

Applications aéronautiques des lidars vent  
Applications éoliens des lidars vent

**A. Dolfi-Bouteyre , C. Besson, B. Augère, M. Valla**



retour sur innovation

# Applications aéronautiques des lidars vent

## Applications éoliens des lidars vent

### Applications aéronautiques des lidars vent

#### Senseurs de navigation

- mesure de vitesse air 1 point 3 composantes (
  - Mie multiparticules
  - Mie monoparticules
  - Rayleigh

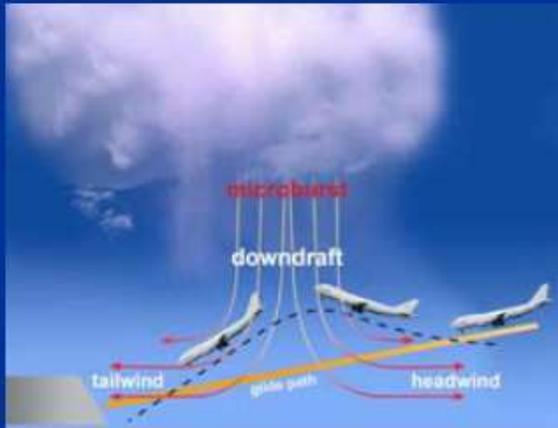
#### Senseurs d'alertes

- Au sol
  - Turbulence de sillage / wake vortex
  - Cisaillements / rafale ( « wind hazard »)
- Embarqués
  - Turbulence de sillage /wake vortex
  - Cisaillements / rafale / Turbulence en air clair

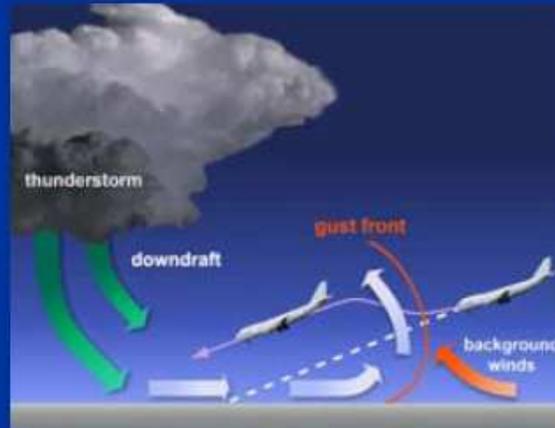
### Applications éoliens des lidars vent

- Caractérisation de site
- Optimisation des turbines

# Menaces liées au champ de vent en aéronautique



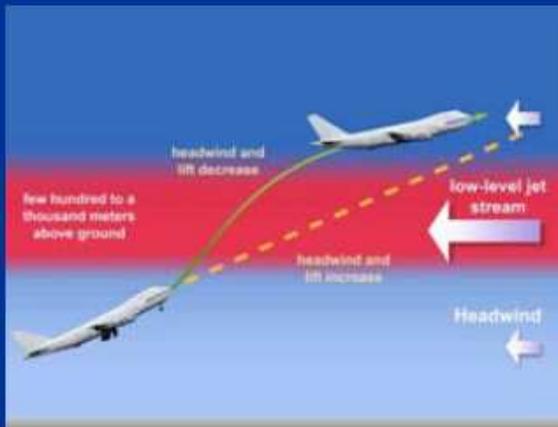
**Microburst Wind Shear**



**Gust Front Shear**



**Sea Breeze Shear**



**Low-Level Jets and Other Vertical Shear**



**Turbulence**



**Terrain-Induced Shear and Turbulence**

# Applications aéronautiques des lidars vent

## Applications éoliens des lidars vent

### Applications aéronautiques des lidars vent

#### Senseurs de navigation

- **mesure de vitesse air 1 point 3 composantes**
  - Mie multiparticules
  - Mie monoparticules
  - Rayleigh

