

Mesures atmosphériques



- A partir du sol
- Par des instruments embarqués
(sous ballon, avion, ...)
- A distance par satellite

Mesures atmosphériques

Au Sol

Concentration intégrée
Grande précision
1 pt et plusieurs jours



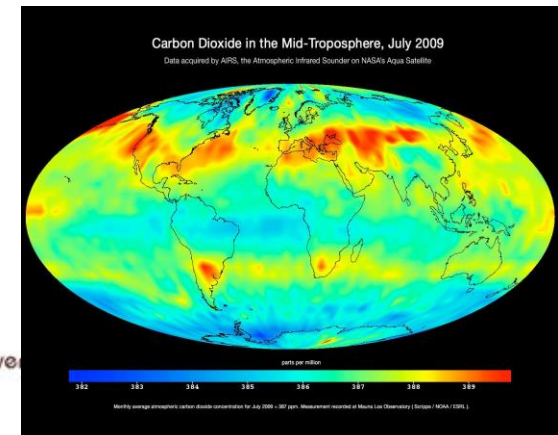
Embarqué

Profil vertical
Grande précision
1 pt et 1 jour



Par satellite

Concentration intégrée
Précision faible
Plusieurs pts et jours



Techniques employées



- Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS)
- Mesures atmosphériques FTS / TDL
- Radiomètre hétérodyne
- Mesures actives à distance : LIDAR

Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS)

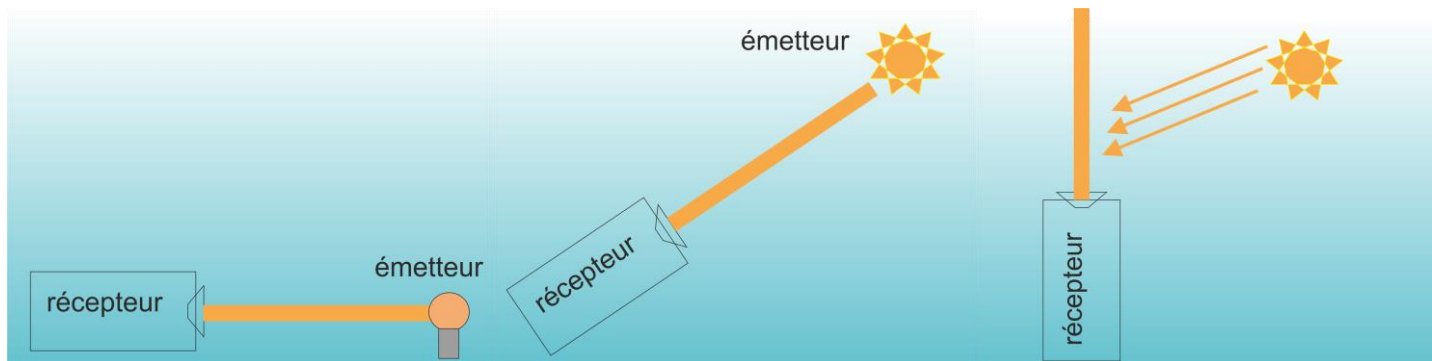


Domaine UV-Visible

Spectroscopie d'absorption : loi de Beer-Lambert

$$I(s, \lambda) = I(0, \lambda) \exp(-\sigma(\lambda) \rho s)$$

ρ : densité d'absorbant λ : longueur d'onde σ : section efficace d'absorption s : le chemin



Occultation solaire/lunaire

zénith



Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS)

Intégrale de chemin

Efficacité de diffusion

Absorption par le gaz j

Exponentiel de la Loi de Beer-Lambert

Extinction diffusion de Mie

Extinction diffusion Rayleigh

$$I(\lambda, \Theta) = a(\lambda, \Theta) I_0(\lambda) \exp \left\{ - \int \left(\sum_{j=1}^J \sigma_j(\lambda) \rho_j(s) + \sigma_{Mie}(\lambda) \rho_{Mie}(s) + \sigma_{Ray}(\lambda) \rho_{Ray}(s) \right) ds \right\}$$



Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS)

$$\sigma_{Ray} \propto \lambda^{-4}$$

$$\sigma_{Mie} \propto \lambda^{-k} \quad k = 0..2$$

$$\sigma = \sigma_{lent} + \sigma'$$

$$I(\lambda, \Theta) = a(\lambda, \Theta) I_0(\lambda) \exp \left\{ - \int \left(\begin{array}{l} \sum_{j=1}^J \sigma_j(\lambda) \rho_j(s) \\ + \sigma_{Mie}(\lambda) \rho_{Mie}(s) \\ + \sigma_{Ray}(\lambda) \rho_{Ray}(s) \end{array} \right) ds \right\}$$



Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS)

$$\sigma_{Ray} \propto \lambda^{-4}$$

$$\sigma_{Mie} \propto \lambda^{-k} \quad k = 0..2$$

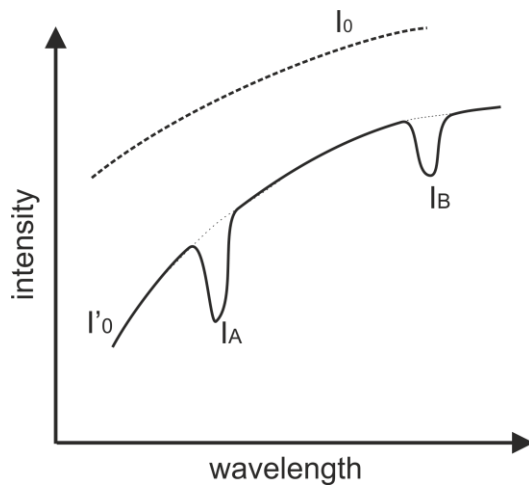
$$\sigma = \sigma_{lent} + \sigma'$$

Section efficace différentielle

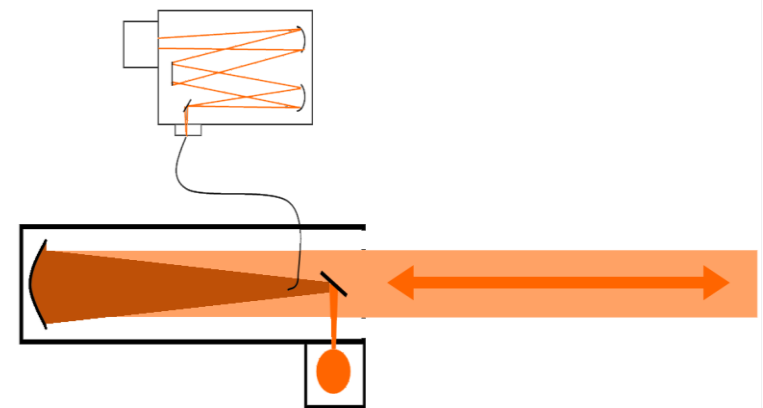
Colonne gaz

Polynôme variation lente avec λ

$$I(\lambda, \Theta) = a(\lambda, \Theta) I_0(\lambda) \exp \left\{ - \sum_{j=1}^J \sigma'_j(\lambda) SC_j + \sum_p b_p \lambda^p \right\}$$



Valable pour des bandes d'absorption étroites




Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS)

<u>Polluant</u>	<u>Domaine (nm)</u>	<u>$\Delta\lambda$</u>	<u>Limites de détection</u>
SO ₂	290 – 310	1.5 nm	0.4 – 0.9 ppb
NO	215 – 226	0.5 nm	6.5 – 8.1 ppb
NO ₂	330 – 500	1.0 nm	1.6 – 4.7 ppb
O ₃	220 - 330	Sp. Cont	0.5 – 1.0 ppb
Benzène	240 - 300	0.5 nm	3.1 ppb
Toluène	240 - 300	0.5 nm	2.5 ppb
M-xylène	240 – 300	0.5 nm	2.3 ppb



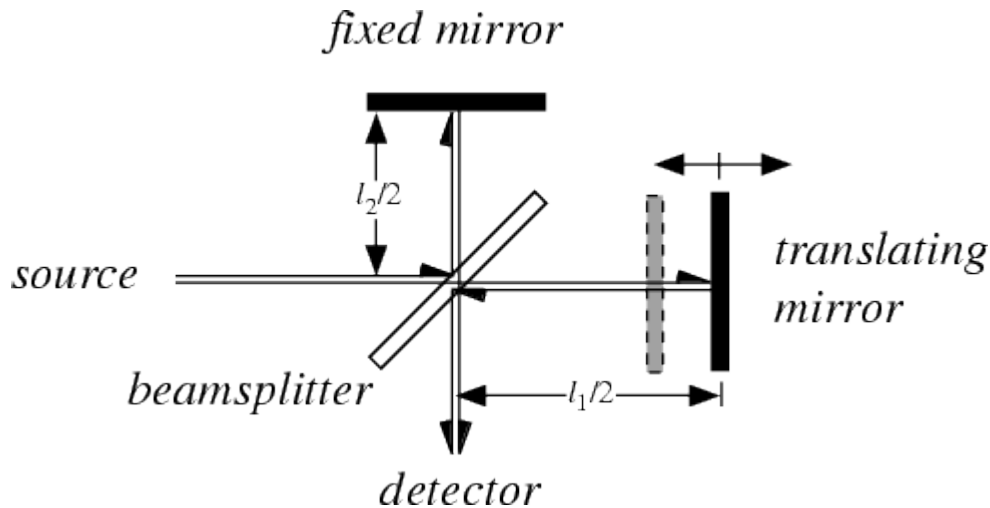
Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS)



- Mesure intégrée dans l'espace \Rightarrow concentration moyenne sur le trajet
- Long trajet (100m à plusieurs kilomètres) \Rightarrow grande sensibilité
- Domaine UV-Visible
- Structures d'absorption propres à chaque espèce, caractérisées par une section efficace
- Non-sélectif : absorption de plusieurs espèces dans le spectre



