



Institut
Pierre
Simon
Laplace



Lidar Géophysique

Fondamentaux Lidar (2/2)

Pierre H. Flamant

Institut Pierre Simon Laplace

Laboratoire de Météorologie Dynamique

École Polytechnique, Palaiseau

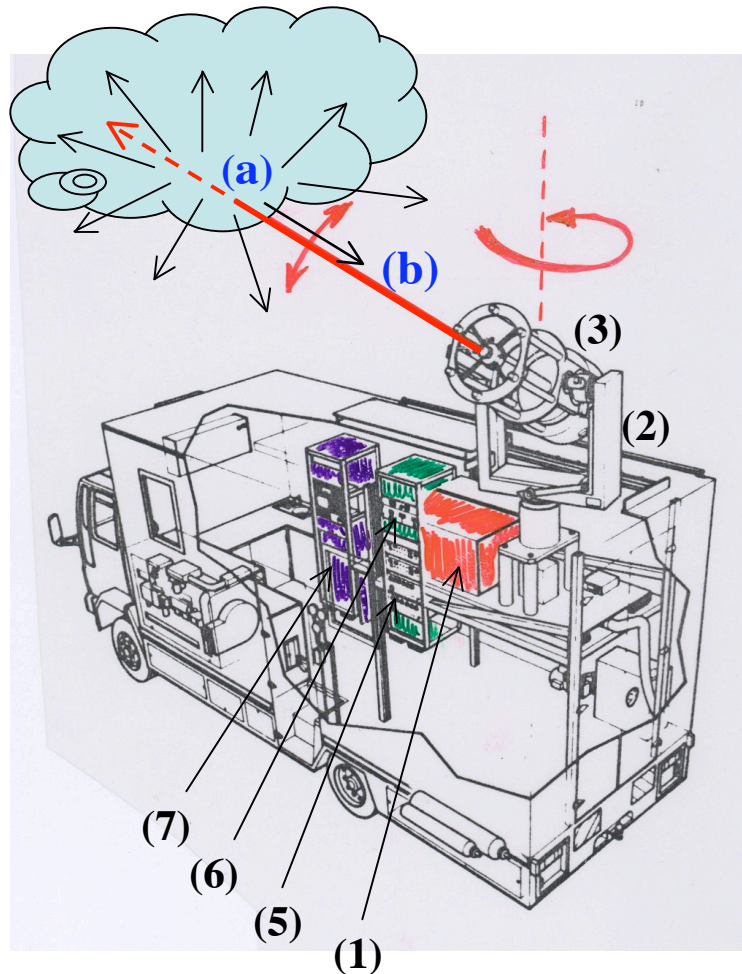
Courriel: pierre.flamant@lmd.polytechnique.fr

Téléphone: 01 69 33 51 50



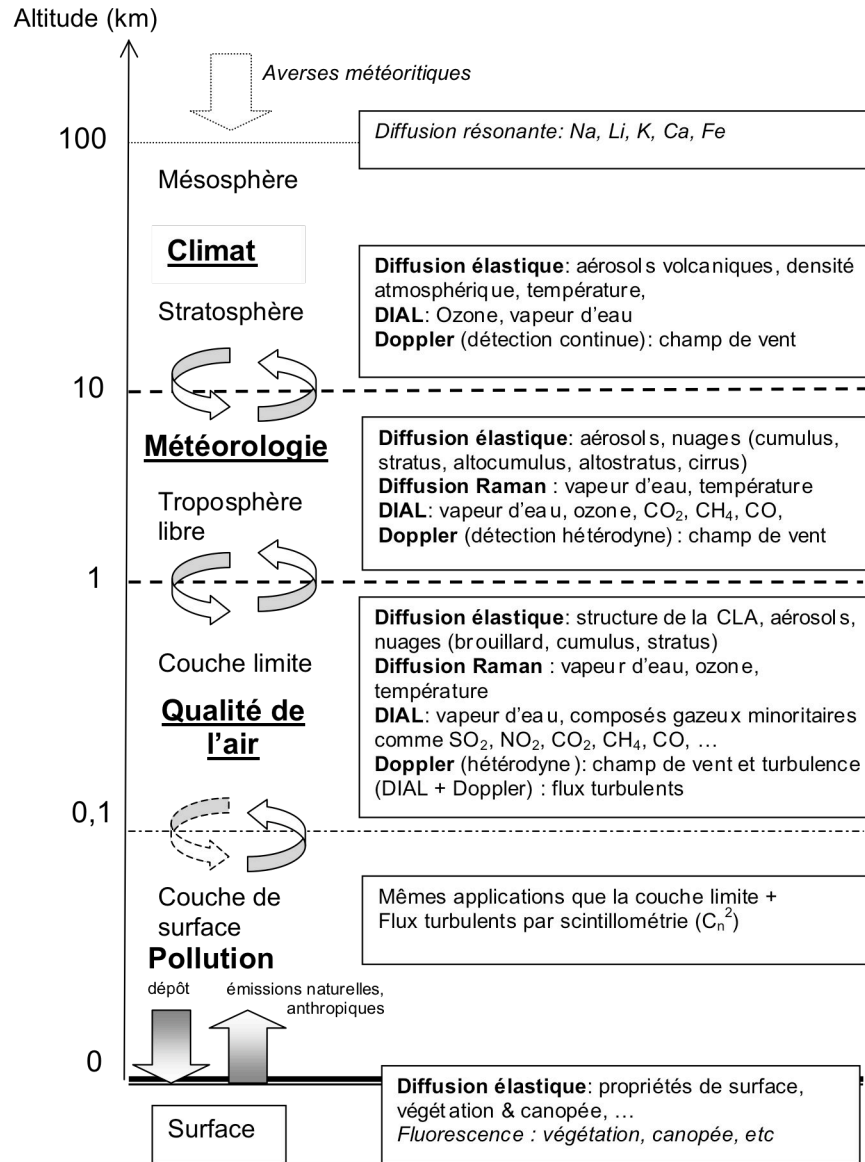
Méthodes Lidar Appliquées à l'Atmosphère

Principe du Lidar Atmosphérique



La technique Lidar implique :

- Un émetteur LASER (1) à émission pulsée ou continue
- La Propagation (a) de la lumière laser dans l'atmosphère \rightarrow la lumière est atténuée par diffusion et absorption par les molécules et particules sur le trajet du faisceau \rightarrow on définit une Transmission pour la longueur d'onde Laser utilisée
 La lumière Laser est diffusée dans toutes les directions (atténuation) et une petite fraction (b) est renvoyée dans la direction d'émission \rightarrow coefficient de diffusion pour le volume diffusant (lui même délimité par le faisceau laser ...)
- Un système opto-mécanique (2) pour diriger la ligne de visée et échantillonner l'atmosphère
- Un télescope de réception (3)
- Une optique associée (4) pour recevoir et filtrer la lumière diffusée pour fournir un Signal Lidar Optique : Sopt
- Un photo-détecteur associé à une électronique (5) pour convertir le Signal Lidar Optique en Signal Lidar Électrique: Selc
- Un Convertisseur Analogique-Numérique (6) pour fournir un Signal Lidar Numérique: Snum, utilisé par la suite pour des traitements et des analyses ultérieures
- Un ensemble informatique avec un ordinateur (7) pour le traitement du signal en temps réel, les affichages, le stockage les données, etc ...





Lidar Atmosphériques

Lidar rétrodiffusion élastique. Le signal lidar contient indistinctement les diffusions moléculaires et particulaires pour les longueurs d'onde UV et visible

- Lidar rétrodiffusion élastique avec diversité de **polarisation**
- Lidar rétrodiffusion élastique à **Haute Résolution Spectrale**

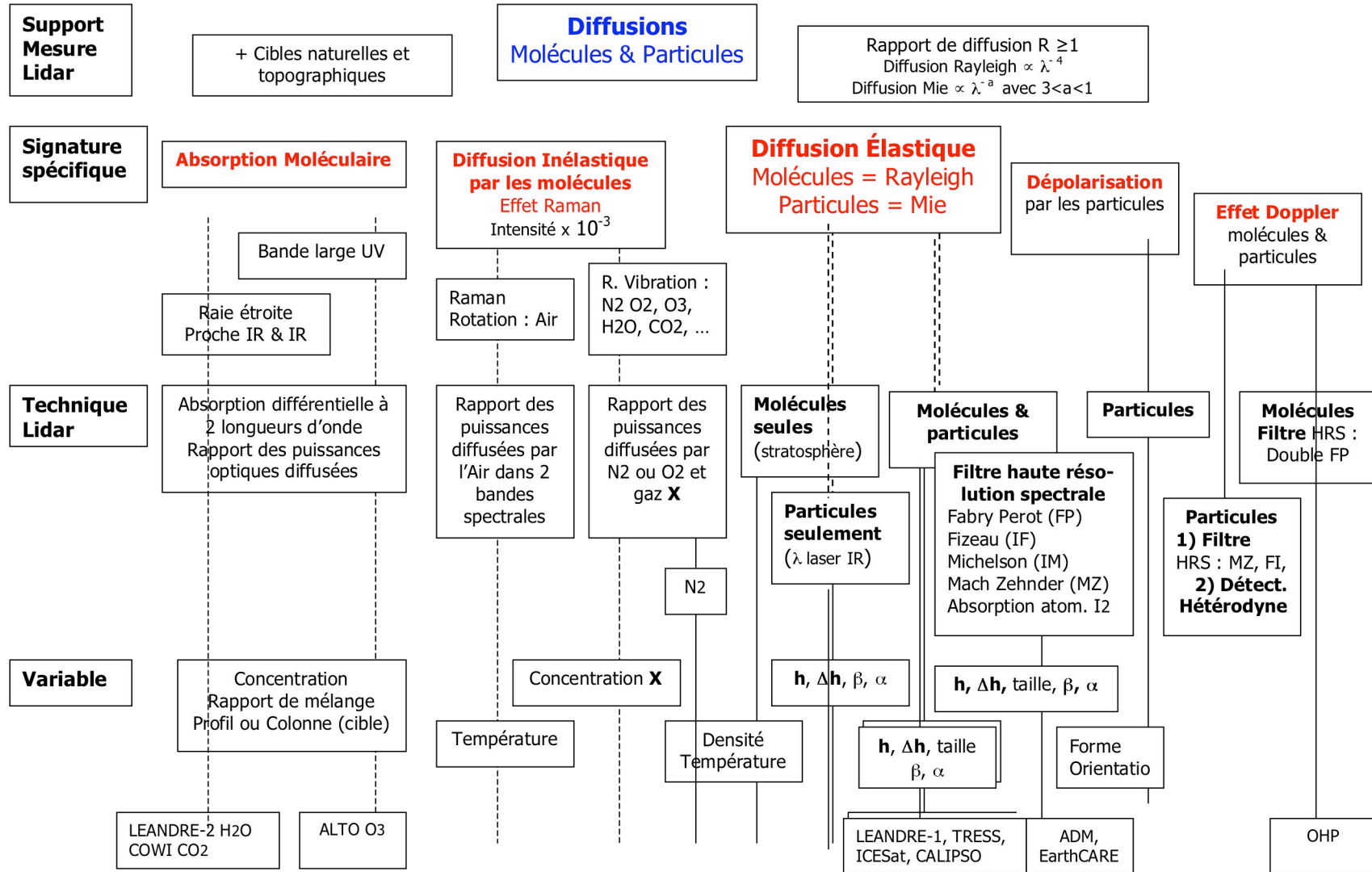
Lidar rétrodiffusion inélastique Raman

- vibrationnelle Stokes par N_2 et O_2
- vibrationnelle Stokes par H_2O , O_3
- rotationnelle Stokes et/ou anti-Stokes par les molécules N_2 et O_2

Absorption Différentielle résolue ou en contenu intégré
Lidar rétrodiffusion émettant à **2 longueurs d'onde spécifiques**

Effet Doppler. Lidar rétrodiffusion émettant une raie laser étroite très stable

Lidar Atmosphériques



LIDAR « RÉTRODIFFUSION »

Les lidar « rétrodiffusion » est le plus simple à mettre en oeuvre.

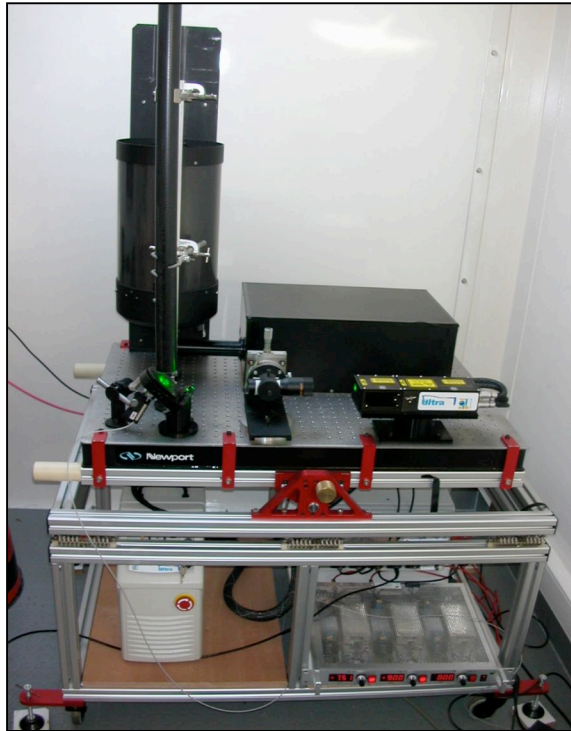
Le lidar rétrodiffusion mesure la puissance du rayonnement optique « rétrodiffusé » par les particules (et les molécules) de l'atmosphère. Le signal Lidar est fonction de la “réflectivité” des couches atmosphériques traversées par le faisceau Laser et de l'atténuation du rayonnement optique le long des trajets aller et retour (transmission)

La “réflectivité” de l'air est elle-même fonction de la concentration en « cibles » rétrodiffusantes et du pouvoir réflecteur de chaque cible (section efficace). Les cibles sont les particules d'aérosol, les hydrométéores (les cristaux de glace des cirrus en particulier) et les molécules d'air elles-mêmes.

Les lidars rétrodiffusion sont utilisés pour étudier les nuages semi-transparents de haute altitude, les aérosols et la couche limite atmosphérique.

