumineux de $31,44 \cdot 10^{-12}$ lm.

Calculer l'**intensité lumineuse** rayonnée par cette source isotrope.

Exercice 3 :

Une source lumineuse émet un faisceau de **lumière monochromatique** de longueur d'onde $\lambda = 500$ nm, ainsi que des lumières situées dans l'ultraviolet et l'infrarouge avec un angle solide égal à $5 \cdot 10^{-5}$ sr...à midi.
Elle consomme une puissance électrique de 1 W.

Le flux énergétique transporté par la lumière « visible » est égal à 10^{-3} W.

- 1) Quelle est la valeur de V_λ , qui traduit la sensibilité de l'œil ?
En déduire l'efficacité lumineuse de l'œil.
- 2) Calculer le flux lumineux émis par la source.
- 3) Calculer l'intensité lumineuse et l'intensité énergétique.
- 4) Calculer le rendement et l'efficacité lumineuse de cette source.

Exercice 4 :

Une lampe L_1 (source isotrope) éclaire une table circulaire.

Elle est placée sur l'axe perpendiculaire à la table, et passant par le centre de celle-ci à une hauteur $h = 1,5$ m.

Sa surface indicatrice d'émission est une sphère centrée sur L_1 .

Elle émet un flux lumineux de 1500 lm.

- 1) a- Calculer l'intensité lumineuse I_0 dans la direction verticale.
b- En déduire l'intensité en bord de table située à $r = 0,8$ m du centre de cette table.

On remplace cette lampe L_1 par une lampe L_2 également source isotrope.

L'intensité lumineuse est maintenant égale à 130 cd.

- 2) a- Calculer le flux lumineux émis par la lampe L_2 .
b- Calculer l'**éclairage**...

• b_1 ...au centre O de la table, après avoir établi la relation : $E_0 = \frac{I_0}{h^2}$ à partir de la loi de Bouguer.

• b_{2a} ...au bord M de la table, en utilisant la relation $E_M = \frac{I_0 \cdot \cos \theta}{R^2}$, après avoir calculé θ ou $\cos \theta$, R^2 ou R, R étant la distance entre la source L_2 et M.

b_{2b} ...au bord M, après avoir démontré que $E_M = \frac{I_0 \cdot \cos \left(\tan^{-1} \frac{r}{h} \right)}{R^2}$.

b_{2c} ...au bord M de la table, après avoir établi la relation : $E_M = \frac{I_0 \cdot h}{(r^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}}$

b_{2d}...au bord M de la table, après avoir démontré les relations : $E_M = \frac{I_0 \cdot \cos^3 \theta}{h^2} = E_0 \cdot \cos^3 \theta$

toujours à partir de la loi de Bouguer. (θ : angle du rayon lumineux par rapport à la verticale à la table)

Exercice 5 :

Au **zénith**, par temps clair, 2 m² de la terre reçoit un flux lumineux de 232000 lm.

Calculer l'éclairement...considéré comme uniforme.

Exercice 6 :

Une lampe à incandescence consomme une puissance électrique de 100 W.

Elle émet un flux lumineux de 1500 lm.

Elle transporte un flux énergétique de 5 W.

1) Calculer :

a- Le rendement de cette lampe. Pourquoi ce rendement est-il si faible ?

b- L'efficacité lumineuse de cette lampe.

2) A partir du calcul des efficacités lumineuses des lampes du tableau ci-dessous, conclure sur l'intérêt des lampes halogènes.

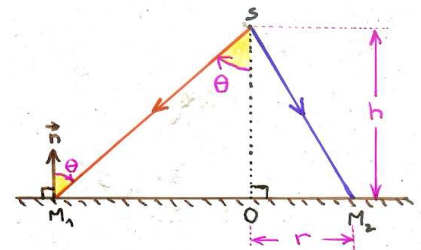
Lampe à incandescence		Lampe halogène	
P(W)	ϕ (lm)	P(W)	ϕ (lm)
75	970	100	2100
100	1390	300	6300
150	2200	500	10500

3) Calculer l'intensité lumineuse de la source supposée isotrope.

4) Un **luxmètre** est placé à $D = 2$ m de la lampe, la cellule est perpendiculaire aux rayons lumineux.

Calculer l'éclairement indiqué par la cellule.

5) Calculer le flux reçu par la surface sensible du luxmètre $S = 10$ cm².




Exercice 7 :

Compléter le tableau suivant, la source S rayonne uniformément

dans l'angle solide Ω (source **isotrope**)

(Chaque résultat d'une colonne est indépendant des autres colonnes)

Φ (lm)		$7,96 \cdot 10^3$	
Ω (sr)	4π		0,5
Dessin de l'angle solide			
Surface indicatrice d'émission			
h (m)	5	10	
I_{SO} (cd)			1500
E_O (lx)			100
r (m)	2,5	10	
I_{SM_1} (cd)			
E_{M_1} (lx)			50
θ (°)	45	10	
I_{SM_2} (cd)	1800		
E_{M_2} (lx)			10

Exercice 8 :

Une lampe électrique de flux lumineux Φ rayonne uniformément dans toutes les directions. Elle se trouve à la hauteur $h = 1,60$ m, centrée au-dessus d'un plan contenant une table circulaire de centre O et de rayon $r = 0,8$ m.