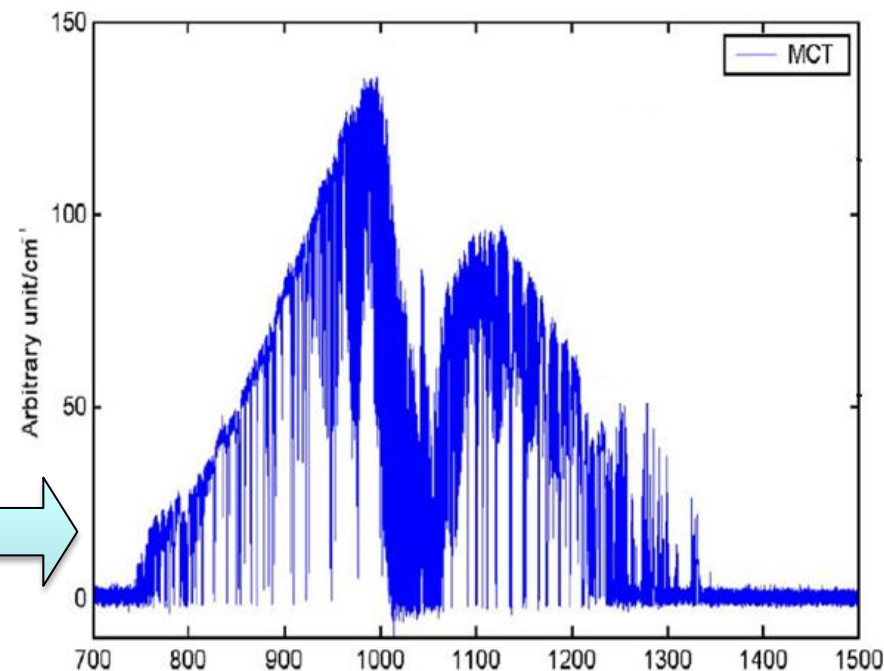
Mesures atmosphériques FTS



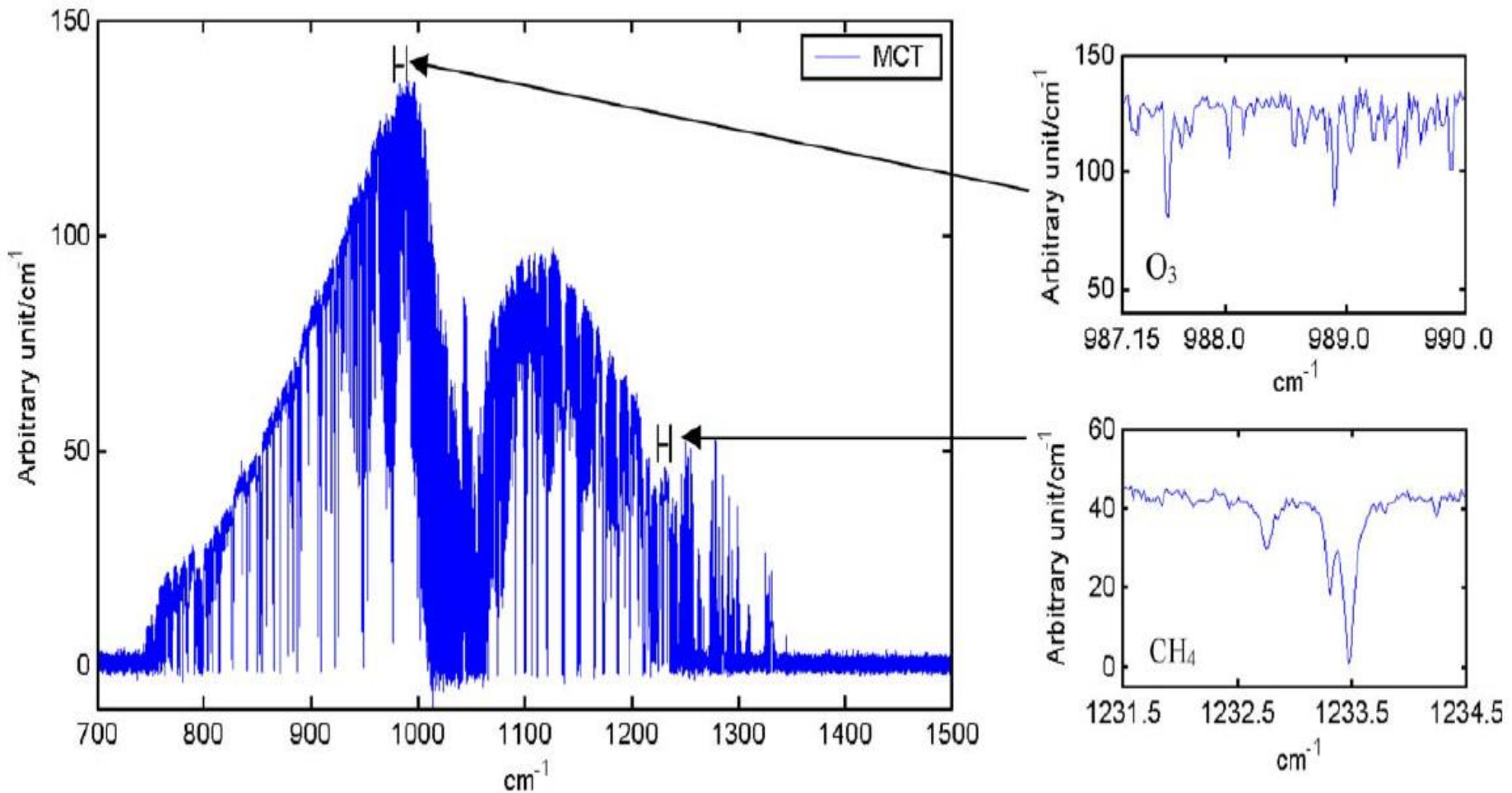
Superposition d'ondes Doppler shifted

Battement dans le domaine acoustique

FFT



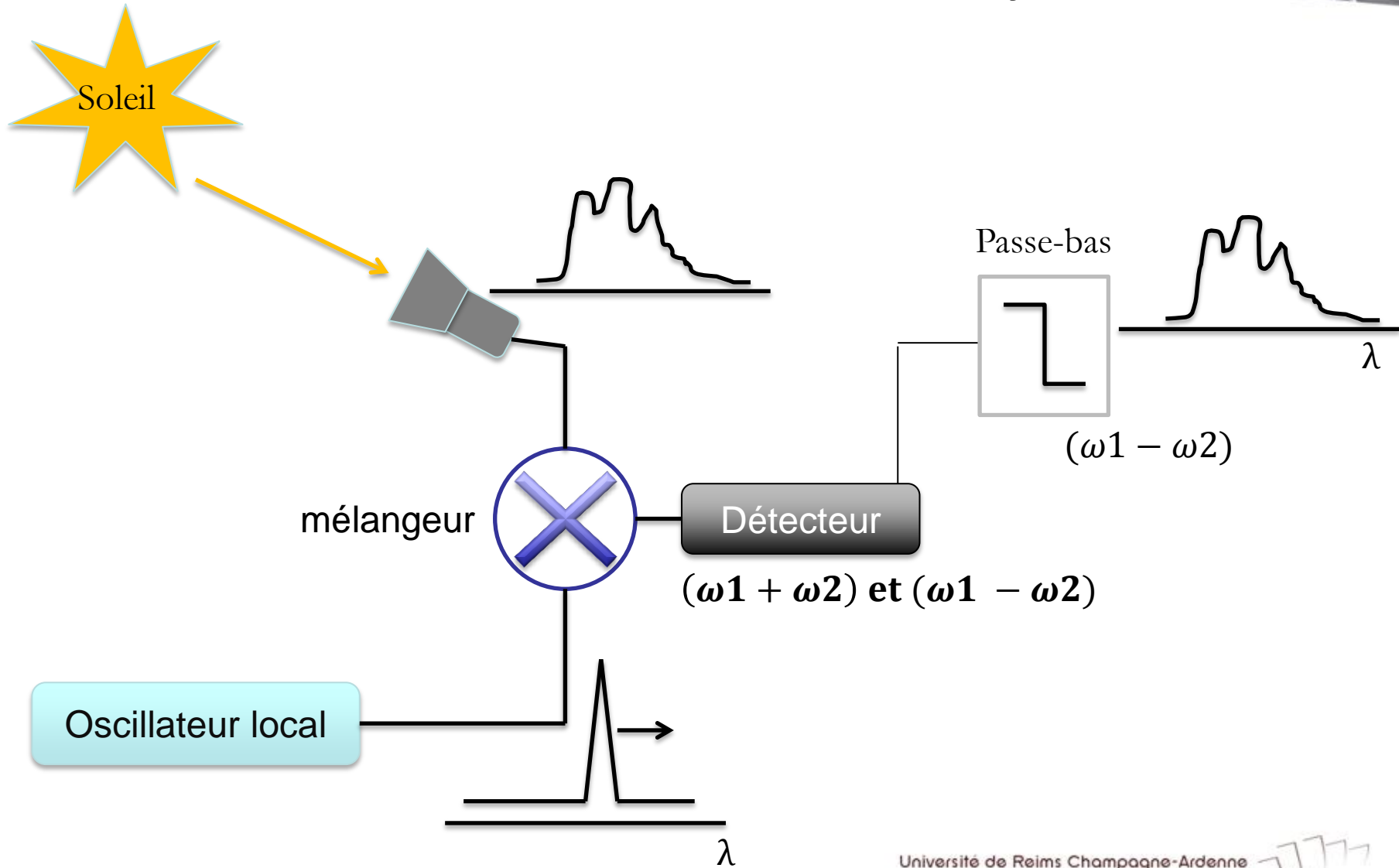
Mesures atmosphériques FTS



D. Fu et al. / Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 103 (2007) 362–370

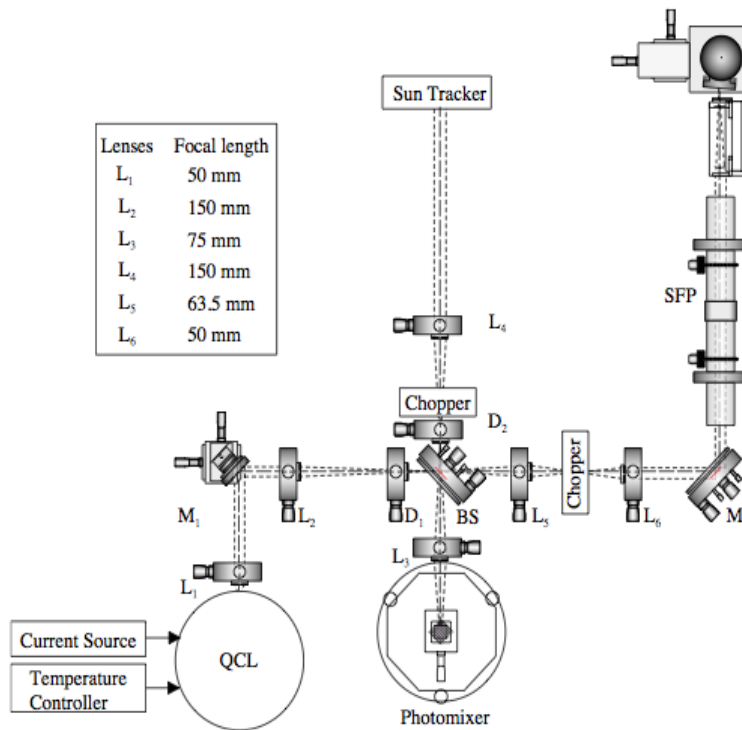


Radiomètre hétérodyne



Radiométrie hétérodyne avec laser à cascade quantique

→ Mesures à distance des polluants atmosphériques / toxiques



- ANR QUIGARDE 2013-2016
- Coordination et collaboration avec Thalès III-V lab et LPL (Paris XIII)
- Thèse M.-H. Mammez (DGA/CNRS 2012-2015)

Mesures actives à distance : LIDAR

(*Light Detection and Ranging*)

- Mesures résolues dans l'espace
- Envoi de courtes impulsions $I_0(\lambda)$ et détection de l'intensité rétrodiffusée
- Absorption UV ou IR

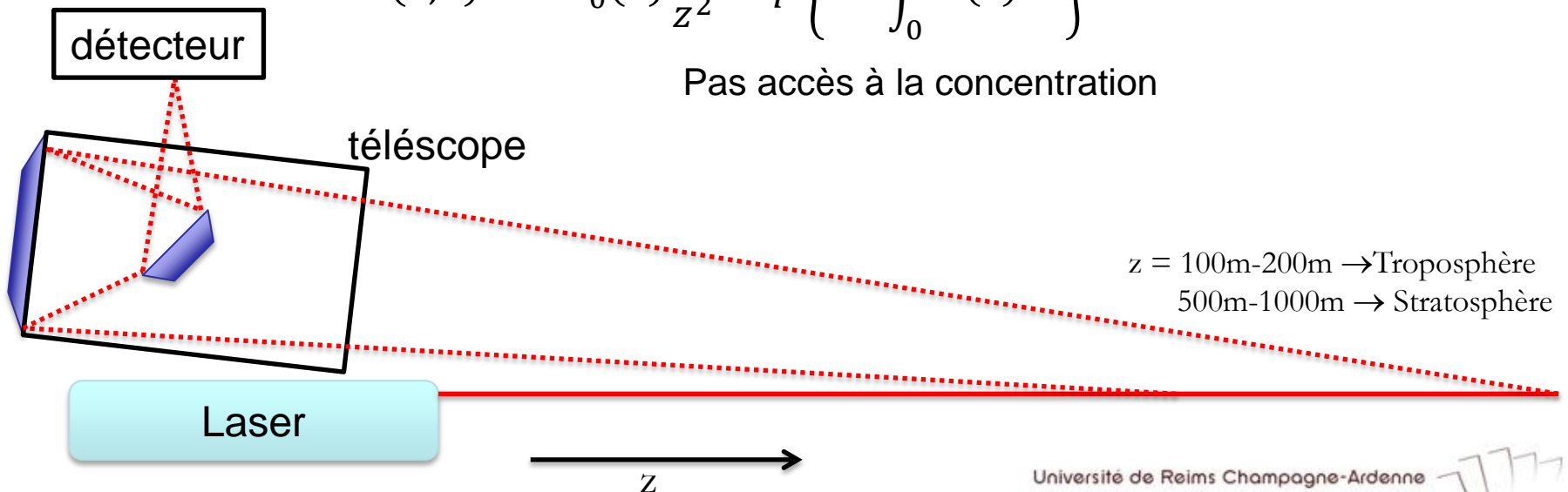
Aller-retour

Coefficient d'extinction totale

(Rayleigh, Mie, Absorption)

$$I(\lambda, z) = K I_0(\lambda) \frac{A}{z^2} \exp \left\{ -2 \int_0^z \alpha(z) dz \right\}$$

