



Vent et turbulence

A. Dabas

Plan

- Principe général de la mesure Doppler.
- Mesure de vent par lidar en détection directe.
 - Double Fabry-Perot.
 - Imagerie de frange.
 - AEOLUS
- Mesure de vent par lidar en détection hétérodyne.
 - Estimation de la fréquence du signal.
 - Fiabilité et précision de la mesure de la vitesse radiale.
 - Reconstitution d'un vecteur vent (*Velocity Azimut Display*)
 - Exemple: la campagne ESCOMPTE (2001)
- Mesure de paramètres turbulents.
 - Turbulence de vitesse
 - Mesure de la turbulence intra-impulsion par élargissement spectral.
 - Mesure de la turbulence dynamique par fluctuations spatiale de la vitesse radiale.

Principe général de la mesure

On mesure la différence de fréquence entre rayonnement émis et le rayonnement réfléchi. Celle-ci est proportionnelle à la composante de la vitesse du réflecteur le long de l'axe de propagation du rayonnement:

$$\Delta f = -\frac{2v_r}{\lambda}$$

La composante de la vitesse le long de l'axe de propagation s'appelle la vitesse radiale.

En lidar, on a pris l'habitude de compter la vitesse positive quand le réflecteur s'éloigne du lidar. Le décalage Doppler est donc de signe opposé à la vitesse radiale.

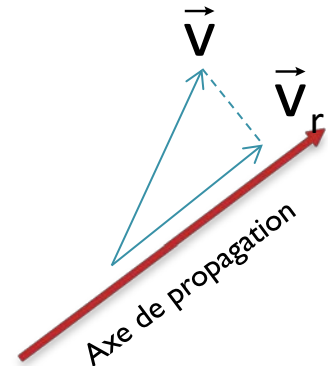
Ordre de grandeur du décalage Doppler:

$$\lambda = 355\text{nm} \quad \frac{\Delta f}{v_r} = -5,63 \text{ MHz}/(\text{ms}^{-1})$$

$$\lambda = 1,5\mu\text{m} \quad \frac{\Delta f}{v_r} = -1,33 \text{ MHz}/(\text{ms}^{-1})$$

$$\lambda = 10\mu\text{m} \quad \frac{\Delta f}{v_r} = -0,2 \text{ MHz}/(\text{ms}^{-1})$$

Le décalage Doppler se situe dans la gamme des radiofréquences...



Pour mesurer une vitesse avec un lidar Doppler, il faut être capable de mesurer la fréquence de la lumière rétrodiffusée par l'atmosphère, et si celle du laser n'est pas suffisamment stable, celle aussi des impulsions émises...

Directe / hétérodyne

- Deux types de détection

La mesure des fréquences émises (impulsion laser) et reçues (rétrodiffusion atmosphérique) peut se faire de deux manières différentes:

1. A l'aide d'un interféromètre (Fabry-Pérot, Fizeau,...) , c'est-à-dire d'un filtre optique dont la transmission dépend de la fréquence de la lumière. On relie alors la puissance de la lumière en sortie de filtre à sa fréquence.
2. Par détection hétérodyne: cette fois-ci, on mesure un écart de fréquence par rapport à un « oscillateur local », c'est-à-dire un rayonnement laser continu très stable en fréquence.

- Vent Rayleigh vs. Vent particulaire

Le spectre de la lumière captée par le lidar possède deux composantes:

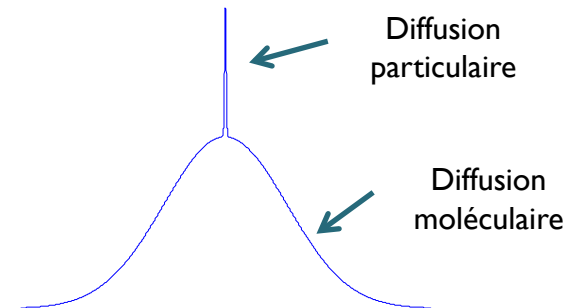
- Une composante très large due à la diffusion de la lumière par les molécules d'air (diffusion Rayleigh)

$$\sigma_f = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{kT}{m}}$$

- Une composante très étroite due à la diffusion par les particules (aérosols ou hydrométéores):

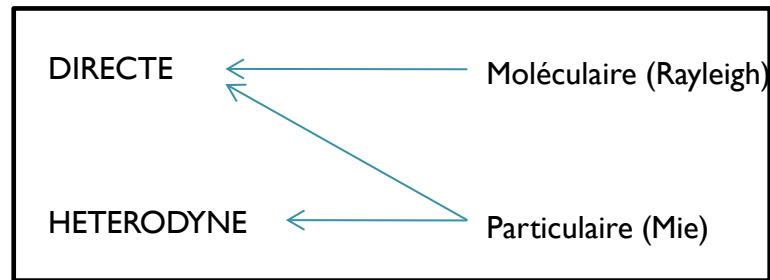
$$\sigma_f \approx \frac{1}{\tau} \quad \text{où } \tau \text{ est la durée de l'impulsion}$$

Application numérique: pour $\lambda=355\text{nm}$, $T=300\text{K}$ et $\tau=1\mu\text{s}$, on a $\sigma_f=1,65\text{GHz}$ pour les molécules, et $\sigma_f \approx 1\text{MHz}$ pour les particules.



Directe / hétérodyne

Les largeurs de spectres sont trop différentes pour qu'un unique système de détection puisse couvrir les 2 → un système de détection donné vise spécifiquement la diffusion particulaire ou la diffusion moléculaire. Si on veut mesurer les deux avec un lidar, il faut 2 systèmes de détection...



La mesure par diffusion moléculaire ne peut se faire qu'en détection directe.

La mesure par diffusion particulaire peut se faire en détection directe ou hétérodyne.

Les lidars Rayleigh fonctionnent sur des longueurs d'onde courtes (UV) pour favoriser la diffusion moléculaire.

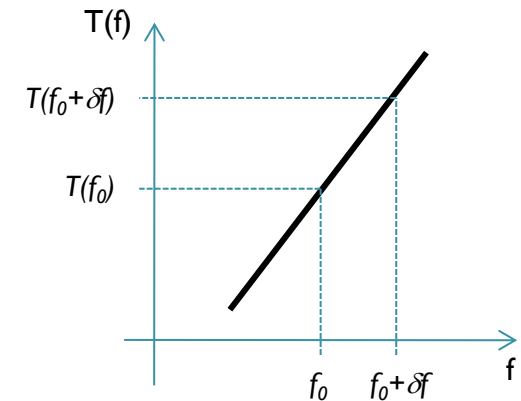


DÉTECTION DIRECTE

2 techniques possibles

- *Edge technique ou double edge technique*

La lumière captée par le télescope passe à travers un filtre interférentiel, sur le flanc de celui-ci. Quand la fréquence du signal varie, l'intensité lumineuse varie... On mesure l'intensité lumineuse en sortie de filtre et on en déduit la fréquence.



- *Imagerie de frange*

La lumière passe à travers un interféromètre qui produit une frange d'interférence à une position spatiale qui dépend de sa fréquence. La frange est imagée sur une matrice CCD. La position de la frange est mesurée à partir de son image et on remonte ainsi au décalage Doppler...

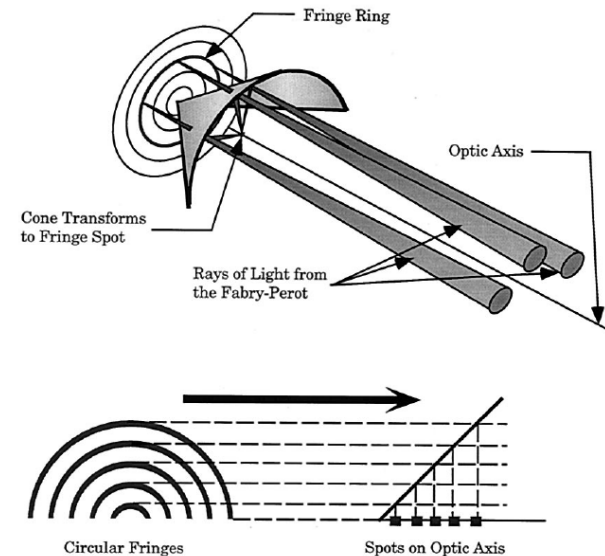


Fig. 1. CLIO transform. With the apex on the optic axis, the cone segment maps light along a radial segment into a single spot along the axis of the cone.

Double edge technique

A. Garnier and M. L. Chanin. Description of a Doppler Rayleigh lidar for measuring winds in the middle atmosphere. *Applied Physics*, B55 :35–40, 1992.

- **Principe général**

- Mis en œuvre par le lidar spatial ADM-AEOLUS (lancement prévu en 2015).
- La lumière captée par le télescope passe à travers un double interféromètre de Fabry-Pérot.
- A la sortie de chaque FP se forme une tâche lumineuse dont l'intensité, mesurée par un détecteur, est fonction de la fréquence de la lumière. On relie la « réponse » du double FP

$$\hat{R} = \frac{N_A - N_B}{N_A + N_B}$$

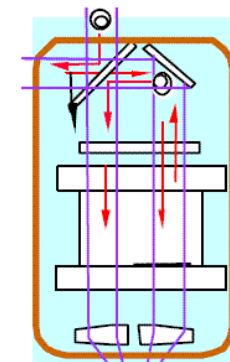
à la fréquence Doppler grâce à une courbe d'étalonnage.

- **Problème**

- La courbe d'étalonnage dépend de la forme du spectre, donc:
 - De la présence d'aérosols (pic),
 - De la température de l'air (largeur de la raie),
 - De la pression à travers la diffusion Brillouin

La restitution de la fréquence doit prendre en compte ces paramètres (utilisation de P et T prévus par les modèles météorologiques...).