Ils ne permettent pas une mesure directe d'une variables physico-chimiques

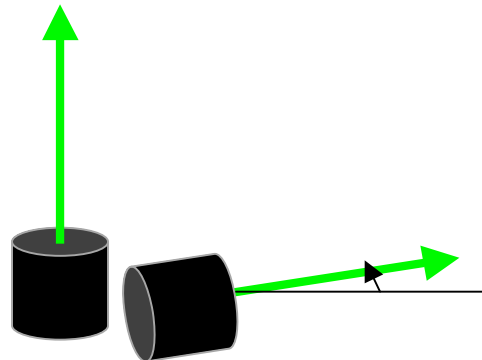
MINI-LIDAR



- Laser:
Nd-YAG, 30 mJ, 20Hz, 0,6 mrad
- Téléscope:
Cassegrain, 20 cm, 2 mrad
- Détection: 5 canaux
355 nm, **532 nm** //, \perp ,
- **1064 nm et 607 nm (Raman)**
- Acquisition des signaux A/D :
12 bit, 50 Ms/s

Visée verticale :

- Aérosols
- Nuages



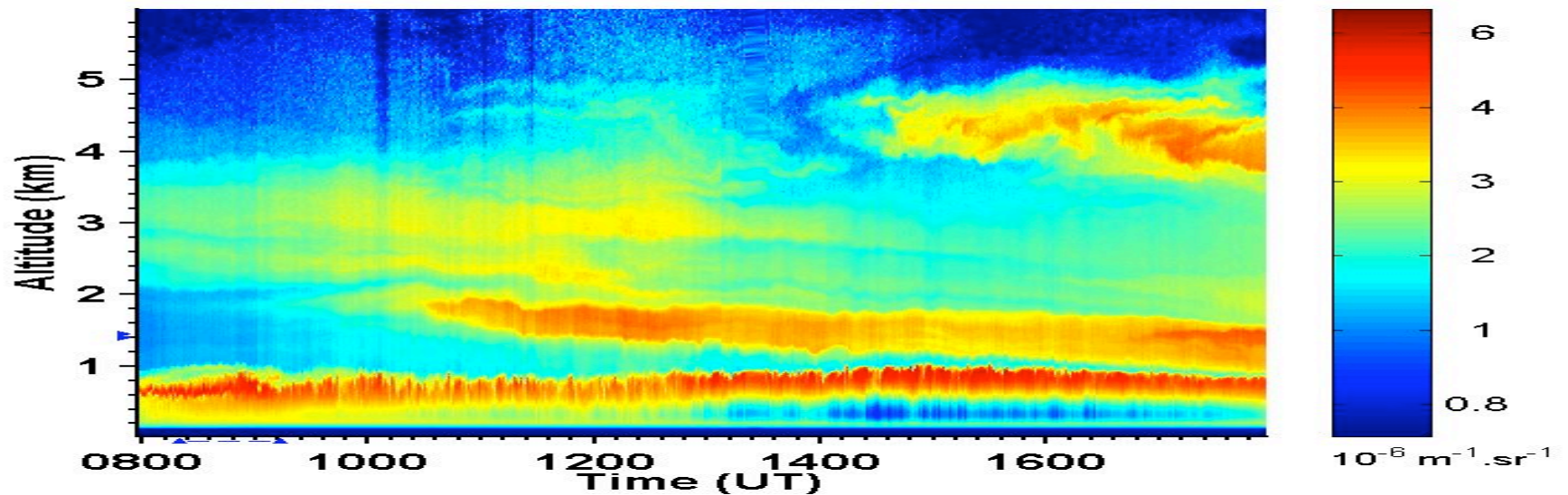
Attention sécurité oculaire !

Caractéristiques du mini-lidar

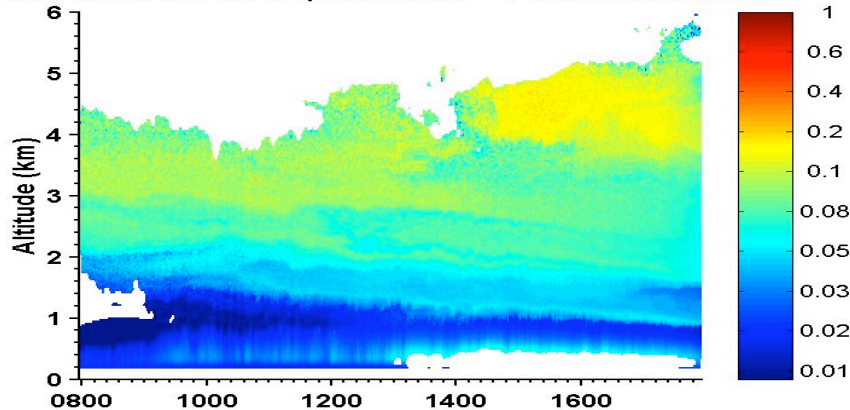
| | | | |
|---------------------------|----------------------------------|--|---|
| Emetteur laser | Nd-YAG | | |
| | $\lambda_\ell = 532 \text{ nm}$ | $E = 30 \text{ mJ}$ par impulsion | Multimodes, polarisé |
| | $\lambda_\ell = 1064 \text{ nm}$ | $E = 15 \text{ mJ}$ par impulsion | Multimodes, polarisé |
| | Durée d'impulsion | $t_\ell = 7 \text{ ns}$ | |
| | Divergence | $\theta_\ell = 0,5 \text{ mrad}$ | Réglable par afocal (x 3) |
| | Fréquence de répétition | $F_\ell = 20 \text{ Hz}$ | |
| Télescope | Schmidt - Cassegrain | Diamètre = 20 cm | |
| | Champ de vue | $\theta_t = 1 \text{ mrad}$ | Réglable pour alignement |
| Cube polariseur | 532 nm | efficacité de séparation > 99 % | |
| Filtre interférentiel | 532 nm 1064 nm 607 nm | $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$ $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$ $\Delta\lambda = 2,5 \text{ nm}$ | Indispensable pour réjection du signal élastique à 532 nm pour les mesures de nuit |
| Détection et Numérisation | 532 nm 1064 nm 607 nm | photomultiplicateur photodiode (APD) photomultiplicateur | CAN, $N_U = 8 \text{ bits}$, $F_e = 50 \text{ MHz}$ ($\Delta r = 3 \text{ m}$) CAN, $N_U = 8 \text{ bits}$, $F_e = 50 \text{ MHz}$ Comptage photons, $F_e = 1 \text{ MHz}$ ($t_c = 1 \mu\text{s}$, $\Delta r = 150 \text{ m}$) |

- Intrusions des poussières sahariennes à Palaiseau:

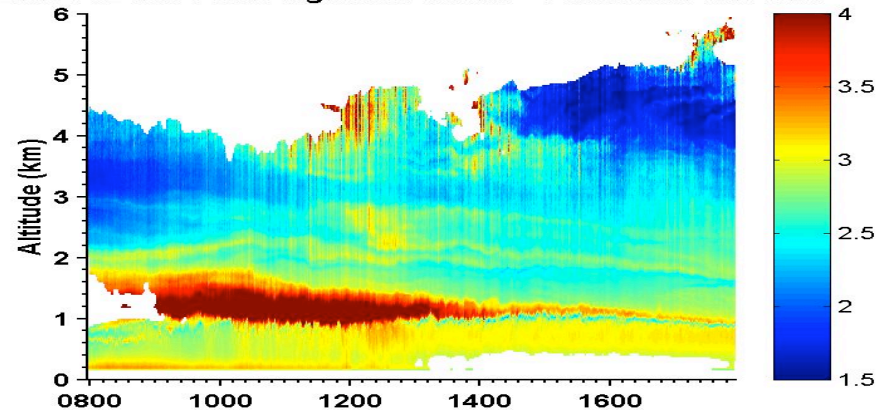
Mini Lidar 532nm Apparent Backscat.- Palaiseau 07/05/03



Mini-Lidar 532 nm Depolar. Ratio - Palaiseau 07/05/03

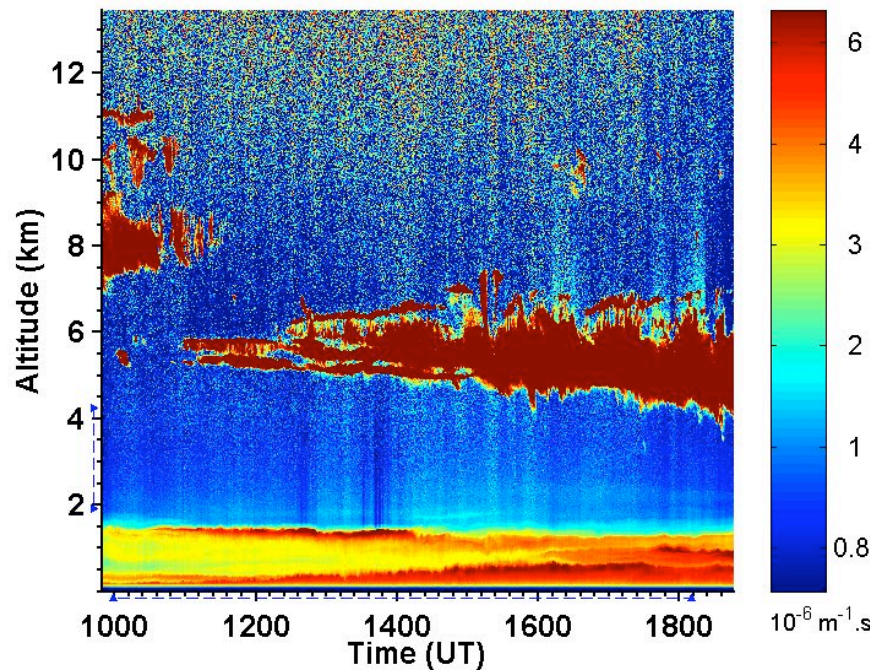


LNA 532-1064 nm Angstrom Coeff. - Palaiseau 07/05/03

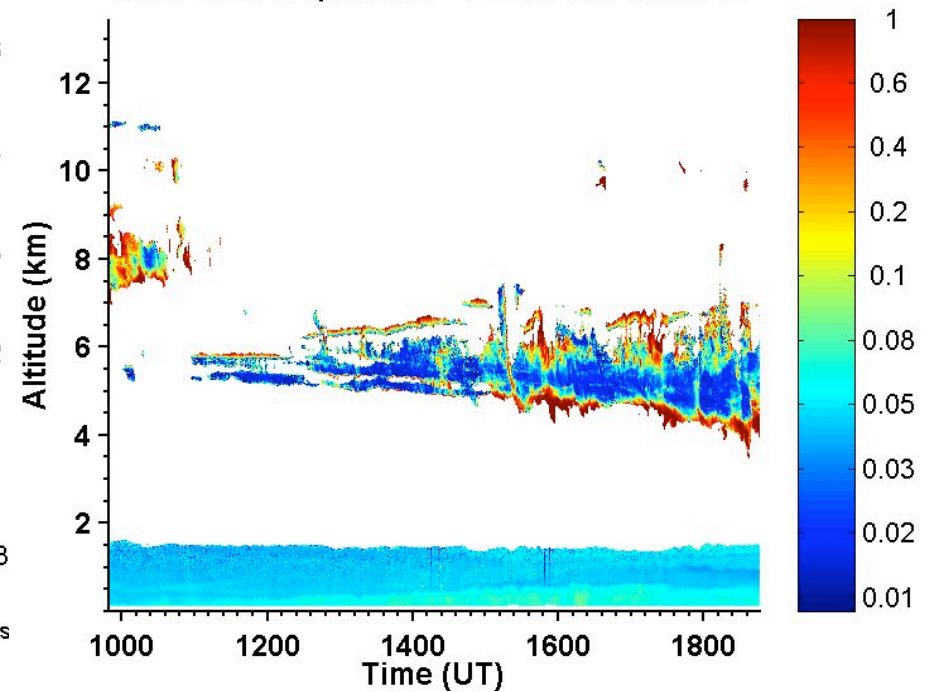


- Nuages de gouttelettes d'eau et de cristaux de glace:

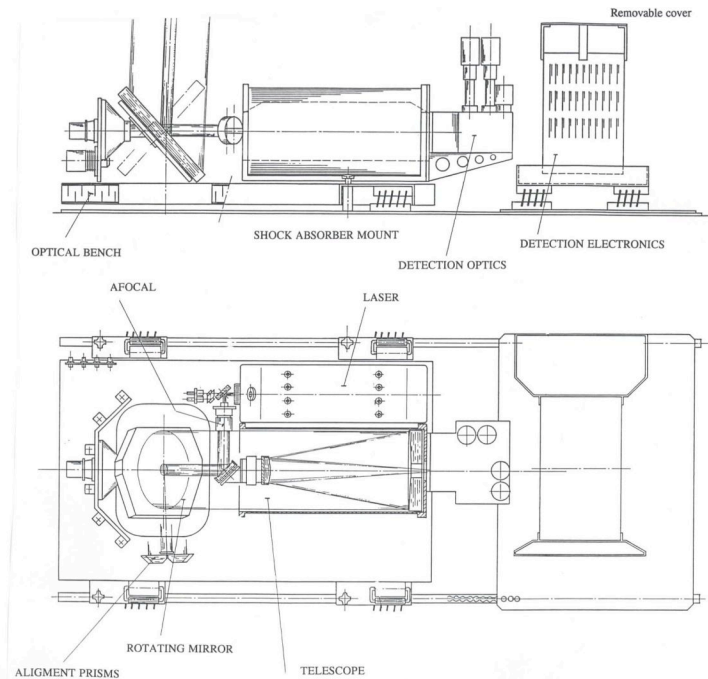
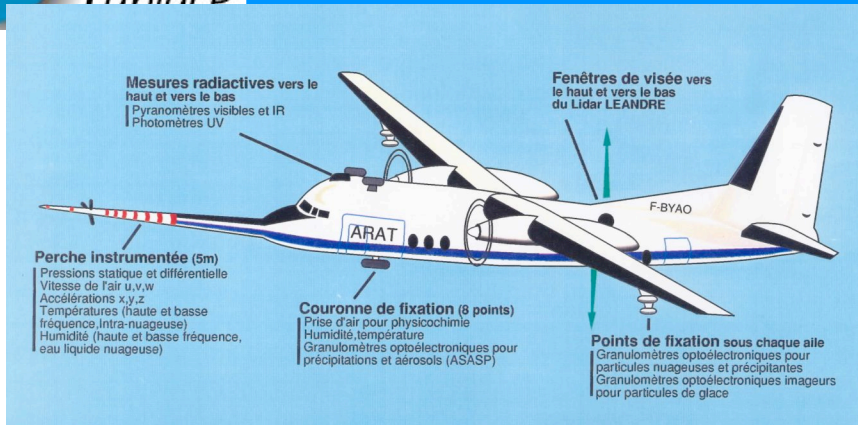
Mini Lidar 532nm Apparent Backscat.- Palaiseau 13/10/03



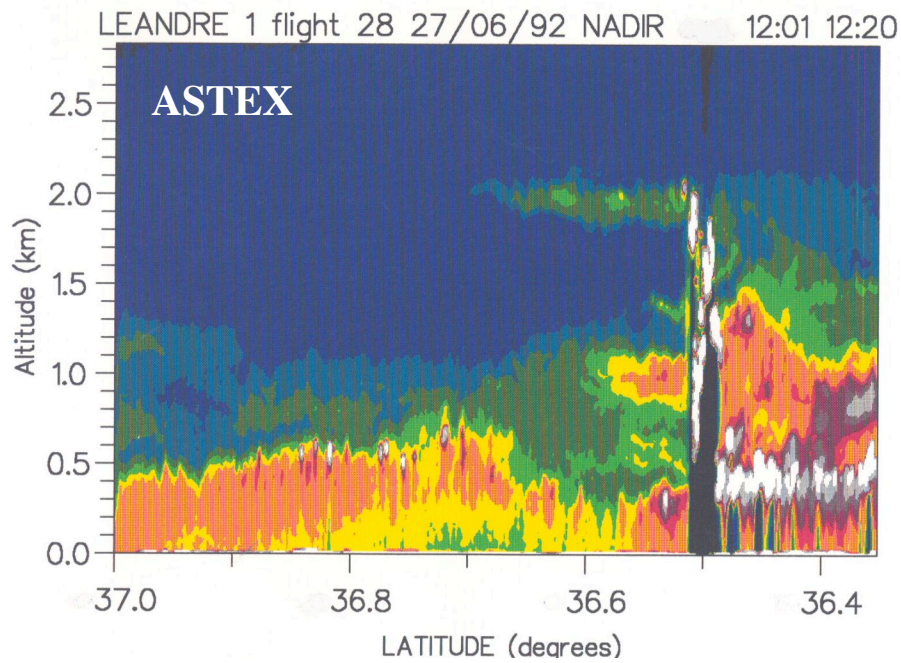
Mini-Lidar Depol.ratio - Palaiseau 13/10/03



