

# OPTIQUE

## MP1 SEMESTRE 2 COURS TD & TP



**B. VELAY, M. CULERON, P-A. DUBOS & M. PERON**  
**2019 – 2020**



## Sommaire

Documentation Cours , TD et TP .....	5
Planning prévisionnel des C-TD .....	5
Mode d'emploi du Cours-TD d'optique S2 .....	5
Programme de révision du DS d'optique .....	6
<b>C0 - INTRODUCTION .....</b>	<b>7</b>
1- Usages de l'Optique géométrique .....	7
2- Faisceaux de lumière et rayons de lumière.....	7
3- Caractérisation de la forme d'un faisceau.....	8
4- Spectres d'une lumière – influence du détecteur.....	8
5- « Puissance en optique » : flux énergétique et lumineux .....	11
<b>C1 - PROPRIETES OPTIQUES DES MATERIAUX : REFLEXION, REFRACTION, DISPERSION, ABSORPTION.....</b>	<b>12</b>
1- Indice de réfraction $n(\lambda)$ pour le visible et dispersion chromatique d'un matériau transparent .....	12
2- Propagation des rayons lumineux dans un matériau .....	12
3- Réflexion / Réfraction lors d'un changement de milieu .....	13
4- Aspect énergétique pour un dioptré .....	13
5- Absorption de lumière par le milieu de propagation .....	14
TD C1 - Pré-requis à maîtriser pour les TD : .....	16
Pré-TD 1- Exercices personnels à faire avant TD (applications directes du Cours).....	16
TD 1.1 - Utilisation d'un prisme ayant un angle droit .....	16
TD 1.2 - Déviation et dispersion par un prisme isocèle .....	17
TD 1.3 - Propriétés d'une fibre optique plastique PMMA .....	18
Pré-DS1 .....	20
<b>C2 -FORMATION ET CARACTERISATION DES IMAGES .....</b>	<b>21</b>
TD C2 - Pré-requis à maîtriser pour les TD : miroirs.....	21
Pré-TD 2- Exercices personnels à faire avant TD (applications directes du Cours).....	23
TD 2.1- Miroirs d'un interféromètre de Michelson.....	24
TD 2.2- Ouverture de champ de miroirs plan et convexe .....	25
TD 2.3- Images par un miroir convexe .....	26
TD 2.4- Caractériser un miroir primaire de télescope .....	26
TD 2.5- Modèle pour le télescope spatial Hubble .....	27
Pré-DS2 .....	29
<b>C3 -FORMATION ET CARACTERISATION DES IMAGES .....</b>	<b>31</b>
TD C3 - Pré-requis à maîtriser pour les TD : lentilles .....	31
Pré-TD 3- Exercices personnels à faire avant TD (applications directes du Cours).....	33
TD 3.1- Dimensionnement d'un verre de lunette .....	33
TD 3.2- Correction pour une lentille « non mince » .....	34
TD 3.3- Utilisation de lentilles minces.....	34
TD 3.4- Deux lentilles minces accolées.....	34
TD 3.5- Deux lentilles minces séparées .....	35
TD 3.6- Téléobjectif photographique.....	35
Pré-DS3 .....	36
<b>C4 – RADIOMETRIE ET PHOTOMETRIE .....</b>	<b>39</b>
TD C4 - Pré-requis à maîtriser pour les TD : .....	39
Pré-TD 4- Exercices personnels à faire avant TD (applications directes du Cours).....	41

<b>TD 4.1- Photométrie de LED .....</b>	<b>41</b>
<b>TD 4.2- Utilisation de miroirs pour un four solaire.....</b>	<b>42</b>
<b>TD 4.3- Photométrie d'une lampe « Mercure ».....</b>	<b>42</b>
<b>TD 4.4- Radiométrie d'un faisceau émis par une diode laser à 670 nm.....</b>	<b>43</b>
<b>TD 4.5- Eclairage urbain .....</b>	<b>44</b>
<b>TD 4.6- Correction pour une mesure sur écran oVisio .....</b>	<b>44</b>
<b>TD 4.7- Transfert de flux optimal par une lentille convergente.....</b>	<b>45</b>
<b>Pré-DS4.....</b>	<b>45</b>
<b>TRAVAIL PREPARATOIRE AUX TP D'OPTIQUE.....</b>	<b>49</b>
<b>Préparation .....</b>	<b>49</b>
<b>Manipulation et Compte-Rendu .....</b>	<b>49</b>
<b>Evaluation .....</b>	<b>49</b>
<b>TP1- Lentilles minces convergentes Etude de la formation d'une image – Focométrie.....</b>	<b>50</b>
<b>TP2- Focométrie .....</b>	<b>51</b>
<b>TP3- Mesure d'indice de réfraction par goniométrie - Dispersion chromatique d'un prisme de verre ....</b>	<b>52</b>
<b>TP4- Radiométrie.....</b>	<b>53</b>
<b>TP5- Etude du spectre d'émission d'une source pour l'éclairage .....</b>	<b>54</b>
<b>TP6- Liaison à fibre optique .....</b>	<b>55</b>
<b>POURSUITE D'ETUDES EN OPTIQUE / OPTRONIQUE APRES MP : .....</b>	<b>57</b>

## Documentation Cours , TD et TP

La documentation est en ligne sur <http://mpsn.free.fr> , y compris PPN2013 M2303

## Planning prévisionnel des C-TD

Séance Cours	Sujet C0 et C1	Exercices
1	Réflexion et réfraction	1.1, 1.2, 1.3
2	Prisme, miroirs plan	1.3, 2.1, 2.2
3	Miroirs	2.2 à 2.4
4	Miroirs, lentilles minces	2.5, 3.1, 3.2
5	Lentilles minces	3.3, 3.4
6	Lentilles minces	3.5, 3.6
7	Radiométrie & photométrie	4.1 à 4.4
8	Radiométrie & photométrie	4.5 à 4.7

## Mode d'emploi du Cours-TD d'optique S2

Suivre le Cours Introductif en amphi (Cours C0 et C1)

Prendre connaissance du Poly de C-TD-TP ; chacune des quatre parties est organisée ainsi :

- Résumé du Cours intitulé « Pré-requis à maîtriser pour les TD »
- Pré-TD : quelques exercices très simples d'application du Cours à faire impérativement avant le TD correspondant.
- Un ensemble de TD réalisés en classe
- Pré-DS : quelques exercices d'entraînement à faire à la fin du chapitre pour préparer les DS

Télécharger les documents PDF lorsqu'ils sont disponibles :

- Documents de Cours disponibles en ligne avant les TD
- Corrigés des Pré-TD et Corrigés des Pré-DS disponibles à la fin de la partie

Prendre connaissance du planning, identifier le thème prévu à la prochaine séance de TD

**Pour chacune des séances :** (1/2h environ)

- Lire le pdf de Cours et faire le lien avec le résumé « Pré-requis »
- Commencer à mémoriser le résumé
- Chercher à l'écrit les exercices « Pré-TD » correspondant

**Après chaque séance :** revoir les exercices nouveaux en parallèle du résumé de Cours (1/4h )

A la fin de chaque partie (toutes les deux séances environ) réviser et se tester sur le Pré-DS (1h environ)

L'efficacité de cette pédagogie repose sur la quantité et la régularité de VOTRE travail personnel. C'est vous qui voyez.

## Programme de révision du DS d'optique

- Connaissance et utilisation des lois de Descartes : réflexion et réfraction sur un dioptre (calcul et tracé)- indice de réfraction – réflexion totale - déviation par un prisme
- Connaître les conventions usuelles de signes pour les distances et les tailles ainsi que les conditions de Gauss.
- Utilisation d'un miroir plan ou sphérique (calcul par relation de conjugaison et grandissement, tracés)
- Utilisation d'une lentille mince convergente ou divergente en conditions de Gauss (calcul par relation de conjugaison et grandissement, tracés), grandissements transversal et angulaire, focale d'un ensemble de lentilles minces accolées
- Système optique simple centré, image intermédiaire (par calcul et/ou tracé),
  
- Flux de lumière : flux réfléchi et transmis par un dioptre, flux absorbé et loi de De Beer.
- Grandeurs énergétiques et unités radiométriques : Flux en W , intensité en  $W.sr^{-1}$  , éclairement en  $W.m^{-2}$  .
- Grandeurs lumineuses et unités photométriques : Flux en lm, intensité en cd , éclairement en lx.
- Usage simple d'un angle solide en sr ; relation flux – intensité uniforme
- Application simple de la loi de Bouguer pour une source ponctuelle.
- Sensibilité d'un détecteur, utilisation d'une courbe de sensibilité spectrale

**Document autorisés** : conditions non encore définies

Bien regarder l'affichage des conditions du premier ou second DS (15 jours à l'avance)

1<sup>er</sup> cas : pas de document personnel autorisé mais formulaire élémentaire fourni dans le sujet

2<sup>ième</sup> cas : 1 feuille A4 recto **manuscrite** (pas de photocopie !)

**Matériels autorisés et probablement nécessaires** : règle, équerre, rapporteur d'angle...

1<sup>er</sup> cas : pas de calculatrice autorisée (valeurs numériques simples, calculs à la main)

2<sup>ième</sup> cas : calculatrice autorisée (ainsi que son mode d'emploi)

# C0 - Introduction

## 1- Usages de l'Optique géométrique

- Formation des images dans les instruments
- Concentration de la lumière et de son énergie
- Guidage de la lumière (fibre optique...)
- Vision et correction de la vue
- Phénomène naturel (arc en ciel, mirage etc.)
- Image de synthèse par informatique : ray tracing

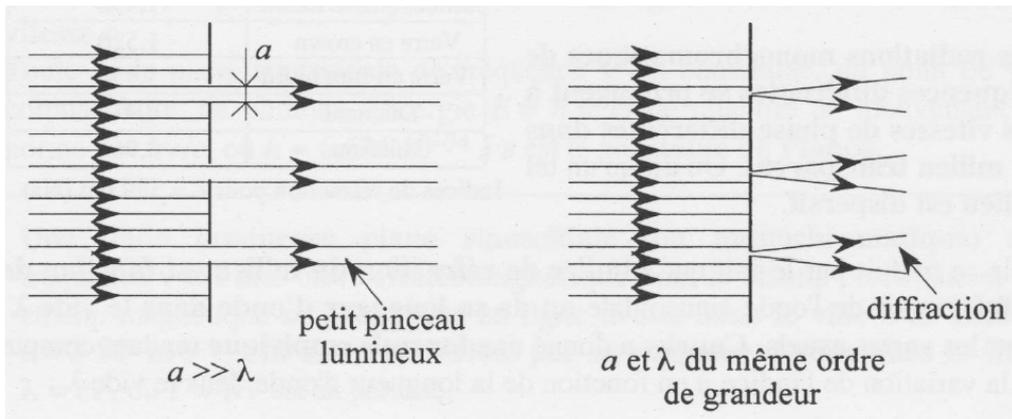
## 2- Faisceaux de lumière et rayons de lumière

### 2.1- Caractérisation du faisceau :

- **Forme** (divergent, convergent, parallèle...)
- **Couleur** : monochrome à longueur d'onde  $\lambda$ , polychrome (spectre de raies ou continu)
- **Puissance optique** transportée dans une section du faisceau
  - $F_e$  **Flux énergétique** en ..... (radiométrie : capteur physique)
  - $F_l$  **Flux lumineux** en ..... (photométrie : vu par l'œil humain)
- **Homogénéité** (éclairage obtenu uniforme ou non)

### 2.2- Le faisceau est composé de rayons de lumière arbitrairement fins

- Modèle : un « **rayon de lumière** » est associé à une ligne géométrique unidimensionnelle (droite ou courbe).



- Limite de l'approximation pour l'optique géométrique : **dimension**  $a \gg$  .....
- Limite des angles calculables sous cette approximation :  $\alpha >$  .....
- Le rayon n'émet pas de lumière : il n'est rendu visible par le côté que s'il y a un diffuseur (fumée, gouttelettes, etc.)

### 3- Caractérisation de la forme d'un faisceau

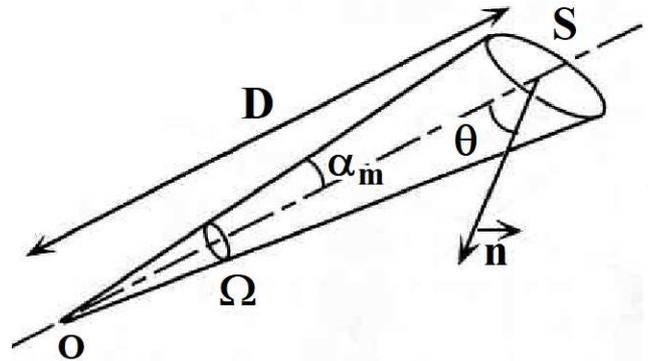
- Faisceau **conique** : l'ouverture géométrique du cône est décrite et mesurée par son **angle solide**  $\Omega$  en **stéradian sr** ( $\neq$  angles usuels  $\alpha$  et  $\theta$  en radian !)

- Soit S une petite surface **vue depuis** le point O. Le cône a un **demi-angle au sommet**  $\alpha_m$  (dans un plan de coupe diamétral)

Sa normale inclinée forme un angle  $\Theta$  avec le rayon moyen provenant de O

$S \cos \Theta$  est la **surface apparente** vue depuis O.

On calcule l'angle solide  $\Omega$  par :



$$\Omega(\alpha_m) = 2\pi (1 - \cos \alpha_m) \quad \text{ou} \quad \Omega = \frac{S \cos \Theta}{D^2}$$

Cas particuliers :

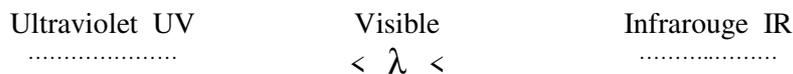
pour un écran plat :  $\alpha_m = \frac{\pi}{2} \rightarrow \Omega_{1/2 \text{ espace}} = 2\pi = \dots\dots\dots$

Pour une boule comme le soleil (« espace entier ») :  $\alpha_m = \pi \rightarrow \Omega_{\text{espace}} = 4\pi = \dots\dots\dots$

- Faisceau **divergent** : faisceau de section de surface croissante et  $\Omega > 0$
- Faisceau **convergent** : faisceau de section de surface décroissante et  $\Omega > 0$
- Faisceau **parallèle** : faisceau de section de surface constante  
 $\alpha_m = 0$  donc  $\Omega_{\text{parallèle}} = 0$  (cône « fermé »)

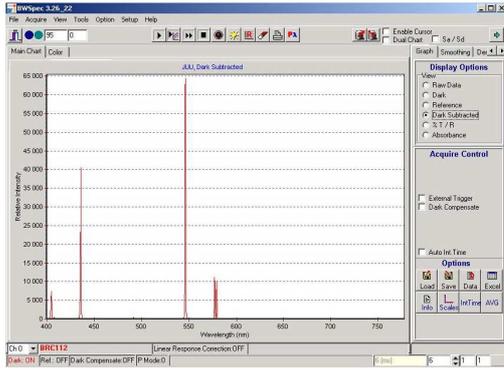
### 4- Spectres d'une lumière – influence du détecteur

#### 4.1- Spectre de la lumière visible

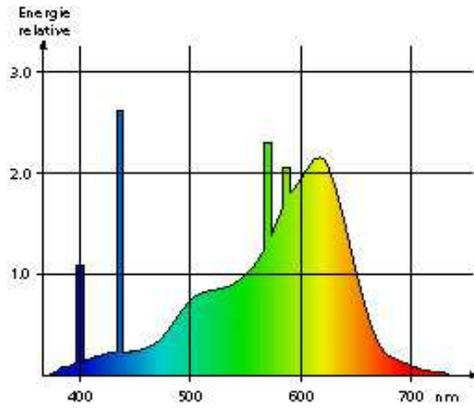


#### 4.2- Exemples de spectres de lampes usuelles

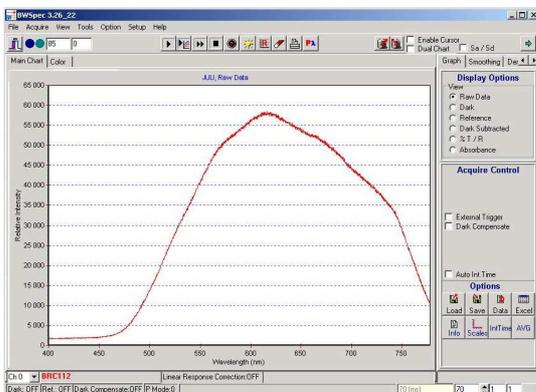
- Lampe spectrale Mercure Hg : spectre de raies
- Tube fluorescent : spectres de raies et de bandes
- Lampe à incandescence et LED Blanche : spectre continu ;



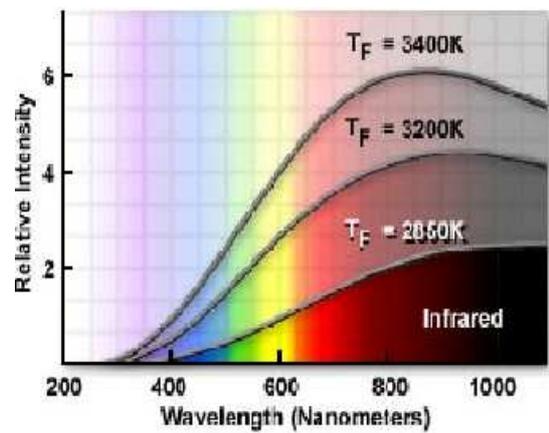
Lampe spectrale Mercure Hg  
Spectre de raies  
mesuré par le spectromètre de TP



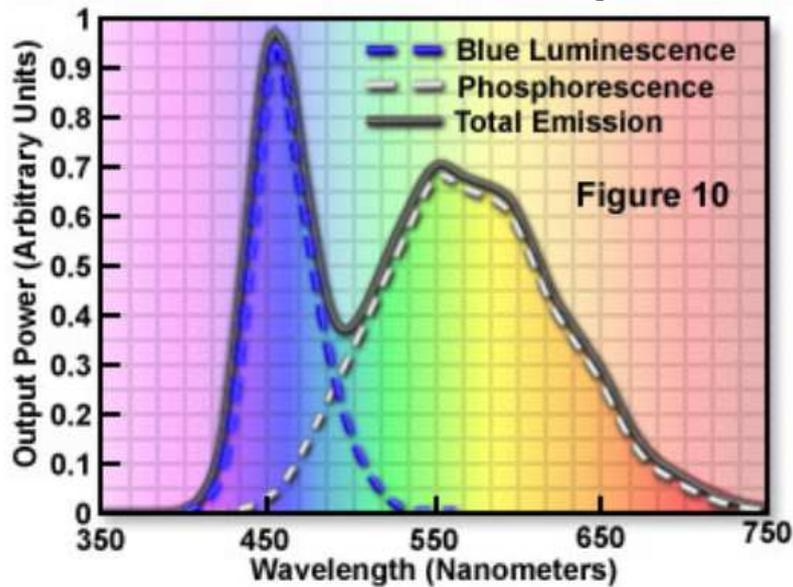
Spectre d'émission d'un tube fluorescent  
(raies visibles du Mercure  
et bandes « continues » de fluorescence)



Lampe « à incandescence »  
Spectre continu  
mesuré par le spectromètre de TP



Spectres complets (IR compris !) de lampe à incandescence selon la température du filament  
5% d'énergie émise dans le visible seulement !



