C4 – Radiométrie et photométrie

Pré-DS4 ☺ Solutions à ne consulter qu'après avoir cherché.

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

Une lanterne de TP est constituée d'un boitier, d'une LED blanche très lumineuse et d'une optique « condenseur » équivalent à une simple lentille convergente de focale 100 mm et de diamètre d'ouverture D = 40 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 vitre en verre d'indice n = 1.5) a une longueur de L = 60 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, éclairant 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-on être positionnée la LED par rapport à la lentille ?

section S constante → faisceau parallèle
La led est donc au foyer objet de la lentille

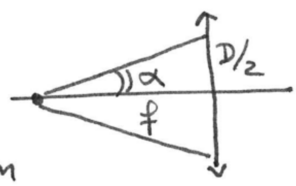
$S = \pi \frac{D^2}{4} = \pi \frac{(40\,10^{-3})^2}{4} = 1{,}26\ 10^{-3}\ m^2$

DS4.1.2- On mesure un éclairement incident **moyen** $E_i = 340\ W.m^{-2}$ 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 .

L'éclairement énergétique en $W.m^{-2}$ mesuré avec un radiomètre
Flux incident $F_i = E_i \times S = 340 \times 1{,}26\,10^{-3} = 0{,}428\ W$

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.

$\alpha = \arctan\left(\frac{D/2}{f}\right) = \arctan\left(\frac{20\,10^{-3}}{100\,10^{-3}}\right)$



$\alpha = 11{,}31°$

$\Omega = 2\pi(1-\cos\alpha) = 0{,}122$ sr stéradian

L'émission est supposée isotrope $\rightarrow F_i = I_{led} \times \Omega$

$I_{led} = \frac{F_i}{\Omega} = \frac{0{,}428}{0{,}122} = 3{,}5\ W.sr^{-1}$ (intensité énergétique)

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 $E_s = 830$ 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.

Les éclairements sont mesurés à l'extérieur du verre. On a $T_g = \frac{F_s}{F_i} = \frac{E_s \times S}{E_i \times S} = \frac{0{,}830}{340} = 2{,}44\,10^{-3}$ (sans unité)

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.

Sur le dioptre air/verre on a $T = 1 - \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$

$T = 1 - \left(\frac{1{,}5-1}{1{,}5+1}\right)^2 = 0{,}96$

il y a deux vitres, soit quatre dioptres air/verre

$T_d = T^4 = (0{,}96)^4 = 0{,}849$ (dioptres en série)

de même $T_g = T_d \times T_f \rightarrow T_f = \frac{T_g}{T_d} = \frac{2{,}44\,10^{-3}}{0{,}849} = 2{,}88\,10^{-3}$

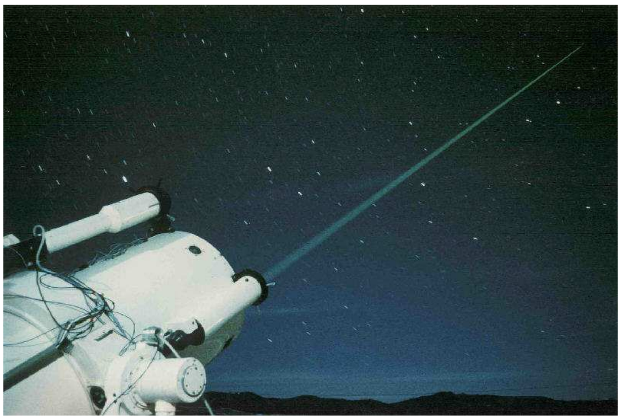
DS4.1.6- Estimer α le facteur d'absorption moyen en lumière blanche pour cette fumée. Estimer l'atténuation linéique de cette fumée en dB.m^{-1}.

