



LIDAR à absorption différentielle (DIAL et IPDA)

Mesures de la concentration de gaz dans
l'atmosphère

Fabien GIBERT

Laboratoire de Météorologie Dynamique

Institut Pierre et Simon Laplace

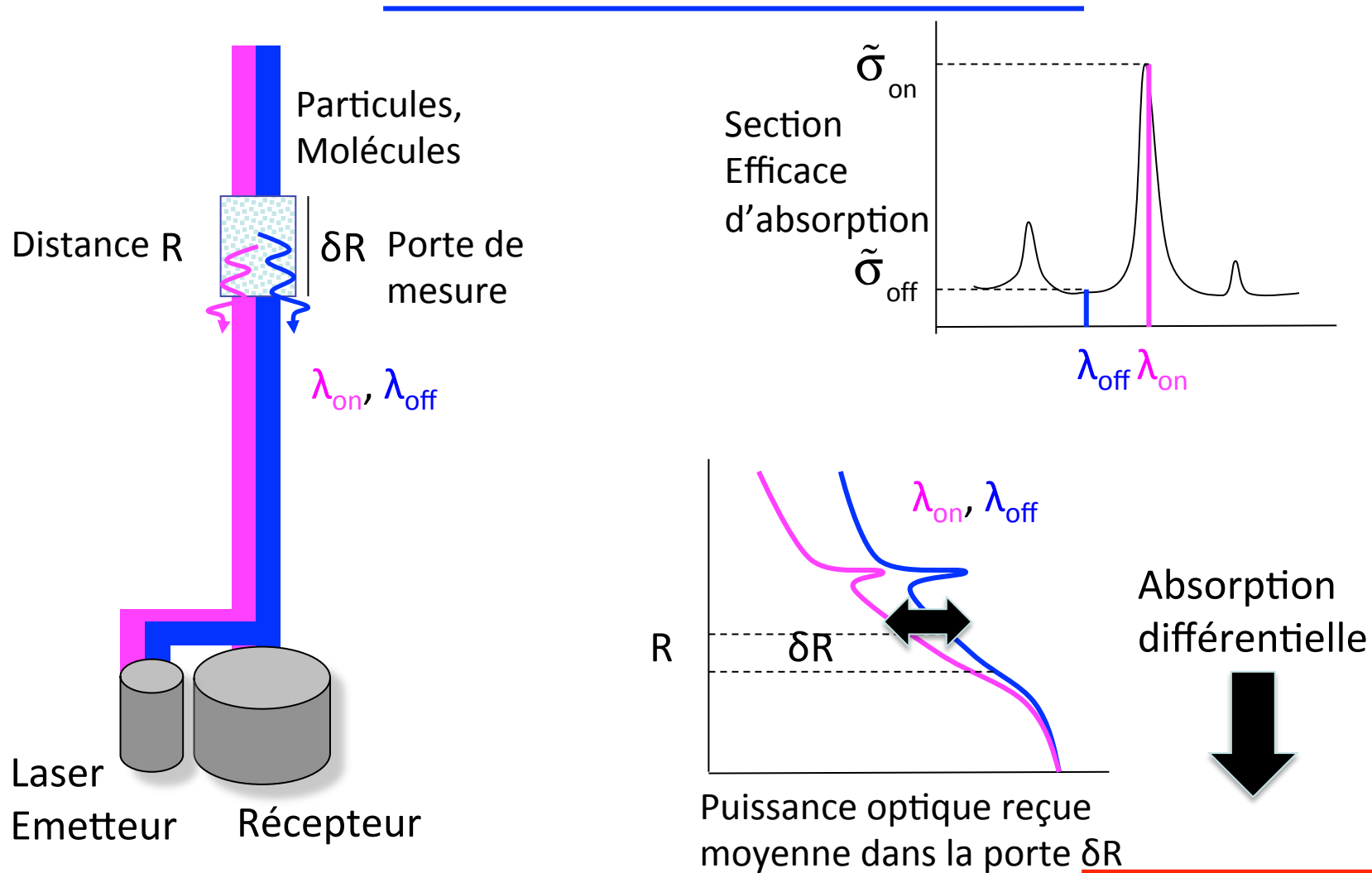
Equipe Atmosphère, Biosphère et Climat, Télédétection

gibert@lmd.polytechnique.fr

Plan

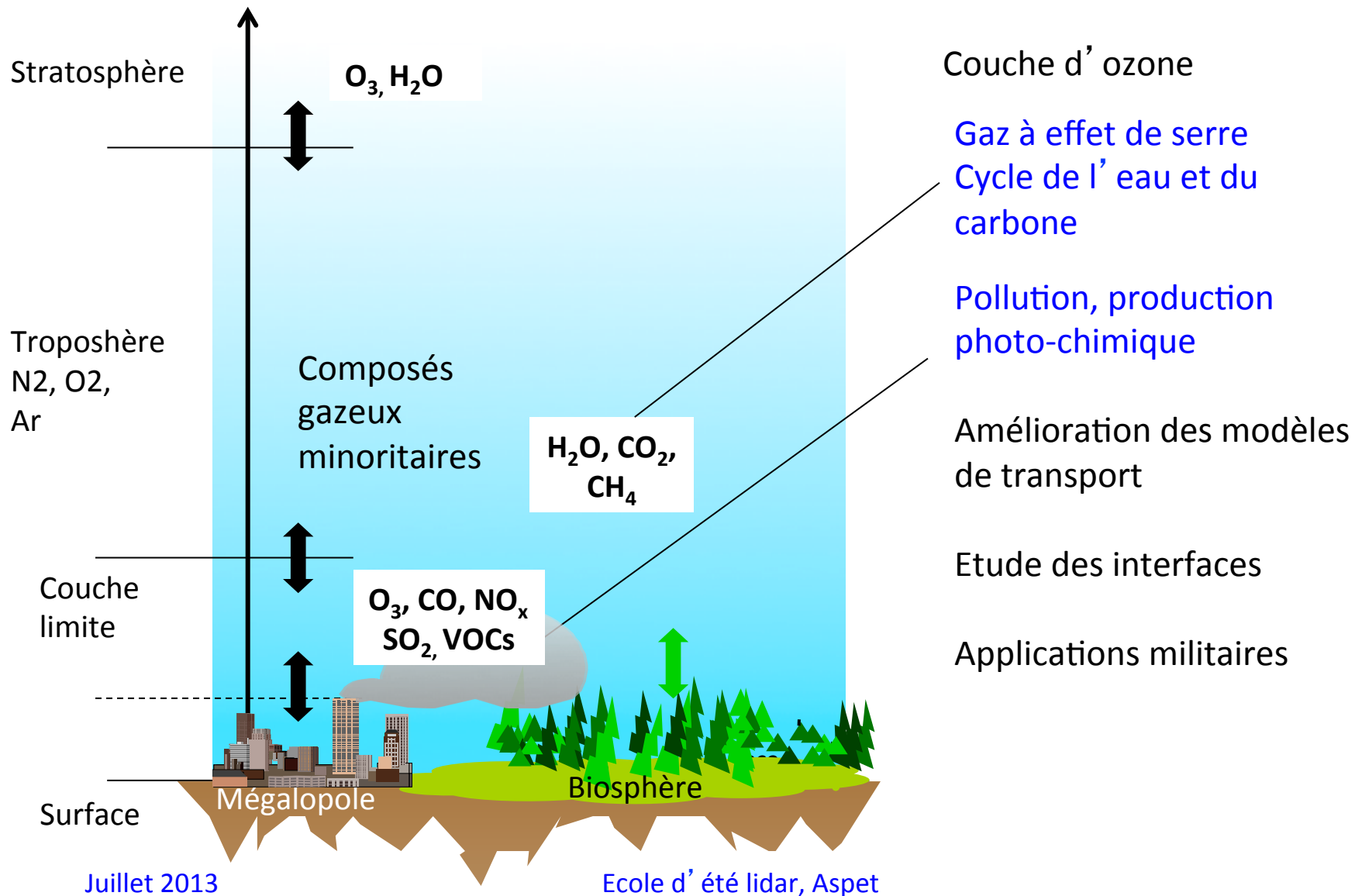
- 1 – Introduction
- 2 – La mesure DIAL et IPDA
- 3 – Précision et biais
- 4 – Systèmes et applications
- 5 – Vers une mesure de flux par lidar

Principe du Lidar à Absorption Différentielle (DIAL)



Concentration (rapport de mélange)

Objectifs géophysiques composés gazeux minoritaires



Lidar DIAL et autre instrumentation continuité d'échelle

Instruments in-situ

Profil aéroporté

Ballon (stratosphère)

Drones (couche de surface)



Instruments in-situ

- Précision

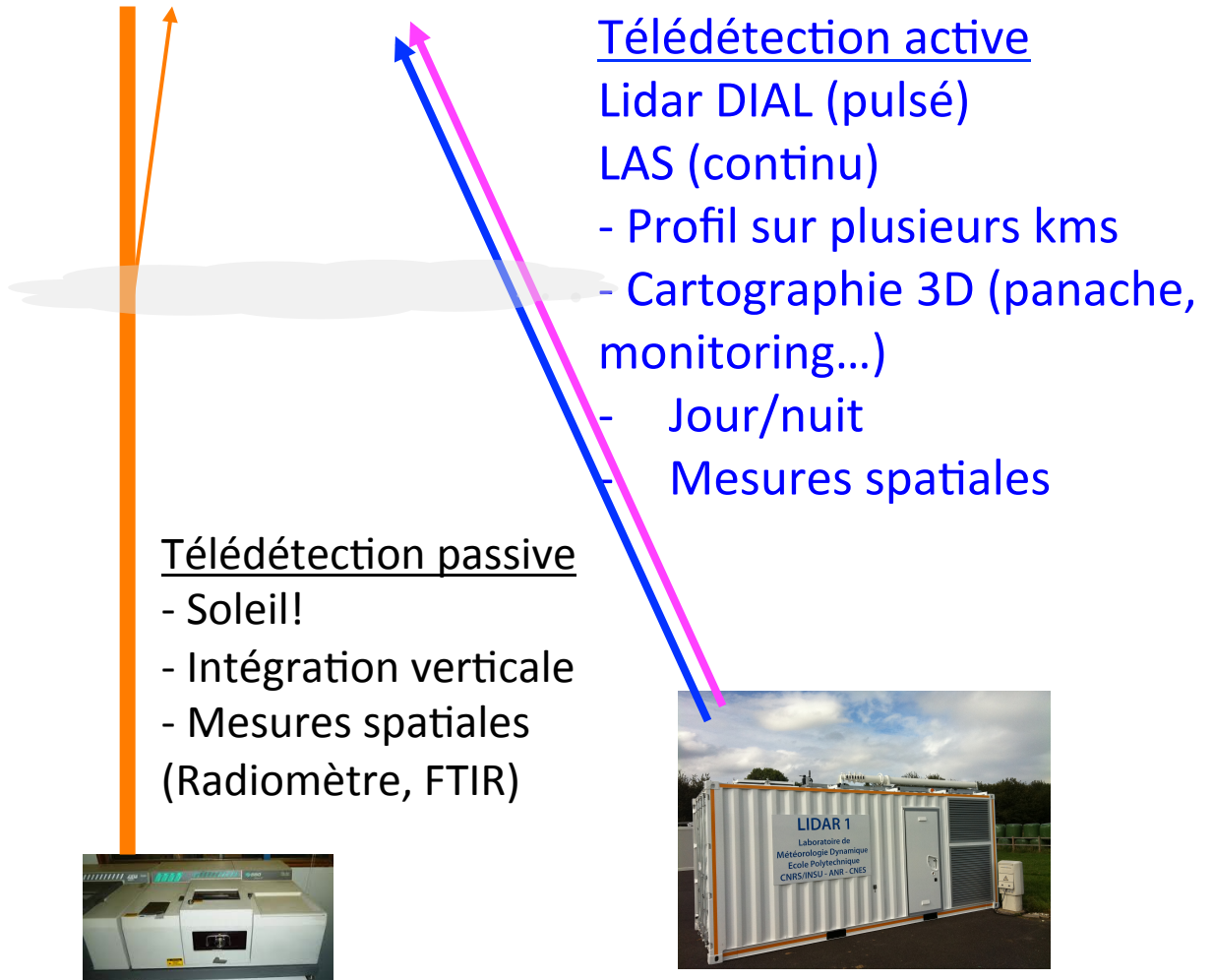
- In-situ !

Analyseur de gaz

GC, LICOR, Picarro, LDAS...



