

Télémétrie Terre-Lune

0- Luminance en émission d'une surface lumineuse : L en $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$

- **Luminance L** (anciennement brillance ou luminosité) décrit le **détail des propriétés de la source** non homogène
- Luminance L = **intensité par unité de surface « apparente »** (c'est à dire perpendiculaire au rayon issu de la source)

$$dA_{s \text{ apparente}} = dA_s \cos \Theta_s \rightarrow L = \frac{dI}{dA_{s \text{ apparente}}} = \frac{dI}{dA_s \cos \Theta_s} \text{ en } \text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$$

- Le long de son trajet, la luminance sur une section d'un faisceau de lumière se conserve sauf s'il y a une atténuation décrite par le facteur de transmission du milieu $\mathfrak{T} \rightarrow$ on a $L_r = \mathfrak{T} L_s$
 \mathfrak{T} vaut évidemment 1 s'il n'y a pas de pertes !
- Un diffuseur « **lambertien** » (ou « orthotrope ») ne retransmet pas la totalité mais une fraction donnée, appelée « **facteur de réflexion** » \mathfrak{R} (ou « albédo ») ou « **facteur de transmission** » \mathfrak{T} , selon le cas.

$$\rightarrow \text{On a } L = \frac{\mathfrak{R}E}{\pi} \text{ en réflexion, } L = \frac{\mathfrak{T}E}{\pi}$$

en transmission pour un diffuseur lambertien avec $\mathfrak{T} < 1$ et $\mathfrak{R} < 1$

\rightarrow Si de plus la luminance L est constante alors

$$I = L A_s \cos \Theta_s \text{ (cf. graphe §3-)}$$



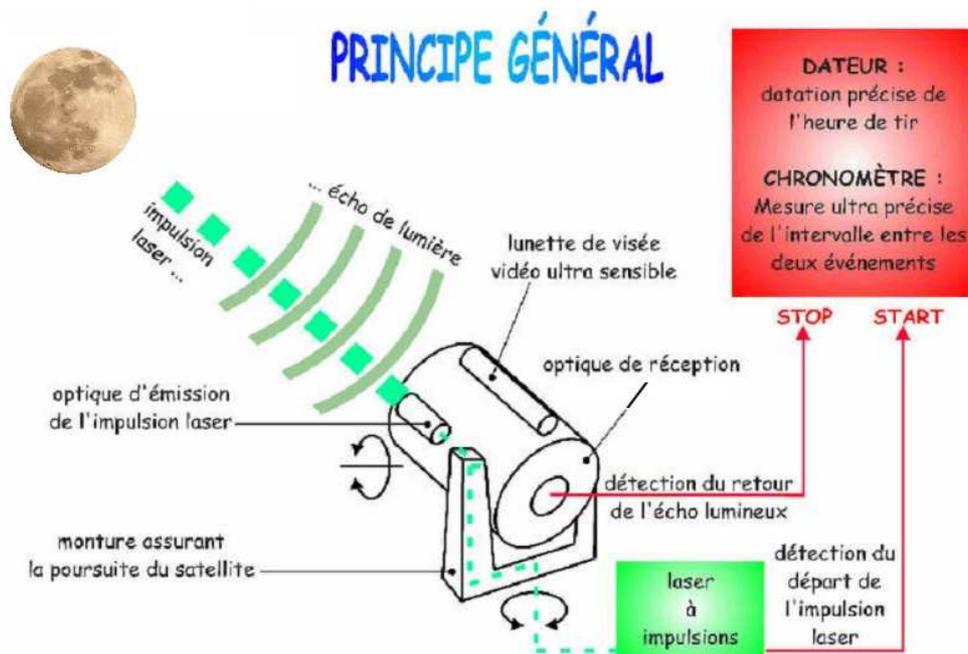
- Un **diffuseur « parfait »** (en transmission ou en réflexion) est une surface qui transmet ou réfléchit la totalité du flux incident avec une luminance uniforme sur un demi-espace, quelque soit la géométrie de l'éclairage.
 $\rightarrow \mathfrak{T} = \mathfrak{R} = 1$ pour un diffuseur parfait.