I étant l'intensité lumineuse de la source et E l'éclairement en un point M de la table.

On souhaite obtenir en un point de la table un **éclairement minimum** $E_{\min} = 100$ lx.

1) Calculer dans ces conditions l'**éclairement maximale** E_{\max} au centre de la table.

Vérifier le résultat en utilisant $E_M = E_0 \cdot \cos^3 \theta$.

2) Calculer la valeur du flux lumineux Φ nécessaire pour assurer cet éclairage.

Exercice 9 : **La surface éclairée n'est pas horizontale !**

Une source lumineuse, supposée ponctuelle, éclaire uniformément dans un angle solide $\Omega = 2\pi$ sr. Son intensité lumineuse est $I = 220$ cd.

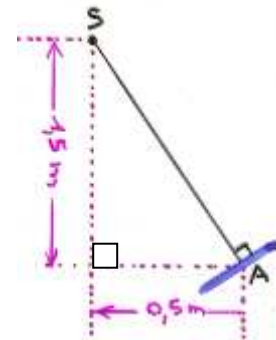
1) Calculer le flux lumineux émis par la source.

Au point A se trouve le centre d'une **feuille de carton blanc**, rectangulaire de 40 cm de long et de 30 cm de large.

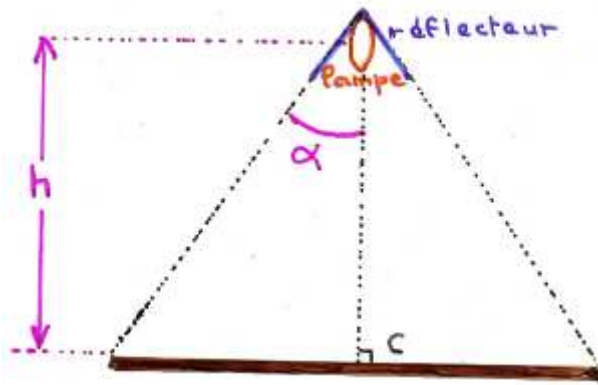
2) Calculer l'éclairement en A et à chaque coin de la feuille (petit côté représenté sur le schéma ci-contre).

3) Peut-on considérer que la valeur de l'éclairement en A est égale à la valeur moyenne de l'éclairement de cette feuille si la précision des calculs souhaitée est de 3 % ?

4) Calculer le flux reçu par la feuille.

Exercice 10 :

On s'intéresse à l'éclairage d'un plan de travail à l'aide d'un **luminaire** suspendu au plafond au dessus de la table.



L'éclairement souhaité au centre de la table est de 300 lx minimum.

Le centre de la table, noté C, se situe à la verticale de la lampe placée dans le luminaire ($h = 2$ m).

Les lampes étudiées seront considérées comme des sources ponctuelles répartissant uniformément le flux lumineux dans le cône de révolution de demi-angle au sommet α .

On a le choix entre trois lampes dont les caractéristiques sont les suivantes :

Lampe	Puissance électrique	Flux lumineux
1	20	780
2	35	1360
3	50	1950

1) Rappeler les unités dans le système international (u.S.I) de la puissance électrique et du flux lumineux.

2) Calculer l'angle solide du faisceau d'une lampe sachant que pour un cône de révolution de demi-angle au sommet $\alpha = 30^\circ$ l'angle solide est $\Omega = 2\pi (1 - \cos \alpha)$.

3) Calculer le coefficient d'efficacité lumineuse de chacune des trois lampes.

La connaissance de ce coefficient nous permettra t-elle de choisir la lampe à installer ?

Justifier.

- 4) Pour chacune des trois lampes, calculer :
- a- L'intensité lumineuse caractérisant chacune des trois lampes.
 - b- L'éclairement du point C.
- 5) Quelle(s) lampe(s) peut-on utiliser pour éclairer la table ? Justifier.
- 6) Parmi les lampes utilisables, vaut-il mieux en retenir une en particulier compte tenu des renseignements connus ? Justifier.

Exercice 11 :

Une lampe à incandescence émet un flux lumineux de 980 lm, réparti uniformément dans l'espace avec une efficacité de 13 lm.W^{-1} .

- 1) Calculer :
- a- La puissance consommée par la lampe.
 - b- L'intensité lumineuse I émise, celle-ci supposée indépendante de la direction d'émission.

On place la lampe dans un **réflecteur** qui permet l'émission de 80 % du flux total de la lampe dans un demi-angle au sommet $\alpha = 60^\circ$.

La nouvelle intensité étant toujours supposée indépendante de la direction d'émission.

- 2) Calculer cette nouvelle intensité I_1 .

La lampe est placée au-dessus d'un bureau à la hauteur h .

L'éclairement en un point M du bureau situé à la distance x du point O à la verticale de la lampe est E_M .