Spectre typique d'une LED « blanche »  
émettant une raie lumineuse bleue et une bande de phosphorescence  
(17 à 20% d'énergie réémise dans le visible)

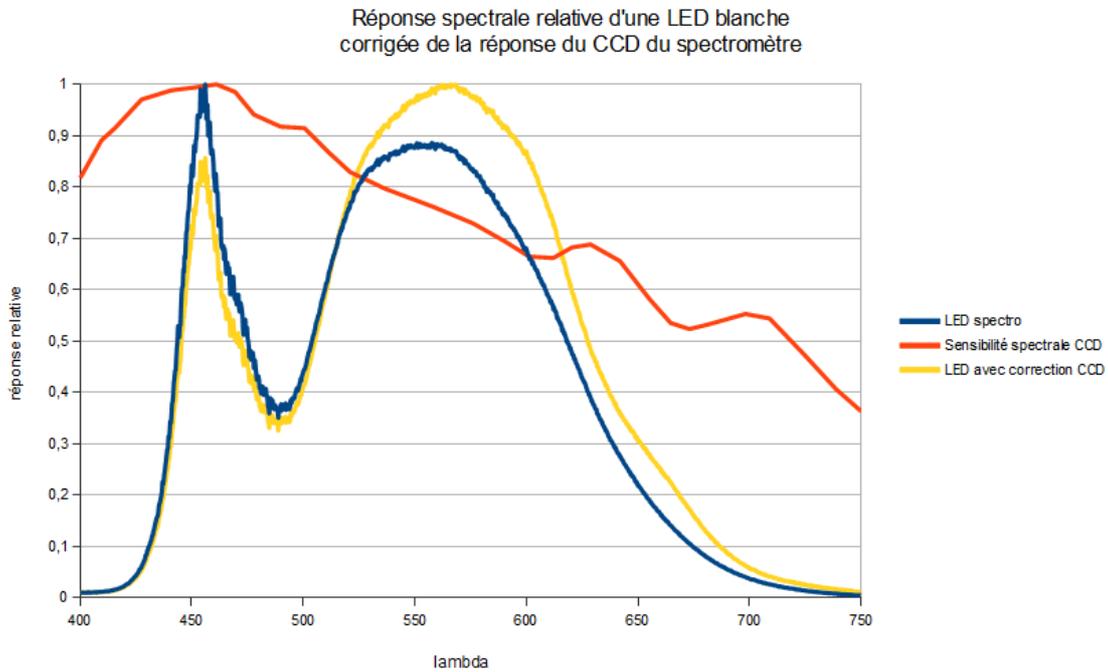
### 4.3- Influence de la sensibilité spectrale d'un détecteur ou de l'œil

Utilisation du spectromètre CCD de TP pour visualiser le spectre d'une LED blanche

Réponse brute issue du capteur (LED Spectro) :  $R(\lambda)$

Sensibilité spectrale du capteur CCD :  $V(\lambda)$

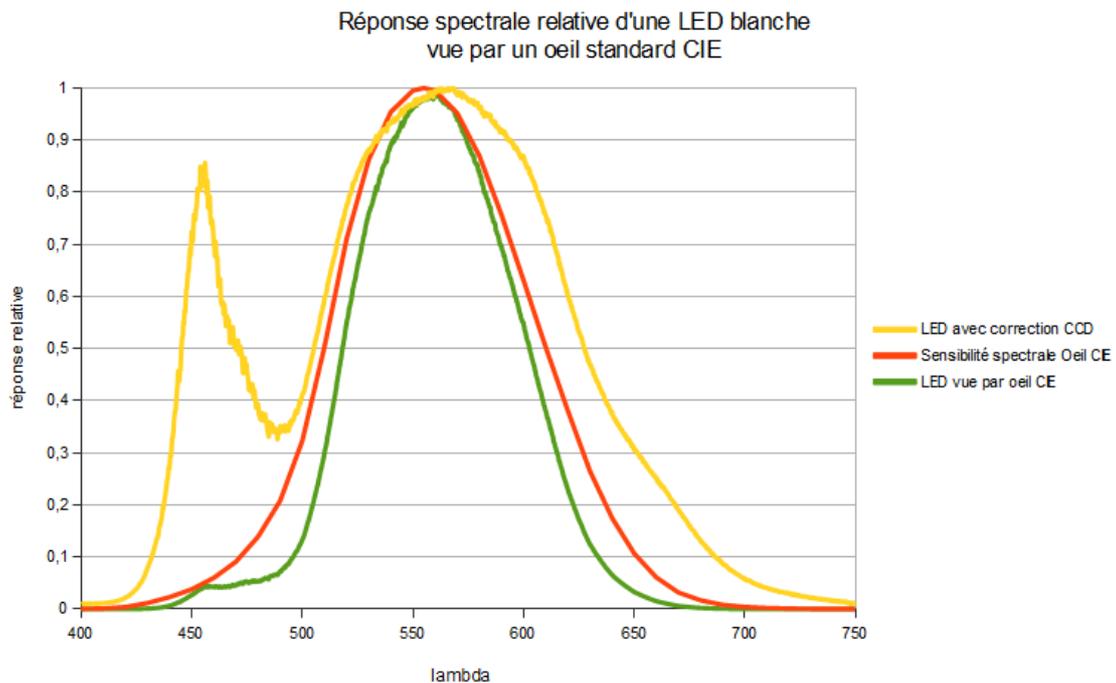
→ **Réponse corrigée des défauts** (du capteur CCD) :  $R_{\text{corrigée}} = \dots\dots\dots / \dots\dots\dots$



Le même spectre de LED blanche d'éclairage vu par l'œil « standard » CIE

**Réponse en vision humaine :**

$R_{\text{œil}} = \dots\dots\dots \times \dots\dots\dots$



- Max de la courbe de sensibilité de l'œil : le vert à 555 nm
- L'œil ne voit quasiment pas le « pic » de bleu.

## 5- « Puissance en optique » : flux énergétique et lumineux

### 5.1- Flux énergétique $F_e$ en watt (ou W) $\approx$ « puissance optique »

- « débit » d'énergie par unité de temps transportée par le rayonnement en  $J.s^{-1} \equiv W$

- Les grandeurs **radiométriques** caractérisent le rayonnement dans les unités physiques usuelles (réponse du détecteur supposée  $\approx$  indépendante de la longueur d'onde).

Flux d'un faisceau en W, éclairement d'un récepteur en  $W.m^{-2}$ , intensité d'une source en  $W.sr^{-1}$

- **Flux énergétique en émission**  $F_e = 5 \text{ mW}$

Puissance électrique consommée :  $P_{alim} = U \times I = 2,3 \text{ V} \times 30 \text{ mA} = \dots\dots\dots \text{ mW}$

**Rendement** de conversion  $\eta = F_e / P_{alim} = 5 / 69 = 0,072 \approx \dots\dots \%$

### 5.2- Flux lumineux $F_l$ en lumen (ou lm)

**Ampoule Philips Tornado High Lumen E27 42 watts**

Type d'ampoule : fluocompacte .

Puissance électrique consommée : .....

**Flux lumineux** : .....

(flux lumineux équivalent à celui d'une lampe à incandescence de puissance consommée 190 W)

Flux énergétique ? non spécifié, difficile à calculer  $\rightarrow$  donc on le mesure directement.

**Efficacité énergétique**  $\eta_L = F_l / P_{alim} = 3000 / 42 = \dots\dots\dots$

Autres sources (en  $lm.W^{-1}$ ) : halogène 15 à 28, LED blanche 80, lampe sodium 125 à 178 (jaune)

Les grandeurs **photométriques** caractérisent un rayonnement **comme s'il était vu par un observateur humain « standard »**.

$\rightarrow$  nécessité d'utiliser les unités spécifiques de la **photométrie** lumen, lux (éclairement d'un récepteur), candela (intensité d'une source) etc.

### 5.3- Pour info : comparaison des principales sources d'éclairage

- Efficacité énergétique  $\eta_L = F_l / P_{alim}$  (flux lumineux global émis toute couleur confondue / puissance électrique consommée, en  $lm.W^{-1}$ ) :

Ex : Halogène 15 à 28, LED blanche 80, fluorescent 70 à 100, lampe sodium 125 à 178 (jaune)

- Qualité chromatique (appréciée par un panel d'utilisateurs) IRC Indice de Rendu des Couleurs (de IRC = 100 pour la lumière solaire à IRC = 0 en lumière monochromatique !)

Ex : Lampe sodium 0 à 25, LED blanche 85, tube fluorescent 85, Halogène 90 à 100, soleil 100

- Durée de vie moyenne

- Prix...

# C1 - Propriétés optiques des matériaux : réflexion, réfraction, dispersion, absorption...

Les matériaux utilisés pour réaliser des composants optiques sont  
 ± **réfringents** (déviation du faisceau au franchissement d'un dioptre,...)  
 ± **réfléchissants** (pertes au franchissement d'un dioptre, images multiples...)  
 ± **dispersifs** (trajet différents selon la couleur  $\lambda$ , ...)  
 ± **absorbants** (pertes énergétiques selon le trajet Flux  $\downarrow$  si  $L \uparrow$ )

## 1- Indice de réfraction $n(\lambda)$ pour le visible et dispersion chromatique d'un matériau transparent

Dans le visible, l'indice de réfraction d'un matériau transparent varie peu mais suffisamment pour disperser la lumière (prisme, arc-en-ciel)

Les faibles variations de sont décrites par un modèle de Cauchy à deux paramètres:

$$n(\lambda) = A + \dots\dots\dots$$

Exemple : un verre d'indice médian  $n \approx 1.52$  (dans le vert) varie d'environ 0.02 entre le bleu et le rouge.

Milieu	Indice
Air sec à 15°C	1,000 277
Eau à 15°C	1,333
Silice, quartz fondu	1,458
Verre en crown	1,520
Verre en flint lourd	1,650
Diamant	2,415
Silicium	3,969

Indices de réfraction pour  $\lambda = 589 \text{ nm}$  (Na)

## 2- Propagation des rayons lumineux dans un matériau

### 2.1- Propagation de la lumière à la vitesse .....

- vitesse de la lumière dans le vide maximale  $c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$   
 $c_{\text{air}} \approx c_{\text{vide}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1} \approx 300\,000 \text{ km.s}^{-1}$  (indice  $n_{\text{vide}} = 1.0 \approx n_{\text{air}}$ )

- vitesse de la lumière dans un milieu  $c/n < c$  donc  $n > 1$  !  
 ex :  $c_{\text{verre}} \approx 200\,000 \text{ kms}^{-1}$  dans un verre d'indice  $n_{\text{verre}} = 1.5$

### 2.2- Propagation rectiligne ou non

- Propagation rectiligne dans un **milieu d'indice optique n uniforme**  
 (n uniforme : même valeur de n en tout point de l'espace, à  $\lambda$  donné)

- Propagation non rectiligne de la lumière si indice n n'est pas uniforme

### 2.3- Mirages optiques

### 3- Réflexion / Réfraction lors d'un changement de milieu

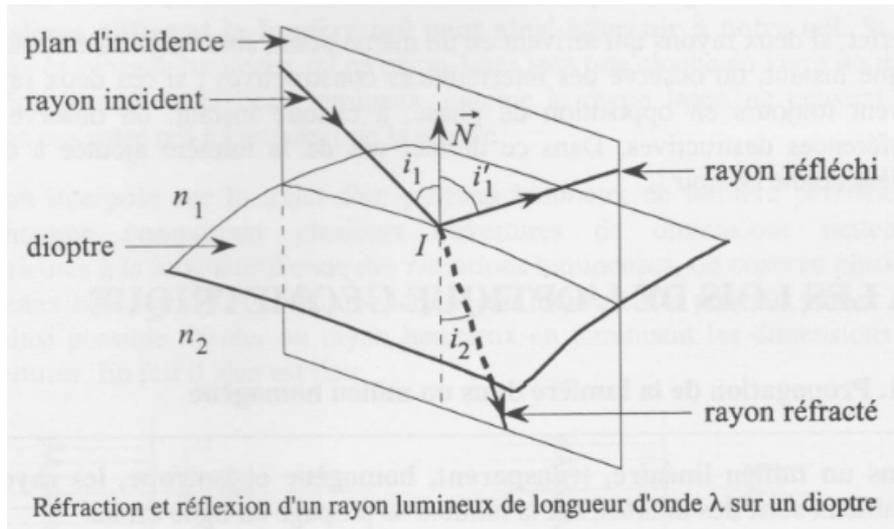
- **Dioptre** : interface de deux milieux transparents

Sur un dioptre, on vérifie les lois de Descartes :

- **Rayons coplanaires** : tous les rayons restent tous dans le plan d'incidence.

- **Réflexion achromatique avec symétrie**  $i_1 = i'_1$

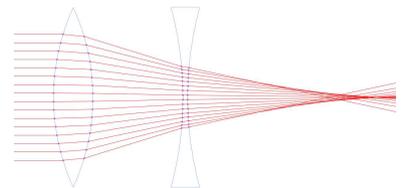
(angles comptés en valeur absolue, repérés par rapport à la **normale**)



- **Réfraction chromatique avec asymétrie** :  $n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$

l'angle réfracté dépend des indices « de réfraction »  $n(\lambda)$  donc de  $\lambda$ .

La réfraction gouverne les directions de propagation des rayons dans un système optique



Pour un rayon **sortant du milieu le plus réfringent**, avec un angle d'incidence  $i > i_{lim}$  il y a **réflexion totale** si

$$n_1 > n_2 \rightarrow \sin(i_{lim}) = \frac{n_2}{n_1}$$

Application : fonctionnement d'une fibre optique

L'angle  $i'$  de sortie du rayon réfracté dépend de  $n(\lambda)$  : un dioptre est **dispersif**.

Exemple : dans un **prisme**, le trajet des différents rayons colorés n'est pas le même.

### 4- Aspect énergétique pour un dioptre

- **Bilan de puissance** des flux optiques sur le dioptre (en W) :  $F_{incident} = F_{réfléchi} + F_{transmis}$

- **Flux optique réfléchi** :  $F_{réfléchi} = R \times F_{incident}$

avec le coefficient énergétique de réflexion  $R$  :

MAIS  $R = \dots\dots\dots$  En réflexion totale !

$R \approx \dots\dots\dots$  Pour un dioptre air / verre

avec  $n_1 = 1$  (air) et  $n_2 = 1.5$  (verre)

$$R \approx \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \text{ ou } 1$$

- **Flux optique transmis** :  $F_{transmis} = T \times F_{incident}$   
avec le coefficient énergétique de réflexion  $T$  :  
MAIS  $T = \dots$  en réflexion totale !  
 $T \approx 1 - 4\% = \dots$  pour un dioptre air / verre

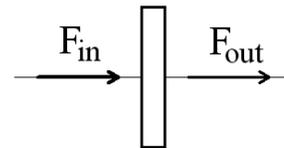
$$T = 1 - R$$

- Pour les principaux matériaux pour l'optique et l'optoélectronique, les couples (indice de réfraction  $n$ , réflectivité  $R$ ) varient typiquement de ( $n \approx 1.5$ ,  $R \approx 0.03$ ) à ( $n \approx 4$ ,  $R \approx 0.4$ )

## 5- Absorption de lumière par le milieu de propagation

### 5.1- Filtres absorbant à densité neutre

- Composant utilisé pour faire diminuer le flux  $F \downarrow$

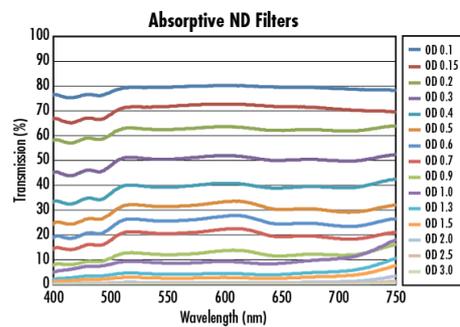


- Transmission du filtre  $A = \frac{F_{out}}{F_{in}}$

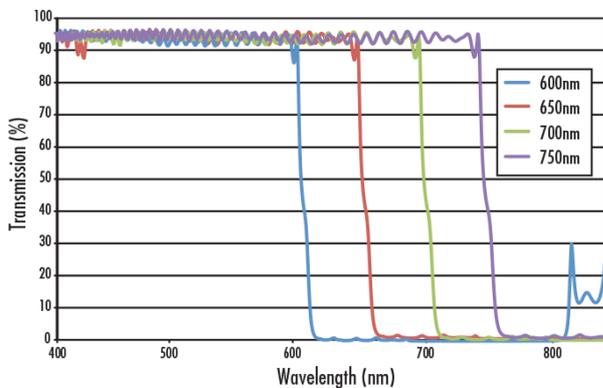
ex : si  $A = 0,1$  seul ..... du flux passe le filtre.

$A$  traduit la perte par absorption  $0 \leq A \leq 1$  matériau :  
opaque  $A = \dots$ , transparent  $A \approx \dots$

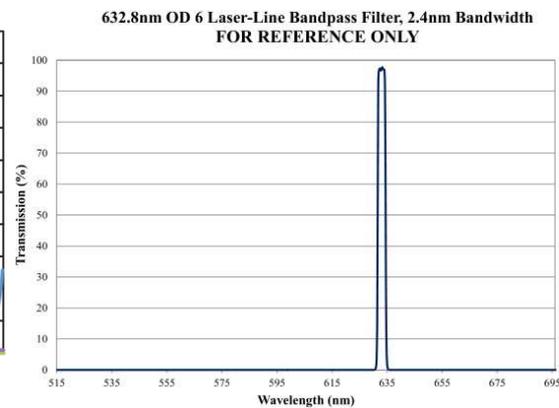
Le **filtre** est **non sélectif** car  $A$  est sensé être indépendant de la couleur  $\lambda$  (on dit «à densité neutre »)



### 5.2- Filtres absorbant sélectif (action différente selon la plage de couleur)

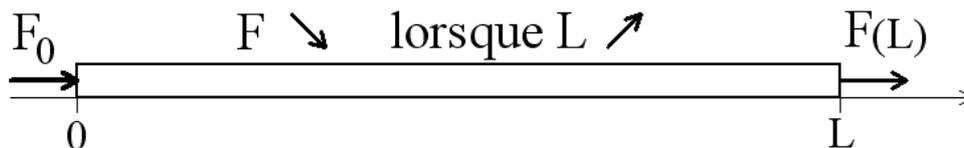


Filtre passe-bas dichroïque



Filtre passe-bande très sélectif

### 5.3- Absorption : loi de De Beer $F(L) = F_0 \exp(-\alpha(\lambda) \times L)$



- Le flux de lumière traversant un cylindre de section constante décroît exponentiellement lorsque sa longueur  $L$  augmente.

- Transmission  $A$  selon l'épaisseur (sans unité)  $A = \frac{F(L)}{F_0} = \exp(-\alpha(\lambda) \times L)$

où la longueur  $L$  est prise en m.

-  $\alpha(\lambda)$  coefficient d'absorption (en  $\text{m}^{-1}$ ) caractérise le milieu de propagation.

$$\alpha(\lambda) = \frac{A_{\text{dB.km}^{-1}}}{4340} = \frac{A_{\text{dB.m}^{-1}}}{4.340} \quad \text{atténuation linéique en dB.km}^{-1} \text{ ou dB.m}^{-1}$$

Exemple : le **minimum d'atténuation** du verre est dans l'IR à  $1.55 \mu\text{m}$

$$A_{\text{dB.km}^{-1}}(\lambda_{\text{III}} = 1,55 \mu\text{m}) \approx 0.2 \text{ dB.km}^{-1}$$

Après un trajet de 50 km dans une fibre « silice » réalisée avec ce verre, il reste 10% du flux initial :

$$A = \exp(-\alpha \times L) = \exp\left(-\frac{A_{\text{dB.km}^{-1}}}{4340} \times L\right) = \exp\left(-\frac{0.2}{4340} \times 50000\right) = 0.1 = 10\%$$

**Pour information : (notion non exigée en détail) :**

**5.4- Atténuation  $A_{\text{dB}}$  (en dB)**  $A_{\text{dB}} = -10 \log_{10}(A)$

- Une échelle logarithmique facilite l'usage des nombres très petits

$$A_{\text{dB}} = -10 \log_{10}\left(\frac{F(L)}{F_0}\right) = -10 \log_{10}(\exp(-\alpha(\lambda) \times L))$$

$$A_{\text{dB}} = -10 \frac{\ln(\exp(-\alpha(\lambda) \times L))}{\ln(10)} = \frac{10}{\ln(10)} \times \alpha(\lambda) \times L$$

- Caractérisation du matériau par l'atténuation linéique en  $\text{dB.m}^{-1}$  ou  $\text{dB.km}^{-1}$

$$A_{\text{dB.m}^{-1}} = \frac{A_{\text{dB}}}{L(\text{en m})} = \frac{10}{\ln(10)} \times \alpha(\lambda) = 4.34 \alpha(\lambda) \quad \text{ce qui justifie les affirmations du §5.3}$$

$$A_{\text{dB.km}^{-1}} = \frac{A_{\text{dB}}}{L(\text{en km})} = 4340 \alpha(\lambda)$$

$$A_{\text{dB}} = A_{\text{dB.m}^{-1}} \times L(\text{en m}) \quad \text{et} \quad A = 10^{-\frac{A_{\text{dB}}}{10}}$$

Il serait facile de confondre  $A$ ,  $A_{\text{dB}}$  et  $A_{\text{dB.m}^{-1}}$  ...