Pas accès à la concentration



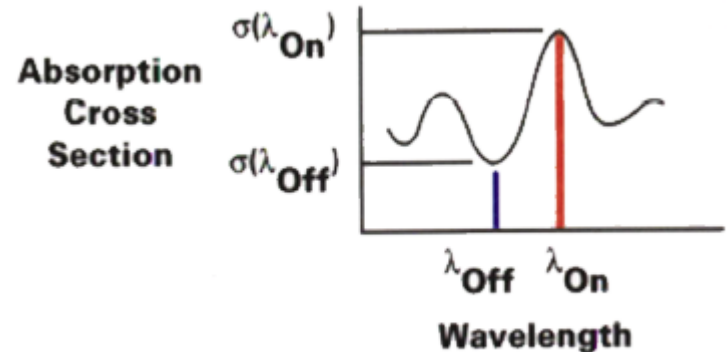
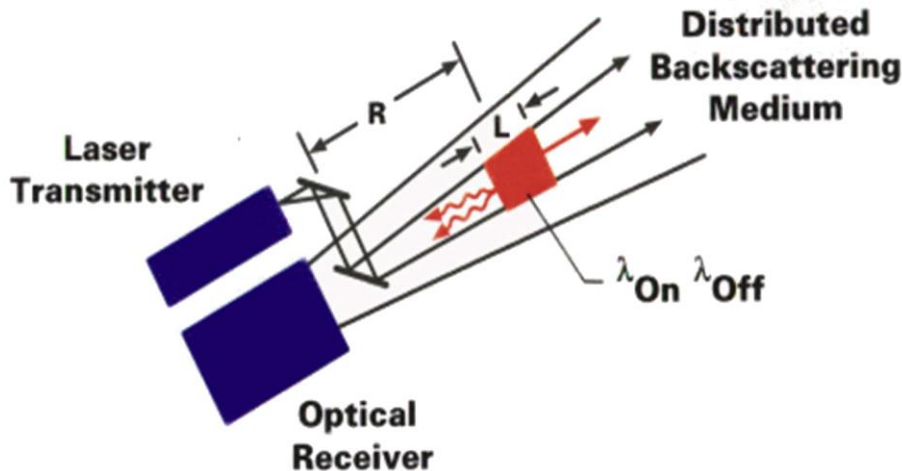
LIDAR DIAL

- On envoie différentes longueur d'onde
 - λ_{ON} → polluant d'intérêt
 - λ_{OFF} → caractéristique de l'atmosphère (référence)

In
d/dz

$$\frac{I(z, \lambda_{ON})}{I(z, \lambda_{OFF})} = \frac{I_0(z, \lambda_{ON}) \exp\left(-2 \int_0^z \alpha(z, \lambda_{ON}) dz\right)}{I_0(z, \lambda_{OFF}) \exp\left(-2 \int_0^z \alpha(z, \lambda_{OFF}) dz\right)}$$

$$N(z) = -\frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{dR} \ln\left(\frac{I(z, \lambda_{ON})}{I(z, \lambda_{OFF})}\right) \quad \Delta\sigma = \sigma(\lambda_{ON}) - \sigma(\lambda_{OFF})$$





Exemples de mesures depuis le sol :

<u>Polluant</u>	<u>Méthode</u>	<u>Limites Détection</u>
SO ₂	DOAS	1 ppb
	LIDAR	2.3 ppb/km

NO ₂	DOAS	2.5 ppb
	LIDAR	6.5 ppb/km

N ₂ O	TDL	1 ppb

O ₃	DOAS	1.5 ppb
	LIDAR	1.8 ppb/km

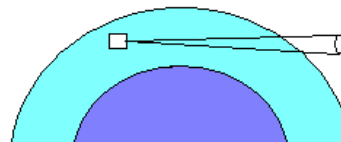
CH ₄	TDL	1 ppb

CO	Abs. IR	0.2 ppb

Mesures sous ballon pour composants minoritaires



- Concentrations de l'ordre du ppb
- Troposphère et basse et moyenne stratosphère
- On obtient l'évolution de la concentration avec l'altitude
- De l'UV à l'IR lointain
- Qualité des mesures de concentration dépend beaucoup de la précision des paramètres spectroscopiques et sa dépendance avec T
- Deux techniques d'observation:
 - Occultation ou in situ. Source naturelle (0° - 5° d'élévation)
 - Source embarquée: IR



Mesures sous ballon pour composants minoritaires



2 types de ballon:

- Ballons stratosphériques ouverts: vie d'une dizaine d'heures. Ascension rapide (jusqu'au 45 km approx.) et descente lente.
- Ballons de longue durée: Transportent quelques dizaines de kg. Peuvent faire plusieurs tours (vortex polaire, zones tropicales et équatoriales)
 - Ballons pressurisés: $z = \text{cte}$ (< 25 km)
 - Ballons Montgolfières IR: 25 km (jour), 15 km (nuit)



Instruments IR aérotransportés pour mesures atmosphériques



Instrument	Species	Time response	Precision (1σ)	Accuracy	λ (μm)
COLD	CO	4 s	the larger of 1% of ambient mixing ratio or 7–8 ppbv	6 to 9%	4.62 and 4.71
TRISTAR	CO	2 s	0.25%		4.63
	CH ₄	2 s	0.4%		7.88
	CH ₂ O	2 s	500 pptv		5.68
4-channel pulsed QCL system	CO ₂	1 s	50 ppbv ^a	≤ 200 ppbv	4.31
	CO	1 s	0.5 ppbv ^a	≤ 5 ppbv	4.61
	CH ₄	1 s	1 ppbv ^a	≤ 2 ppbv	7.84
	N ₂ O	1 s	0.1 ppbv ^a	≤ 0.4 ppbv	7.84
Argus	N ₂ O	2 s	3.9 ppbv		4.5
	CO	2 s	1.3 ppbv	3%	4.5
	CH ₄	2 s	9.8 ppbv	1.5%	3.3
Pico-SDLA	H ₂ O	800 ms		5%–10%	2.63
DLH	H ₂ O(v)	50 ms	0.1% or 0.01 ppmv (in 1 s)	5% or 1 ppmv	1.39
DACOM	CO	1 s	< 1% or 1 ppbv	2%	~ 4.7 ^b
	CH ₄	1 s	< 0.1%	1%	~ 3.3 ^b
	N ₂ O	1 s	< 0.1%	1%	~ 4.5 ^b
DFG	CH ₂ O	1 s	80–120 pptv in 2006 (60 pptv in 2008)	13%	3.53
		1 min	20–30 pptv in 2006 (7 pptv in 2008)		



Satellites

Instrument

Plateforme

ACE FTS (*Atmospheric Chemistry Experiment*)

ACE

AIRS (*Atmospheric InfraRed Sounding*)

TERRA

ATMOS (*Atmospheric Trace Molecule Spectroscopy Experiment*)

NS

GOME (*Global Ozone Monitoring Experiment*)

PP

GOMOS (*Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars*)

ENVISAT

HIRS/TOVS (*HIgh Resolution Infrared Radiation Sounder*)

PP

IASI (*Infrared Atmospheric Sounding Interferometer*)

METOP

ILAS (*Improved Limb Atmospheric Sounder*)

ADEOS

MIPAS (*Michelson Interferometer for Pasive Atmospheric Sounding*)
ENVISAT

SCIAMACHY (*Scanninc Imaging Absorption Spectrometer for
Atmospheric CHartographY*)

ENVISAT

TANSO (*Thermal And Near-infrared Sensor for carbon Observation*)

GOSAT

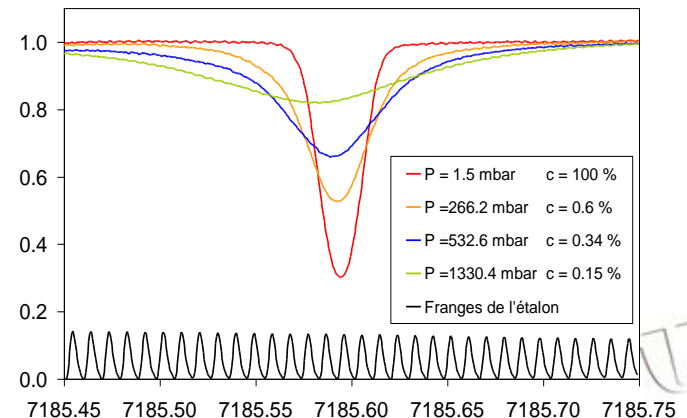
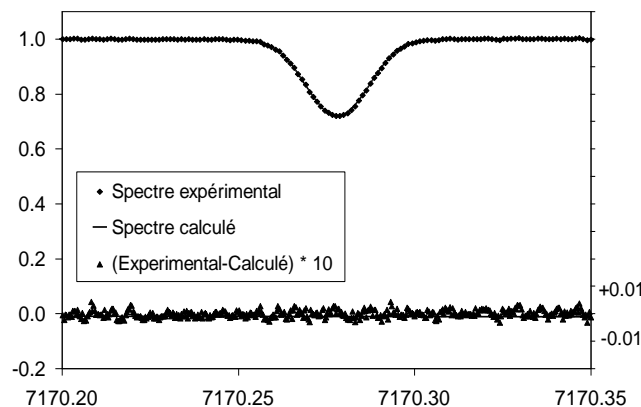
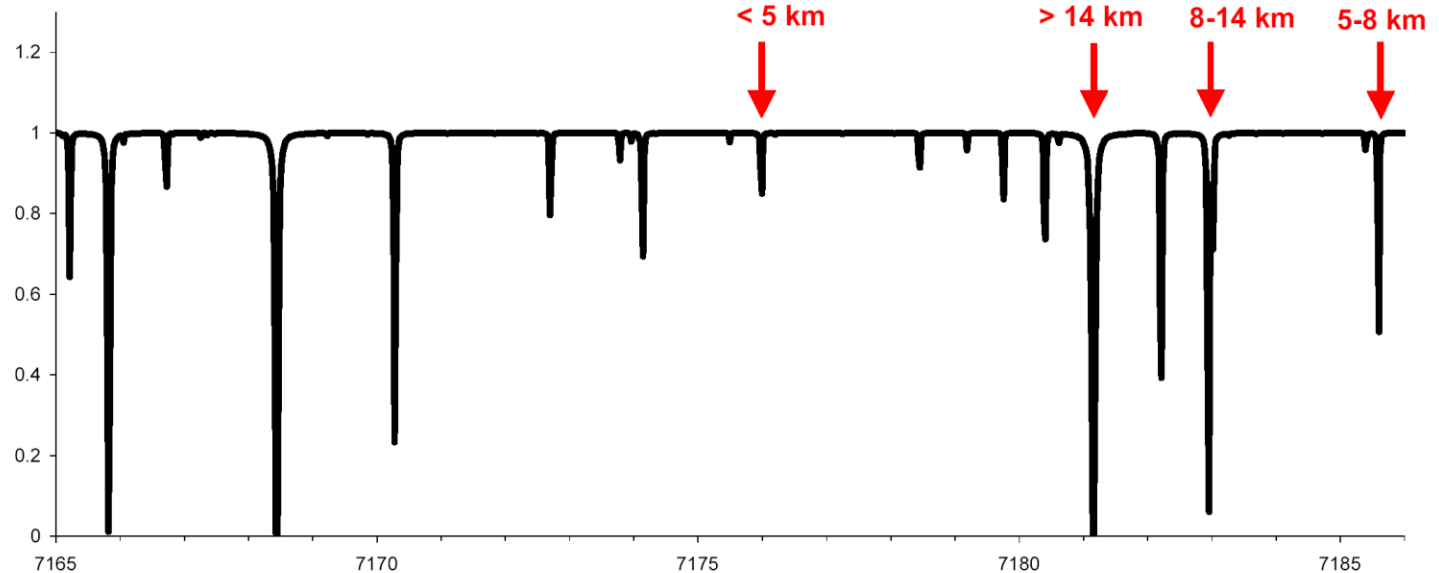
Université de Reims Champagne-Ardenne