Juillet 2013

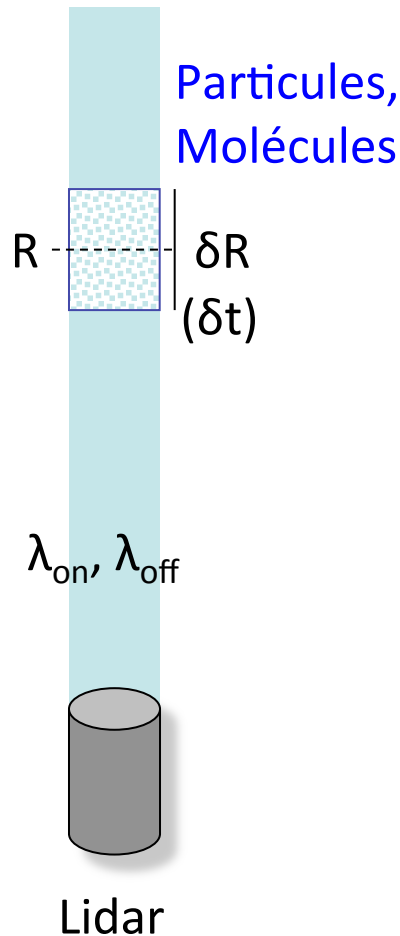


Ecole d'été lidar, Aspet

2 - La mesure DIAL

- Mesure DIAL
- Equation lidar, coefficient d'absorption différentielle et épaisseur optique
- Exemples de signaux DIAL
- Fonction de poids WF
- Application au spatial: lidar IPDA

Mesure DIAL



Rapport de mélange moyen du composé X dans δR

$$\rho_X(R) = \frac{\alpha(R)}{WF(R)}$$

Mesure DIAL

Coefficient d'absorption différentielle de X
[m⁻¹]

Spectroscopie et données météorologiques

Fonction de poids [m⁻¹]

$$WF = n_a (\tilde{\sigma}_{on} - \tilde{\sigma}_{off})$$

Densité d'air sec
[m⁻³]

Section efficace différentielle d'absorption de X
[m²]

Equation lidar et absorption différentielle

$$P_i \cdot R^2 = K_i \cdot E_i \cdot \beta_i(R) \cdot \exp \left[-2 \int_0^R (\alpha_i(r) + \alpha_{e,i}(r)) dr \right]$$

Moyenne temporelle δt
(nombre de tirs)

Moyenne porte spatiale δR

Puissance moyenne estimée dans une porte δR
à la longueur d'onde i et après N tirs moyennés



$$\alpha(R) = \frac{d}{dR} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{P_{\text{Off}}}{P_{\text{On}}} \right) \right]$$

Coefficient d'absorption différentielle

$$\tau(O, R) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{P_{\text{Off}}(R)}{P_{\text{On}}(R)} \right)$$

Epaisseur optique différentielle

$$+\alpha_{j,\text{Off}} - \alpha_{j,\text{On}}$$

absorption parasite d'un autre gaz (supposée négligeable par la suite)

$$+\frac{d}{dR} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{\beta_{\text{Off}}}{\beta_{\text{On}}} \right) \right]$$

$$+\alpha_{e,\text{Off}} - \alpha_{e,\text{On}}$$

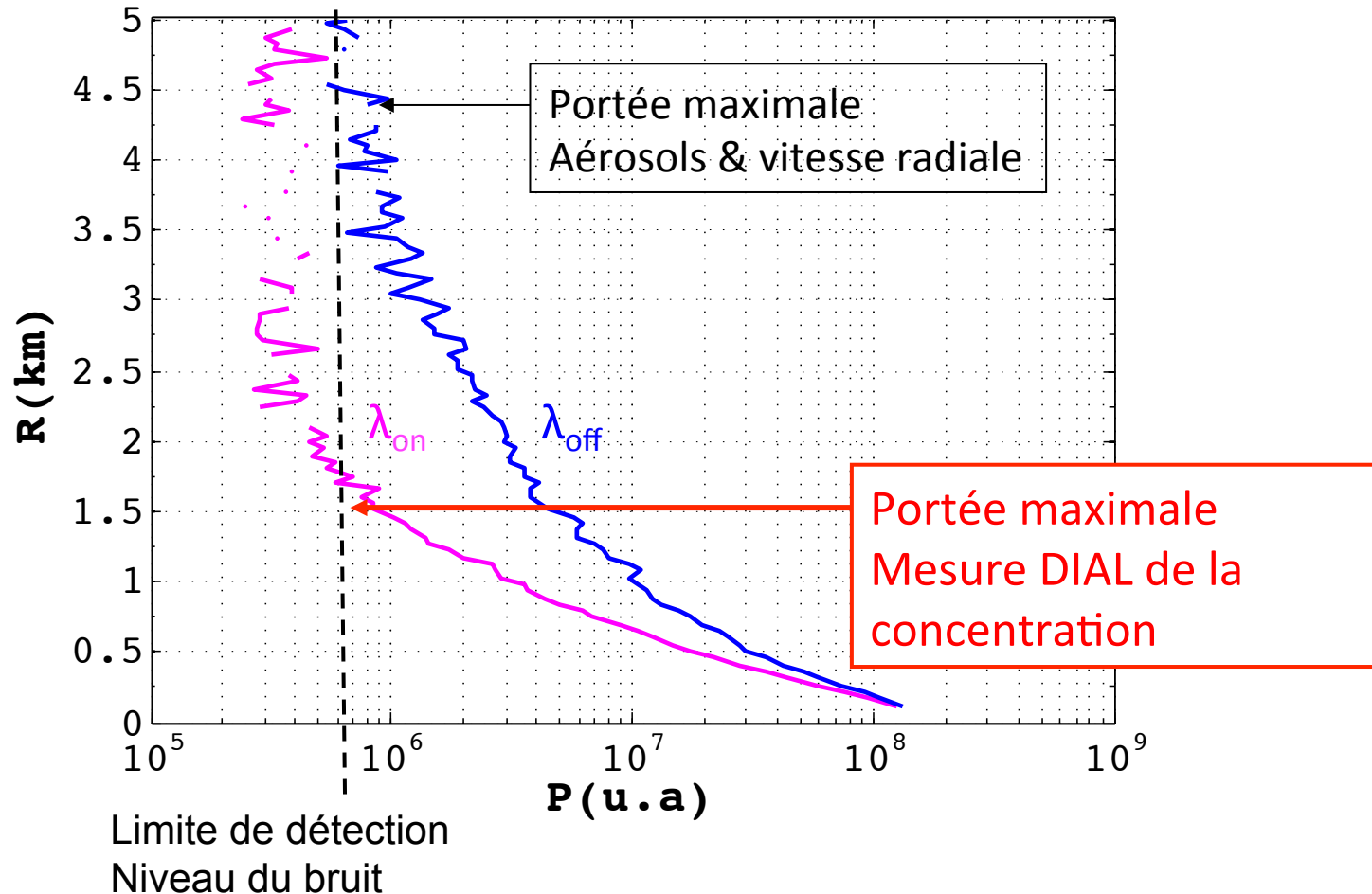
rétrodiffusion, extinction

$$+\frac{d}{dR} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{K_{\text{Off}} \cdot E_{\text{Off}}}{K_{\text{On}} \cdot E_{\text{On}}} \right) \right]$$

paramètres instrumentaux: énergie par impulsion, recouvrement géométrique, rendement hétérodyne...

Exemple de signaux DIAL (1/3)

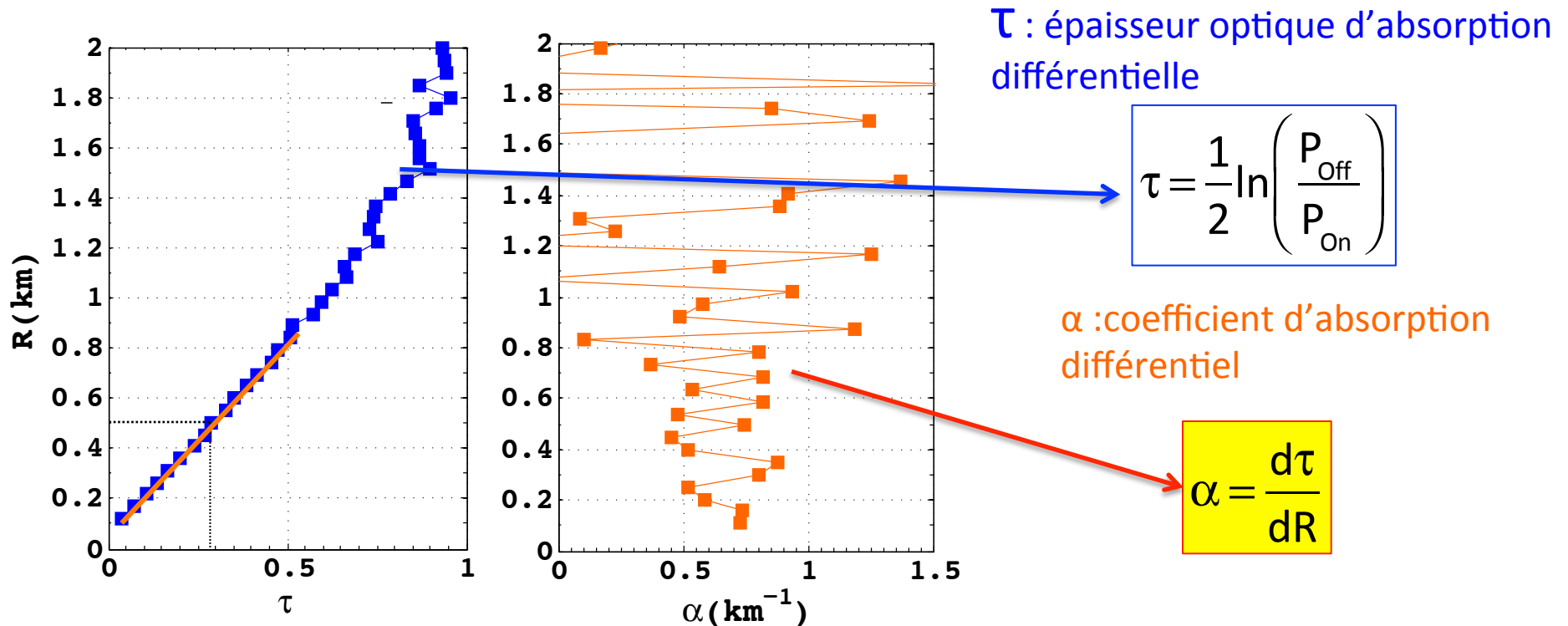
Puissance rétrodiffusée On/Off



Lidar DIAL 2- μm (détection hétérodyne) en visée horizontale dans la couche limite atmosphérique
Mesure de CO₂ atmosphérique

Exemple de signaux DIAL (2/3)

Épaisseur optique et coefficient d'absorption

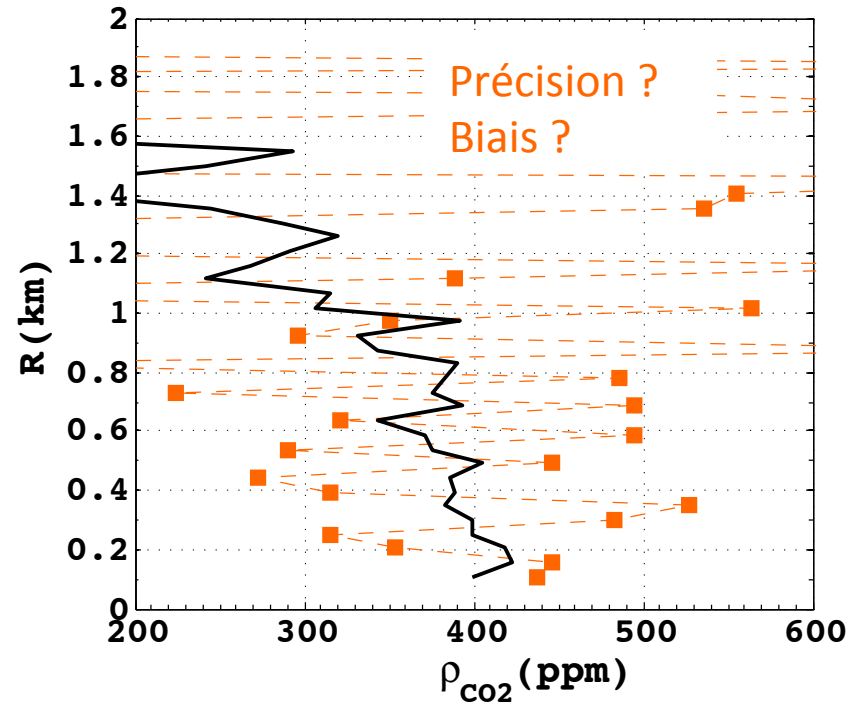
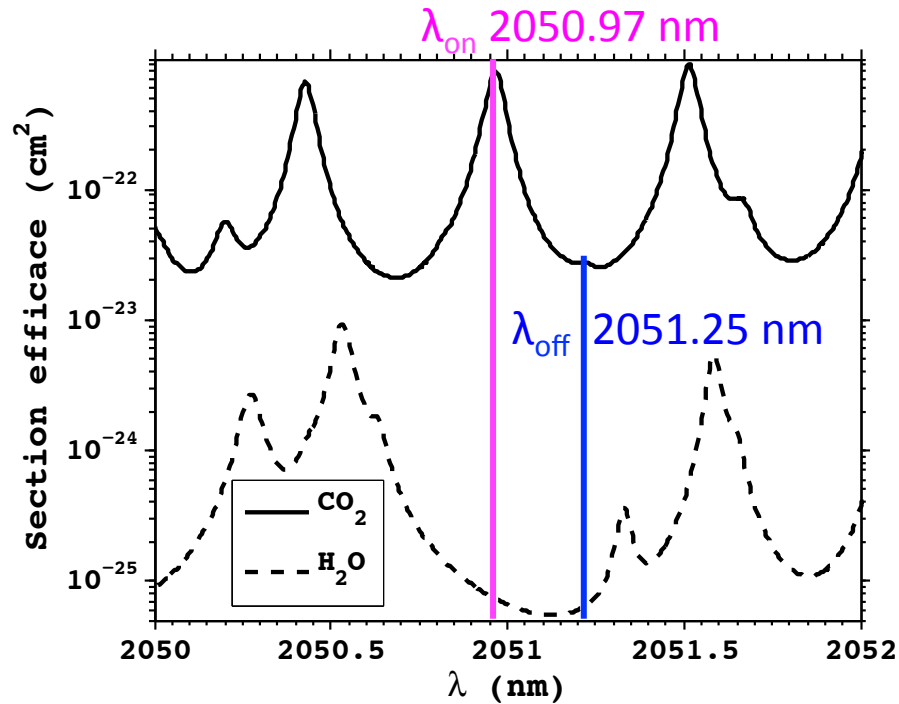


Mesures de l'épaisseur optique = $f(\text{distance})$ dans le cas d'une visée horizontale du lidar