Exemple précédent de la fibre : il reste 10% du flux initial après 50 km

en effet  $A_{\text{dB}} = 0.2 \text{ dB/km} \times 50 \text{ km} = 10 \text{ dB}$  et  $A = 10^{-10/10} = 10^{-1} = 0.1 = 10\%$

Ce genre de calcul en dB est arithmétiquement plus « facile » et rapide ce qui est à l'origine de leur popularité auprès des techniciens utilisateurs (cf. électronique, acoustique etc.).

## TD C1 - Pré-requis à maîtriser pour les TD :

- ✓ Vitesse de la lumière dans un milieu  $c/n < c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$  dans le vide  
Indice de réfraction dans le visible  $n(\lambda) = A + B/\lambda^2 \rightarrow$  milieu dispersif  
 $n = 1$  vide,  $n \approx 1$  air,  $n \approx 1.33$  eau,  $1 < n < 4$  pour les matériaux transparents dans le visible
- ✓ Sur un dioptre (interface de deux milieux transparents), on vérifie les lois de Descartes :
  - **Rayons coplanaires** : tous les rayons restent tous dans le plan d'incidence.
  - **Réflexion achromatique avec symétrie  $i_1 = i'_1$**   
(angles comptés en valeur absolue, repérés par rapport à la **normale**)
  - **Réfraction chromatique avec asymétrie :  $n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$**   
l'angle réfracté dépend des indices « de réfraction »  $n(\lambda)$  donc de  $\lambda$ .
  - Pour un rayon **sortant du milieu le plus réfringent** ( $n_1 > n_2$ ) il y a **réflexion totale** pour un angle d'incidence  $i > i_{\text{limite}} = \arcsin(n_2 / n_1)$
- ✓ **Flux optique réfléchi** :  $F_{\text{réfléchi}} = R \times F_{\text{incident}}$  avec  $R \approx \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$  ou 1 si réflexion totale  
**Flux optique transmis** :  $F_{\text{transmis}} = T \times F_{\text{incident}}$  avec  $T = 1 - R$   
Exemple : dioptre Air/Verre  $n=1.5$  :  $R = 4\%$ ,  $T = 96\%$
- ✓ Perte par absorption (loi de De Beer) : transmission  $A = \frac{F(L)}{F_0} = \exp(-\alpha(\lambda) \times L)$   
avec  $\alpha(\lambda)$  coefficient d'absorption (en  $\text{m}^{-1}$ ) qui caractérise le milieu de propagation et  
$$\alpha(\lambda) = \frac{A_{\text{dB.km}^{-1}}}{4340} = \frac{A_{\text{dB.m}^{-1}}}{4.340} \quad \text{atténuation linéique en dB.km}^{-1} \text{ ou dB.m}^{-1}$$

## Pré-TD 1- Exercices personnels à faire avant TD (applications directes du Cours)

- Q1.0.1** : Un rayon incident avec  $i = 25^\circ$  sort d'un milieu d'indice 1,33 et entre dans du verre d'indice 1,6. Calculer l'angle de réfraction.
- Q1.0.2** : Un rayon incident visible avec  $i = 45^\circ$  quitte l'air et se réfracte avec un angle  $i' = 5.8^\circ$  dans un matériau d'indice  $n'$ . Calculer  $n'$ . Est-ce plausible ?
- Q1.0.3** : En supposant que  $n_1 > n_2$  et que  $i_2 = \pi/2$ , montrer que l'on a  $i_{\text{limite}} = \arcsin(n_2 / n_1)$   
Calculer alors l'angle limite de réflexion totale entre l'air et l'eau.
- Q1.0.4** : Une lentille est faite d'un verre d'indice 1,7 et d'atténuation linéique  $20 \text{ dB.km}^{-1}$ . Son épaisseur au centre est 15 mm. Calculer T le coefficient énergétique de transmission pour une de ses faces puis la transmission A due à l'absorption par le verre. Quel % de flux reste-t-il à un faisceau de lumière ayant traversé cette lentille ?
- Q1.0.5- Technologie** : Qu'est-ce qu'un verre photochromique ? Quel est son usage usuel ?

### Résultats :

- Q1.0.1** :  $20,57^\circ$     **Q1.0.2** :  $n' = 7$  ; non.    **Q1.0.3** :  $i_{\text{lim}} = \sin^{-1}(1/1.33) = 48.8^\circ$   
**Q1.0.4** :  $R = 0,067$  donc  $T = 0,933$  ;  $A \approx 0,999993$ . Il reste environ 87% de flux

## TD 1.1 - Utilisation d'un prisme ayant un angle droit

- Q1.1.1** - Calculer l'angle limite d'incidence dans le cas de l'air et d'un verre d'indice 1,5.  
**Q1.1.2** - Un petit prisme de ce verre, isocèle et d'angle au sommet  $45^\circ$  est schématisé en coupe. Représenter sur la figure le trajet d'un faisceau d'incidence normale à la face d'entrée

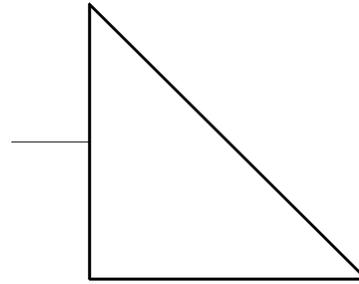
(la face d'entrée est la face verticale sur la figure, celle où arrive le rayon normal initial qui est tracé). Justifier brièvement.

**Q1.1.3** - Calculer les coefficients de réflexion et de transmission énergétique  $R$  et  $T$  pour un dioptre air-verre.

**Q1.1.4** - En incidence normale, quel faisceau de sortie est-il le plus lumineux ? Quel est le rôle du prisme ? Evaluer le flux du faisceau « utile » pour un flux initial incident de  $0.03 \text{ W}$ .

d'après DS1 2011

Prisme vu en coupe

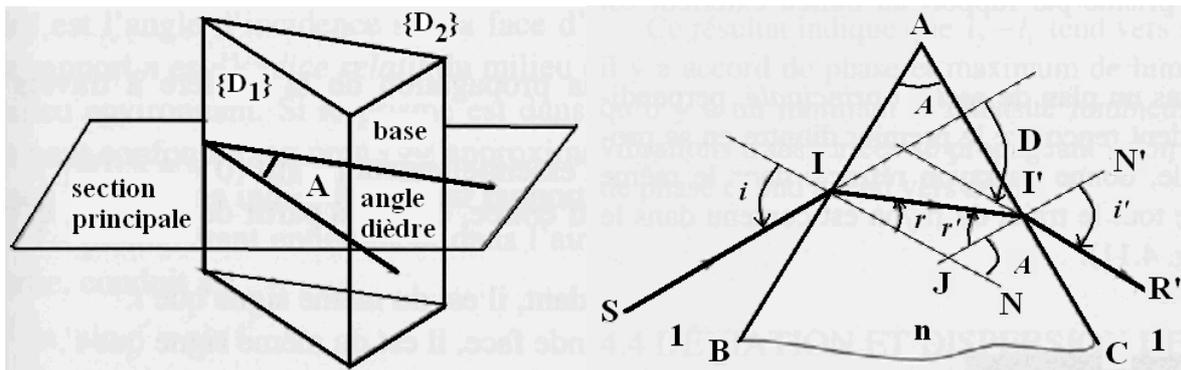


## TD 1.2 - Déviation et dispersion par un prisme isocèle

**Q1.2.1** - L'indice de réfraction du verre d'un prisme est calculable par son modèle de Cauchy  $n = A + B/\lambda^2$  où  $\lambda$  est pris en nm,  $A = 1,5909$  et  $B = 9731,0 \text{ nm}^2$ .

Calculer les indices  $n_C$  et  $n_F$  correspondant à deux raies d'émission d'une lampe spectrale « Hydrogène » dont les longueurs d'onde sont  $\lambda_C = 656,3 \text{ nm}$  et  $\lambda_F = 486,1 \text{ nm}$ .

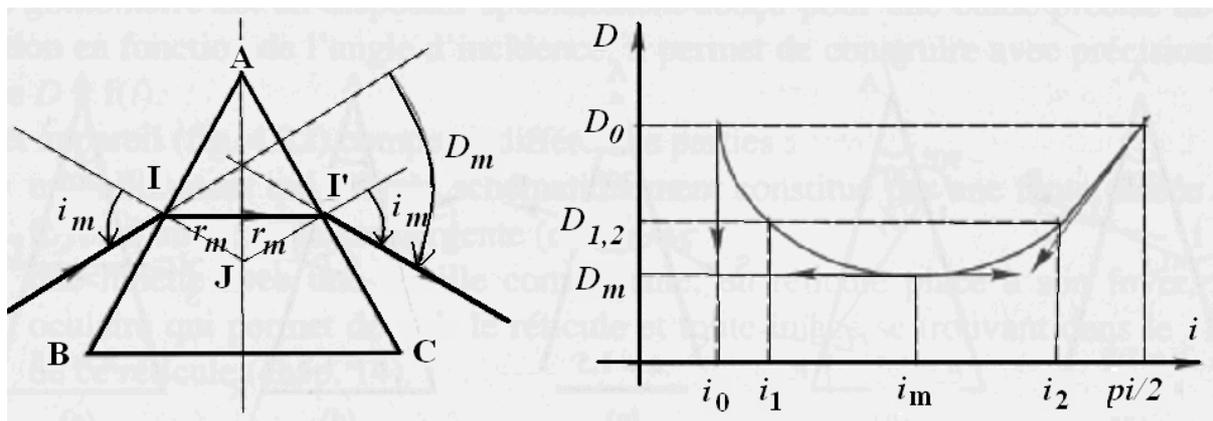
**Q1.2.2** - Ecrire les quatre équations du prisme exprimant les lois de Descartes, la somme des angles d'un triangle et la déviation. En déduire les expressions simplifiées de l'angle au sommet  $A$  et de la déviation  $D$ .



**Q1.2.3** - Un prisme d'angle au sommet  $A = 59,95^\circ$  est éclairé par un faisceau parallèle sous incidence  $i = 50,00^\circ$ , calculer la déviation  $D$  pour ces deux raies rouge et bleue. Commenter.

**Q1.2.4** - Trouver l'expression de la déviation minimale en fonction de l'indice  $n$  sachant que dans cette configuration le tracé des rayons est symétrique. Soit  $D_m = f(n)$  et  $n = g(D_m)$ .

Calculer le minimum de déviation pour les deux longueurs d'onde  $\lambda_C$  et  $\lambda_F$ .



## TD 1.3 - Propriétés d'une fibre optique plastique PMMA

Une fibre optique plastique à saut d'indice est composée d'un cœur cylindrique d'indice  $n_1 = 1,50$  entouré d'une gaine optique d'indice  $n_2 = 1,45$ .

Une couche de protection opaque recouvre la fibre optique proprement dite.

L'ouverture numérique (NA = Numerical Aperture) de la fibre est  $NA = \sin(i_0)$ , où  $i_0$  est l'angle d'incidence sur la face d'entrée correspondant à la réfraction limite en J.

Les angles  $i$  et  $i'$  sont comptés par rapport à l'axe de la fibre optique. Les angles  $j$  sont comptés par rapport à la normale tracée.



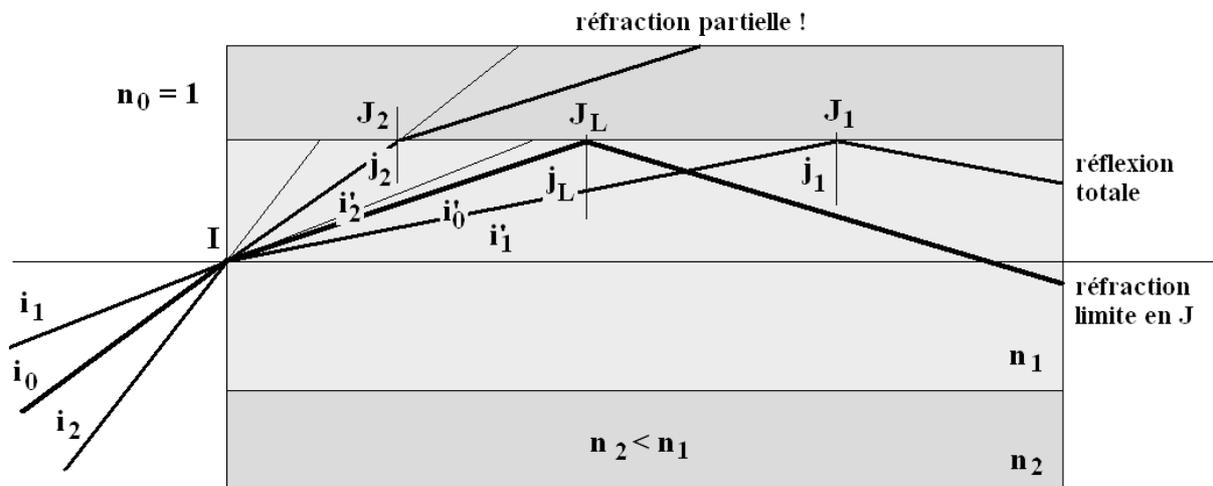
fibre optique  
à saut d'indice

**Q1.3.1** - Exprimer l'angle limite  $j_L$  en fonction des indices de la fibre. Calculer  $j_L$  pour cette fibre.

**Q1.3.2** - En déduire une expression pour  $i'_0$  puis que  $NA = \sin(i_0) = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

Calculer NA et  $i_0$  pour cette fibre, la face avant étant dans l'air  $n_0 = 1$

**Q1.3.3** - Etudier la propagation de 2 rayons particuliers pénétrant dans la fibre au point I et dont les incidences seront  $i_1 = 20^\circ$  et  $i_2 = 30^\circ$ . Dans quel cas aura-t-on propagation sans pertes dans la fibre ? Justifier la réponse en montrant comment se propagent les rayons lumineux.



**Q1.3.4** - Représenter en perspective le cône d'acceptance (de demi-angle au sommet  $i_0$ ), vu de la face d'entrée, dans lequel doivent se présenter tous les rayons incidents utiles. L'angle solide  $\Omega_a = 2\pi(1 - \cos i_0)$  estime l'ouverture de ce cône. Calculer  $\Omega_a$  en stéradian (sr), puis comme une fraction de celui correspondant au demi-espace devant la fibre (rappel : angle solide  $\Omega_{1/2 \text{ espace}} = 2\pi = 6.28 \text{ sr}$ ).

**Q1.3.5** - La fibre optique a une longueur  $L_{\min} = 10 \text{ m}$  le long de son axe. Exprimer la longueur maximale  $L_{\max}$  parcourue dans cette fibre par une lumière en fonction de  $L_{\min}$  et  $\cos i'_0$ . Calculer  $L_{\max}$ .

**Q1.3.6** - Calculer le décalage temporel entre des lumières ayant suivi les trajets  $L_{\min}$  et  $L_{\max}$ . Quelle est conséquence pratique en termes de débit d'information numérique par cette fibre ?

(on transmet au départ des impulsions numériques à front très raide)

**Q1.3.7** - Calculer le coefficient de transmission énergétique  $T$  pour les faces d'entrée et de sortie de la fibre.

**Q1.3.8** - Le plastique PMMA a une atténuation linéique  $A_{dB} = 150 \text{ dB.km}^{-1}$  dans le rouge. Calculer la transmission  $A$  de la fibre pour des angles d'incidence  $i = 0$  (soit  $L_{min}$ ) et  $i = i_0$  (soit  $L_{max}$ ).

**Q1.3.9** – On éclaire la face avant avec un laser rouge. Le flux est de 3 mW dans le cône d'acceptance. Estimer le flux en sortie de la fibre.

## Pré-DS1

Exercices complémentaires à chercher en préparation du DS.

☺ Solutions disponibles sur le site [mpsn.free.fr](http://mpsn.free.fr) mais à ne consulter qu'après avoir cherché.

### DS1.1- Question complémentaire pour le TD1.1 :-

Le faisceau incident reste encore dans le plan de figure mais fait un angle de  $10^\circ$  avec la normale à la face d'entrée. Parmi les deux cas possibles, représenter sur la figure mais avec une autre couleur, le trajet des rayons **uniquement pour le cas** où il y a réflexion totale sur la face oblique. En raisonnant par symétrie, quel est alors l'angle entre le faisceau de sortie « utile » et la normale à la face de sortie ?

### DS1.2- Quelques questions autour de lames de verre à faces parallèles

**DS1.2.1-** Représenter une lame à face parallèle d'épaisseur  $e$  et d'indice  $n = 1.5$ , entourée d'air sur ses deux faces. Un rayon incident fait  $45^\circ$  compté par rapport à la normale à la face. Représenter à peu près à l'échelle les trois premiers rayons réfléchis par la lame et les trois premiers réfractés à travers la lame. Combien y aurait-il a priori de rayons réfléchis et réfractés ?

**DS1.2.2-** Y a-t-il un risque de réflexion totale dans cette situation ?

**DS1.2.3-** Calculer les coefficients énergétiques  $R$  et  $T$  pour cette lame. On néglige l'absorption par le verre. Calculer ensuite le % de flux portés chacun des rayons réfléchis et réfractés tracés, pourvu qu'il soit supérieur à  $1/1000$  du flux initial. Commenter le nombre de rayons visualisables expérimentalement à l'extérieur de la lame.

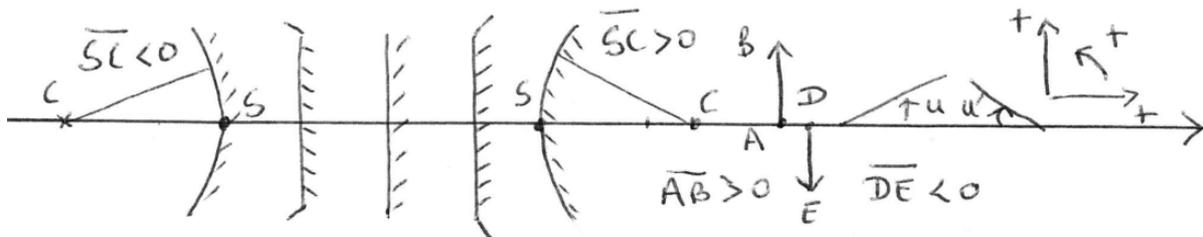
**DS1.2.4-** On dispose de plusieurs lames de verre d'indices différents, à faces parallèles, que l'on empile. La pile est entourée d'air sur ses deux faces extérieures. Quelle propriété présenteront les rayons incident et émergents ? Sous quelle condition ?

# C2 - Formation et caractérisation des images

## Utilisation de miroirs

### TD C2 - Pré-requis à maîtriser pour les TD : miroirs

- ✓ CONVENTIONS de SIGNES : axe horizontal orienté à droite, axe vertical orienté vers le haut, angle orienté selon le sens trigonométrique.



- ✓ Représentations réalistes et conventionnelles des miroirs sphériques et plan  
**convexe** de rayon de courbure  $R = \overline{SC} > 0$  « en bosse » (C après S)  
**concave** de rayon de courbure  $-R = \overline{SC} < 0$  « en creux » (C avant S)

**Conditions de Gauss :** utiliser des rayons proches de l'axe optique et peu inclinés sur l'axe (angle des rayons avec l'axe très petits)

- **stigmatisme approché** (stigmatisme  $\approx$  « l'image d'un point est un point »)
- **aplanétisme approché** (aplanétisme  $\approx$  « l'image d'un plan est un plan »)

- ✓ A et A' sont « conjugués »  $\rightarrow A' \approx$  image de A et  $A \approx$  objet de A'

### Réel et virtuel : cas des MIROIRS en général

- ✓ Dans le demi-espace en avant d'un miroir, les rayons de lumière sont bien réels  
 En avant du miroir, les **rayons incidents** viennent d'un **objet A réel**  $\overline{SA} < 0$  ;  
 les **rayons émergents** convergeront en avant sur une **image A' réelle**  $\overline{SA'} < 0$ .
- ✓ Un objet placé derrière un miroir est virtuel  $\overline{SA} > 0$  : les **rayons incidents** semblent issus de A.  
 L'image virtuelle A' est derrière le miroir  $\overline{SA'} > 0$ , les **rayons émergents** semblent issus de A'.