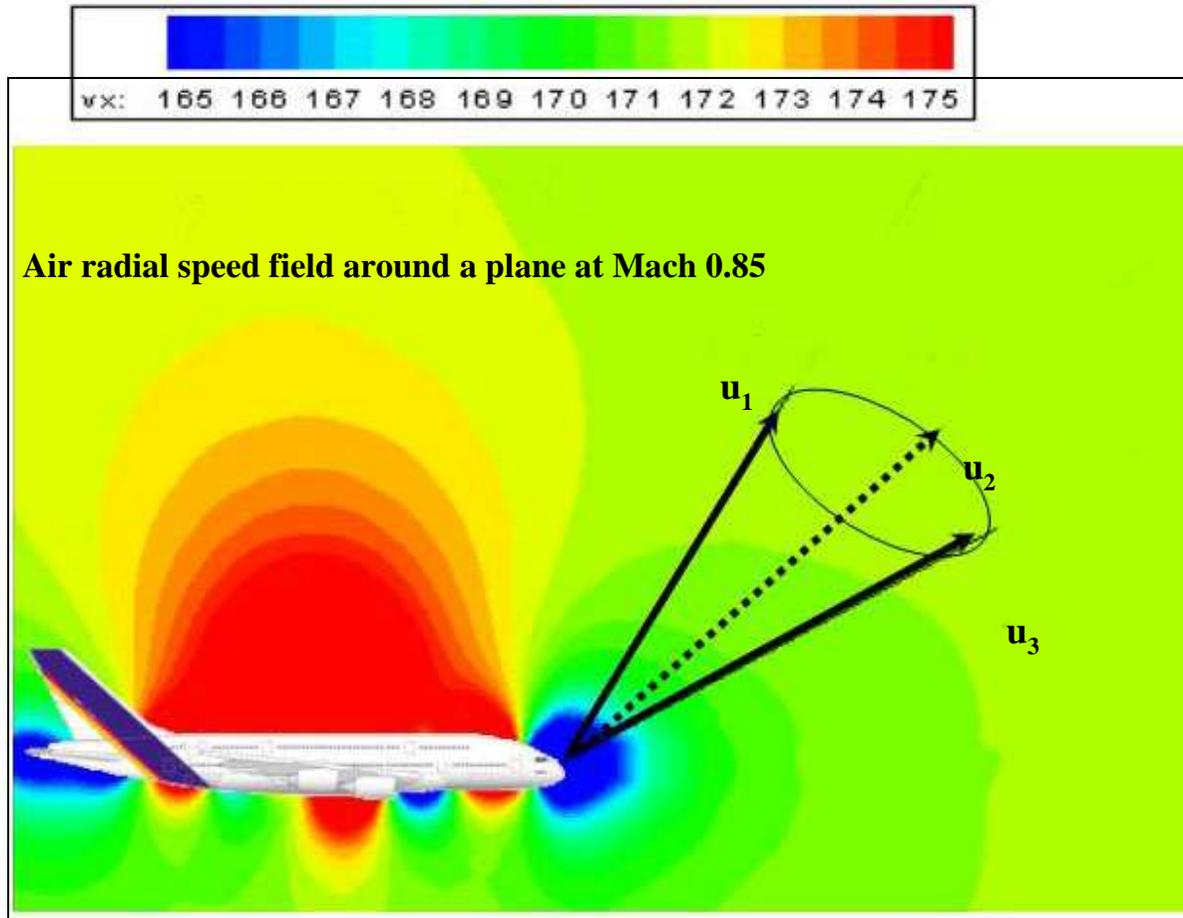
#### Senseurs d'alertes

- **Au sol**
  - Turbulence de sillage / wake vortex
  - Cisaillements / rafales
- **Embarqués**
  - Turbulence de sillage /wake vortex
  - Cisaillements / Turbulence en air clair

### Applications éoliens des lidars vent

- **Caracterisation de site**
- **Optimisation des turbines**

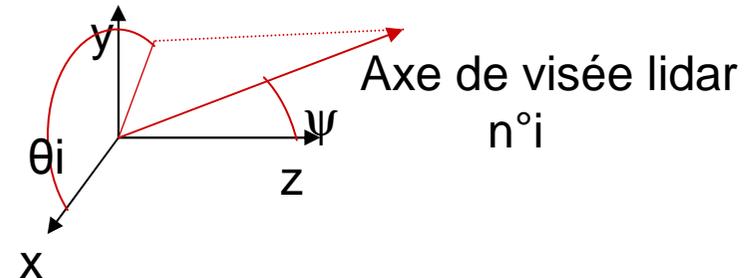
# Principe de l'anémométrie laser



Source : J-L Hantrais-Gervois, Aerodynamics Department, ONERA

Mesure à 50 m dans un flux non perturbé  
Ou mesure à quelques mètres et on corrige

# Principe de l'anémométrie laser



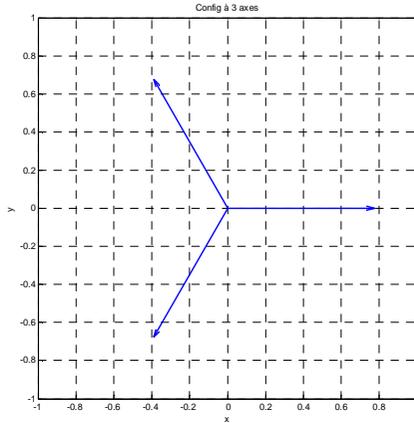
- $$V_{ri} = \cos \theta_i \cdot \sin \psi \cdot V_x + \sin \theta_i \cdot \sin \psi \cdot V_y + \cos \psi \cdot V_z$$

$$V_{ri} = M_i \cdot V$$

$\psi_i$  ouverture du cone  
 $M_i$  Matrice de transfert
- $$V = (M_i^T \cdot M_i)^{-1} \cdot M_i^T \cdot V_{ri}$$

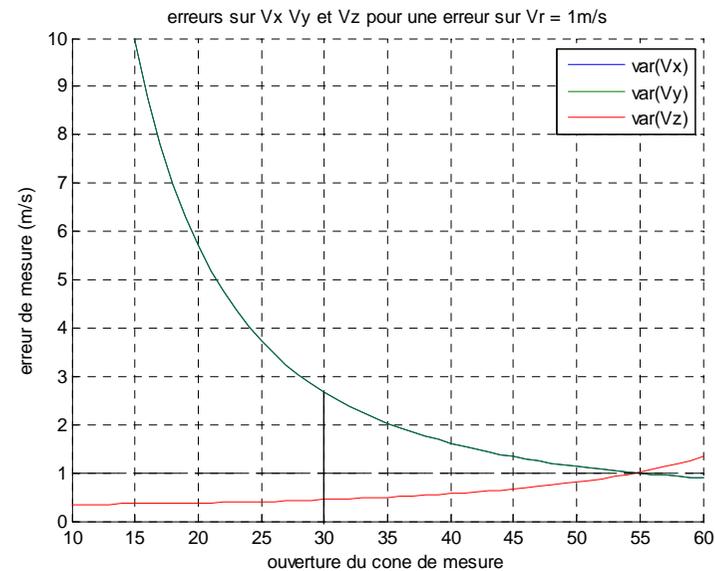
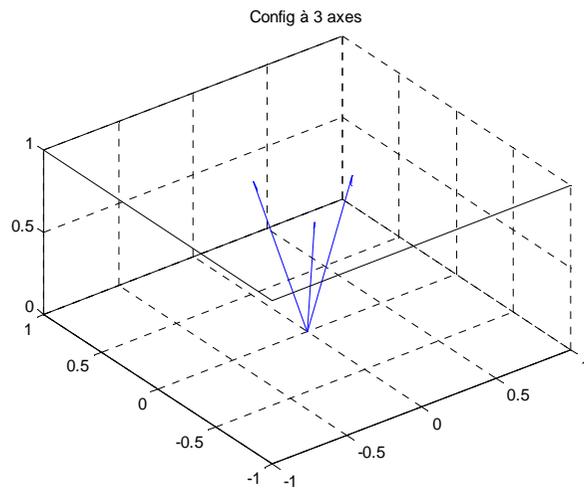
alors  $\text{var}(V) = ((M_i^T \cdot M_i)^{-1} \cdot M_i^T)^2 \cdot \text{var}(V_{ri})$
- 3 inconnues  $\rightarrow$  3 axes de visée lidar minimum ( $i \geq 3$ )

