Lidar Diffusion Élastique Aérosols & Nuages

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

Institut Pierre Simon Laplace
Sciences de l'environnement

➢ *Qualité de l'air*

Concentration en surface

- *Exposition des populations aux polluants:*

Pendant de courtes et longues périodes
*Émissions locales / **Dilution Verticale** & Horizontal*

- *Antécédents catastrophiques*

[Wilkins, 1953]

- *Augmentation du risque de mortalité: +10 $\mu g/m^3$ ⇒ +2%*

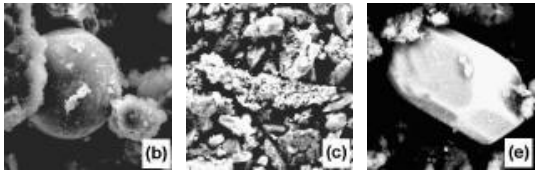
➢ *Bilan radiatif*

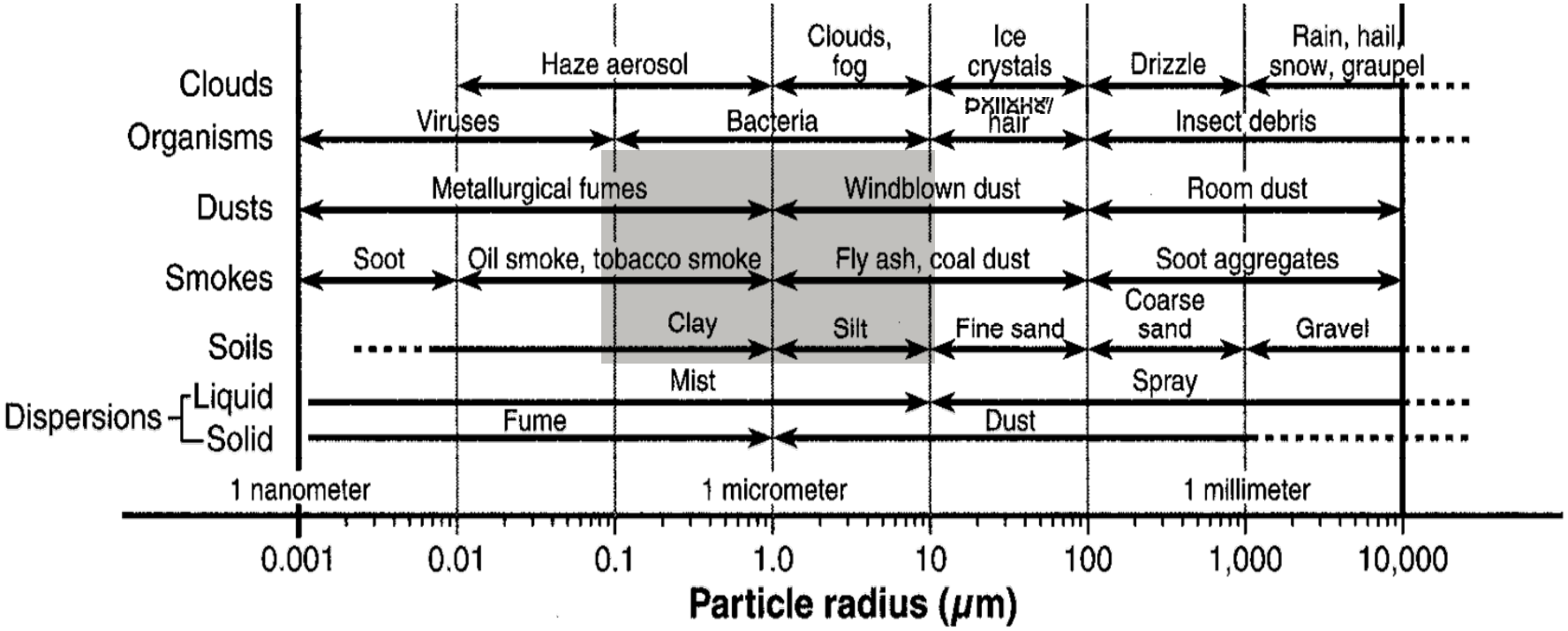
Epaisseur optique AOD
Albédo de diff. simple

- ***Direct :***
  Diffusion + Absorption + Émission (IR)
- *Indirect :*
  Cycle de vie des nuages (CCN, IN)
- *Semi-direct :*
  Profil Température / humidité

- *Connaissance scientifique faible*
- *Forçage climatique, avec les gaz à effet de serre*

Particules en suspension dans l'air qu'on appelle aérosols





Lidar Atmosphériques

Lidar rétrodiffusion élastique.

- *Le signal lidar porte indistinctement les diffusions moléculaires et particulaires pour les dongueurs d'onde UV, visible et PIR*
- *Lidar rétrodiffusion élastique avec diversité de polarisation*
- *Lidar rétrodiffusion élastique à Haute Résolution Spectrale*

Lidar rétrodiffusion inélastique Raman

- *vibrationnel Stokes par N_2 et O_2*
- *vibrationnel Stokes par H_2O, O_3*
- *rotationnel Stokes et/ou anti-Stokes par les molécules d'air*

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 avec détection hétérodyne ou détection directe*

Profils Lidar

À partir des signaux lidars on cherche à déterminer :

- La présence de nuages et de couches d'aérosols
- Les propriétés optiques de diffusion : $\beta(z)$, $\alpha(z)$, δ (épaisseur optique, liées au concentration en particules
- La phase thermodynamique des nuages : eau, glace, en utilisant le facteur de dépolarisation Δ

Conditions préalables :

- Rapport signal à bruit élevé *RSB* > 10
- Profil Lidar moyen comme moyenne de nombreux profils Lidar successifs (*N*) pour augmenter $RSB \propto \sqrt{N}$
- Au moins une zones propre pour étalonnage relatif avec la rétrodiffusion moléculaire

Signaux Lidar

- Les 2 informations atmosphériques : ***coefficients de diffusion et d'atténuation***, sont portées par la puissance optique diffusée
- Le signal est intégré sur une porte de mesure => (J)

$$S_L(r,\Delta r) = \frac{c}{2} E\, A\, m\ \ \Delta r\, \frac{\beta_\pi(r)}{r^2} \exp\left[-2\int_0^r \alpha(y)\,dy\right] + bruits.\Delta r$$

- On soustrait le signal radiométrique et le signal d'offset, on corrige de la dépendance en distance et on remplace une des 2 inconnues

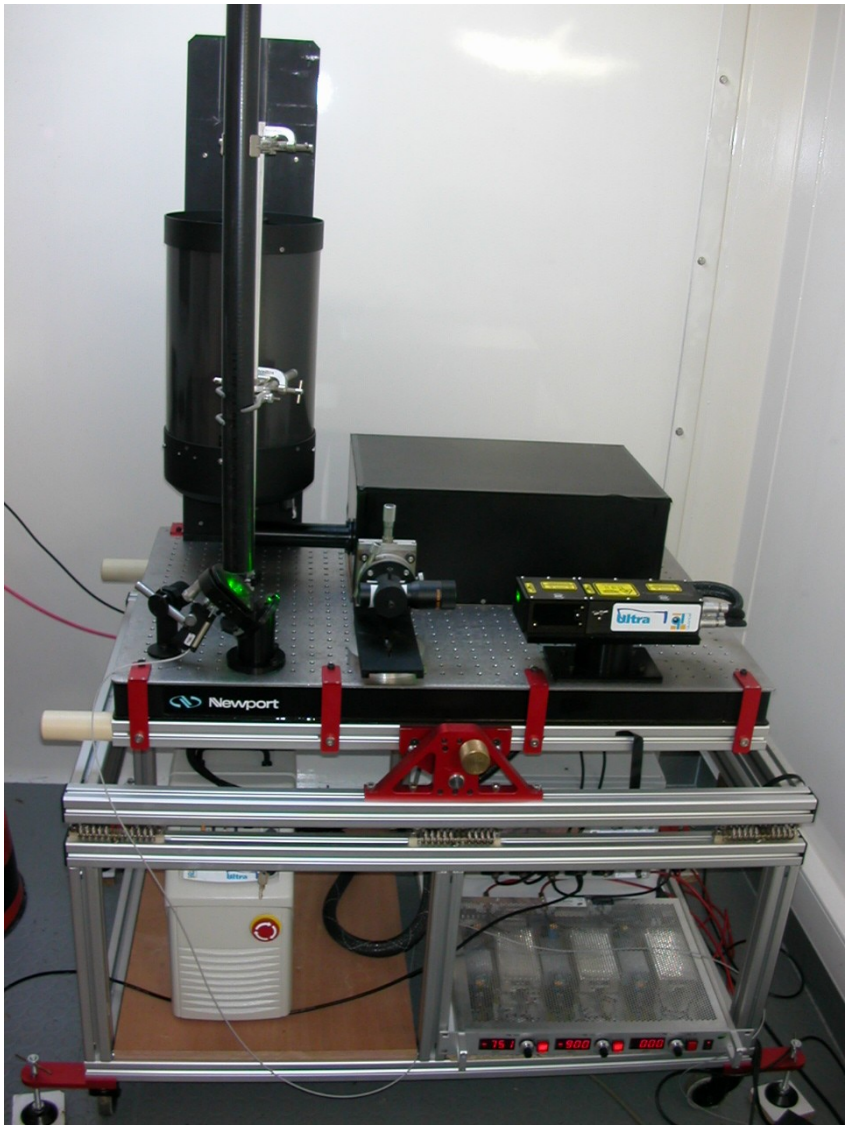
$$S_L(r,\Delta r)\ r^2 = K\ k\alpha(y) \exp\left[-2\int_0^r \alpha(y)\,dy\right] + \varepsilon$$

- Normalisation au moyen du signal moléculaire calculé à une altitude sans particules. On calcule la rétrodiffusion moléculaire à cette altitude au moyen d'une expression théorique et de données météorologiques

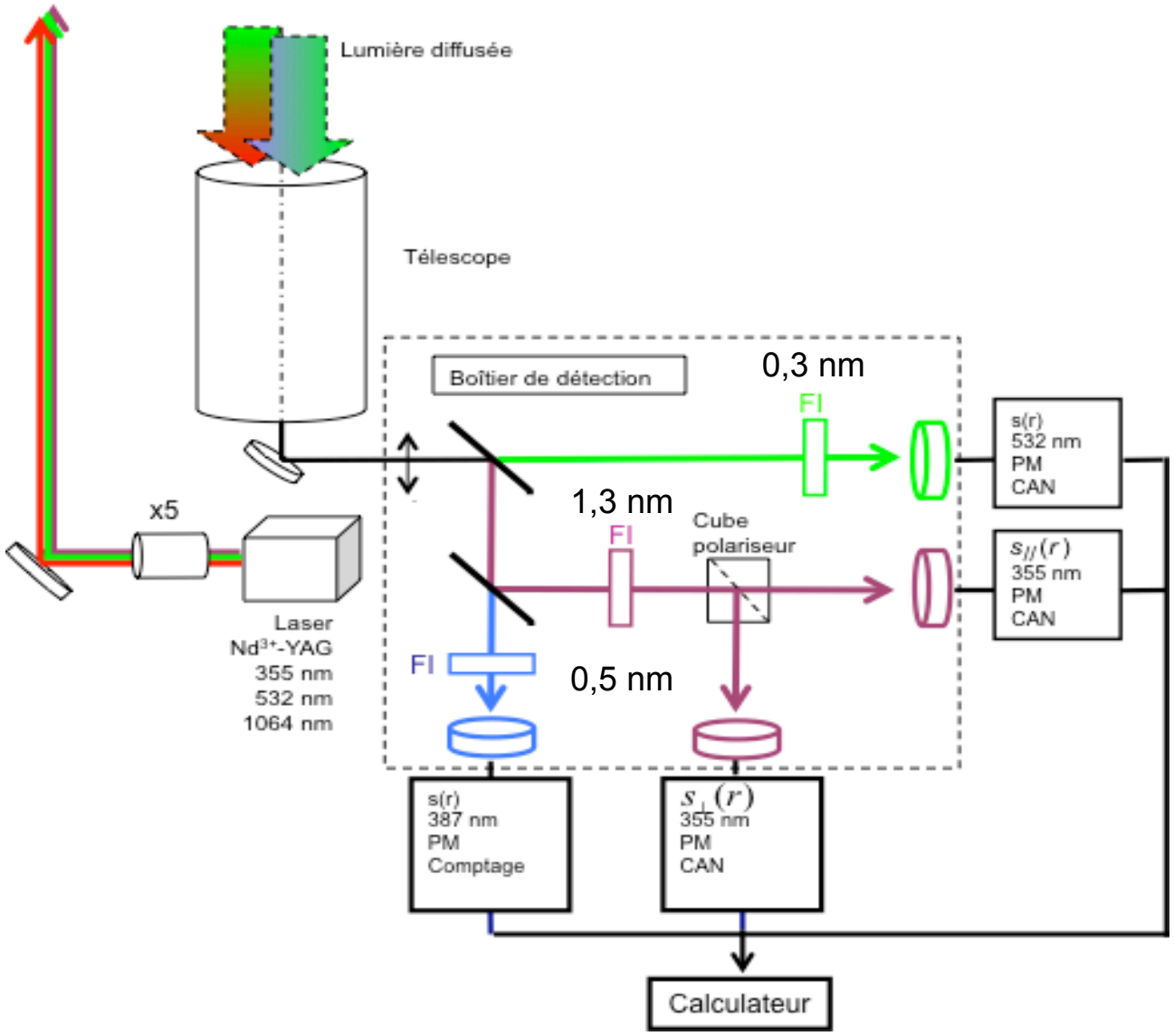
$$\alpha_{e,m}(m^{-1}) = 2{,}89.10^{-7}.\frac{p(hP)}{T(K)\left[\lambda(\mu m\right]^{-4{,}08}} \qquad \beta_{\pi,m}(m^{-1}sr^{-1}) = \frac{3}{8\pi}\alpha_{e,m}$$