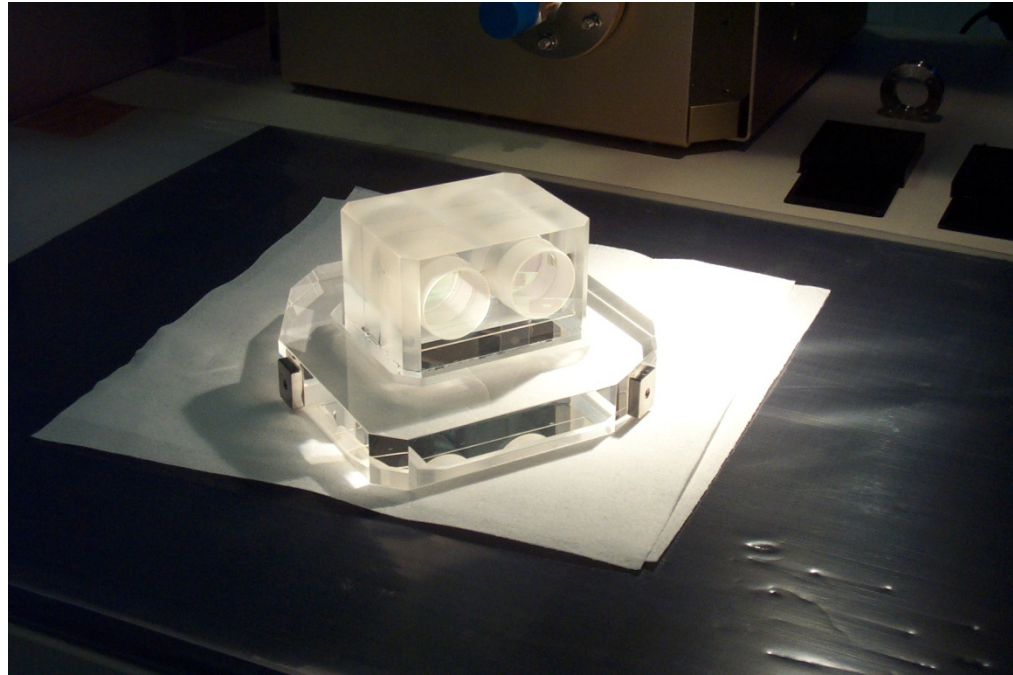
From the telescope



**Rayleigh
Spectrometer
(RSP)**

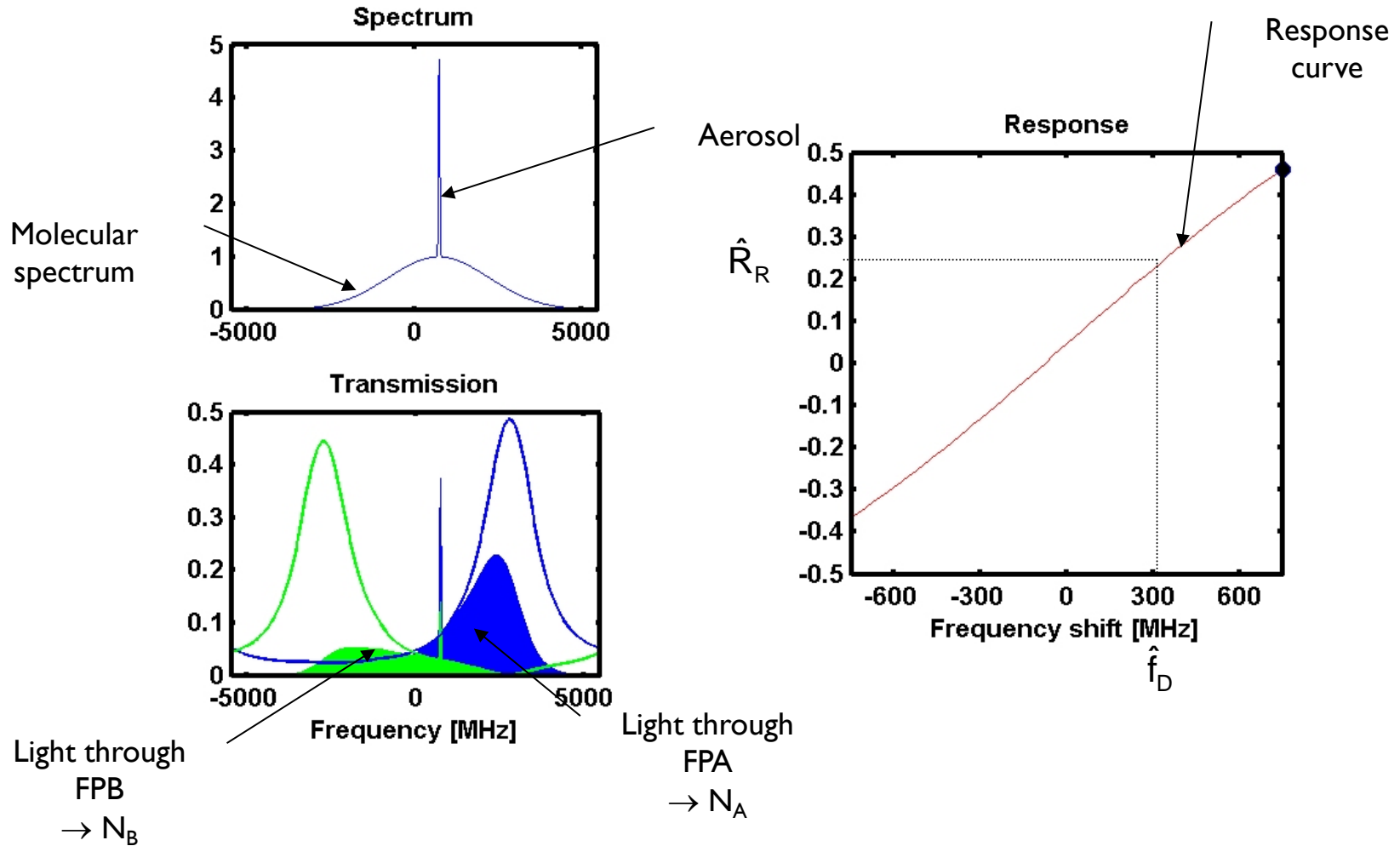
DFU1

Double Fabry-Pérot

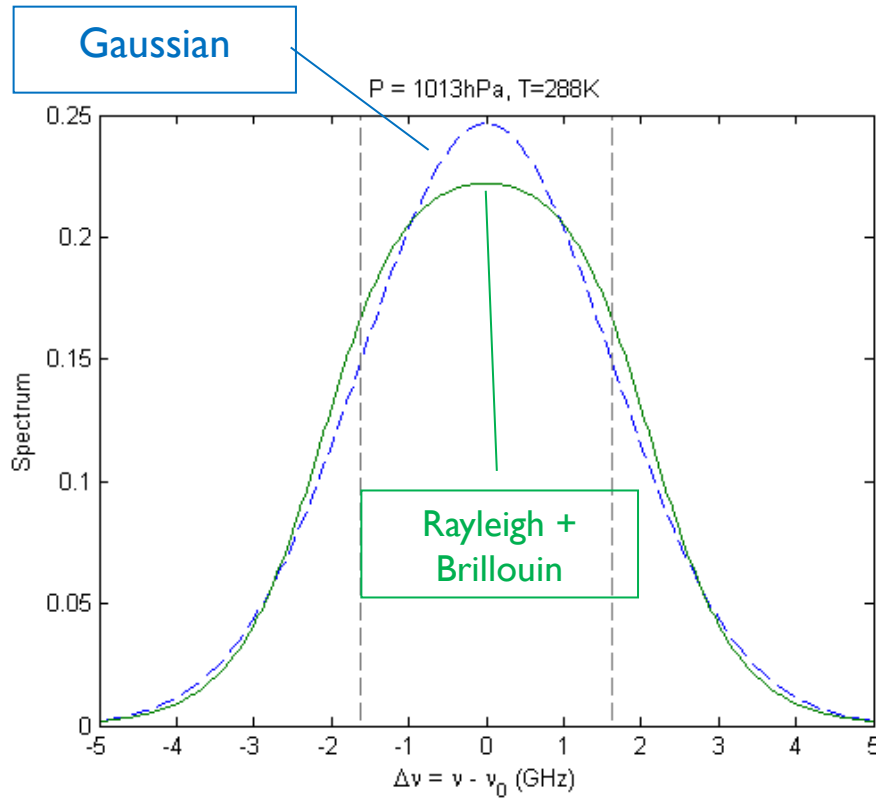


$$T_{A,B}(f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{2FSR}{\pi FWHM} \right)^2 \sin^2 \left(\pi \frac{\nu - \nu_{A,B}}{FSR_{A,B}} \right)}$$

Double edge technique



Diffusion Brillouin

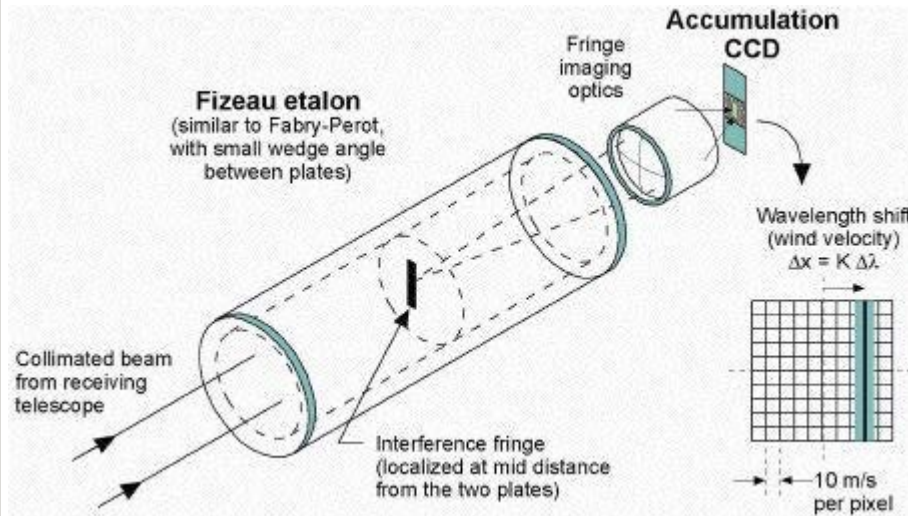


Rayleigh-Brillouin spectrum for $P=1013\text{hPa}$ and $T=288\text{K}$ compared to the Gaussian spectrum predicted by the Rayleigh scattering theory.

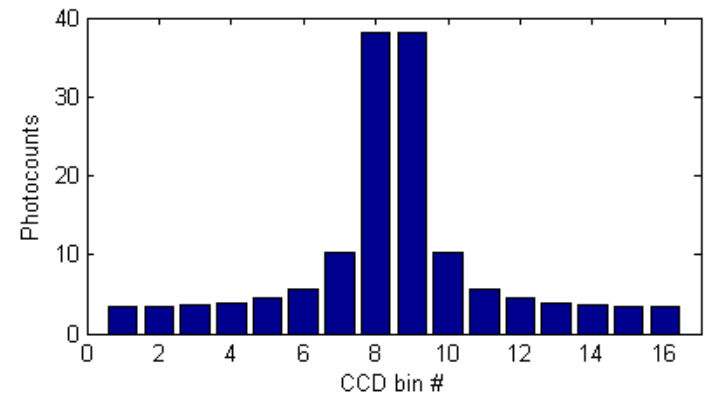
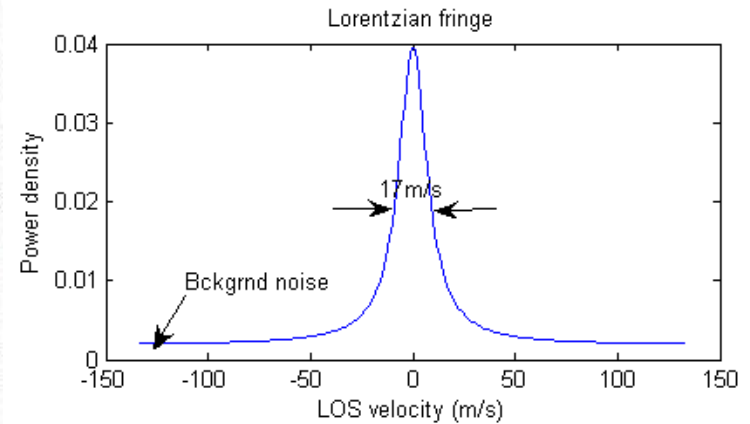
The area is the same, Brillouin scattering modifies the spectral density but does not enhance the scattering ratio but.