# Principe de l'anémométrie laser : Erreur de mesure en fonction du nombre d'axe de mesure



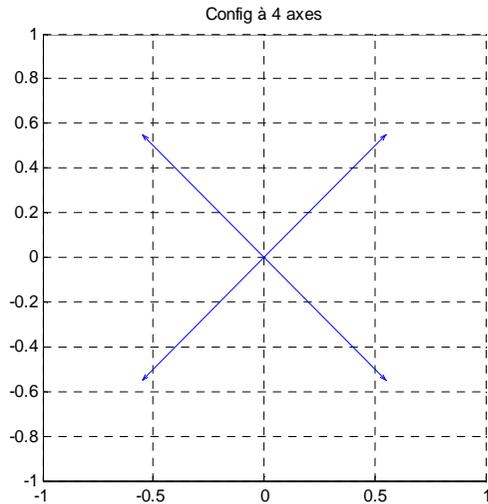
3 axes :  $\theta = (0, 2\pi/3, 4\pi/3)$

$$\begin{pmatrix} Vr1 \\ Vr2 \\ Vr3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \psi & 0 & \cos \psi \\ -\frac{1}{2} \sin \psi & \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \psi & \cos \psi \\ -\frac{1}{2} \sin \psi & -\frac{\sqrt{3}}{2} \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} vx \\ vy \\ vz \end{pmatrix}$$



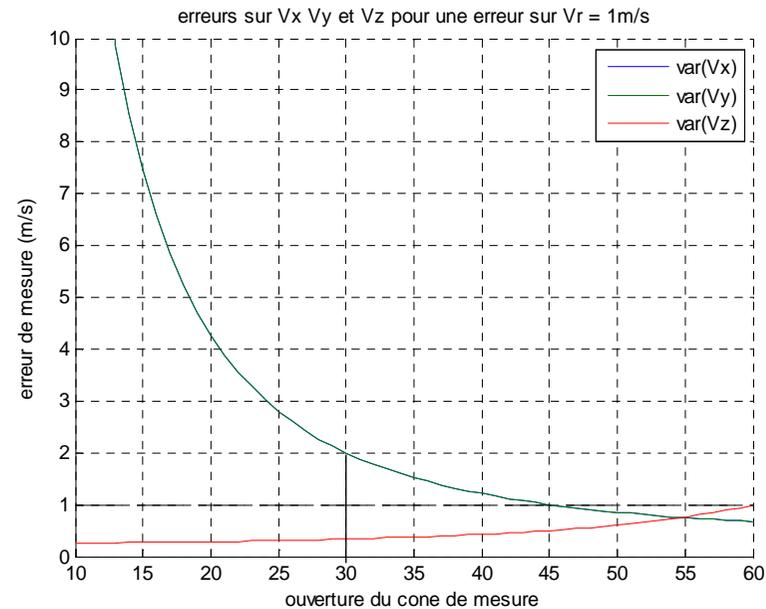
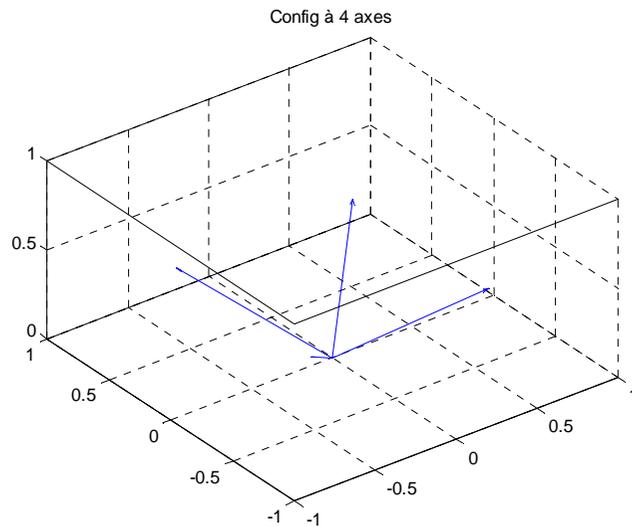
compromis homogénéité de la zone de mesure / précision de mesure