Mini Lidar Rétrodiffusion

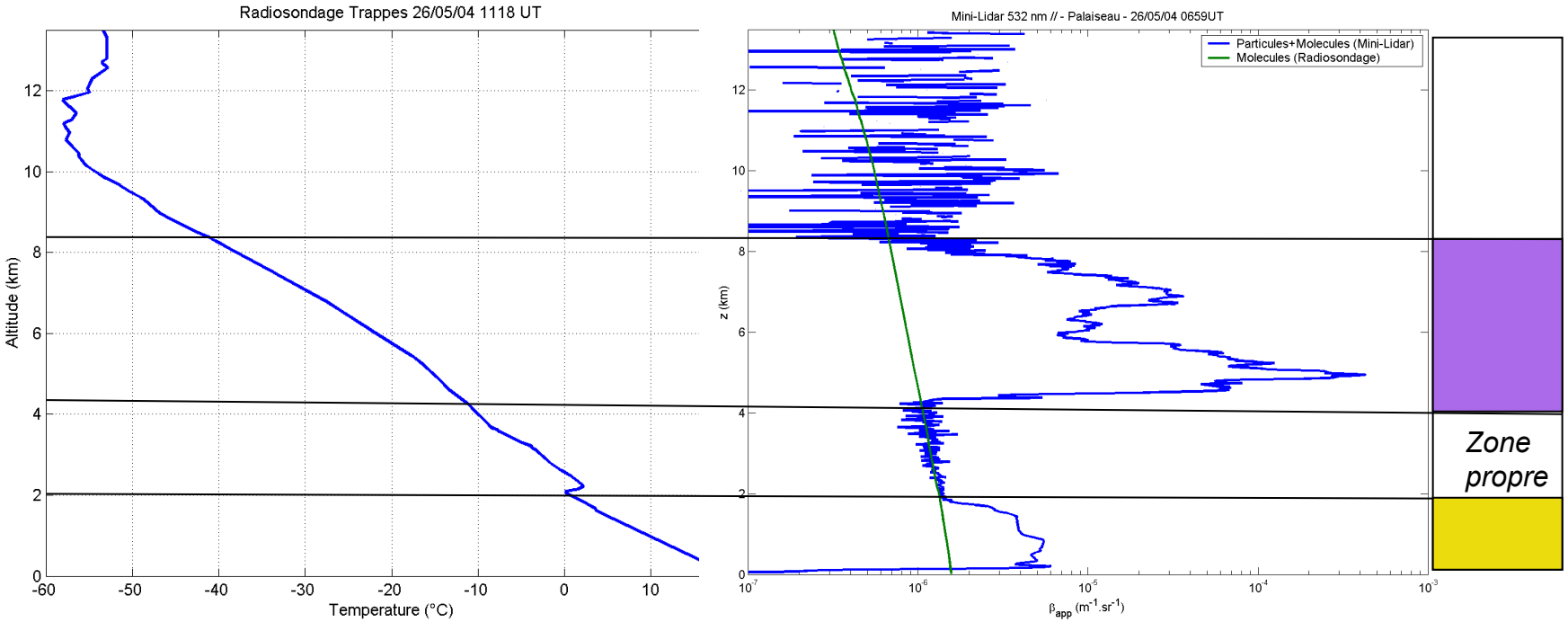
- Conteneur transportable
- Composants commerciaux
- Diffuseurs atmosphériques (molécules et particules atmosphériques
- Opérationnel depuis 2003
- Laser: Nd-YAG: 355 nm (10 mJ), 532 nm (16 mJ), 1064 nm (10 mJ), 20Hz, 7 ns,
- Divergence : 2,5 => 0,3 mrd
- Émission para axiale
- Télescope réception: Schmidt-Cassegrain, 20 cm, 1 mrd
- Détection: 532 nm (1 nm, PMT) //,1064 nm (1 nm, ADP) et 607 nm (Raman spontané, Comptage photons), 532 nm polarisation croisée
- CAN : 8 bits, 50 Ms/s (3 m)
- Comptage photons : 1 MHz (150 m)



Mini Lidar Rétrodiffusion



Étalonnage (1/2)



Coefficient de rétrodiffusion apparent

$$\overline{\beta_{\pi,app}}(r) = \overline{\beta_{\pi,m}(r_O)} \left\{ \frac{S_{L,U}(r,\Delta r)}{S_{L,U}(r_O,\Delta r)} \right\} exp\left[+2 \int_{r_O}^{r} \overline{\alpha_m(y)}\, dy \right]$$

$$R_{dif}(R) = \frac{\beta_\pi(R)}{\beta_{\pi,m}(x)} = \frac{\beta_{\pi,p}(R) + \beta_{\pi,m}(R)}{\beta_{\pi,m}(R)} = \frac{\beta_{\pi,p}(R)}{\beta_{\pi,m}(R)} + 1$$

Étalonnage (2/2)

À l'altitude de référence on pose :

$$S_{L,U}(r_O,\Delta r) = K\left\{\overline{\beta_{\pi,m}(r_O)}\left(exp\left[-2\int_0^{r_O}\left(\overline{\alpha_m(y)}+\sum_i\overline{\alpha_{p,i}(y)}\right)dy\right]\right)\right\}$$

On en déduit une valeur de la constante instrumentale lidar :

$$K = \frac{S_{L,U}(r_O,\Delta r)}{\left\{\overline{\beta_{\pi,m}(r_O)}\left(exp\left[-2\int_0^{r_O}\left(\overline{\alpha_m(y)}+\sum_i\overline{\alpha_{p,i}(y)}\right)dy\right]\right)\right\}}$$

En remplaçant, et après simplification :

$$S_{L,U}(r,\Delta r) = \frac{S_{L,U}(r_O,\Delta r)}{\overline{\beta_{\pi,m}(r_O)}}\left\{\left(\overline{\beta_{\pi,m}(r)}+\sum_i\overline{\beta_{\pi,p,i}(r)}\right)exp\left[-2\int_{r_O}^{r}\left(\overline{\alpha_m(y)}+\sum_i\overline{\alpha_{p,i}(y)}\right)dy\right]\right\}$$

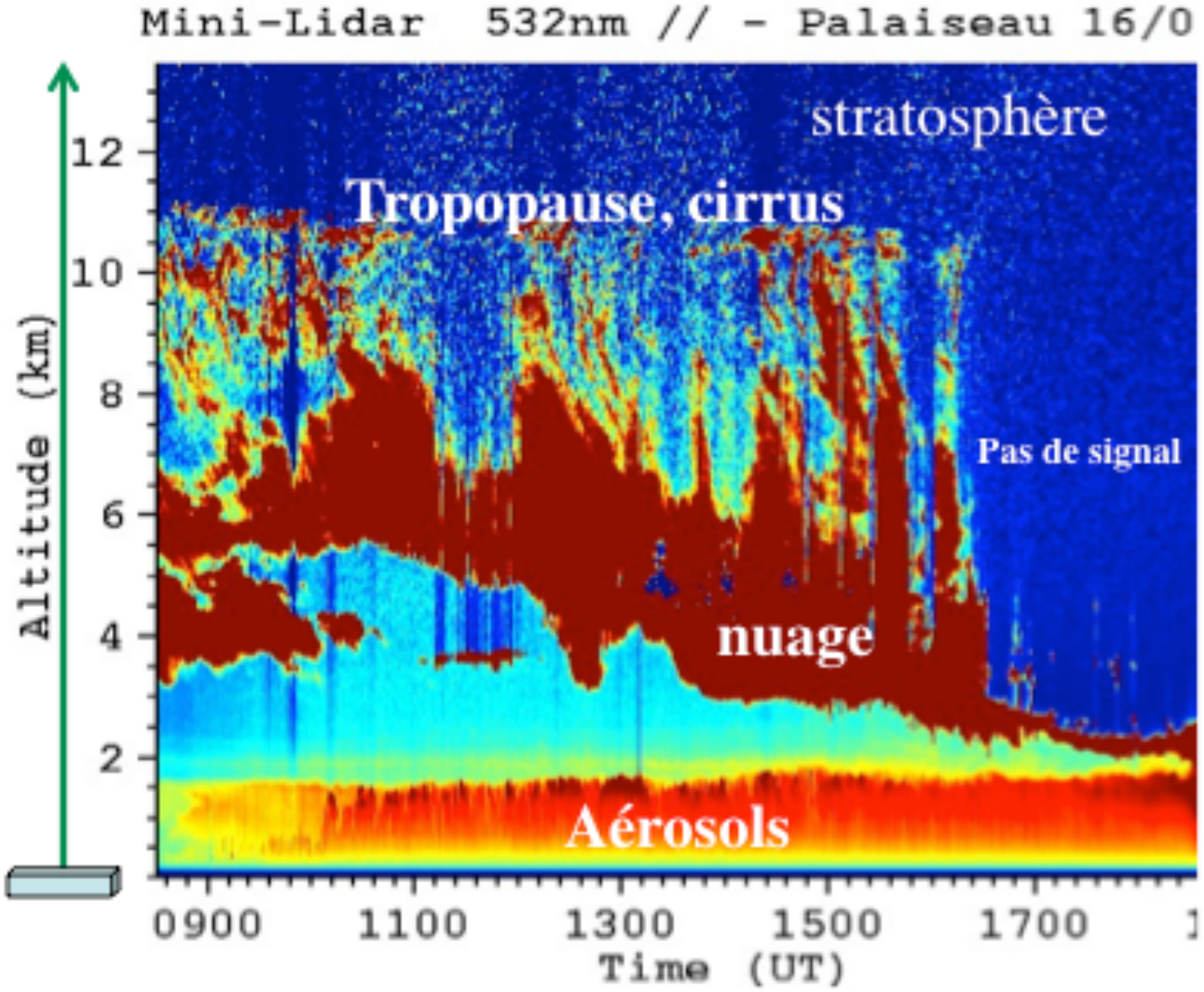
On définit le coefficient de rétrodiffusion total atténué ou apparent $\beta_{\pi,app}(r)$:

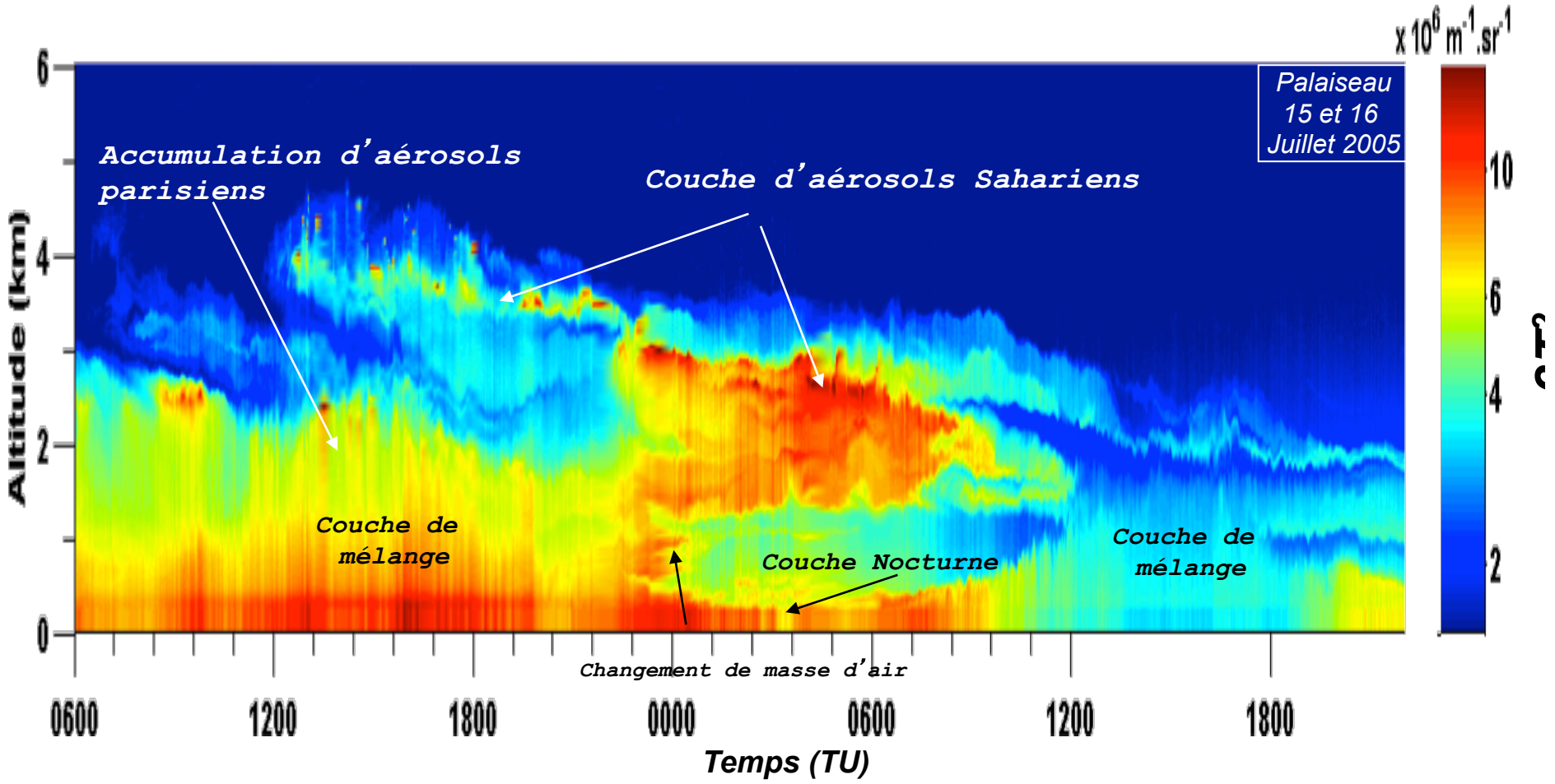
En utilisant l'étalonnage moléculaire on obtient