### Relations pour les MIROIRS SPHERIQUES (et miroir plan)

- ✓ **Relation de conjugaison des miroirs sphériques :** 
$$\frac{1}{SA'} + \frac{1}{SA} = \frac{2}{SC} = V = \frac{1}{f'}$$

V vergence (en  $m^{-1}$  ou dioptrie  $\delta$ ) ;

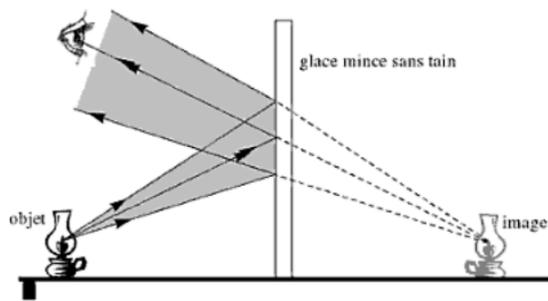
$$f = f' = \frac{\overline{SC}}{2} \text{ distance focale du miroir}$$

#### **Grandissement transversal**

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = -\frac{\overline{SA'}}{\overline{SA}} \quad \begin{array}{l} \gamma > 0 \text{ image « droite »} \quad \gamma < 0 \text{ image « renversée »} \\ |\gamma| > 1 \text{ image agrandie} \quad |\gamma| < 1 \text{ image diminuée} \end{array}$$

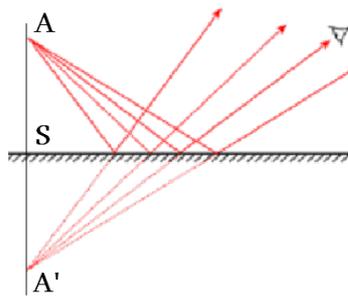
$$\text{Grandissement angulaire} \quad G = \frac{u'}{u} = \frac{\overline{SA}}{\overline{SA'}} ; \text{ on a aussi } \gamma G = -1$$

- ✓ **Cas particulier du Miroir plan**  $\overline{SA'} = -\overline{SA}$  et  $\gamma = 1$  (on fait  $R \rightarrow +\infty$ )

**Tracés pour les MIROIRS PLANS**

Repliement du  $\frac{1}{2}$  espace image  
sur le  $\frac{1}{2}$  espace objet

Dioptré : tout se passe comme si  $n' = -n$



Objet réel A  $\rightarrow$  Image virtuelle A'  
symétrique par rapport au plan

$$n \sin i = n' \sin i' \text{ et } n' = -n \\ \rightarrow i = i' \text{ (loi de Descartes pour la réflexion)}$$

**Tracés pour les MIROIRS SPHERIQUES**

Les tracés exploitent les propriétés suivantes : soient trois rayons particuliers

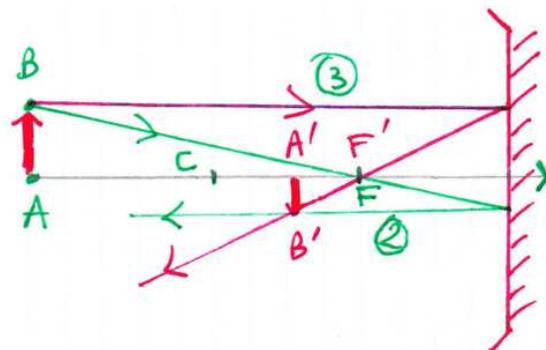
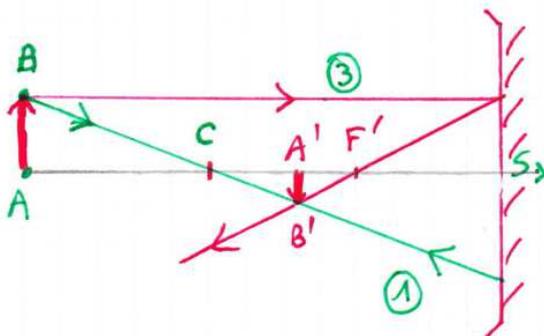
**1- Un rayon passant par le centre C se réfléchit sur lui-même** (tangente au cercle perpendiculaire au rayon)

**2- Le foyer objet F est situé à mi-distance entre le sommet S et le centre C** ( $f = f' = \frac{SC}{2}$ )

L'image du foyer est située à l'infini objet : **le rayon émergent issu de F est horizontal**

**3- Le foyer image F' est confondu avec le foyer objet F** ( $f = f' = \frac{SC}{2}$ )

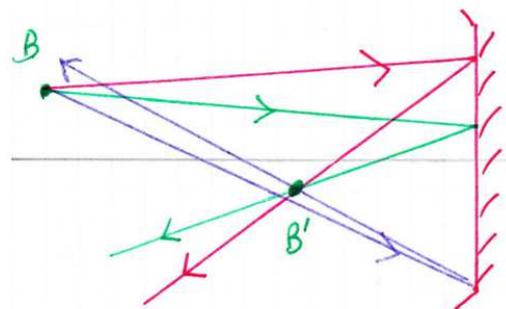
Un objet situé à l'infini objet à son image au foyer image F' : **un rayon incident horizontal émerge en passant par F'**



- **Seuls les rayons particuliers** permettent de tracer le point image B' image du point objet B  
Le point B' est au croisement de 2 parmi les 3 rayons particuliers.

- **Une fois le point B' connu**, on pourra tracer n'importe quel rayon issu de B qui émergera alors en passant par 'image B'.

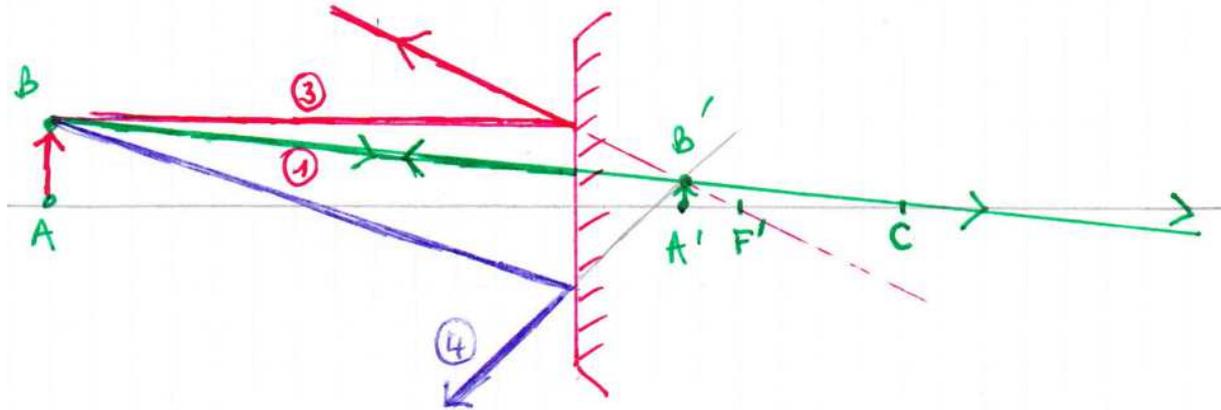
- L'ensemble des rayons issus de B incident sur le miroir forme le faisceau incident. L'ensemble des rayons réfléchis forme le faisceau émergent (ici convergent puis divergent après B')



Le procédé est similaire pour un miroir convexe, mais C est derrière le miroir.

La position du point image B' est tracée ici avec les deux rayons particuliers 1 et 3.

On ne pourra tracer le rayon 4 que lorsque B' aura été correctement placé.



### Remarques :

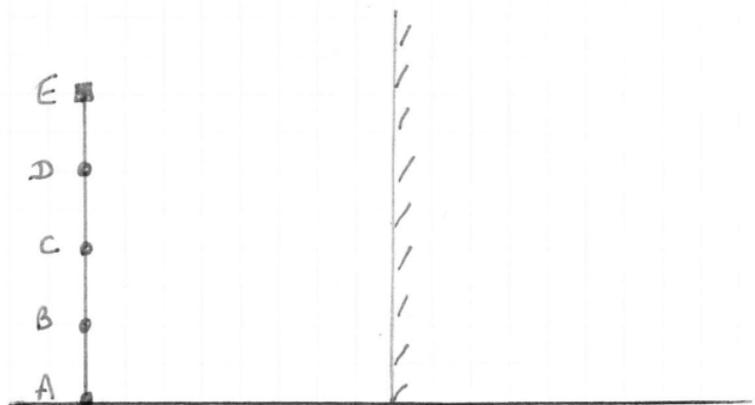
- Dans le principe, une grande figure très bien réalisée (appelée « épure ») permet de mesurer la position et la taille de l'image.
- Le tracé dans les conditions de Gauss (« près de l'axe ») implique de tracer avec une échelle dilatée dans le plan perpendiculaire (sinon on n'y voit rien !)
- **Privilégier les calculs.** Les tracés viennent vérifier les calculs.
- Les calculs permettent de positionner les points sur l'axe.
- Les tracés ne fonctionnent que pour des points objets situés hors de l'axe (vrais triangles)
- L'image A'B' d'un petit objet AB situé dans le plan perpendiculaire à l'axe en A s'identifie par **aplanétisme** dans le plan perpendiculaire à l'axe en A'

## Pré-TD 2- Exercices personnels à faire avant TD (applications directes du Cours)

**Q2.0.1-** Un capteur d'image est placé en E, des LED brillantes sont positionnées aux points A, B, C et D

Placer a priori les points images A', B', C', D' conjugués des points objets. Vérifier que les rayons issus des LED, vu par E après réflexion par le miroir vérifient aussi la loi de Descartes.

Les points images sont-ils réels ou virtuels ?



**Q2.0.2-** Une personne est située à 5 m d'un miroir sphérique concave de rayon  $R = 1$  m. Caractériser l'image qu'elle voit d'elle-même (position, image réelle-virtuelle, grandissement transversal puis la taille et l'orientation).

[objet « réel »  $\overline{SA} < 0$  ou  $> 0$  ? , miroir concave  $\overline{SC} = +R$  ou  $-R$  ? , signe  $\overline{SA'}$  ?]

**Q2.0.3-** Même question pour un miroir sphérique convexe similaire.

**Q2.0.4-** Identifier la nature des miroirs sur les deux photos.



Miroir A



Miroir B

**Q2.0.5- Technologie :** Qu'est-ce qu'un DMD (Digital Micromirror Device by Texas Instrument)? Dans quelle application technologique récente est-il indispensable? (brève recherche sur mots-clé : DMD TI, DLP ou sur You Tube)

**Résultats :**

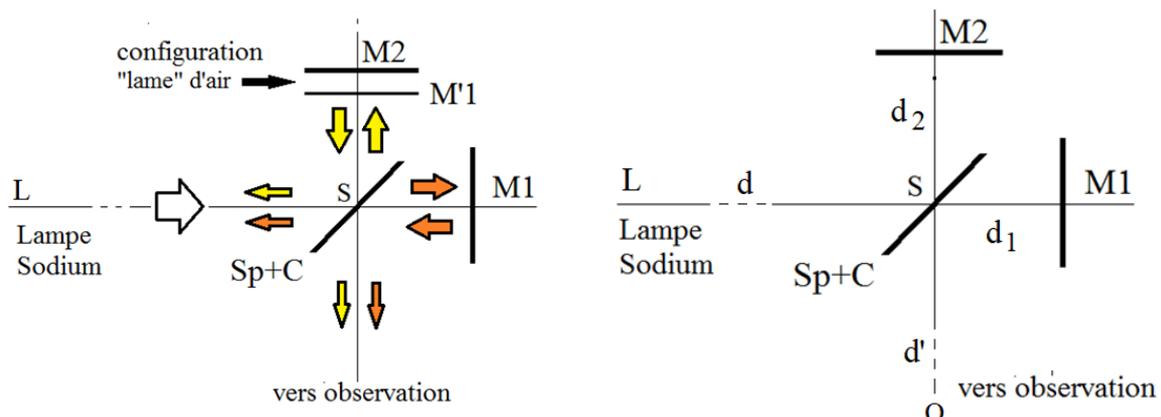
**Q2.0.1-** voir après TD2.5 **Q2.0.2-**  $\overline{SA'} = -0.55\text{m}$ , image réelle car avant miroir,  $\gamma = -0.11$  image inversée et diminuée. **Q2.0.3-**  $\overline{SA'} = +0.455\text{m}$  image virtuelle car après miroir,  $\gamma = +0.091$  image droite et diminuée. **Q2.0.4-** miroir A convexe (cf : cas 3), miroir B concave (cf. cas 2). **Q2.0.5-** Voir le document pdf de correction détaillée en ligne.

## TD 2.1- Miroirs d'un interféromètre de Michelson

Un interféromètre de Michelson est un dispositif destiné à produire pour l'observateur deux faisceaux de lumière à partir d'une seule lampe.

La configuration exploite une lame « séparatrice » orientée à  $45^\circ$  à réflexion partielle 50-50, deux miroirs parfaits M1 et M2, orientables finement. La position de M1 est réglable à  $5 \mu\text{m}$  près. En superposant les deux faisceaux, le réglage des miroirs permettra la réalisation d'interférences par une « lame d'air », exploitables pour des mesures de précision.

Données :  $d \approx 1.40\text{m}$ ,  $d' \approx 0.80$ ,  $d_1 = 24,125 \text{ mm}$  et  $d_2 = 28,150 \text{ mm}$





## TD 2.3- Images par un miroir convexe

**Q2.3-** Montrer que l'image d'un objet réel par un miroir convexe est systématiquement virtuelle, droite et diminuée.

## TD 2.4- Caractériser un miroir primaire de télescope

**Q2.4.1-** Prouver que le miroir primaire d'un télescope est concave.



vue de loin ( $L > R$ )  
l'image est renversée



mais vu de près ( $L < R/2$ )  
l'image est droite !

Le miroir primaire de ce télescope est donc a priori concave, avec  $-R = \overline{SC} < 0$

**Q2.4.2-** On suppose que l'objet est réel en posant  $\overline{SA} = -a$  avec  $a > 0$ .

Exprimer la position de l'image  $\overline{SA'}$  et le grandissement  $\mathcal{Y}$  en fonction de  $R$  et de  $a$

**Q2.4.3-** On se tient près du miroir, par exemple  $\overline{SA} = -0.4 R$ . Montrer que l'image est virtuelle, droite et agrandie.

**Q2.4.4-** On se tient plus loin du miroir, par exemple  $\overline{SA} = -0.8 R$  ou  $-1.2 R$ . montrer que les images sont réelles, renversées. L'une est diminuée, l'autre agrandie.

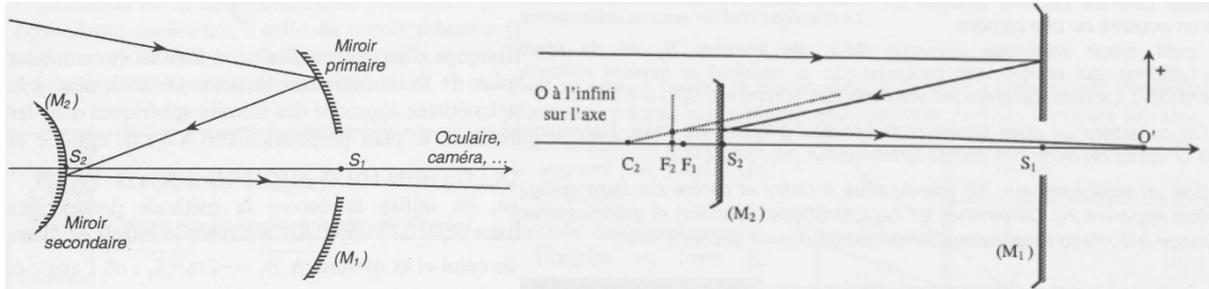
On fera au choix le calcul pour l'un et le tracé pour l'autre cas.

**Q2.4.5-** A quelle condition l'image sera réelle, renversée mais de même dimension que l'objet ? Quel est l'intérêt pratique ?

Cette méthode de mesure s'appelle « autocollimation ».

## TD 2.5- Modèle pour le télescope spatial Hubble

- mise en œuvre 04/1990 (d'après Wikipedia)
- masse  $\approx 11\,000$  kg, longueur 13,2 m, diamètre max 2,4 m, coût global  $\approx 1$  milliard de \$.
- télescope réflecteur à deux miroirs : diamètre du miroir primaire 2,4 m pour un coût de 350 millions de \$



Caractéristiques des miroirs sphériques équivalents :

- Miroir primaire  $M_1$  : sommet  $S_1$ , rayon  $R_1 = 11.025$  m et diamètre  $D_1 = 2.40$  m
- Miroir secondaire  $M_2$  : sommet  $S_2$ , rayon  $R_2 = 1.355$  m
- Distance entre les deux sommets des miroirs  $S_1 S_2 = 4.90$  m
- L'étoile à observer est située à l'infini. Le point « objet » situé sur l'axe optique est noté  $O$
- L'image de ce point  $O$  par le miroir  $M_1$  est notée  $O_i$  ( $O \equiv O_1$ )
- $O_i$  est une image intermédiaire qui sert d'objet pour le second miroir ( $O_i \equiv O'_1 \equiv O_2$ )
- L'image de  $O_i$  par le miroir  $M_2$  est située en  $O'$  : c'est l'image finale de l'étoile ( $O' \equiv O'_2$ )

Position de l'image de l'objet observé  $O'$

**Q2.5.1-** En raisonnant sur le miroir  $M_1$ , identifier la position de l'image intermédiaire  $O_i$ .

Calculer  $O_i S_1$  en fonction de  $R_1$  puis numériquement. Préciser la nature réelle ou virtuelle de cette image intermédiaire.

**Q2.5.2-** Calculer la position intermédiaire  $S_2 O_i$  par rapport au sommet  $S_2$  du second miroir. Est-il en avant ou en arrière de  $M_2$ ? Cet objet sera-t-il réel ou virtuel du point de vue de  $M_2$ ?

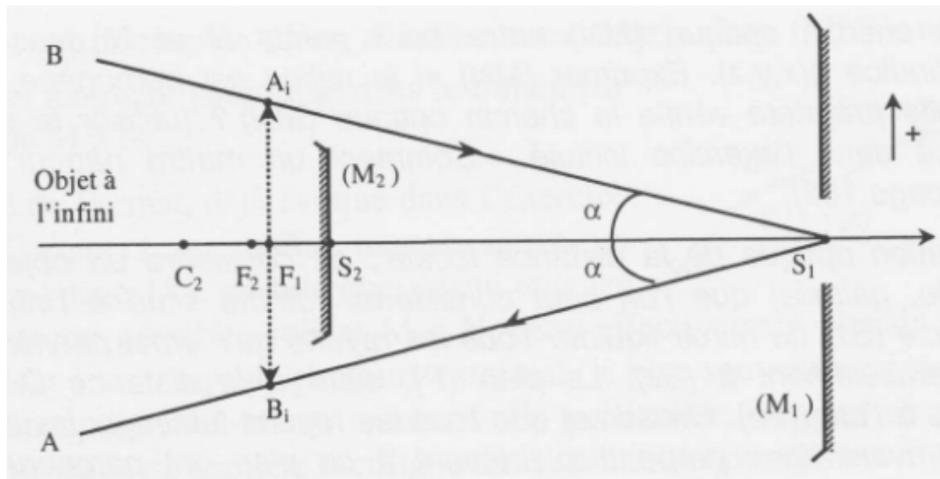
**Q2.5.3-** Déterminer la position de l'image finale  $O'$  par rapport au sommet  $S_2$ . Préciser la nature réelle ou virtuelle de cette image finale.

Où doit être positionné le capteur d'image par rapport au sommet  $S_1$ ?

Taille de l'image d'un objet à l'infini de diamètre angulaire  $\alpha$

L'objet astronomique observé paraît évidemment très petit. Il est vu comme un disque situé à l'infini. Soit  $A$  et  $B$  les points extrêmes situés sur un diamètre vertical.

On ne peut mesurer a priori la taille métrique de cet objet si on n'en connaît pas la distance, car la seule grandeur géométrique mesurable depuis la Terre est son « diamètre angulaire » (l'angle  $2\alpha$  sous lequel on voit le disque - conventionnellement depuis le sommet du miroir primaire).



**Q2.5.4-** L'étoile observée a un rayon angulaire  $\alpha = 1''$  (1'' seconde d'arc est  $1/60^{\text{ième}}$  de minute, soit  $1/3600^{\text{ième}}$  de degré). Calculer  $\alpha$  en radian.

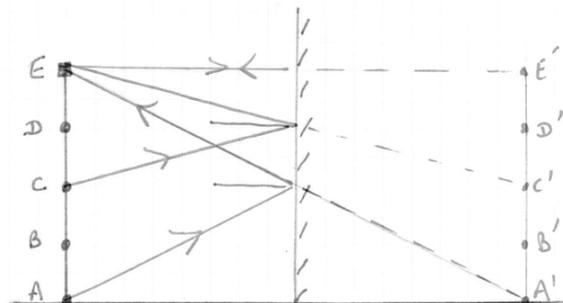
**Q2.5.5-** L'objet AB situé à l'infini forme une image intermédiaire  $A_iB_i$  située par aplanétisme dans le plan perpendiculaire à l'axe passant par  $O_i$ .