Estimation avec le maximum de vraisemblance de l'absorption différentielle moyenne de CO₂ (fit linéaire contraint par les barres d'incertitude)

Exemple de signaux DIAL (3/3)

Application: rapport de mélange en CO₂

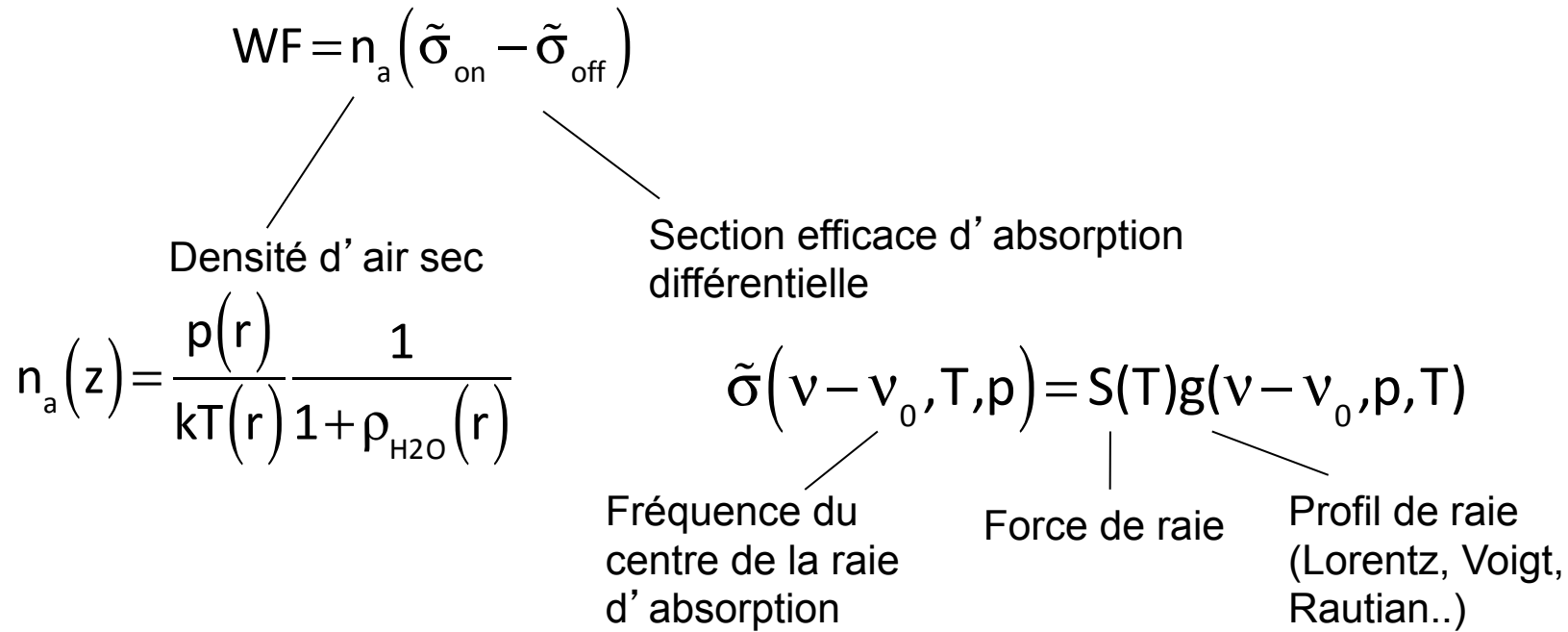


$$\rho_{\text{CO}_2} = \frac{\alpha}{n_a \cdot (\tilde{\sigma}_{\text{on}} - \tilde{\sigma}_{\text{off}})} = 397.2 \cdot 10^{-6}$$

$6.35 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ (pointing to α)
 $2.51 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$ (pointing to n_a)
 $6.37 \cdot 10^{-26} \text{ m}^2$ (pointing to $\tilde{\sigma}_{\text{off}}$)

Mesures horizontales: WF est constante (P et T en surface) → $\alpha = d\tau/dR = C^{\text{te}}$

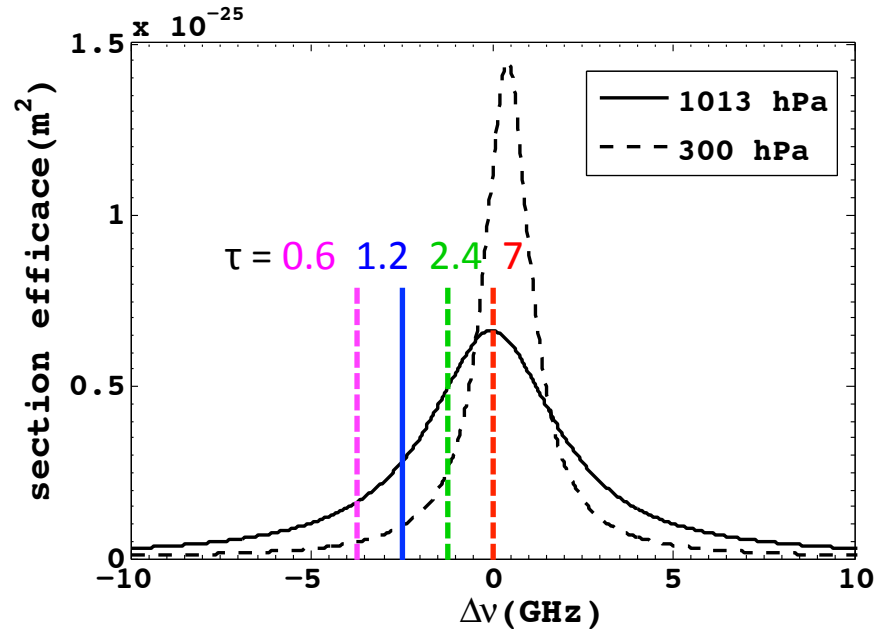
Fonction de poids WF (1/2)



$$WF_i(\rho_w, T, p) = n_0 \tilde{\sigma}_0 \frac{1}{1 + \rho_w} \left(\frac{T_0}{T} \right)^{2-t} \exp \left[-\frac{E'' hc}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \frac{1}{1 + (\Delta \tilde{\nu}_i / \gamma(T, p))^2}$$

Exemple de fonction de poids utilisant un profil de raie Lorentzien

Fonction de poids (2/2)



Raie R30 du CO2

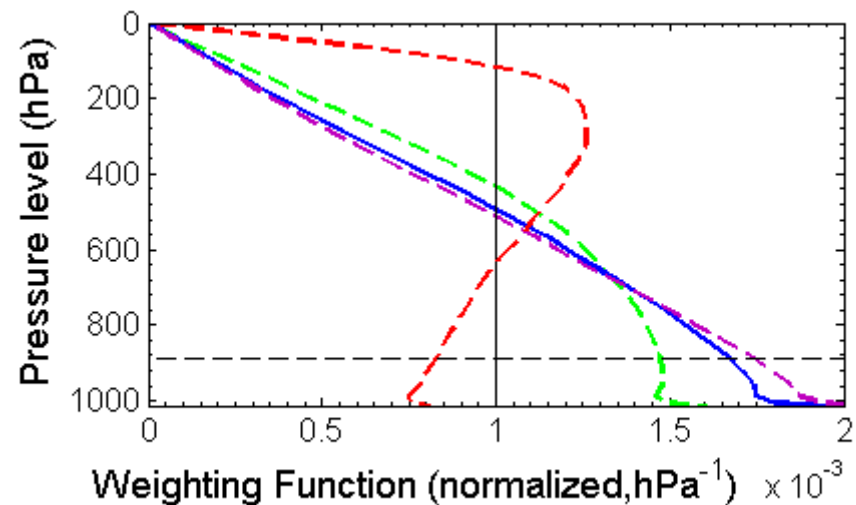
τ : épaisseur optique intégrée 0-60 km

$$\tau_{\text{TOTAL-X}} = \int_0^{P_{\text{surf}}} \rho_X(p) WF_p(p) dp$$

Pour une concentration de gaz donnée dans l'atmosphère, l'épaisseur optique / l'absorption peut changer avec le positionnement du laser « On » sur la raie d'absorption.

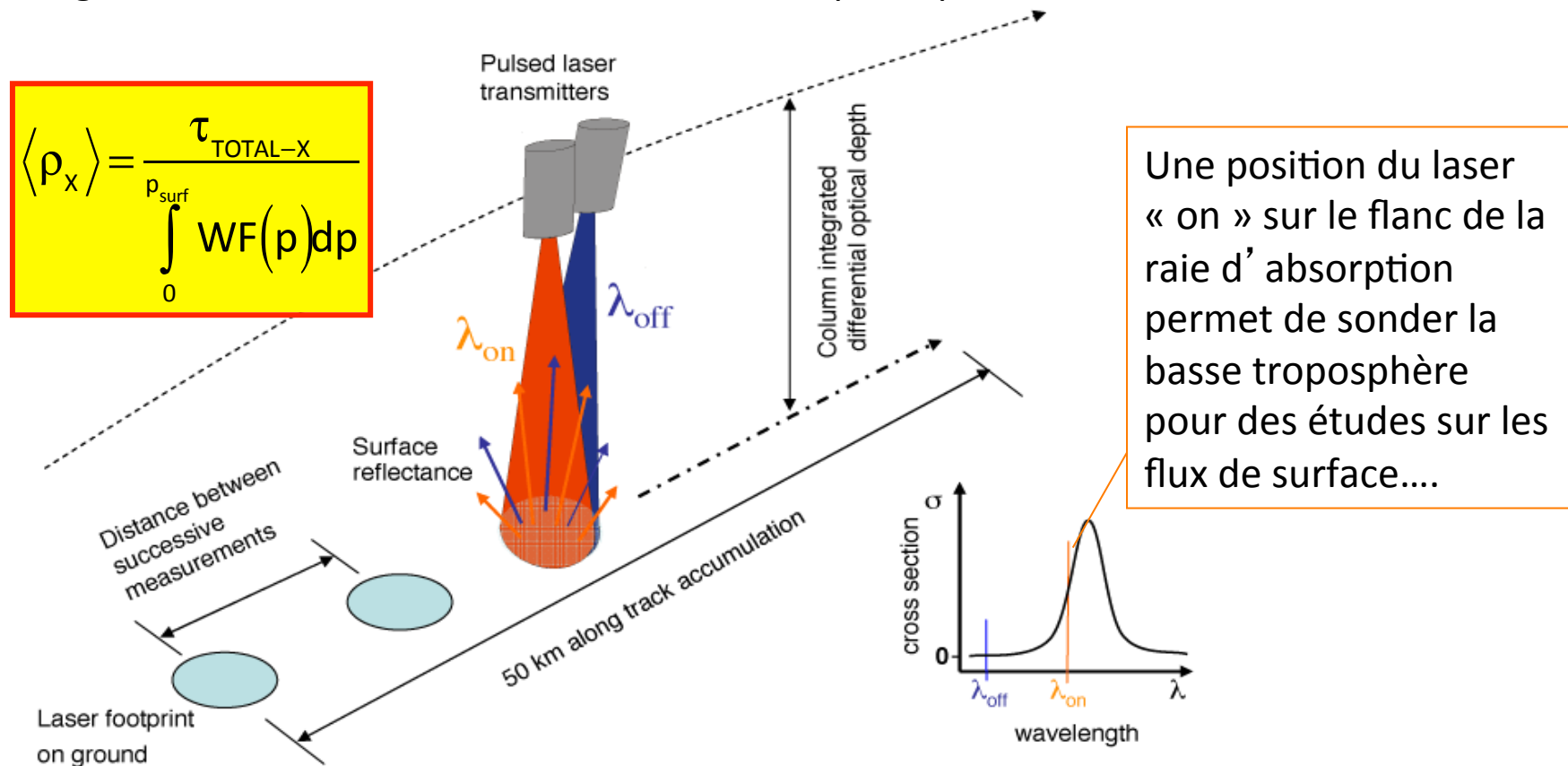
On modifie alors le poids donné à certaines parties de l'atmosphère dans la mesure moyenne de concentration intégrée sur la colonne

$$WF_p(p) = n_a(p) \Delta \tilde{\sigma}(p) \left(-\frac{\partial z}{\partial p}(p) \right)$$



Application à la mesure spatiale: lidar IPDA

On peut utiliser une cible réfléchissante (nuages, surface,..) pour obtenir un bon SNR à grande distance avec une source laser de puissance raisonnable. C' est le cas de figure d' une mesure DIAL effectuée à partir de l' espace. On réalise alors une mesure intégrée de concentration sur la colonne atmosphérique.