LEANDRE-1: AÉROSOLS & NUAGES



⇒ Premières observations pendant PYREX en 1990



⇒ Chef de projet: M. Meissonnier



AÉROSOLS VOLCANIQUES

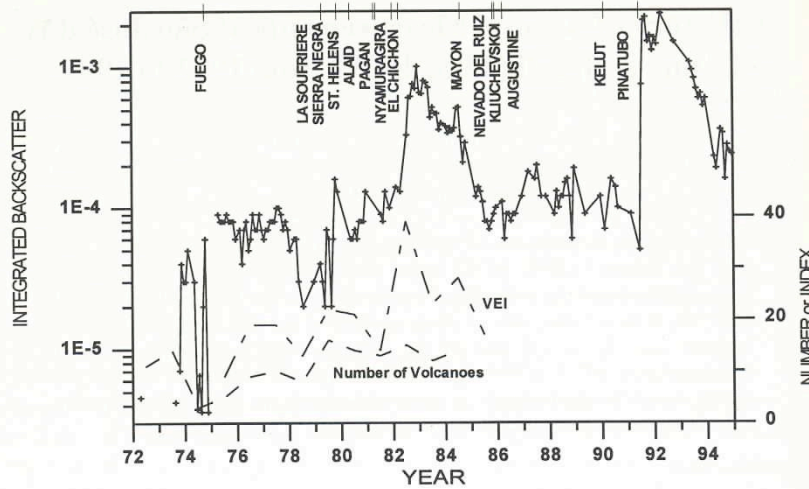
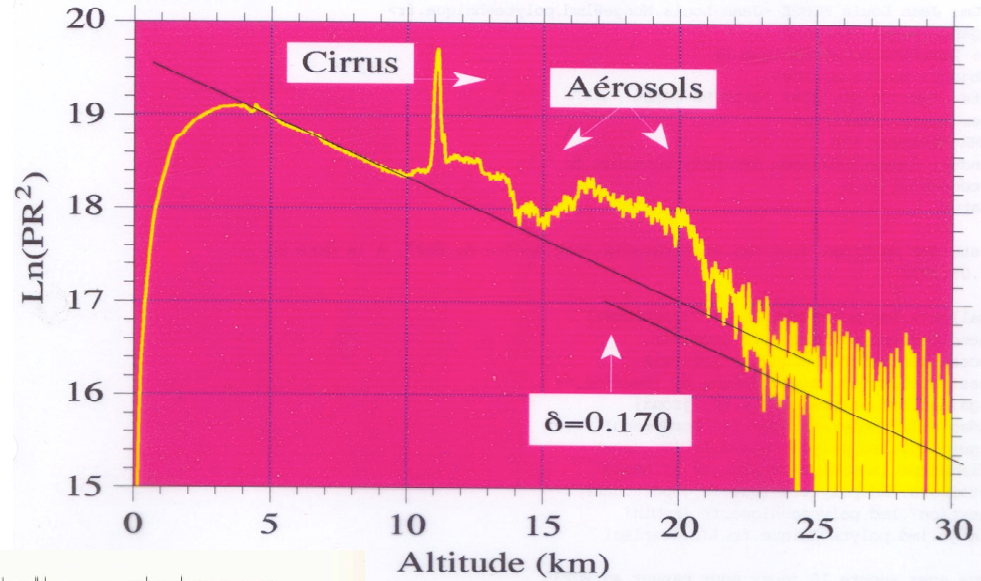


Figure 1 The integral from 17 to 35 km of the monthly averaged backscatter function versus time.



INVERSION DE L'ÉQUATION LIDAR

La mesure Lidar fournit une seule équation à 2 inconnues : β et α ,

$$P_L(r)r^2 = K_L \beta(r) \exp\left[-2 \int_0^r \alpha(y)dy\right]$$

Une seconde équation est nécessaire. Elle utilise une relation entre la diffusion et l'extinction :

$$\beta_\pi(r) = k \alpha(r)$$

Pour les molécules $k = 0,12 \text{ sr}^{-1}$, est indépendant des coordonnées spatiales

En reportant (2) dans (1)

$$P_L(r)r^2 = K_L k \alpha(r) \exp\left[-2 \int_0^r \alpha(y)dy\right]$$

C'est une équation transcendante (qui contient une fonction exponentielle) que l'on ne peut pas résoudre de manière algébrique. Les méthodes algébriques analytiques ne s'appliquent qu'à des fonctions polynomiales

En conséquence, on peut utiliser :

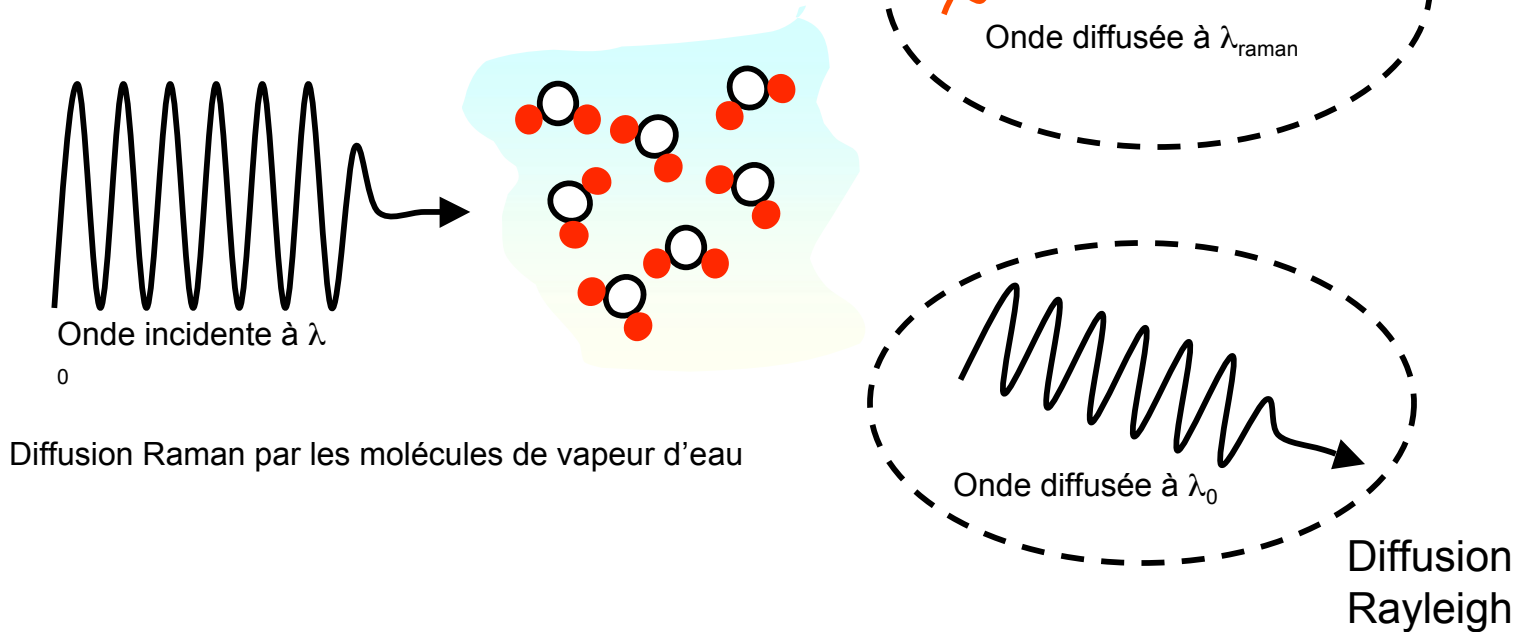
- (1) une méthode numérique itérative par approximations successives,
- (2) des méthodes simples dans des conditions particulières rencontrées dans la pratique,
- (3) une méthode analytique utilisant une équation différentielle ou une équation intégrale

Lidar Raman



- Les lidars Raman ciblent une molécule particulière. Le principe est d'émettre dans une gamme de longueur d'onde susceptible de donner lieu à une diffusion « inélastique » forte
- Le rayonnement diffusé a une longueur d'onde plus grande que celle du laser, le décalage est caractéristique de la molécule cible.
- On peut ainsi remonter à la **concentration** des molécules diffusantes.
- La diffusion Raman peut être utilisée pour des mesures de **concentrations d'espèces minoritaires (humidité, gaz, particules) ou température.**
- Les premières expériences ont été conduites à la fin des années 70.

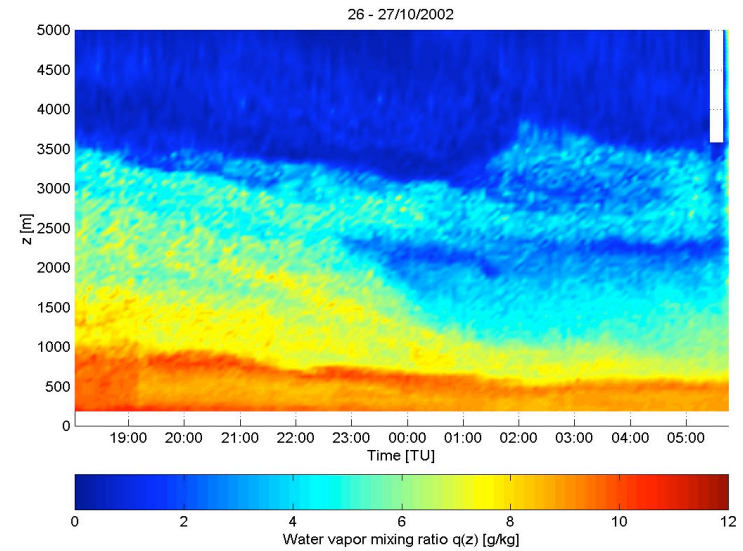
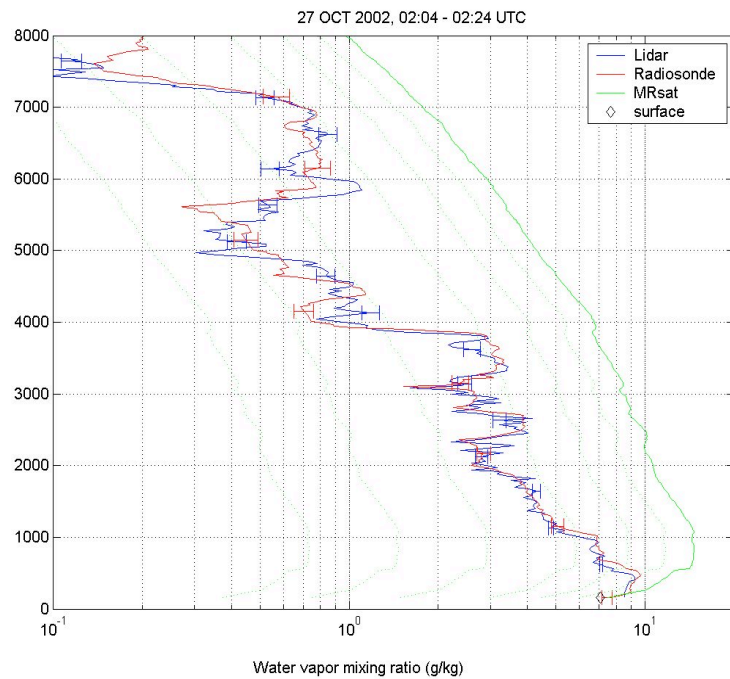
Lidar Raman

➔ Mesure basée sur le processus de diffusion Raman découvert en 1928



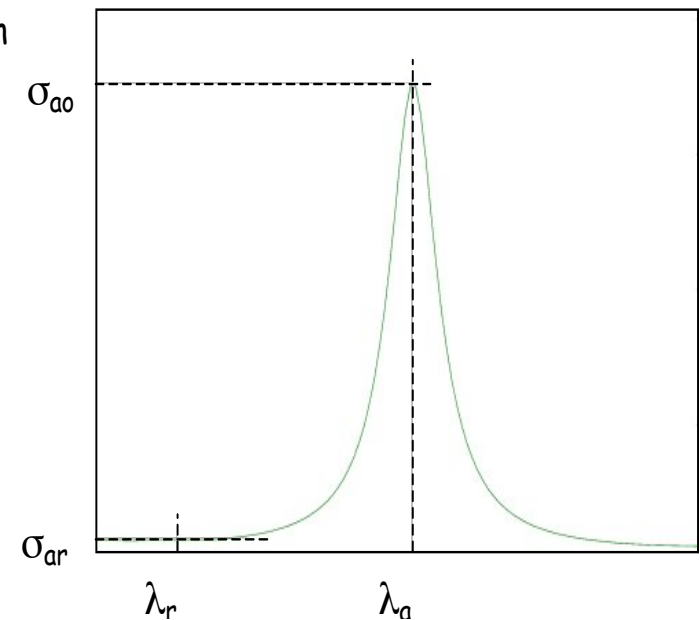
➔ Décalage en fréquence spécifique à la molécule diffusante

| | | | | |
|---|------------------|-----------------------------------|----------------------------|---|
|  | H ₂ O | décalage= 3652 cm ⁻¹ | $\lambda_0 = 355 / 532$ nm | $\lambda_{\text{Raman}} = 407 / 660,3$ nm |
|  | N ₂ | décalage= 2330,1 cm ⁻¹ | $\lambda_0 = 355 / 532$ nm | $\lambda_{\text{Raman}} = 386,7 / 607,3$ nm |



- **Méthode Absorption Différentielle**
- La méthode DIAL est utilisée pour des mesures de concentrations de composés gazeux.
- Deux longueurs d'onde Laser sont émises séquentiellement, la lumière diffusée est reçue par un seul photo détecteur
- Raie d'absorption : vapeur d'eau, CO₂, ...
- Transition de vibration-rotation dans l'infrarouge.
- Une longueur d'onde λ_0 est centrée sur le maximum de la raie d'absorption, l'autre longueur d'onde λ_r est placée hors absorption (si possible) pour être utilisée comme référence. La raie d'absorption est choisie en fonction de plusieurs critères, notamment sa section efficace et le niveau d'énergie le plus bas pour limiter si nécessaire la dépendance avec la température sur la gamme de distance de mesures

Section efficace d'absorption



$$\sigma_a(\lambda) = \sigma_{a0} f(\lambda - \lambda_0)$$

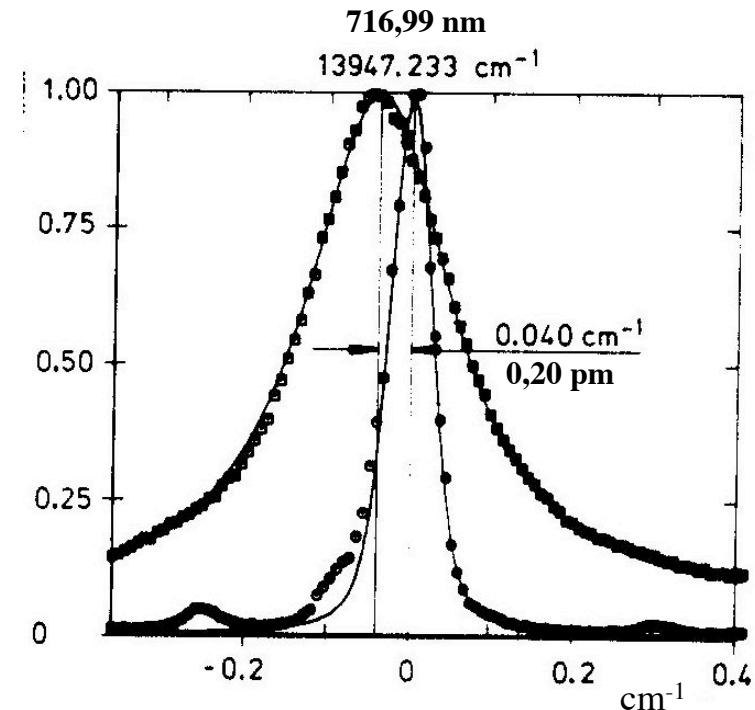
Pour les spectres de raies, la grandeur pertinente est la force de raie $S(T)$ qui est fonction de la température

Les raies d'absorption sont élargies par effet Doppler et par pression, la largeur de raie est fonction de la température et de la pression

La section efficace d'absorption est fonction de la fréquence (ou de la longueur d'onde)

Les raies présentent des profils gaussiens à basses pressions (stratosphère et haute troposphère), et des profils lorentziens pour des pressions voisines d'une atmosphère.

De manière générale, les raie d'absorption ont un profil dit de « Voigt » qui est la convolution d'un profil gaussien et d'un profil lorentzien.