Déterminer la taille  $A_i B_i$  en fonction de  $\alpha$  et  $R_1$

**Q2.5.6-** L'image finale  $A'B'$  est située dans le plan perpendiculaire à  $O'$ . Calculer le grandissement transversal par le miroir M2 puis la taille de cette image finale. Cette image est-elle droite ou renversée ?

**Résultats :**

**Q2.0.1-**



## Pré-DS2

Exercices complémentaires à chercher en préparation du DS.

☺ Solutions disponibles sur le site [mpsn.free.fr](http://mpsn.free.fr) mais à ne consulter qu'après avoir cherché.

### Dimension d'un miroir plan

Une personne de hauteur 1,80 m se regarde dans un miroir plan. Les yeux sont à 10 cm du sommet de la tête.

**DS2.1.1-** Quelles doivent être la dimension minimale du miroir en hauteur et sa distance au sol pour que l'observateur se voit tout entier ?

**DS2.1.2-** Pour le miroir précédent et son positionnement, qu'en est-il pour un enfant de 1.20 m ?

**Conseil :** tracer une figure inspirée de Q2.0.1- mais réaliser l'analyse et les calculs de géométrie du plan pour une distance  $d$  quelconque entre la personne et le miroir. On pourra d'ailleurs montrer que les résultats ne dépendent pas de la valeur numérique de  $d$ .

### Finir le TD sur Hubble s'il n'a pas été fini en séance

#### Utilisation d'un miroir sphérique concave avec l'objet placé entre S et F

**DS2.2.1-** Montrer graphiquement sur un exemple que l'image est virtuelle et droite.

**DS2.2.2-** Retrouver ces deux résultats en exploitant les équations du miroir.

**DS2.2.3-** Eliminer la position de l'image  $\overline{SA'}$  dans l'équation de conjugaison du miroir afin d'obtenir une expression entre  $\overline{SA}$ ,  $R$  et le grandissement transversal  $\gamma$

**DS2.2.4-** En déduire une expression de  $R$  en fonction de  $\overline{SA}$  et de  $\gamma$ .

On veut un grandissement de 5 pour un visage à 20 cm du miroir. Quel doit-être le rayon du miroir ? Où sera située l'image ?

**DS2.2.5-** En déduire une expression de  $\gamma$  en fonction de  $R$  et  $\overline{SA}$ .

Pour un visage à 20 cm d'un miroir de rayon 50 cm, quel sera le grandissement ? Où sera alors située l'image ?

**DS2.2.6-** Montrer enfin que, dans cette configuration, l'image est systématiquement agrandie (en plus d'être virtuelle et droite)

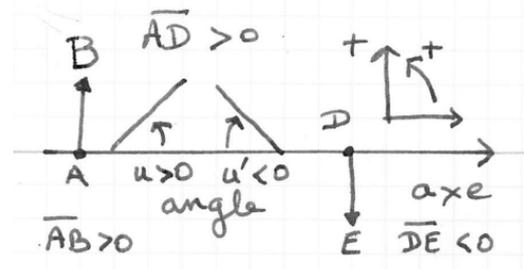


# C3 -Formation et caractérisation des images

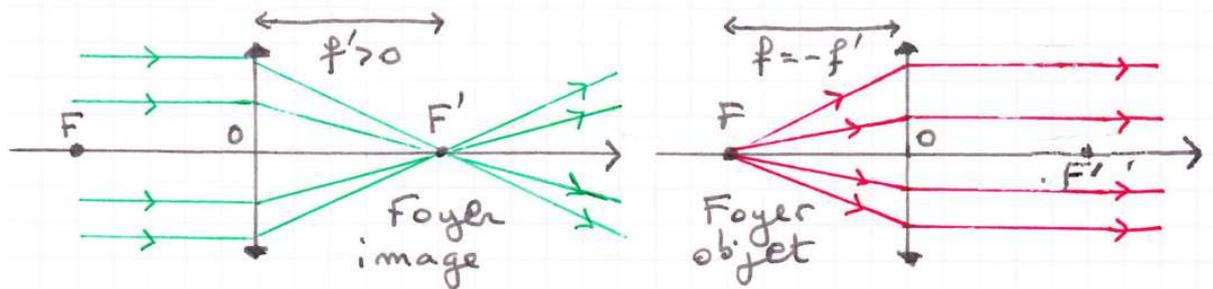
## Utilisation de lentilles

### TD C3 - Pré-requis à maîtriser pour les TD : lentilles

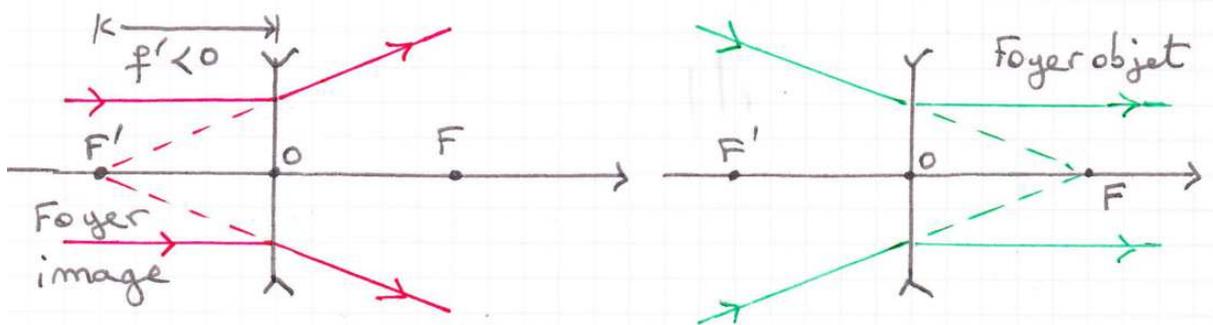
- ✓ CONVENTIONS de SIGNES : axe horizontal orienté à droite, axe vertical orienté vers le haut, angle orienté selon le sens trigonométrique.



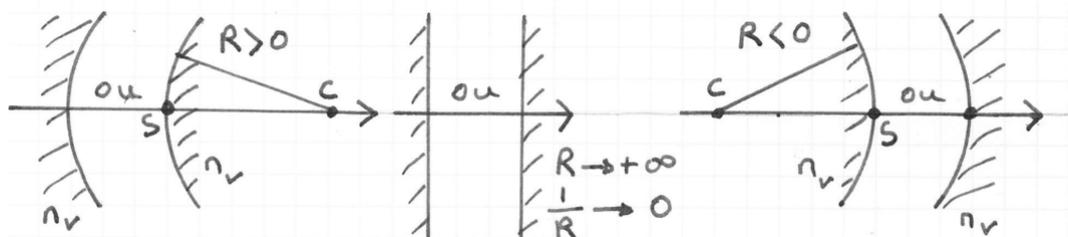
- ✓ **Lentille convergente :**  
 $f' > 0$  distance focale image  
 avec  $f' = \overline{SF'} = -\overline{SF} = -f$   
**F' foyer image :** après la lentille convergente,  
**F foyer objet :** avant la lentille (position symétrique)



- ✓ **Lentille divergente :  $f' < 0$**       **Attention :** F' avant la lentille divergente, F après

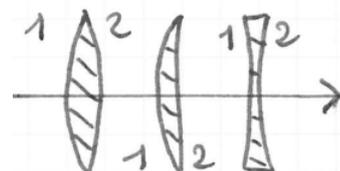


- ✓ Rayon de courbure de la face  $R = \overline{SC}$  (R grandeur algébrique  $> 0$  ou  $< 0$ )

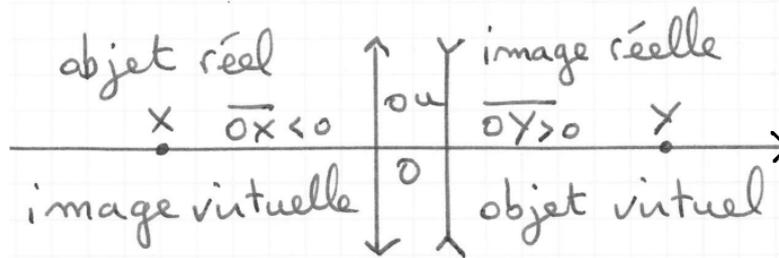


- ✓ **Formule des lunetiers** (lentilles minces)

pour prédire  $f'$  : 
$$\frac{1}{f'} = V = (n_v - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$



✓ **Réel et virtuel pour le cas des lentilles**



**Relations pour une LENTILLE mince**

**Conditions de Gauss :** utiliser des rayons proches de l'axe optique et peu inclinés sur l'axe (angle des rayons avec l'axe très petits)

→ **stigmatisme approché** (stigmatisme  $\approx$  « l'image d'un point est un point »)

→ **aplanétisme approché** (aplanétisme  $\approx$  « l'image d'un plan est un plan »)

✓ A et A' sont « conjugués » → A'  $\approx$  image de A et A  $\approx$  objet de A'

✓ **Relation de conjugaison**  $\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'}$

V « vergence » ou « puissance » (dioptrie  $\delta \approx m^{-1}$ ) et distance focale image  $f' = -f$

✓ **Grandissement transversal**

$\gamma > 0$  image « droite »

$\gamma < 0$  image « renversée »

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$

$|\gamma| > 1$  image agrandie  $|\gamma| < 1$  image diminuée

✓ **Grandissement angulaire**  $G = \frac{u'}{u} = \frac{\overline{OA}}{\overline{OA'}}$  ; on a aussi  $\gamma G = -+1$

**Système de deux lentilles minces (« doublet »)**

- Pour deux lentilles **non accolées** dont les sommets sont séparés de la distance d, on a  $V_{eq} = V_1 + V_2 - d \times V_1 V_2$  (formule de Gullstrand)

- Pour deux lentilles minces **accolées**,  $d = 0$  :  $V_{eq} = V_1 + V_2$  soit  $\frac{1}{f_{eq}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$

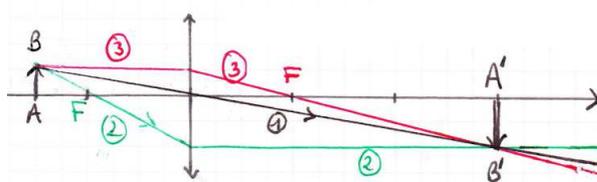
**Tracés pour les LENTILLES MINCES**

Les tracés exploitent les propriétés suivantes : soient trois rayons particuliers

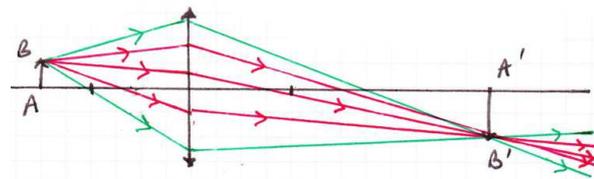
1- Un rayon passant par le centre optique O n'est pas dévié

2- le rayon émergent issu du foyer objet F est horizontal (image de F située à l'infini)

3- un rayon incident horizontal émerge en passant par F' (objet de F' situé à l'infini)



B' est tracé à l'aide de deux des trois rayons particuliers. A' est tracé ensuite sur l'axe par aplanétisme



Une fois B' placé, on peut tracer le faisceau des rayons issus de B et passant par B'.

## Pré-TD 3- Exercices personnels à faire avant TD (applications directes du Cours)

**Q3.0.1-** Quelle est la distance focale image d'une lentille plan-convexe dont le rayon de courbure est  $R = 8$  cm et le verre d'indice 1.5 ? La distance focale change-t-elle selon que l'on présente la face plane vers l'avant ou vers l'arrière ?

**Q3.0.2-** Un petit objet AB de hauteur 2 cm est placé, perpendiculairement à l'axe, dans un plan de front à 60 cm en avant d'une lentille convergente de distance focale 40 cm.

Préciser les valeurs de  $\overline{AB}$ ,  $\overline{OA}$  et  $f'$ . L'objet est-il réel ou virtuel ?

Calculer la position et la taille de l'image. L'image est-elle réelle ou virtuelle ?, droite ou renversée ?

Vérifiez vos résultats par un tracé.

**Q3.0.3-** Un objet réel de longueur 5 cm est placé à 4 m d'une lentille divergente de distance focale 60 cm. Préciser les valeurs de  $\overline{AB}$ ,  $\overline{OA}$  et  $f'$ .

Calculer la position et la taille de l'image. L'image est-elle réelle ou virtuelle ?, droite ou renversée ? Vérifiez vos résultats par un tracé.

**Q3.0.4-** On accole deux lentilles minces en supposant qu'elles ont même centre optique. L'une a une distance focale image de +0.4 m et l'autre a une vergence de  $-4 \delta$  (donc une distance focale de ?). Quelle est la distance focale de la lentille mince équivalente au doublet ?

**Q3.0.5- Technologie :** Comment obtenir une optique de grandissement réglable mais avec une seule lentille seulement ? Pour info, un objectif « zoom » est réalisé avec au moins trois lentilles distinctes.

[recherche rapide avec les mots-clés : varioptic, lens]

### Résultats :

**Q3.0.1 :**  $V = 6.25\delta$  et  $f' = 16$  cm    **Q3.0.2 :**  $\overline{OA}' = 1.20$  m ;  $\gamma = -2$ , image réelle, renversée et agrandie    **Q3.0.3 :**  $\overline{OA}' = -0.52$  m ;  $\gamma = +0.13$ , image virtuelle, droite et diminuée.

**Q3.0.4 :**  $f'_{eq} = -0.666$  m lentille divergente    **Q3.0.5** Voir solution détaillée sur le document de correction disponible ultérieurement en ligne

## TD 3.1- Dimensionnement d'un verre de lunette

Un verre de lunette, de forme usuelle mais considéré comme mince, se présente comme un ménisque de verre d'indice 1.5 limité par deux portions de dioptre sphérique. Le premier a un rayon de courbure  $R_1 = R$ , le second un rayon  $R_2$  plus long de 40%.

**Q3.1.1-** Représenter la forme du verre de lunette (l'axe est orienté vers l'œil). Calculer la valeur R pour qu'il ait une « puissance » de  $+2\delta$  (en lunetterie, le terme historique de « vergence » est usuellement remplacé par celui de « puissance » exprimé en  $\delta$  ou  $m^{-1}$ )

**Q3.1.2-** Quelle serait la « puissance » d'un verre de lunette où les deux rayons de courbure précédents seraient intervertis ?

**Q3.1.3-** Comparer la nature convergente/divergente de ces deux lentilles. Comment les distinguer géométriquement ?

## TD 3.2- Correction pour une lentille « non mince »

Soit une lentille en verre d'indice  $n_v = 1.5$ , de forme biconvexe symétrique (valeur absolue du rayon de courbure  $R = 20$  cm) et d'apparence épaisse (épaisseur au centre  $e = 2$  cm). Une formule plus détaillée permet de calculer la distance focale d'une lentille non mince en tenant compte de son épaisseur  $e$  :

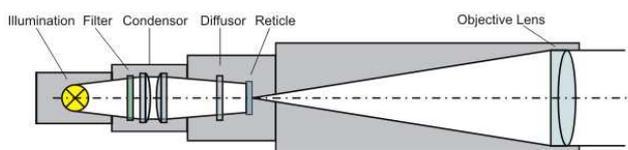
$$V' = \frac{1}{f'} = (n_v - 1) \times \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{(n_v - 1)^2}{n_v} \times \frac{e}{R_1 R_2}$$

**Q3.2.1-** Identifier les valeurs de  $R_1$  et  $R_2$  puis faire un calcul approché de  $V'$  et  $f'$  en considérant une lentille quasi-mince (c'est à dire en négligeant l'épaisseur  $e \approx 0$ )

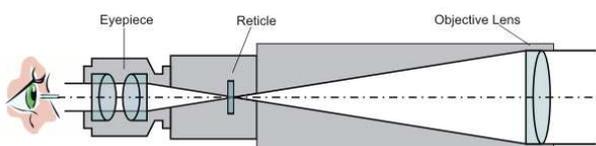
**Q3.2.2-** Faire le calcul exact de  $V'$  et  $f'$ . Commenter

## TD 3.3- Utilisation de lentilles minces

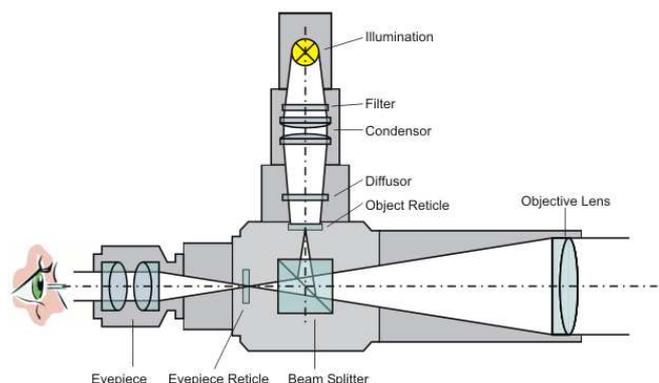
**Q3.3.1-** « Collimater » veut dire « produire un faisceau de lumière parallèle ». Comment régler la distance objet-lentille d'un collimateur ? Comment régler une lunette d'observation en « visée à l'infini » ? Comment régler une lunette « auto-collimatrice » en « visée à l'infini » ? Intérêt pour réaliser un goniomètre



Collimateur



Lunette de visée (à l'infini ?)



Lunette auto-collimatrice

**Q3.3.2-** On place une lentille convergente au dessus d'un objet, de sorte qu'elle soit à une distance équivalente à la moitié de sa distance focale. Caractériser l'image obtenue (par calcul et par tracé). Quel est le mode de fonctionnement de la lentille ?

**Q3.3.3-** On place un objet à mi-distance entre le centre optique  $O$  et le foyer image  $F'$  d'une lentille convergente. L'objet est-il réel ou virtuel ? Comment peut-on être physiquement dans un tel cas ? Caractériser l'image obtenue (par calcul et par tracé).

Même question pour une lentille divergente mais en considérant alors le foyer objet  $F$ .

## TD 3.4- Deux lentilles minces accolées

Pour mesurer la distance focale  $f'_1$  d'une lentille mince divergente, on accole à cette lentille une autre lentille mince convergente de  $V_2 = 4$  dioptries. On forme avec ce système de lentilles l'image réelle d'un objet. Lorsque l'image est de même taille que l'objet, la distance objet/image est égale à 3 m.

**Q3.4.1-** Calculer  $f'_1$ .

**Q3.4.2-** L'ordre des lentilles importe-t-il ?

## TD 3.5- Deux lentilles minces séparées

Un objet  $A_1B_1 = 2 \text{ cm}$  est situé à  $1 \text{ m}$  en avant d'une lentille mince de focale  $f_1' = 0.20 \text{ m}$ . On place une seconde lentille de vergence  $10 \delta$  à  $d = 30 \text{ cm}$  en arrière de la première.

**Q3.5.1-** Construire la position de l'image intermédiaire  $A_i$  puis la calculer. Caractériser l'image intermédiaire. Comment est utilisée cette première lentille ?

**Q3.5.2-** Caractériser l'objet de la seconde lentille. Construire la position de l'image finale  $A'_2$ , puis la calculer. Caractériser cette image. Comment est utilisée cette seconde lentille ?

**Q3.5.3-** Calculer le grandissement angulaire global.

**Q3.5.4-** Calculer la position de l'image finale rapportée à la lentille de front. L'image finale est-elle réelle ou virtuelle ?

## TD 3.6- Téléobjectif photographique

On constitue un « téléobjectif », c'est-à-dire un objectif pour photographier des objets très éloignés, en associant un ensemble équivalent à une lentille mince convergente  $L_1$  de distance focale  $f_1' = 200 \text{ mm}$  à une seconde lentille mince  $L_2$  de distance focale  $f_2'$  que l'on place en arrière à une distance  $d = 170 \text{ mm}$ . Le capteur d'image  $C$  est placée à une distance  $D = 245 \text{ mm}$  en arrière de la première lentille, dans le plan focal image du téléobjectif.

**Q3.6.1-** Où se situe l'image intermédiaire formée par la lentille de front ? Du point de vue de  $L_1$ , l'image  $A_i$  est-elle réelle ou virtuelle ?

**Q3.6.2-** Du point de vue de la lentille  $L_2$ , où est située l'image finale  $A'_2$  ? Est-elle réelle ou virtuelle ? Où est situé l'objet intermédiaire ? Est-il réel ou virtuel ?