3 – Bilan des erreurs

- Précision d'une mesure DIAL
- Optimisation de l'épaisseur optique et choix de la raie d'absorption
- Biais
- Précision et biais sur WF

Précision d'une mesure DIAL (1/3)

Erreur statistique sur l'épaisseur optique

$$\rho_x = \frac{d\tau / dR}{WF} \Rightarrow \frac{\sigma(\rho_x)}{\rho_x} = \sqrt{\left[\frac{\sigma(d\tau)}{d\tau} \right]^2 + \left[\frac{\sigma(WF)}{WF} \right]^2} \quad \text{Erreur sur } \rho_x \rightarrow \text{erreur sur } \tau$$

$$\tau = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{P_{\text{Off}}}{P_{\text{On}}} \right) \Rightarrow \frac{\sigma(\tau)}{\tau} = \frac{1}{2\tau} \sqrt{\frac{\sigma^2(P_{\text{Off}})}{(P_{\text{Off}})^2} + \frac{\sigma^2(P_{\text{On}})}{(P_{\text{On}})^2} - 2 \cdot \text{cor}(P_{\text{On}}, P_{\text{Off}}) \cdot \frac{\sigma(P_{\text{On}}) \cdot \sigma(P_{\text{Off}})}{P_{\text{On}} \cdot P_{\text{Off}}}}$$

Rapport signal sur bruit (SNR)

$$\sigma^2(P) = \frac{\sum_{p=1}^N \sigma^2(P_p) + 2 \sum_{p=1}^{N-1} \sum_{q>p}^N \text{cor}(P_p, P_q) \sigma(P_p) \sigma(P_q)}{N^2}$$

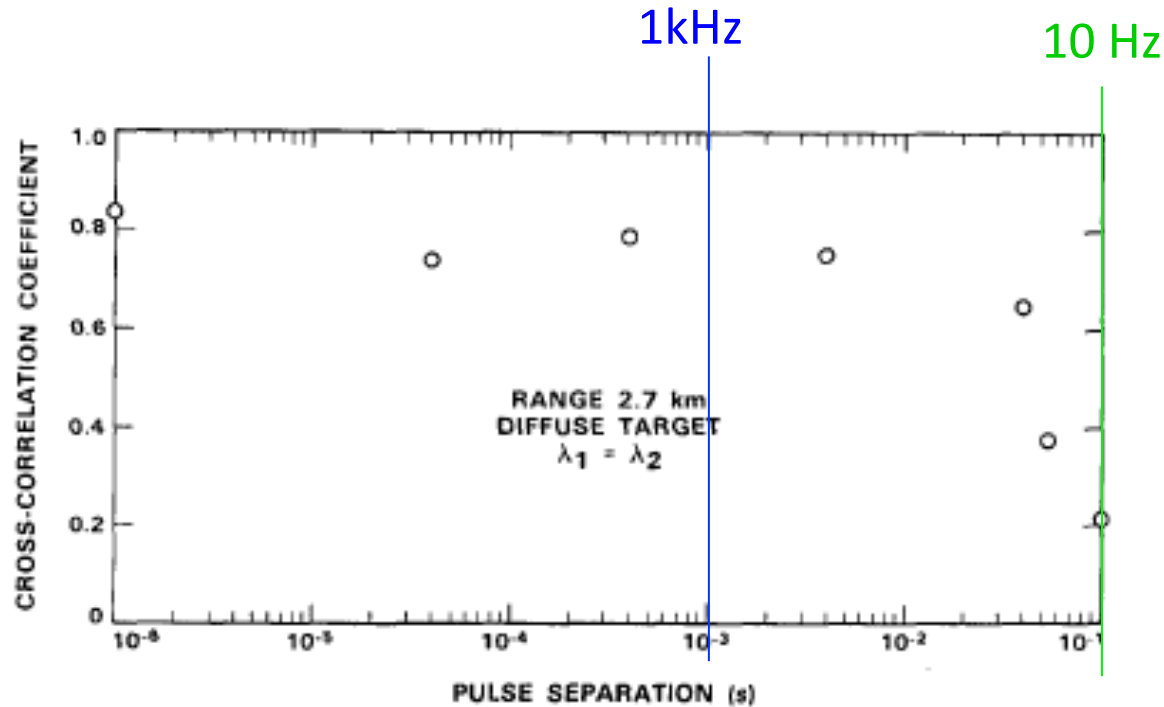
La variance sur la puissance dépend de la corrélation des signaux tir à tir

La variance sur l'épaisseur optique dépend de la corrélation des signaux On - Off

En pratique, l'erreur statistique DIAL est minimale si le doublet On-Off est suffisamment proche dans le temps pour que l'atmosphère soit « corrélée » et les tirs Off-Off suffisamment éloignés pour que l'atmosphère (ou la cible) « décorrèle » les signaux rétrodiffusés...

Précision d'une mesure DIAL (2/3)

Corrélation du signal et atmosphère



Corrélation de l'atmosphère dépend:

- Conditions atmosphériques: vent, C_n^2
- Longueur d'onde
- récepteur
- Type de cible diffusante

Fig. 5. Temporal pulse-pair cross-correlation coefficient as a function of pulse separation time between lasers 1 and 2 for heterodyne-detection lidar returns from a diffuse target at a range of 2.7 km. The wavelengths of the two lasers were the same, the $P(20)$ line at $10.532 \mu\text{m}$.

(Killinger and Menyuk, Appl. Phys. Lett, 1981, Menyuk and Killinger, Opt. Lett., 1981)

Précision d'une mesure DIAL (3/3)

Application numérique: précision d'une mesure DIAL

Dans le cas où les échantillons « P » sont indépendants (corrélation =0) et où il n'y a pas d'incertitude sur WF:

$$\frac{\sigma(\rho)}{\rho} = \frac{\sigma(\alpha)}{\alpha} = \frac{\sigma(d\tau)}{d\tau} = \frac{1}{2.\delta\tau} \sqrt{2.SNR_{on}^{-2} + 2.SNR_{off}^2} \approx \frac{1}{\delta\tau.SNR} \Rightarrow \boxed{SNR = \frac{1}{\delta\tau.\sigma(\rho)/\rho}}$$

*Exemple: $\sigma(\rho)/\rho = 5\%$,
 $\tau = 0.5$ pour 1 km
soit $\delta\tau = 0.05$ pour 100 m*



SNR = 400 !

Même pour une précision modeste de 5% la mesure DIAL demande un grand SNR.
Le SNR peut être augmenté en moyennant dans le temps et dans l'espace:

$$\boxed{SNR \propto \delta t^{0.5} . \delta R^{0.5}$$
$$\sigma(\rho)/\rho \propto \delta t^{-0.5} . \delta R^{-1.5}$$

(détection directe –
limite du shot noise)

Optimisation de l'épaisseur optique (1/3)

Choix d'une raie d'absorption adaptée pour la mesure DIAL

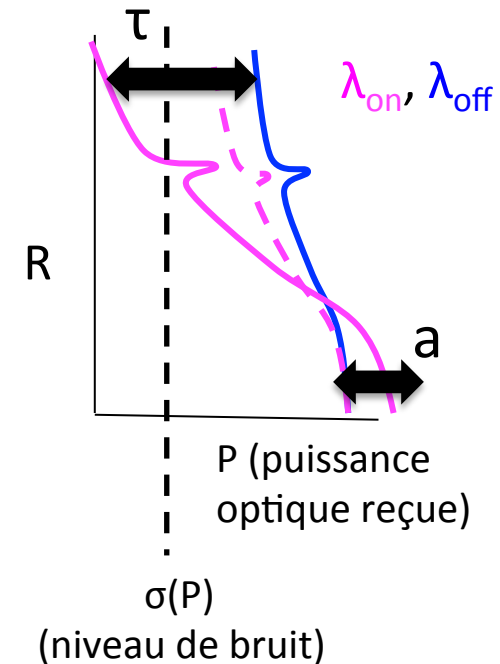
$$\frac{\sigma(\tau)}{\tau} = \frac{1}{2\tau} \sqrt{\left[\frac{\sigma(P_{on})}{P_{on}} \right]^2 + \left[\frac{\sigma(P_{off})}{P_{off}} \right]^2}$$

$$P_{on} = P_{off} \cdot a \cdot e^{-2\tau} \quad (\text{équation lidar})$$

On cherche une réduction de l'erreur statistique DIAL en fonction

- du rapport des puissances laser émises a
- de l'épaisseur optique simple passage τ

sachant qu'en pratique cette condition ne pourra être réalisée qu'à une distance donnée...



Optimisation de l'épaisseur optique (2/3)

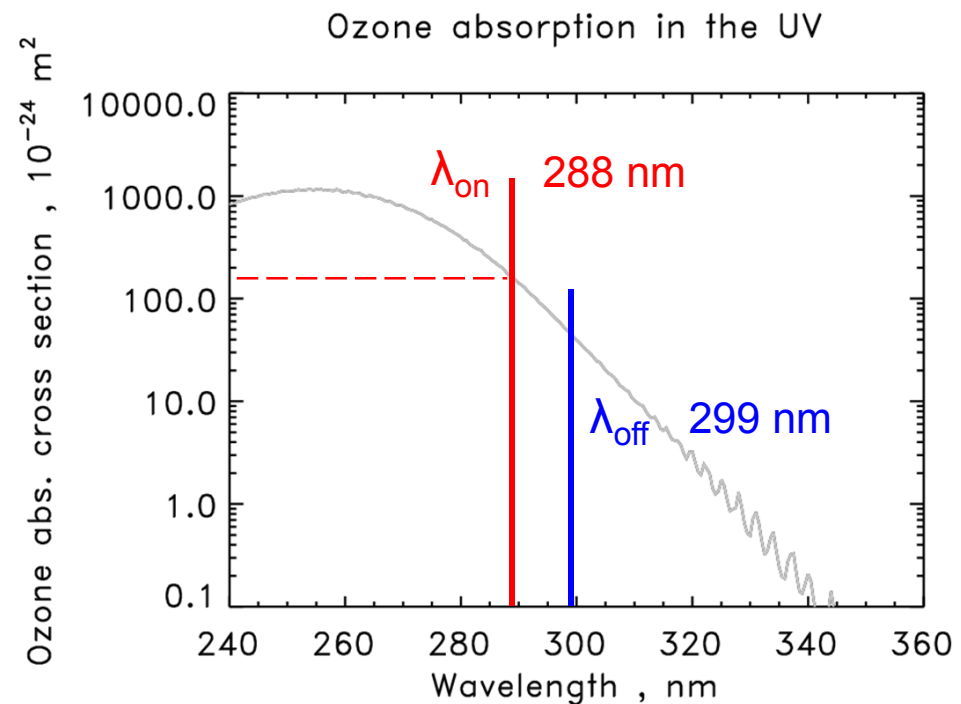
Application: choix du positionnement spectral pour l'ozone

$$\tau = \int_0^R \rho_{O_3} n_{air} (\tilde{\sigma}_{on} - \tilde{\sigma}_{off}) dr = 1.28$$

Pour un rapport de mélange de $\rho_{O_3} = 80$ ppb et $n_{air} = 2.51 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$ et une distance de mesure horizontale de $R = 3 \text{ km}$:

$$(\tilde{\sigma}_{on} - \tilde{\sigma}_{off}) n_{air} R = 1.28$$

$$\tilde{\sigma}_{on} - \tilde{\sigma}_{off} = 1.66 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$$



Biais sur le coefficient d'absorption α

Biais statistiques

$$+\frac{d}{dR} \left\{ \frac{1}{2} \ln \left[\left(\frac{\exp(\delta\tau_{on}) - \exp(-\delta\tau_{on})}{\exp(\delta\tau_{off}) - \exp(-\delta\tau_{off})} \right) \frac{\delta\tau_{off}}{\delta\tau_{on}} \right] \right\}$$

Moyenne spatiale dans une porte de δR

Cette erreur provient de l'approximation de l'équation lidar (absorption constante sur δR) et peut être non négligeable si $\delta\tau$ est grand sur δR

$$+\frac{d}{dR} \left[\frac{1}{4} \left(\frac{1}{SNR_{on}^2} - \frac{1}{SNR_{off}^2} \right) \right]$$

Moyenne temporelle sur N tirs

Cette erreur apparaît lorsque la différence des SNR On et Off augmente et à faible SNR_{on}

Biais systématiques

$$+\frac{d}{dR} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{\beta_{off}}{\beta_{on}} \right) \right] \quad +\alpha_{e,off} - \alpha_{e,on}$$

rétrodiffusion, extinction

Cette erreur peut être non négligeable dans le cas où les longueurs d'onde On et Off sont éloignées (exemple de l'ozone)

Précision sur WF (1/2)

variables météorologiques – choix de la raie d'absorption

$$\rho_x = \frac{d\tau / dR}{WF}$$

$$WF_i(\rho_w, T, p) = n_0 \tilde{\sigma}_0 \frac{1}{1 + \rho_w} \left(\frac{T_0}{T} \right)^{2-t} \exp \left[-\frac{E'' hc}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \frac{1}{1 + (\Delta \tilde{\nu}_i / \gamma(T, p))^2}$$

- pression $\frac{\sigma(WF_i)}{WF_i} = -2 \frac{(\Delta \tilde{\nu} / \gamma_c)^2}{1 + (\Delta \tilde{\nu} / \gamma_c)^2} \frac{\sigma(p)}{p}$

- humidité $\frac{\sigma(WF_i)}{WF_i} = \frac{\rho_{H2O}}{1 + \rho_{H2O}} \frac{\sigma(\rho_{H2O})}{\rho_{H2O}}$ ~0.01

- temperature

$$\frac{\sigma(WF_i)}{WF_i} = \left[\frac{E'' hc}{kT} - 2 - t \frac{(\Delta \tilde{\nu} / \gamma_c)^2 - 1}{(\Delta \tilde{\nu} / \gamma_c)^2 + 1} \right] \frac{\sigma(T)}{T}$$

La sensibilité de WF / pression augmente lorsqu'on s'écarte du centre de raie.