# Principe de l'anémométrie laser : Erreur de mesure en fonction du nombre d'axe de mesure



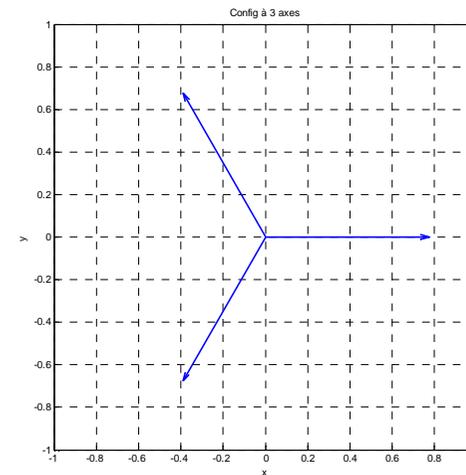
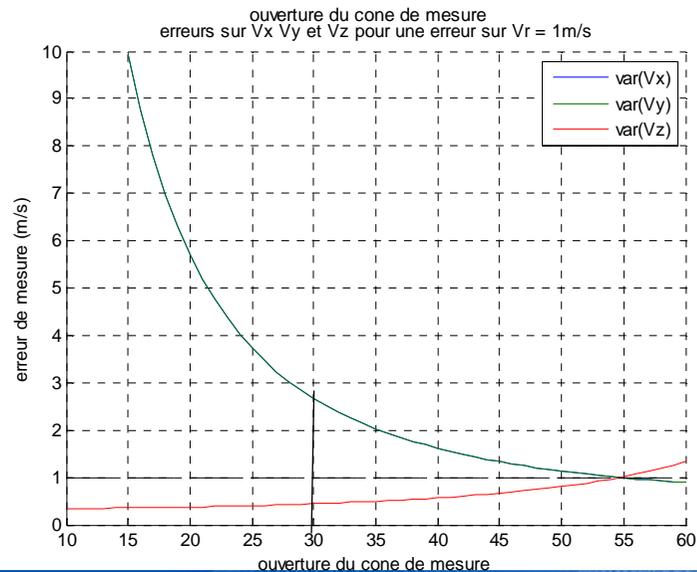
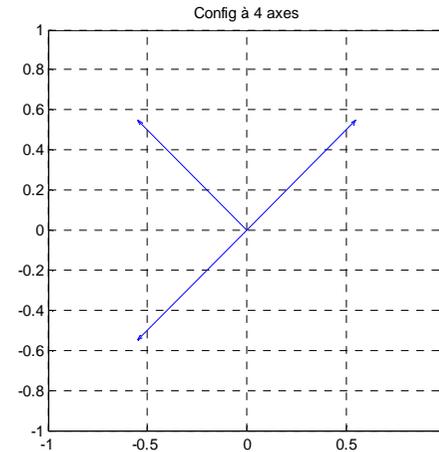
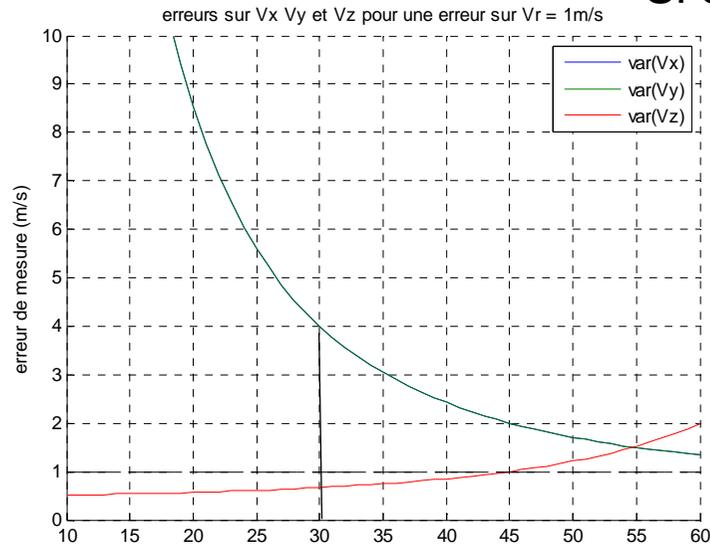
4 axes :  $\theta = (\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4)$

$$\begin{pmatrix} Vr1 \\ Vr2 \\ Vr3 \\ Vr4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \psi & \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \psi & \cos \psi \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \sin \psi & \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \psi & \cos \psi \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \sin \psi & -\frac{1}{\sqrt{2}} \sin \psi & \cos \psi \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \sin \psi & \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} vx \\ vy \\ vz \end{pmatrix}$$



# Principe de l'anémométrie laser : Erreur de mesure en fonction du nombre d'axe de mesure

Si on perd un axe : 3 axes sur 4



# lidar anemo multiparticules Alev (Thales)

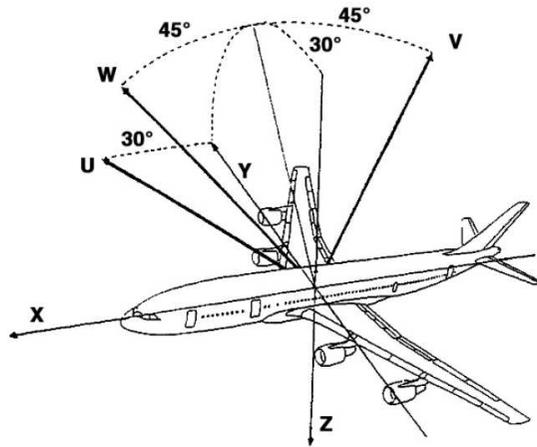


Figure 7-2: Installation of ALEV 3 system in the Airbus A340.

Table 7-1: Characteristics of the ALEV 3 system.