Based on Tenti S6 model

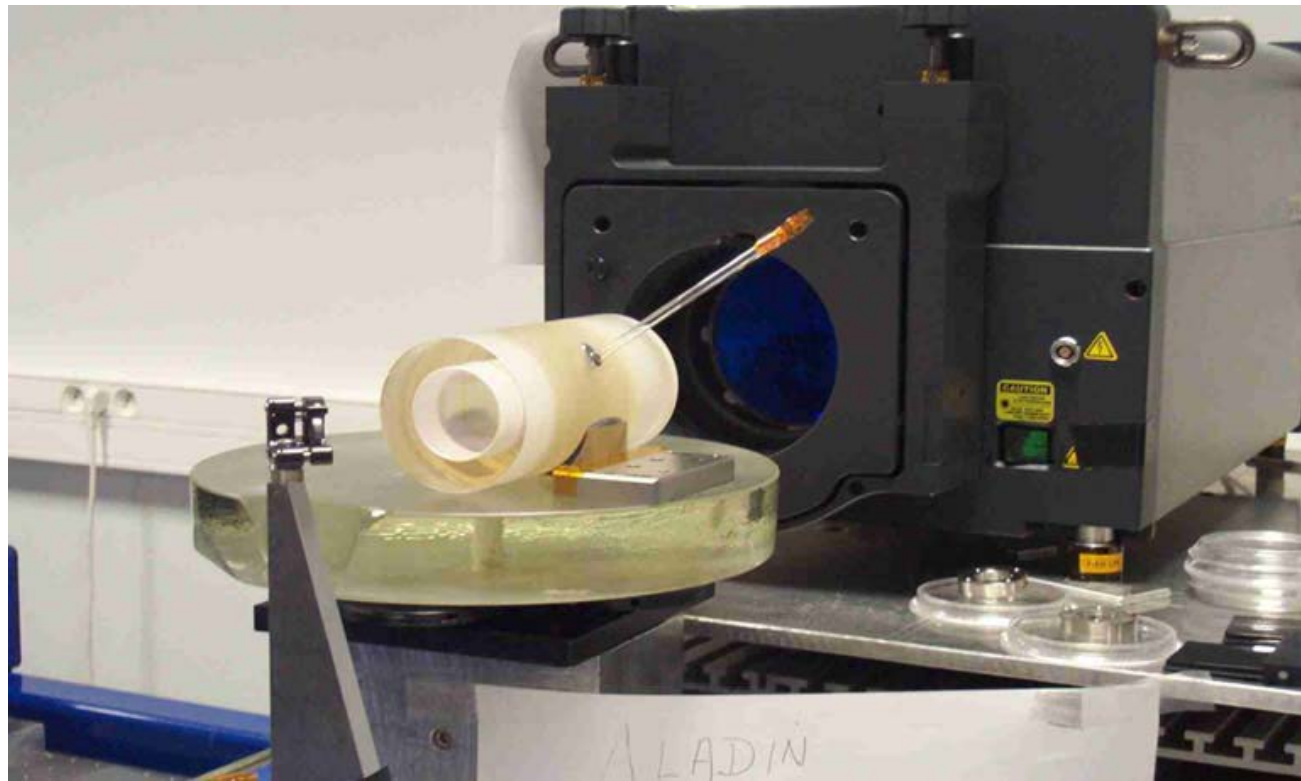
Imagerie de frange (AEOLUS)



La lumière passe à travers le Fizeau. Il se forme entre les 2 faces du Fizeau une frange d'interférence linéaire dont la position est fonction de sa fréquence. La frange est imagée sur une CCD, et sa position est déduite des nombres de photons dans le canaux CCD (16 dans ADM-AEOLUS).

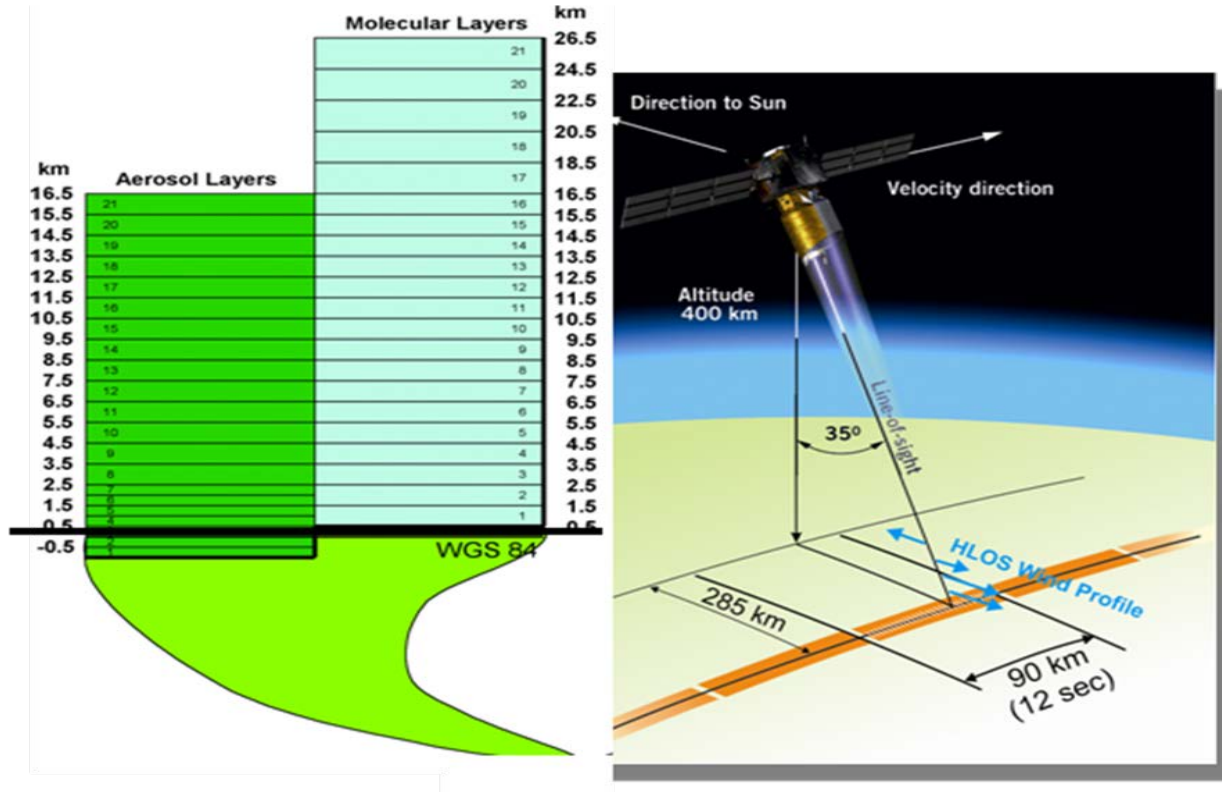


Interféromètre de Fizeau



AEOLUS – Géométrie d'observation

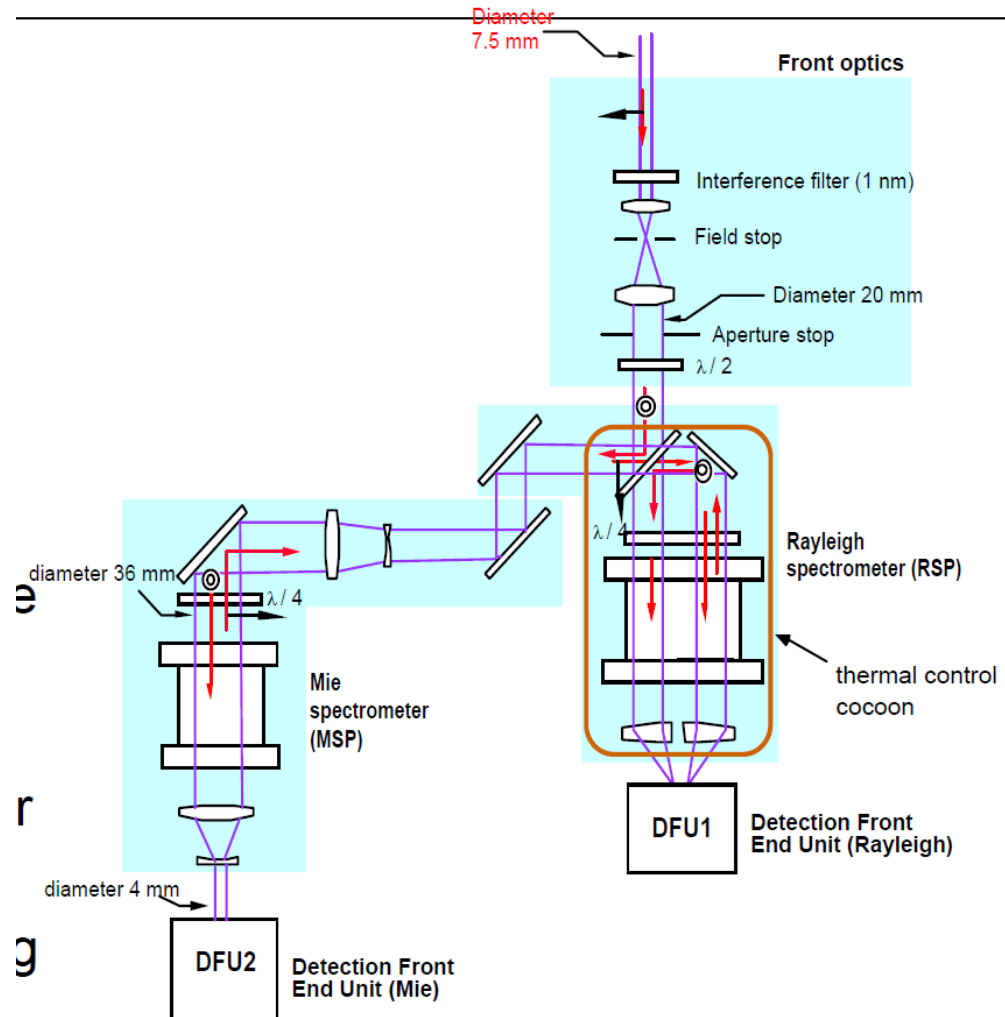
Géométrie de mesure: une seule composante de vent mesurée (zonale).