Le coefficient d'absorption α_a est le produit de la section efficace par la concentration N_i :

$$\alpha_a(\lambda) = \sigma_a(\lambda) N_i$$

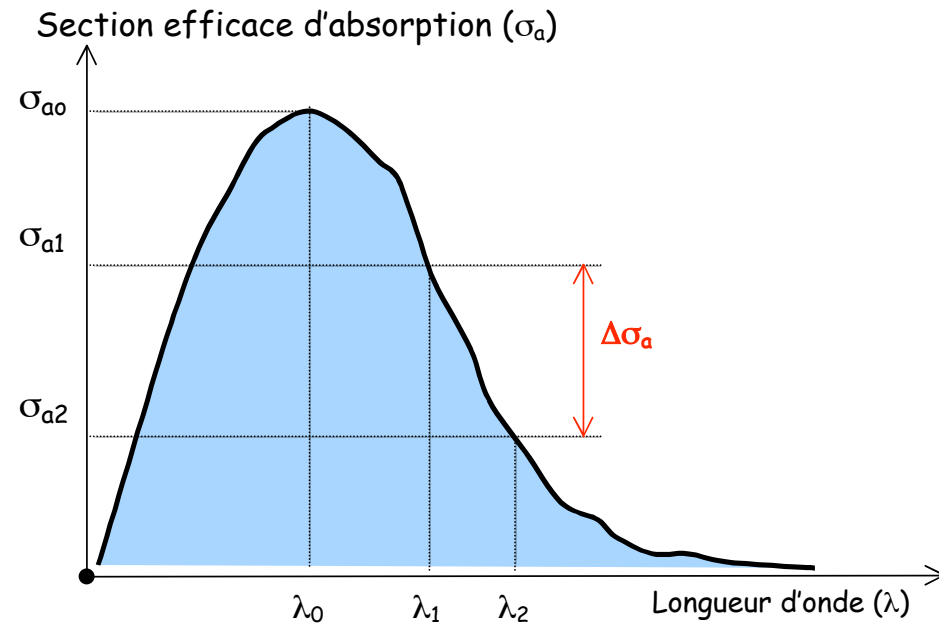
Spectre Électronique

Absorption en bande large

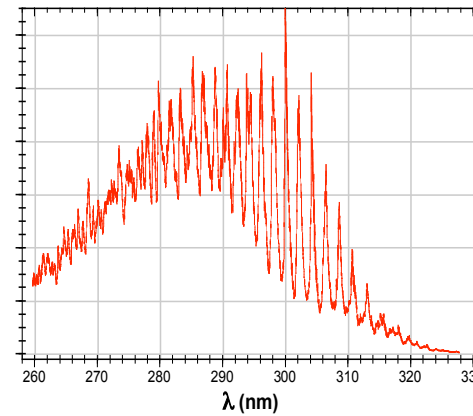
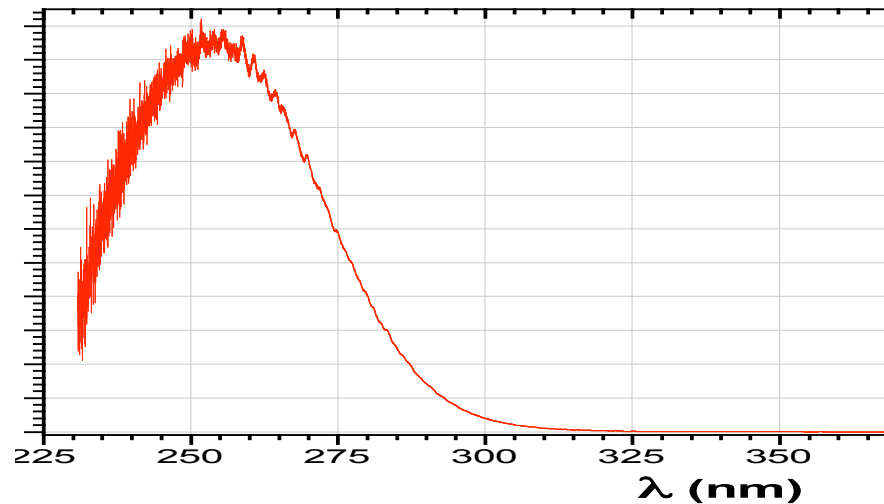
- Bande d'absorption : Ozone, NO_2 , SO_2 ,
- Les 2 longueurs d'onde λ_1 et λ_2 correspondent à une différence d'absorption connue :

$$\Delta\sigma_a$$

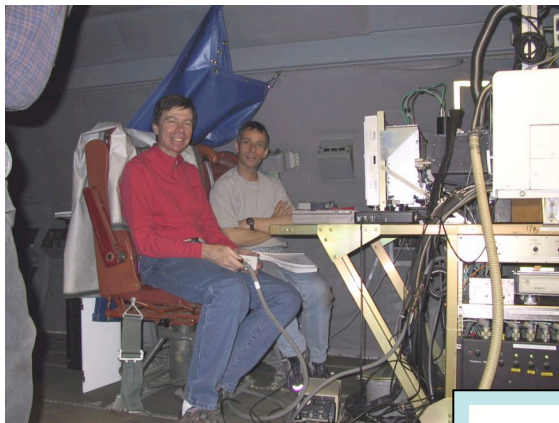
- Base de donnée spectroscopiques : GEISA (LMD), HITRAN



- Spectres d'absorption dans l'ultra violet : O_3 et SO_2 . Les 2 spectres se recouvrent en partie !
- Le phénomène d'interférence spectrale est fréquent dans le domaine visible et ultraviolet.



LEANDRE-2: DIAL VAPEUR D'EAU



D. Bruneau & F. Blouzon

Nouveau **Laser Alexandrite** bi-impulsions et bi-longueurs d'onde pour les applications DIAL



Airborne Ozone Lidar: ALTO

UV DIAL O3 vertical profile:
 266/289/316 nm

Range: 0.5 - 7 km (aircraft)
 0.3 - 5 km (ground)

Vertical resolution: 300 m at 1 km
 1000 m at 7 km

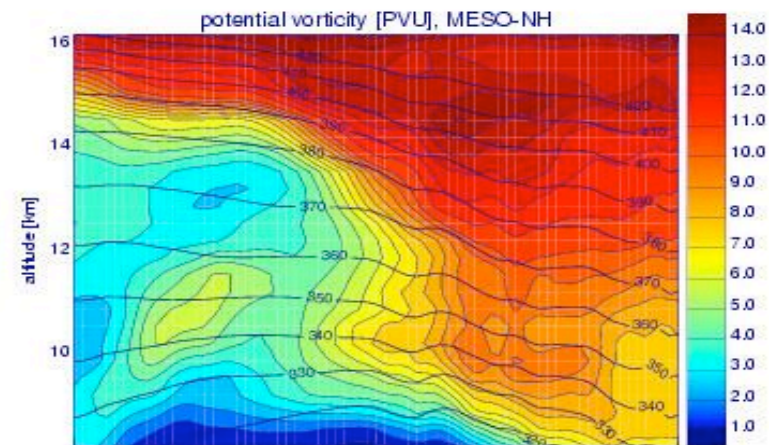
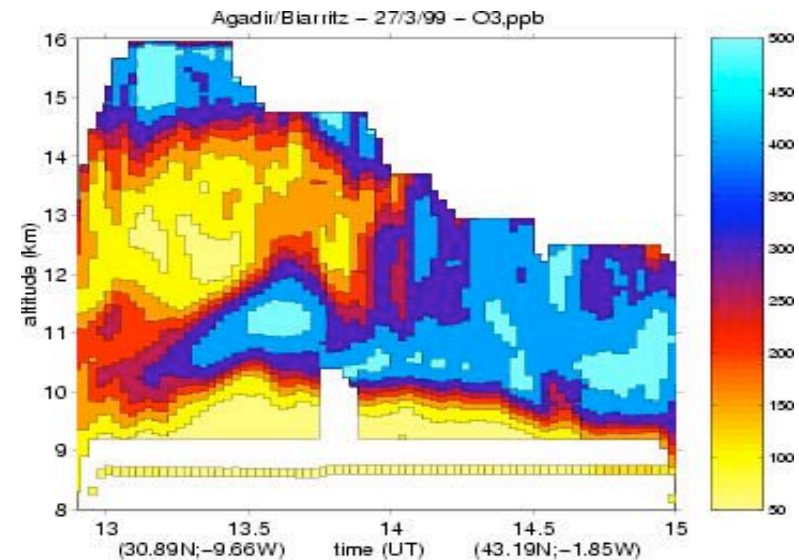
Sampling time: 3 min.

O3 accuracy: 5-7 ppb

Aerosol backscatter at 316 nm

STE campaigns: TOASTE-96 and
 97, TRACAS-99, PICO3-2000

Pollution campaigns: PIPAPO-98,
 ESQUIF-99, EXPORT-2000,
 ESCOMPTE-2001



flight track: Agadir / Biarritz
 March 27, 1999

Depuis 2003: CO₂ atmosphérique Lidar Absorption Différentielle et Doppler

Paris

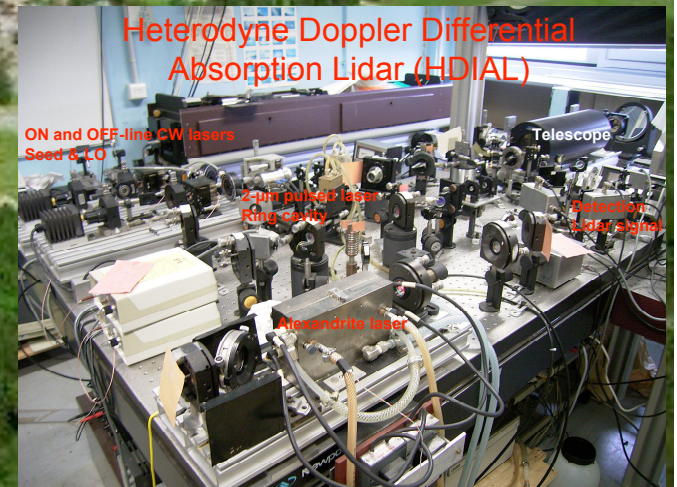
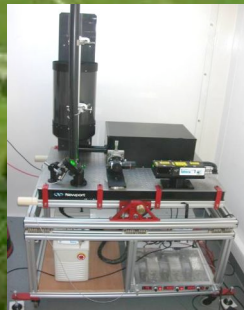
Step 2: Vertical
CO₂ mixing
ratio HDIAL in
the troposphere

Step 1: Horizontal
CO₂ mixing ratio

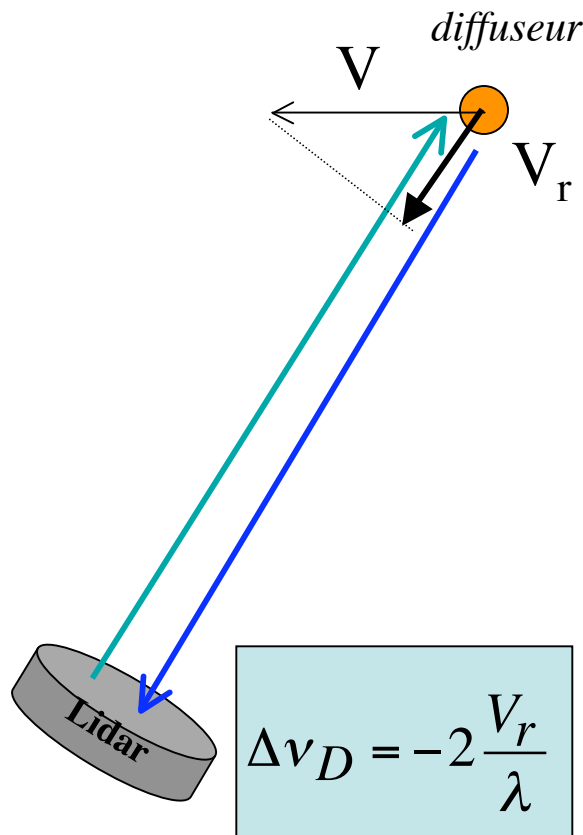
IPSL/LMD
HDIAL

TReSS

Routine *in situ* measurements
at IPSL/LSCE 5 km away



Effet Doppler



- Changement en fréquence par effet Doppler de la lumière diffusée.
- Le changement de fréquence relatif est proportionnel au rapport de la vitesse radiale du diffuseur suivant la ligne de visée divisée par la vitesse de la lumière. La fréquence augmente pour les vitesses comptées comme négatives lorsqu'elles sont dirigées vers l'observateur (le Lidar) :

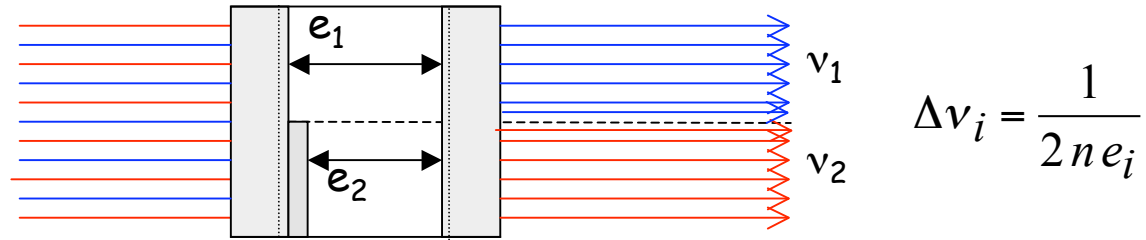
$$\frac{\Delta\nu_D}{\nu_l} = -\frac{V_r}{c}$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad \Delta\nu_D = -\frac{V_r}{\lambda}$$

- La mesure Lidar implique 2 changements de fréquence successifs : (1) entre le Laser et le diffuseur, (2) entre le diffuseur et le télescope
- **Application numérique** : vitesse radiale $V_r = -10 \text{ m s}^{-1}$, longueur d'onde Laser $\lambda = 10 \text{ }\mu\text{m}$. Le changement de fréquence par effet Doppler est égal à 6 MHz. Comme la fréquence Laser est égale à $3 \cdot 10^{13} \text{ Hz}$, le **changement relatif est d'environ 10^{-7} (!!!)**.