**Q3.6.3-** Caractériser la lentille  $L_2$ .

**Q3.6.4-** Tracer une figure correspondant à la situation décrite. Déterminer graphiquement puis par le calcul, la distance focale équivalente  $f'$  du téléobjectif. Vérifiez votre résultat en appliquant la formule de Gullstrand pour le « doublet » de lentilles non accolées. Enfin calculer la compacité  $f'/D$

**Q3.6.5-** Quelle est la dimension de l'image formée par ce téléobjectif sur le capteur lorsqu'on photographie un objet très éloigné vu sous un angle de  $1^\circ$ .

## Pré-DS3

Exercices complémentaires à chercher en préparation du DS.

☺ Solutions disponibles sur le site [mpsn.free.fr](http://mpsn.free.fr) mais à ne consulter qu'après avoir cherché.

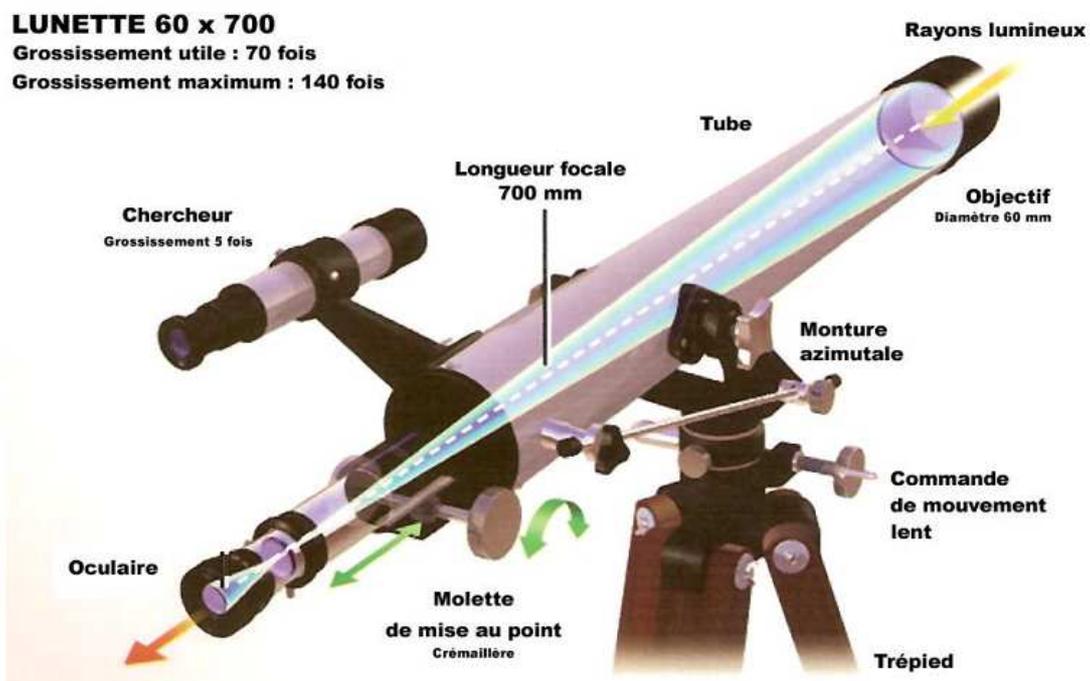
### DS3.1- Relations des lentilles minces

**DS3.1.1-** Comment faut-il placer un objet par rapport à une lentille convergente pour que l'image soit droite et de longueur triple de celle de l'objet ?

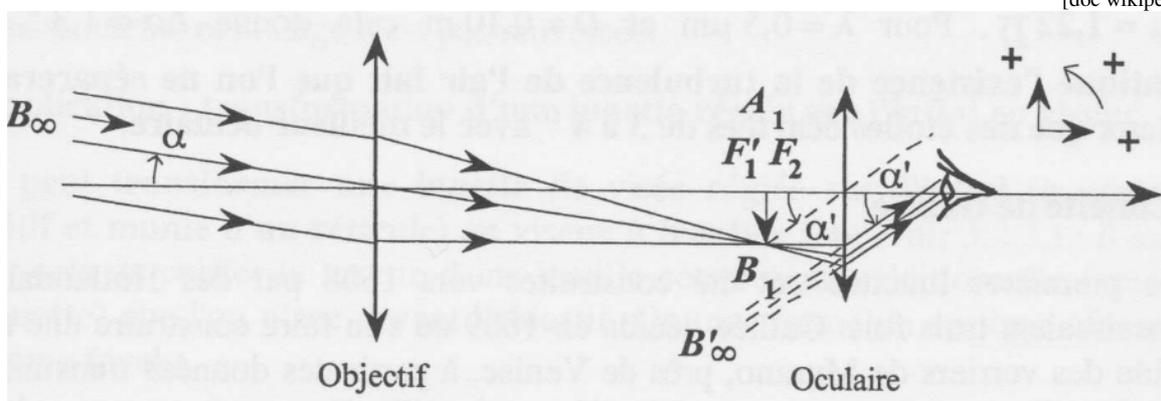
Vérifier le résultat à l'aide d'un tracé.

**DS3.1.2-** Même question mais en obtenant une image renversée.

### DS 3.2- Etude d'une lunette astronomique



[doc wikipédia]



Utilisation dans les **conditions de Gauss** → représentation avec **échelle dilatée en Y**

La lunette astronomique étudiée est, selon la figure organisée autour :

- d'un **objectif**  $L_1$ , de diamètre utile  $D = 60$  mm et de longueur focale  $f'_1 = 700$  mm.
- d'un **oculaire**  $L_2$ , de diamètre  $d$  et de longueur focale  $f'_2$  comprise entre 5 et 30 mm.
- d'une configuration de position dite « **afocale** » où :  $F'_1 \equiv F_2$

**DS3.2.1-** L'objet astronomique  $AB$  (réel !) est situé à l'infini. Caractériser l'image intermédiaire  $A'_1B'_1 \equiv A_i B_i$  formée par l'objectif  $L_1$  (lieu, type, orientation, taille) en fonction des paramètres donnés.

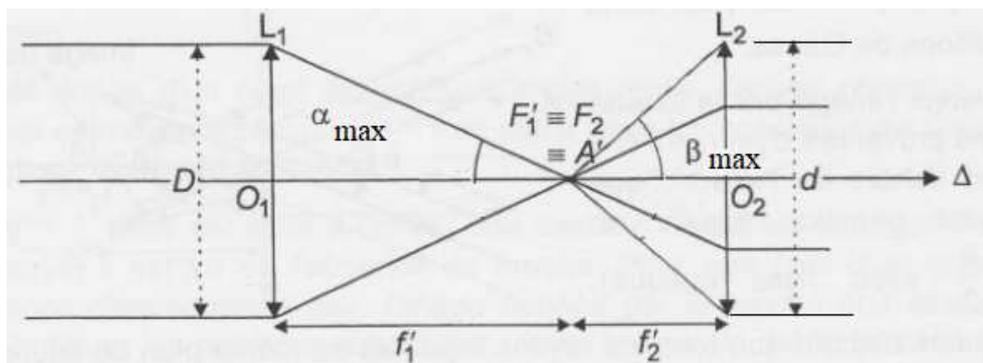
**DS3.2.2-** Le système est afocal avec  $F'_1 \equiv F_2$ . Où est situé l'objet  $A_2 B_2 \equiv A_i B_i \equiv A'_1 B'_1$  de la lentille  $L_2$  ? Caractériser l'image finale  $A'_2 B'_2$  formée par l'oculaire  $L_2$  (lieu, type, orientation, taille).

**DS3.2.3-** Exprimer le grandissement angulaire  $G$  en fonction des angles  $\alpha$  et  $\alpha'$ , puis en fonction des deux longueurs focales. Caractériser l'image vue par l'œil.

**DS3.2.4-** En déduire la valeur de  $f'_2$  pour que  $G = 70$ . Comment changer simplement le grandissement de la lunette ?

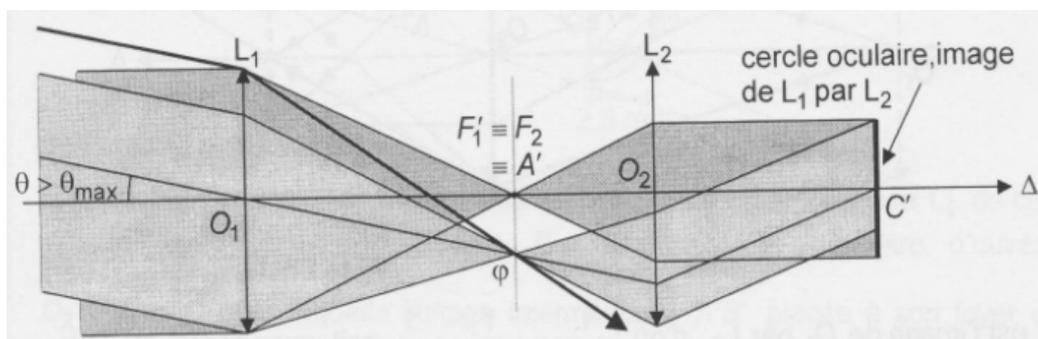
**DS3.2.5-** Pour une visée à l'infini, parallèle à l'axe optique, quel paramètre de la lunette vient limiter l'ouverture de la lunette ?

[c'est-à-dire limiter la quantité de lumière susceptible d'entrer dans la lunette]



**DS3.2.6-** Pour une visée à l'infini, quel paramètre de la lunette vient limiter la taille de l'image vue à travers la lunette ?

[c'est-à-dire par conséquent, limiter le **champ optique** qui est la zone de l'espace observable simultanément par l'instrument ]





# C4 – Radiométrie et photométrie

## TD C4 - Pré-requis à maîtriser pour les TD :

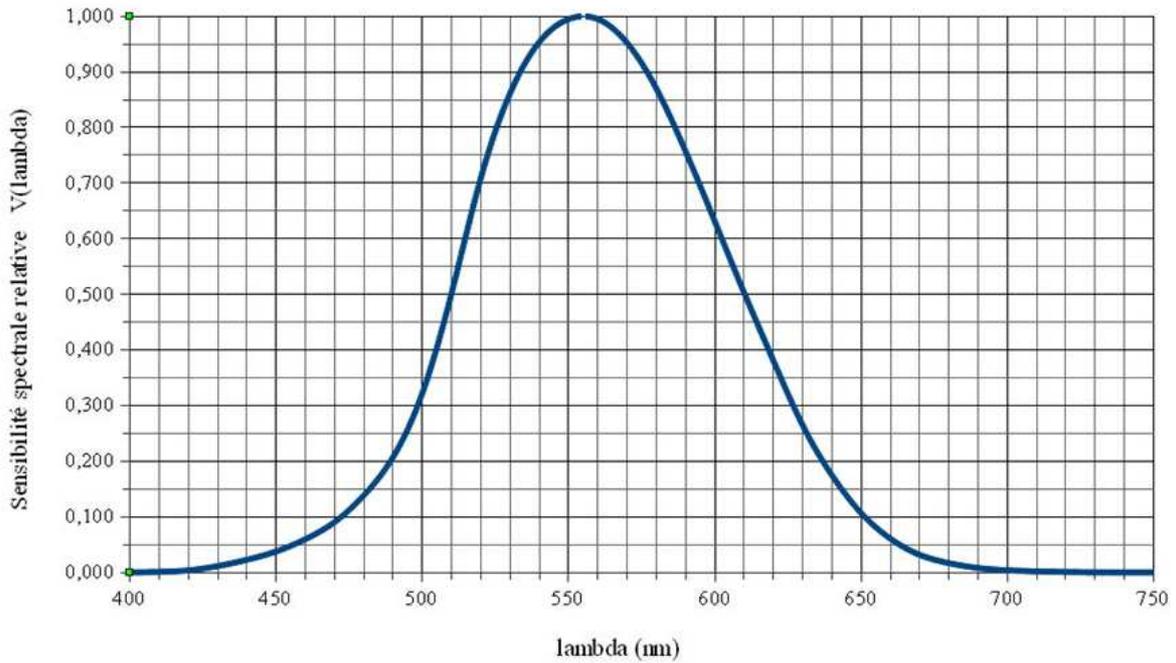
Etudier le Cours et les exemples disponibles en ligne sur mpsn.free.fr dans le fichier S2-C4\_Radiometrie&Photometrie.pdf

- ✓ Flux réfléchi, transmis et absorbé etc. (R, T et A) étudiées au chapitre C1.
- ✓ Les grandeurs **radiométriques** caractérisent la lumière dans les unités physiques usuelles **W, W.sr<sup>-1</sup>, W.m<sup>-2</sup>**. Mesures par un détecteur à réponse  $\approx$  indépendante de  $\lambda$ .
- ✓ Les grandeurs **photométriques** caractérisent un rayonnement **comme s'il était vu par un observateur humain « standard »**. Restreint au « visible » [400 nm ; 750 nm]  
Unités spécifiques de la photométrie **lumen, candela, lux** etc.
- ✓ La « **vision de jour** » est bien adaptée aux niveaux de **luminosité ambiante usuel** ; le **maximum de sensibilité V( $\lambda_p$ )** se situe à  $\lambda = 555$  nm avec 683 lumen  $\leftrightarrow$  1 W
- ✓ Correspondance en monochromatique entre le **flux énergétique**  $F_e(\lambda_{ex})$  en W et le **flux lumineux**  $F_l(\lambda_{ex})$  en lm
  - Lire la valeur correspondante V( $\lambda_p$ ) sur le graphe le plus pratique
  - Calculer :  $F_l(\lambda_{ex}) = F_e(\lambda_{ex}) \times K_m \times V(\lambda_{ex})$  en lumen, connaissant  $F_e(\lambda_{ex})$  en W
  - $F_e(\lambda_{ex}) = F_l(\lambda_{ex}) / (K_m \times V(\lambda_{ex}))$  en watt, connaissant  $F_l(\lambda_{ex})$  en lm
- ✓ Angle solide en fonction du demi-angle au sommet du cône  $\Omega(\alpha_m) = 2\pi(1 - \cos \alpha_m)$
- ✓ **Intensité** d'une source dans une direction donnée : **flux issu de la source par unité d'angle solide** :  $I = \frac{dF_s}{d\Omega_s}$  ou flux émis dans un cône d'angle solide  $\Omega_s$  :  $F = \int_{\Omega_s} I(\theta) d\Omega$
- ✓ Radiométrie : **intensité énergétique**  $I_e$  en **W.sr<sup>-1</sup>** ;
- ✓ photométrie : **intensité lumineuse**  $I_l$  en **candela** cd ( $\approx$  lm.sr<sup>-1</sup>)
- ✓ **Indicatrice d'intensité** : courbe en coordonnées polaires décrivant la distribution de I
- ✓ **Isotrope** = « identique dans toutes les directions » = « indépendant des coordonnées angulaires concernés »  
Source isotrope  $I(\theta) = I_0 = \text{constante}$   $F = \int_{\Omega_s} I(\theta) d\Omega = I_0 \times \Omega_s$   
Surface indicatrice : sphère centrée sur le point source
- ✓ L'**éclairage** caractérise le **flux reçu par unité de surface du récepteur**
- ✓ Eclairage énergétique  $E_e = \frac{dF_e}{dA_r}$  en **W.m<sup>-2</sup>** mesuré avec un **radiomètre**
- ✓ Eclairage lumineux  $E_l = \frac{dF_l}{dA_r}$  en **lux** ( $lx \approx$  lm.m<sup>-2</sup>) mesuré avec un **luxmètre**
- ✓ L'**éclairage moyen** est le rapport du flux global reçu divisé par la surface éclairée
- ✓ Eclairage par une **source ponctuelle** : **théorème de Bouguer**
  - Source quasi-ponctuelle d'intensité I dans la direction concernée
  - Propagation en stricte ligne droite (**sans lentille ou miroir**) dans un milieu sans pertes
  - Surface  $dA_r$  à la distance D de la source, vue depuis la source sous l'angle solide  $d\Omega_s$

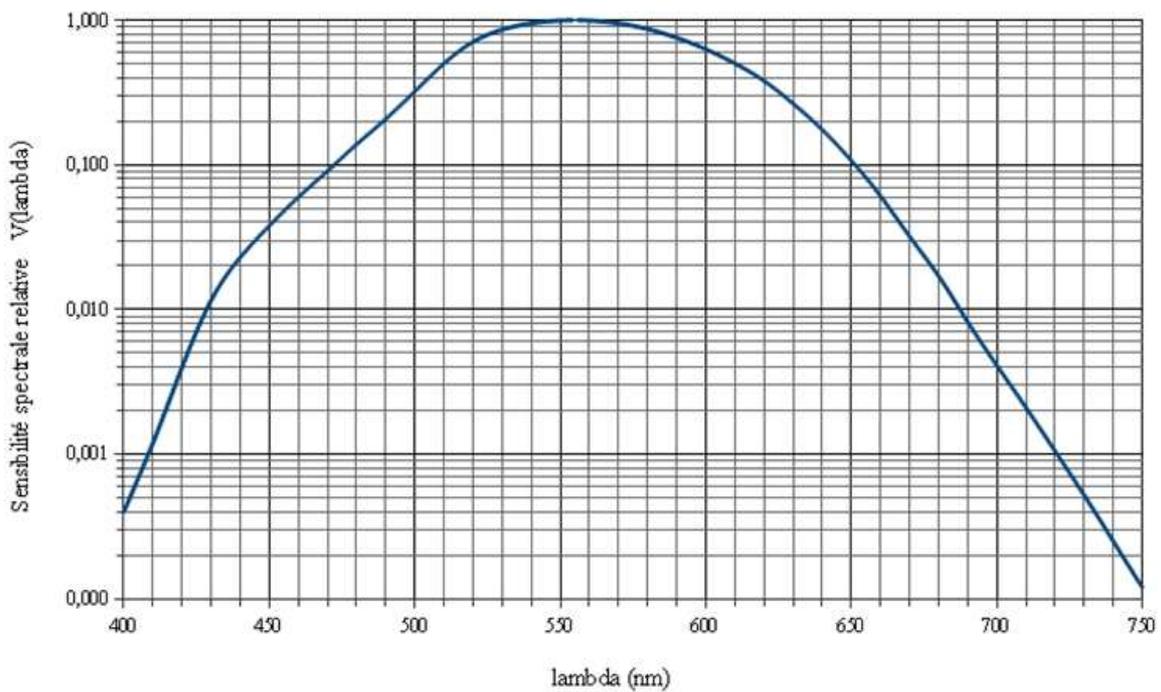
- Normale à  $dA_r$  faisant un angle  $\Theta_r$  avec le rayon issu de la source ( $\cos \Theta_r dA_r$  est la surface projetée ou apparente)

**Flux reçu par la surface**  $dA_r \rightarrow dF_r = I d\Omega_s = I \frac{dA_r \cos \Theta_r}{D^2}$

L'éclairement sur  $dA_r$  est  $E_r = \frac{dF_r}{dA_r} = I \frac{\cos \Theta_r}{D^2}$ . loi de **Bouguer**



Sensibilité spectrale relative  $V(\lambda)$  en vision de jour de l'œil standard CIE  
échelle linéaire : lecture facilitée entre 470 et 650 nm



Sensibilité spectrale relative  $V(\lambda)$  en vision de jour de l'œil standard CIE  
échelle log : lecture facilitée aux extrêmes (violet, rouge)

## Pré-TD 4- Exercices personnels à faire avant TD (applications directes du Cours)

**Q4.0.1 :** Laser YAG à 1.06  $\mu\text{m}$  IR (traitement thermique matériaux pour la mécanique) de flux en émission 100 W et de rendement de conversion  $\eta = 3\%$

Estimer le flux lumineux émis et la puissance électrique consommée par ce laser. Commentaires ?

**Q4.0.2 :** Comparer l'impression visuelle donnée par ces trois diodes laser émettant dans le vert (1 mW à 532 nm), le rouge (2 mW à 650 nm) et le violet (5 mW à 404 nm).

**Q4.0.3 :** Quelle est l'intensité moyenne d'une source supposée isotrope émettant un flux de 10 W dans un cône de demi-angle au sommet  $10^\circ$  ? Idem pour un flux de 200 lm et un cône d'angle au sommet complet  $20^\circ$ .

**Q4.0.4 :** Une sonde de radiomètre éclairée par une LED reçoit un flux de 5 mW sur une surface de 1  $\text{cm}^2$ . Prévoir la valeur de l'éclairement énergétique moyen mesuré.

Quel est l'éclairement lumineux moyen correspondant si la source est une LED verte ( $\lambda \approx 550$  nm), une LED rouge ( $\lambda \approx 650$  nm), une LED de télécommande TV ( $\lambda \approx 950$  nm) ou une LED blanche d'éclairage.

