

C4 – Radiométrie et photométrie

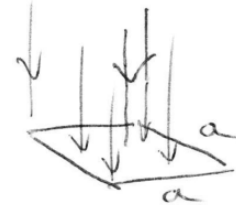
TD 4.1- Photométrie de LED

Q4.1.1- : Un faisceau de lumière parallèle a une section carré de 20 cm de coté et transporte un flux de 80 lm. Il éclaire perpendiculairement un sol plat. Calculer l'éclairement moyen reçu sur la zone éclairée.

la zone éclairée est une section $A = a^2$ du faisceau

$$E_f = \frac{F_f}{a^2} = \frac{80}{(0,2)^2} = 2000 = 2 \text{ klx}$$

$$1 \text{ lux} \equiv 1 \text{ lm} \cdot \text{m}^{-2}$$

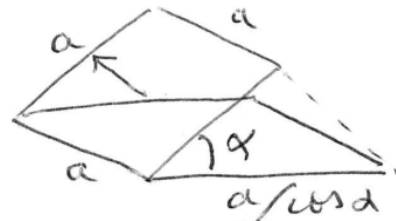


$$A = 0.04 \text{ m}^2 ; E_f = 2000 \text{ lx}$$

Q4.1.2- : Même question si le flux est de 10 W et que la direction du faisceau fait un angle de 30 degré avec la normale à la surface éclairée (qui sera donc plus grande).

la zone éclairée en projection oblique est un rectangle de surface $A' = a \times \frac{a}{\cos \alpha}$

$$E_e = F_e \times \frac{\cos \alpha}{a^2} = \frac{10 \times \cos(30^\circ)}{(0,2)^2} = 216,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

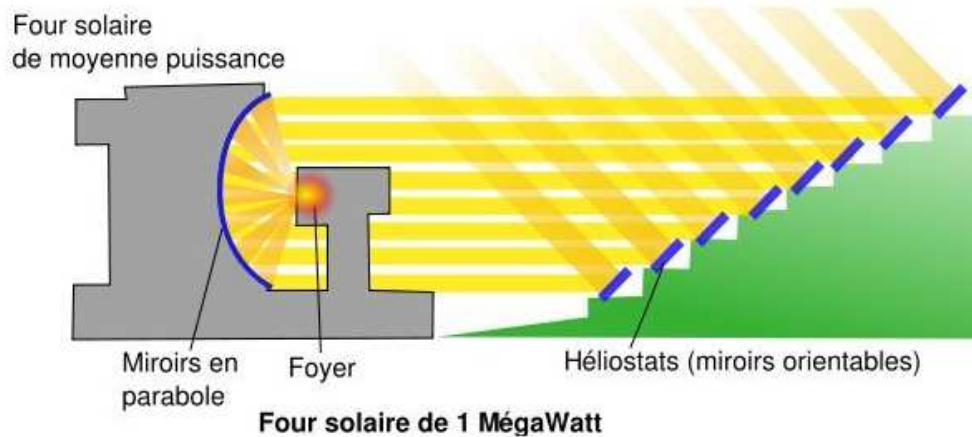


$$A' = A/\cos 30^\circ = 0.0462 \text{ m}^2 ; E_e = 216.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

TD 4.2- Utilisation de miroirs pour un four solaire

Etude basé sur les données du premier four solaire d'importance 1 MW, construit en 1970 à Odeillo (Pyrénées Orientale - France). Installation développée comme outil de recherche en chimie des matériaux (moyen de chauffage jusqu'à 3500 °C sans aucune pollution).

Il est composé d'un réseau d'héliostats équivalent à des miroirs plans, asservis en orientation, de sorte qu'ils renvoient toute la lumière solaire reçue vers le miroir mural quasi parabolique. On considère que le flux total reçu est entièrement concentré sur un four sphérique.



Fin juin, le soleil est à midi à environ 70° d'élévation (angle compté par rapport au sol horizontal). On suppose que les 63 héliostats (de 45 m^2 chacun) sont orientés de façon optimale selon la loi de Descartes. Le four est conçu comme une sphère de 0.8 m de diamètre.