Lidar Doppler avec Détection directe

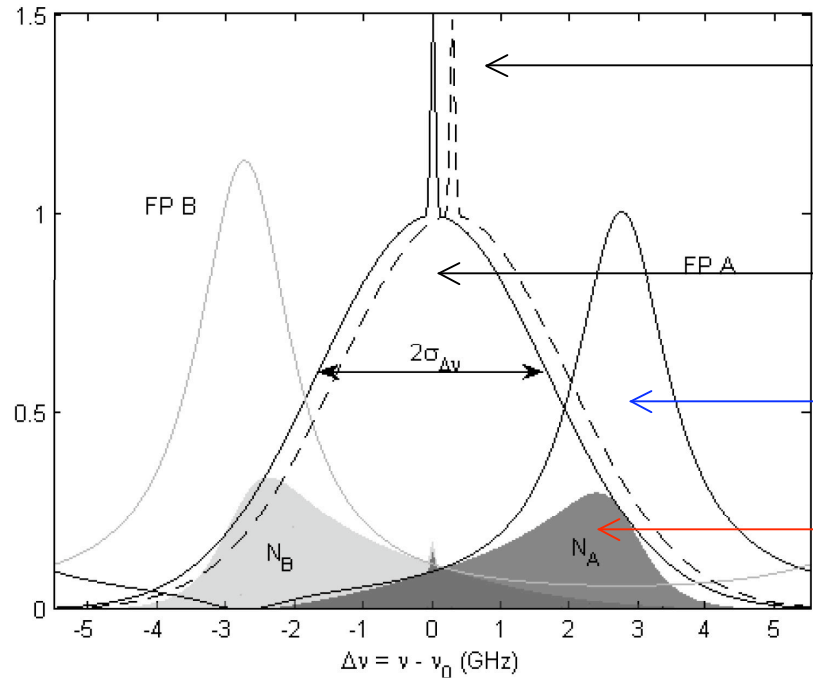
Diffusion moléculaire & Double Fabry Perot



Élargissement Doppler de la raie diffusée par les molécules

La largeur de la raie laser est négligeable
 La raie diffusée est beaucoup plus large que le déplacement de fréquence Doppler

$$\Delta \nu_{Dop} = K \frac{(N_A - N_B)}{(N_A + N_B)}$$



Diffusion Mie par les particules

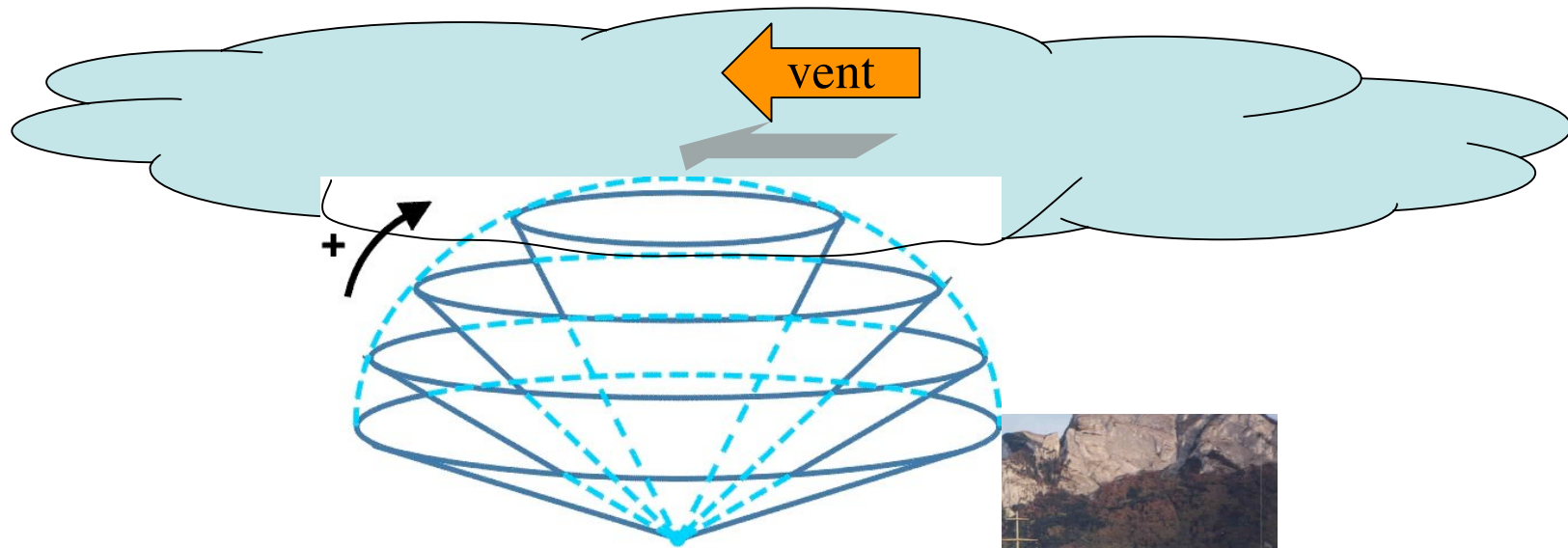
Diffusion Rayleigh par les molécules

Filtres FP

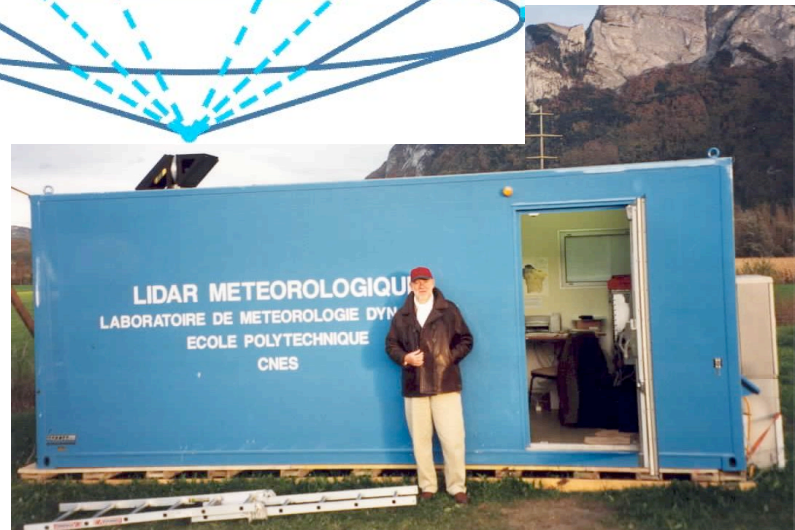
Signaux lidar

Lidar Doppler Transportable

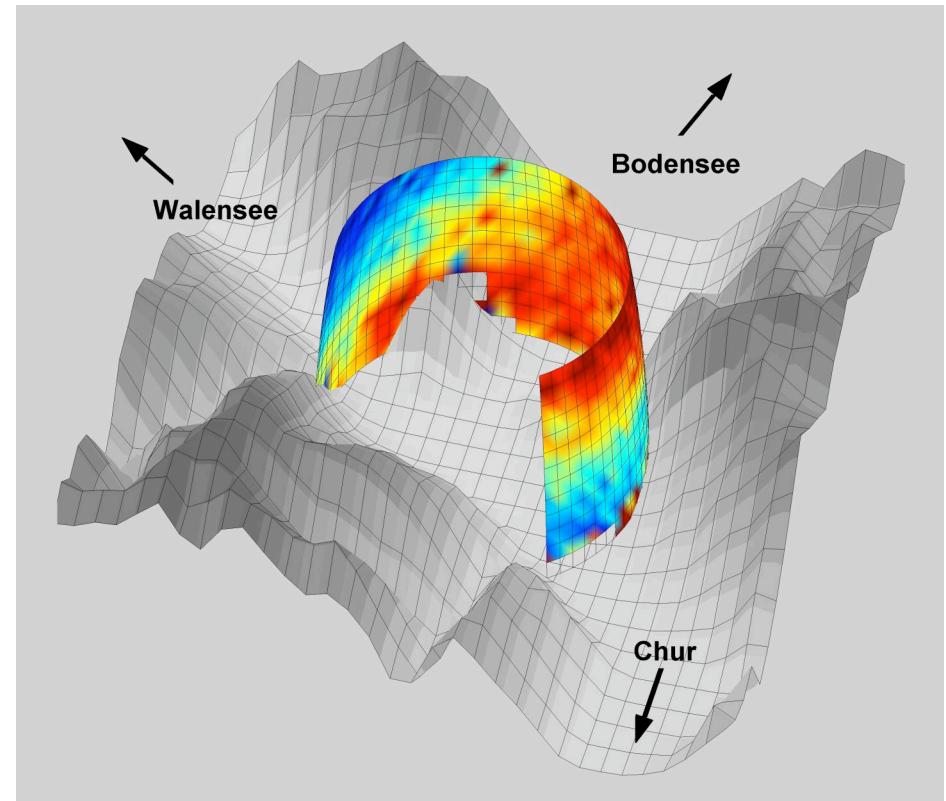
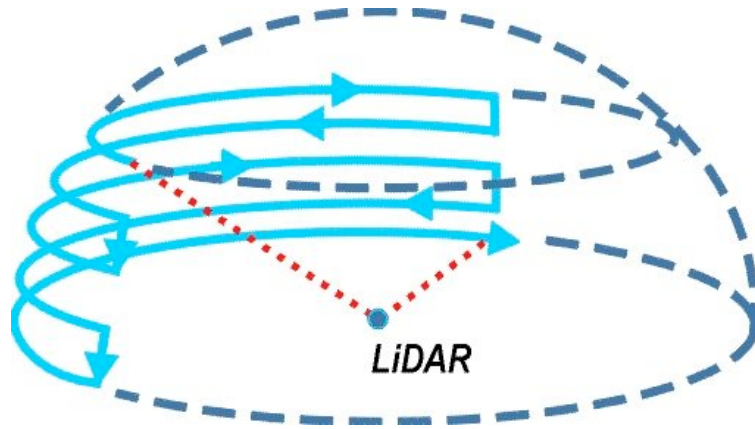
Lidar 10 μm -détection hétérodyne



- Le vent est caractérisé par sa vitesse : en module, direction et sens (\pm)
- Mesure directe de vitesse par effet Doppler

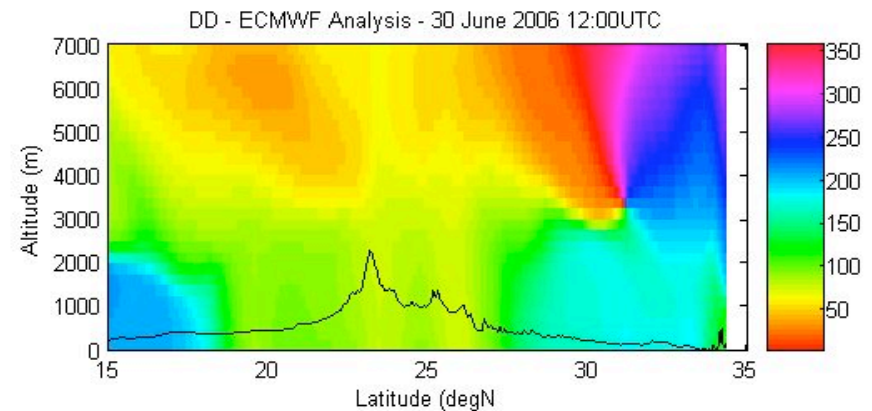
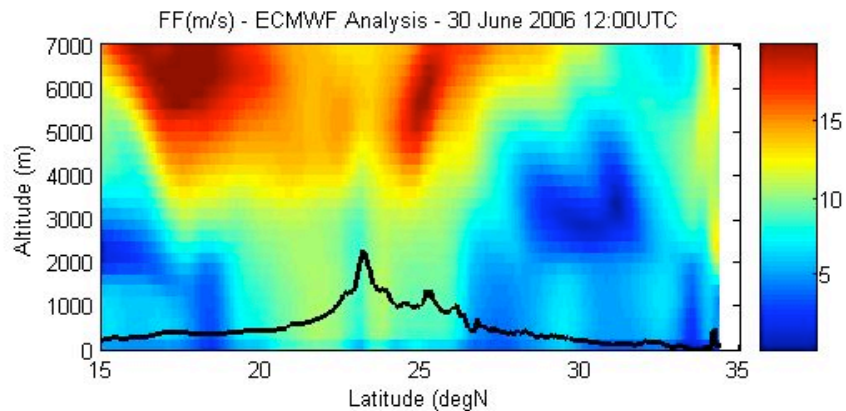
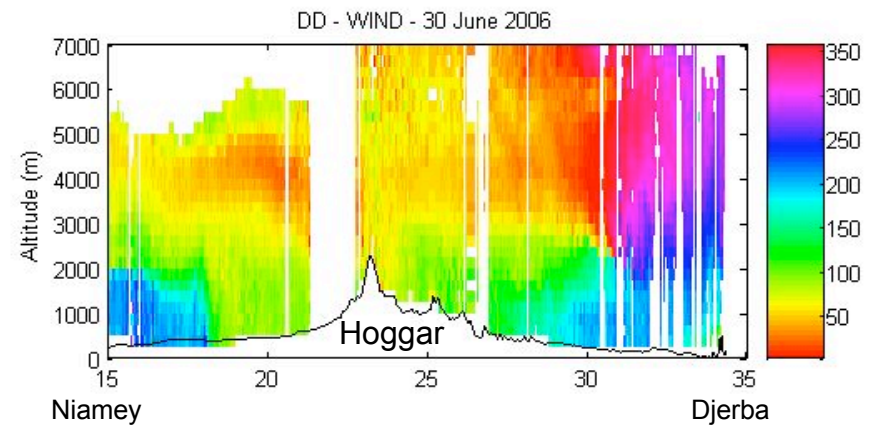
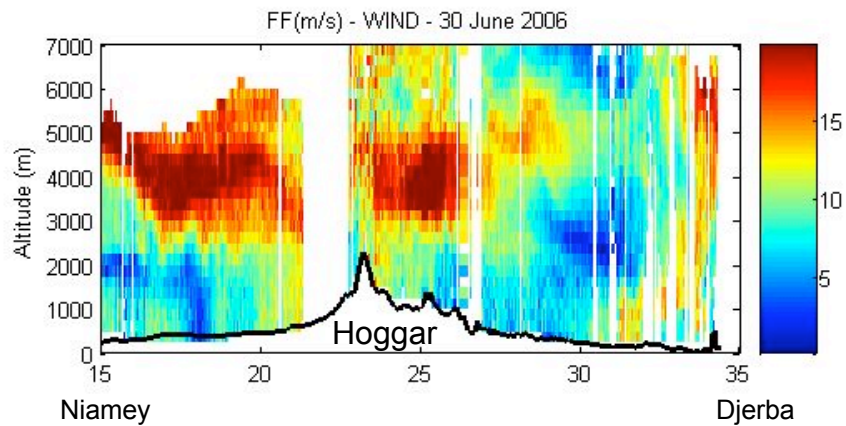