**Q4.0.5 :** Une LED supposée ponctuelle est placée au centre d'un écran sphérique de 1 m de diamètre. Quel est l'éclairement reçu sur l'écran si son intensité est de 5 cd ? Idem pour une sphère de rayon 20 cm et une intensité de  $15 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$  ?

### Q4.0.6 : Technologie

Qu'est-ce qui est commun aux trois procédés de mesure optique suivants :

- mesure de taux de  $\text{CO}_2$  dans des gaz d'échappement (raie caractéristique à 4.3  $\mu\text{m}$ )
- détection de présence ou de mouvement à effet pyroélectrique
- recherche de points chauds par caméra thermique

### Résultats :

**Q4.0.1 :** 0 lm ! lunette de protection obligatoire parce que non visible ! -  $P = F_e / \eta = 3.3 \text{ kW}$

**Q4.0.2 :** laser vert  $V(532 \text{ nm}) = 0,87 \rightarrow 0,59 \text{ lm}$  ;

$V(650 \text{ nm}) = 0,11 \rightarrow 0,150 \text{ lm}$  Ce laser rouge paraît  $0,59/0,15 \text{ lm} \approx 4$  fois moins lumineux mais il est  $2 \text{ mW}/1 \text{ mW} = 2$  fois plus dangereux que le laser vert ;

$V(404 \text{ nm}) = 0,0004 \rightarrow 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ lm}$  Ce laser violet paraît  $0,59/0,00027 \text{ lm} \approx 2200$  fois moins lumineux mais il est  $5 \text{ mW}/1 \text{ mW} = 5$  fois plus dangereux pour les yeux !

**Q4.0.3 :**  $\Omega = 0.0955 \text{ sr}$ ,  $I_e = 104.8 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$  ; même  $\Omega$  !,  $I_l = 2094 \text{ cd}$

**Q4.0.4 :**  $5 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2} = 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  ;  $V_{\text{vert}} = 1$ ,  $F_{l \text{ vert}} = 3.4 \text{ lm}$  et  $E_{l \text{ vert}} = 34 \text{ klx}$  ;  $V_{\text{rouge}} = 0.1$ ,  $F_{l \text{ rouge}} = 0.34 \text{ lm}$  et  $E_{l \text{ rouge}} = 3400 \text{ lx}$  ;  $V_{\text{IR}} = 0$ ,  $F_{l \text{ IR}} = 0 \text{ lm}$  et  $E_{l \text{ IR}} = 0 \text{ lx}$  ; LED blanche polychromatique - non calculable simplement...

**Q4.0.5 :**  $\cos\Theta_r = 1$  ;  $20 \text{ lx}$  ;  $375 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

**Q4.0.6 :** voir le document de correction ultérieurement mis en ligne

## TD 4.1- Photométrie de LED

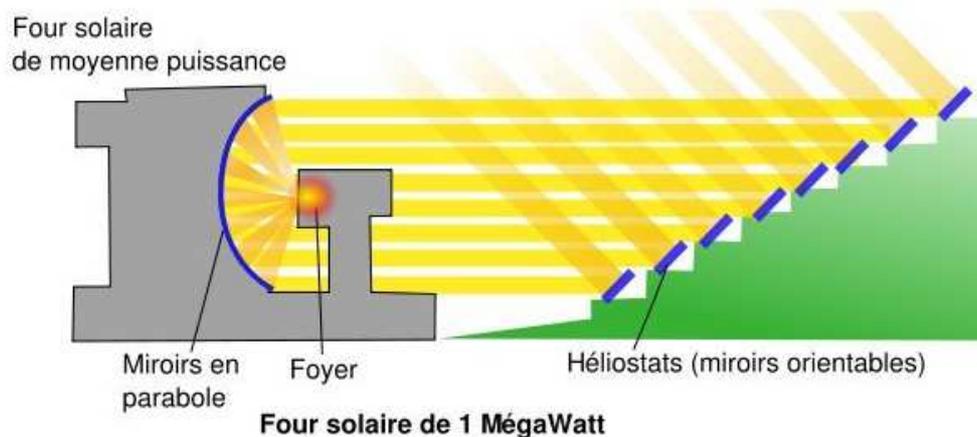
**Q4.1.1-** : Un faisceau de lumière parallèle a une section carrée de 20 cm de côté et transporte un flux de 80 lm. Il éclaire perpendiculairement un sol plat. Calculer l'éclairement moyen reçu sur la zone éclairée.

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

## TD 4.2- Utilisation de miroirs pour un four solaire

Etude basée sur les données du premier four solaire d'importance 1 MW, construit en 1970 à Odeillo (Pyrénées Orientales - 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<sup>2</sup> 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 indiquée de 1 MW, quel est alors l'éclairement reçu sur une surface faisant face au soleil. Est-ce plausible ?

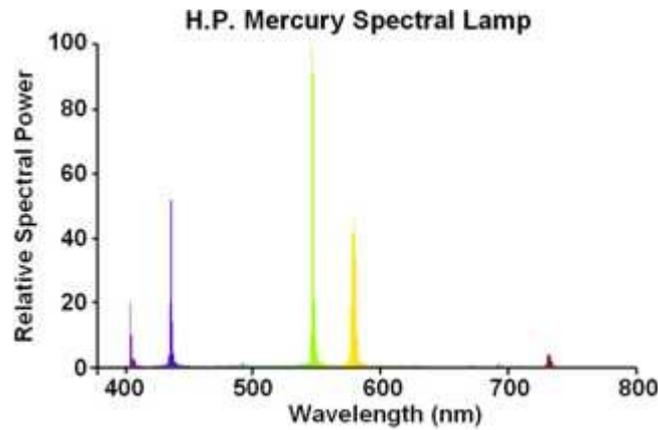
**Q4.2.2-** Il est parfois écrit dans les brochures touristiques que ce four est chauffé comme par 10 000 soleils. Est-ce plausible ?

## 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  $F_l = 3000$  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

## 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 <sup>2</sup>	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 ?

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

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

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

Le faisceau est dirigé perpendiculairement sur un écran distant de  $L = 3$  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.

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

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

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

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

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

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

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

## 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  $75 \text{ lm.W}^{-1}$ , 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.

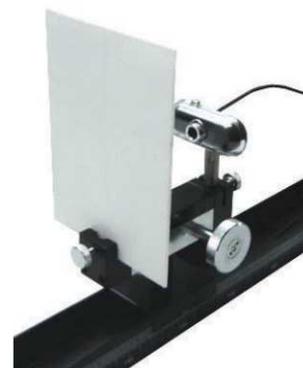
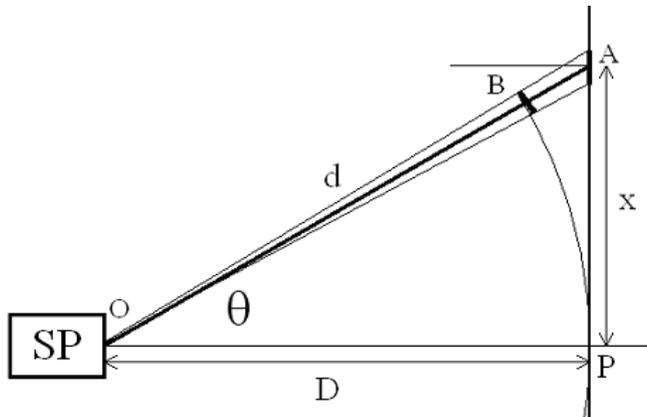
**Q4.5.2-** En déduire l'origine de l'éclairage au pied d'un lampadaire ; calculer l'éclairement de la chaussée obtenu là.

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



## TD 4.6- Correction pour une mesure sur écran type oVisio

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



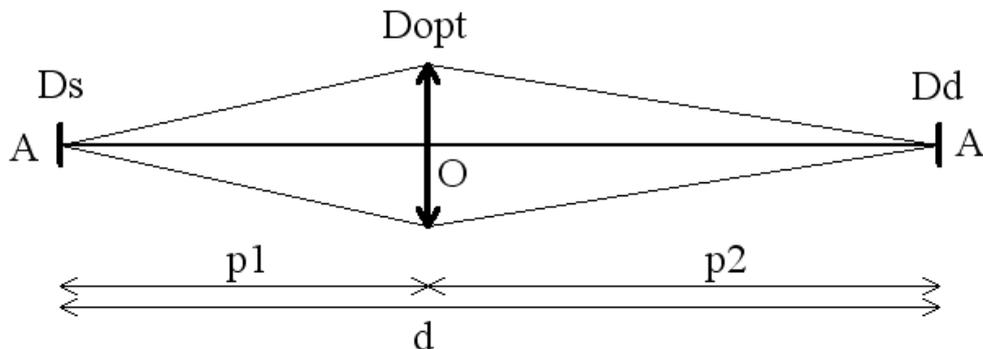
**Q4.6.1-** Déterminer l'éclairement dans l'axe en P.

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

**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 ?

## TD 4.7- Transfert de flux optimal par une lentille convergente

On cherche à collecter le flux émis par une source optique uniforme se présentant comme un disque de diamètre  $D_s = 1 \text{ mm}$  et de luminance  $L_s = 1 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ .



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  $D_{opt} = 15 \text{ mm}$ , 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 ?

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

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

## Pré-DS4

### DS4.1 : Atténuation d'un faisceau de lumière par de la fumée (d'après DS2016)

Une lanterne de TP est constituée d'un boîtier, d'une LED blanche très lumineuse et d'une optique « condenseur » équivalent à une simple lentille convergente de focale  $100 \text{ mm}$  et de diamètre d'ouverture  $D = 40 \text{ mm}$ . On peut régler la distance entre la LED et le centre de la lentille avec une coulisse.

Une cuve de type aquarium (parallélépipède à 6 faces en verre en verre d'indice  $n = 1.5$ ) a une longueur de  $L = 60 \text{ cm}$ .

On dispose la lampe devant la cuve de sorte que le faisceau de lumière pénètre la cuve **perpendiculairement** à sa plus petite face, traverse la cuve selon sa longueur et ressort à travers la face opposée.

La cuve étant munie d'un couvercle, on injecte de la fumée dans l'air de la cuve afin d'étudier l'atténuation de la lumière du faisceau par cette fumée.

**DS4.1.1-** La lampe est réglée de sorte que les sections du faisceau issu de la lentille, éclairent les faces d'entrée et de sortie de la cuve aient la même surface  $S$ . Quelle propriété géométrique particulière possède ce faisceau de lumière ? Identifier l'origine physique du faisceau pour en calculer la surface de section  $S$ . Où doit être positionnée la LED par rapport à la lentille ?

**DS4.1.2-** On mesure un éclairement incident **moyen**  $E_i = 340 \text{ W.m}^{-2}$  en plaçant la sonde d'un instrument dans le faisceau, au niveau de la face d'entrée de la cuve mais juste à l'extérieur. Quel est le nom de cet instrument ? Calculer le flux énergétique incident sur la cuve  $F_i$ .

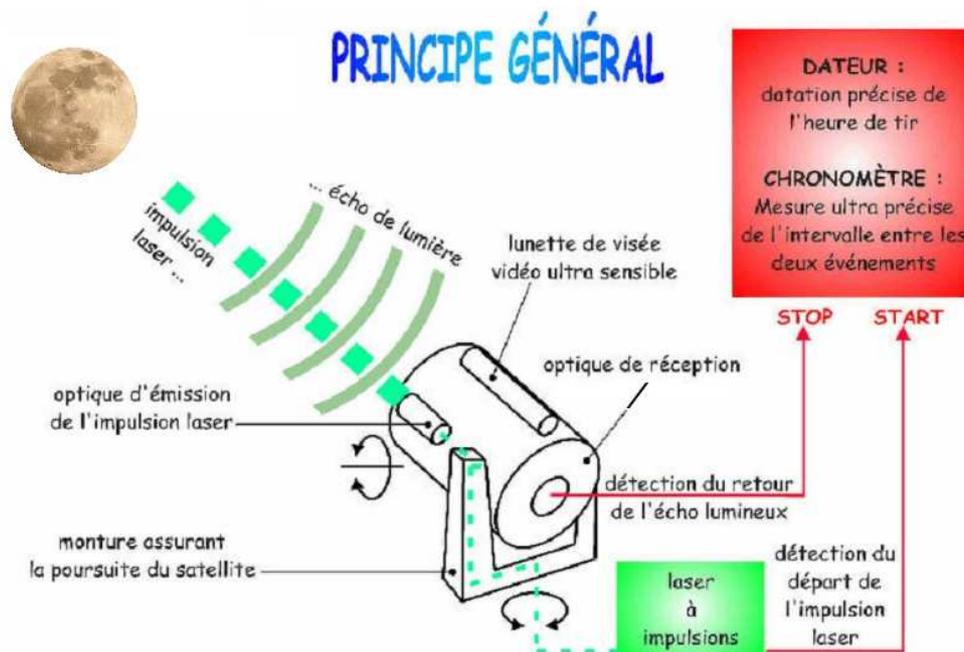
**DS4.1.3-** Pour ce réglage et cette distance LED/lentille, estimer l'angle solide sous lequel la lentille est éclairée par la LED. En déduire l'intensité de la lumière émise par la LED supposée être une source isotrope pour ce faisceau.

**DS4.1.4-** On mesure maintenant avec le même instrument l'éclairement moyen du faisceau en sortie en plaçant à nouveau la sonde dans le faisceau mais juste à l'extérieur de la face de sortie de la cuve. On lit  $E_s = 830 \text{ mW.m}^{-2}$ . Calculer le facteur de transmission global  $T_g$  du faisceau, l'atténuation étant causée à la fois par la fumée et par le franchissement des deux plaques de verre.

**DS4.1.5-** Estimer le facteur de transmission énergétique  $T_d$  associé à la traversée des deux plaques de verre (combien de faces ?). En déduire le facteur de transmission énergétique de la fumée seule, soit  $T_f$ .

**DS4.1.6-** Estimer  $\alpha$  le facteur d'absorption moyen en lumière blanche pour cette fumée. Estimer l'atténuation linéique de cette fumée en  $\text{dB.m}^{-1}$ .

## DS4.2 : Faisabilité d'une télémétrie laser « Terre – Lune »



### LASER de tir impulsif

- YAG IR 1062 nm dédoublé : longueur d'onde du laser vert  $\lambda = 532 \text{ nm}$
  - Impulsion d'énergie  $U = 0.2 \text{ J}$  et de durée  $\tau = 80 \text{ ps} = 80 \cdot 10^{-12} \text{ s}$  toutes les  $T_i = 0.1 \text{ s}$
  - Puissance moyenne du laser (= flux énergétique moyen)  $P_{\text{moyen}} = U / T_i = 2 \text{ W}$  assez faible
  - Divergence du faisceau  $\alpha_L = 4'' = (4 / 3600) \times (\pi / 180) = 19.4 \mu\text{rad}$
  - La lumière est composée de « photons », « grain de lumière » ayant tous la même énergie  $u = h c / \lambda$  avec  $h = 6.64 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$  constante de Planck et  $c = 2.997 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$  vitesse de la lumière dans le vide
- Soit  $u = 6.64 \cdot 10^{-34} \times 2.997 \cdot 10^8 / 532 \cdot 10^{-9} = 3.74 \cdot 10^{-19} \text{ J}$  pour chacun de ces photons verts.

**DS4.2.1-** Calculer le nombre de photons par impulsion tirée. Soit  $U / u$

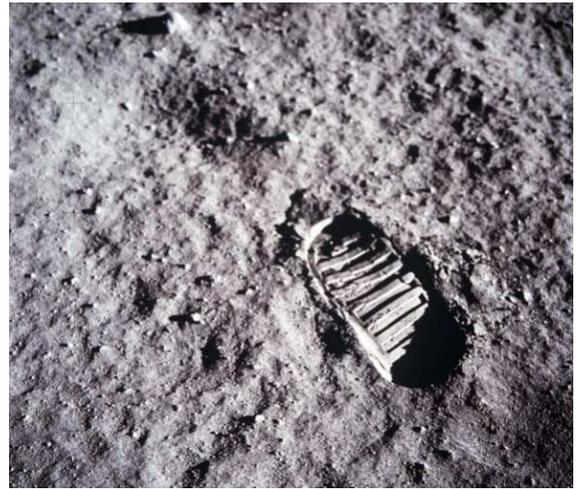
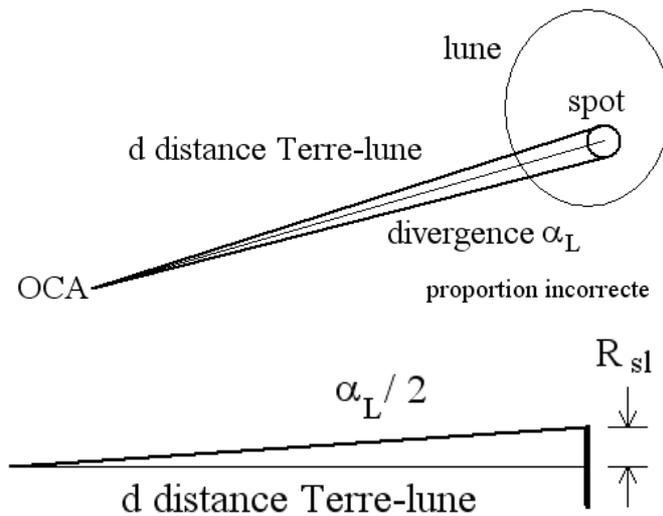
**DS4.2.2-** Toute l'énergie  $U$  est émise pendant la durée  $\tau$  de l'impulsion. Calculer la puissance crête  $F_{ec}$  pendant l'impulsion (= flux énergétique crête).

### Eclairage du sol lunaire

- Distance Terre – lune =  $3.6 \cdot 10^8 \text{ m} = 360\,000 \text{ km}$

**DS4.2.3-** Calculer le rayon du spot lunaire  $R_{sl}$ , puis la surface du spot lunaire  $A_{sl}$  en  $\text{m}^2$

**DS4.2.4-** En supposant la lumière du laser uniformément répartie sur la surface du spot, calculer l'éclairement lunaire « crête »  $E_{lc}$  dû au spot laser.



Trace de pas de Neil Armstrong 20/07/1969

« That's one small step for (a) man; one giant leap for mankind

### Rétrodiffusion du sol lunaire vers le télescope terrestre

- Le sol lunaire est poussiéreux et rétrodiffuse mal : facteur de réflexion  $\mathfrak{R} = 7 \%$

- On étudie globalement la lumière rétrodiffusée par la surface lunaire éclairée par le laser. A l'échelle astronomique et vu par le télescope terrestre, le spot lunaire est équivalent à un point lumineux ayant une intensité énergétique dans la direction Lune –Terre :

$$I_{sl} = \frac{\mathfrak{R} \times A_{sl} \times E_{lc}}{\pi} = 5.5 \cdot 10^7 \text{ W.sr}^{-1}$$

**DS4.2.5-** A l'aide du théorème de Bouguer, calculer l'éclairement  $E_{Tc}$  reçu à la surface du télescope.

**DS4.2.6-** Le télescope (type Cassegrain) a un diamètre  $D_T = 1.54 \text{ m}$ . Calculer sa surface  $A_T$  ainsi que le flux énergétique « crête »  $F_{Tc}$  reçu par le miroir d'entrée du télescope.

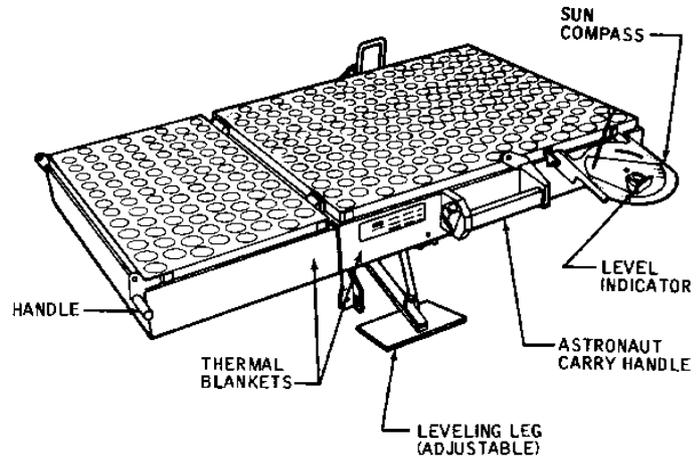
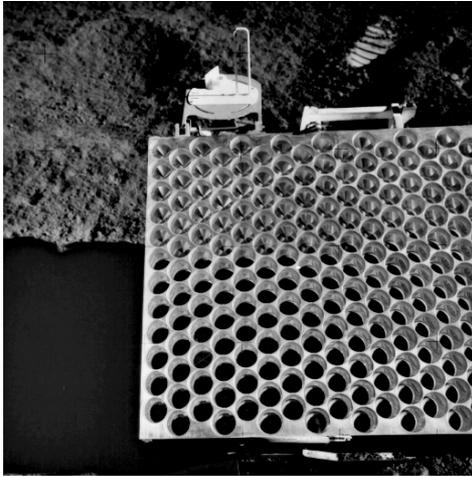
**DS4.2.7-** La lumière reçue est nettoyée de toutes les lumières parasites avec un filtre passe-bande sélectif à  $\lambda = 532 \text{ nm}$  ( $\Delta\lambda = 0.12 \text{ nm}$ ) transmettant  $T_{\max} = 0.6 = 60 \%$  de la lumière verte reçue.