d'après la loi de De Beer, on a $T_f = \exp(-\alpha L)$

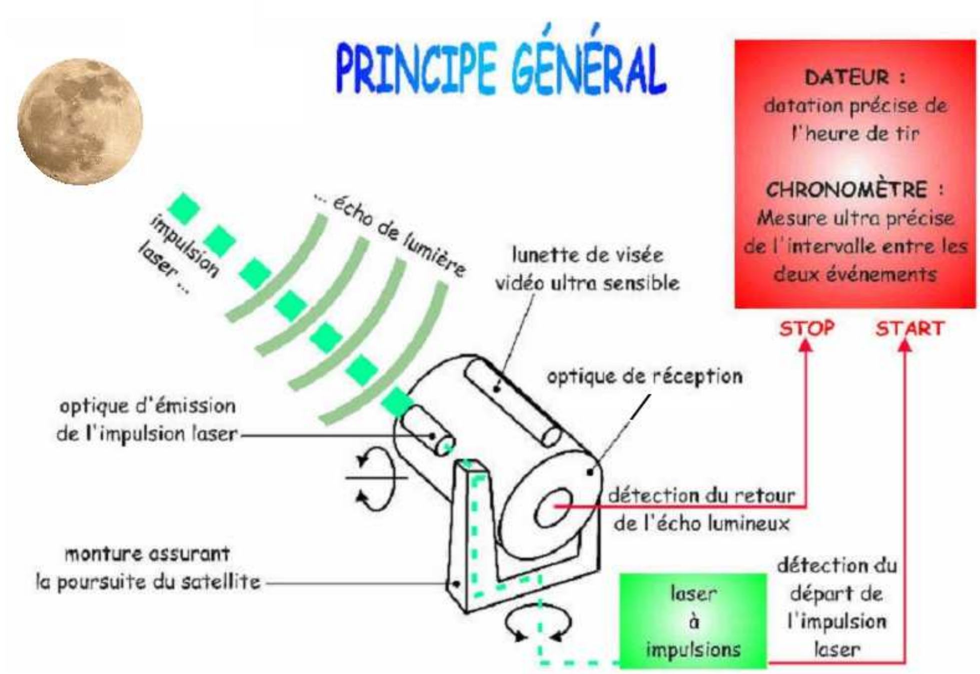
soit $\alpha = -\frac{\ln(T_f)}{L} = -\frac{\ln(2{,}88\,10^{-3})}{0{,}6} = 9{,}75\ m^{-1}$

Remarque : il s'agit d'une valeur globale pondérée par le spectre d'émission visible, spécifique de cette LED blanche. L'information serait probablement plus utile avec une source quasi-monochromatique (led colorée, faisceau laser étalé)

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



Observatoire de la Côte d'Azur (**OCA**) Plateau de Calern
LLR pour « Lunar Laser Ranging »
Instrument MéO (pour MÉtrologie Optique)



LASER de tir impulsionnel

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

Soit $u = 6.64\ 10^{-34} \times 2.997\ 10^{8} / 532\ 10^{-9} = 3.74\ 10^{-19}$ J pour chacun de ces photons vert

DS4.2.1- Nombre de photons par impulsion tirée $N_{impulsion} = U / u = 5.3\ 10^{17}$

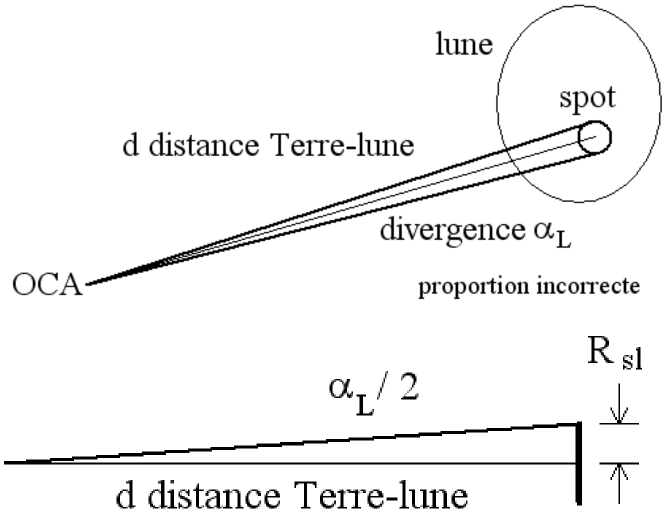
DS4.2.2- Toute l'énergie U est émise pendant la durée τ de l'impulsion. Pendant l'impulsion la puissance crête est F_{ec} (= flux énergétique crête) $= U / \tau = 2.5\ 10^{9}$ W (!).