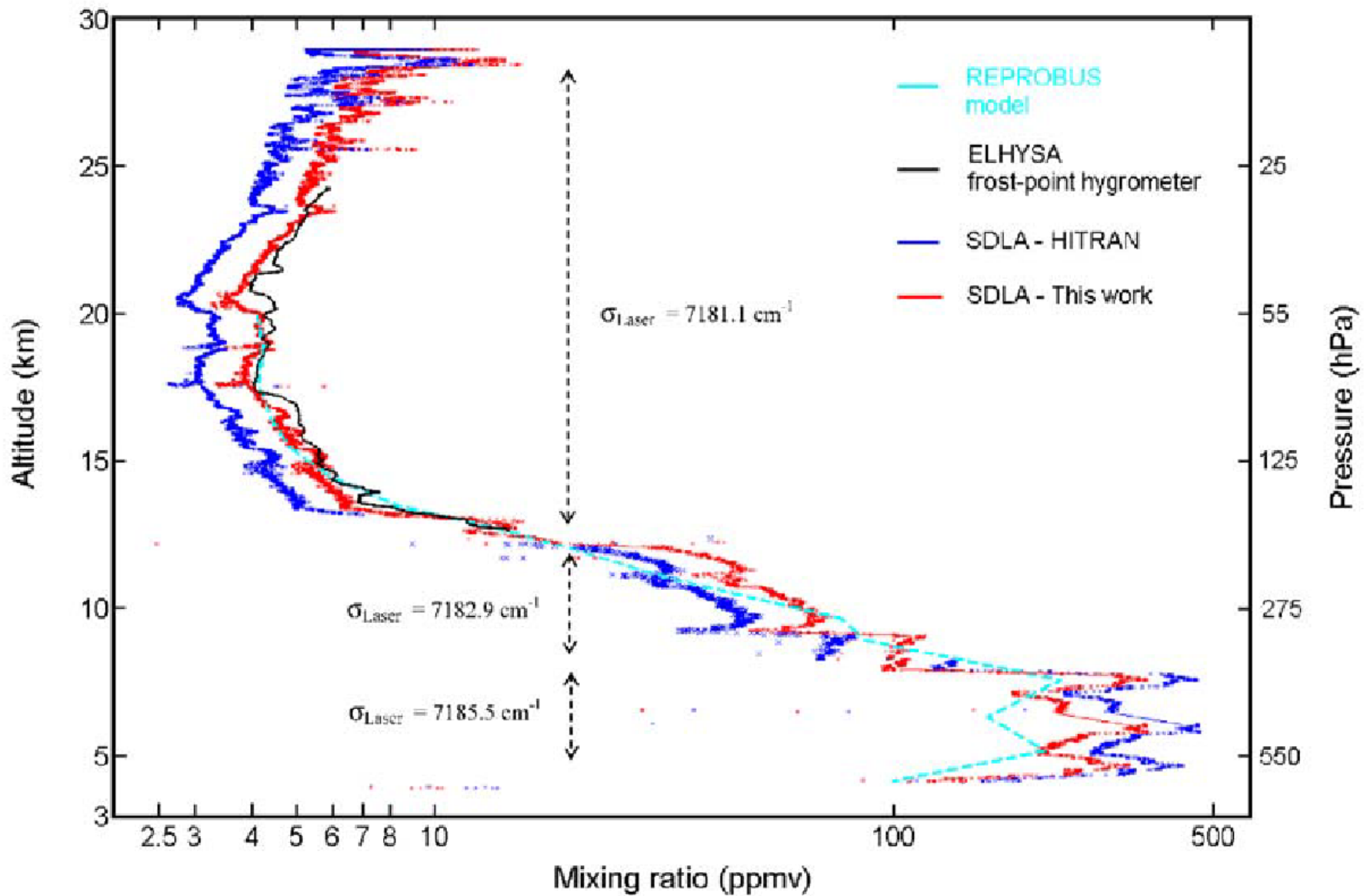
Exemple d'influence de la spectroscopie sur mesures ballon

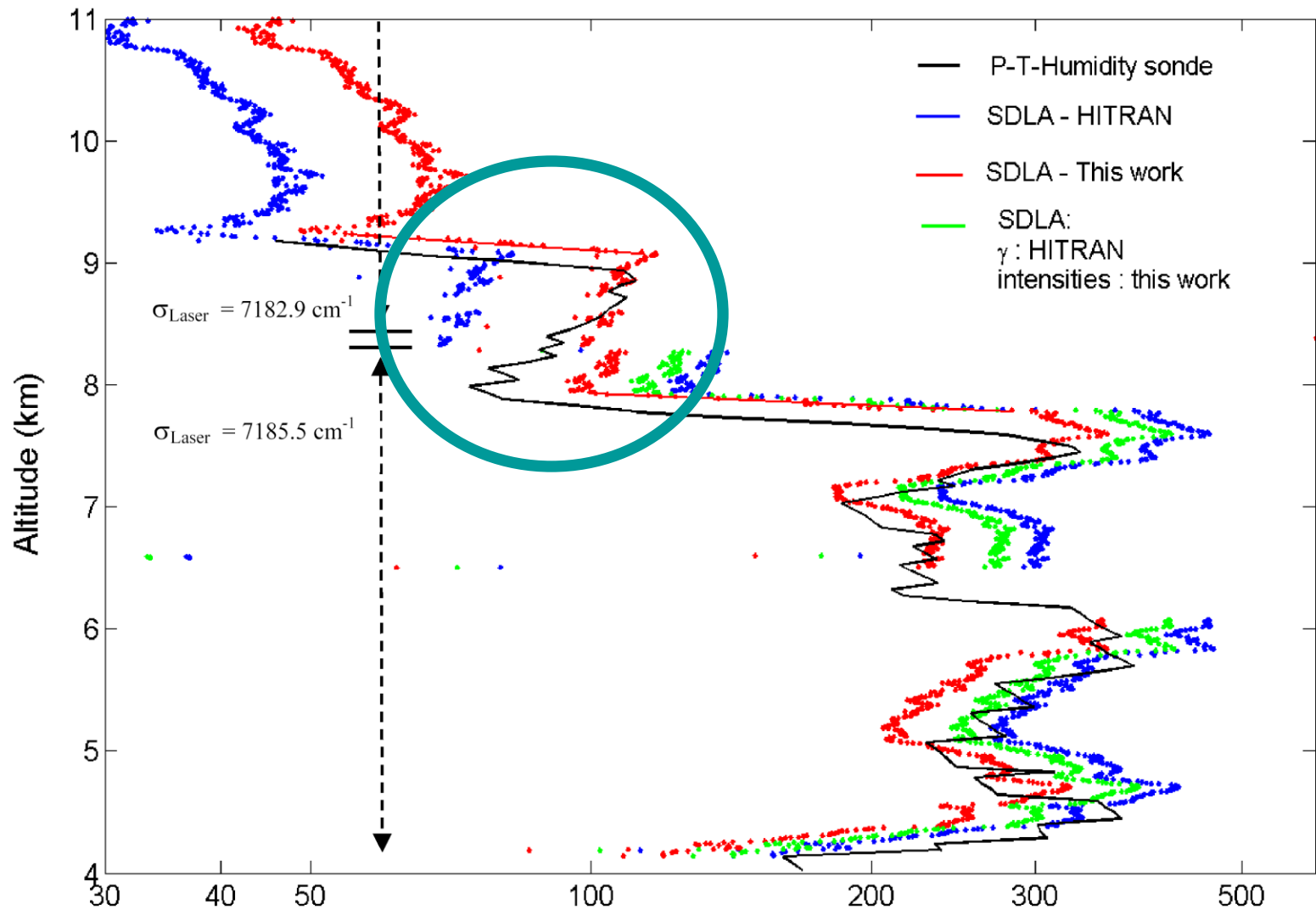
Instrument
SDLA
Mesure
H2O
Spectro
Laser
1,39 μm

Intensités
Largeurs

Comparaison
HITRAN
2000





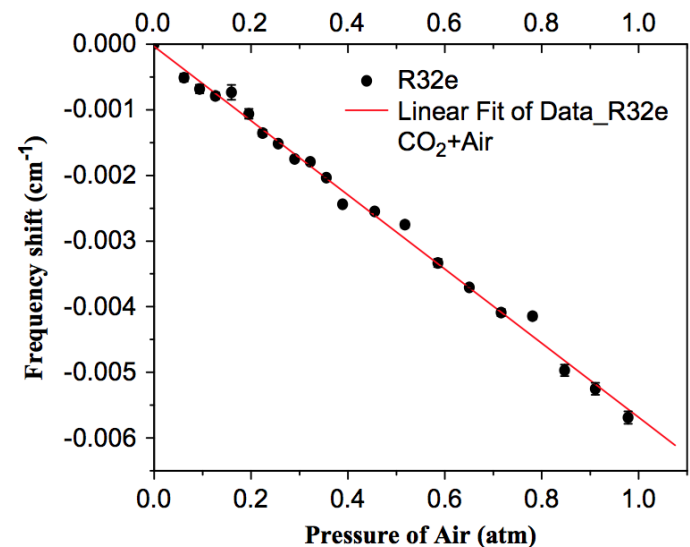
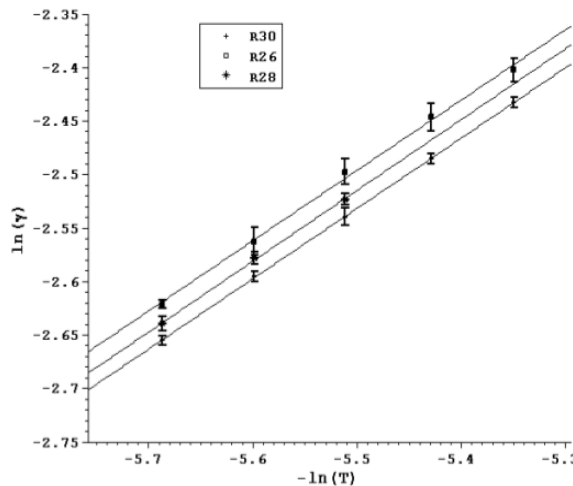
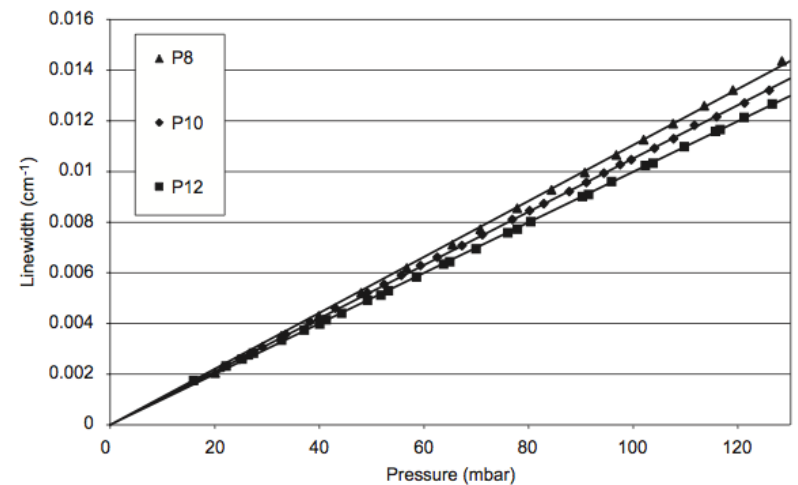
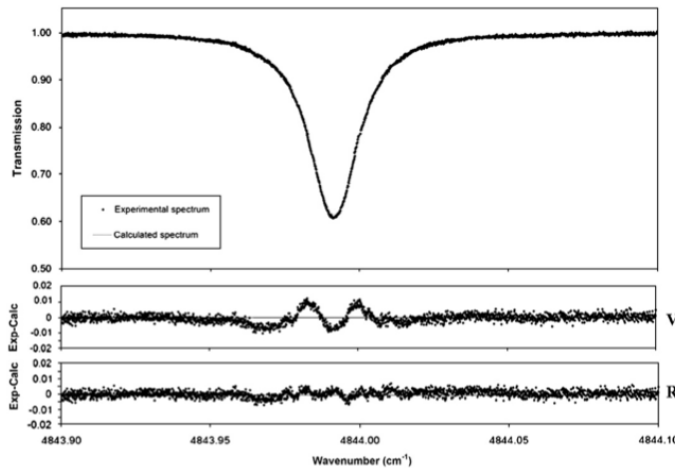