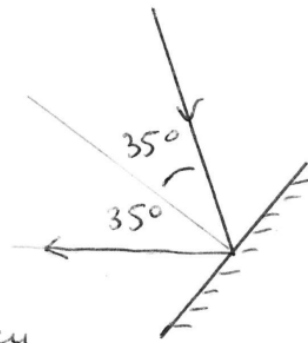
Q4.2.1- Si on suppose que la puissance reçue par le four est la valeur type de 1 MW , quel est alors l'éclairement reçu sur une surface faisant face au soleil ? Est-ce plausible ?

Surface des héliostats

$$A_h = 63 \times 45 = 2835 \text{ m}^2$$

Surface apparente

$$A'_h = A_h \times \cos(35^\circ) = 2323 \text{ m}^2$$



Soit E_s l'éclairement solaire reçu.

le flux F sera $F = E_s \times A'_h$ avec $F = 1 \text{ MW}$!

(tout ce qui arrive sur le four via le mur vient des héliostats)

$$E_s = \frac{F}{A'_h} \approx \frac{10^6}{2323} = 430 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

c'est plausible $430 = 1360 \times 31\%$ } c'est le 1/3 de l'éclairement solaire maximal.

Q4.2.2- Il est parfois écrit dans les brochures que ce four est chauffé comme par 10 000 soleils. Est-ce plausible ? (fin juin, on est astronomiquement optimal en élévation)

$$\text{Éclairement sur le four } E_f = \frac{F}{\pi D^2/4} = \frac{10^6}{0,5} \approx 2\,000\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

cela fera un éclairement reçu sur les héliostats de

$$E'_s = \frac{2\,000\,000}{10\,000} = 200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{ seulement}$$

$$\text{c'est plutôt } \frac{2\,000\,000}{430} = 4650 \text{ soleils seulement}$$

Remarque :

- Même idée pour les centrales solaires de production électrique mais en renvoi direct sur la masse thermique.
- Un système de stockage d'énergie thermique important (ici masse thermique $6,25$ tonnes de sels fondus) permet de fournir de l'électricité pendant 15 heures sans soleil : la centrale « solaire » produit donc de l'électricité pendant la nuit !



Centrale solaire Gemasolar à Ecija (Espagne)

En service depuis 10/2011. 2650 héliostats installés sur 185 ha. Puissance moyenne 20 MW en production d'électricité.

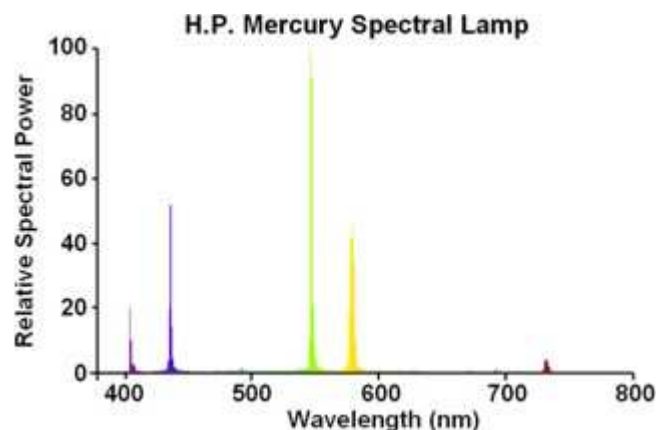
[voir <http://www.torresenergy.com/TORRESOL/gemasolar-plant/en> pour tous les détails]

TD 4.3- Photométrie d'une lampe « Mercure »

Le faisceau d'une lampe spectrale « Mercure » est « nettoyé » par un filtre ne laissant passer que les raies verte et orangée (546 nm et 578 nm). On mesure au luxmètre un flux lumineux global $F_1 = 3000$ lumens.

Le spectre énergétique du rayonnement est relevé avec un spectromètre. On constate un niveau double pour la raie verte vis à vis du doublet orangé : il y a donc 67% de vert pour 33% d'orangé.

Q4.3- : Calculer le flux énergétique total du faisceau de sortie.



la valeur pour la raie verte est double de celle pour la raie orangée (doublet)
source : Philips Lighting - No. 93136E

On ne peut pas faire de calcul direct type

$$F_e = \frac{F_e}{k_m V} \quad \text{on} \quad F_p = F_e \times \frac{d}{h \cdot c}$$

parce que la lumière n'est pas mono chromatique (1 d!)