$$\overline{\beta_{\pi,app}}(r) = \overline{\beta_{\pi,m}(r_O)}\left\{\frac{S_{L,U}(r,\Delta r)}{S_{L,U}(r_O,\Delta r)}\right\}exp\left[+2\int_{r_O}^{r}\overline{\alpha_m(y)}\,dy\right]$$

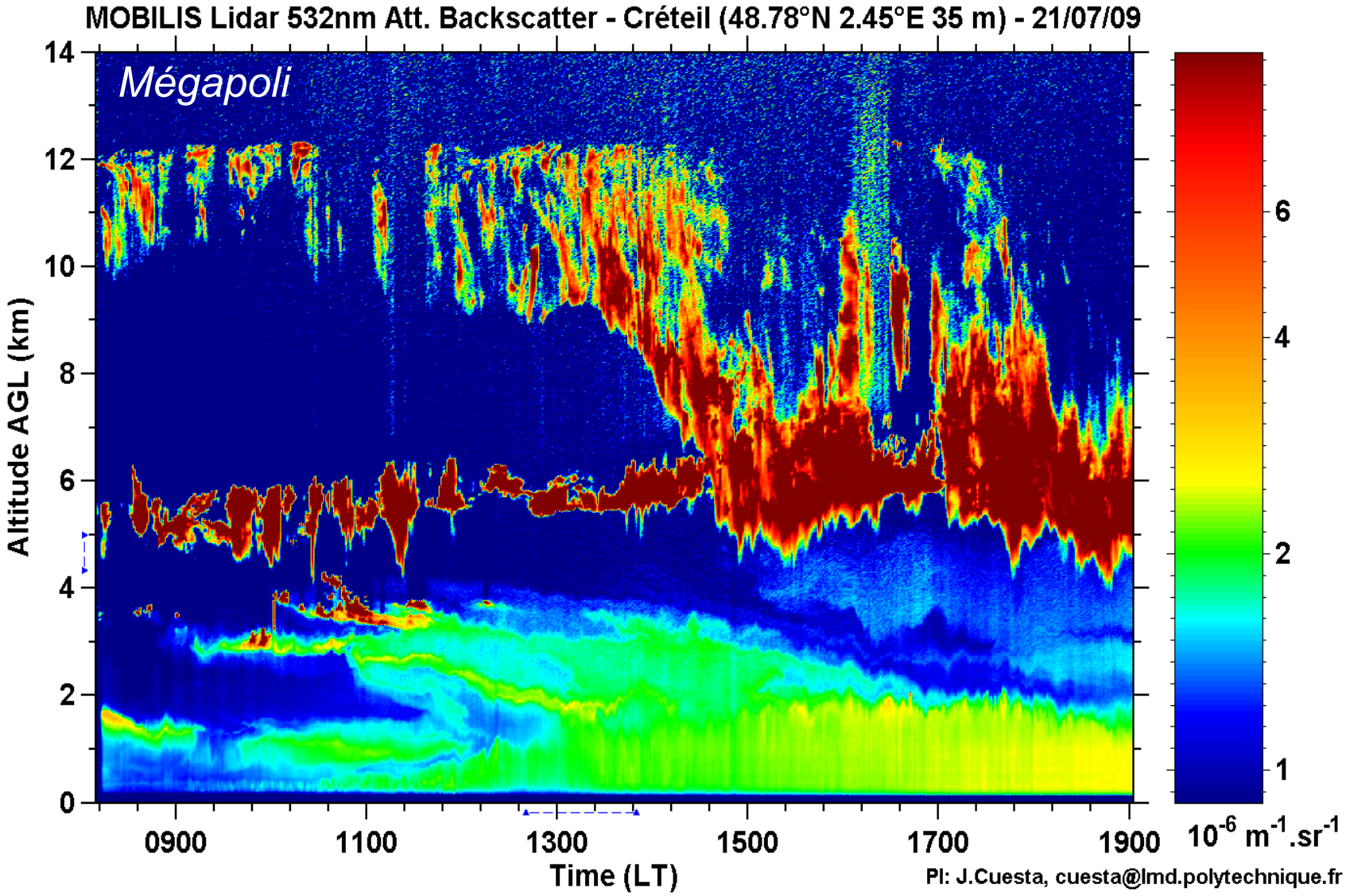
On corrige de l'atténuation moléculaire.
Les profils de coefficient de rétrodiffusion total atténué sont définis comme les « donnée de niveau 1 »

Nuages

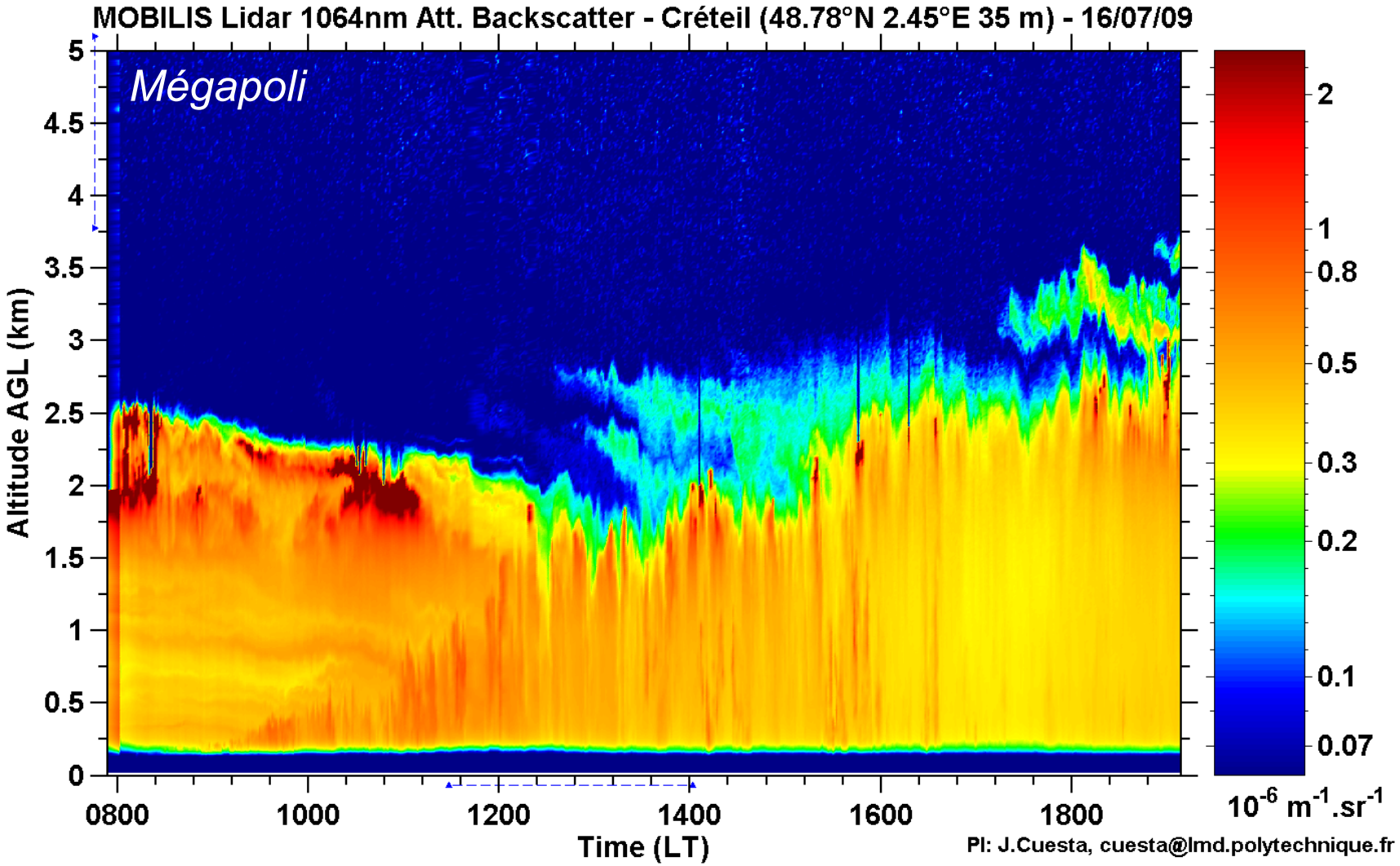

Mini-Lidar 532nm // - Palaiseau 16/0
stratosphère
Tropopause, cirrus
Pas de signal
nuage
Aérosols
Altitude (km)
12
10
8
6
4
2
0900
1100
1300
1500
1700
Time (UT)


Palaiseau
15 et 16
Juillet 2005
Accumulation d'aérosols parisiens
Couche d'aérosols Sahariens
Couche de mélange
Couche Nocturne
Couche de mélange
Changement de masse d'air
Altitude (km)
Temps (TU)
0600
1200
1800
0000
0600
1200
1800
0
2
4
6
x 10⁶ m⁻¹.sr⁻¹
2
4
6
10