Exemple de mesures spectroscopiques nécessaires pour lidar

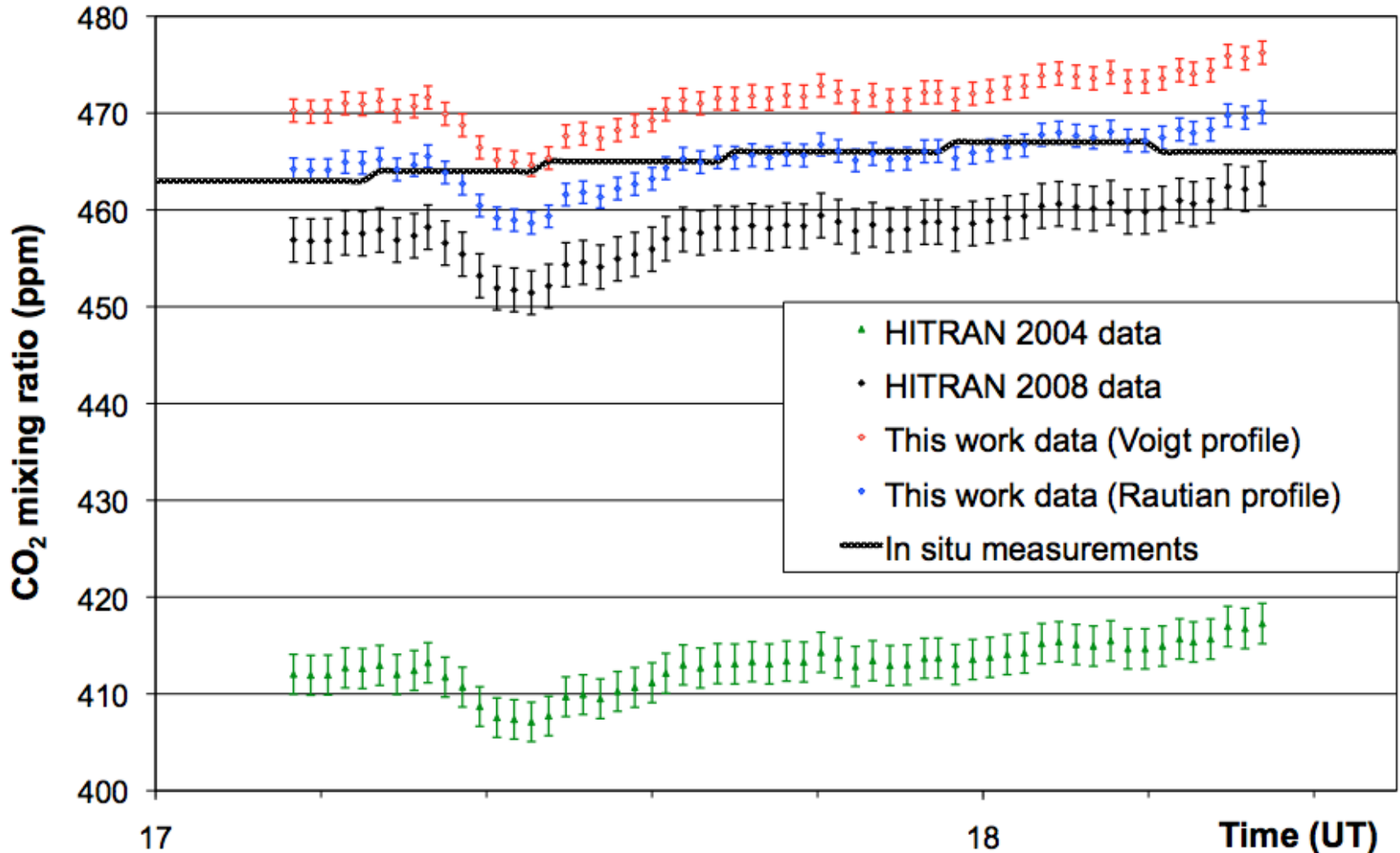
Instrument
Lidar DIAL
Mesure
CO₂
Spectro
Laser
2 μm
P10 Sol
R30 spatial

Intensités
Largeurs
Déplacements

Comparaison
HITRAN
2004-2008



Influence de la spectroscopie sur mesures Lidar

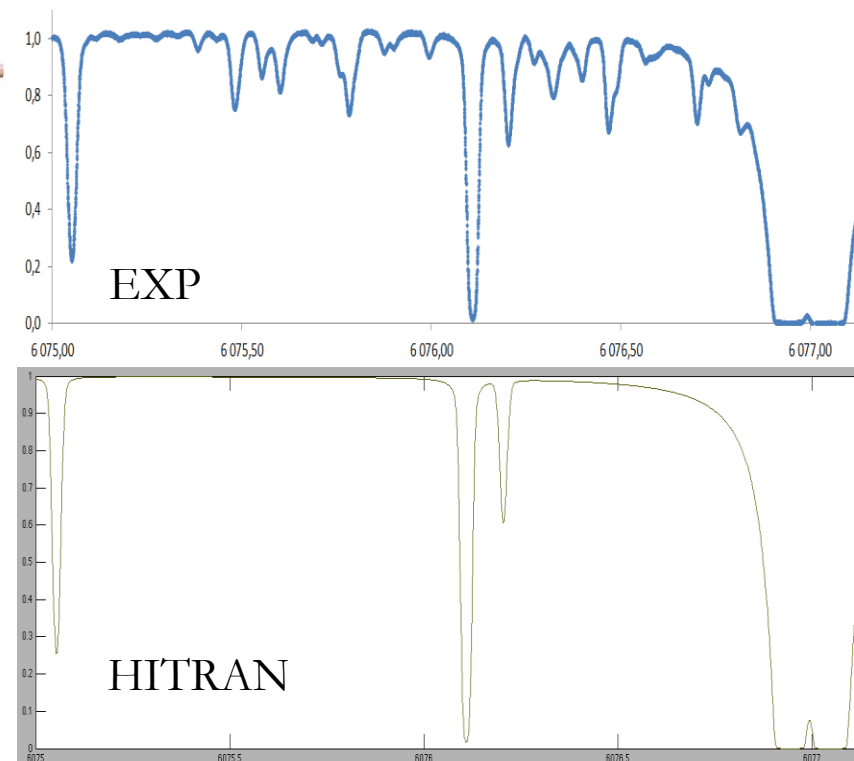
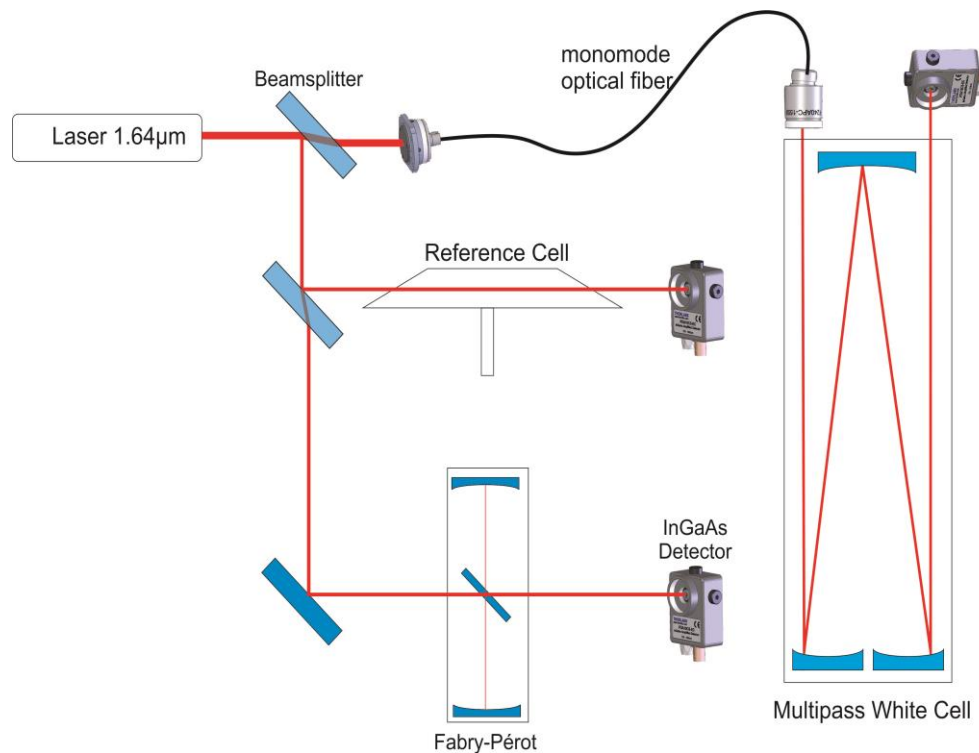