Factor	Detail
anemometer type	reference-beam laser anemometer
laser	CO <sub>2</sub> gas laser
wavelength	10.6 μm
operating mode	continuous wave (cw)
power	5 Watts
detection	coherent mode using a HgCdTe detector cooled to 77 K
detector cooling	Thompson cooling, expansion of pressurized nitrogen gas
measurement	vector true airspeed (TAS) angle of attack (AoA), and angle of sideslip (AoS)
focal distance	between 50 and 100 m
velocity range	10 m/s to 400 m/s
altitude range	up to FL 250 without signal loss, at FL 250 to FL 350 signal is occasionally lost because of insufficient atmospheric backscatter
TAS uncertainty	0.25 m/s (including system and installation uncertainties)
update rate	2, 4, or 8 measurements per second (measurements in the three directions are taken intermittently)
format	ARINC 429
physical characteristics	
scanning	scanning mirror
size (optical unit)	0.75 x 0.5 x 0.75 m
weight (optical unit)	70 kg
developed by:	Crouzet, Sextant, Thales

Source : “optical air flow measurement” (OTAN)

## ORIENTATIONS TECHNOLOGIQUES :

### TECHNOLOGIE 1.5 $\mu\text{m}$

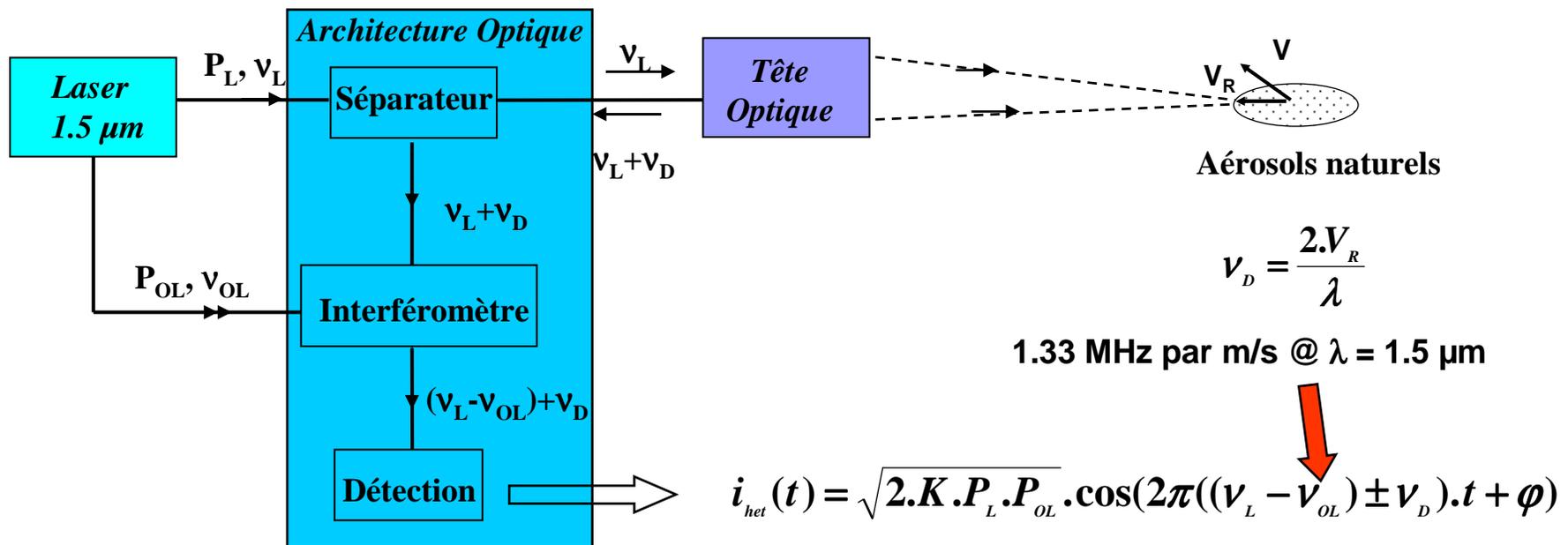
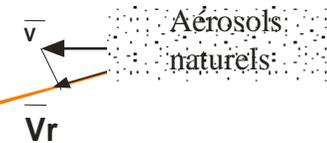
#### **SOURCE : Laser fibré Erbium**

- très bonnes qualités spectrale et spatiale
- sécurité oculaire
- bonne transmission atmosphérique
- compacité et fiabilité
- utilisation de composants fibrés

#### **ARCHITECTURE OPTIQUE FIBREE :**

- composants fibrés performants et bas coût
- facilité d'utilisation et de réglage
- compacité et fiabilité

# Anémométrie laser 1.5 μm aéroportée



## Anémométrie laser 1.5 $\mu\text{m}$ aéroportée

**DALHEC** : collaboration Onera / Thales Avionic

Realiser une sonde anémométrique 1.5  $\mu\text{m}$  embarqué sur hélicoptère

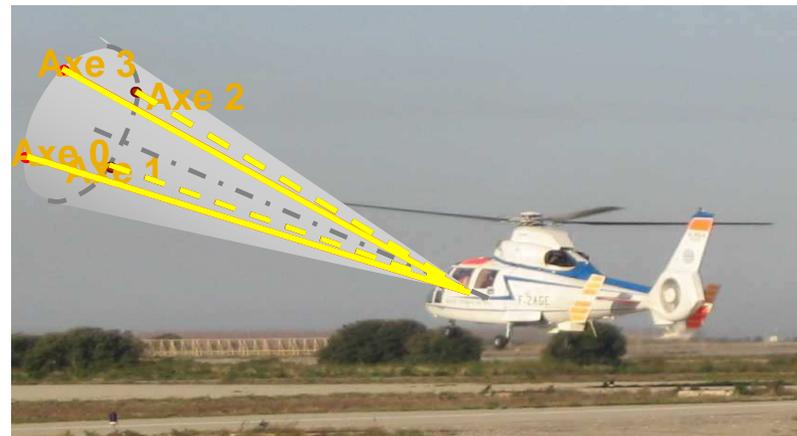
Avantage par rapport aux sondes pneumatiques classiques :