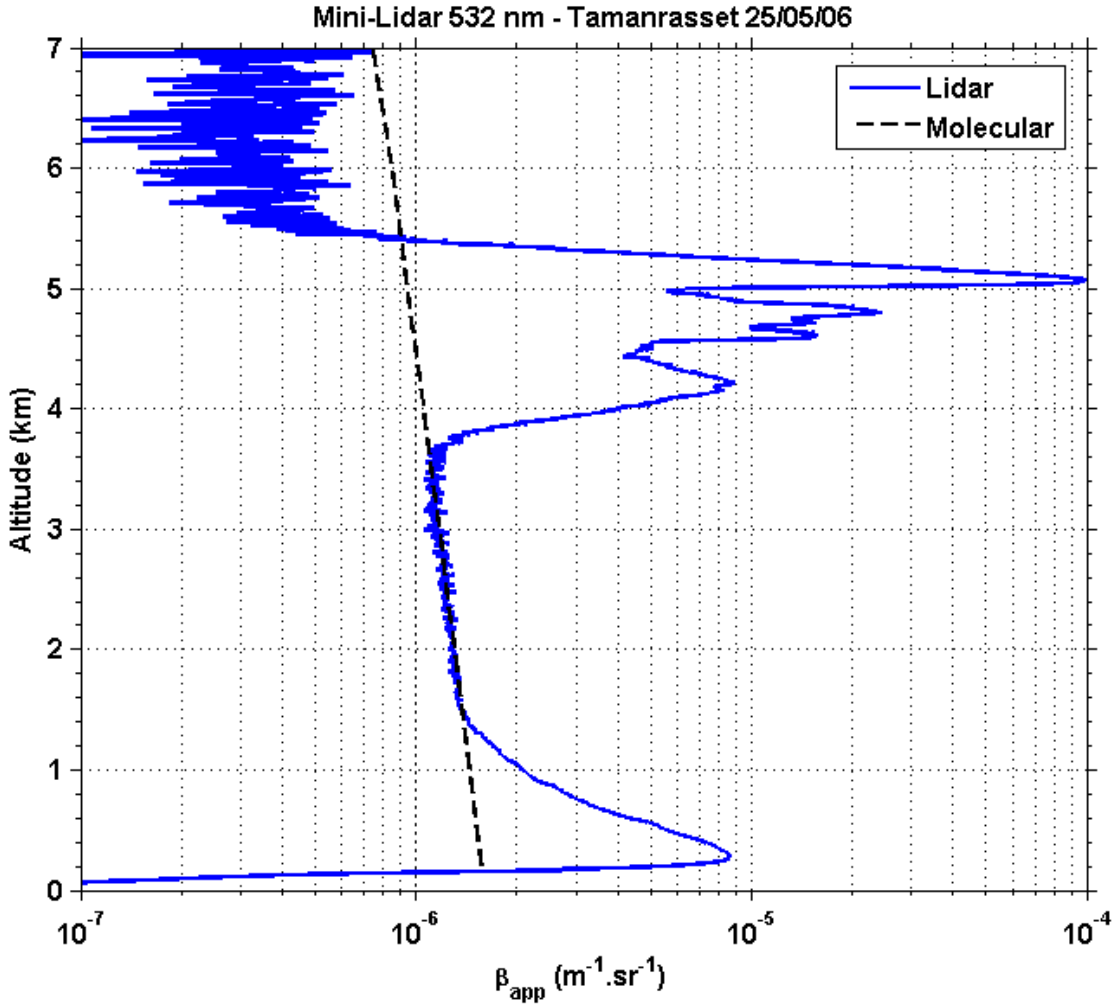
Nuages & Aérosols Troposphériques



Aérosols Couche Limite

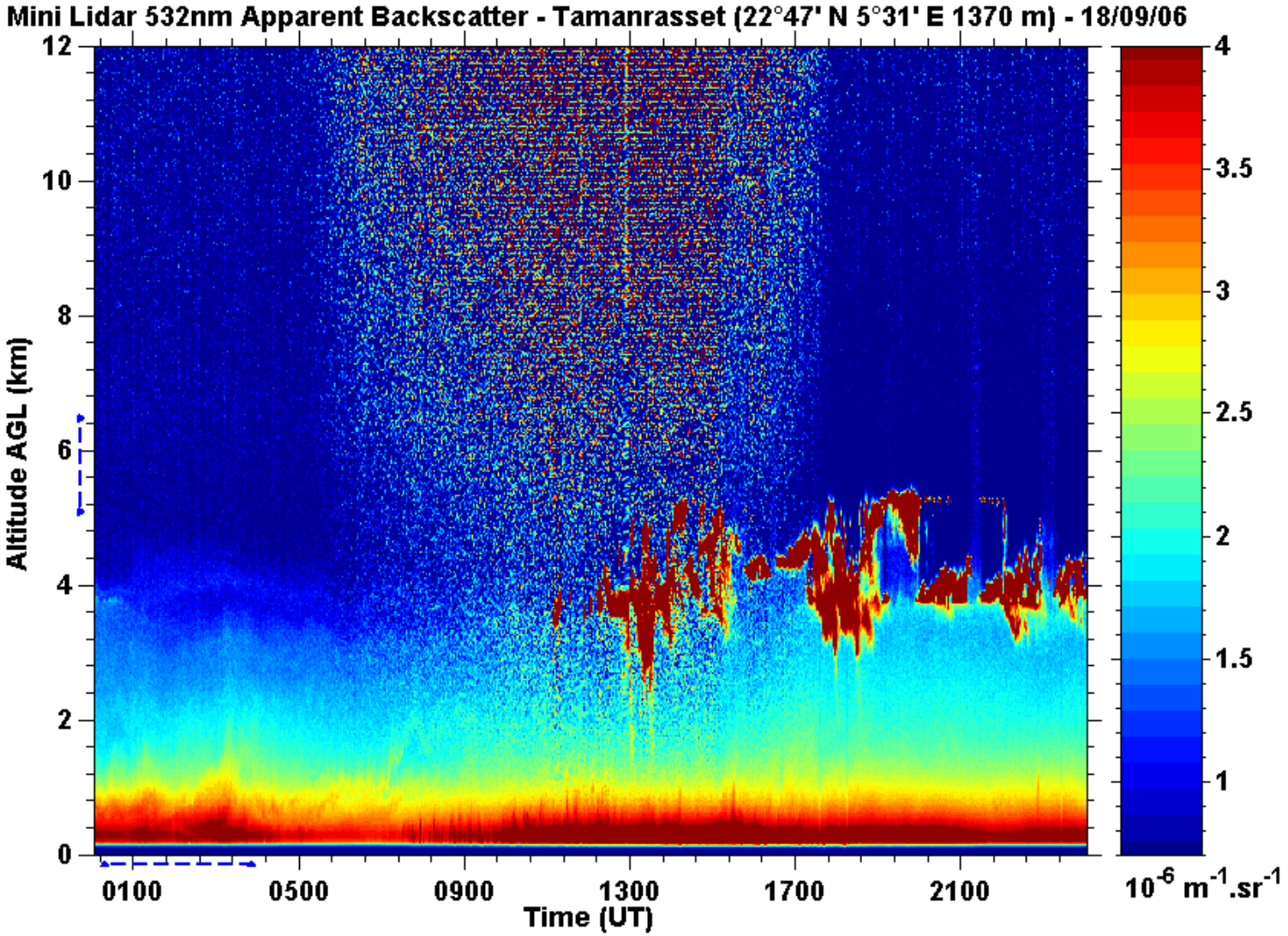


Étalonnage

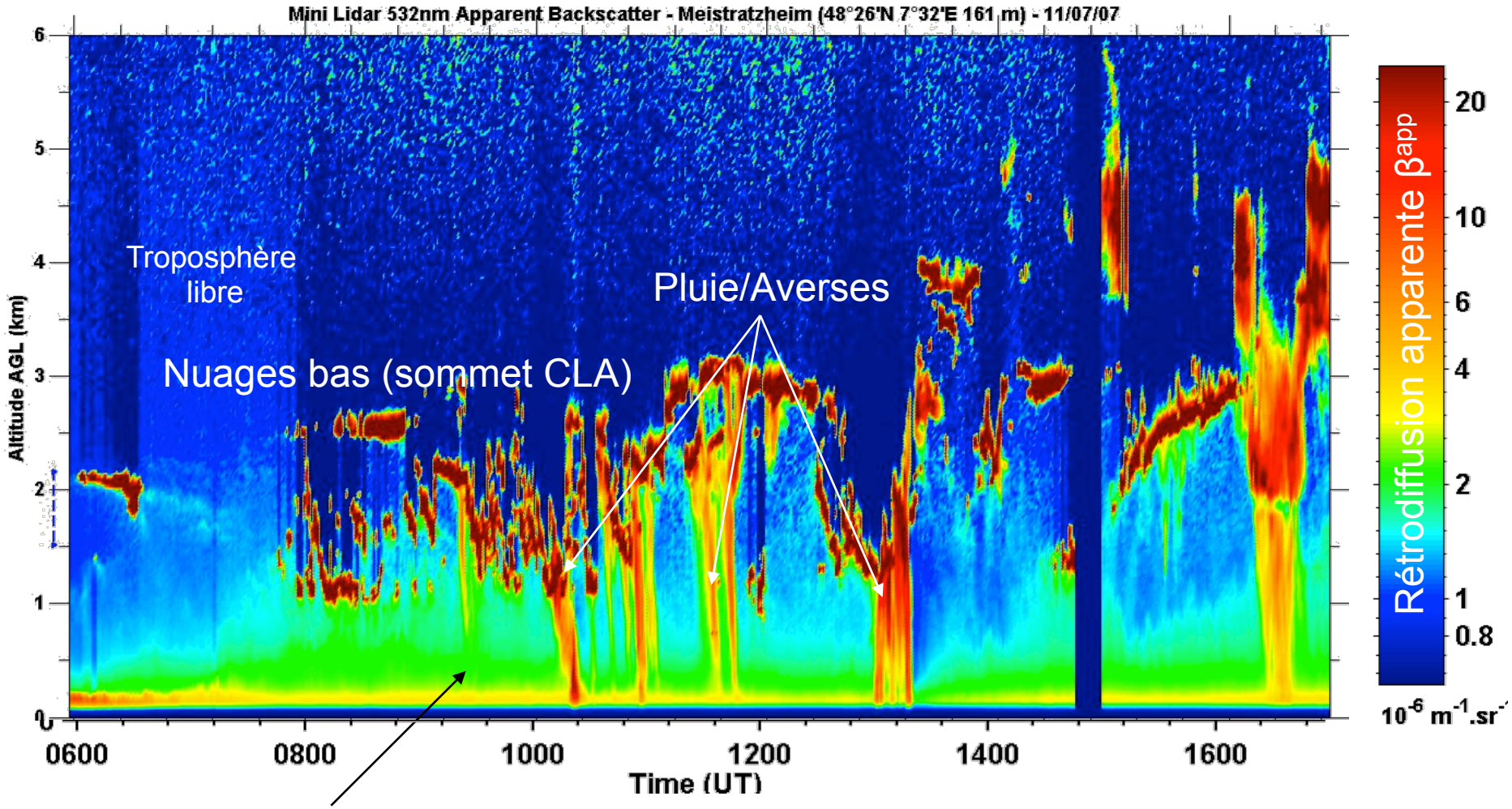


Connaissant *p* et *T* on calcule la rétrodiffusion et l'extinction moléculaire en valeur absolue pour une zone propre sans particule.

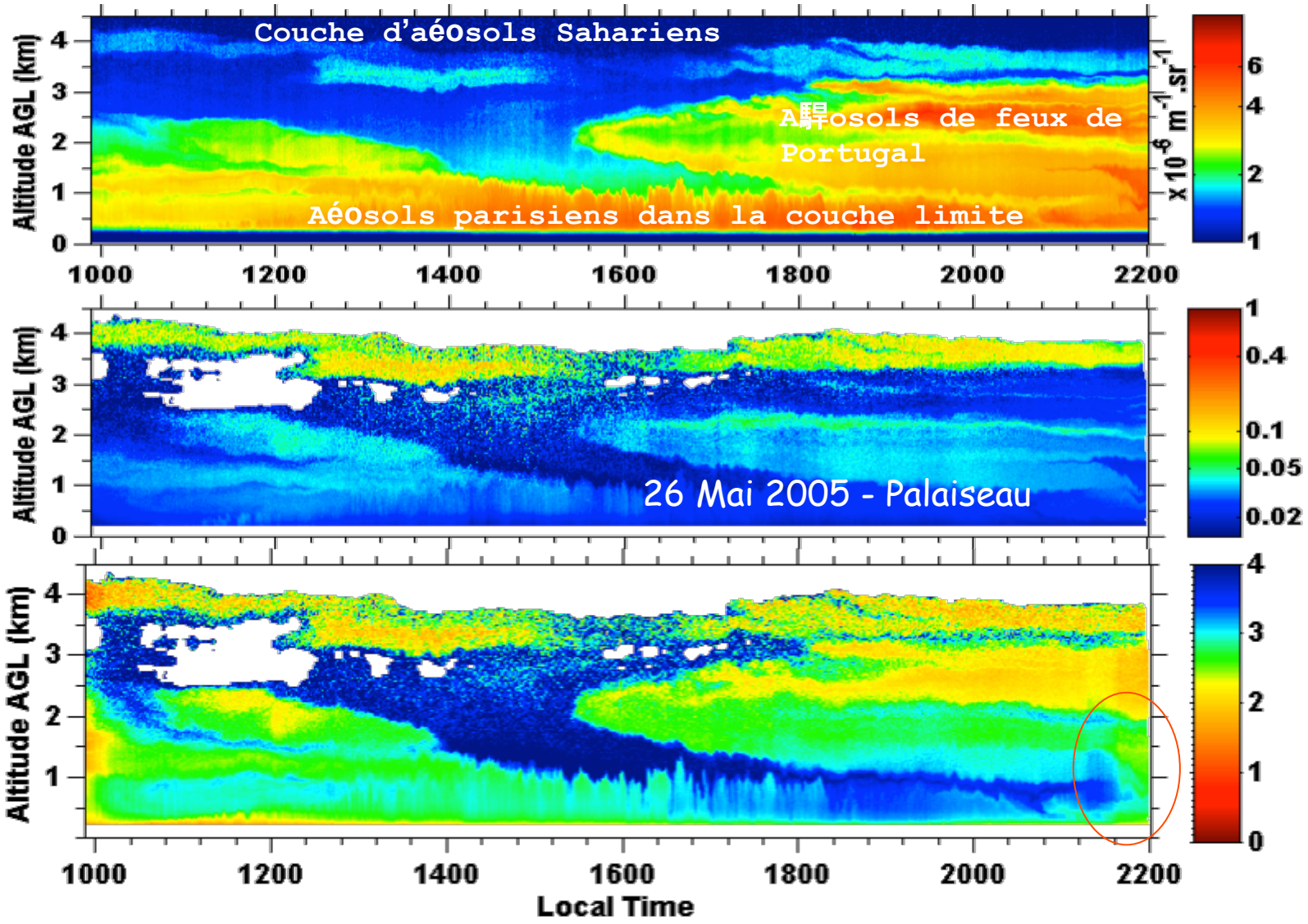
Rétrodiffusion Apparente



Situation Météorologique Hétérogène



Couche limite (structure hétérogène et hachée)