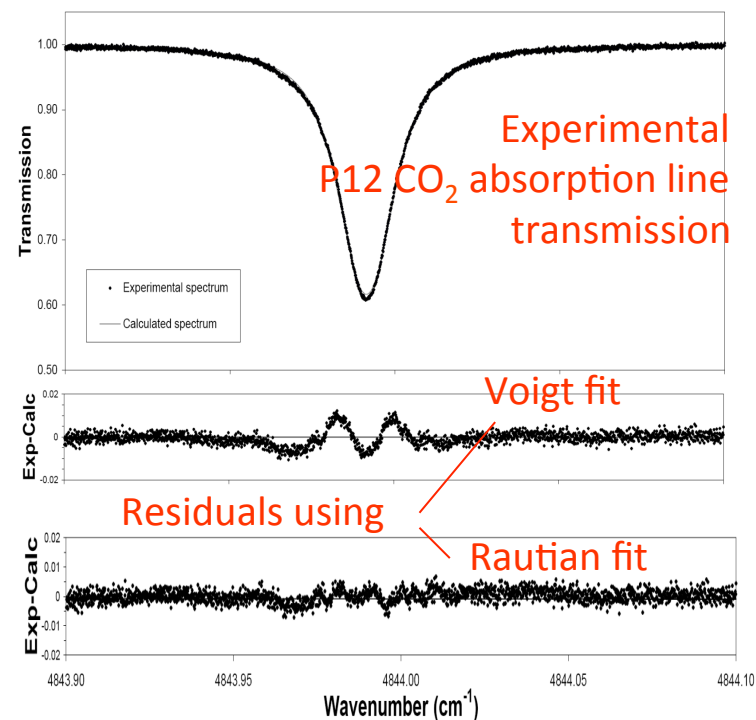
Pour une mesure DIAL spatiale intégrée = erreur sur l'altitude

Pour un positionnement donné sur la raie d'absorption, une sensibilité minimale de WF / température est obtenue pour une valeur de E'' donnée.

Précision sur WF(1/2)

Spectroscopie - Laser

- Données spectroscopiques (pressure shift, force de raie, paramètre de température, profil de raie..)
- Approximation dans l'équation lidar: largeur spectrale du laser / largeur raie d'absorption
- Positionnement spectral laser/ raie d'absorption (sensibilité accrue sur le flanc)
- Pureté spectrale du laser



4 – Systèmes et applications DIAL

- Premières mesures DIAL
- Bref historique
- Système DIAL: laser
- DIAL O₃: exemple en large bande et détection directe
- DIAL H₂O
- DIAL CO₂: exemple en bande étroite et détection cohérente

Premières mesures DIAL

Richard M. Schotland

1964 – Mesure du profil en vapeur d'eau en accordant thermiquement un laser à ruby sur et en-dehors la raie de H₂O à 694.38 nm

Seulement 4 ans après l'invention du laser à ruby!

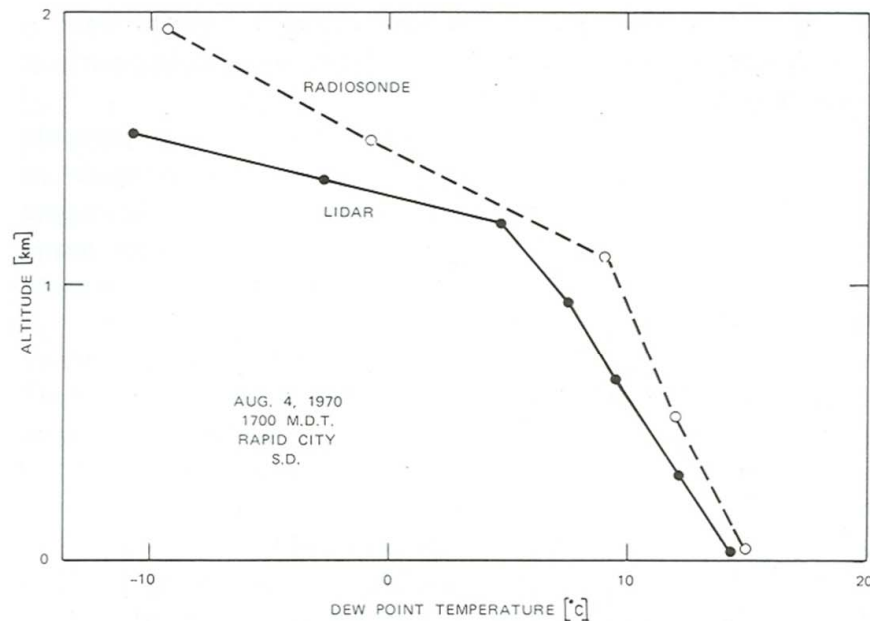
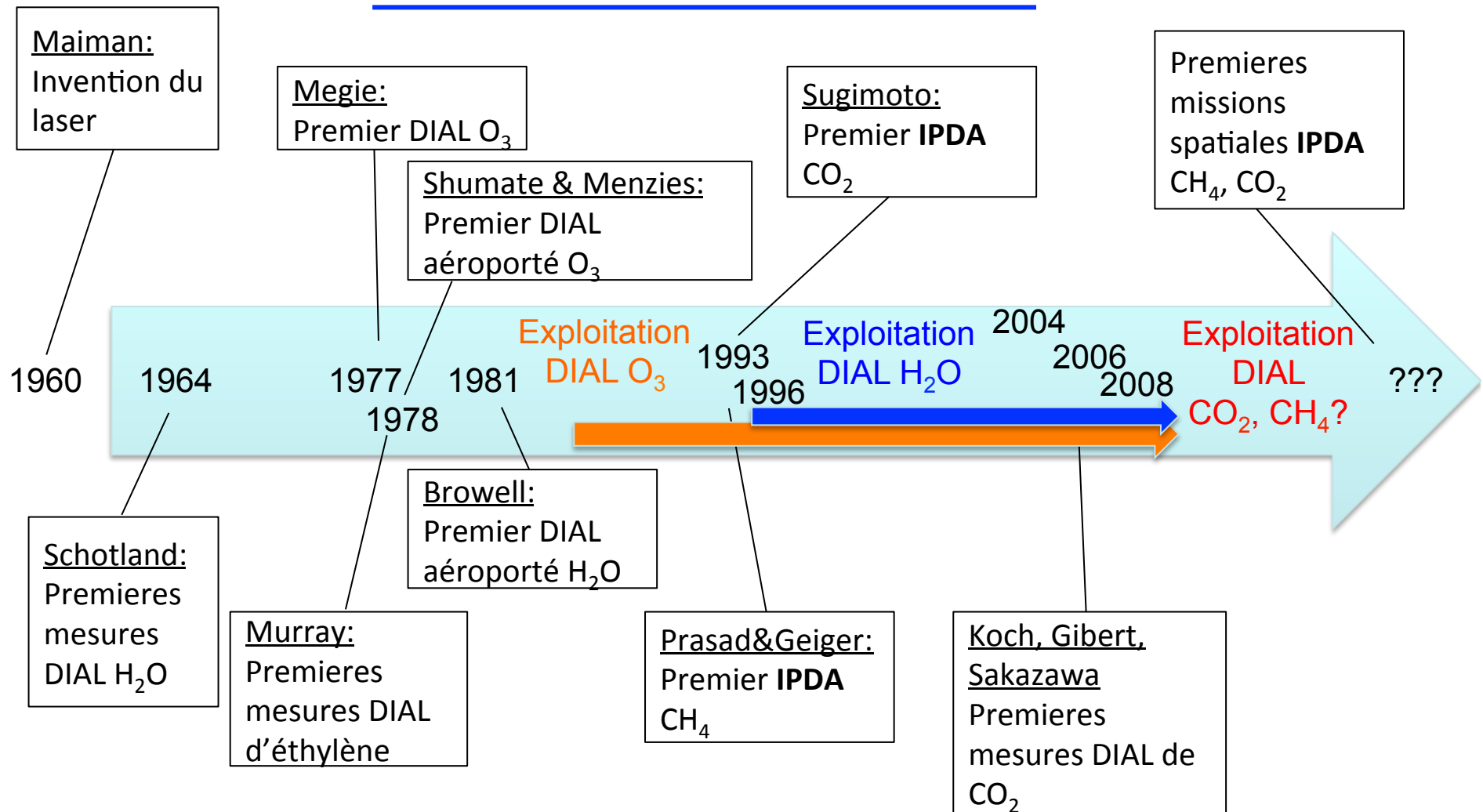


Fig. 4.20. Comparison of atmospheric water vapor vertical profiles (expressed as dew point temperature) measured by differential absorption lidar and radiosonde [4.82]

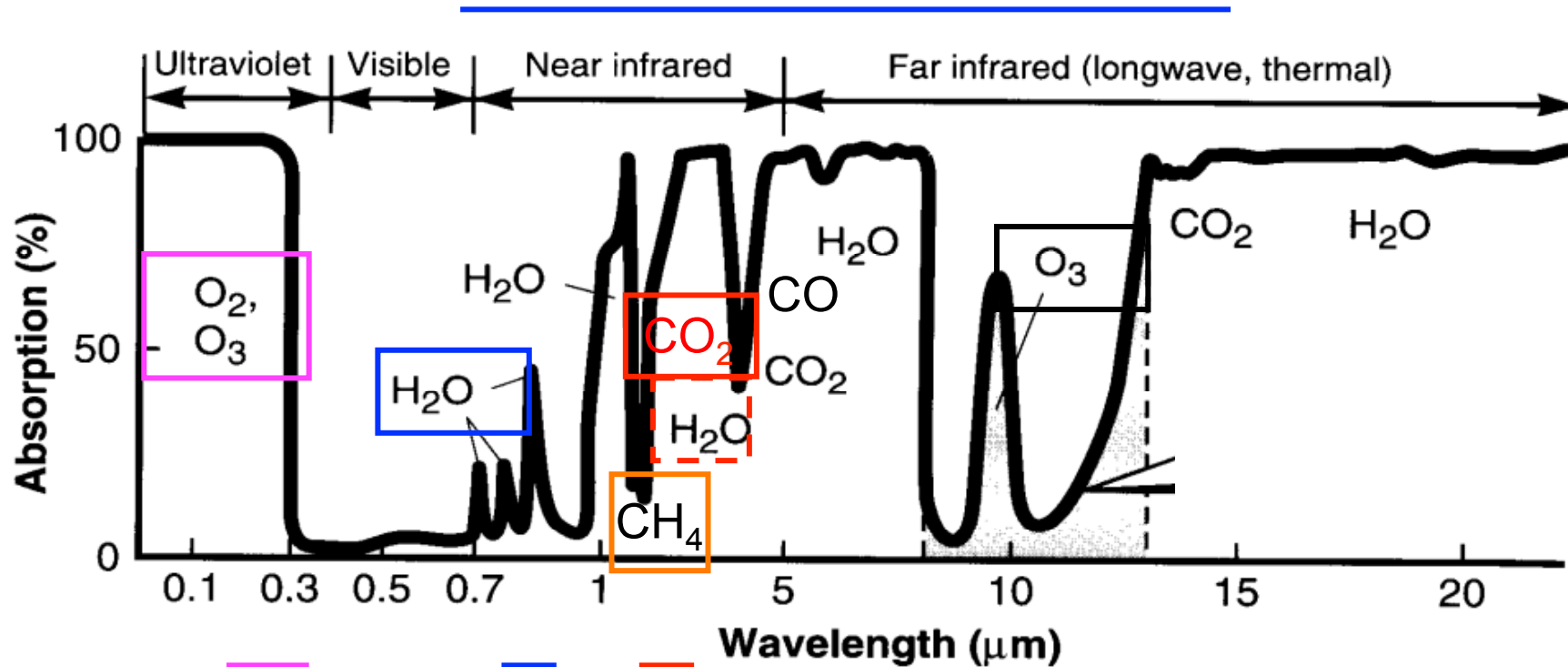
Bref historique



Systeme DIAL: laser (1/2)

- Laser de puissance (grand SNR):
Détection directe: grande E / faible PRF (cadence impulsionnelle)
Détection hétérodyne: modérée E / grande PRF
- Laser accordable ($\Delta\lambda < 1 \text{ nm}$) ou λ fixes appropriées ($\Delta\lambda > 10 \text{ nm}$)
- Très grande stabilité spectrale, finesse spectrale, pureté spectrale

Système DIAL: laser (2/2)



Laser à gaz
Excimère
(260-350nm)
1980s →
Laser solide
Nd:YAG 4x
1990s →

Laser solide
Ti³⁺,
Alexandrite
(720-940nm)
1980s →

Laser solide
Laser fibrés
Er (1.5 μm)
Tm, Ho (2.05 μm)
2000s →

Laser à gaz CO₂
1970s →

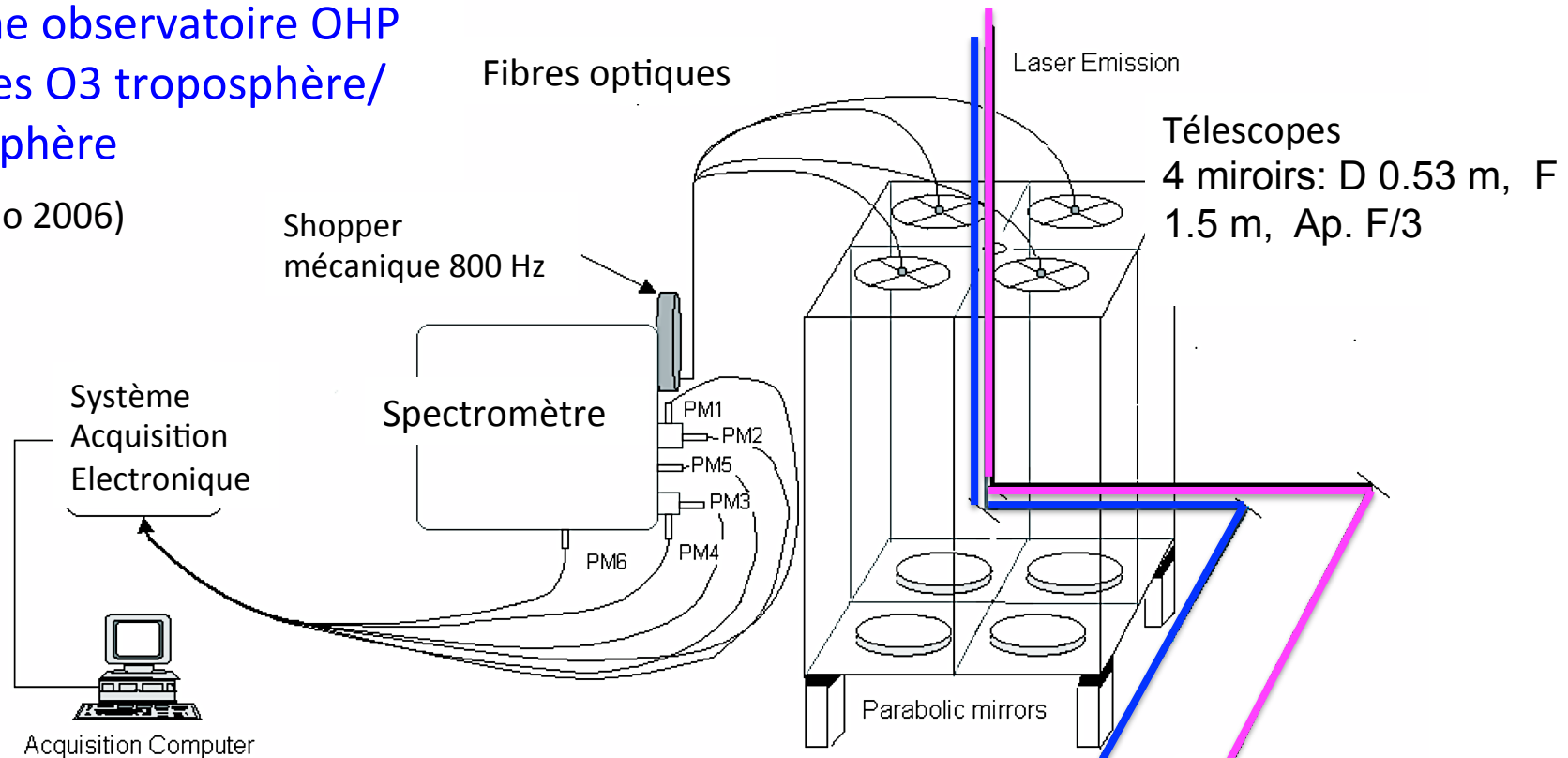
OPO

Ozone (1/2)