1- Application : faisabilité d'une télémétrie laser « Terre – Lune »

LLR pour « Lunar Laser Ranging »



Observatoire de la Côte d'Azur (OCA)
Plateau de Calern
Instrument MÉO (pour MÉtrologie Optique)



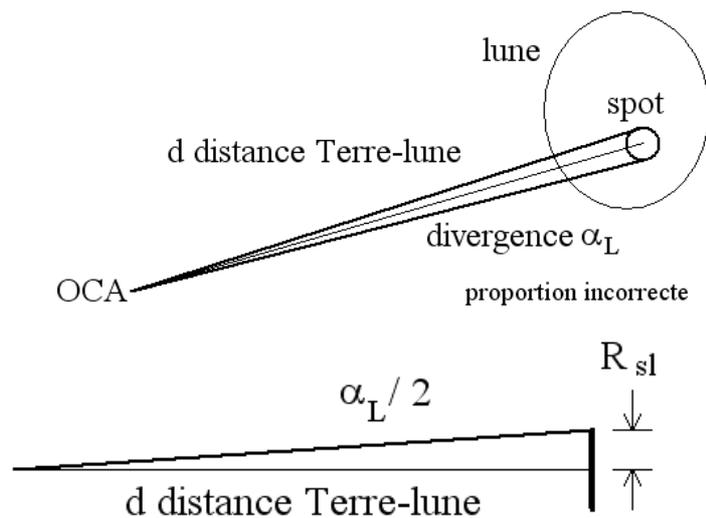
LASER de tir impulsionnel

- ✓ YAG IR 1062 nm dédoublé : $\lambda = 532$ nm vert
- ✓ Impulsion d'énergie $U = 0.2$ J
et de durée $\tau = 80$ ps = $80 \cdot 10^{-12}$ s toutes les $T_i = 0.1$ s
- ✓ Divergence du faisceau
 $\alpha_L = 4'' = (4 / 3600) \times (\pi / 180) = 19.4 \mu\text{rad}$
- Nombre de photons par impulsion
 $n_0 = U \lambda / h c = 5.3 \cdot 10^{17}$ photons par impulsion tirée
- Puissance moyenne du laser (= flux énergétique moyen)
 $= U / T_i = 2$ W
- Puissance crête pendant l'impulsion
(= flux énergétique crête) = $U / \tau = 2.5 \cdot 10^9$ W (!)



Eclairage du sol lunaire

- ✓ Distance Terre – lune = $3.6 \cdot 10^8 \text{ m} = 360\,000 \text{ km}$
- Rayon du spot lunaire
 $R_{sl} = d \tan(\alpha_L / 2) = 3.5 \text{ km}$
- Surface du spot lunaire
 $A_{sl} = \pi R_{sl}^2 = 3.8 \cdot 10^7 \text{ m}^2$
- Eclairement « crête » sur le sol lunaire du au spot laser :
 $E_l = P_c / A_{sl} = 65.3 \text{ W.m}^{-2}$



Rétrodiffusion du sol lunaire vers le télescope terrestre

- ✓ Le sol poussiéreux rétrodiffuse mal :
facteur de réflexion $\Re = 7\% = 0.07$
- ✓ Diamètre du télescope (type Cassegrain)
 $D_T = 1.54 \text{ m}$
- ✓ Transmission du filtre de sélection à λ
 $T_{\max} = 0.6 = 60\% (\Delta\lambda = 0.12 \text{ nm})$