Recherche au GSMA

Participation au projet franco-allemand de Lidar spatial CH₄

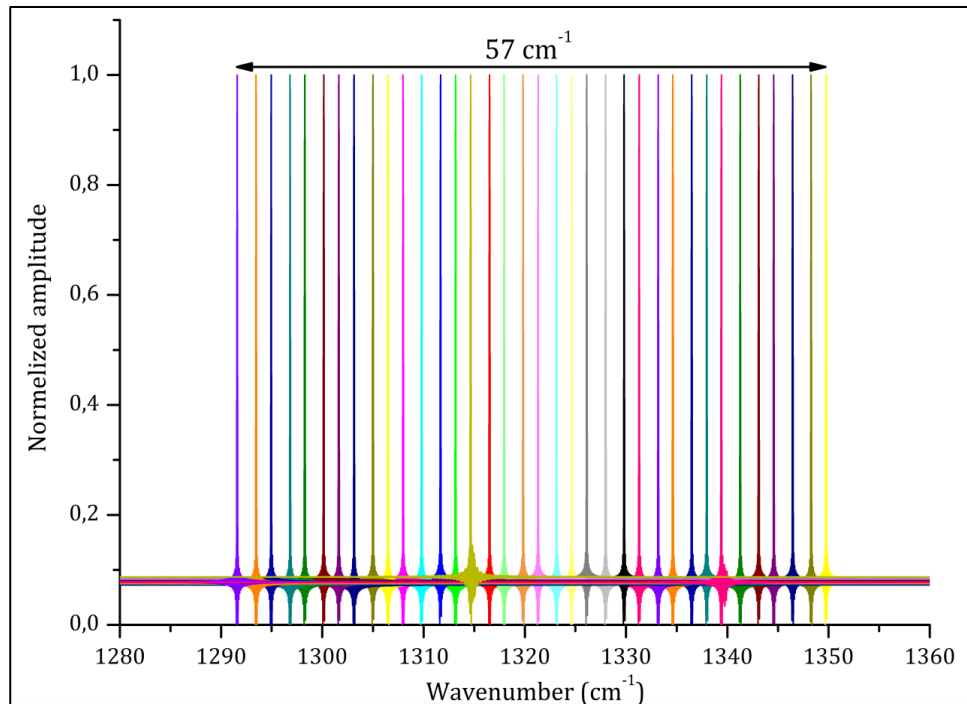
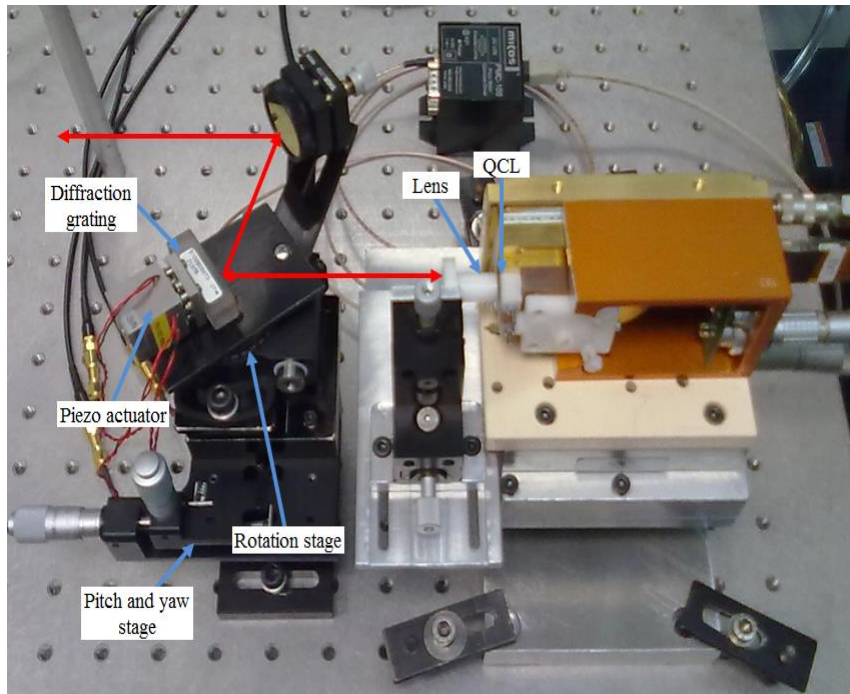
→ Mesure de paramètres spectroscopiques du méthane à 1,6 μm



- Projet CNES Merlin 2011-2017
- Lidar méthane des agences spatiales françaises et allemandes
- Collaboration avec LISA (Paris)

Mise en cavité externe d'un laser à cascade quantique

→ Augmenter l'accord pour détection multigaz/grosses molécules

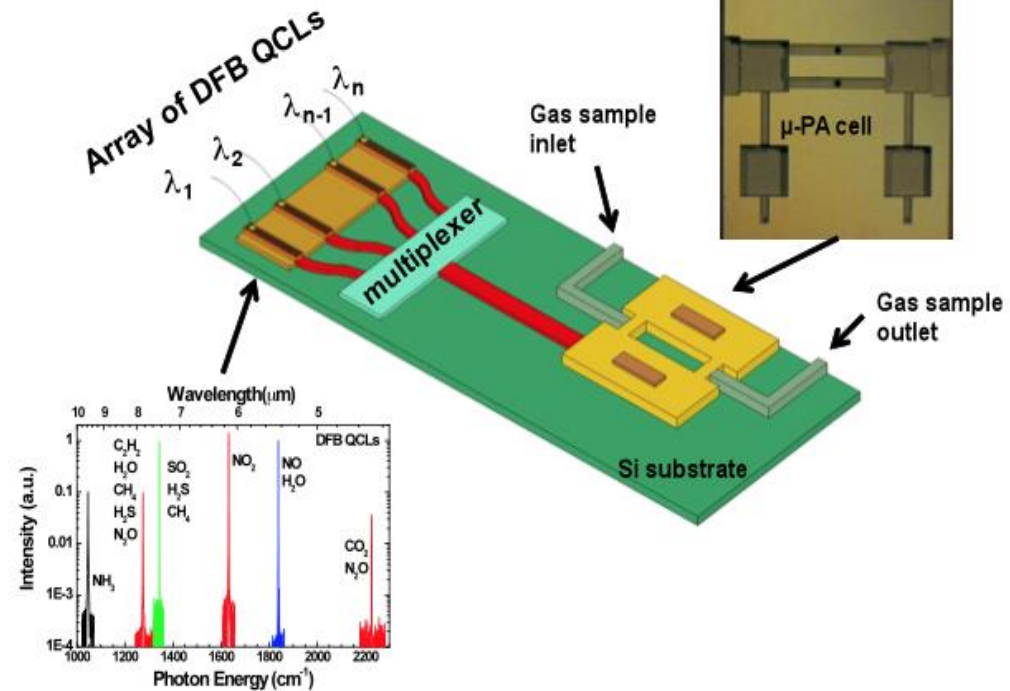
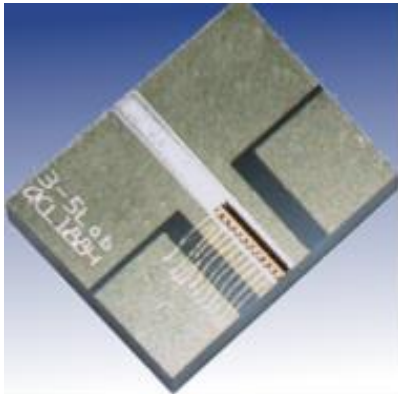
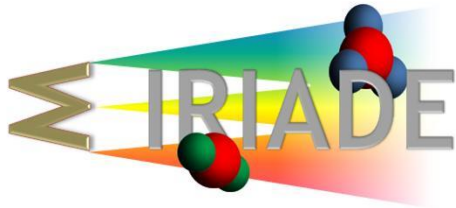


- REI DGA Selectif 2009-2011 avec Thalès III-V lab
- Projet européen AcousticNose 2010-2012 avec NEO
- Thèse D. Mammez (DGA/Région 2010-2013)



Miniaturisation de senseurs photoacoustiques

→ Senseurs sélectifs peu chers et facilement déployables

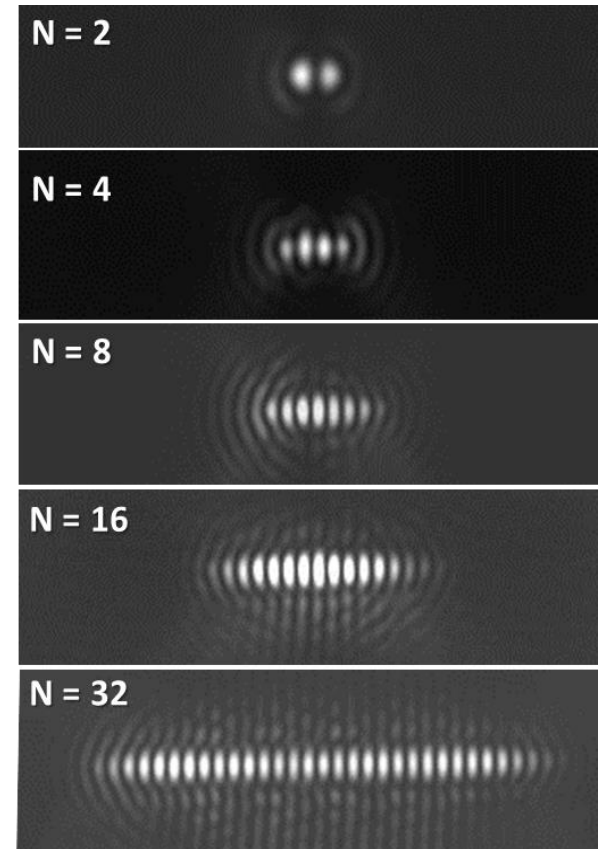
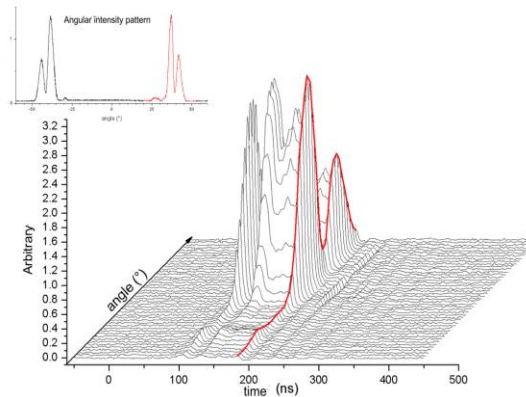
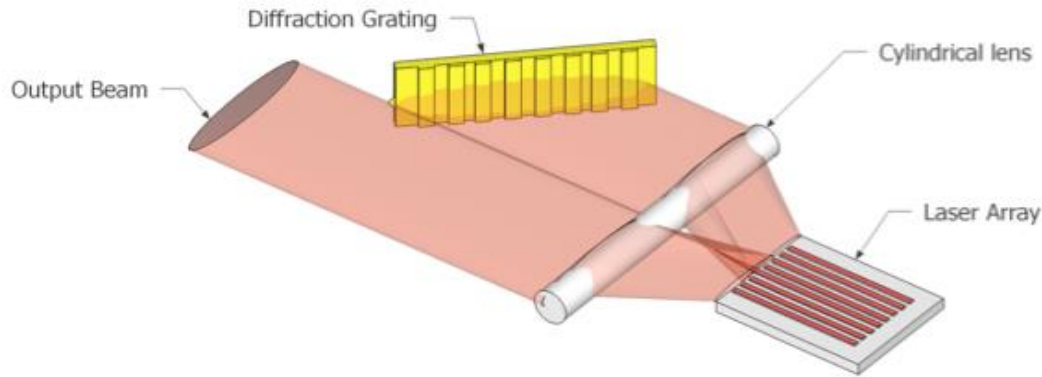


- ANR MIRIADÉ 2012 - 2014
- Collaboration avec Thalès III-V lab, CEA Leti, LSCE Palaiseau
- Thèses J. Rouxel (CEA 2012-2015) et C. Risser (Cifre 2012-2014)