- 3) Calculer :
- a- La hauteur h pour avoir $E_0 = 250 \text{ lx}$

b- L'éclairement E_M quand $x = h$, après avoir établi la relation :
$$E = \frac{E_0}{\left(1 + \frac{x^2}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

- c- Compléter le tableau, puis tracer le **graphe** $E_x = f(x)$ pour $h = 1 \text{ m}$ et pour $-2 \text{ m} < x < 2 \text{ m}$.

x (m)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
E _x (lx)																					

L'éclairage du bureau étant insuffisant et non uniforme, on place une même lampe avec réflecteur, à la distance $d = h = 1,0 \text{ m}$ de la première lampe.

- 4) a- Compléter le tableau suivant :

x (m)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$E_1 (\text{lx})$											
$E_2 (\text{lx})$											
E_{global}											

- b- Tracer sur un même diagramme les trois graphes E_1 , E_2 et E_{global} .

- c- Conclure.

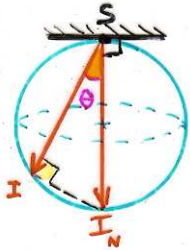
2c. Source anisotrope

2c1. Définition

L'intensité rayonnée par la source dépend de la direction.

2c2. Source orthotrope

(du grec « ortho » : droit, correct et « trephô » : je fais tourner)



Surface indicatrice d'émission en coupe verticale :



La surface indicatrice d'émission est une sphère passant par la source et de diamètre I_N

$$I_\theta = I_N \cdot \cos \theta$$

θ : angle du rayon lumineux par rapport à la verticale de la source

I_N : intensité lumineuse rayonnée à la verticale de la source (cd)

I_θ : intensité lumineuse dans la direction θ (cd)

$$I_N = \frac{\Phi_\ell}{\pi}$$

Φ_ℓ : flux lumineux rayonné par la source (lm)

Angle solide d'émission : $\Omega = 2\pi$ sr (semi-espace)

$$E = \frac{I_\theta \cdot \cos \theta}{R^2} \quad \left(SM^2 = r^2 + h^2 ; SO = h ; OM = r ; \cos \theta = \frac{h}{\sqrt{r^2 + h^2}} ; \theta = \tan^{-1} \frac{r}{h} \right)$$

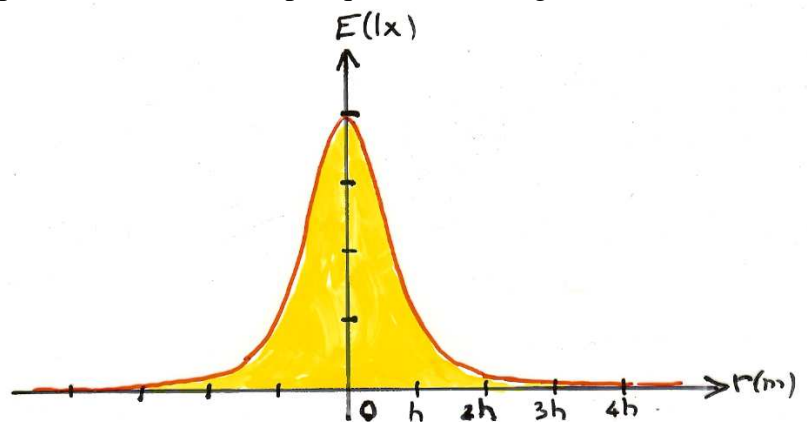
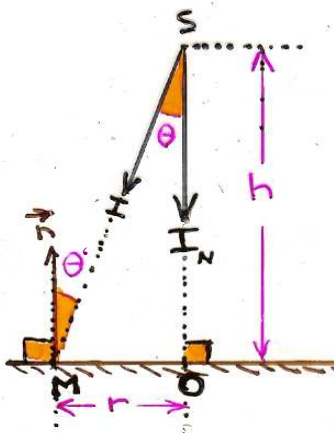
$$E_0 = \frac{I_N}{h^2} ; E_M = \frac{I_N \cdot \cos^2 \theta}{R^2} = \frac{I_N \cdot h^2}{(r^2 + h^2)^2} = \frac{I_N \cdot \cos^4 \theta}{h^2} = E_0 \cdot \cos^4 \theta$$

E_M : éclairement lumineux en un point de la surface situé à la distance r du centre O de la surface éclairée (lx)

E_0 : éclairement au centre O de la surface éclairée (lx)

L'éclairement est maximal au centre O .

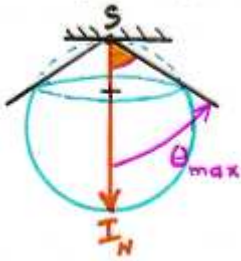
Il décroît encore plus rapidement que pour les sources isotropes quand on s'éloigne du centre.



2c3. Flux rayonné par la source orthotrope

L'intensité I dépend de la direction.