Couche d'aéOsols Sahariens
Aéosols de feux de Portugal
Aéosols parisiens dans la couche limite
26 Mai 2005 - Palaiseau
Altitude AGL (km)
Local Time
x 10-6 m-1.sr-1

Épaisseur Optique (1/2)

- L'épaisseur optique d'une couche de particules est l'intégrale du coefficient d'extinction volumique

$$EO_p(R_a,R_b) = \int_{R_a}^{R_b} \alpha_{e,p}(x)\,dx$$

- On utilise 2 fois l'équation lidar pour 2 distances avant et après la couche de particules

$$\frac{s_L(R_a)}{s_L(R_b)} = \frac{\left[\beta_{\pi,m}(R_a)\right]}{\left[\beta_{\pi,m}(R_b)\right]} \exp\left[2\int_{R_a}^{R_b}\left(\alpha_{e,m}(x)+\alpha_{e,p}(x)\right)dx\right]$$

- L'épaisseur optique est

$$EO_p(R_a,R_b) = \frac{1}{2}\ln\left[\frac{s_L(R_a)}{s_L(R_b)}\right] - \frac{1}{2}\ln\left[\frac{\beta_{\pi,m}(R_a)}{\beta_{\pi,m}(R_b)}\right] - \int_{R_a}^{R_b}\alpha_{e,m}(x)\,dx$$

Épaisseur Optique (2/2)

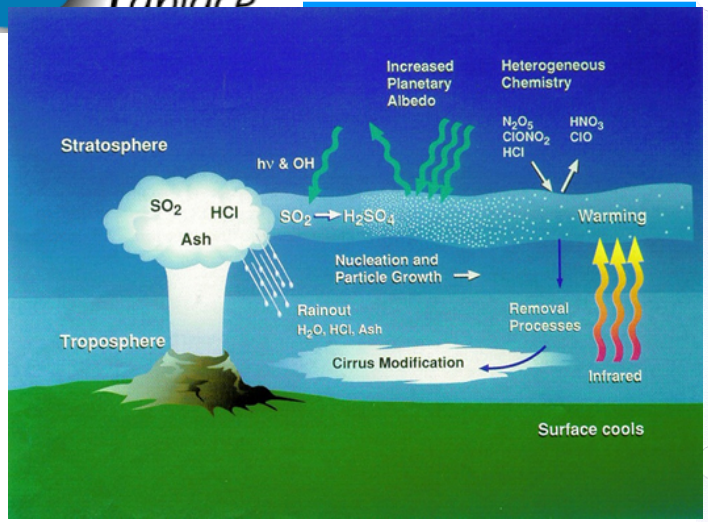
- On néglige les erreurs sur les termes moléculaires. L'erreur peut s'exprimer en considérant le rapport signal sur bruit en écart type (intervalle de confiance de 85 %)

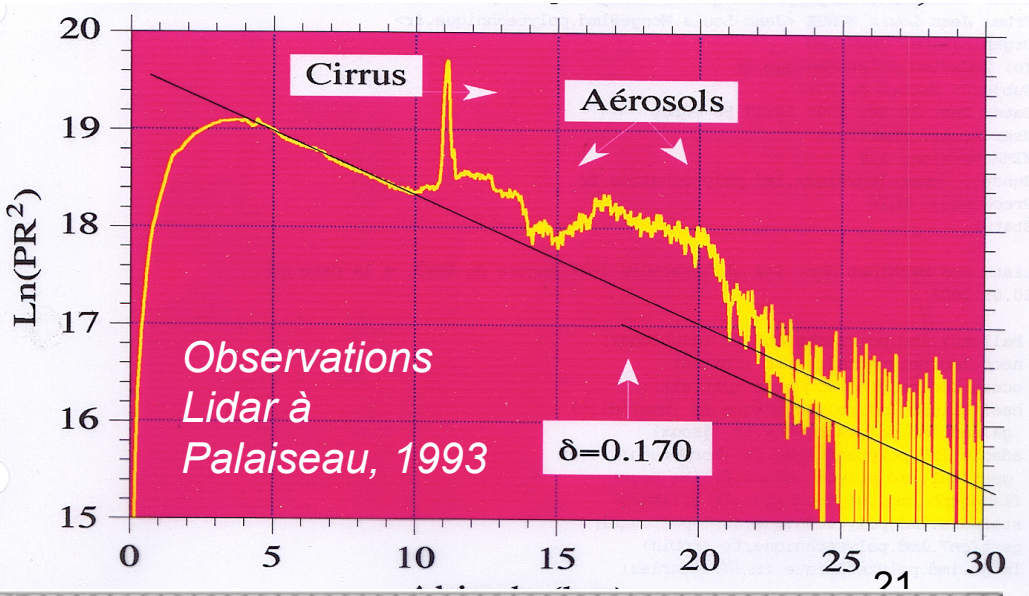
$$\delta EO_p = \frac{1}{2}\ln\left(1 \pm \sum_{a,b} \frac{1}{RSB_{\sigma,i}}\right)$$

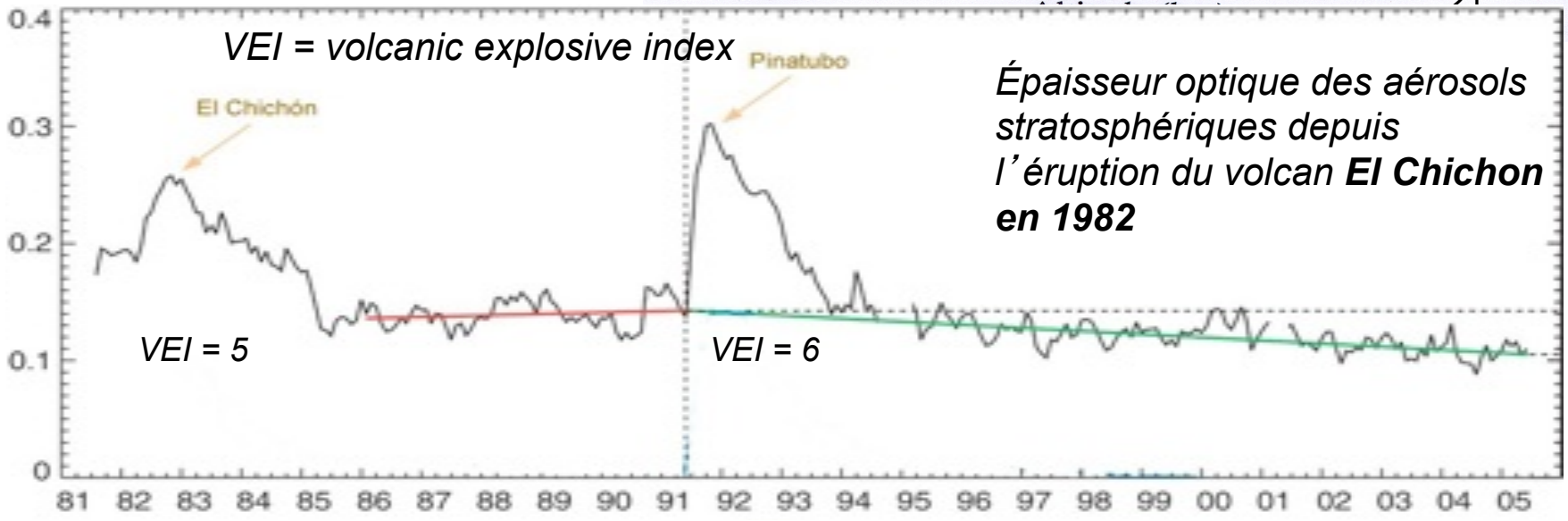
- Pour RSB > 10

$$\delta EO_p = \frac{1}{2}\sum_{a,b} \frac{1}{RSB_{\sigma,i}}$$

Éruption du Mt Pinatubo, 1991







Épaisseur optique des aérosols stratosphériques depuis l'éruption du volcan ***El Chichon en 1982***

Inversion de l'Équation Lidar

La mesure lidar fournit une équation à 2 inconnues β et α,

$$s_L(R) = K\,\beta(R)\exp\left[-2\int_0^R \alpha(y)dy\right] \qquad s_L(R) = P_L(R)\,R^2$$

Une seconde équation est nécessaire pour résoudre. On utilise une relation entre la diffusion et l'extinction : $\beta_\pi(R) = k\,\alpha_e(R)$

Pour les molécules d'air k_m = 0,12 sr^{-1} est constant.

Pour des particules $s_L(R) = K\,k_p\,\alpha_p(R)\exp\left[-2\int_0^R \alpha_p(y)dy\right]$

C'est une équation transcendante (qui contient une fonction exponentielle)

On peut utiliser :

(1) une méthode numérique itérative par approximations successives

(2) des conditions particulières rencontrées dans la pratique

(3) une équation intégrale ou une équation différentielle (de type Bernoulli)

Visée horizontale-Méthode de la Pente

- Elle est applicable dans le cas d'une couche diffusante homogène.
- On utilise une nouvelle variable : $U(R) = Ln[s_L(R)]$

$$U(R) = Ln\,K + Ln\,\beta - 2\int_0^R \alpha\, dy$$

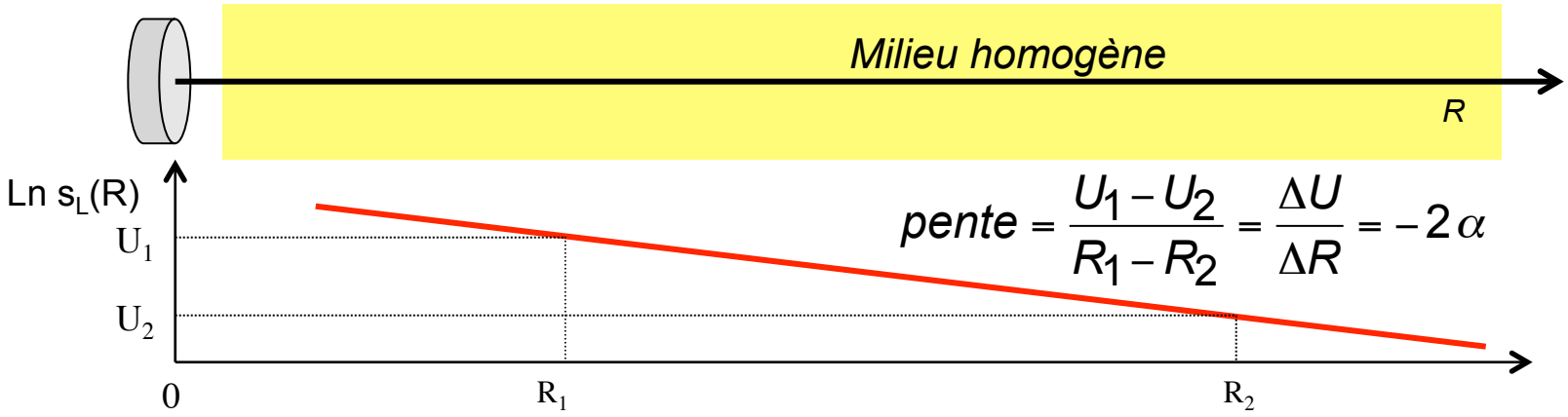
- On écrit une équation différentielle

$$\frac{dU}{dR} = \frac{1}{\beta}\frac{d\beta}{dR} - 2\alpha$$

- Avec β constant :

$$\frac{d\beta}{dR} = 0 \qquad \frac{dU}{dR} = -2\alpha$$

- Exemple d'application : mesures en visée horizontale dans la CLA



Solution par Équation Intégrale

Solution vers l'avant de 0 à R de l'équation lidar en intégrant les 2 membres

On sort *kp* de l'intégrale ce qui suppose qu'il est constant avec *R* , ce qui présuppose que la composition du mélange de particulene varie pas

$$\int_{R_{ref}}^{R} dx\, s_L(x) = K k_p \int_{R_{ref}}^{R} dx\, \alpha(x) \exp\left[-2\int_{R_{ref}}^{x} \alpha_p(y)dy\right]$$

$$\int_{R_{ref}}^{R} dx\, s_L(x) = K k_p \left[1 - \exp\left[-2\int_{R_{ref}}^{R} \alpha(y)dy\right]\right]$$

$$\exp\left[-2\int_{R_{ref}}^{R} \alpha(y)dy\right] = 1 - \frac{2}{K k_p}\int_{R_{ref}}^{R} dx\, s_L(x)$$

Expression que l'on reporte dans la relation de départ

$$s_L(R) = K k_p\, \alpha_p(R)\left\{1 - \frac{2}{K k_p}\int_{R_{ref}}^{R} dx\, s_L(x)\right\}$$

Solution vers l'avant

$$\alpha(R) = \frac{s_L(R)}{\left\{K k_p - 2\int_{R_{ref}}^{R} dx\, s_L(x)\right\}}$$