Réseau de QCL : Augmentation de la puissance des QCL en cavité

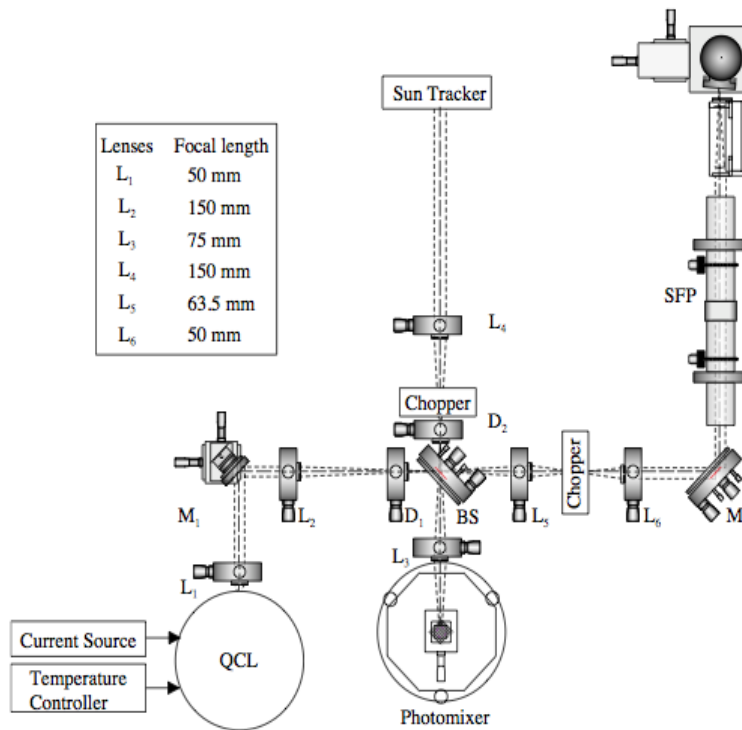
→ Efficacité améliorée des senseurs photacoustiques



- ANR COCASE 2012 -2014
- Collaboration avec Thalès III-V lab

Radiométrie hétérodyne avec laser à cascade quantique

→ Mesures à distance des polluants atmosphériques / toxiques



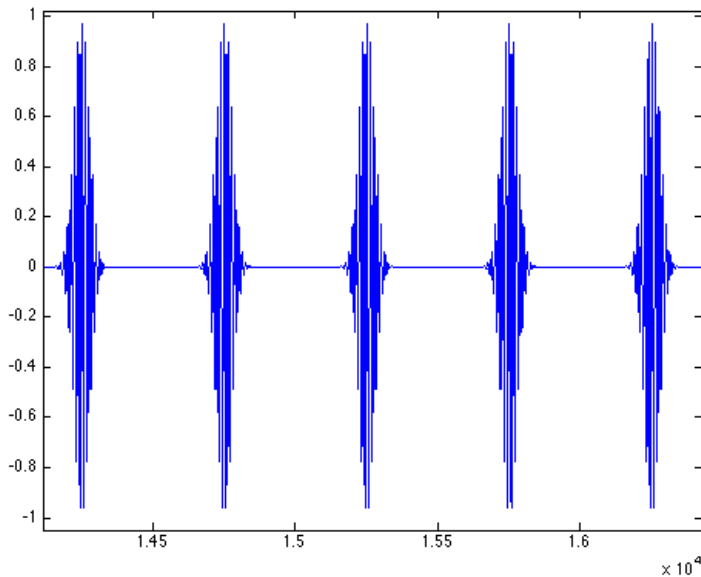
- ANR QUIGARDE 2013-2016
- Coordination et collaboration avec Thalès III-V lab et LPL (Paris XIII)
- Thèse M.-H. Mammez (DGA/CNRS 2012-2015)



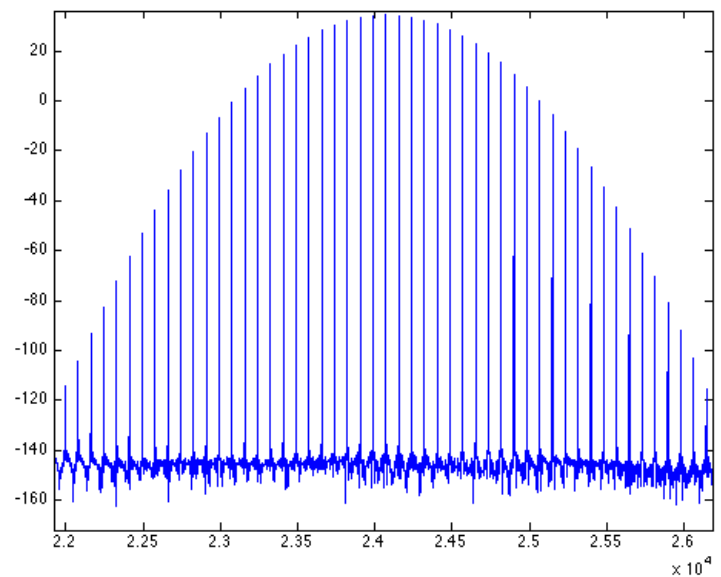
Et à l'avenir ???

LIDAR & Frequency Combs Spectroscopy

Lasers impulsionnels



Temps

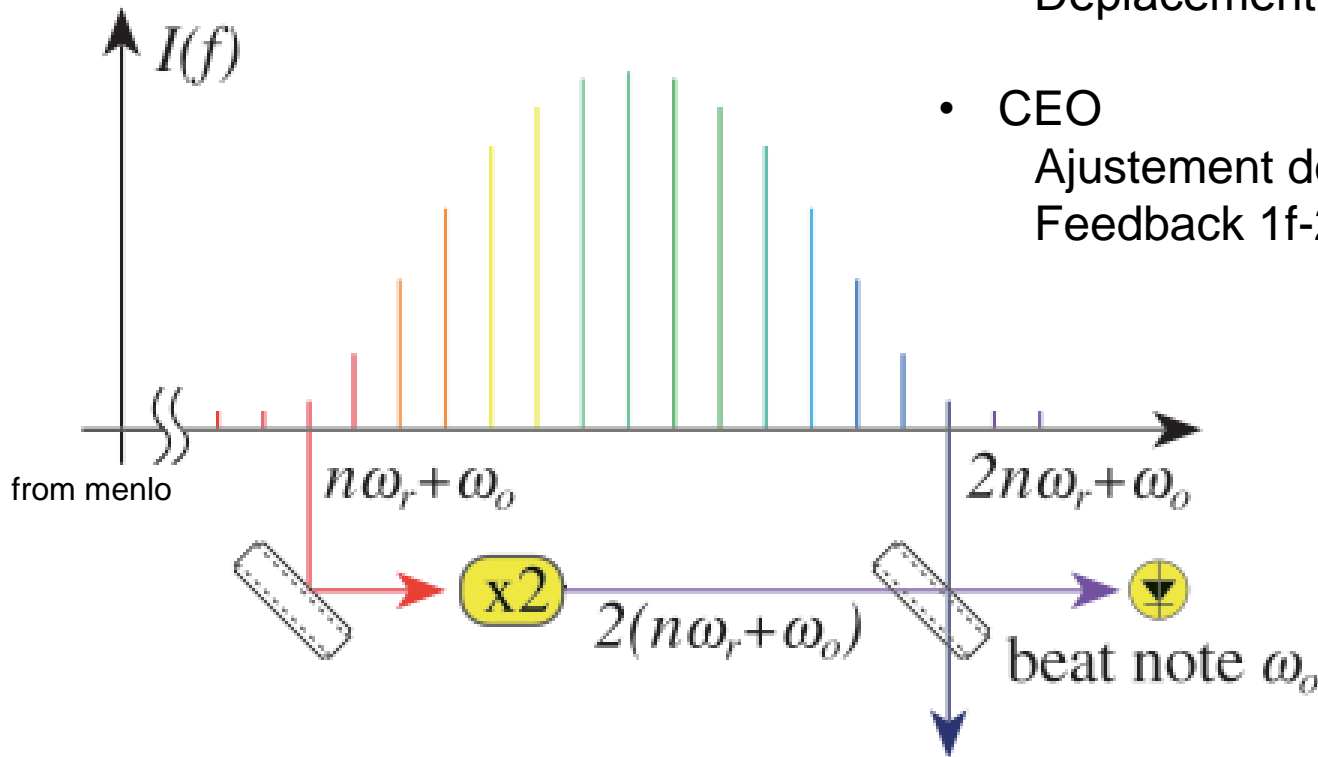


Fréquences

LIDAR & Frequency Combs Spectroscopy

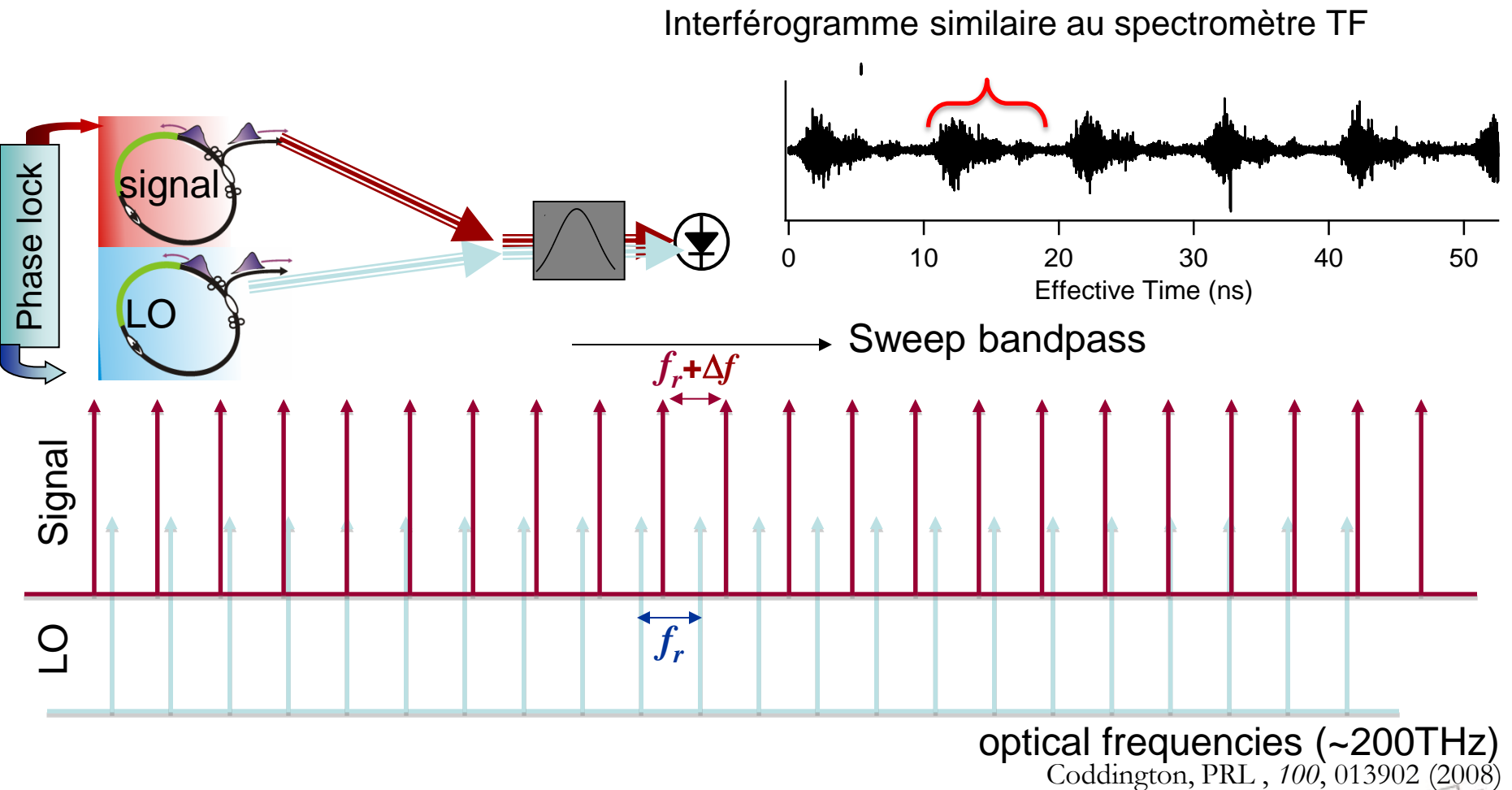
Lasers stabilisés

- Taux de répétition :
Changement de la longueur de la cavité
Déplacement d'un miroir
- CEO
Ajustement de la dispersion
Feedback 1f-2f