Exemple large bande, détection directe:

Système observatoire OHP
Mesures O₃ troposphère/
stratosphère

(Pazmino 2006)



PM1-PM2: 308 nm signaux Rayleigh (DIAL) (tropo/ strato)

PM3-PM4: 355 nm signaux Rayleigh (DIAL) (tropo/strato)

PM5-PM6: Signaux Raman

Comptage de photons

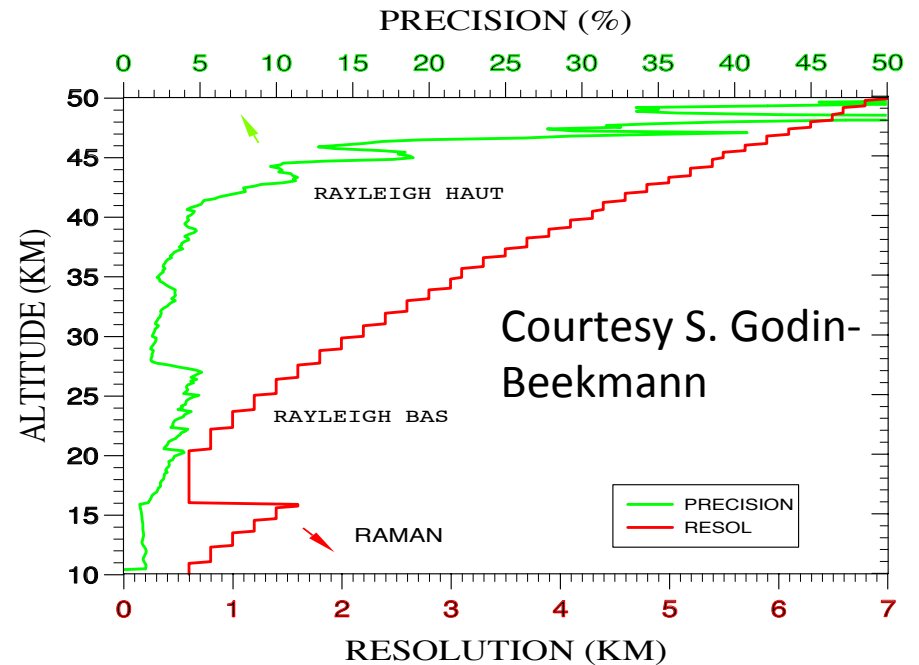
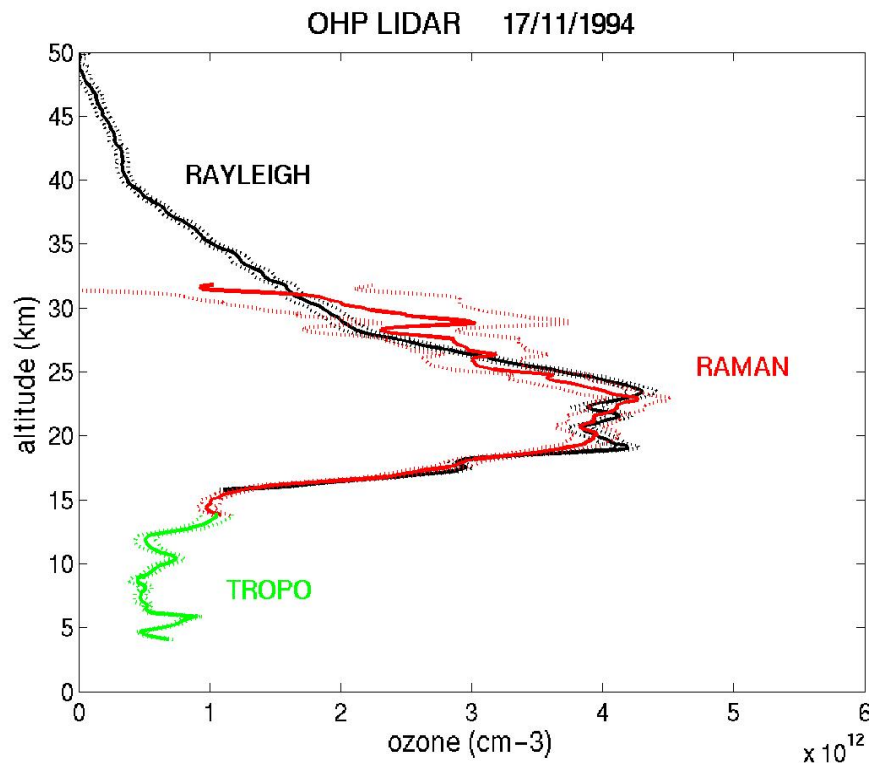
Laser Nd:YAG 3x
355 nm – 50 Hz

Excimer Laser
308 nm – 50 Hz
O₃ absorption

Ozone: profiles (2/4)

Troposphère et stratosphère

Andrea Pazmiño (SA/IPSL) – ERCA 2007 – 6 February 2007 - OHP, France



Précision 2 – 5 %

Résolution temporelle ~ 4 h

Résolution spatiale 0.15 – 1 km

Conditions de fonctionnement: ciel clair (biais du aux aérosols), nuit (bruit de fond de ciel)

H₂O (1/2)

Airborne H₂O DIAL LEANDRE 2

ACE-2' 97, FETCH' 98, MAP' 99, IHOP_2002, AMMA' 06
(LATMOS Didier Bruneau, Cyrille Flamant)

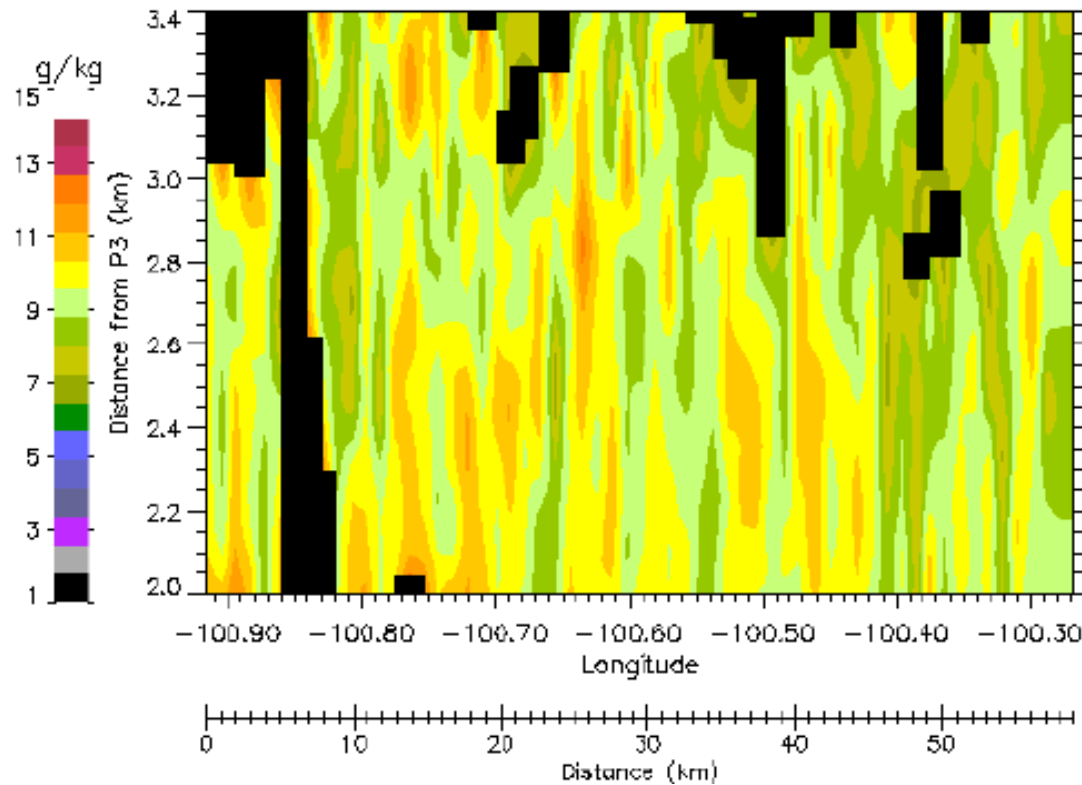
Emitter: Alexandrite laser
Spectral range 727 nm - 770 nm
Pulse energy **50 mJ**
Repetition rate **10 Hz (Double pulse)**
Temporal pulse width 225 ns
Double pulse temporal separation 50 μ s
Double pulse spectral separation 442 pm

Receiver: Telescope diameter **30 cm**
Field of view 1.5 mrd - 8mrd
Photomultiplier efficiency 4 %
Filter: Max trans / bandwidth 57 % / 1 nm
Digitizer 12 bits / 10 MHz



H₂O (2/2)

Variabilité de la vapeur d'eau dans la CLA

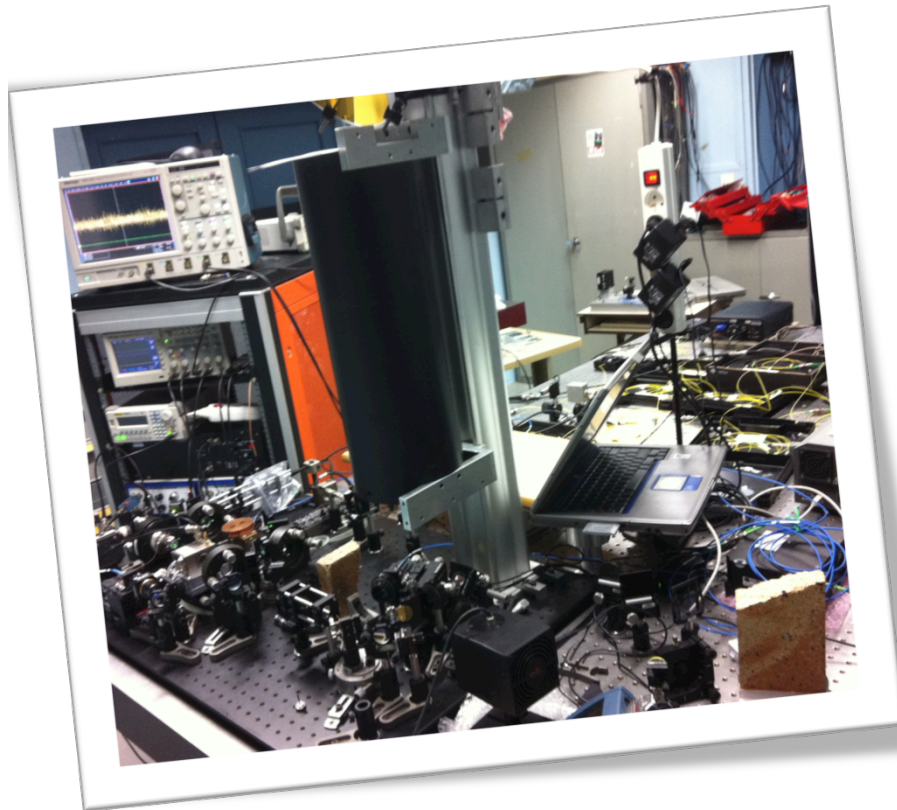


Précision	2 – 5 %
Accuracy	2 %
Résolution temporelle	10 s
Résolution spatiale	300 m

CO₂ (1/2)

Exemple bande étroite, détection cohérente:

(LMD - F. Gibert, D. Edouart, C. Cénac, F. Le Mounier)



LASER

Laser pulse energy	10 mJ
Double-PRF	1 kHz
Wavelengths (On/Off)	2050.97 / 2051.26 nm
Pulse duration/ width	40 ns / 10 MHz

DETECTION

Lens aperture	50 mm
Dual-balanced fibered	InGaAs photodiodes
Heterodyne BW	200 MHz