⇒ Vitesse air absolue (référence primaire)

⇒ Très bonne précision dans tout le domaine de vol

⇒ Technologie 1.5 $\mu\text{m}$  compacte, fiable et à sécurité oculaire

⇒ Sonde non intrusive

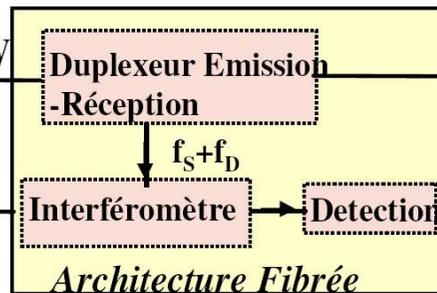
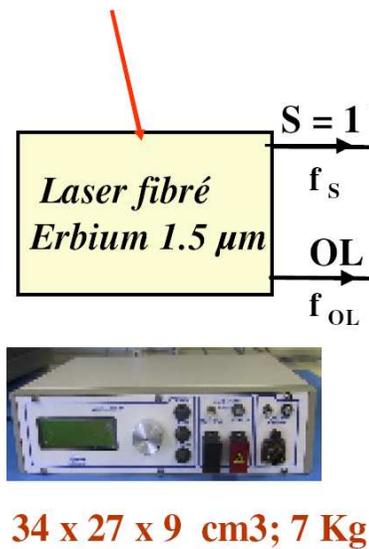


Sondes pitot : erreur 2 m/s et perturbé par le rotor à faible vitesse

# Anémométrie laser 1.5 μm aéroportée lidar DALHEC

## SYSTEME OPTIQUE DALHEC

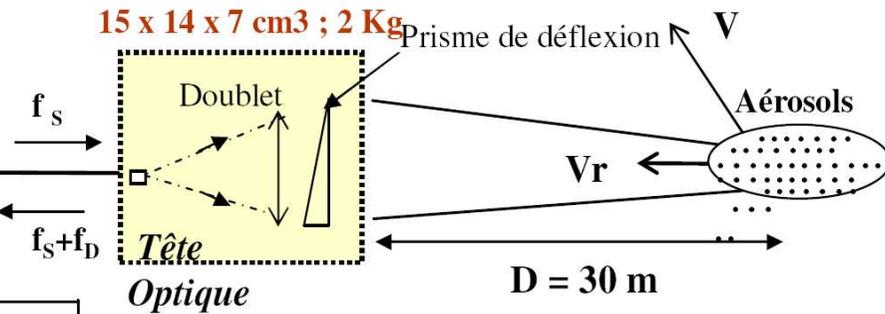
Laser à fibre maintien de polarisation  
PI=1W



Architecture fibrée monostatique,  
Détection équilibrée



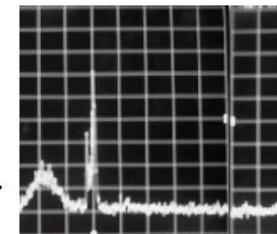
Diamètre doublet : 30 m  
Prisme en Silicium



$$(f_s - f_{OL}) \pm f_D$$

$$f_D = \frac{2Vr}{\lambda}$$

Traitement  
du Signal



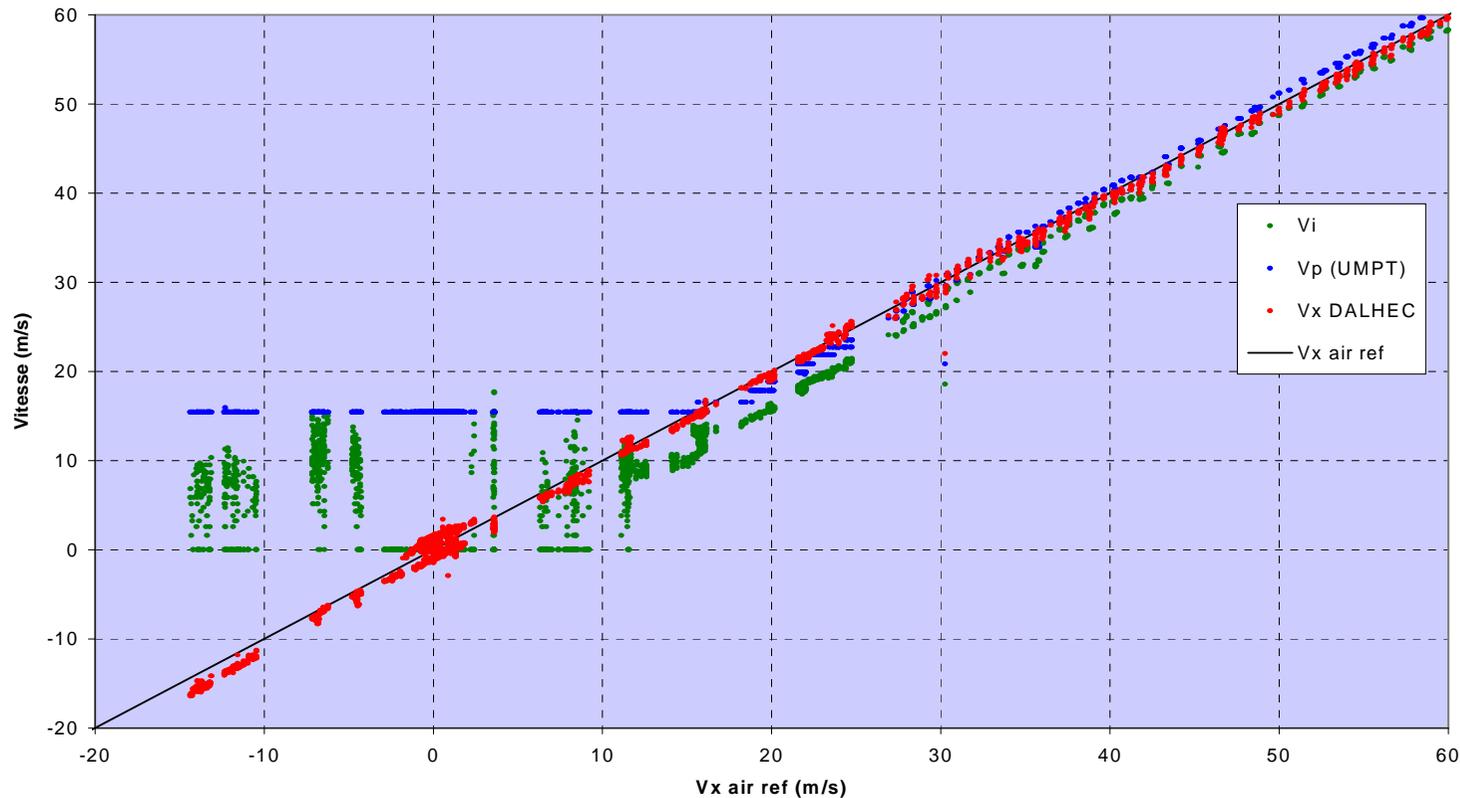
Signal Doppler :  $Vr = 1.4\text{ m/s}$   
1 MHz/carreau ; 0.7 mV/carreau