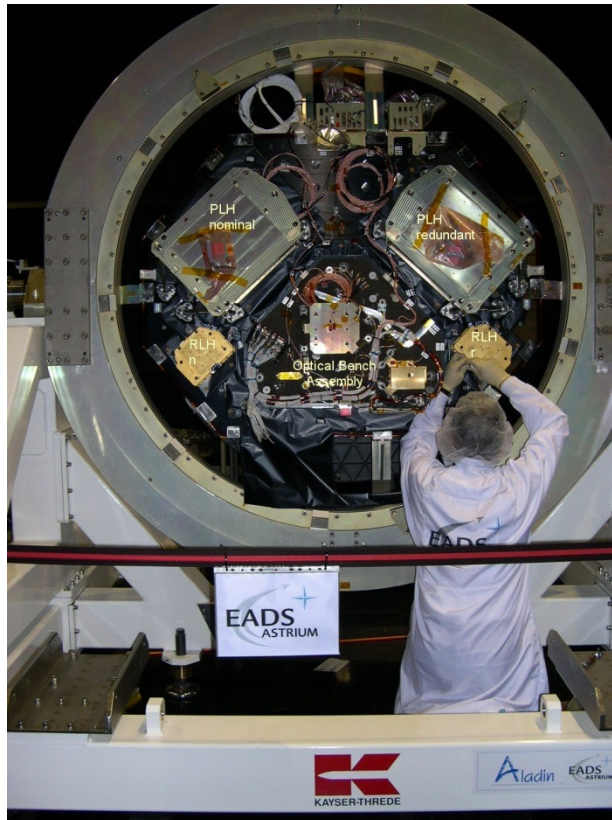
AEOLUS – Les spécifications de mission

		Observational Requirements		
		PBL	Troposph.	Stratosph.
Vertical Domain	[km]	0-2	2-16	16-20
Vertical Resolution	[km]	0.5	1.0	2.0
Horizontal Domain		global		
Number of Profiles	[hour ⁻¹]	100		
Profile Separation	[km]	> 200		
Horizontal Integration Length	[km]	50		
Horizontal Sub-sample Length	[km]	0.7 to 50		
Accuracy (HLOS Component)	[m/s]	1	2	3
Zero-Wind Bias	[m/s]	0.1		
Windspeed Slope Error	[%]	0.5		
Data Reliability	[%]	95		
Data Availability	[hour]	3		
Length of Observational Data Set	[yr]	3		

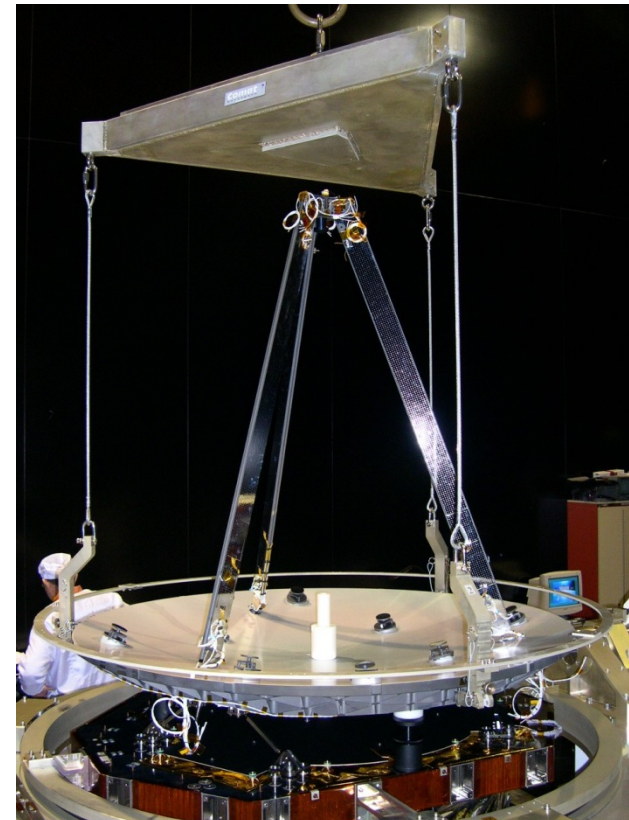
AEOLUS – Le récepteur Mie/Rayleigh



AEOLUS – Le matériel

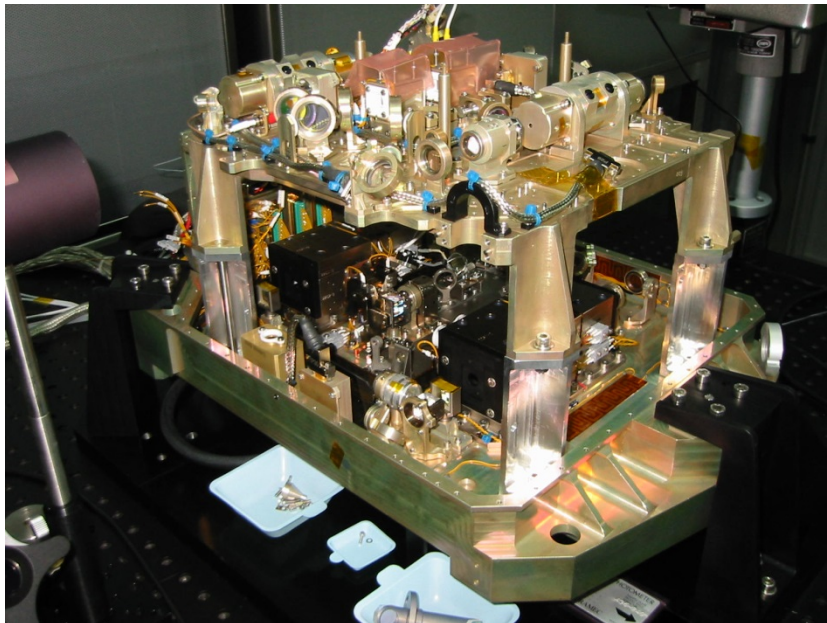


Le banc optique avec les lasers et les interféromètres.

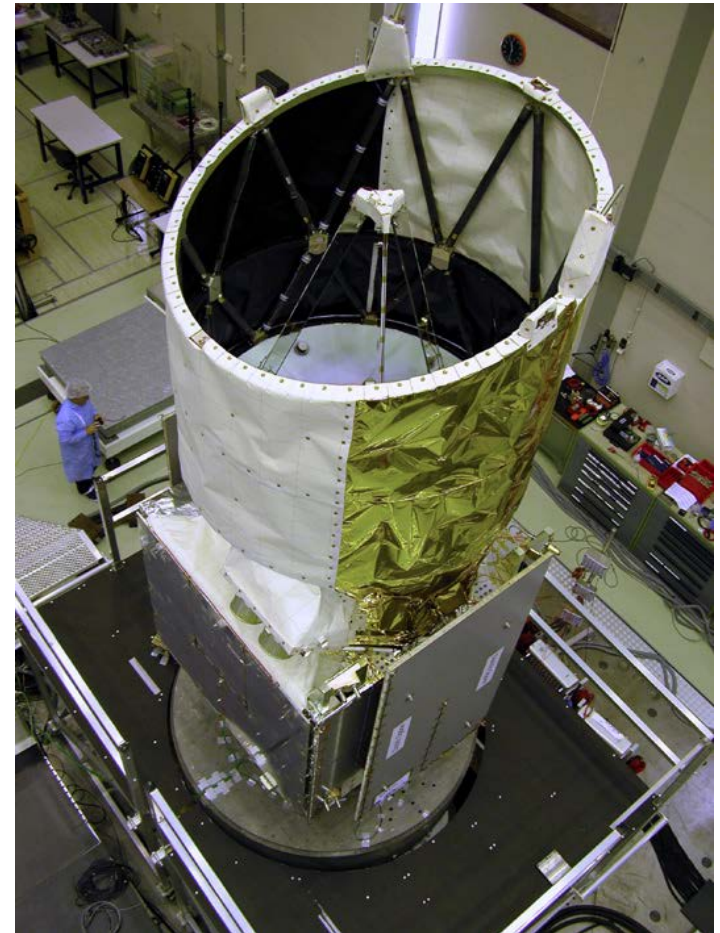


Le télescope de réception ($\text{Ø}=1,50\text{m}$)
en SIC (poids total $\sim 70\text{kg}$)

AEOLUS – Le matériel



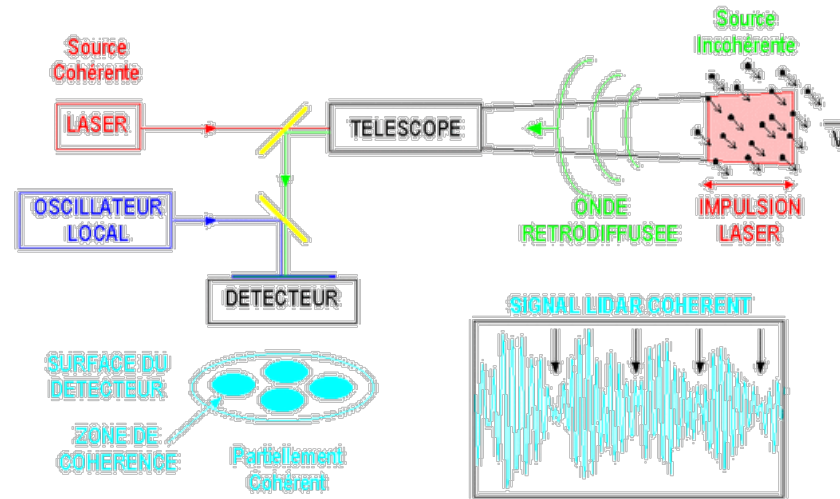
Le laser émetteur





DÉTECTION HÉTÉRODYNE

Rappel du principe général



L'onde en rétrodiffusée est superposée physiquement au faisceau d'un laser continu (Oscillateur Local). Le détecteur produit un courant électrique mesurant l'interférence entre les deux:

$$\begin{aligned}
 i(t) &= K \int_D \|E_r(\vec{x}, t) \exp(2j\pi\nu_r t) + E_{oi}(\vec{x}) \exp(2j\pi\nu_{oi} t)\|^2 d\vec{x} \\
 &= K \int_D \|E_r(\vec{x}, t)\|^2 d\vec{x} + K \int_D \|E_{oi}(\vec{x})\|^2 d\vec{x} + 2K \operatorname{Re} \left\{ \exp(2j\pi(\nu_r - \nu_{oi})t) \int_D E_r(\vec{x}, t) E_{oi}^*(\vec{x}) d\vec{x} \right\} \\
 &= i_r(t) + i_{oi} + 2\gamma \sqrt{i_r(t) i_{oi}} \cos(2\pi(\nu_r - \nu_{oi})t + j\phi)
 \end{aligned}$$

Signal direct
(basse fréquence)

Signal hétérodyne
(fréquence intermédiaire)

γ = rendement hétérodyne

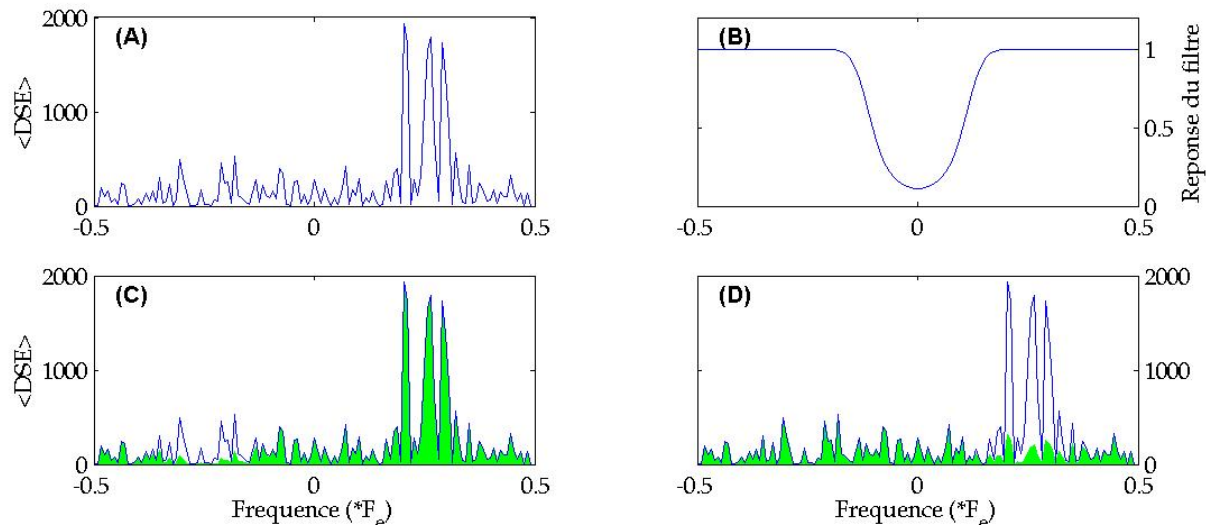
Estimation de la fréquence par filtrage adapté.