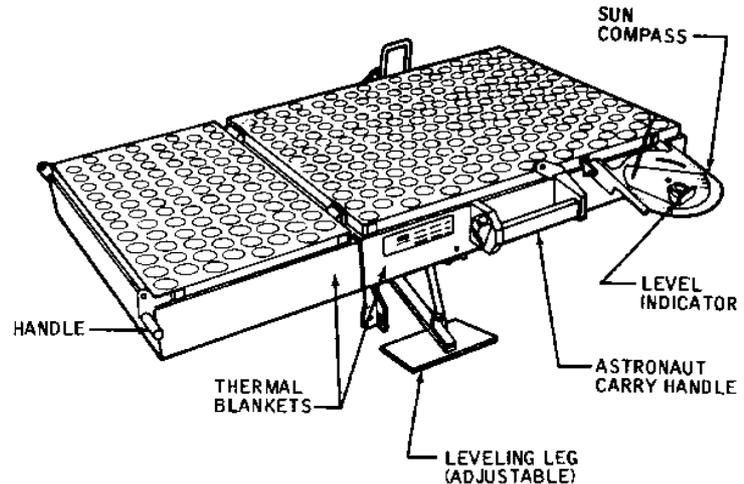
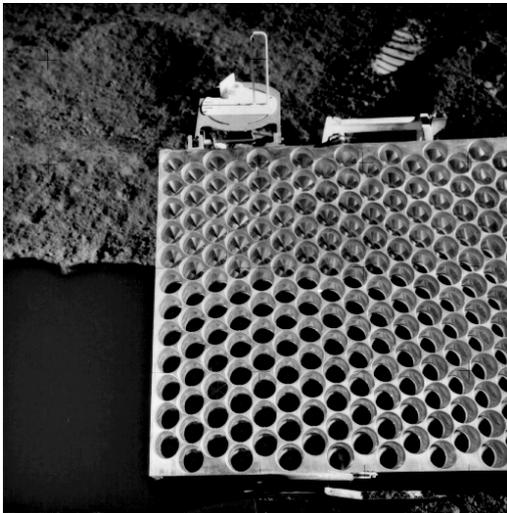
Trace de pas de Neil Armstrong
20 juillet 1969

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

- Luminance du sol lunaire due au spot
 $L_{sl} = \frac{\Re E_l}{\pi} = 1.46 \text{ W.m}^{-2}$
 - Intensité rétrodiffusée par le sol lunaire
 $I_{sl} = L_{sl} \times A_{sl} = 5.5 \cdot 10^7 \text{ W.sr}^{-1}$
 - A l'échelle astronomique le spot lunaire est quasi ponctuel vu du télescope terrestre. Le théorème de Bouguer donne l'éclairement au niveau du télescope :
 $E_T = I_{sl} \times \cos(\theta) / d^2 = 4.3 \cdot 10^{-10} \text{ W.m}^{-2}$
 - Surface du télescope $A_T = \pi (D_T / 2)^2 = 1.86 \text{ m}^2$
 - Flux énergétique « crête » reçu par le miroir d'entrée du télescope
 $F_T = E_T \times A_T = 8.0 \cdot 10^{-10} \text{ W}$
 - Flux photonique « crête » reçu $F_p = F_T \times \lambda / hc = 2.9 \cdot 10^9 \text{ photons/s}$
 Nombre de photons revenus et détectés par impulsion
 $n = F_p \times T_{\max} \times \tau = 0.1 \text{ photon pour une impulsion tirée !}$
- Il revient en moyenne 0.1 photon par impulsion tirée, soit un photon pour 10 tirs... **La mesure est évidemment impossible par ce procédé !**

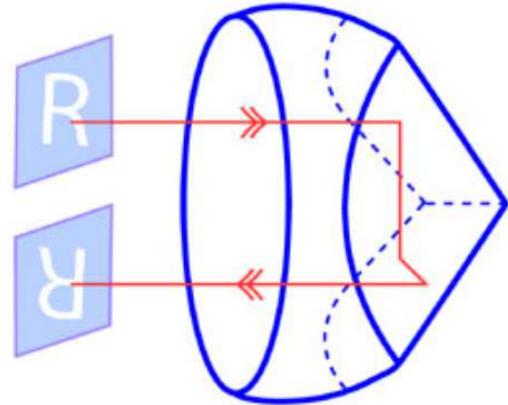
Utilisation de rétro-rélecteurs lunaires