Pb numérique lorsque les 2 termes du dénominateur deviennent voisins

Solution par Équation Différentielle

On écrit la relation précédente sous forme logarithmique avec un changement de Variable : U(R) = Ln[s_L(R)] pour obtenir une équation différentielle de type Bernoulli

La variable est α(R)

$$\frac{d\alpha(R)}{dR} = \frac{dU(R)}{dR}\alpha(R) + 2\left(\alpha(R)\right)^2$$

Changement de Variable pour annuler le terme non linéaire

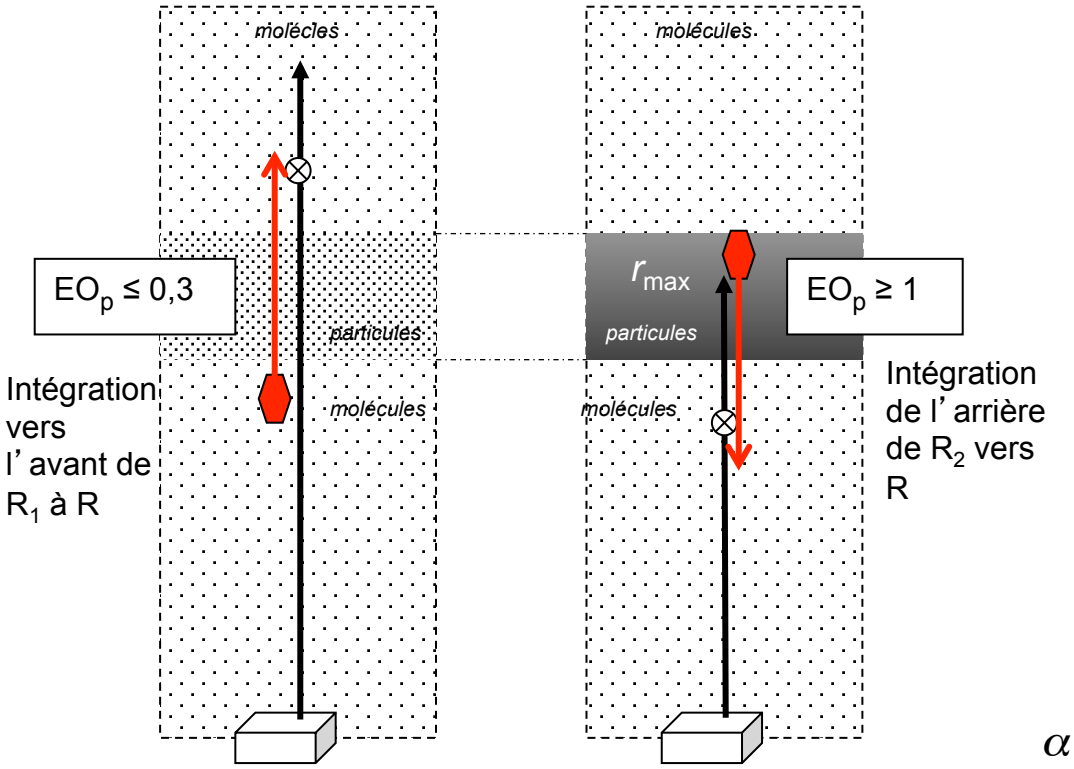
$$\alpha(R) = \left(z(R)\right)^{-1} \qquad \frac{d\,z(R)}{dR} = -\frac{dU(R)}{dR}z(R) - 2$$

Solutions vers l'avant $$\alpha(R) = \frac{s_L(R)}{\frac{s_L(R_{ref})}{\alpha(R_{ref})} - 2\int_{R_{ref}}^{R} s_L(y)dy}$$

Les 2 solutions vers l'avant sont identiques $$K\,k_p = \frac{s_L(R_{ref})}{\alpha(R_{ref})}$$

Solutions vers l'Avant ou de l'Arrière

$$K k_p \exp\left[-2\int_{R_1}^{R_2} \alpha(y)dy\right] = \frac{s_L(R_2)}{\alpha(R_2)}$$



$$K k_p = \frac{s_L(R_1)}{\alpha(R_1)}$$

- Pour des couches de particules denses, il est préférable d'intégrer en partant du plus loin vers le plus près
- Le signe - au dénominateur devient un signe +

⊗ Zone propre pour étalonnage du lidar en coefficient de rétrodiffusion apparent

⬢ Zone de référence pour l'inversion de l'équation lidar

$$\alpha(R) = \frac{s_L(R)}{\frac{s_L(R_{ref})}{\alpha(R_{ref})} + 2\int_{R}^{R_{ref}} s_L(y)dy}$$

Inversion Continue entre Zones

- Lorsque le signal moléculaire est suffisant, on obtient des solutions continues en dehors et dans la couche de particules sans utiliser de valeur de référence dans la couche de particules
- Changement de variable

$$Y(R) = \left(\alpha_{e,p}(R) + \frac{k_m}{k_p} \alpha_{e,m}(R) \right)$$

- Ce qui permet d'écrire l'équation

$$k_p \, Y(R) \exp\left[-2 \int_0^R Y(x)\, dx \right] = \beta_{\pi,m}(R_o) \, \frac{s_L(R)}{s_L(R_o)} \exp\left[-2 \int_0^R \left(\alpha_{e,m}(x) \left(\frac{k_m}{k_p} - 1 \right) \right) dx \right]$$

- Après intégration des 2 membres et des calculs + longs que difficiles, on obtient la solution vers l'avant

$$\alpha_{e,p}(R) = \frac{s_L(R) \; . \exp\left[-2 \int_0^R M(x)\, dx \right]}{k_p \, \frac{s_L(R_o)}{\beta_{\pi,m}(R_o)} - 2 \int_0^R dx \; s_L(x) \exp\left[-2 \int_0^x M(y)\, dy \right]} - \frac{k_m}{k_p} \alpha_{e,m}(R)$$

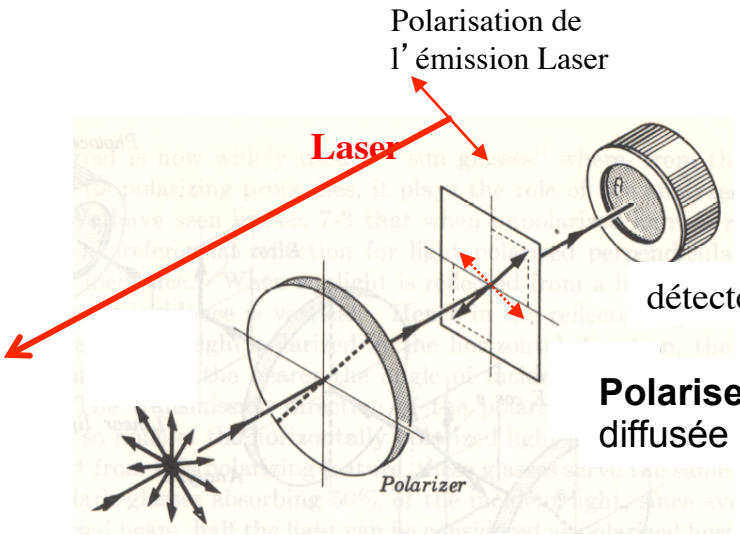
$$M(x) = \alpha_{e,m}(x) \left(\frac{k_m}{k_p} - 1 \right)$$

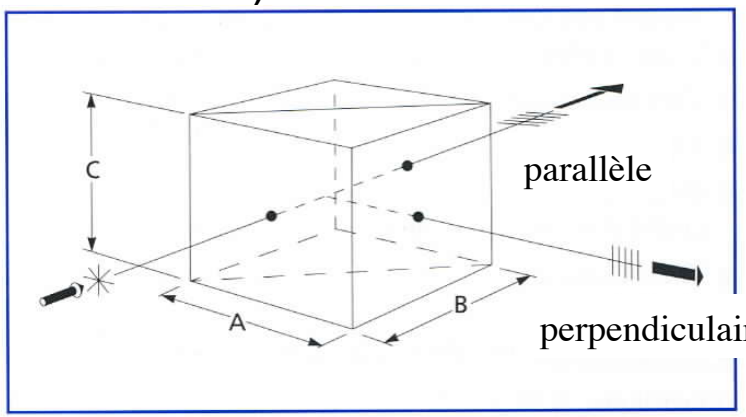
Polarisation

La lumière du Laser de sondage est polarisée linéairement, mais l'interaction avec des diffuseurs non sphériques modifie l'état de polarisation de la lumière diffusée: elle peut être représentée par 2 polarisation orthogonales : parallèle et perpendiculaire, par référence à celle de l'émission Laser

Un polariseur sépare les 2 composantes orthogonales : parallèle et perpendiculaire, de la lumière diffusée. La référence en polarisation est celle de l'émission Laser

Prisme de Glan-Thompson (en quartz ou en calcite)





Polariseur : sélection d'une composante de lumière diffusée perpendiculaire à celle de l'émission Laser

Dépolarisation (1/2)

- La dépolarisation du signal diffusé fournit des informations sur la microphysique des particules et la phase thermodynamique des nuages : gouttelettes d'eau, cristaux de glace. On mesure la dépolarisation en séparant à la réception, au moyen d'un cube polariseur, les composantes parallèle et perpendiculaire à la polarisation du rayonnement laser de sondage
- Les 2 signaux lidars sont

$$s_{L,//}(R) = K_{//}\left[\beta_{\pi,//,m}(R) + \beta_{\pi,//,p}(R)\right] T_m^2(0,R)\, T_p^2(R,0)$$

$$s_{L,\perp}(R) = K_{\perp}\left[\beta_{\pi,\perp,m}(R) + \beta_{\pi,\perp,p}(R)\right] T_m^2(0,R)\, T_p^2(R,0)$$

- En pratique on mesure un taux de dépolarisation totale

$$\Delta_L(R) = \frac{\left[\beta_{\pi,\perp,m}(R) + \beta_{\pi,\perp,p}(R)\right]}{\left[\beta_{\pi,//,m}(R) + \beta_{\pi,//,p}(R)\right]} = \frac{s_{L,\perp}(R)}{s_{L,//}(R)} \frac{K_{//}}{K_{\perp}}$$

- La dépolarisation particulaire que l'on cherche à mesurer est le rapport des coefficients de rétrodiffusion

$$\Delta_p(R) = \frac{\beta_{\pi,\perp,p}(R)}{\beta_{\pi,//,p}(R)}$$

Dépolarisation (2/2)

- Pour déterminer $\Delta_p(R)$ on combine les mesures de $\Delta_L(R)$ et du rapport de diffusion

$$R_{dif}(R) = \frac{\beta_{\pi,p}(R)}{\beta_{\pi,m}(R)} + 1 = \frac{\left[\beta_{\pi,//,p}(R) + \beta_{\pi,\perp,p}(R)\right]}{\left[\beta_{\pi,//,m}(R) + \beta_{\pi,\perp,m}(R)\right]} + 1$$

- Après calcul

$$\Delta_p(R) = \frac{\Delta_L(R)\,Q(R) + 1}{Q(R) - 1} \qquad Q(R) = \left(R_{dif}(R) - 1\right)\frac{1 + \Delta_m}{\Delta_L(R) - \Delta_m}$$

- Lorsque $\Delta_L(R) >> \Delta_m$

$$\Delta_p(R) = \Delta_L(R)\frac{R_{dif}(R)}{R_{dif}(R) - 1}$$

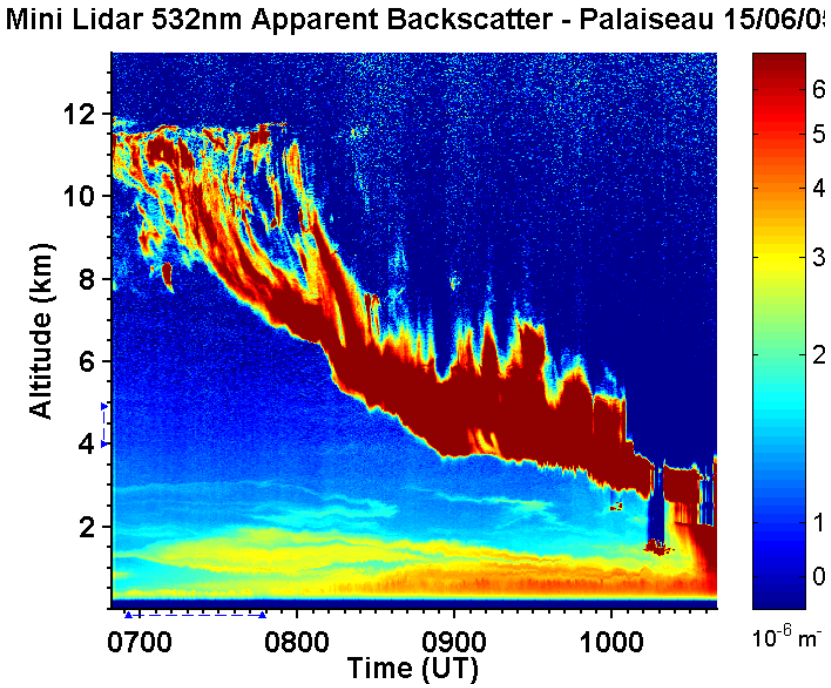
- Étalonnage du lidar au moyen de la diffusion moléculaire sur une zone propre