# Anémométrie laser 1.5 $\mu\text{m}$ aéroportée DALHEC Sensor: Flight tests on DAUPHIN (CEV Istres)



# DALHEC Sensor: Flight measurements

## • Comparison between Dalhec and Pitot estimations



- ➔ Par rapport aux sondes classiques ( $V_i$ ), DALHEC mesure des vitesses ( $V_x$ ) conformes à la vitesse vraie avec une très bonne précision, même aux basses vitesses
- ➔ Validation de la mesure jusqu'à des altitudes de 3000 m

# lidar anemo multiparticules Dalev (Thales)



Laser 1.5  $\mu\text{m}$  continu 5 W

Source : presentation Alain Verbeke Wakenet3 mars 2010

# Applications aéronautiques des lidars vent

## Applications éoliens des lidars vent

### Applications aéronautiques des lidars vent

#### Senseurs de navigation

- **mesure de vitesse air 1 point 3 composantes**
  - Mie multiparticules
  - **Mie monoparticules**
  - Rayleigh

#### Senseurs d'alertes

- **Au sol**
  - Turbulence de sillage / wake vortex
  - Cisaillements ( « wind hazard » )
- **Embarqués**
  - Turbulence de sillage /wake vortex
  - Cisaillements / Turbulence en air clair

### Applications éoliens des lidars vent

- **Caracterisation de site**
- **Optimisation des turbines**

# Lidar Anemometre monoparticule

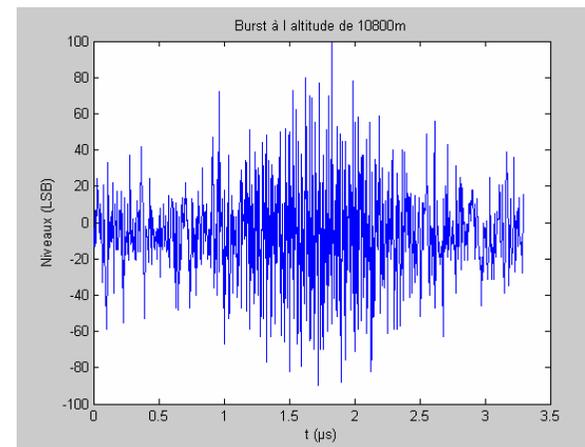
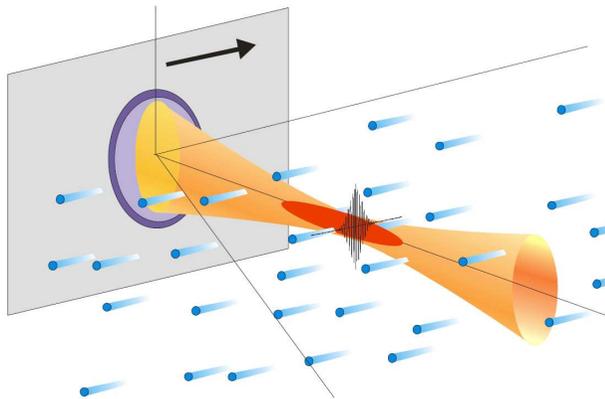
A haute altitude , la concentration en aerosol peut devenir très faible

→ Lidar monoparticule :

mesure avec un seul aerosol dans le volume de mesure

Avantage : pas de bruit de speckle .