SIGNAL PROCESSING

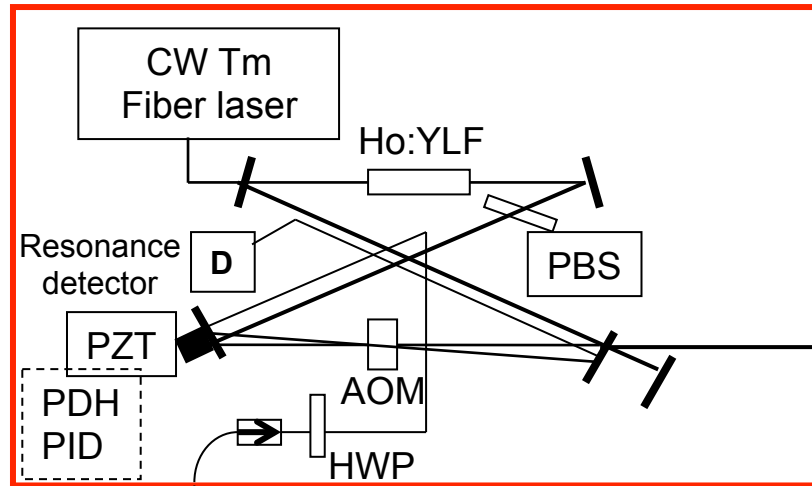
AD converter	FPGA-400MHz-14bits
Real time processing	Simulink-Xilinx-FPGA
Viewer/ final processing	C++/ Matlab

DATA

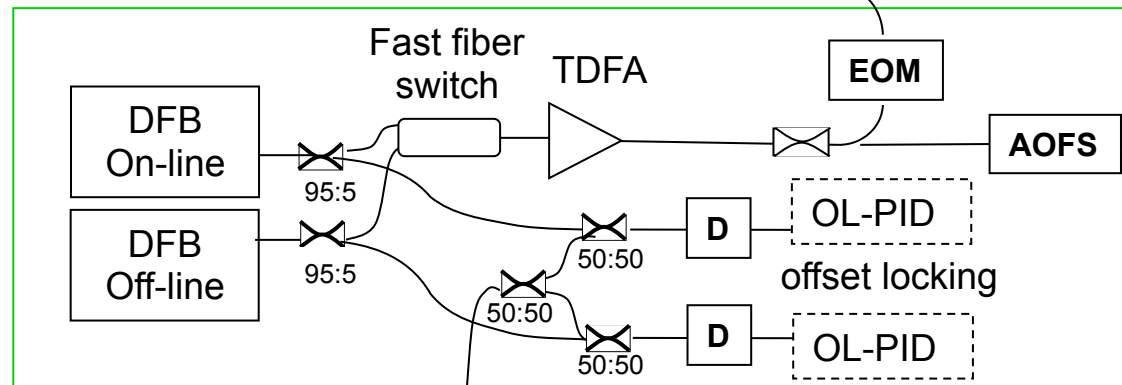
Lidar reflectivity at 2 μ m	
Radial velocity	50 m / 4 s
CO ₂ differential optical depth	
CO ₂ differential absorption	slope method
CO ₂ dry-air mixing ratio	meteo. data & spectroscopy

CO₂ : DIAL et métrologie (2/3)

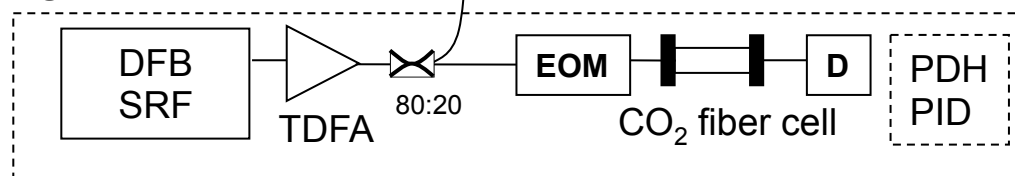
2.05- μ m PULSED LASER



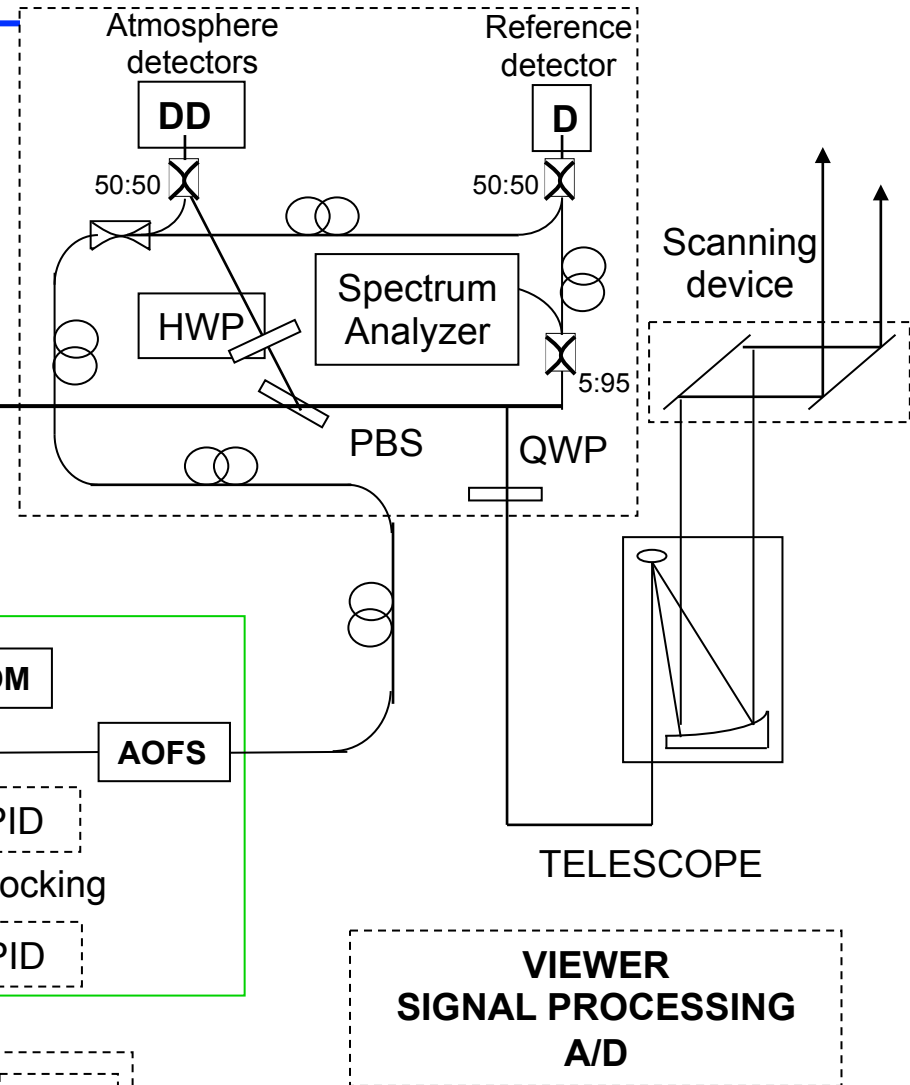
SEEDER/ LO



FRS



DETECTION

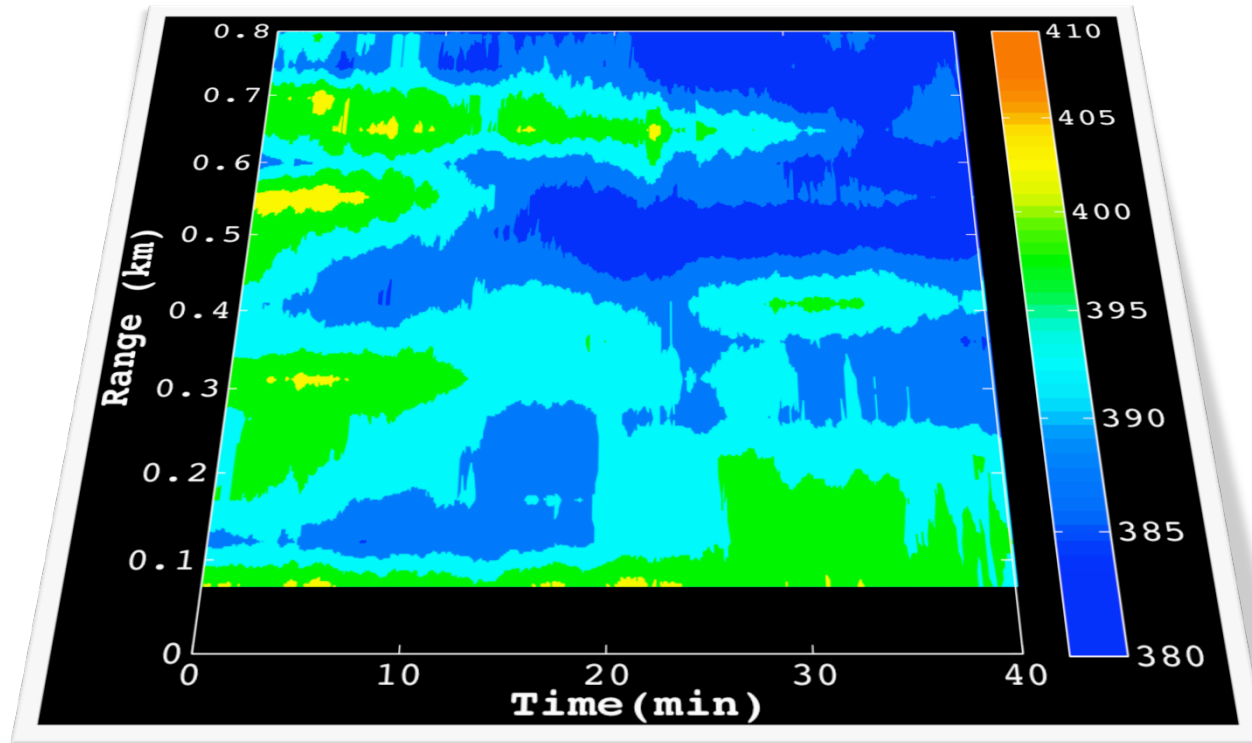


VIEWER
SIGNAL PROCESSING
A/D



CO₂ (3/3)

Surveillance de site émissifs: séquestration, zone industrielle..



Précision	0.5 – 1.5 %
Accuracy	0.5 %
Résolution temporelle	10 min
Résolution spatiale	200 m

5 – Vers une mesure de flux par lidar

- Pourquoi une mesure de flux par lidar?
- Méthode de corrélation turbulente et bilan des erreurs
- Echelle intégrale de la turbulence et résolution spatiale et temporelle du DIAL
- Applications

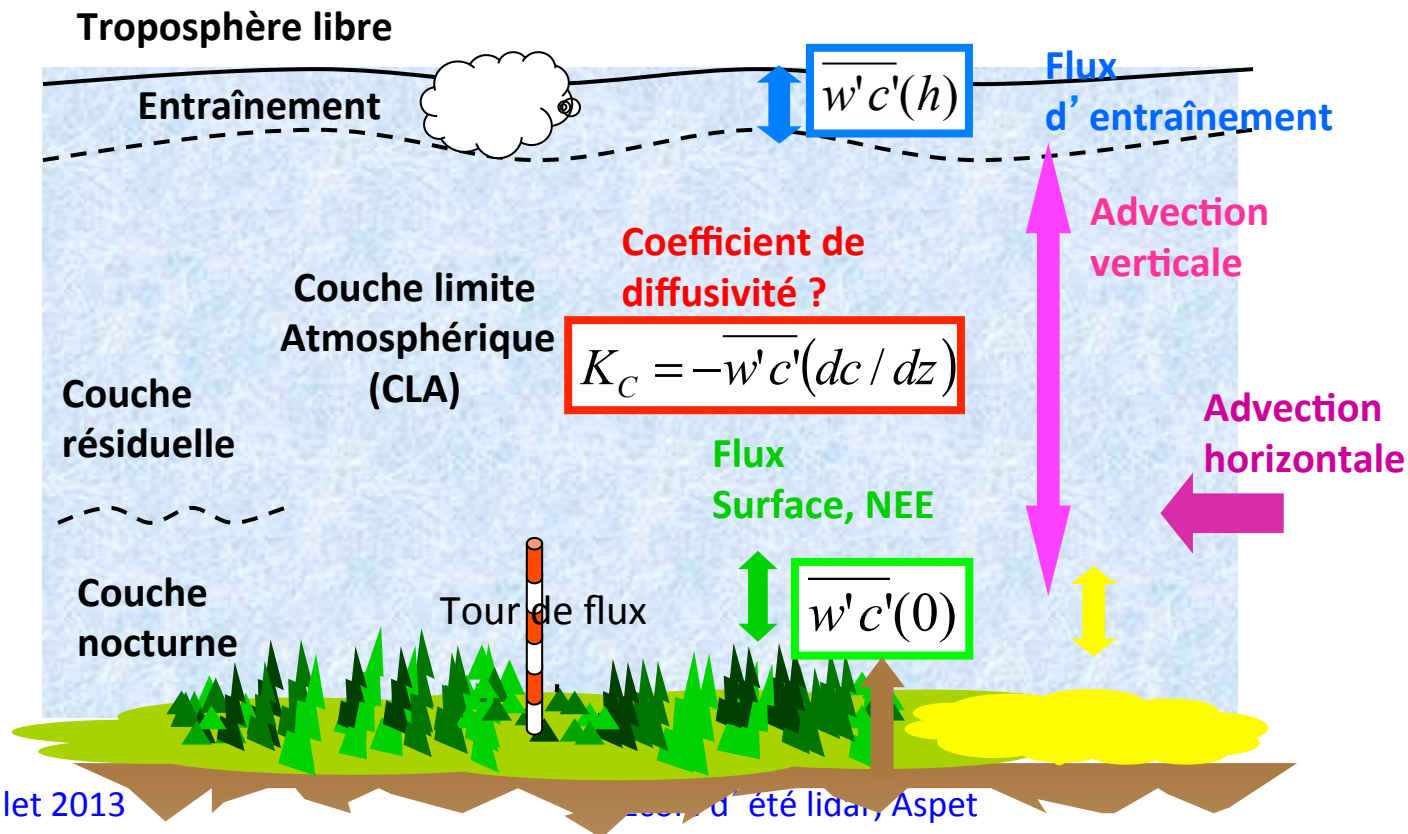
Pourquoi des mesures de flux par Lidar?