Elle peut être considérée comme constante dans un angle solide élémentaire $d\Omega$, dans lequel existe un flux élémentaire $d\Phi$.

a- calcul intégral

$$d\Phi = I \cdot d\Omega$$

$$d\Omega = 2\pi \cdot \sin \theta \cdot d\theta$$

$$I = I_N \cdot \cos \theta$$

$$\Phi = \int_0^{\theta_{\max}} d\Phi$$

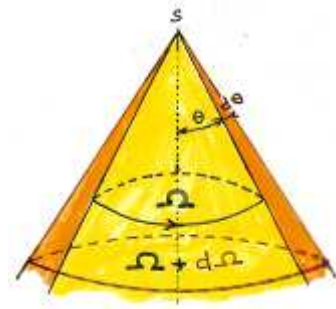
$$\Phi = \int I_N \cdot \cos \theta \cdot 2\pi \cdot \sin \theta \cdot d\theta$$

$$\Phi = 2\pi \cdot I_N \int_0^{\theta_{\max}} \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot d\theta$$

$$\Phi = 2\pi \cdot I_N \left(-\frac{1}{2} \cos^2 \theta \right)_0^{\theta_{\max}}$$

$$\Phi = 2\pi \cdot I_N \left(-\frac{1}{2} \cos^2 \theta_{\max} + \frac{1}{2} \cos^2 0 \right)$$

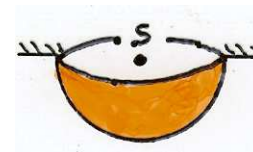
$$\Phi = \pi \cdot I_N (-\cos^2 \theta_{\max} + 1)$$



$$\Omega = 2\pi \cdot (1 - \cos \theta_{\max})$$

b- flux maximal

$$\Phi = \pi \cdot I_N$$



$$\Omega = 2\pi \text{ sr}$$

Exercice 12 :

Une lampe L (source orthotrope) éclaire une table circulaire.

Elle est placée sur l'axe de la table à une hauteur $h = 1,5$ m.

Sa surface indicatrice d'émission est une sphère passant par L et centrée sur la verticale.

Elle émet un flux lumineux de 408,4 lm.

- 1) Calculer l'intensité lumineuse I_N dans la direction verticale.
- 2) Calculer l'intensité en bord de table située à $r = 0,8$ m du centre de cette table.
- 3) Calculer l'éclairement... :

a-...au centre O de la table, après avoir établi la relation : $E_0 = \frac{I_N}{h^2}$ à partir de la loi de Bouguer.

•b₁-...au bord M de la table, en utilisant la relation $E_M = \frac{I_{\theta} \cdot \cos \theta}{R^2}$, après avoir calculé θ ou $\cos \theta$, R^2 ou R, R étant la distance entre la source L et M.

•b₂-...au bord M de la table, après avoir démontré que $E_M = \frac{I_N \cdot \cos^2 \theta}{R^2} = \frac{I_N \cdot \cos^2 \left(\tan^{-1} \frac{r}{h} \right)}{R^2}$.

•b₃-...au bord M de la table, après avoir établi la relation : $E_M = \frac{I_N \cdot h^2}{(r^2 + h^2)^2}$

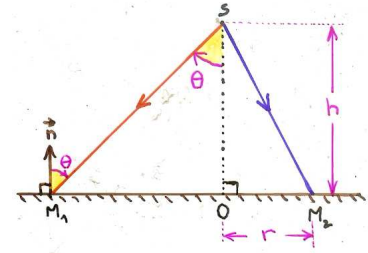
•b₄-...au bord M de la table, après avoir démontré que $E_M = \frac{I_N \cdot \cos^4 \theta}{h^2} = E_0 \cdot \cos^4 \theta$ toujours à partir de la loi de Bouguer. (θ : angle du rayon lumineux par rapport à la verticale à la source)



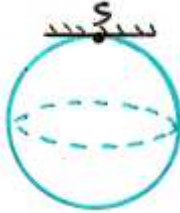
Exercice 13 :

Compléter le tableau suivant, la source S ne rayonne pas uniformément dans l'angle solide Ω :

(Source orthotrope)

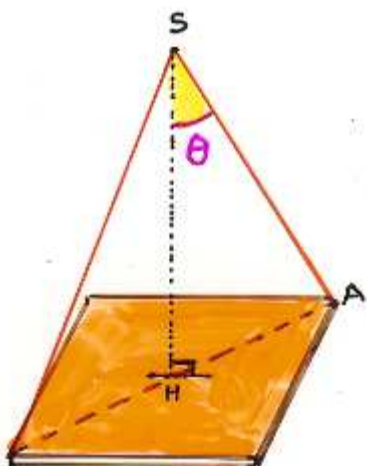
(Chaque résultat d'une colonne est indépendant des autres colonnes)



Φ (lm)	$15,7 \cdot 10^3$		$0,9 \cdot 10^3$
Ω (sr)			
Dessin de l'angle solide			$\theta_{\max} = 60^\circ$ 
Surface indicatrice d'émission			
h (m)	5		4
I_{SO} (cd)		1000	
E_O (lx)			
r (m)	2	2,9	0,5
I_{SM_1} (cd)		500	
E_{M_1} (lx)			
θ ($^\circ$)	60		30
I_{SM_2} (cd)			
E_{M_2} (lx)		10	

2c4. Autre exemple de source anisotrope

••**Exercice 14 :** Une **table rectangulaire** a pour dimensions $1,2 \text{ m} \times 2,8 \text{ m}$.



On dispose d'une source lumineuse S ponctuelle à la verticale d Centre géométrique de la table, à une distance $SH = 4 \text{ m}$.

1) Calculer le demi-angle θ_{\min} au sommet du cône lumineux d'ouverture minimale pour que toute la table soit éclairée.

On considère que les rayons issus de S vers la table sont verticaux.