Eclairage du sol lunaire

- Distance Terre – lune = 3.6 10^8 m = 360 000 km

DS4.2.3- Rayon du spot lunaire R_{sl} = d tan (α_L /2) = 3.5 km
Surface du spot lunaire $A_{sl} = \pi R_{sl}^2$ = 3.8 10^7 m^2

DS4.2.4- En supposant la lumière du laser uniformément répartie sur la surface du spot, on a l'éclairement lunaire « crête » $E_{lc} = F_{ec} / A_{sl}$ = 65.3 W.m^{-2}



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 $\Re$ = 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 :

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

DS4.2.5- La source étant supposée ponctuelle, on peut appliquer le théorème de Bouguer. A la surface du télescope est l'éclairement reçu $E_{Tc} = I_{sl} \times \cos(o°) / d^2$ = 4.3 10^{-10} W.m^{-2}

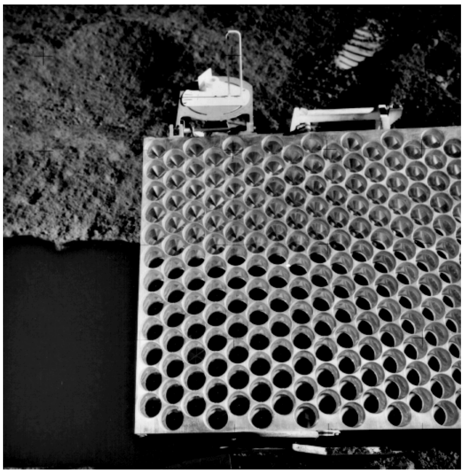
DS4.2.6- Le télescope a un diamètre D_T = 1.54 m. Le miroir d'entrée du télescope a une surface $A_T = \pi (D_T / 2)^2$ = 1.86 m² .
Le flux énergétique « crête » reçu est $F_{Tc} = E_{Tc} \times A_T$ = 8.0 10^{-10} W

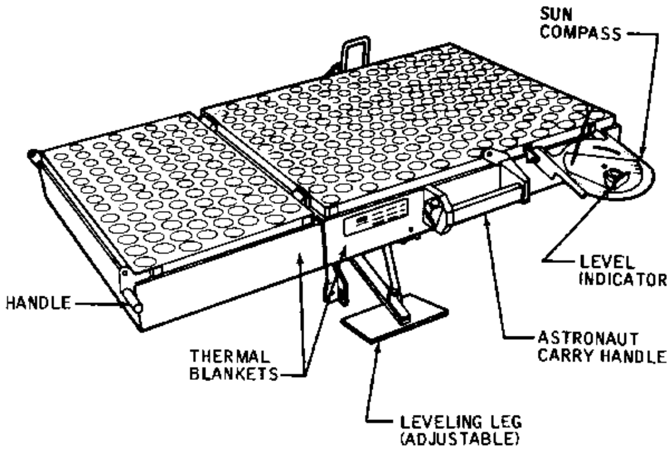
DS4.2.7- La lumière reçue est nettoyée de tous les lumières parasites avec un filtre passe-bande sélectif à λ = 532 nm ($\Delta\lambda$ = 0.12 nm) transmettant T_{max} = 0.6 = 60 % de la lumière verte reçue.
En sortie de filtre, l'énergie de la lumière reçue en retour pendant une durée d'impulsion τ est :
$U_r = F_{Tc} \times T_{max} \times \tau = 8.0\ 10^{-10} \times 0.6 \times 80\ 10^{-12} = 3.84\ 10^{-20}$ J

DS4.2.8- Le nombre moyen de photons vert d'énergie u reçu par impulsion émise est
$N_r = U_r / u = 3.84\ 10^{-20} / 3.74\ 10^{-19} \approx 0.1$ photons par impulsion
→ Il revient en moyenne 0.1 photon par impulsion tirée, soit un photon pour 10 tirs… **La mesure est évidemment impossible par ce procédé !**