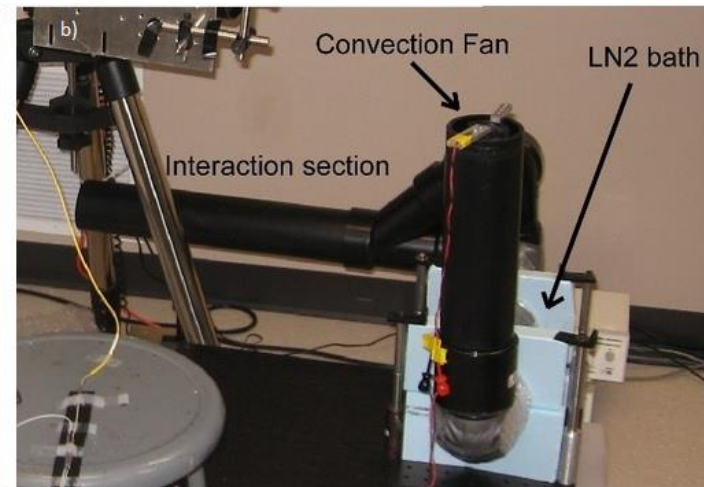
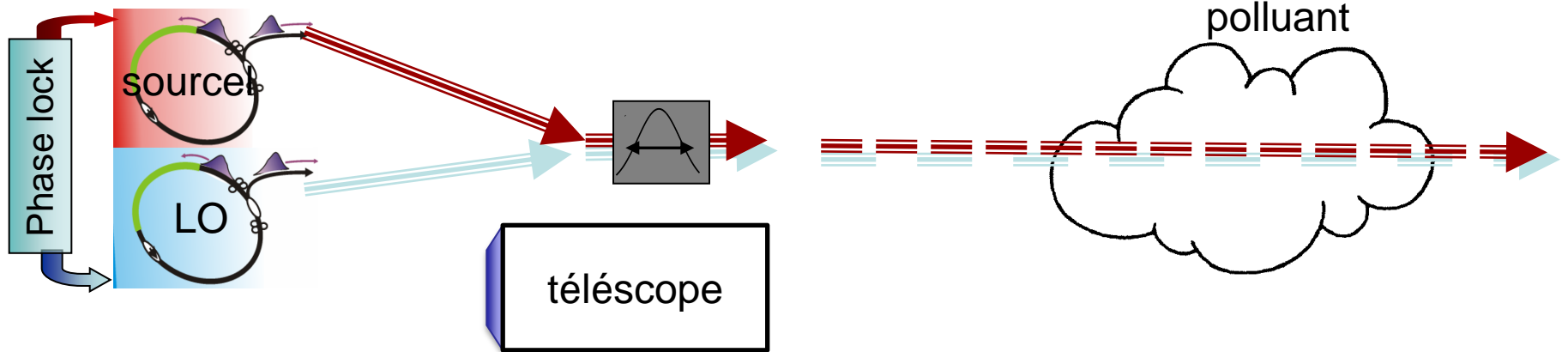
LIDAR & Frequency Combs Spectroscopy

Dual Frequency Combs



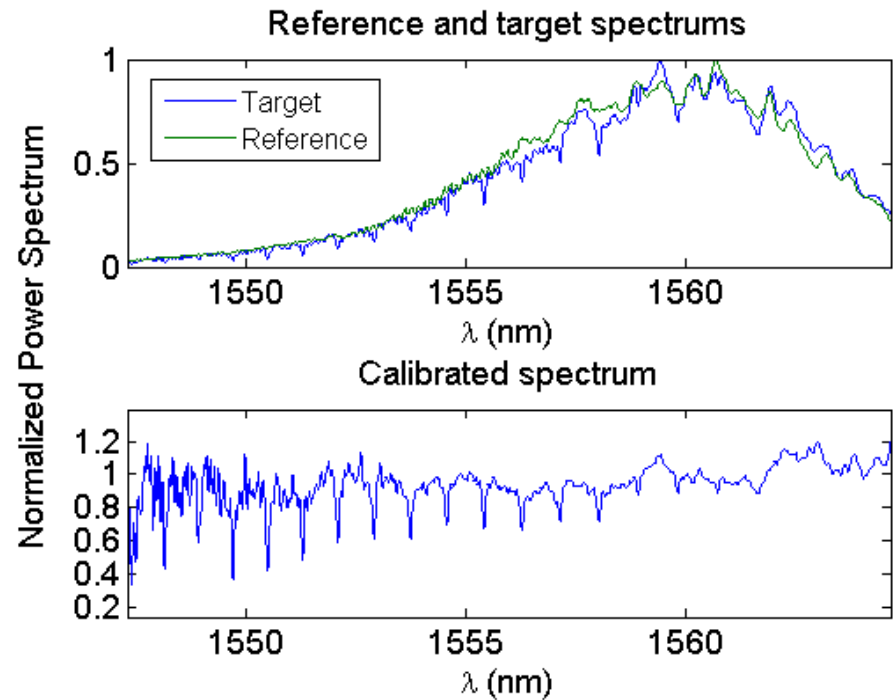
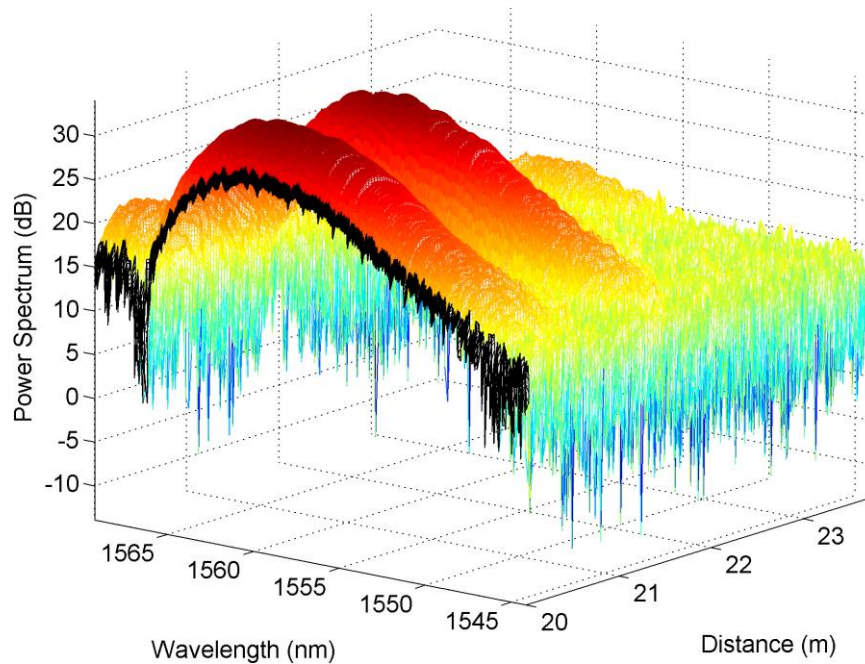
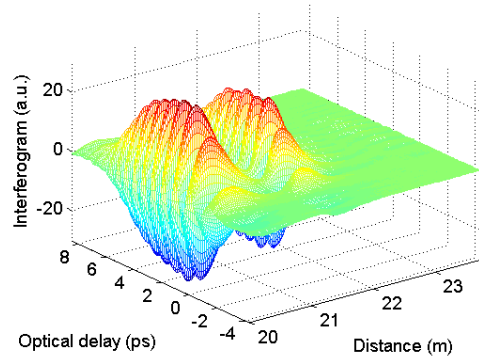
LIDAR & Frequency Combs Spectroscopy

Dual Frequency Combs



LIDAR & Frequency Combs Spectroscopy

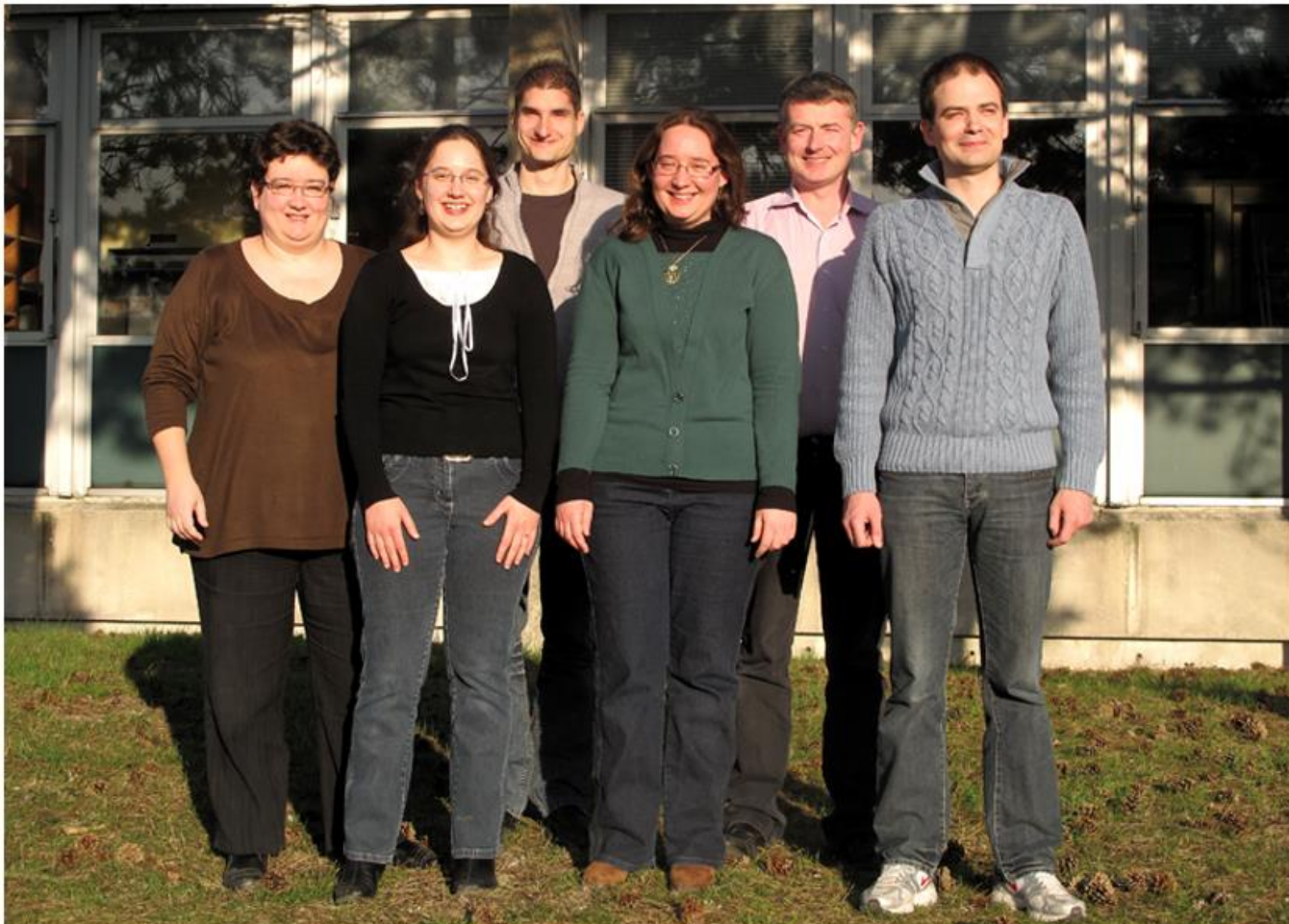
Dual Frequency Combs



Boudreau, Levasseur, Roy, and Genest
CLEO: Science and Innovations San Jose, California
United States June 9-14, 2013

Remerciements

- Organisateurs de l'école d'été LIDAR
- Membres de l'équipe laser du GSMA





**MERCI POUR
VOTRE
ATTENTION**