On doit gérer la polychromaticité simplifiée ici au max

(merci le filtre ad hoc) \rightarrow $\left\{ \begin{array}{l} d_{\text{vert}} \\ d_{\text{orangé}} \end{array} \right\}$ moyen sur le doublet

le spectromètre indique par la hauteur relative des raies (capteur supposé idéal...)

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{e \text{ vert}} = F_e \times 0,33 \\ F_{e \text{ orangé}} = F_e \times 0,67 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} F_{e \text{ vert}} = F_e \times 0,33 \times k_m \times V(d_v) \\ F_{e \text{ orangé}} = F_e \times 0,67 \times k_m \times V(d_o) \end{array} \right.$$

$$\rightarrow F_e = \frac{F_e}{k_m [0,67 V(d_o) + 0,33 V(d_v)]} = \frac{F_e}{k_m V_p} = \frac{3000}{683} \times \frac{1}{0,917} = 4,8 \text{ W}$$

$V_p = 0,67 \times 0,95 + 0,33 \times 0,25 = 0,917$ valeur équivalente pondérée
par la "composition" énergétique

TD 4.4- Radiométrie d'un faisceau émis par une diode laser à 670 nm

Collimateur IMK-0714-E-K-DL3149-057

IMM-Art.Nr. 1100000316 Conrad Art.-Nr.:187514 IMK10A-4-670/3,5

Toutes les données pour Tc=25°C	Min.	Typ.	Max.
Longueur d'onde (nm)	660.	670	678
Courant de seuil (mA)	n. a.	25	35
Courant de service (mA)	n. a.	40	45
Tension de service (V)	n. a.	2,3	2,6
Courant de diode moniteur (mA)	0,5	1,5	2
Puissance optique (mW)		3,5	4,2
Température de service °C	-10		60
Température de stockage °C	-25		85
Section de faisceau ca.	4x2mm ²	Divergence de faisceau	0,5mrad

Source : <http://www1.produktinfo.conrad.com/cgi-bin/dlc/dlc.cgi?art=187514&ins=62&lang=FR>

D'après DS. A l'aide du tableau :

Q4.4.1- Estimer le flux énergétique émis par la diode laser, soit F_e sa valeur typique. Unité ?

$F_e = P_o = 3,5 \text{ mW}$ "puissance optique" émise
 cf. tableau } par la DL

Q4.4.2- Estimer la puissance électrique correspondante fournie à la diode laser. En déduire le rendement de conversion de la diode laser. Unité ?

Courant de service 40 mA typ.
 • tension de service 2,3 V typ } cf. tableau

• en service la puissance électrique consommée en émission

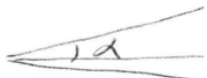
soit $P_e = U_d \times I_d \approx 2,3 \times 40 = 92 \text{ mW}$

• rendement de conversion $\eta = \frac{P_o}{P_e} = \frac{3,5}{92} = 3,8\%$ seulement

Q4.4.3- La diode est fournie avec une lentille plastique pour collimater son faisceau. Elle émet ainsi un faisceau de lumière légèrement divergent. Quel le demi-angle au sommet du cône de lumière formé par le faisceau (angle de divergence du faisceau) ?

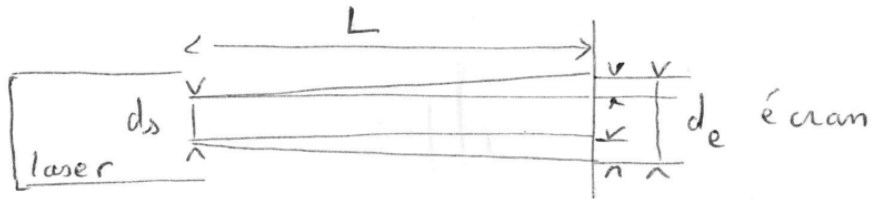
« Collimater » veut dire « rendre le faisceau parallèle » (donc le moins divergent possible).

cf. tableau divergence du faisceau $\alpha = 0,5 \text{ mrad} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$

→ $\frac{1}{2}$ angle au sommet du faisceau : 

Q4.4.4- La section en sortie du laser est un disque de diamètre $d_s = 3 \text{ mm}$.