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

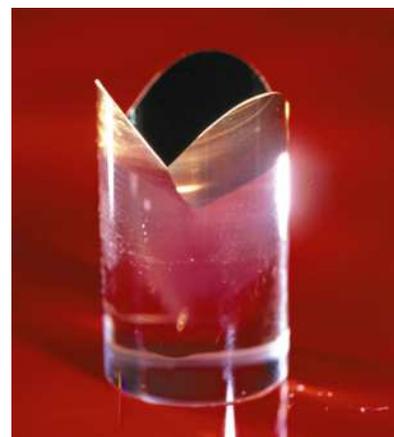


Panneau composé de N_{RR} 300 réflecteurs « coin de cube » en quartz, de diamètre $D_{RR} = 3.8$ cm en structure « nid d'abeille », conçu pour ne pas se déformer lors des changements importants de température ($N_{RR} = 100$ pour Apollo 11).

- ✓ Panneaux de $N_{RR} = 300$ réflecteurs « coin de cube » à réflexion totale.
- ✓ Retour du faisceau vers la Terre avec une divergence limitée à $\alpha_R = 12'' = (12 / 3600) \times (\pi / 180) = 58 \mu\text{rad}$
- ✓ Diamètre d'un rétro-rélecteur $D_{RR} = 3.8$ cm
- ✓ Retour du faisceau vers la Terre avec une divergence limitée à $\alpha_R = 12'' = (12 / 3600) \times (\pi / 180) = 58 \mu\text{rad}$
- ✓ Diamètre d'un rétro-rélecteur $D_{RR} = 3.8$ cm



- Surface des rétro-rélecteurs $A_{RR} = N_{RR} \times \pi (D_{RR} / 2)^2 = 0.34 \text{ m}^2$
- Puissance = Flux énergétique « crête » reçu par les rétro-rélecteurs $P_{RR} = P_c \times A_{RR} / A_{sl} = 22.4 \text{ W}$



Rétro-rélecteurs à prime « coin de cube »

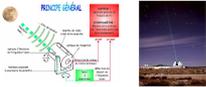
- Du fait de la divergence du faisceau réfléchi, la lumière repart dans un cône d'angle au sommet $\alpha_R = 58 \mu\text{rad}$,
soit un angle solide $\Omega_R \approx \pi \alpha_R^2 = 1.0 \cdot 10^{-9} \text{ sr}$
- Rayon du spot de retour sur la surface terrestre $R_{\text{st}} = d \tan(\alpha_R/2) = 10.4 \text{ km}$
- Surface du spot terrestre $A_{\text{st}} = \pi R_{\text{st}}^2 = 3.4 \cdot 10^8 \text{ m}^2$
- Flux énergétique « crête » reçu sur la surface du miroir principal du télescope
 $F'_T = P_{\text{RR}} \times A_T / A_{\text{st}} = 1.2 \cdot 10^{-7} \text{ W}$
- Flux photonique « crête » reçu par le télescope
 $F'_p = F'_T \times \lambda / h c = 3.3 \cdot 10^{11} \text{ photons/s}$
- Nombre de photons revenus et détectés par impulsion
 $n' = F'_p \times T_{\text{max}} \times \tau = 16 \text{ photons par impulsion tirée !}$

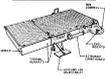
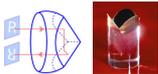
→ Il revient en moyenne 16 photons par impulsion : **La mesure est donc délicate mais faisable** (et faites en routine à l'OCA)



La Terre vue de la Lune

Sources des figures et des images :

- 
<http://www.czeryba.com/maison/wp-content/uploads/2008/07/fenetre-verre-depoli.jpg>
- 
<http://wwwrc.obs-azur.fr/cerga/lasat/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>

Sommaire

TELEMETRIE TERRE-LUNE.....	1
0- Luminance en émission d'une surface lumineuse : L en $W.m^{-2}.sr^{-1}$	1
1- Application : faisabilité d'une télémétrie laser « Terre – Lune ».....	2
Sources des figures et des images :.....	7
Sommaire.....	7