2) Calculer l'intensité que doit émettre S pour obtenir un éclairement égal à 500 lx sur la table.

En fait, l'émission de S n'est pas isotrope et l'intensité lumineuse suit la relation $I_\theta = I_N \cdot \cos^2 \theta$, où $I_N = 8000 \text{ cd}$.

3) Calculer le flux émis par la source S .

$$(d\Phi = I \cdot d\Omega \text{ et } d\Omega = 2\pi \cdot \sin\theta \cdot d\theta ; \Phi = \int_0^{\theta_{\min}} d\Phi$$

3. SOURCES ETENDUES (secondaire et primaire)

3_A. Loi de Lambert

(Jean Henri, 1728-1777), philosophe, astronome, physicien mulhousien, l'un des fondateurs de la photométrie. Il imagina aussi l'idée du zéro absolu pour la température.

3_{A1}. Luminance

La **luminance L** traduit la **sensation lumineuse** d'une **surface** telle qu'elle est perçue par l'œil.

$$L = \frac{\text{intensité dans une direction donnée}}{\text{surface apparente de la source}}$$

La **luminance L** d'une source étendue ne dépend pas de la direction d'émission θ , selon Lambert.

Une ampoule n'apparaît pas de la même façon selon que le verre est clair (source direct) ou opalisé (source indirecte) : l'**éblouissement** sera plus important pour le verre clair.

Soit une source de surface élémentaire dS et de surface élémentaire apparente dS' dans la direction θ qui émet un flux élémentaire $d\Phi$ dans un angle solide élémentaire $d\Omega$. (θ est l'angle entre la normale à la surface dS et l'axe de l'angle solide élémentaire).

Soit L la luminance de la source :

$$L = \frac{I_\theta}{dS'} = \frac{\frac{d\Phi}{d\Omega}}{dS \cdot \cos \theta} = \frac{d\Phi}{d\Omega \cdot dS \cdot \cos \theta}$$

$$L = \frac{I_N}{dS} \quad (1)$$

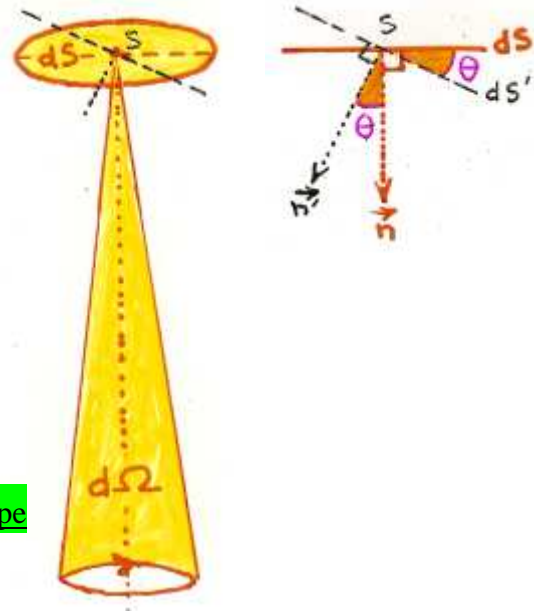
$$L = \frac{I_\theta}{dS'} = \frac{I_\theta}{dS \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

Pour suivre la loi de Lambert, la source doit être **orthotrope**

$$I_\theta = I_N \cdot \cos \theta$$

$$(1) \text{ identique à } (2) : L = \frac{I_N \cdot \cos \theta}{dS \cdot \cos \theta} = \frac{I_N}{dS}$$

• sauf pour une source sphérique (globe...) qui émet dans l'espace de façon isotrope.



3_{A2}. éMittance

L'**émittance** (ou **exitance**) **M** ($\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$) représente le flux par unité de surface émis par une source étendue primaire ou secondaire.

$$\Phi = \pi \cdot I_N ; d\Phi = \pi \cdot L \cdot dS ; d\Phi = M \cdot dS ; M = \pi \cdot L$$

3_{A3}. Φ , I , E , L , M

Grandeurs physiques	Unités énergétiques	Unités lumineuses
Flux : Φ (ou F)	W	lumen (lm)
Intensité lumineuse : I	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$	candéla (cd)
Eclairement : E	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	lux (lx)
Luminance : L	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$
Emittance : M	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	$\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$

$$\frac{\Phi_\ell}{\Phi_e} = \frac{I_\ell}{I_e} = \frac{E_\ell}{E_e} = e_{(\lambda)} = 683 \cdot V_{(\lambda)} = \frac{L_\ell}{L_e} = \frac{M_\ell}{M_e} \quad (\text{efficacité lumineuse de l'œil})$$

Une source étendue de surface S a une émittance uniforme :

$$M_\ell = \frac{\Phi_{\text{émis}}}{S} \quad L_\ell = \frac{I_N}{S_{\text{apparente source}}} \quad M_\ell = \pi \cdot L_\ell$$

M_ℓ : émittance de la source (lm.m^{-2})

L_ℓ : luminance de la source (cd.m^{-2})