Le faisceau est dirigé perpendiculairement sur un écran distant de $L = 3 \text{ m}$. Faire une figure explicative « vue de côté ». Décrire ce que l'on voit sur l'écran. Estimer d_e la dimension de la tache.



l'écran présente une tache circulaire rouge de diamètre

$$d_e = d_s + 2 \times (L \tan \alpha) = 3 + 2 \times 1,5 = 6 \text{ mm}$$

⚠ ne pas oublier : $d_e > d_s$ faisceau divergent !

Q4.4.5- En déduire l'éclairement énergétique moyen de la tache E_{tache} .

• la tache sur l'écran a une surface $A = \frac{\pi}{4} \times d_e^2 = 2,83 \times 10^{-5} \text{ m}^2$

• l'éclairement énergétique moyen sur cette tache est

$$E_{\text{tache}} \approx \frac{F_e}{A} \approx \frac{3,5 \times 10^{-3}}{2,83 \times 10^{-5}} = 123,8 \approx 124 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Q4.4.6- Estimer le flux lumineux délivré par ce laser (unité ?).

• la lecture du graphique de $V(d)$ pour $d = 670 \text{ nm}$ donne

$$V(670 \text{ nm}) = 0,03$$

$$F_p = F_e \times V(670) \times V_m = 3,5 \times 10^{-3} \times 0,03 \times 683 = 0,0717$$

en $\text{lm} \cdot \text{s}^{-1}$

$$F_p \approx 0,07 \text{ lm} \text{ lumen}$$

Rappel } raccord système d'unité : voir à 555 nm
 { 1 W à 555 nm \leftrightarrow 683 lm

Q4.4.7- Calculer l'efficacité lumineuse du laser, soit $\eta_{\text{laser}} = F_{\text{lumineux}} / P_e$ (unité ?).

Efficacité lumineuse du laser (efficacité à produire de la lumière visible)

$$\eta_{\text{laser}} = \frac{F_l}{P_e} = \frac{0,07}{92 \cdot 10^{-3}} = 0,76 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \quad (!)$$

≈ nul !

{	led blanche	≈ 75 lm · W ⁻¹
	halogène	≈ 28 lm · W ⁻¹
	tube fluo	≈ 100 lm · W ⁻¹
	éclairage sodium	≈ 114 lm · W ⁻¹

Q4.4.8- Estimer le petit angle solide Ω_s sous lequel le laser éclaire l'écran (unité ?).

angle solide du cône de divergence

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha) \approx \pi \alpha^2 = \pi (0,5 \cdot 10^{-3})^2 = 7,85 \cdot 10^{-7} \text{ sr}$$

↑
radian stéradian

L'usage du développement limité n'est pas nécessaire SI on garde assez de décimales sur l'affichage de la calculatrice (notation scientifique avec exposant conseillé)

Q4.4.9- Estimer l'intensité énergétique I_e en sortie du laser (unité ?).

en supposant l'intensité énergétique uniforme

$$F_e \approx I_e \times \Omega \quad \rightarrow \quad I_e \approx \frac{F_e}{\Omega} = \frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{7,85 \cdot 10^{-7}} \approx 4,5 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$$

forte intensité !

≠ I électrique de la DL en mA !

Q4.4.10- Estimer l'éclairement moyen E_{Bouguer} de la tache en appliquant directement la formule de calcul du théorème de Bouguer. Que penser de la valeur obtenue E_{Bouguer} ?