- Estimateur.

Les estimateurs utilisés sont de type « filtrage adapté », c'est-à-dire que l'on cherche à trouver la fréquence centrale d'un filtre de gabarit donné qui produit en sortie un maximum ou un minimum de puissance.

$$J(\hat{f}) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \hat{\Phi}(f_k) \Psi(f_k - \hat{f}) \quad \text{où} \quad \hat{\Phi}(f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left| \sum_{m=0}^{M-1} s_n(mT_s) \exp(-2j\pi f m T_s) \right|^2 \quad \text{et} \quad f_k = \frac{kF_s}{M}$$

Gabarit du filtre



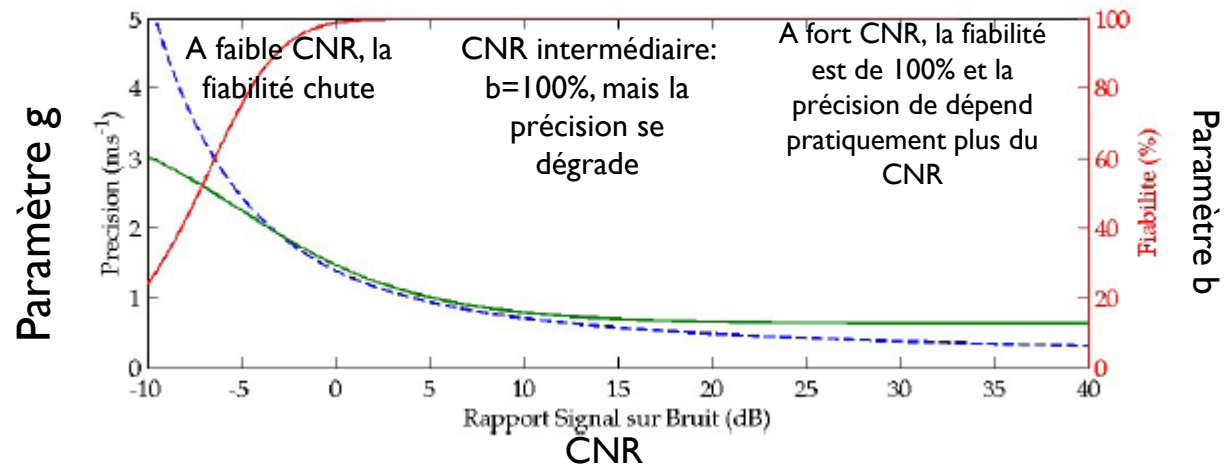
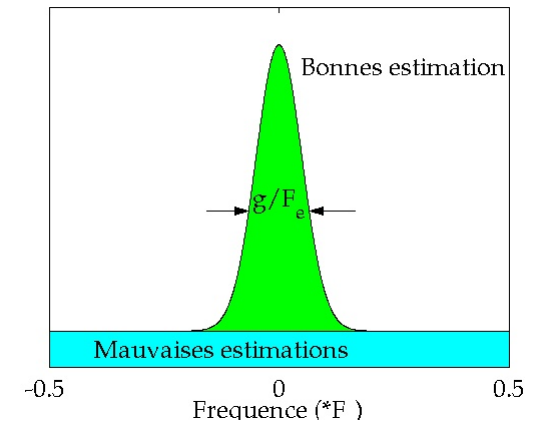
La précision

- Répartition des erreurs

$$prob(\hat{v}) = \frac{b-1}{F_e} + \frac{b}{\sqrt{2\pi}g} \exp\left(-\frac{(\hat{v}-v)^2}{2g^2}\right)$$

Un pic de « bonnes estimations » au-dessus d'un niveau uniforme de « mauvaises estimations ».

Il y a mauvaise estimation quand le filtre adaptable se cale sur un pic spectral de bruit au lieu du pic hétérodyne. La probabilité d'avoir des mauvaises estimations est donc d'autant plus importante que le CNR est faible.



Erreur de mesure

- **Précision**

A fort CNR, la précision de la mesure est de l'ordre de

$$g \approx \frac{\lambda}{2} \frac{w}{\sqrt{mN}}$$

où w est la largeur spectrale du signal (à peu près égale à celle de l'impulsion), m le nombre de tavelure et N est le nombre de signaux « accumulés ».

Donc, quand le CNR est élevé, il ne sert plus à rien d'augmenter la puissance du lidar pour améliorer la précision de mesure car celle-ci ne dépend pratiquement plus du CNR. Si l'on veut améliorer la précision, on peut

- **Affiner la largeur spectrale du signal en augmentant la durée de l'impulsion laser, mais on dégrade alors la résolution spatiale de la mesure...**
- **Augmenter la durée de la fenêtre de mesure (m augmente alors), mais là encore, on dégrade la résolution.**
- **On augmente le nombre N de tirs accumulés, soit en augmentant le temps d'intégration au prix de la résolution temporelle, soit en augmentant la cadence de tir du laser.**

Erreur de mesure

Exemple: prenons le cas du lidar WLS de Léosphère. La durée d'impulsion est de 400ns (FWHM), la longueur d'onde $\lambda=1,5\mu\text{m}$, et la cadence de tir $\text{prf } 10000\text{s}^{-1}$. Pour un temps d'intégration $T=1\text{s}$, on a

$$w = \frac{1}{4\pi} \frac{2\sqrt{2 \ln(2)}}{\tau} = 0,468\text{MHz} \quad N = T \text{ prf} = 10000 \quad m = 1 \Rightarrow g \approx 6 \text{ cm s}^{-1}$$

Autre exemple: cas du lidar aéroporté WIND: durée d'impulsion de $2\mu\text{s}$ (FWHM), longueur d'onde de $10\mu\text{m}$, et cadence de tir de 10Hz . Pour une durée d'intégration $T=0.1\text{s}$,

$$w = \frac{1}{4\pi} \frac{2\sqrt{2 \ln(2)}}{\tau} = 93\text{kHz} \quad N = T \text{ prf} = 1 \quad m = 1 \Rightarrow g \approx 47 \text{ cm s}^{-1}$$

Portée du lidar

- Portée

La portée du lidar est la distance à partir de laquelle le taux de fiabilité b passe en dessous d'un seuil généralement fixé à 95% ou 99%.

Il existe un modèle semi-empirique* permettant de calculer la fiabilité d'une mesure lidar en fonction des paramètres suivants:

- $\Phi = M \text{ CNR}$ où M est le nombre d'échantillons dans la porte de mesure (durée de la porte de mesure divisée par la période d'échantillonnage). Ce nombre représente le nombre de photoélectrons « cohérents » détectés pendant la porte de mesure.
- Le nombre de tavelures temporelles m dans la porte de mesure,
- Le nombre N de signaux accumulés.

La manière dont la fiabilité varie en fonction de ces paramètres est assez compliquée, mais on peut quand même en tirer une règle simple au premier ordre:

La seuil de fiabilité de 95% ou 99% est atteint pour une valeur de $\Phi N^{1/2} m^{-1/2}$ supérieure à un certain seuil Φ_{seuil} .

Pour atteindre ce seuil à une distance donnée

- S'assurer que l'énergie des impulsions laser est suffisante pour que $\Phi \geq \Phi_{\text{seuil}}$ à la distance visée.
- Accumuler suffisamment de tir (au détriment de la résolution temporelle de la mesure),
- Augmenter la taille de la porte de mesure au détriment de la résolution spatiale: le nombre de tavelure augmente, mais Φ également, de sorte que l'on gagne en $m^{+1/2}$...

D'un point de vue énergétique, la manière la plus efficace d'augmenter la portée est d'émettre des impulsions laser de forte énergie... Mais ce n'est pas toujours possible.

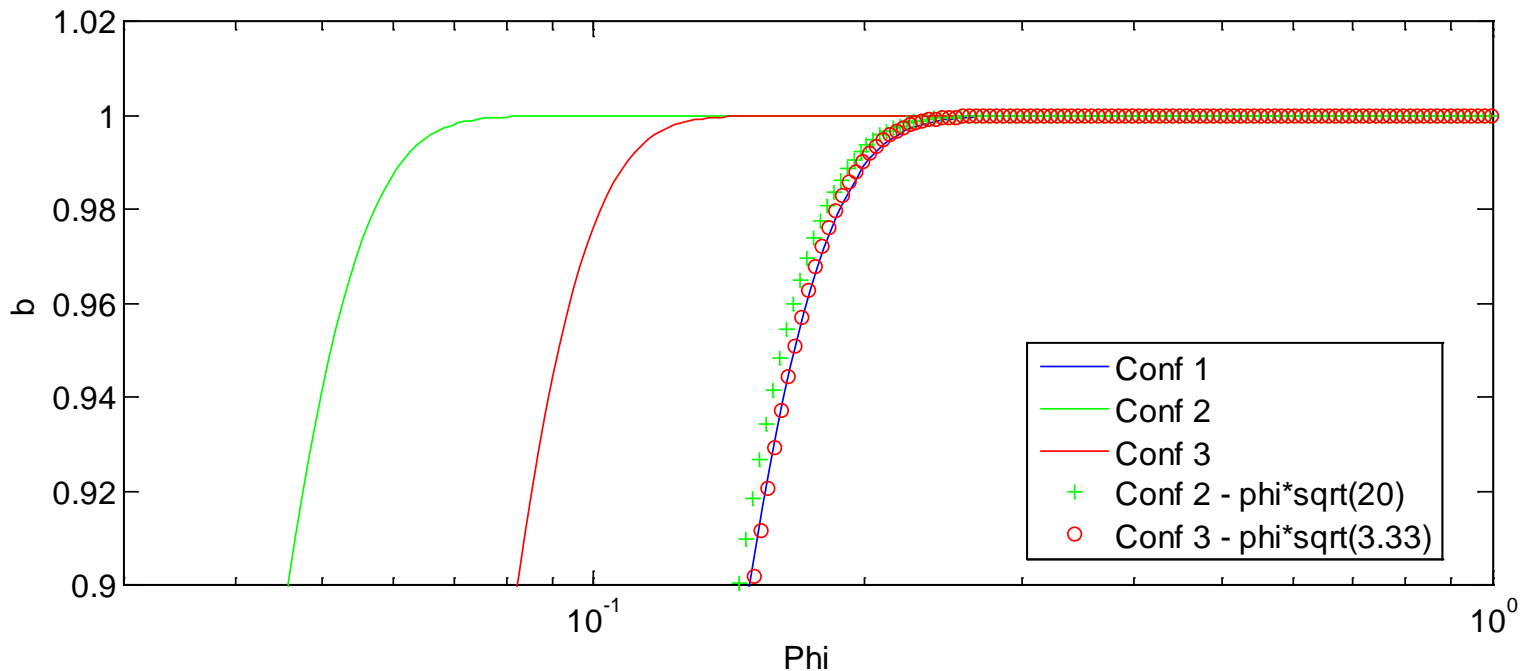
* A. Dabas. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16 :19–28, 1999.