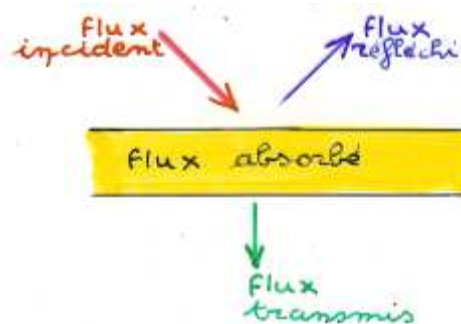
I_N : intensité lumineuse à la verticale de la source (cd)

Φ_ℓ : flux lumineux émis par la source (lm)

S : surface de la source (m^2)

3_B. Source secondaire

3_{B1}. Généralités



Flux incident : Φ_i (ou flux reçu)

Flux réfléchi : $\Phi_r = \Phi_{\text{réfléchi}} = r \cdot \Phi_{\text{incident}}$ (r : coefficient de réflexion)

Flux transmis : $\Phi_t = \Phi_{\text{transmis}} = t \cdot \Phi_{\text{incident}}$ (t : coefficient de transmission)

(flux absorbé : $\Phi_a = \Phi_{\text{absorbé}} = a \cdot \Phi_{\text{incident}}$) (a : coefficient d'absorption)

$$\Phi_{\text{réfléchi}} + \Phi_{\text{transmis}} + \Phi_{\text{absorbé}} = \Phi_{\text{incident}}$$

$$(r + t + a = 1)$$

Matériau	Plâtre	Papier blanc	Marbre blanc	Verre	Peinture	Pierre de taille	Ciment	Chêne	Brique rouge	Noyer	Acajou
r	0,85	0,84	0,83	0,81 à 0,04	0,75 à 0,2	0,50	0,40	0,33	0,20	0,16	0,12

3_{B2}. Source réfléchissante...

...de surface S dont l'éclairement E est uniforme :

$$\Phi_{\text{incident}} = E \cdot S$$

$$\Phi_{\text{réfléchi}} = r \cdot \Phi_{\text{incident}} = r \cdot E \cdot S$$

$$\Phi_{\text{réfléchi}} = M \cdot S$$

$$M = r \cdot E$$

E : éclairement uniforme de la source secondaire (lx)

r : coefficient de réflexion de la source

M : émittance de la source secondaire (lm.m^{-2})

$$M = \pi \cdot L$$

L : luminance de la source secondaire (cd.m^{-2})

3_{B3}. Source « transmettante »...

...de surface S dont l'éclairement E est uniforme :

$$\Phi_{\text{incident}} = E \cdot S$$

$$\Phi_{\text{transmis}} = t \cdot \Phi_{\text{incident}} = t \cdot E \cdot S$$

$$\Phi_{\text{transmis}} = M \cdot S$$

$$M = t.E$$

E : éclairement uniforme de la source secondaire (lx)
 t : coefficient de transmission de la source (rendement)
 M : émittance de la source secondaire (lm.m⁻²)

$$M = \pi.L$$

L : luminance de la source secondaire (cd.m⁻²)

Exercice 15 :

1) Calculer la **luminance** d'un globe diffuseur de 0,4 m de diamètre dont l'intensité lumineuse émise uniformément dans toutes les directions de l'espace est $I = 150$ cd.

En déduire son **émittance**.

2) Calculer la **luminance** d'un tube fluorescent de longueur $\ell = 1,2$ m et de diamètre $d = 38$ mm, sachant que l'intensité lumineuse émise perpendiculairement à l'axe du tube est $I = 300$ cd.

Exercice 16 :

Un local est équipé d'une lampe à incandescence S qui consomme une puissance électrique de 150 W. Cette lampe émet un flux lumineux de 1900 lm.

1) Déterminer l'efficacité lumineuse de cette lampe.

Cette lampe se trouve à l'intérieur d'une **sphère opalescente** qui absorbe théoriquement 12 % du flux émis par la lampe.

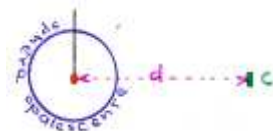
On considérera la lumière uniformément diffusée dans toutes les directions.

2) Déterminer l'intensité lumineuse de la sphère.

3) Montrer que cette source secondaire obéit à la loi de Lambert.

Calculer sa luminance sachant que le globe a un diamètre de 30 cm.

En fait des mesures expérimentales de l'intensité lumineuse du globe opalescent sont faites avec une cellule photoélectrique (C).



Cette cellule est située à une distance $d = 0,33$ m du centre du globe.

On supposera la surface de la cellule normale aux rayons lumineux.

Sachant que la cellule a une sensibilité de $0,20 \mu\text{A.lx}^{-1}$ et que l'intensité du courant photoélectrique mesurée est $0,24$ mA, en déduire l'intensité lumineuse mesurée de la sphère.

4) Conclure sur la valeur du coefficient d'absorption.

Exercice 17 :

L'éclairement de la **page d'un livre** est considéré comme uniforme et égal à 51 lx.

1) Sachant que son coefficient d'absorption est égal à 0,8 calculer son émittance M.

2) En déduire sa luminance L, sachant que la page émet selon la loi de Lambert.

Exercice 18 :

Pour éviter l'**éblouissement** (5000 cd.m^{-2}) provoqué par une lampe, on utilise un globe opalisé autour de cette lampe. La luminance de ce globe est $L = 1000 \text{ cd.m}^{-2}$ et son rayon $R = 0,2$ m.