• Application "brutale" du th. de Bouguer

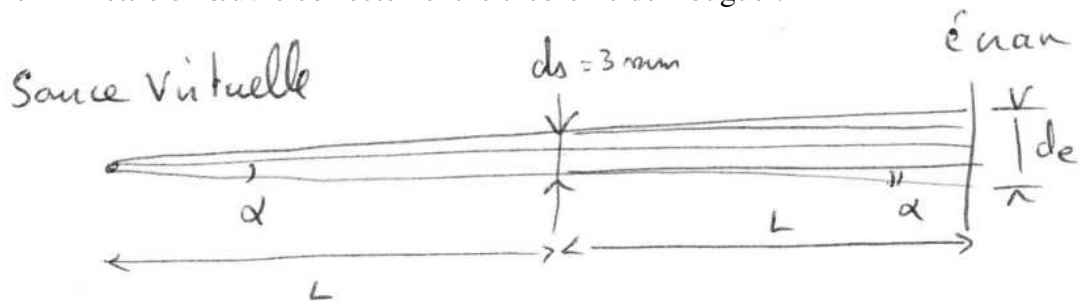
$$E \approx \frac{I_e \times \cos^2(0^\circ)}{L^2} = \frac{4500 \times 1}{3^2} \approx 500 \text{ W.m}^{-2}$$

faisceau \perp écran

• On attend $E \approx 124 \text{ W.m}^{-2}$ cf. Q4.4.5 !

• même si $d_e = 3 \text{ mm}$ petit, la source n'est pas ponctuelle pour un faisceau très peu divergent !

Q4.4.11- Mettre en œuvre correctement le théorème de Bouguer.



$$\frac{ds}{2} = L' \tan \alpha = 1.5 \text{ mm} = L \tan \alpha$$

cf. Q4.4.4

$$\frac{ds}{2} = L' \tan \alpha = 1.5 \text{ mm} \rightarrow L' = 3 \text{ m} = L$$

il faut considérer une source virtuelle en avant du laser, à l'origine du cône divergent de $\frac{1}{2}$ angle α de même intensité

la distance source-écran est $L + L' = 3 + 3 = 6 \text{ m}$.

$$E_{\text{tache}} \approx \frac{I \times \cos^2(0^\circ)}{(L+L')^2} = \frac{4500 \times 1}{6^2} = 125 \text{ W} \quad \text{au x arrondis près...}$$

TD 4.5- Eclairage urbain

Pour assurer l'éclairage d'une rue, on dispose en ligne une série de lampadaires dont chaque lampe à LED 28 W émet uniquement de la lumière visible avec une efficacité de 75 lm.W^{-1} , un rendement énergétique de 23% et une intensité de 780 cd. Vues du sol dans leur cône d'éclairage, ces lampes peuvent être considérées comme ponctuelles et éclairant de façon isotrope.

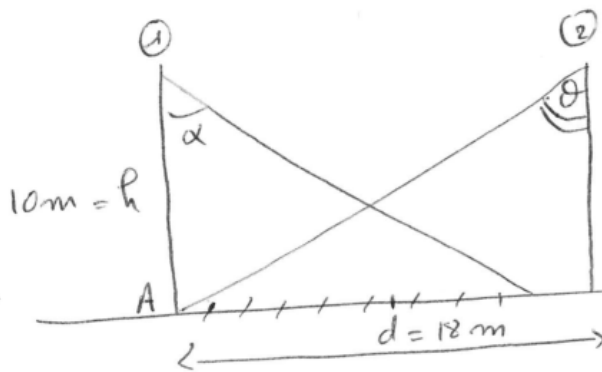
Deux lampadaires sont espacés de 18 m et la hauteur de suspension des lampes est de 10 m.



Q4.5.1- En déduire les flux énergétique et lumineux émis. En déduire l'angle solide dans lequel un lampadaire éclaire, puis le demi-angle au sommet de son cône d'éclairage.

- $\eta = 0,23$ rendement thermodynamique de la lampe.
- $F_e = \eta \times P_e = 0,23 \times 28 = 6,4 \text{ W}$ flux énergétique
- $\eta_l = 75 \text{ lm.W}^{-1}$ efficacité de la lampe
- $F_l = \eta_l \times P_e = 75 \times 28 = 2100 \text{ lm}$ (lumen) flux lumineux
- $F_p = \Omega I_p$ ← intensité lumineuse → $\Omega = \frac{F_l}{I_p} = \frac{2100}{780} = 2,69 \text{ sr}$ } angle solide (stéradian)
- $\Omega = 2,69 \text{ sr}$, $\Omega = 0,21 \times 4\pi \approx 1/5$ de l'angle espace
- $I_e = \frac{F_e}{\Omega} = \frac{6,44}{2,69} \approx 2,39 \approx 2,4 \text{ W.sr}^{-1}$ } intensité (énergétique)
- $\Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha) \rightarrow \cos \alpha = 1 - \frac{\Omega}{2\pi} = 0,572$
 $1/2$ angle au sommet $\alpha = 55,1^\circ$