Echanges aux interfaces: surface – couche limite – troposphère libre

Etude de la diffusivité des scalaires dans la couche limite, nouvelles paramétrisations

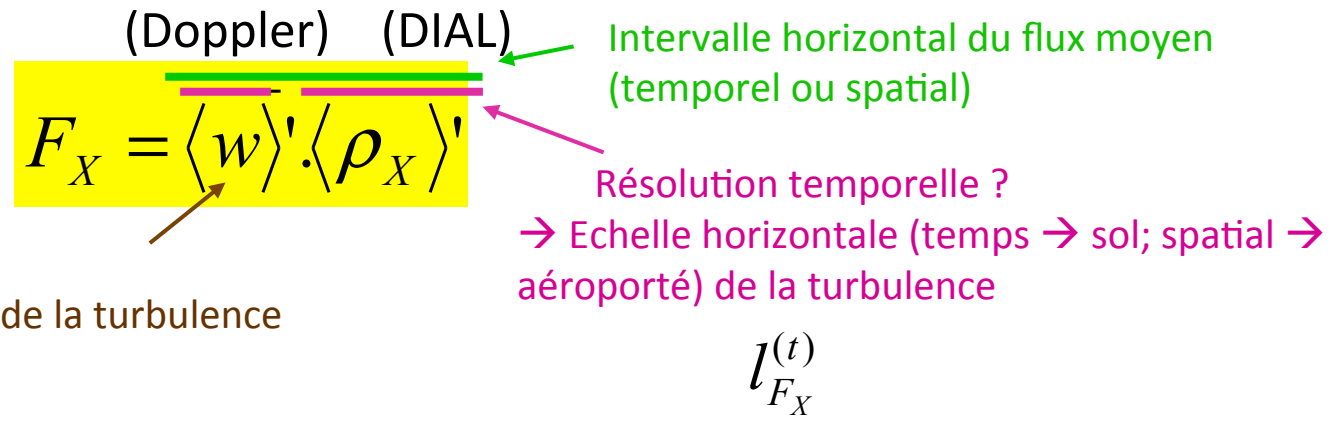
Bilan de masse des composés minoritaires gazeux dans la couche limite

$$\int_0^h \frac{1}{V_m} \left[\frac{\partial c}{\partial t} \right] dz = \overline{w'c'}(0) - \overline{w'c'}(h) + \int_0^h \frac{1}{V_m} w(z) \left[\frac{\partial c}{\partial z} \right] dz + \int_0^h \frac{1}{V_m} \left[u(z) \frac{\partial c}{\partial x} + v(z) \frac{\partial c}{\partial y} \right] dz$$



La méthode de flux par corrélation turbulente (1/2)

Méthode de corrélation turbulente

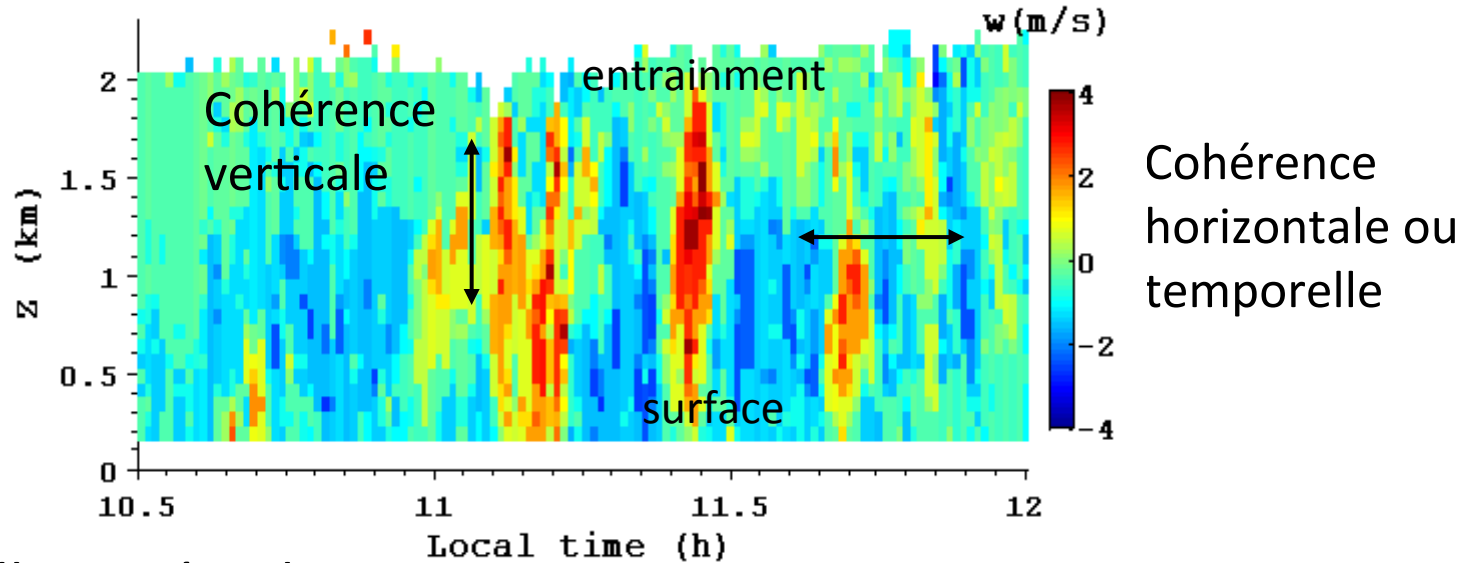


Bilan des erreurs:

- Instrumentale
- Echantillonnage
 - nombre limité de structures turbulentes dans l' intervalle de mesure de flux
- Biais: si la résolution temporelle et spatiale du lidar est plus faible que les échelles spatiales et temporelles de la turbulence, l' estimation de flux est biaisée.

(Lenschow and Stankov 1986, Giez et al. 1999, Engelmann et al. 2008, Gibert et al. 2010)

Echelles de turbulences et résolution DIAL



Echelles intégrales

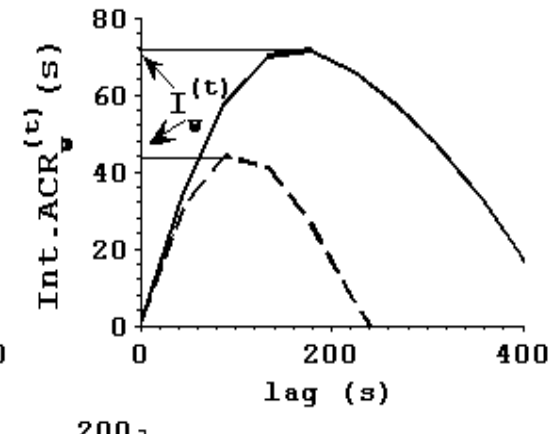
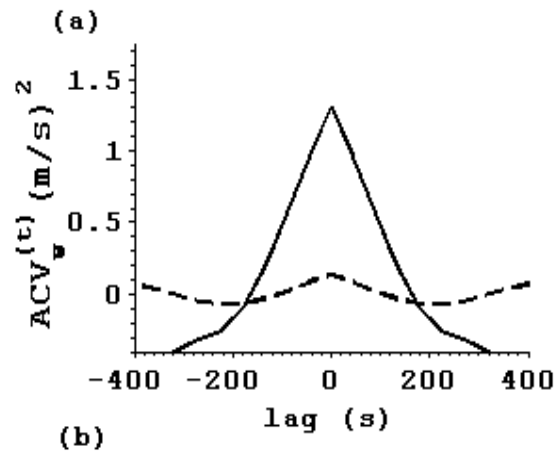
$$l_w = \max \left(\int_0^{\infty} ACR_c(r) dr \right)$$

Auto-covariance

$$ACV_w(X) = \overline{\langle w(x) \rangle' \langle w(x+X) \rangle'}$$

Auto-correlation

$$ACR_w(X) = ACV_w(X) / \sigma_{w,atm}^2$$



Applications

-Flux turbulent de vapeur d'eau (Giez et al., JTECH, 1999; Kiemle et al., JGR, 2007)

Lidar Doppler 2 μm + Lidar DIAL vapeur d'eau

-Flux turbulent d'aérosols (Engelmann et al., JTECH, 2008)

Lidar Doppler + Lidar Raman

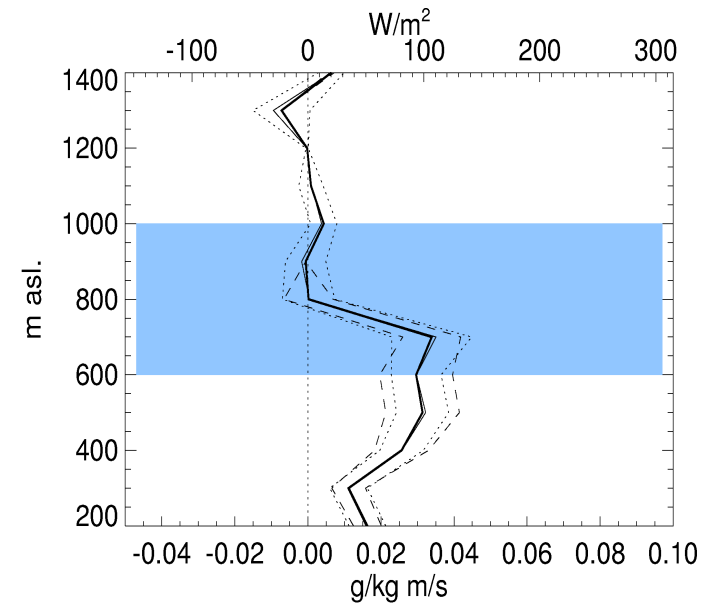
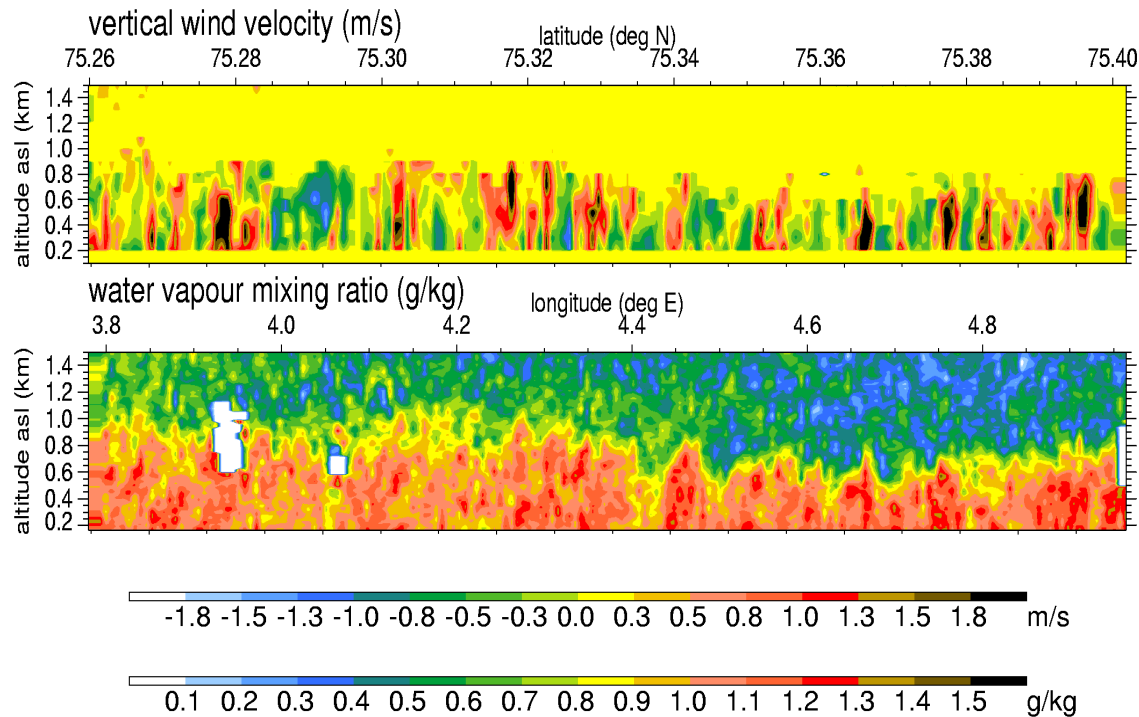
-Flux turbulent de CO₂ (Gibert et al., JTECH, 2010)

Lidar Doppler et DIAL 2 μm

TABLE 2. DIAL and HRDL system parameters.

Parameter	DIAL	HRDL
Transmitter type	OPO	Diode laser
Wavelength (nm)	927	2020
Pulse energy (mJ)	12	2
PRF (Hz)	100	200
Pulse length (ns)	7	200
Detection principle	Direct	Heterodyne
Detector type	APD ^a	PIN diode ^b
Telescope diameter (cm)	35	20
Horizontal resolution (m) ^c	1.5	0.75
Vertical resolution (m) ^c	15	30
Absolute accuracy	0.6 g kg ⁻¹ , ^d	0.05 m s ⁻¹ , ^e

Exemple de mesures de flux de chaleur latente par lidar



profile of latent heat flux

(Polar low investigation above the Barents sea, courtesy, G. Ehret) (Wagner et al. 2011)