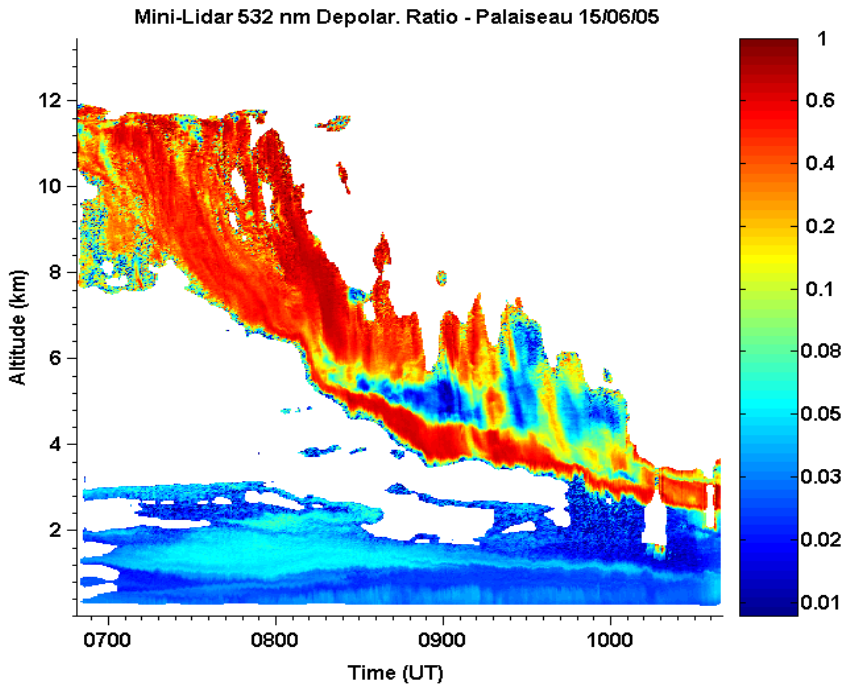
$$\frac{K_{//}}{K_{\perp}} = \frac{s_{L,//}(R)}{s_{L,\perp}(R)}\Delta_m$$

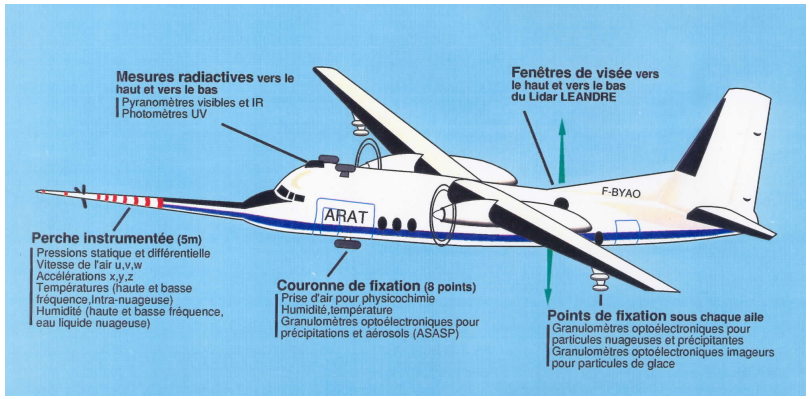
- Dépolarisation moléculaire par l'air dans toute la basse atmosphère pour une lumière laser polarisée linéairement

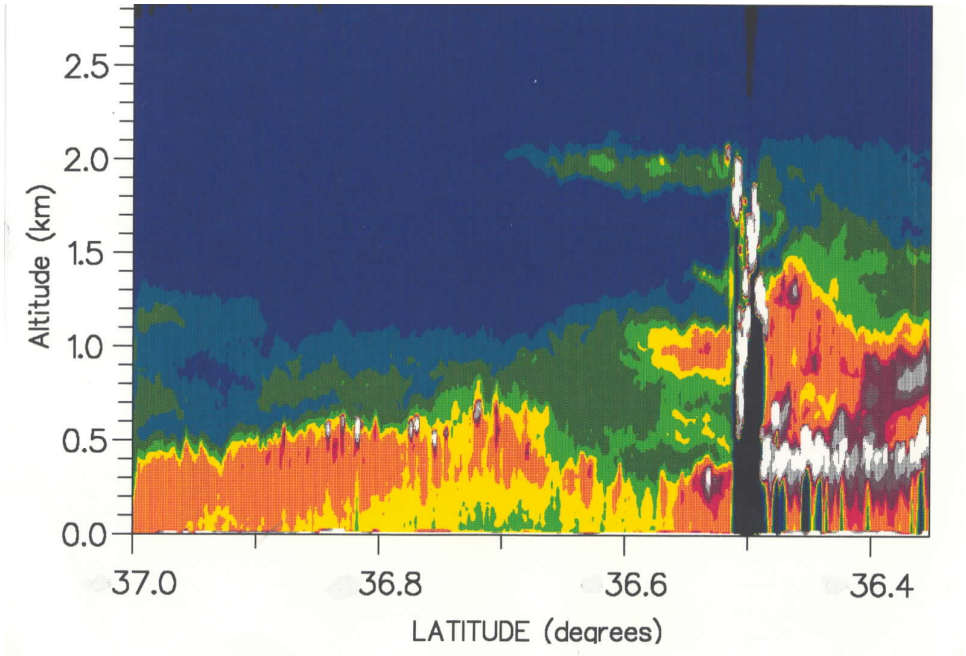
$$\Delta_m = \left(\beta_{\pi,\perp,m} \big/ \beta_{\pi,//,m}\right) = 0{,}0175$$

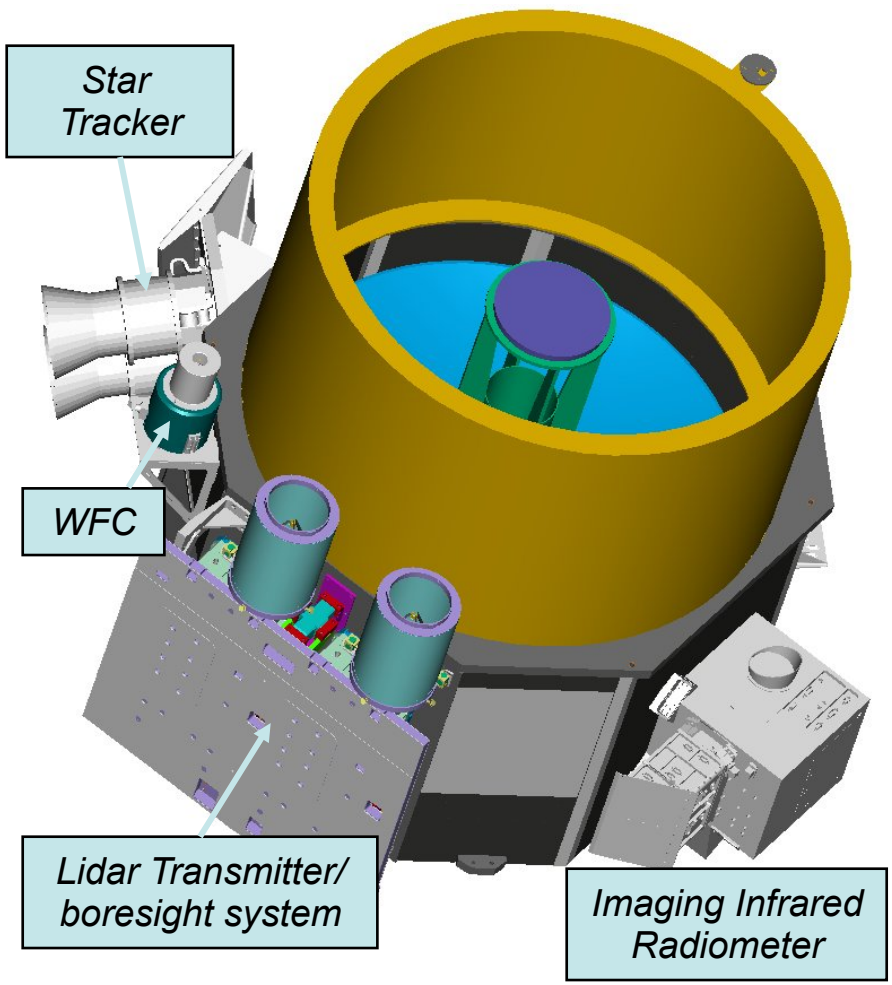
Caractéristiques Nuageuses





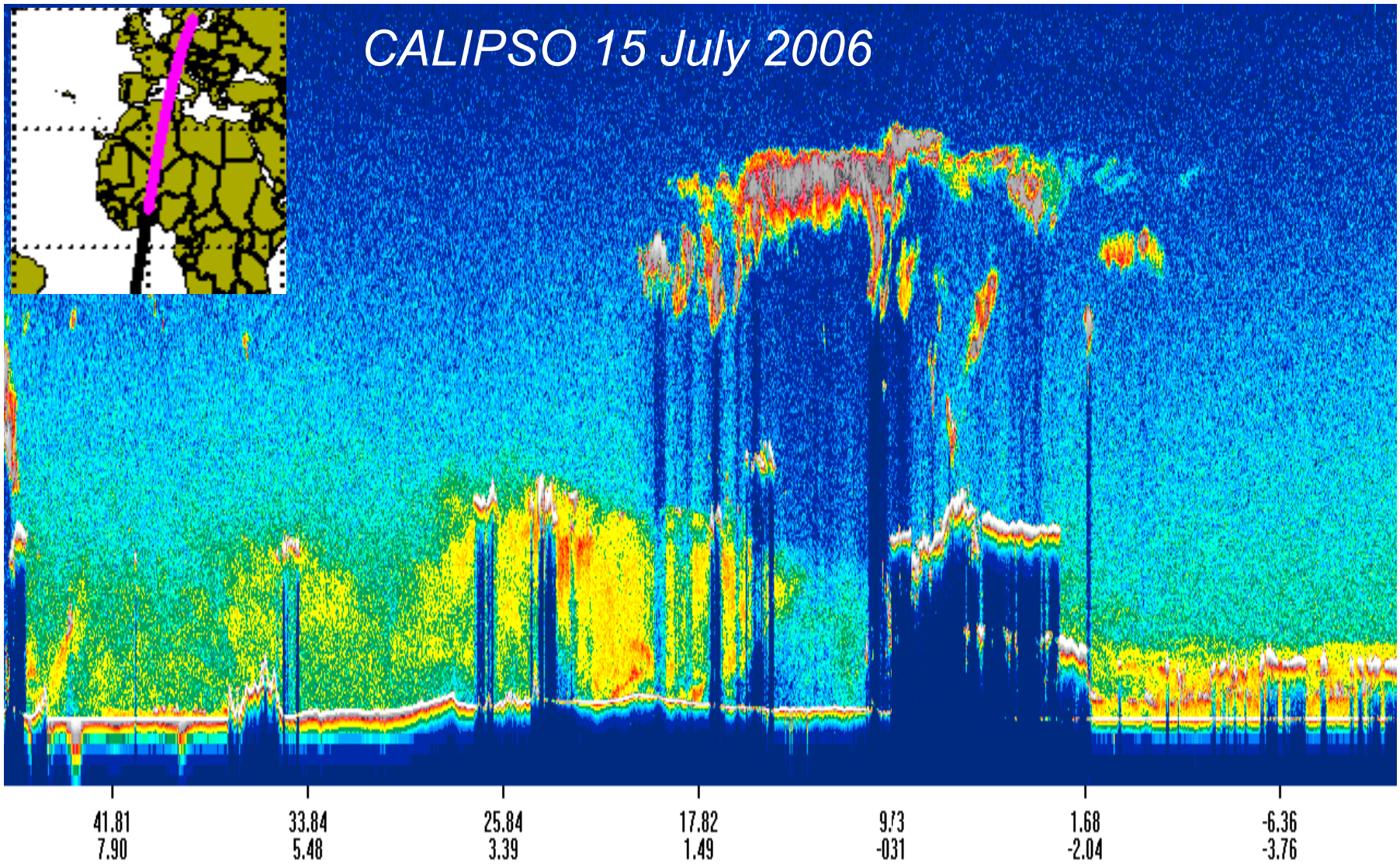

Mesures radiactives vers le haut et vers le bas
Pyranomètres visibles et IR
Photomètres UV
Fenêtres de visée vers le haut et vers le bas du Lidar LEANDRE
F-BYAO
ARAT
Perche instrumentée (5m)
Pressions statique et différentielle
Vitesse de l'air u,v,w
Accélérations x,y,z
Températures (haute et basse fréquence,Intra-nuageuse)
Humidité (haute et basse fréquence, eau liquide nuageuse)
Couronne de fixation (8 points)
Prise d'air pour physicochimie
Humidité,température
Granulomètres optoélectroniques pour précipitations et aérosols (ASASP)
Points de fixation sous chaque aile
Granulomètres optoélectroniques pour particules nuageuses et précipitantes
Granulomètres optoélectroniques imageurs pour particules de glace