Q4.5.2- En déduire l'origine de l'éclairage au pied d'un lampadaire ; calculer l'éclairement de la chaussée obtenu là.



$$\tan \theta = \frac{d}{h} = \frac{18}{10} = 1,80$$

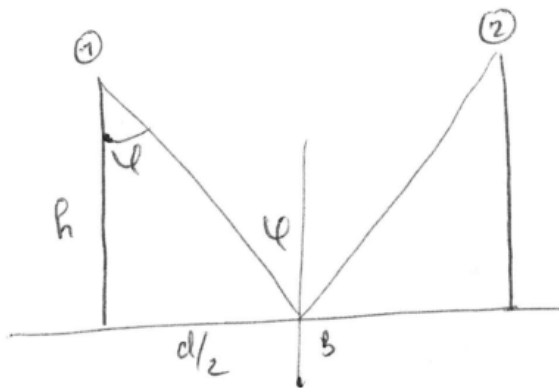
$$\theta = 60,9^\circ > \alpha$$

seul le lampadaire ①
éclaire en A
② est trop loin

$$E(A) = \frac{I \times \cos(0^\circ)}{r^2} = \frac{I}{100}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rightarrow \frac{780}{100} = 7,8 \text{ lx} \\ \rightarrow \frac{2,4}{100} = 24 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \end{array} \right.$$

Q4.5.3- Même question pour le lieu de la chaussée équidistant des pieds de deux lampadaires voisins.



$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{d/2}{h} \right)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{9}{10} \right) \approx 42^\circ$$

Les deux lampadaires contribuent autant à l'éclairage en B

$$E = E_1(B) + E_2(B) = 2 \times I \times \frac{\cos \varphi}{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + h^2}$$

$$E = I \times \frac{2 \times 0,743}{9^2 + 10^2} = I \times 0,0082$$

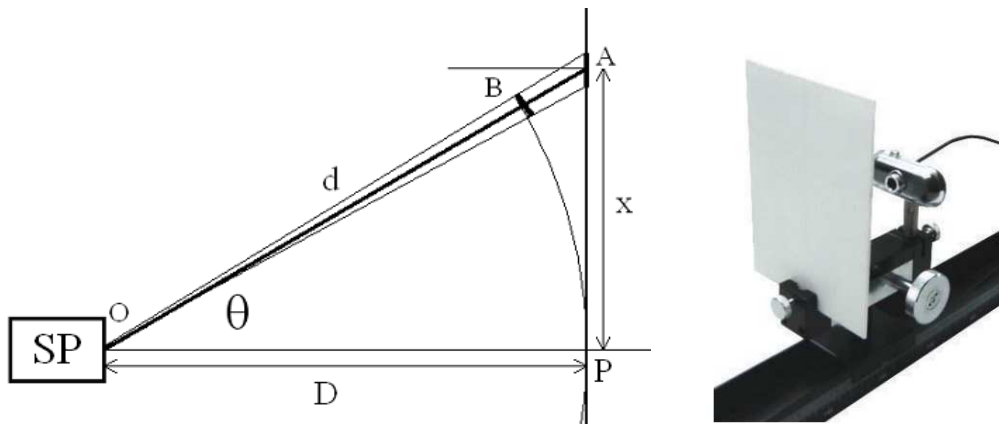
$$\rightarrow 6,4 \text{ lx} \quad \left(\frac{I_E}{780 \cdot d} \right)$$

$$\rightarrow 19,6 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \approx 20 \quad \left(\frac{2,4 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}}{I_E} \right)$$

ce qui compte sont les valeurs d'éclairages
donc les grandeurs photométrique (un peu l'œil)

TD 4.6- Correction pour une mesure sur écran oVisio

Une source ponctuelle isotrope éclaire un écran oVisio photographié par une webcam.



Q4.6.1- Déterminer l'éclairement dans l'axe en P.