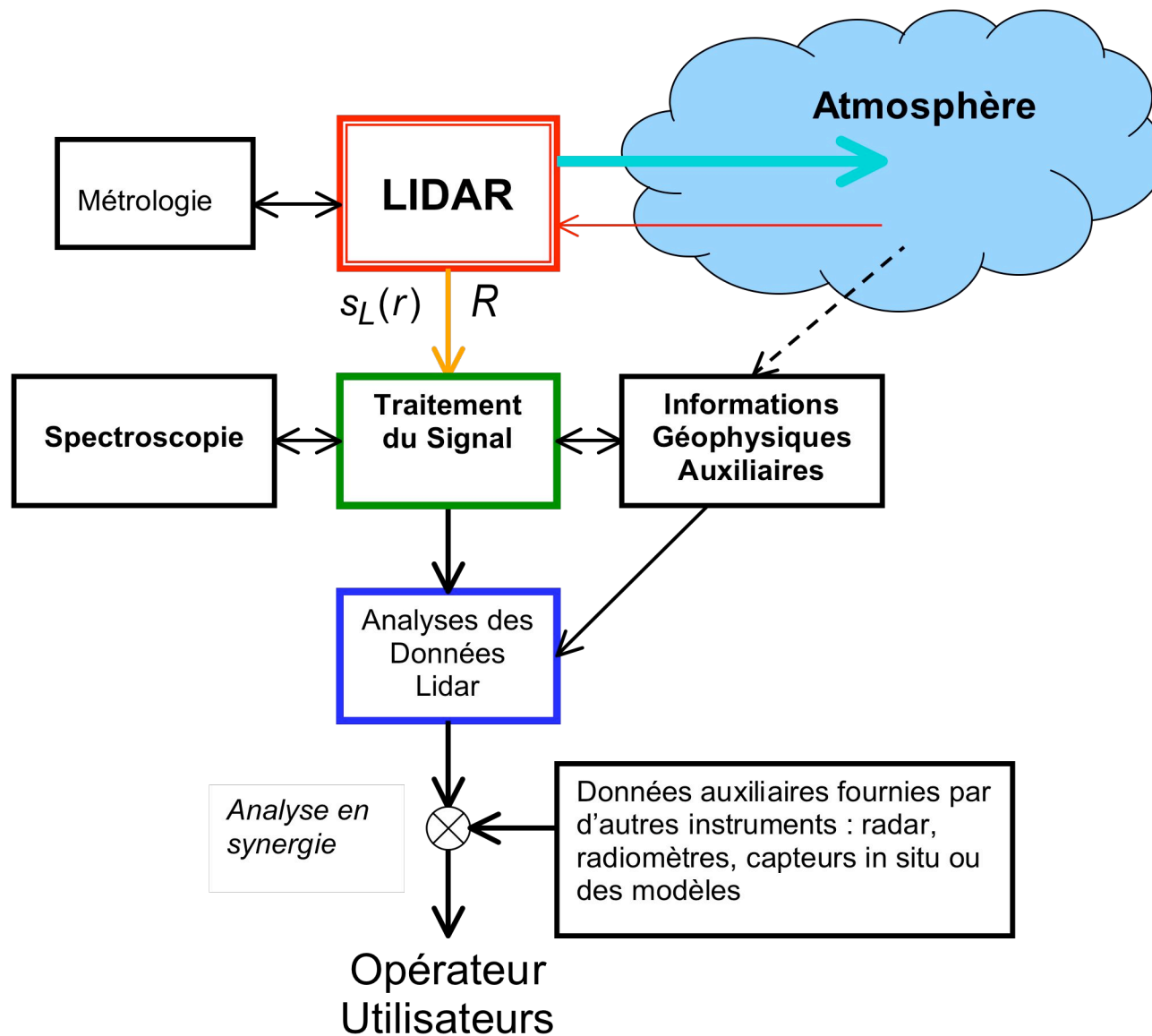
LIGNE DE VISÉE EN TRAME TV



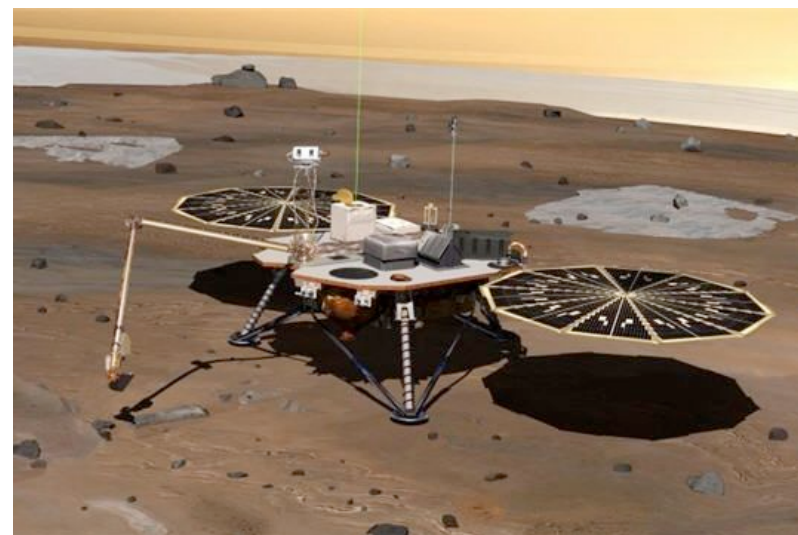
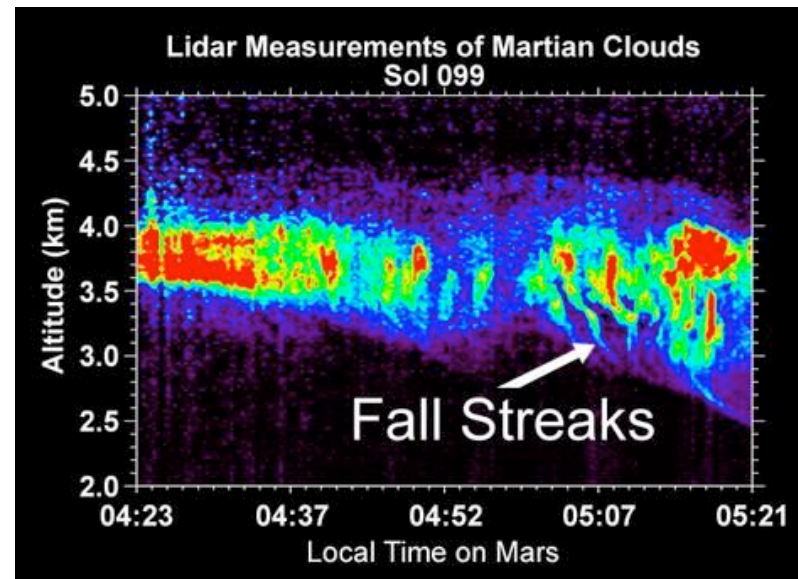
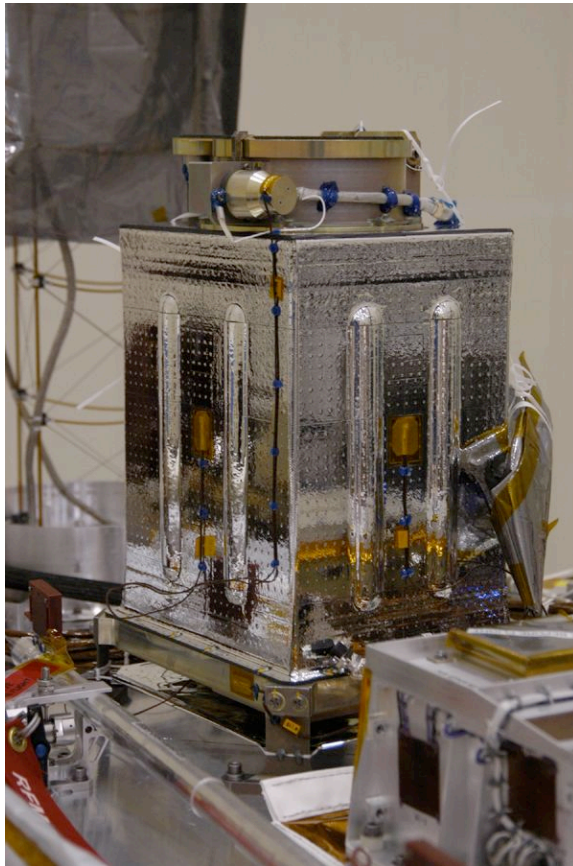
WIND pendant AMMA en 2006

Comparaison WIND avec modèle CEPMT Vol Djerba - Niamey 30 juin 2006





Lidar pour Atmosphère Martienne





Méthodes Lidar Appliquées aux Surfaces

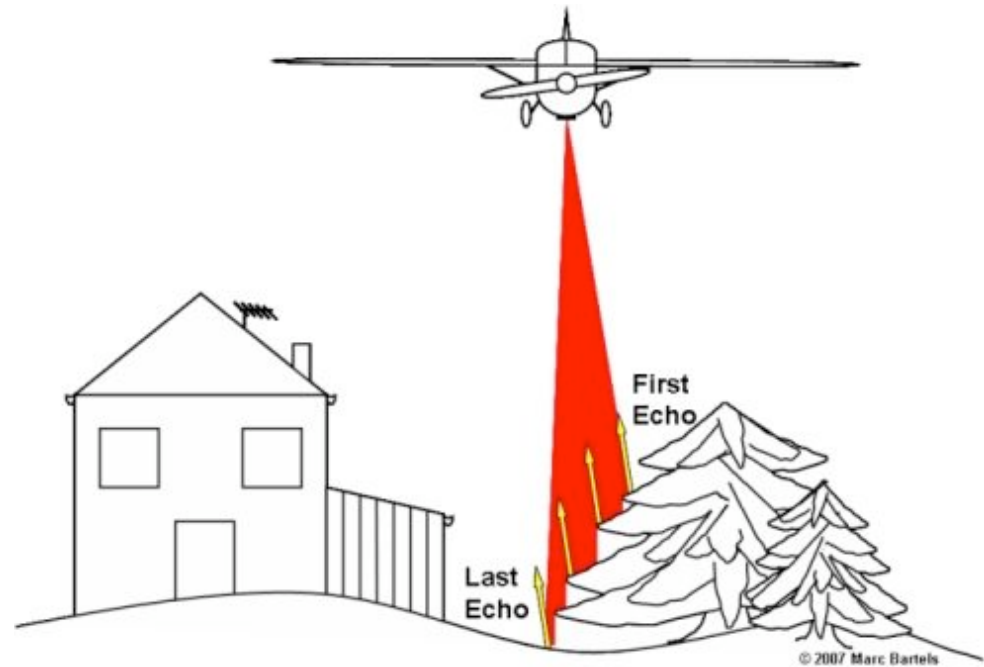


Principe du Lidar Altimétrique

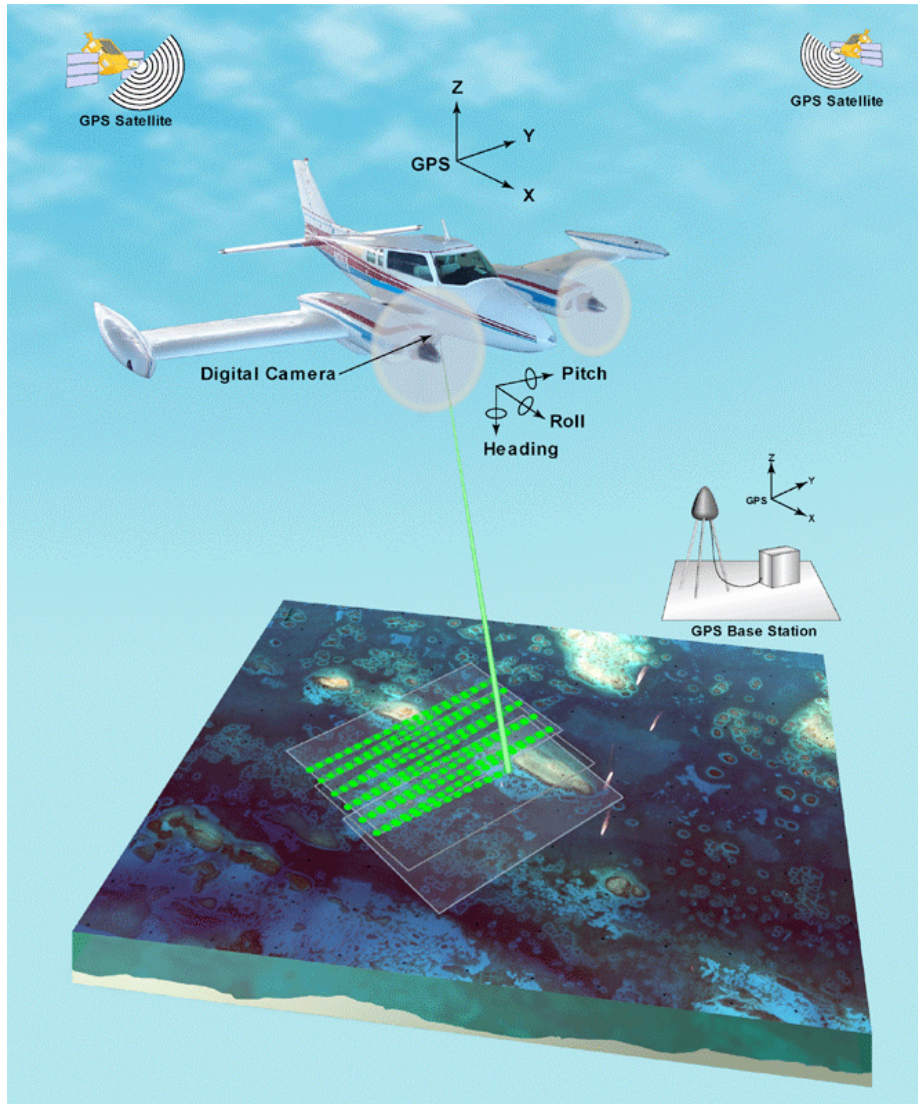
- Technique de mesure plus simple dans son principe
- Un laser à haute cadence (jusqu'à 150 kHz)
- Un balayage de la ligne de visée lidar transverse par rapport au déplacement de l'avion,
- La mesure de la distance lidar par le temps de vol AR des photons, il faut connaître les angles et les positions pour restituer une altitude très précise au-dessus de la surface,
- Détection du dernier écho qui représente (ou non) l'écho de sol,
- Avec un positionnement géo-référencé très précis des distances par rapport à une référence (*à choisir*)
- On peut construire un modèle numérique de terrain (logiciel commerciaux comme ArcGIS 9.2 de *Environmental Systems Research Institute*)

Topographie & Végétation

- Le premier écho laser indique le sommet d'un bâtiment ou d'un l'arbre
- Le dernier écho indique le niveau du sol
- La différence entre les 2 est la hauteur des bâtiments ou de la canopée



Instrument Lidar Altimétrique



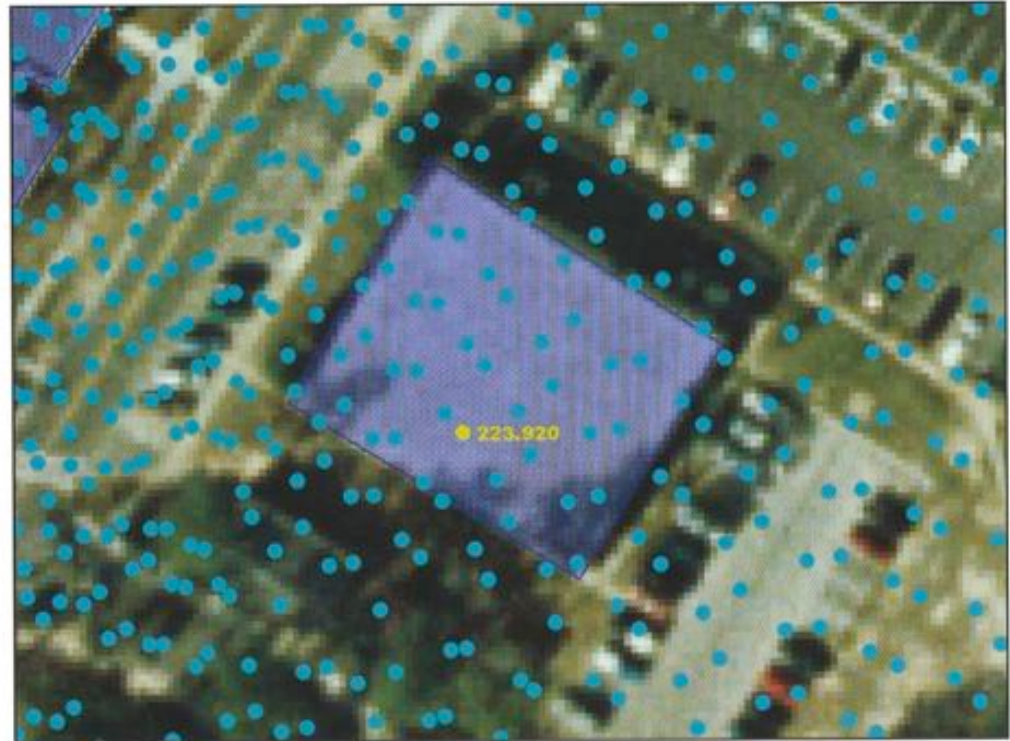
Relevé Topographique

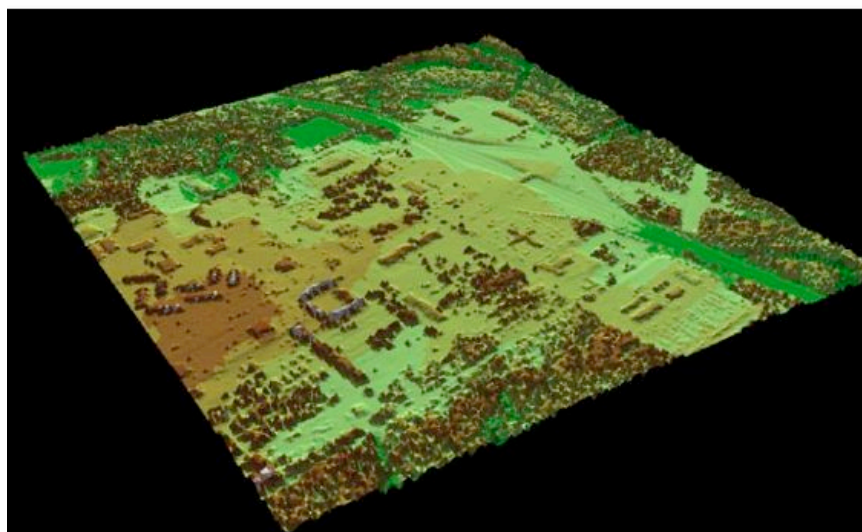
La distribution des données est donnée
en nombre de points au sol par m²