Calculer :

1) L'émittance M du globe.

2) Le rendement lumineux (t) du globe sachant que le flux incident émis par la lampe est $\Phi_i = 1974$ lm.

3) L'éclairement intérieur E du globe.

3c. Source primaire

P : Puissance consommée par la source.

Φ (P) : flux énergétique émis à l'équilibre thermique, dans l'ensemble des longueurs d'onde.

M (W.m⁻²) : émittance énergétique de la source.

Φ_e : flux énergétique émis dans le visible, avec un rendement η de la source.

M_e (W.m⁻²) : émittance énergétique de la source dans le visible.

Φ_ℓ : flux lumineux émis...dans le visible, avec $e_{(\lambda)}$ l'efficacité lumineuse de l'œil.

M_ℓ (lm.m⁻²) : émittance lumineuse de la source.

$$\Phi(P) = \sigma \cdot S \cdot T^4 = M \cdot S$$

$$M = \sigma \cdot T^4$$

$$\frac{\Phi_e}{P} = \eta ; \Phi_e = \eta \cdot P = \eta \cdot \sigma \cdot S \cdot T^4$$

$$\Phi_e = M_e \cdot S$$

$$M_e = \eta \cdot \sigma \cdot T^4$$

$$\Phi_\ell = M_\ell \cdot S$$

$$\frac{\Phi_\ell}{\Phi_e} = \frac{M_\ell}{M_e} = 683 \cdot V_{(\lambda)}$$

$$M_\ell = 683 \cdot V_{(\lambda)} \cdot \eta \cdot \sigma \cdot T^4$$

$$M_\ell = \pi \cdot L_\ell$$

Exemple :

Lampe à incandescence de puissance 100 W, de rendement 5%, émettant une lumière « blanche »

La vergence est égale à 0,3. ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

La température d'équilibre de la lampe est égale à 2800 K.

$$M_\ell = 35\,704\,845 \text{ lm.m}^{-2}$$

$$L_\ell = 113\,710 \text{ cd.m}^{-2}$$

4. EXERCICES DIVERS

•Exercice 19 : Le luxmètre

Indispensable à toute mesure photométrique, cet appareil est équipé d'une cellule photosensible au sélénium, transformant l'énergie lumineuse reçue en courant électrique.

Il est donc associé à un milliampèremètre.

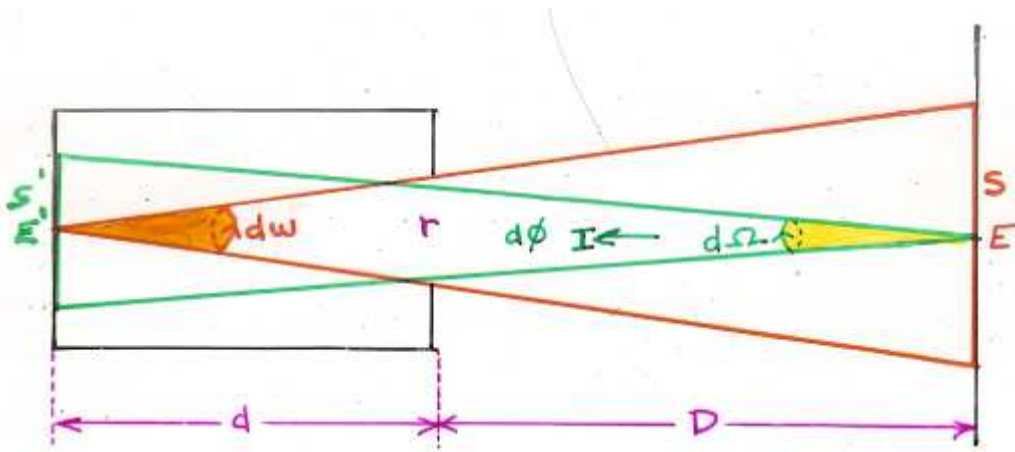
Pour que sa sensibilité corresponde à celle de l'œil, il est muni d'un filtre dont la courbe de réponse en fréquence est celle définie par la fonction V_λ (efficacité lumineuse relative de l'œil) en vision photopique (diurne).

Le calibre du milliampèremètre peut alors être gradué en lux.

Mesure des intensités lumineuses

Si la cellule est éclairée directement par une source, placée à une distance R et rayonnant une intensité I dans la direction normale à la cellule $I = E \cdot R^2$ donne la valeur de l'intensité.

Mesure des luminances



La cellule circulaire, de surface S' et d'éclairement E' est munie d'un cache cylindrique de longueur d et d'ouverture de rayon r .

Cet ensemble est orienté perpendiculairement à un mur, où l'éclairement E est supposé uniforme.

1) Montrer que, de la cellule, l'angle solide $d\omega$ intercepte sur le mur une surface S telle que :

$$S = \pi \cdot r^2 \cdot \frac{(D+d)^2}{d^2}$$

La surface S émet, vers la cellule, un flux $d\Phi$ dans l'angle solide $d\Omega$.

2) Montrer qu'on a : $d\Phi = \frac{L \cdot S \cdot S'}{(D+d)^2}$ ou L est la luminance du mur.