L'éclairement autour du point P est d'après la loi de Bouguer :

$$E_P = \frac{dF_r}{dA_r} = I \frac{\cos O}{D^2} = \frac{I}{D^2} \quad \text{car P est dans l'axe et voit la source sous un angle } \theta = 0$$

Q4.6.2- Déterminer les paramètres géométriques concernant l'éclairement en A.

Le point A est situé à $d = D / \cos \theta$

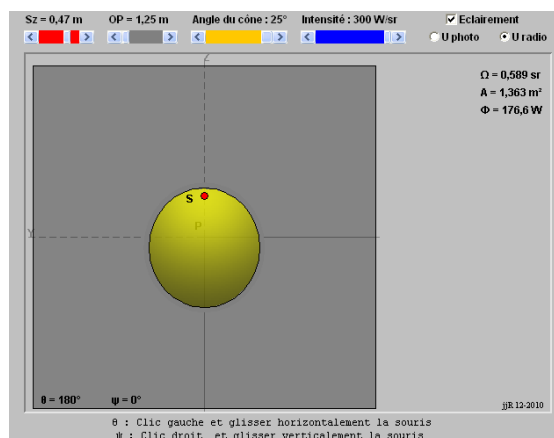
Le point A voit la source sous un angle θ (égalité des angles « intérieur » / « extérieur »)

Q4.6.3- En déduire l'éclairement en A en fonction de celui en P. Quelle correction faudra-t-il appliquer lors de mesures à caractère radiométrique avec le système oVisio ?

L'éclairement autour du point A est donc

$$E_A = I \frac{\cos \theta}{d^2} = I \frac{\cos^2 \theta}{D^2} \cos \theta = \frac{I}{D^2} \cos^3 \theta = E_P \cos^3 \theta < E_P$$

→ bien que la source soit isotrope, l'éclairement reçu sur le plan n'est pas uniforme.

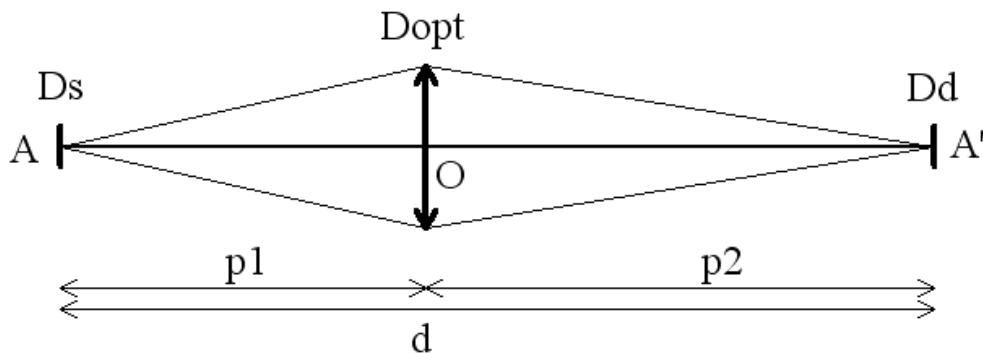


TD 4.7- Transfert de flux optimal par une lentille convergente

On cherche à collecter le flux émis par une source optique uniforme qui n'est pas ponctuelle mais de petite dimension.

Il s'agit d'un petit disque de diamètre $D_s = 1 \text{ mm}$ dont l'intensité en émission peut-être, dans ce cas là, donné par l'expression $I_s = A_s \times L_s$. A_s est la surface de la source.

$L_s = 1 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ est la luminance de la source supposée ici uniforme (c'est en quelque sorte l'intensité par unité de surface pour une source non ponctuelle).



Pour ce faire, on utilise un photodétecteur de diamètre $D_d = 2 \text{ mm}$, situé à $d = 1 \text{ m}$, sur lequel on forme une image de la source à l'aide d'une lentille de diamètre utile $D_{\text{opt}} = 15 \text{ mm}$, de longueur focale f' et de transmission énergétique $T = 0,95$.

Le transfert de flux est optimal lorsque détecteur et image ont même taille.

Q4.7.1- Où faut-il positionner la lentille ?