Portée du lidar

3 configurations possibles du lidar WLS de Léosphère.

Pour la conf 2, il faut un Φ_{\min} de 0.06 au minimum pour une fiabilité d'au moins 99%, soit un CNR minimum $\Phi_{\min}/M = 0.0014$, soit -28dB...

	Conf 1	Conf 2	Conf 3
E_0 (mj)	0.1	0.1	0.1
Δr (m)	100	100	400
τ (ns)	400	400	400
prf (s^{-1})	10000	10000	10000
T_{int}	0.1	1	1



Restitution d'un vecteur vent

- *Velocity-Azimuth-Display (VAD)*

La ligne de visée est inclinée d'un angle θ par rapport à la verticale et tourne par autour de celle-ci. Pendant 1 tour, le lidar réalise P mesures de vitesse radiales aux angles azimutaux χ_p . Si le vent est homogène, on a

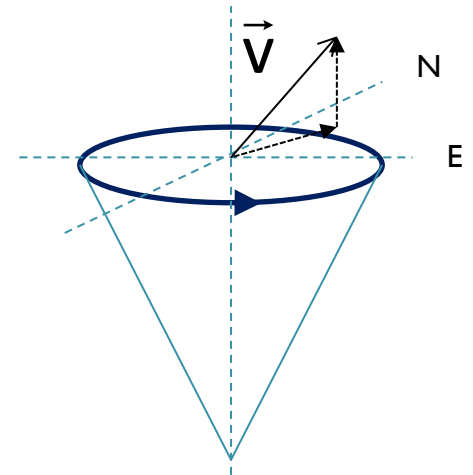
$$\hat{v}_r(p) = u \sin \theta \cos \chi_p + v \sin \theta \sin \chi_k + w \cos \theta + e(p)$$

où $e(p)$ est l'erreur de mesure de la vitesse radiale p et

$$\vec{v} = [u, v, w]$$

Pour retrouver les 3 composantes du vecteur vent, on minimise la fonction

$$J(\vec{v}) = \sum_{p=1}^P [\hat{v}_r(p) - u \sin \theta \cos \chi_p - v \sin \theta \sin \chi_p - w \cos \theta]^2$$

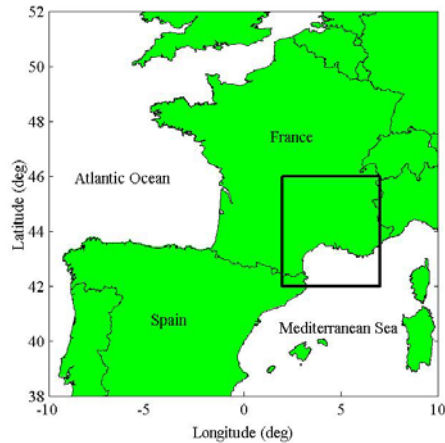


Campagne ESCOMPTE (2001)

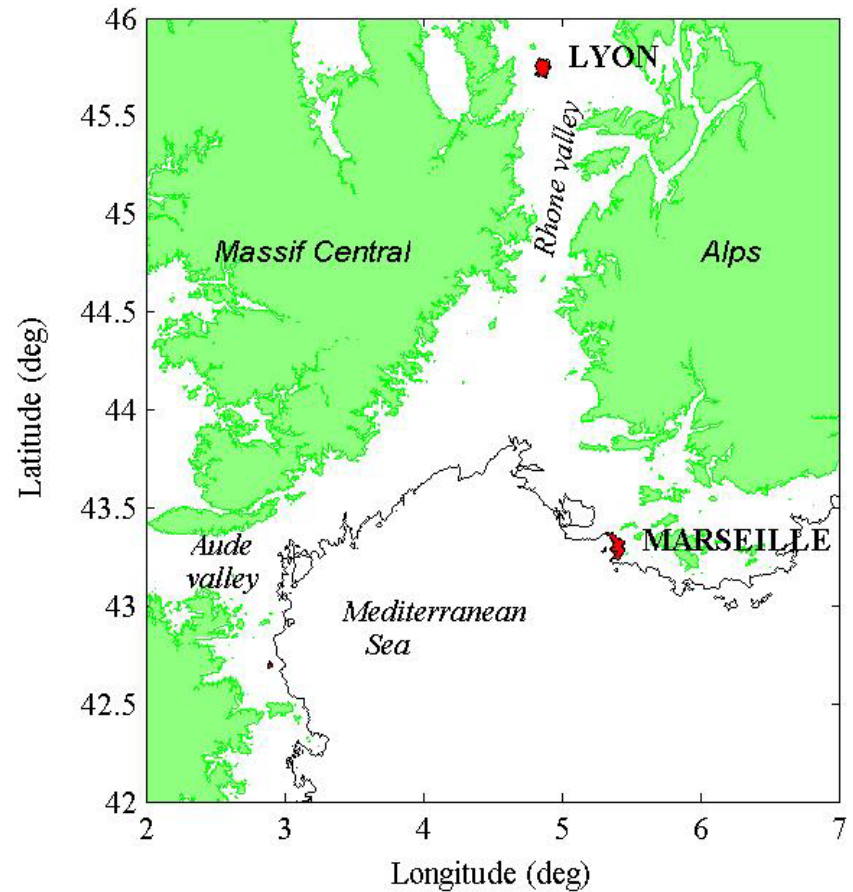


- Développement franco-allemand (CNRS-CNES et DLR)
- Mesure le profil vertical de vent le long de la trajectoire, depuis le sol jusqu'à l'altitude de vol.
- Laser CO₂ émettant dans l'IR thermique (10.6 μ m).
- Embarqué sur le Facon 20 du DLR (alt. max 12km).

ESCOMPTE

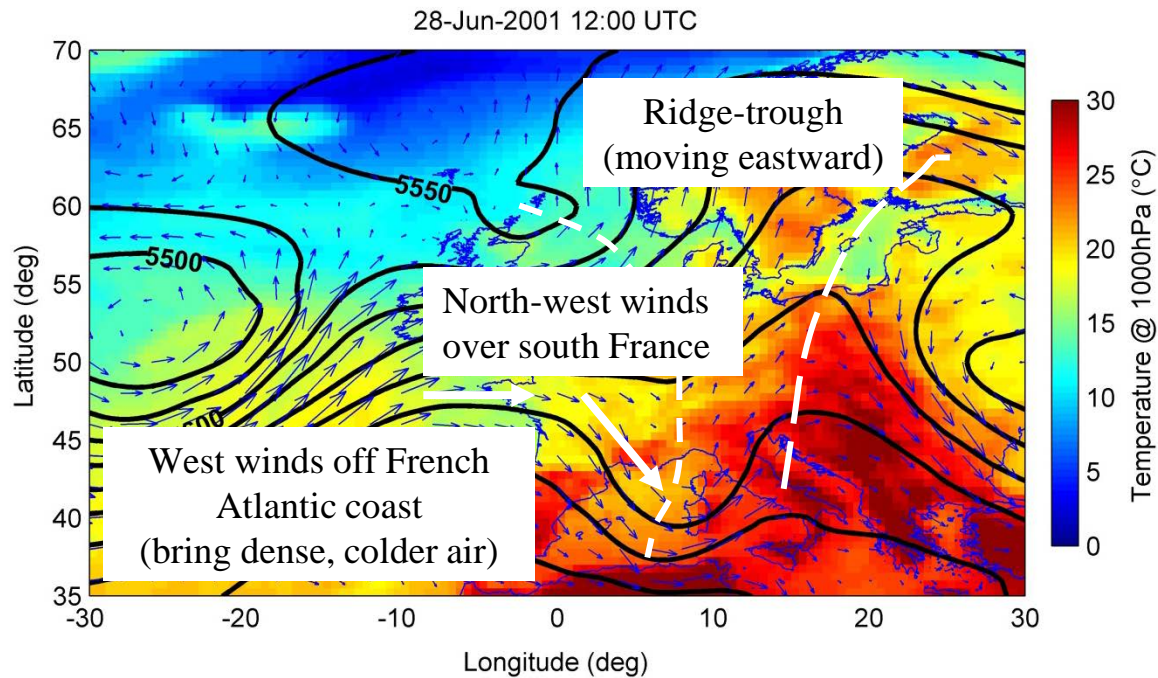


Campagne de mesure s'intéressant à la pollution dans la région de Marseille où la présence de la mer et le relief rendent les écoulements relativement complexes.