Calculer l'énergie de la lumière reçue en retour pendant une durée d'impulsion  $\tau$ .

**DS4.2.8-** Calculer le nombre moyen de photons verts d'énergie  $u$  reçu par impulsion émise. Conclure sur la faisabilité de la mesure de la distance Terre-Lune...

## Utilisation de rétro-rélecteurs lunaires

Déposé par la mission Apollo 15 (été 1971) sur la face visible de la Lune, un panneau de photo-rélecteurs a été pointé vers la Terre (les premiers panneaux destinés à valider la méthode, ont été posés par Apollo 11 en 1969).



Conçu pour ne pas se déformer lors de changement important de température, le panneau est composé de  $N_{RR}$  300 réflecteurs « coin de cube » à réflexion totale, de diamètre  $D_{RR} = 3.8$  cm en structure « nid d'abeille ».

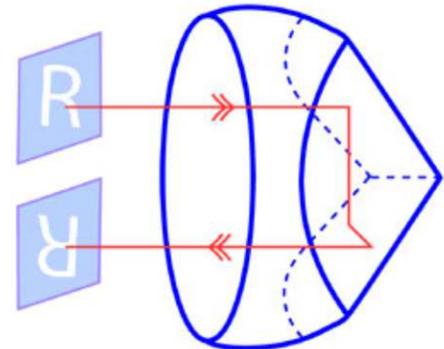
La surface utile du panneau est  $A_{RR} = N_{RR} \times \pi (D_{RR} / 2)^2 = 0.34 \text{ m}^2$

**DS4.2.9-** Calculer le flux « crête » reçu par le panneau  $F_{RR}$ , qui est une fraction du flux reçu par le sol lunaire. Quel est le flux « crête » renvoyé par le panneau ?

**DS4.2.10-** Le faisceau de retour vers la Terre a une divergence  $\alpha_R = 12'' = 58 \mu\text{rad}$   
En déduire le rayon du spot de retour sur la surface terrestre  $R_{st}$ , ainsi que la surface du spot terrestre  $A_{st}$

**DS4.2.11-** Calculer le flux énergétique « crête » reçu sur la surface du miroir principal du télescope. Calculer l'énergie de la lumière reçue en retour à la sortie du filtre et pendant une durée d'impulsion  $\tau$ .

**DS4.2.12-** Calculer le nombre moyen de photons verts d'énergie  $u$  reçu par impulsion émise. Conclure sur la faisabilité de la mesure de la distance Terre-Lune...



Rétro-rélecteurs à prime  
« coin de cube »

# Travail préparatoire aux TP d'optique

## Préparation

La Préparation des Travaux Pratiques se fait **avant** le TP.

**Elle ne se fait pas pendant** le TP proprement dit, sous peine de ne plus avoir assez de temps pour manipuler et demander des explications à votre enseignant.

**Consulter le texte et les Annexes** des textes de TP, en reprenant les notions concernées avec votre cours et vos TD dont certaines sont précisées en début de TP.

**Faire les simulations demandées** et précisées sur chacune des fiches suivantes.

## Manipulation et Compte-Rendu

### Conventions typographiques des textes :

- Texte normal :           normal           = descriptions et explications
- Texte en gras :           **gras**           = définitions de points importants
- Texte en italique :       *italique*       = travail ou calcul à réaliser

De plus les différentes étapes successives d'une *liste de tâches* sont identifiées par un -

Les manipulations décrites seront réalisées pendant le TP et font l'objet d'un **compte-rendu** regroupant le descriptif du montage, les mesures et les enregistrements, réalisés et analysés, ainsi que vos commentaires et remarques. Un compte-rendu par binôme est remis **en fin de chaque séance**.

Vous ferez preuve de rigueur, de précision mais aussi de concision et d'esprit de synthèse. Vous noterez qu'**il n'est pas nécessaire de recopier ou de paraphraser le photocopié de TP !**

## Evaluation

La note de Travaux Pratiques pour ce cycle est obtenue de la façon suivante :

- le partiel de Travaux Pratiques compte pour 70% de la note.
- le travail effectué pendant les séances compte pour 30% de la note au titre du contrôle continu.

Il sera particulièrement tenu compte des comptes-rendus de mesure (en particulier en ce qui concerne la qualité des graphiques, de leur interprétation ainsi que des conclusions que vous en tirerez).

# TP1- Lentilles minces convergentes

## Etude de la formation d'une image – Focométrie

### Sujet

Etudier la formation d'une image à l'aide d'une lentille convergente. En mesurer la distance focale.

### Objectifs

- Visualiser en 3D le faisceau de rayons lumineux lors de la formation d'une image
- Approche expérimentale et par simulation
- Apprentissage de méthodes de mesure de distance focale
- Analyse critique de méthodes de mesures sur la base du nombre d'actions à réaliser et de la facilité des réglages

### Consignes et sécurité

- **En début de TP** : exécuter l'utilitaire par son icône « **Au début du TP** » afin de rafraîchir le répertoire « **Travail\_S2** » accessible par l'icône sur le bureau. Ce dossier contient le texte complet du TP en couleur, ses annexes et les logiciels de simulation.
- **Le matériel optique ne DOIT jamais tomber !**
- **Eteindre la lampe en fin de TP**

### Plan du TP

- 1- Faisceau lumineux lors de la formation d'une image p 2
- 2- Méthodes par relation de conjugaison p 4
- 3- Méthode de Bessel p 6
- 4- Conclusion : analyse critique p 7

### Annexes :

**Version en couleur accessible dans « E:\MesDocs »**

A1- Liste du matériel utilisé p 8

A2- Simulation par traçage des rayons de lumière en 3D avec Optics-lab p 9

### TRAVAIL PREPARATOIRE à faire avant le TP

Le texte du TP en couleur, ses annexes complètes dont A2, le logiciel et les applets de simulation sont accessibles sur Internet par <http://mpsn.free.fr>

- Lire attentivement le texte de TP.
- Réaliser **avant le TP**, l'expérience virtuelle décrite §1.1- . Il n'y a pas de temps pour cela pendant le TP.
- Lire et apprendre les éléments théoriques du § 1.2
- Réaliser **avant le TP**, l'expérience virtuelle décrite §1.3- . Il n'y a pas de temps pour cela pendant le TP.
- Lire la justification §3.2- .  
Vous l'étudierez en détail dès que le cours / TD correspondant sera fait.

## TP2- Focométrie

### Sujet

Mesurer la distance focale de lentilles convergente ou divergente par une méthode avec lunette de visée.

### Objectifs

- Utilisation de lunette de visée (procédure de réglage des lunettes, pointé)
- Approches comparées : expérimentale et par simulation
- Maîtrise de l'usage des lentilles minces

### Consignes et sécurité

- **En début de TP** : exécuter l'utilitaire par son icône « **Au début du TP** » afin de rafraîchir le répertoire « **Travail\_S2** » accessible par l'icône sur le bureau. Ce dossier contient le texte complet du TP en couleur, ses annexes et les logiciels de simulation.
- **Le matériel optique ne DOIT jamais tomber !**
- **Eteindre la lampe en fin de TP**

### Plan du TP

- 1- Focométrie par autocollimation p 2
- 2- Focométrie par visée p 3

#### Annexes :

**Version en couleur accessible dans « E:\MesDocs »**

A1- Liste du matériel utilisé p 6

A2- Lunette de visée p 7

A3- Obtenir un faisceau de lumières parallèles p 8

A4- Modélisation et notations pour une lentille mince (cf. TP1) p 9

### TRAVAIL PREPARATOIRE à faire avant le TP

Le texte du TP en couleur, ses annexes complètes et les logiciels de simulation sont accessibles sur Internet par <http://mpsn.free.fr>

- Lire attentivement le texte de TP.
- Relire en particulier l'Annexe 4 « Modélisation et notation » (relation de conjugaison, signes, conventions...).
- Expérimenter avec les applets décrites au §1.1 et §2.1

## TP3- Mesure d'indice de réfraction par goniométrie - Dispersion chromatique d'un prisme de verre

### Sujet

Etudier l'indice de réfraction  $n(\lambda)$  d'un verre selon la couleur de la lumière en mesurant par goniométrie la déviation d'un faisceau lumineux due à un prisme de ce verre.

### Objectifs

- Savoir utiliser un prisme et gérer l'angle d'incidence ainsi que la déviation
- Savoir régler un goniomètre en plusieurs étapes (collimateur, lunette, horizontalité du plateau)
- Savoir régler une déviation minimale et en déduire la valeur de l'indice.
- Déterminer le modèle numérique d'un verre sous la forme  $n(\lambda) = A + B / \lambda^2$
- Comprendre le caractère dispersif d'un prisme

### Consignes et sécurité

- **Le prisme ne DOIT jamais tomber !**
- **La lampe spectrale reste allumée pendant toute la durée des phases de réglages et de mesures**

### Plan du TP

- 1- Principe de l'expérience p 2
- 2- Principe, description et réglages du goniomètre p 3
- 3- Mesures d'indice pour un prisme de verre p 4
- 4- Etude d'un modèle numérique de la dispersion de ce verre p 6

### Annexes :

**Version en couleur accessible dans « E:\MesDocs »**

A1- Liste du matériel utilisé p 7

A2- Procédures de réglage du goniomètre p 8

### TRAVAIL PREPARATOIRE à faire avant le TP

Le texte du TP en couleur, ses annexes complètes et les logiciels de simulation sont accessibles sur Internet par <http://mpsn.free.fr>

- Lire attentivement le texte de TP, en particulier les §1- et §2- .
- Réaliser **avant le TP** l'expérience virtuelle du TP décrite au §1.2-

## TP4- Radiométrie

### Sujet

Initiation à la radiométrie : expérimenter la loi de Bouguer et l'atténuation d'un flux de lumière par des filtres absorbants à densité neutre. Application à la caractérisation de détecteurs de lumière.

### Objectifs

- Utilisation d'un radiomètre
- Utilisation de filtres absorbants de densités neutres
- Unités radiométriques simples
- Traitement de données (graphique, tableur) pour valider un modèle théorique

### Consignes et sécurité

- **Le matériel optique ne DOIT jamais tomber !**
- **Attention à la sonde de mesure du radiomètre.**
- **En fin de TP**, penser à arrêter **TOUS** les appareils.

### Plan du TP

- 1- Etude radiométrique d'une source de lumière « ponctuelle » p 2
- 2- Atténuation d'un flux de lumière par des filtres p 3
- 3- Etude d'une photodiode BPW34 utilisée polarisée en inverse p 5
- 4- Etude d'un photorésistor LDR VT935G p 7

### Annexes :

**Version en couleur accessible dans « E:\MesDocs »**

- A1- Liste du matériel utilisé p 9
- A2- Caractéristiques des filtres absorbant à densité neutre Edmund p 10
- A3- Caractéristique du Radiomètre Delta-Ohm HD2302 p 11
- A4- Caractéristique de la photorésistance LDR VT935G p 17
- A5- Caractéristiques d'un module Laser C2025 vert : 532 nm p 18
- A6- Caractéristiques d'une photodiode BPW34 p 19

### TRAVAIL PREPARATOIRE à faire avant le TP

Le texte du TP en couleur, ses annexes complètes et les logiciels de simulation sont accessibles sur Internet par <http://mpsn.free.fr>

- Lire attentivement le texte de TP.
- Revoir le Cours associé

## TP5- Etude du spectre d'émission d'une source pour l'éclairage

### Sujet

Utiliser un monochromateur et un radiomètre/luxmètre pour étudier la distribution spectrale en émission d'une LED blanche d'éclairage.

### Objectifs

- Mesures d'éclairement énergétique en  $W.m^{-2}$  et d'éclairement lumineux en lux.
- Comprendre la spécificité de la vision humaine (sensibilité spectrale comparée œil – radiomètre – luxmètre).
- Savoir utiliser un système optique complexe : le monochromateur.
- Récupérer, traiter et analyser des données par informatique.
- Comprendre l'influence de la distribution spectrale d'une source de lumière.

### Consignes et sécurité

- **Le matériel optique ne DOIT jamais tomber !**

Penser à serrer les vis des cavaliers sur le banc optique.

- **En fin de TP**, penser à arrêter **TOUS** les appareils, y compris le « luxmètre ».

### Plan du TP

- 1- Utiliser un monochromateur p 2
- 2- Réponse du radiomètre au rayonnement de la LED en fonction de  $\lambda$  p 4
- 3- Réponse du luxmètre au rayonnement de la LED en fonction de  $\lambda$  p 7
- 4- Analyse métrologique p 8
- 5- Maquette d'un monochromateur p 9

### Annexes :

**Version en couleur accessible dans « E:\MesDocs »**

- A1- Liste du matériel utilisé p 9
- A2- Utilisation du luxmètre HD2102-2 et du logiciel Delta-Log9 p 10
- A3- Caractéristiques des sondes radiométrique et photométrique LP741 p 13
- A4- Caractérisation de la vision de l'œil standard CIE p 15
- A5- Caractéristiques d'un module LASER vert à 532 nm oVio-optics p 16
- A6- Luminance spectrique d'une lampe à incandescence à halogène p 17

### 0- TRAVAIL PREPARATOIRE à faire avant le TP

Le texte du TP en couleur, ses annexes complètes et les logiciels de simulation sont accessibles sur Internet par <http://mpsn.free.fr>

- Lire attentivement le texte de TP, tout particulièrement les paragraphes §1.1 et §2.5
- Si vous en avez, revoir vos notes de Cours de lycée sur le **réseau optique**.

## TP6- Liaison à fibre optique

### Sujet

Etudier expérimentalement quelques propriétés des composants d'une chaîne de transmission à fibre optique plastique :

Vérifier la linéarité en émission d'une LED, mesurer des temps de montée d'une chaîne de transmission à fibre, mesurer le spectre d'émission d'une LED, comparer l'atténuation d'une fibre optique selon la couleur etc.

### Objectifs

- Réaliser des expériences en maîtrisant ses paramètres (ici I et f)
- Mesurer des temps de montée d'un système opto-électronique.
- Utiliser et exploiter un spectromètre et un radiomètre..
- Maîtriser les fonctions avancées d'un oscilloscope numérique (mesures, curseur, correction par moyenne, utilisation des mémoires, export...).
- Exploiter des mesures complexes en faisant des corrections justifiées.
- Utiliser des données numériques spécifiées par le constructeur d'un composant.

### Consignes et sécurité

- ATTENTION aux FIBRES OPTIQUES : consignes §1.3
- **Eteindre tous les appareils en fin de TP**

### Plan du TP

- 1- Description de la liaison à fibre optique utilisée p 2
- 2- Etude de la linéarité d'une LED en émission p 3
- 3- Etude dynamique de la liaison : mesure de temps de montée p 4
- 4- Etude du spectre d'émission de la LED rouge p 6
- 5- Comparaison de l'atténuation par une fibre R / IR p 8

### Annexes :

**Version en couleur accessible dans « E:\MesDocs »**

A1- Liste du matériel utilisé p 12

A2- Oscilloscope Tektronix : mise en mémoire, capture d'écran sur clé USB p 13

A3- Acquérir un spectre avec le logiciel BWSpec p 16

A4- Résultat d'étalonnage du spectromètre BRC-112E p 17

A5- Radiomètre Delta-Ohm DO9721 p 18

A6- Photos p 20

### 0- TRAVAIL PREPARATOIRE à faire avant le TP

Le texte du TP en couleur, ses annexes complètes et les logiciels de simulation sont accessibles sur Internet par <http://mpsn.free.fr>

- Lire attentivement le texte de TP p1-11.
- Revoir les définitions du TD3 du module « Capteur S1 »



# Poursuite d'études en optique / optronique après MP :

Cette liste n'est pas exhaustive.

Vérifier sur les sites les conditions d'entrée sur titre, les possibilités d'apprentissage ou d'alternance.

## Ecoles d'INGENIEUR

On peut aussi essayer <https://www.orientation.com/metiers/ingenieur-en-optique.html>



**ENSSAT Lannion** Université de Rennes  
École Nationale Supérieure des Sciences Appliquées et de  
Technologie 6 rue de Kerampont BP 80518 - 22305  
Lannion Cedex Téléphone : +33 (0)2.96.46.90.00  
<http://www.enssat.fr/> [secretariat.concours@enssat.fr](mailto:secretariat.concours@enssat.fr)  
ingénieur spécialité OPT



**Institut d'Optique Graduate School**  
<http://www.institutoptique.fr>  
Campus Polytechnique RD 128 91127 PALAISEAU  
cedex Téléphone : 01 64 53 31 00  
Concours sur titre, apprentissage



**ENSIM** - Université du Maine  
rue Aristote - 72085 Le Mans CEDEX 09  
Téléphone : 02 43 83 35 93 Télécopie : 02 43 83 37 94  
<http://ensim.univ-lemans.fr/> [scolarite.ensim@univ-lemans.fr](mailto:scolarite.ensim@univ-lemans.fr)  
option MicroCapteurs et Mesures Optiques MCMO en 1<sup>ière</sup>  
année et Techniques Optiques pour l'Industrie TOI en 3<sup>ème</sup>  
année



**IFIPS** Université Paris-Sud11  
Maison de l'Ingénieur, bât 620 Plateau de Moulon  
Université Paris-Sud11 91 405 Orsay cedex tél : 01 69 33  
86 00 <http://www.polytech.u-psud.fr> , en particulier :  
<http://www.polytech.u-psud.fr/fr/formations/photonique-systemes-optroniques.html> Ingénieur en optronique,  
alternance



**Ecole Polytechnique de l'Université d'Orléans**  
8 rue Léonard de Vinci, 45072 Orléans Cedex 2 /  
Tél. +33 (0) 2 38 41 70 50 Ingénieur spécialité  
électronique-optique <http://www.univ-orleans.fr/polytech/>

## Licence PRO

<https://www.orientation.com/diplomes/diplome-licence-pro/>

nom de domaines pas toujours évident...

par exemple :



### Licence Pro LP2MI

IUT d'ORSAY Plateau du Moulon – 91400 Orsay

Mesures Physiques, 01 69 33 60 66

[mphy-lpcma@iut-orsay.fr](mailto:mphy-lpcma@iut-orsay.fr)

<http://www.iut-orsay.u->

[psud.fr/fr/formations/licences\\_professionnelles/mphy\\_lp\\_2mi.html](http://www.iut-orsay.u-psud.fr/fr/formations/licences_professionnelles/mphy_lp_2mi.html)

La formation est orientée maintenant « conception de capteurs » dont capteurs optiques



### Licence Pro « Contrôle et Mesure de la Lumière et de la Couleur »

Université de Montpellier2

Contact : Mr Frédéric Geniet : Tel : 04 67 14 46 92

[frederic.geniet@umontpellier.fr](mailto:frederic.geniet@umontpellier.fr)

<https://coulomb.umontpellier.fr/Licence-Professionnelle-Couleur-de-l-Universite-Montpellier> (plaquette en bas de page)...



### Licence Professionnelle Instrumentation Optique et Visualisation (IOVIS)

Sorbonne Université

CFA des Sciences Casier 232 4, Place Jussieu 75252 Paris cedex 05

Contact : [julien.laurat@sorbonne-universite.fr](mailto:julien.laurat@sorbonne-universite.fr)

<https://www.cfa-sciences.fr/physique-optique/licence-professionnelle-optique-optronique-instrumentation-liovis>

Voir aussi <https://youtu.be/nPz5e2WXHD0>

« Former en alternance des assistants ingénieurs ayant une double compétence en électronique et en photonique associée à une forte coloration en visualisation et traitement des images. »

Documents avec liens actifs disponibles sur le site <http://mpsn.free.fr/>