Altitude (km)
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
37.0
36.8
36.6
36.4
LATITUDE (degrees)


Star Tracker
WFC
Lidar Transmitter/ boresight system
Imaging Infrared Radiometer

Institut Pierre Simon Laplace

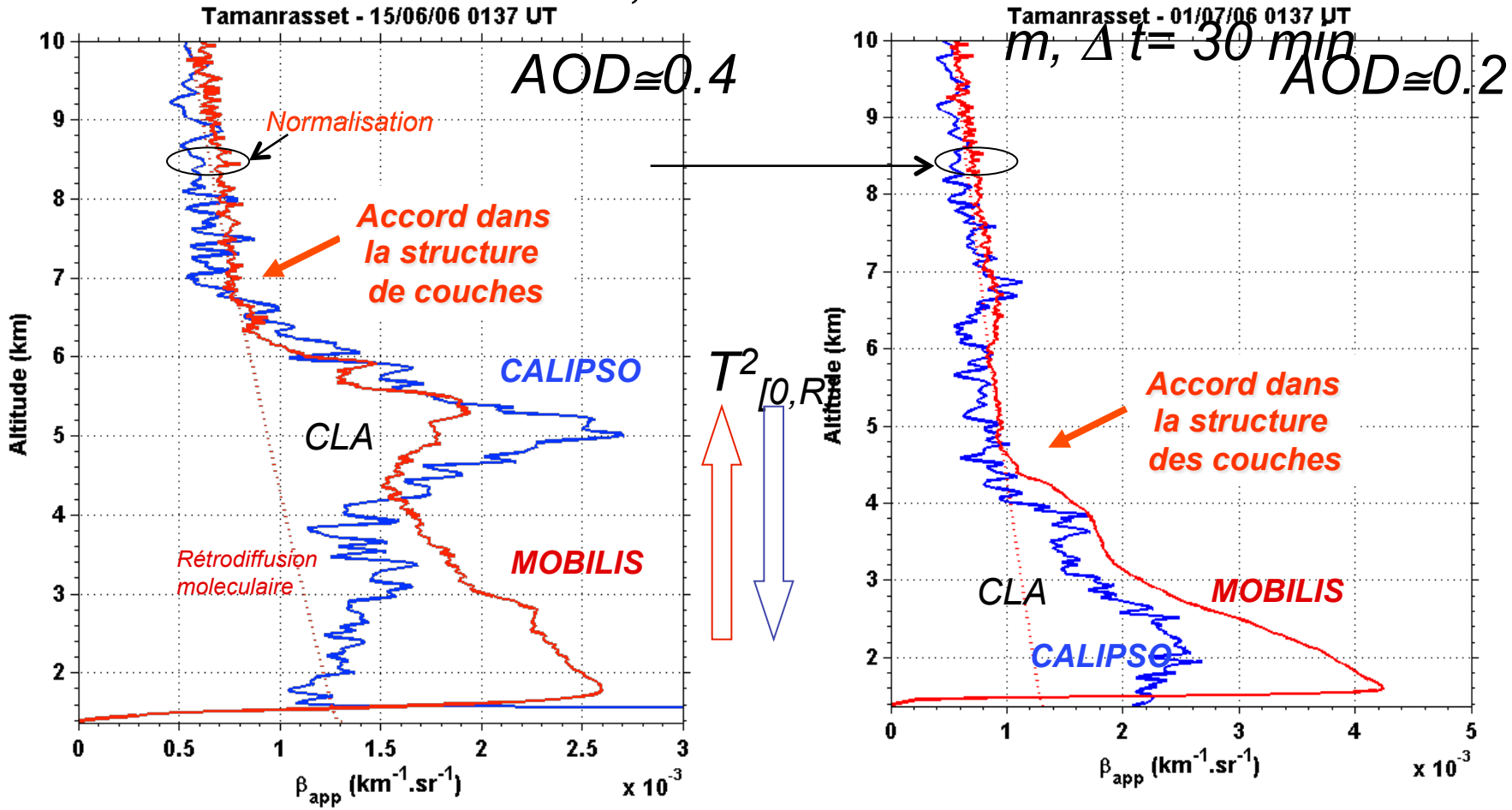
Sciences de l'environnement



MOBILIS) vs Lidar spatial (CALIPSO) au Sahara

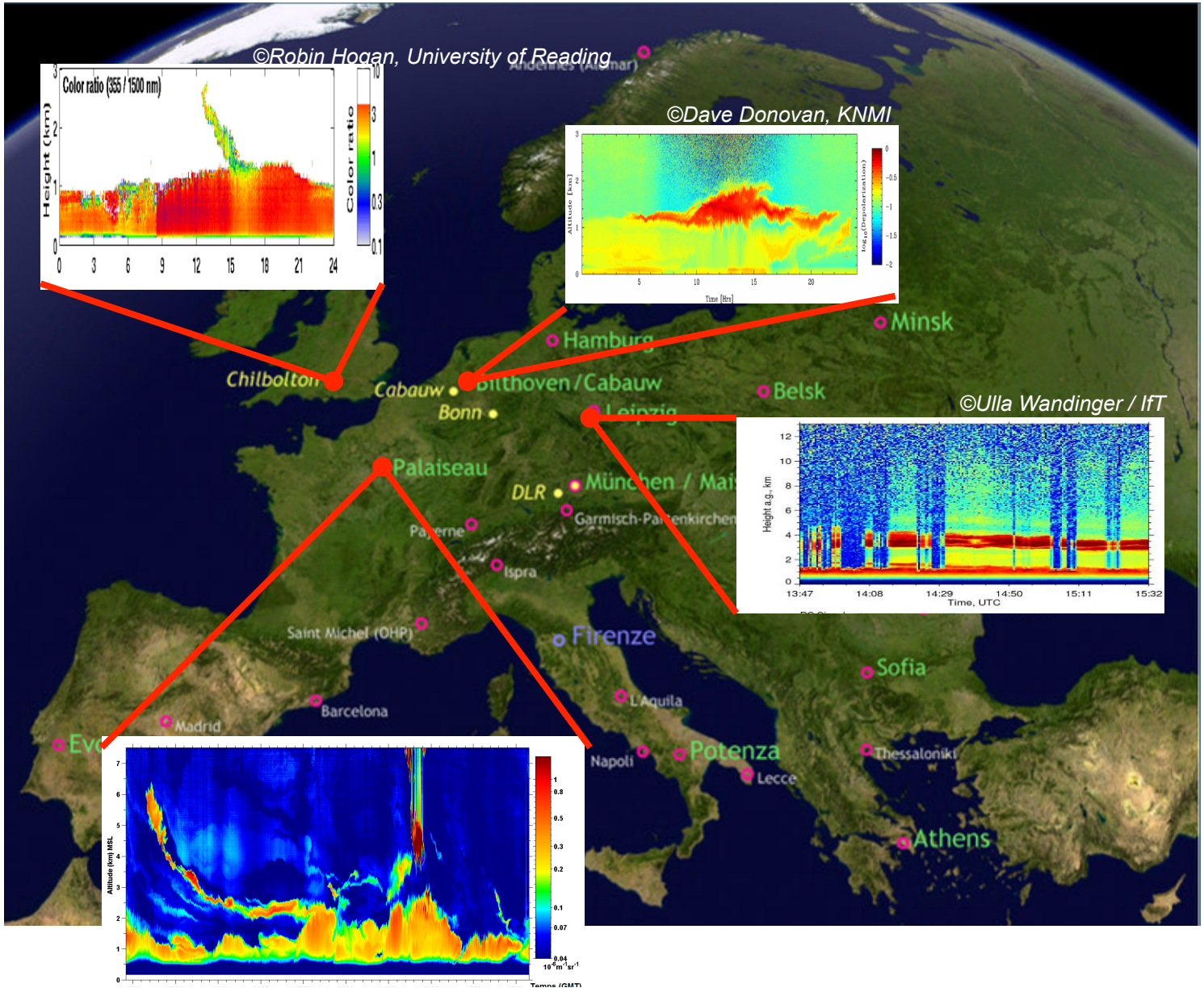
Profils de retrodiffusion attenué βT_2, Nuit

CALIOP Δz= 30 m, Δ x= 33 km MOBILIS Δz= 30 m, Δ t= 30 min



Mais, comment comparer / valider les profils lidar?

Réseau Lidar aérosol Européen: EARLINET



Le réseau LEONET durant MEGAPOLI

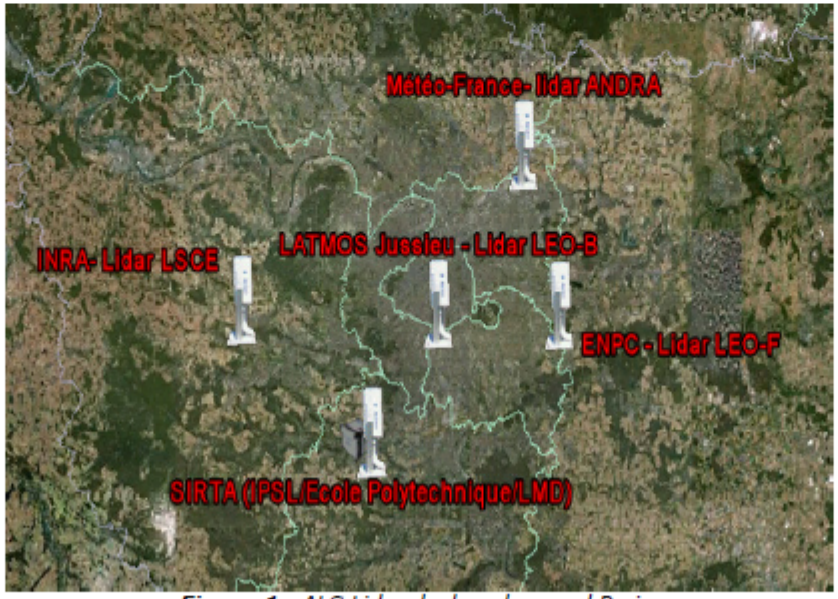
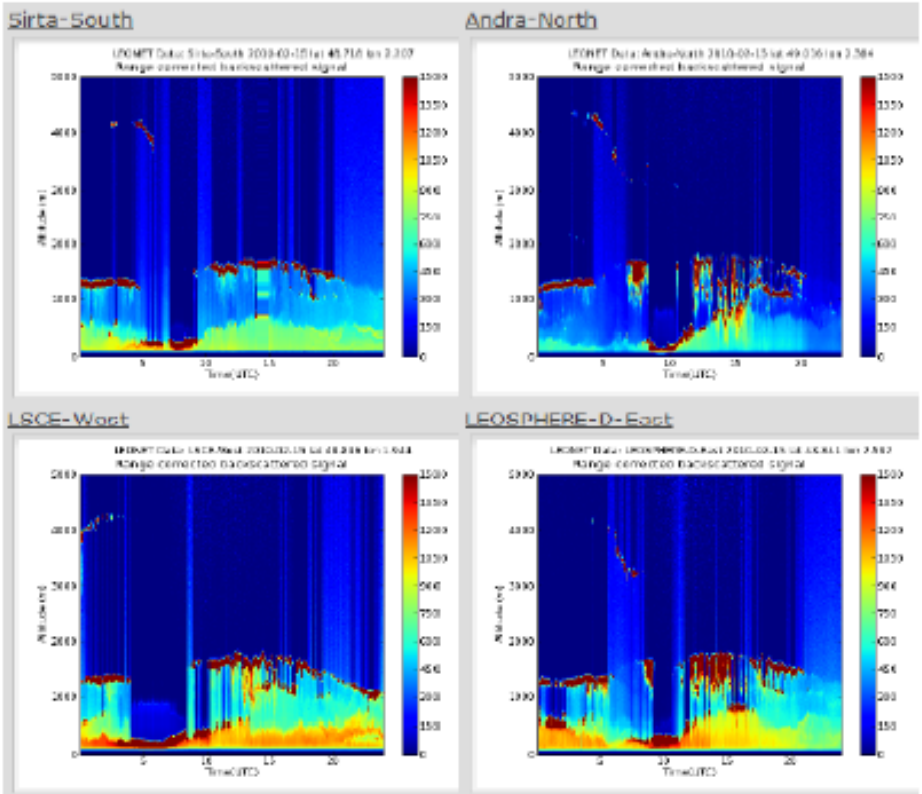


Figure 1 : *ALS Lidar deployed around Paris.*



Site Name	Lat	Lon	Alt (m)	PI	PI affiliation
LEOSPHERE-D East	48.841389	2.591944	110	Sophie Loaec	LEOSPHERE
LSCE West	48.846111	1.943889	85	Michel Ramonet	LSCE
Andra North	49.015556	2.384444	90	Sebastien Conil	Andra
Sirta South	48.717778	2.207222	180	Martial Haeffelin	Sirta