• grandissement $|\gamma| = \frac{D_d}{D_s} = \frac{p_2}{p_1}$ avec $d = p_1 + p_2$

la taille optimale de l'image est celle du détecteur D_d

$$|\gamma| = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} = 2$$

$$\bullet \quad p_2 = \frac{D_d}{D_s} p_1 \quad , \quad d = p_1 \left(1 + \frac{D_d}{D_s}\right) = p_1 \frac{D_s + D_d}{D_s}$$

$$\rightarrow p_1 = \frac{d D_s}{D_s + D_d} = \frac{1 \times 10^{-3}}{10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3}} = \frac{1}{3} \text{ m}$$

$$\rightarrow p_2 = d - p_1 = \frac{2}{3} \text{ m}$$

Q4.7.2- Quelle est la focale de cette lentille ?

$$\text{focale } f' \quad \frac{1}{p_2} - \left(\frac{1}{-p_1}\right) = \frac{1}{f'} \quad \rightarrow \frac{1}{f'} = \frac{3}{2} + 3 = \frac{9}{2} \quad \rightarrow f' = \frac{2}{9}$$

$$f' = 0,22 \text{ m} \quad \left(\text{car } \overline{OA'} = p_2 \quad \overline{OA} = -p_1 < 0 \quad p_1 > 0 \right)$$

Q4.7.3- Quel est le flux reçu sur le détecteur ? Quelle est l'influence du diamètre de la lentille ?

• source "Lambertienne" (L uniforme) $\rightarrow I = L \times A_s = L \frac{\pi D_s^2}{4}$
intensité énergétique en $W \cdot sr^{-1}$

• éclairage sur la face avant de la lentille

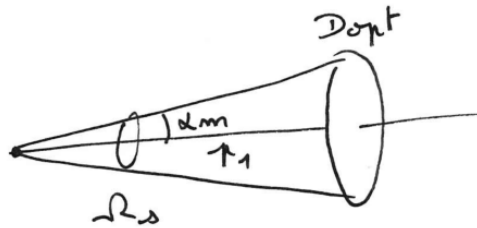
théorème de Bouguer $E \approx I \times \frac{\cos \theta}{r_1^2} \approx \frac{I}{r_1^2}$ $\cos \theta \approx 1$ condition de Gauss

• flux reçu par la face avant de la lentille

$$\phi_i = E \times A_{opt} = \frac{I}{r_1^2} \times \frac{\pi D_{opt}^2}{4}$$

$$\phi_i = \left(L_s \frac{\pi D_s^2}{4} \right) \times \frac{\pi D_{opt}^2}{4} \times \frac{1}{\left(\frac{D_s + D_d}{2} \right)^2}$$

Rg $\left\{ \begin{array}{l} \phi_i = I \times \Omega_s \\ \Omega_s = \frac{A_{opt}}{r_1^2} \end{array} \right.$ avec Ω_s angle solide sous lequel la source est vue de la lentille



• flux transmis à travers l'optique $\phi_t = T \phi_i$
(les 5% manquants sont absorbés par le verre et remis en IR à cause de l'échauffement)

• flux reçu par le détecteur $\phi_r = \phi_t$ car le faisceau complet éclaire le détecteur

$$\phi_r = TL_s \left[\frac{\pi}{4} \frac{D_{opt}}{d} \frac{D_s}{f_s} (D_s + D_d) \right]^2$$

$$\phi_r = 0,95 \times 1 \times \left[\frac{\pi}{4} \times \frac{15 \cdot 10^{-3}}{1} (1+2) \cdot 10^{-3} \right]^2 \approx 1,2 \text{ nW}$$

• $\phi_r \nearrow$ comme $D_{opt}^2 \propto A_{opt}$ surface de la lentille

R_g, ON : ouverture numérique NA numerical Aperture $\sin \alpha_m$

• photo nombre d'ouverture $N = \frac{1}{2 \sin \alpha'_m}$

$$\sin \alpha'_m \approx \tan \alpha'_m \approx \frac{D_{opt}}{2} \times \frac{1}{f}$$

$$N = \frac{f}{D_{opt}}$$

un objectif à 2.4 "ouvre" plus qu'un à 3,3 ou 5,6

→ plus "lumineux" : meilleure photo à base luminosité'