Utilisation de rétro-réflecteurs lunaires

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

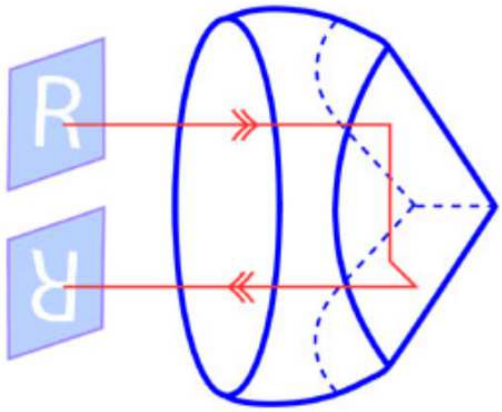




Conçu pour ne pas se déformer lors de changement important de température, le panneau est composé de N_{RR} = 300 réflecteurs « coin de cube » à réflexion totale, de diamètre D_{RR} = 3.8 cm
La surface utile du panneau est $A_{RR} = N_{RR} \times \pi (D_{RR} / 2)^2 = 0.34$ m²

DS4.2.9- Le flux « crête » reçu par le panneau est une fraction du flux reçu par le sol lunaire
$F_{RR} = F_{ec} \times A_{RR} / A_{sl} = 22.4$ W
$F_{RR} = 2.5\ 10^9 \times 0.34 / 3.8\ 10^7 = 22.4$ W
C'est aussi le flux « crête » renvoyé par le panneau puisque les coins sont à réflexion totale.

DS4.2.10- Le faisceau de retour vers la Terre a une divergence α_R = 12'' = 58 µrad, soit deux fois le demi-angle au sommet du cône !
Le rayon du spot de retour sur la surface terrestre est $R_{st} = d\ \tan(\alpha_R /2) = 10.4$ km et la surface du spot terrestre est $A_{st} = \pi R_{st}^2 = 3.4\ 10^8$ m^2



Rétro-réflecteurs à prime « coin de cube »

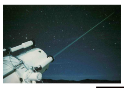
DS4.2.11- Le flux énergétique « crête » reçu sur la surface du miroir principal du télescope est en proportion de celui émis par le panneau
$F'_{Tc} = F_{RR} \times A_T / A_{st} = 1.2\ 10^{-7}$ W
L'énergie de la lumière reçue en retour à la sortie du filtre et pendant une durée d'impulsion τ est :
$U'_r = F'_{Tc} \times T_{max} \times \tau = 1.2\ 10^{-7} \times 0.6 \times 80\ 10^{-12} = 5.76\ 10^{-18}$ J

DS4.2.12- Le nombre moyen de photons vert d'énergie u reçu par impulsion émise est maintenant :
$N'_r = U'_r / u = 5.76\ 10^{-18} / 3.74\ 10^{-19} \approx 15.4$ photons par impulsion en moyenne (le nombre ne peut être physiquement que entier pour une impulsion donnée)

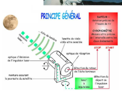
→ Il revient en moyenne 16 photons par impulsion : **La mesure est donc délicate mais faisable** (et faites en routine à l'OCA)

La Terre vue de la Lune

Sources des figures et des images :



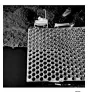
http://wwwrc.obs-azur.fr/cerga/lassat/lasersat.htm

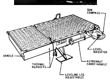
Moteur de recherche + « terre-Lune.pps » (sur site académique Aix-Marseille)

http://www.cnes.fr/automne_modules_files/standard/public/p5767_56e2c2eb9d1d089ee42430cf1a5889c7laserFS.gif

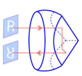
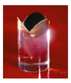
http://www.histoire-fr.com/mensonges_histoire_petit_pas.htm



http://physics.ucsd.edu/~tmurphy/apollo/lrrr.html



http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laser_Ranging_Retroreflector_Apollo_15.gif

Moteur de recherche + « terre-Lune.pps » (sur site académique Aix-Marseille)

http://jmm45.free.fr/articles/docslune/luneapol/levterrea.jpg