3) En déduire que l'éclairement de la cellule est : $E' = \pi \cdot L \cdot \left(\frac{r}{d}\right)^2$.

4) Comment faut-il choisir le rapport $\frac{d}{r}$ pour que le calibre du milliampèremètre 300 lx indique la luminance L du mur avec un calibre de 3000 $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$?

•Exercice 20 :

La surface de la cathode d'une cellule photoélectrique est de 12 cm^2 .

La cellule est placée à 150 cm d'une source lumineuse ponctuelle.

L'intensité lumineuse rayonnée par la source dans la direction de la cathode est $I = 30 \text{ cd}$.

1) Quelle est la valeur de l'angle solide sous lequel, de la source, on voit la surface de la cathode ?

2) La sensibilité moyenne de la cellule étant de $18 \mu\text{A} \cdot \text{lm}^{-1}$, quel est l'intensité du courant fourni par

la cellule dans ces conditions ?

••Exercice 21 :

Le rayon de la terre est $R_T = 6,37 \cdot 10^3$ km, celui du soleil est $R_S = 696 \cdot 10^3$ km, la distance soleil-terre est $d = 149,6 \cdot 10^6$ km.

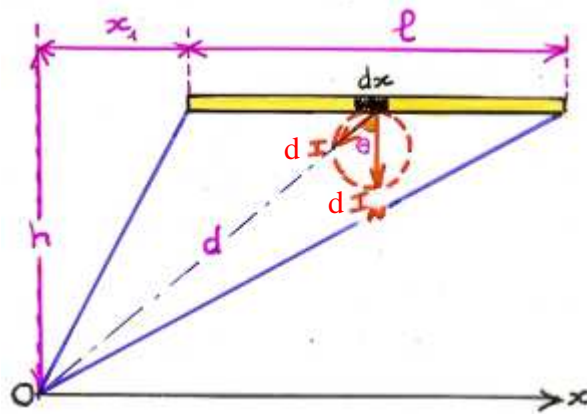
Les approximations effectuées lors des calculs seront justifiées : $R_T \ll d$ et $R_S \ll d$.

On admettra que le rayonnement du soleil est **isotrope**.

- 1) Calculer l'angle solide sous lequel, de la terre, on voit le soleil.
- 2) Lorsque le soleil est au zénith, on mesure un éclairement horizontal de 115000 lx.
Calculer le flux lumineux reçu par la terre.
- 3) Calculer l'intensité lumineuse et la luminance du soleil pour un observateur terrestre.
- 4) En admettant que 86 % seulement du flux lumineux tombant sur terre parvient au sol, calculer le flux lumineux total émis par le soleil.
- 5) le flux énergétique total émis par le soleil étant de $3,8 \cdot 10^{26}$ W, calculer son efficacité lumineuse.
- 6) Calculer l'intensité lumineuse rayonnée par le soleil et son intensité énergétique.
- 7) En admettant que 71 % du flux énergétique tombant sur terre parvient au sol, calculer, lorsque le soleil est au zénith, l'éclairement énergétique d'un sol horizontal et l'efficacité lumineuse du soleil vu de la terre.

••Exercice 22 :

On considère un **tube fluorescent** de longueur égale à 1,2 m qui se comporte comme une **source linéaire**.



L'intensité émise observée de loin sur une perpendiculaire à l'axe du tube est égale à 300 cd.

Dans le but de déterminer l'éclairement horizontal en un point O, tel que la normale à la surface en O soit perpendiculaire à l'axe du tube :

- 1) Exprimer littéralement pour l'élément dx du tube :
 - a- dI_N l'intensité élémentaire rayonnée à la verticale.
 - b- dI l'intensité élémentaire rayonnée dans la direction de O..sachant que l'indicatrice d'émission de dx dans le plan concerné est un cercle de diamètre dI_N .
 - c- l'éclairement élémentaire dE au point O.

Montrer que
$$dE = \frac{I_N \cdot \cos^2 \theta}{\ell \cdot h^2} \cdot dx$$

- 2) Calculer la valeur de l'éclairement dû à tout le tube en fonction de I_N , ℓ , h , θ_1 et θ_2 .

(On donne : $dx = \frac{h \cdot d\theta}{\cos^2 \theta}$ car $\tan \theta = \frac{x}{h}$ conduit à $\frac{d\theta}{\cos^2 \theta} = \frac{dx}{h}$)

(la primitive de $\cos^2 \theta$ est $\frac{\theta}{2} + \frac{\sin 2\theta}{4}$, θ en radians)

Application numérique : $h = 2,4$ m et $x_1 = 0,8$ m

- Salle de bains : éclairage général, 100 lx
niveau du miroir, 300 lx
- Cuisine : éclairage ambiant, 200 lx
plan de travail, 300 lx
- Table de travail : 300 lx
- Séjour : coin d'écriture et de lecture, 300 lx
coin de couture et de tricot, 500 lx

Lieu éclairé	Magasin (dépôt)	Vitrine Tableau	Mécanique générale	Salle de classe Laboratoire	Bureau Supermarché	Travail de précision
E_ℓ (lx)	100	150	200 à 300	300 à 500	750	> 1000