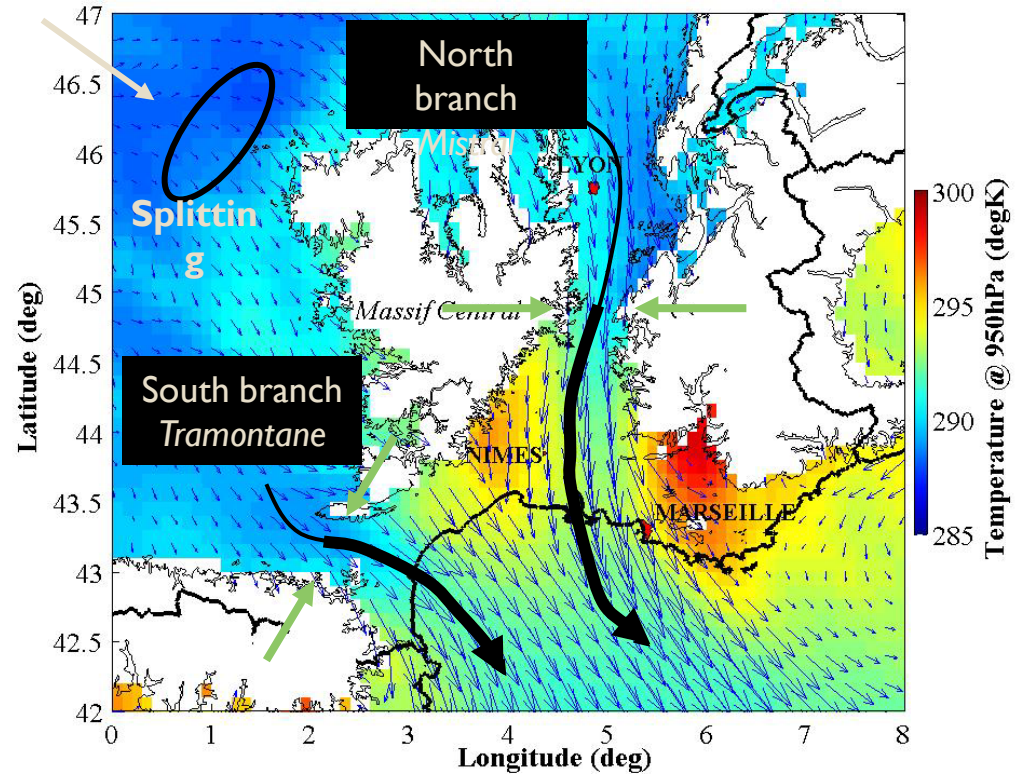
ESCOMPTE

Géopotential à 500hPa et température à 1000hPa analysés par le modèle ARPEGE



ESCOMPTE

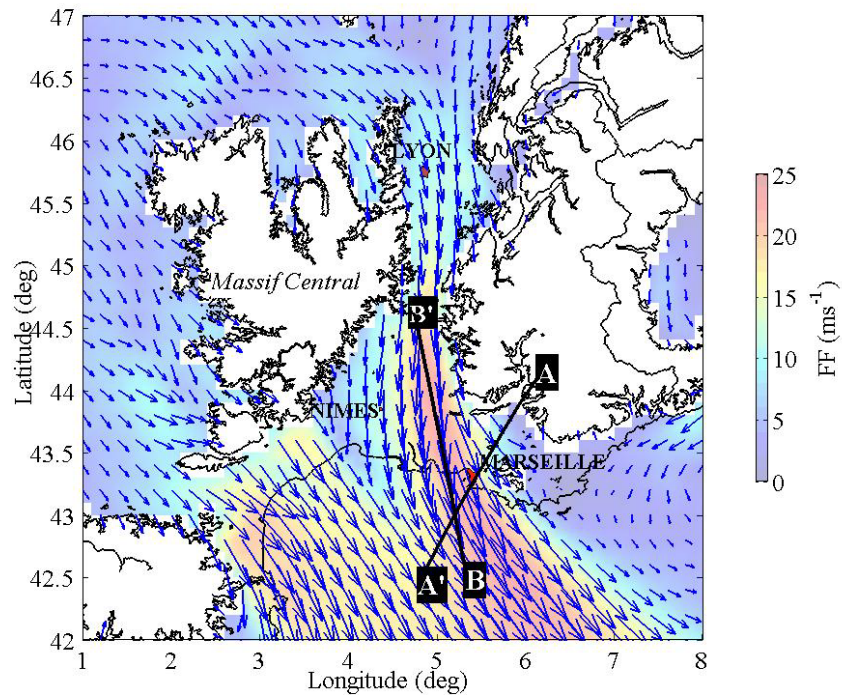
Modèle régional ALADIN



Wind and temperature at 950hPa (~500m asl)

ESCOMPTE

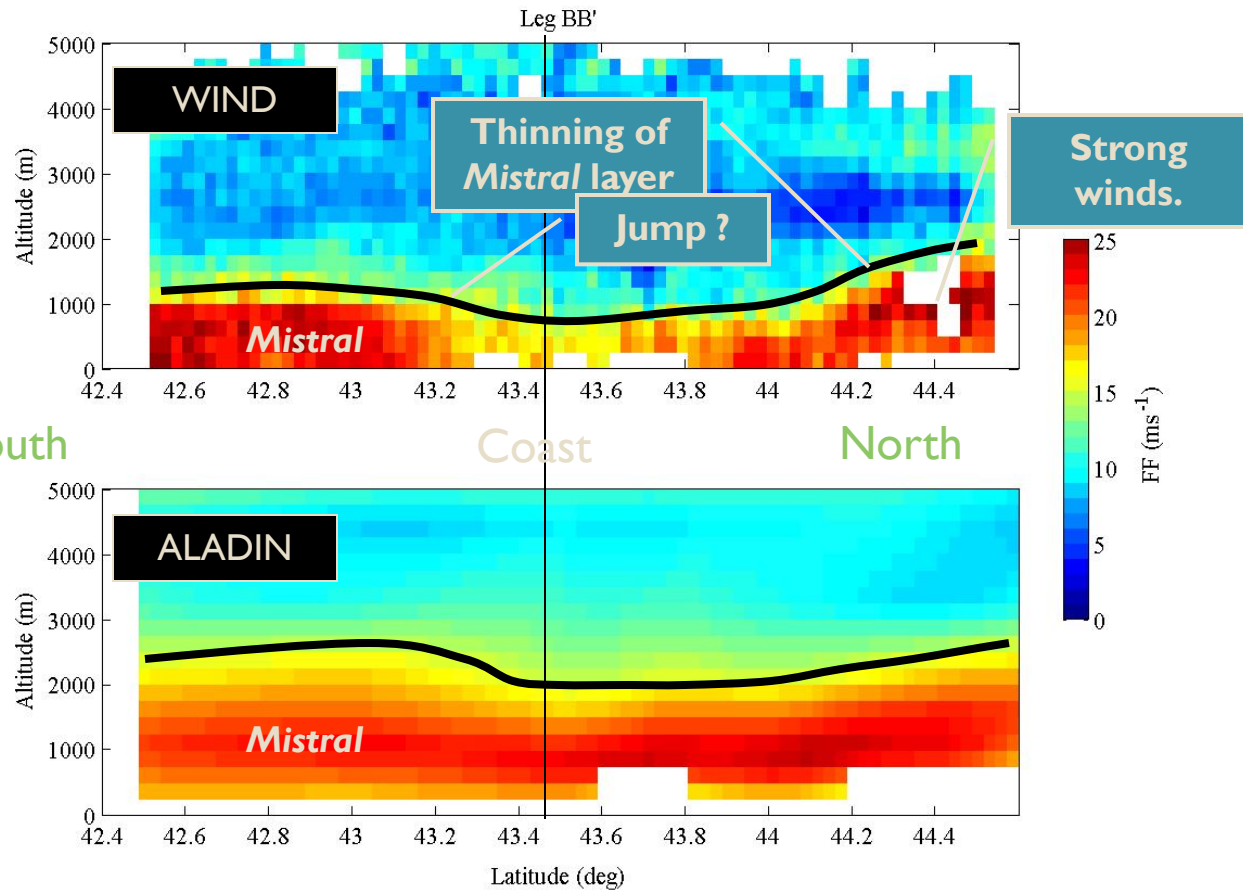
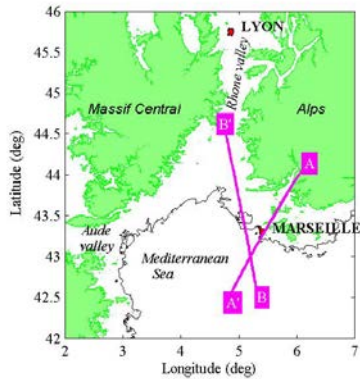
ALADIN – 28 June 2001, 1200UTC



Wind at 950hPa

LEG BB'
Flown S→N
10:16 UTC to 10:43
UTC

ESCOMPTE

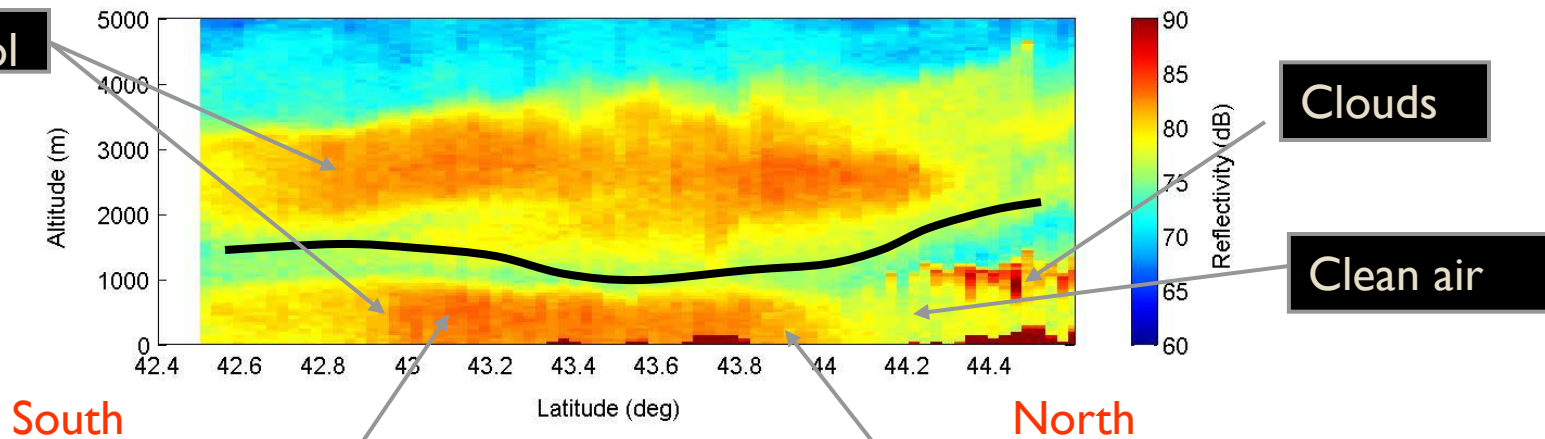


ALADIN (24hr forecast)
 Regional forecast model.
 Init fields: Global analysis
 Init. date : 27 June, 1200 UTC
 Horiz. res. 10km

WIND speed (FF) along leg BB'

ESCOMPTE

Lidar Reflectivity ($z^2P(z)$) in dB units



Pollutants are trapped in *Mistral* layer and transported over the Mediterranean Sea

Pollution trapped in *Mistral* layer and transported off-shore

Pollution emitted by the city of Marseille



TURBULENCE DYNAMIQUE

Turbulence

- Pourquoi mesurer la turbulence

- La turbulence joue un rôle important dans la dynamique de l'atmosphère, en particulier dans la couche limite.
- Elle peut représenter un danger pour l'aviation.
- Elle n'est qu'incomplètement comprise et mal représentée dans les modèles météorologiques.

- Qu'est-ce que la turbulence

- Le concept de turbulence est fondé sur l'idée que les paramètres météorologiques peuvent être décomposés en 2:

$$U(x, y, z, t) = \bar{U}(x, y, z, t) + U'(x, y, z, t)$$



- La composante moyenne est de relativement grande échelle et prédictible.
- La composante turbulente est de petite échelle et peu prédictible...

Turbulence

- Que cherche-t-on à mesurer ?