La distribution spatiale 3D irrégulière
des points lidar est due aux
mouvements de l'avion, à la
réflectivité variable des cibles
urbaines, à leurs orientations par
rapport au faisceau laser et au
processus de recomposition des
données

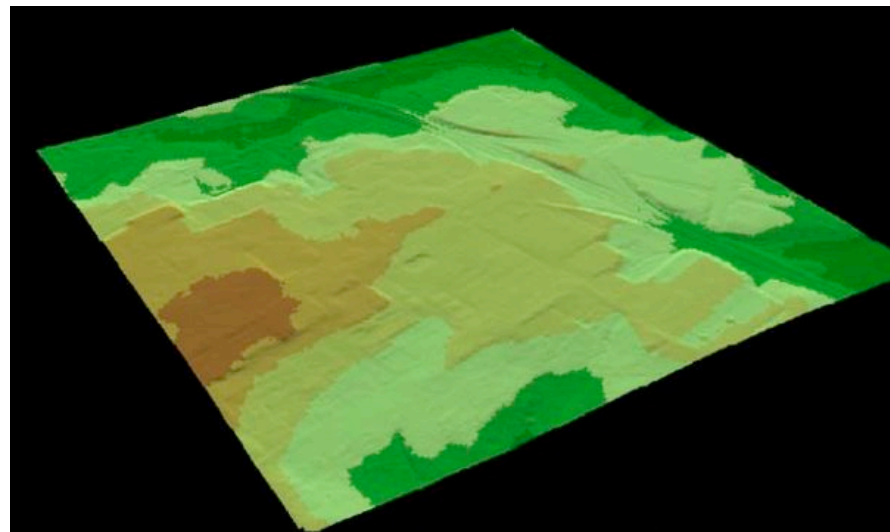
Très grande précision du
positionnement de chaque point

Processus d'interpolation





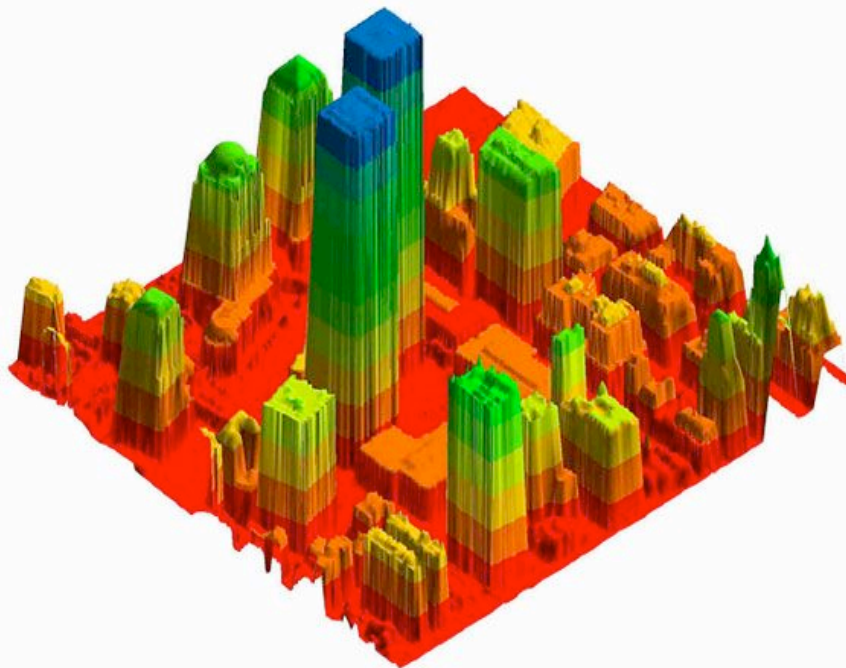
Premier écho lidar



Dernier écho lidar

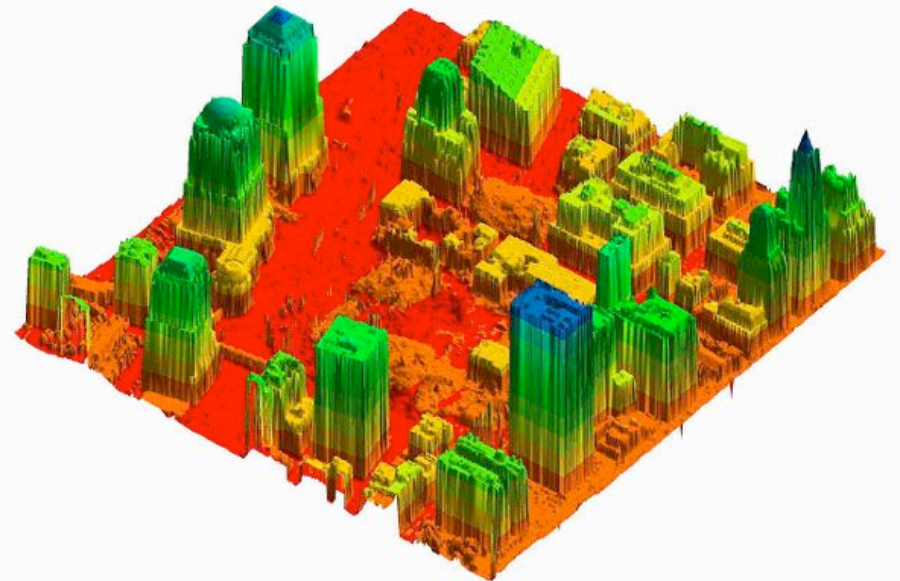


NYC « Ground 0 »



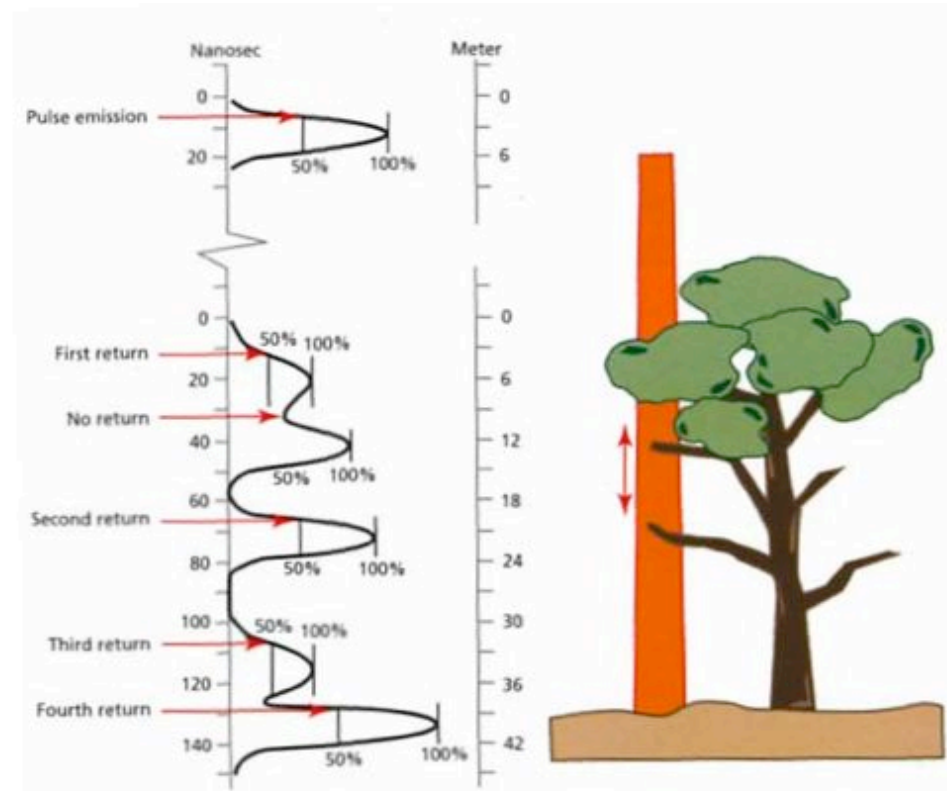
juillet 2001

octobre 2001



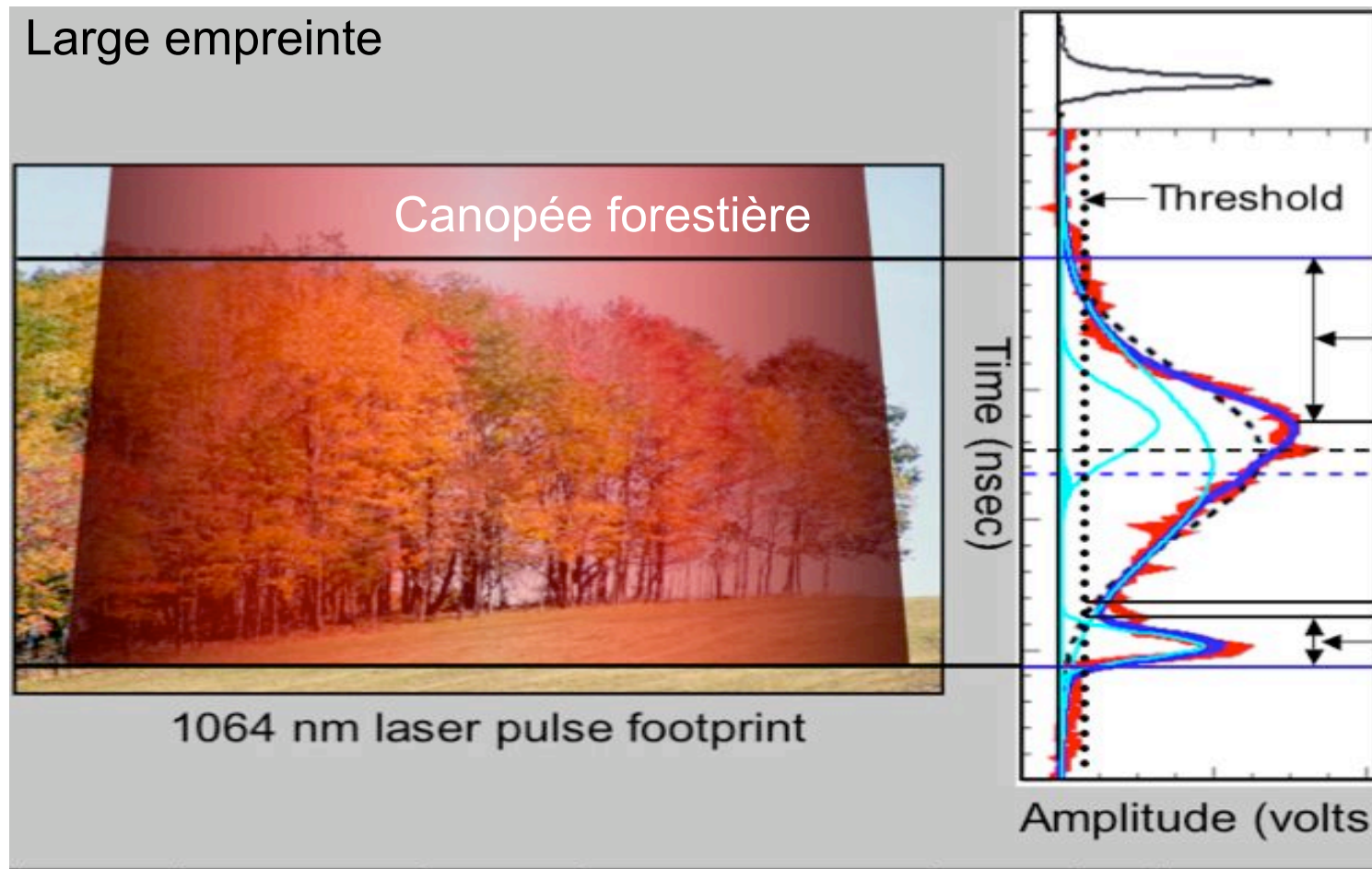
Structure de la Canopée

- Exemple de retour en onde complète (« full wave form »)
- Échos lidar multiple pour une seule impulsion
- Les échos multiples sont fonction de l'empreinte du faisceau (diamètre)
- On peut aussi décrire la couronne et la végétation sous le couvert végétal
- Effectuer une description complète de la canopée
- Densité foliaire
- Biomasse forestière
- Agriculture



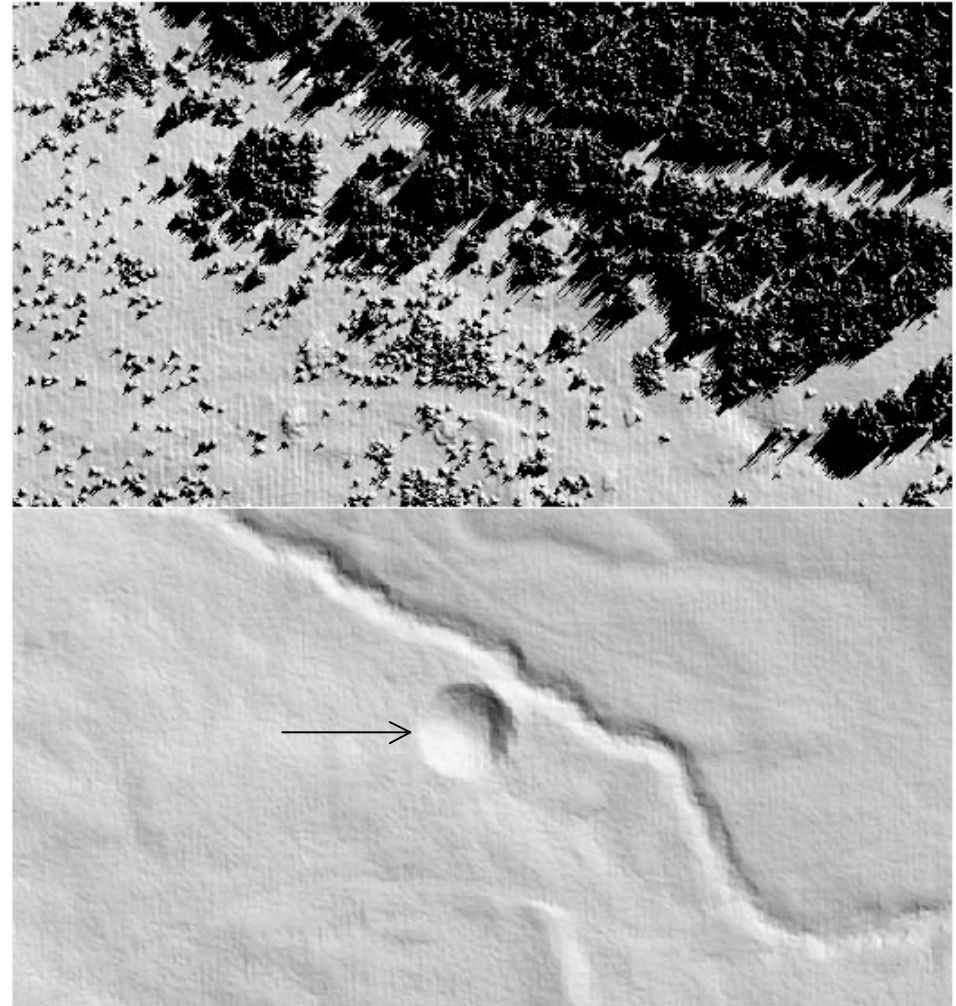
ICESat 2003

Mission NASA altimétrie pour les glaces aussi utilisées pour la canopée



Analyse du signal par déconvolution au moyen d'une somme de gaussiennes de largeur variable

- En régions boisées, le lidar permet de « soustraire » la couverture végétale et de ne garder que la topographie du sol observée au travers du couvert végétal
- Il en est de même du suivi des failles sismiques dans les régions boisées des zones à risques



LiDAR images of the crater site, showing the full feature image (top) and bare earth image (bottom).
The crater is 36 m across.



Missions NASA Altimétriques

- **1971-1972.** Trois missions Apollo : 15, 16, 17, utilisant des altimètres laser à rubis pour cartographier la lune
- **La mission Apollo 17** a embarqué un laser performant qui a fonctionné pendant 12 révolutions

Table 1. Laser Altimetry Missions^a

| Mission Name | Launch Date | Type | Firing Rate, Hz | Shots fired | Geolocated Ranges | Horizontal accuracy | Vertical precision | Vertical accuracy |
|-------------------|-------------|------------------------|-----------------|-------------|-------------------|---------------------|--------------------|-------------------|
| Apollo 15, 16, 17 | 1971-1972 | Ruby | 0.06 | 7,080 | 5,140 | 30 km | 4 m | 400 m |
| Clementine | 1994 | Cr:Nd:YAG ^b | 0.6 | 600,000 | 72,300 | 3 km | 40 m | 90 m |
| SLA-01 | 01/1996 | Cr:Nd:YAG | 10 | 3,000,000 | 1,203,000 | 40 m | 0.75 m | 2.78 m |
| SLA-02 | 08/1997 | Cr:Nd:YAG | 10 | 3,000,000 | 2,090,000 | 40 m | 0.75 m | 6.74 m |
| NLR | 02/1996 | Cr:Nd:YAG | 1-2 | 20,000,000 | 15,868,304 | 20 m | 0.31 m | 10 m |
| MOLA | 11/1996 | Cr:Nd:YAG | 10 | 675,000,000 | 583,000,000 | 100 m | 0.38 m | 1 m |

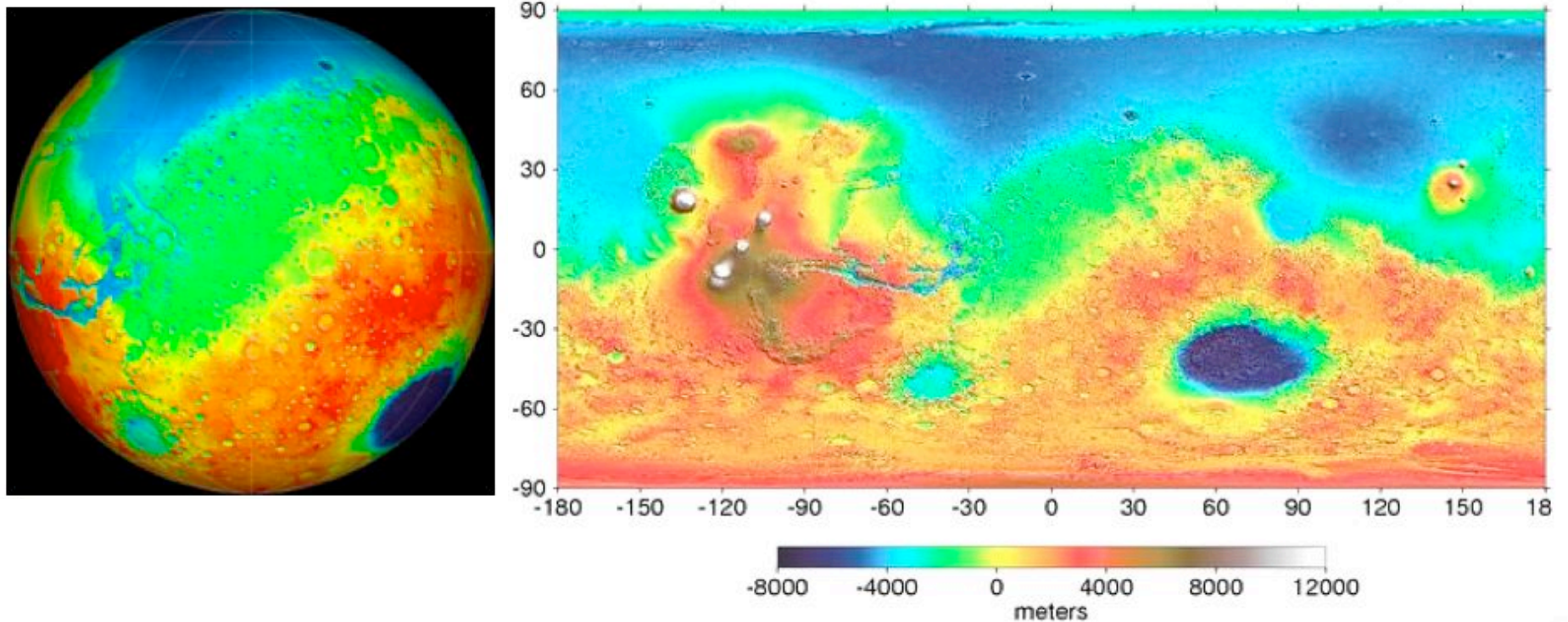
^aThe number of geolocated ground returns does not necessarily reflect the instrument's ability to range. Spacecraft off-pointing, data loss, gaps in tracking, clouds, as well as range failure limit the altimetric product.

^bChromium:neodymium-doped yttrium-aluminum-garnet

- 2003. ICESat-I
- 2004. Mercury Laser Altimeter
- 2008. Lunar Orbiting Laser Altimeter

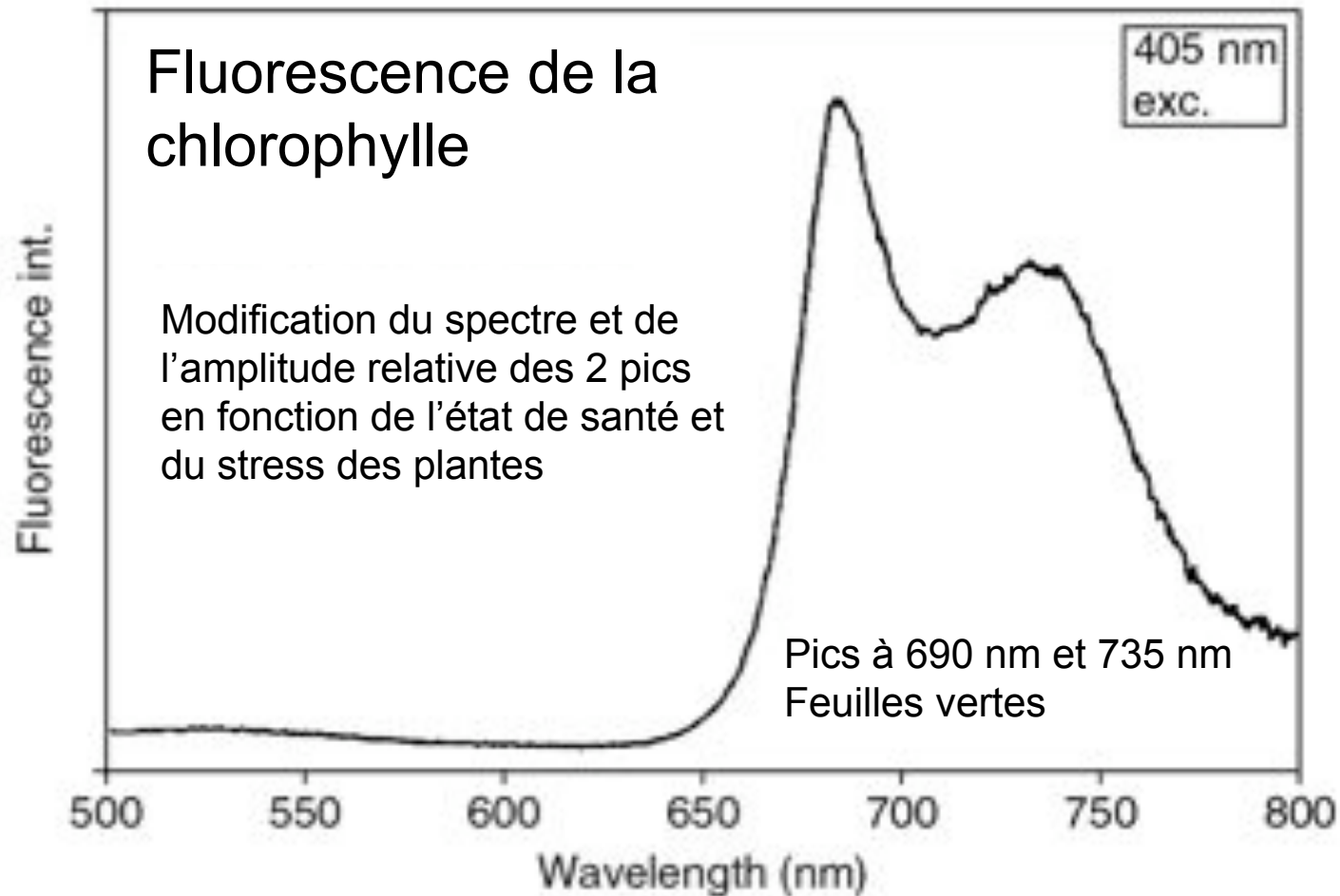
Topographie de Mars

Mission NASA Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA)

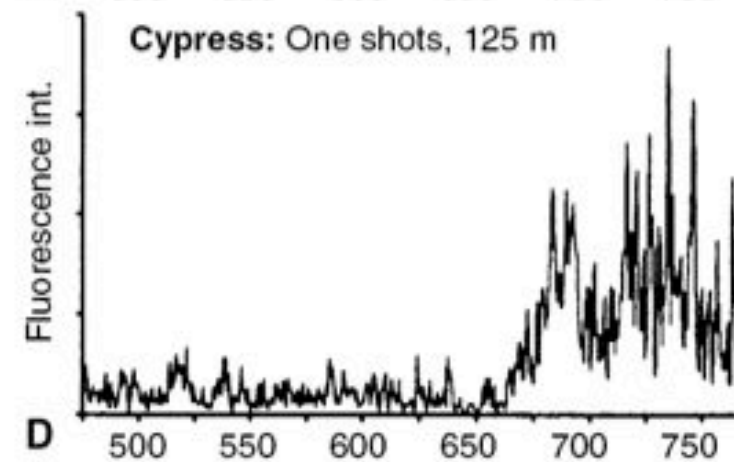
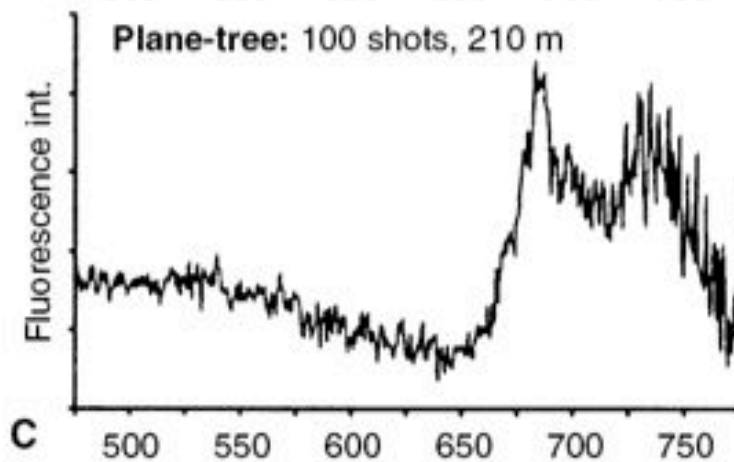
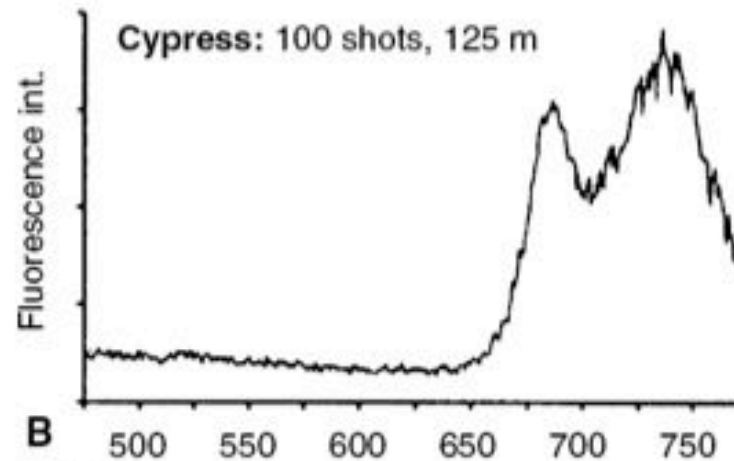
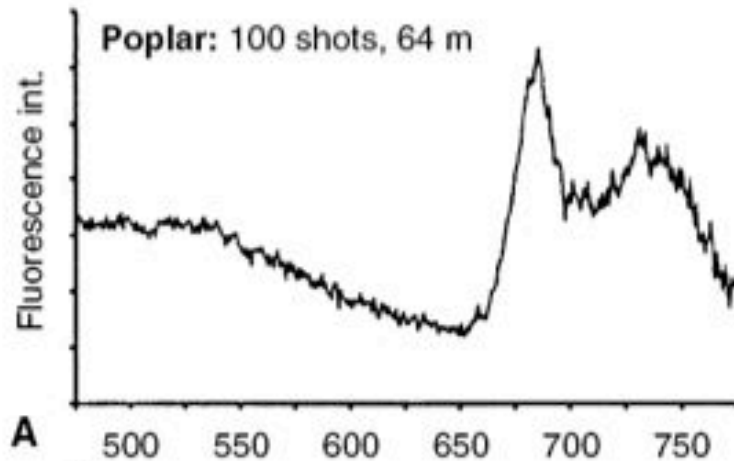


Lidar Fluorescence Végétation

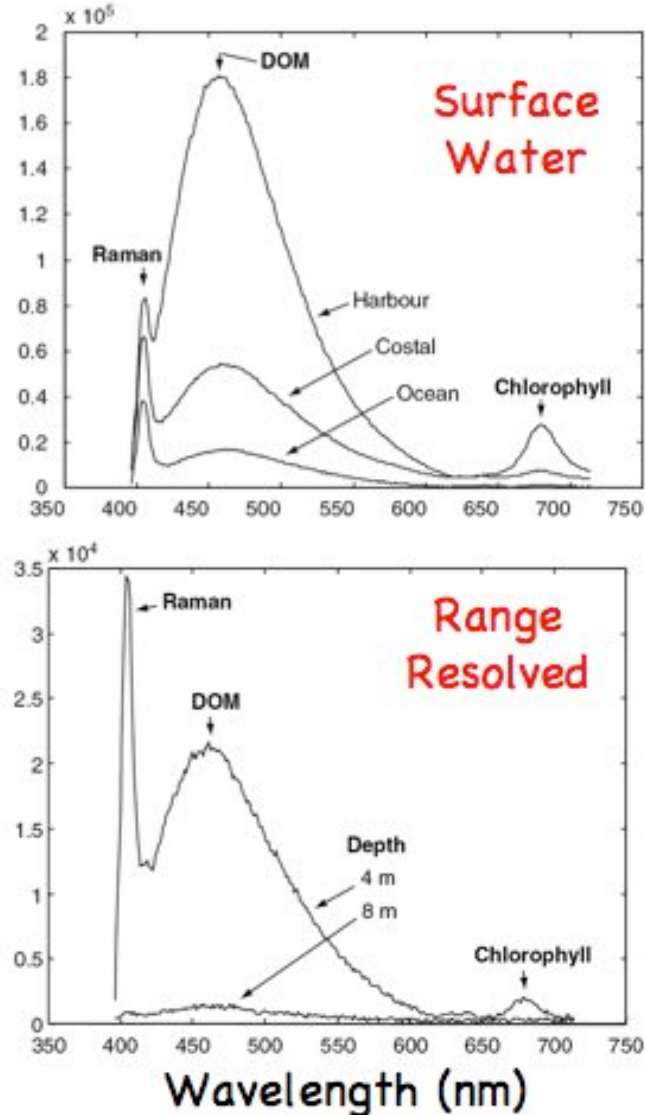
Excitation laser à 405 nm et spectre obtenu avec un spectromètre



Lidar Fluorescence Végétation



Lidar Fluorescence Marin



- Excitation laser à 355 nm
- Diffusion Raman de l'eau à 404 nm ($\Delta\nu=3400 \text{ cm}^{-1}$)
- Le spectre Raman peut être utilisé pour mesurer la température de l'eau
- La signature spectrale des Matières Organiques (DOM) dissoutes dans l'eau apparaît dans le bleu.