Type	Quantity	Name
Local (or point) statistics	$\overline{u'^2} \quad \overline{v'^2} \quad \overline{w'^2}$	Wind variance
	$\overline{e'^2} = \frac{1}{2} [\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}]$	Turbulent kinetic energy (TKE)
	$\overline{u'v'} \quad \overline{u'w'} \quad \overline{v'w'}$	Momentum fluxes
Time and/or space statistics	$D_{i,j}(\vec{r}, \vec{s}) = \overline{\Delta u'_i \Delta u'_j}$ $\Delta u'_i = u'_i(\vec{r} + \vec{s}) - u'_i(\vec{r})$	Structure function
	$F_{i,j}(\vec{k})$ or ε, C_v^2 and L_0	Spectrum

$$u_1 = u \quad u_2 = v \quad u_3 = w$$

Turbulence

- **Modèle de Kolmogorov**

Si l'on fait l'hypothèse que la turbulence est localement homogène et localement isotrope (modèle de Kolmogorov), on s'attend à ce que les fonctions de structures et les spectres des fluctuations turbulentes du vent soient de la forme

$$D_{i,j}(\vec{r}, \vec{s}) = [D_{LL}(s) - D_{NN}(s)] \frac{s_i s_j}{s^2} + D_{NN}(s) \delta_{i,j}$$

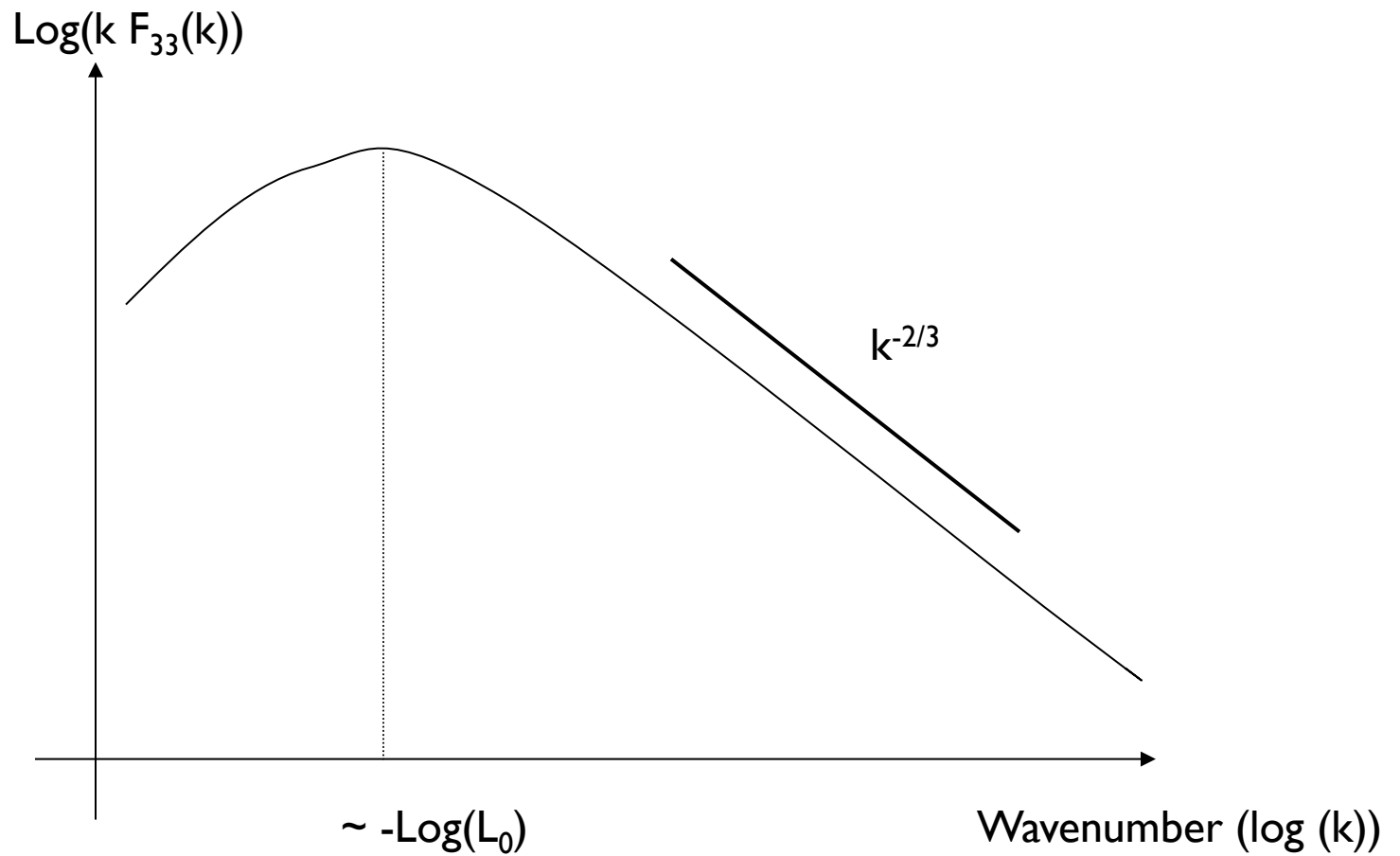
$$F_{i,j}(\vec{k}) = [F_{LL}(k) - F_{NN}(k)] \frac{k_i k_j}{k^2} + F_{NN}(k) \delta_{i,j}$$

Avec

$$\begin{aligned} D_{LL}(s) &= C_v^2 s^{2/3} & D_{NN}(s) &= \frac{4}{3} C_v^2 s^{2/3} \\ F_{LL}(k) &\propto \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} & F_{NN}(k) &\propto \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} \end{aligned}$$

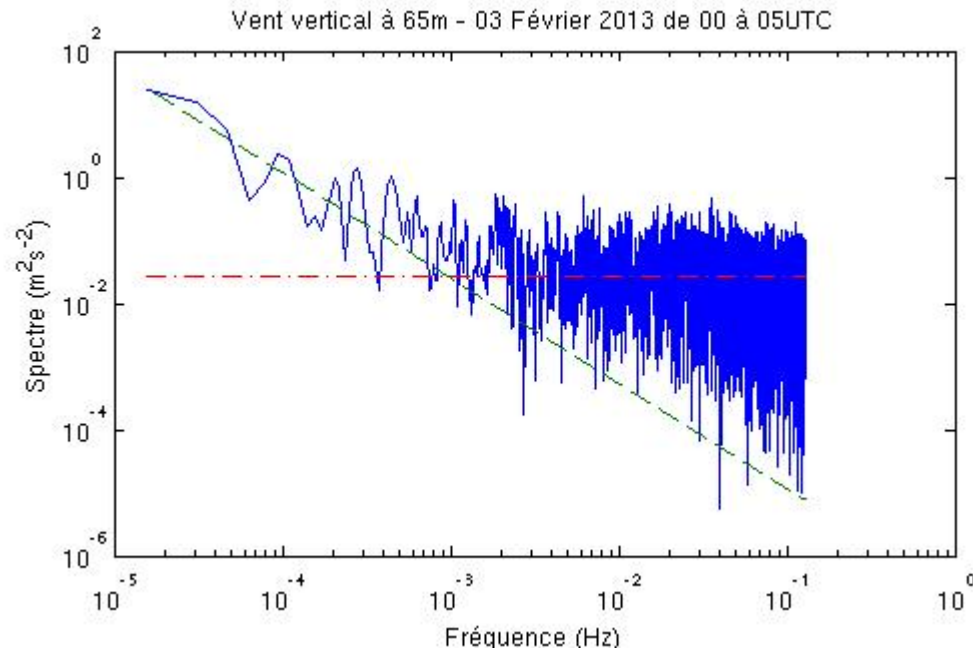
Il en ressort que est caractérisée par le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulent ε (ou de manière équivalente le paramètre de structure C_v^2), mais aussi la taille L_0 des structures turbulentes les plus grandes.

Turbulence



Exemple

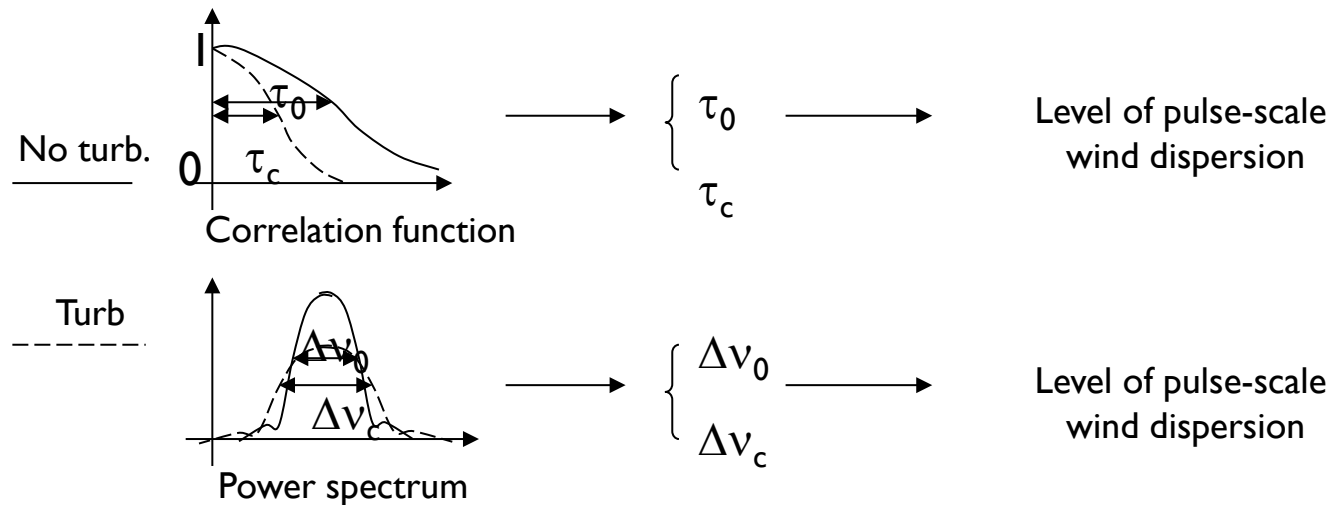
Spectre des vitesses verticales mesurées par un WLS7 v2 de LEOSPHERE
La pente en $-5/3$ est bien observé jusqu'à ce que la puissance du bruit (blanc) domine.



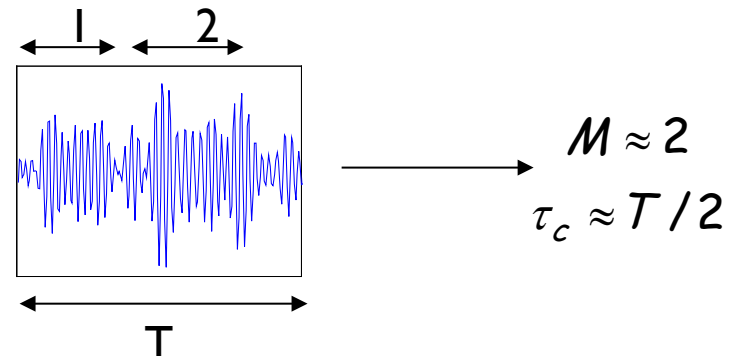
Restitution de paramètres turbulents

- A l'échelle de l'impulsion (élargissement de spectre)

- L'idée est de mesurer la largeur spectrale du signal (ou de manière équivalente la durée de corrélation du signal) et de relier celle-ci à la largeur spectrale de l'impulsion et à la force de la turbulence.



- Exemple: mesure la durée de corrélation par la mesure du nombre de tavelures temporelles dans une porte de mesure.



Restitution de paramètres turbulents

- **Mesure du spectre des fluctuations spatiales de la vitesse radiale**
 - Dans ce cas, on relie la mesure de la variabilité spatiale de la vitesse radiale et on la relie aux paramètres de turbulence.
 - Exemple: mesure du spectre de la vitesse radiale le long de la ligne de visée lidar.
 - Dans ce cas, il faut prendre en compte le fait que la mesure lidar n'est pas ponctuelle mais est une moyenne spatiale. D'après Frehlich, JAOT, **18**, 1628, 2002:

$$m_{\text{wgt}}(R, H) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{H-\Delta h/2}^{H+\Delta h/2} u(r, h) W(R-r) dh dr$$

Un bon exemple de ce que l'on peut faire se trouve dans Frehlich *et al.* JAMC, **45**, 821, 2006.