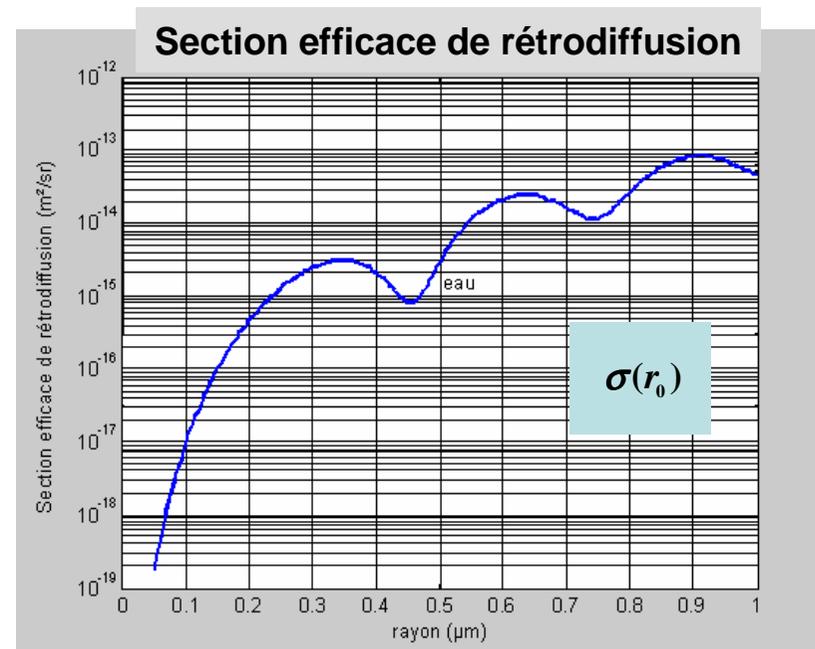
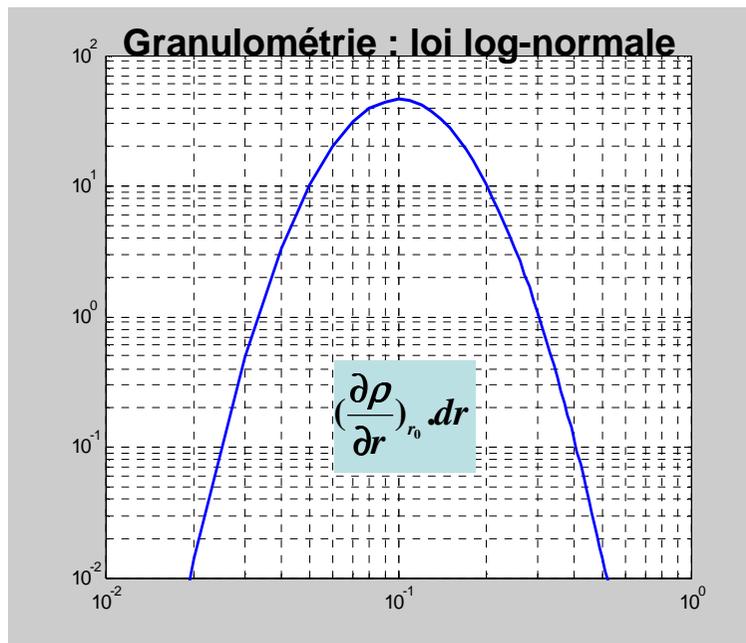
Statistique de mesure liée à la statistique de repartition des particules



# Lidar Anemometre monoparticule

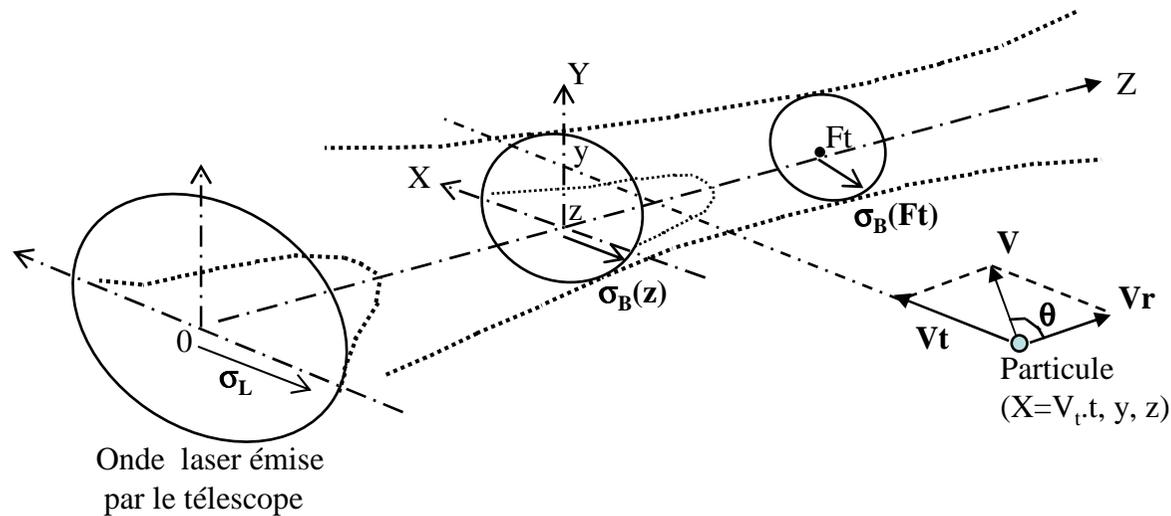
## Étude de l'atmosphère : tropopause (10 km)

- ⇒ Aérosols majoritaires du fond : noyaux d'Aitken
- ⇒ Concentration :  $N_p = 5 \text{ parts/cm}^3$
- ⇒ Taille :  $0.1 \mu\text{m}$
- ⇒  $\sigma$  : section efficace de rétrodiffusion  $\sigma = \beta / 4\pi$
- ⇒ Coefficient de rétrodiffusion :  $\beta = 10^{-9} \text{ m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$



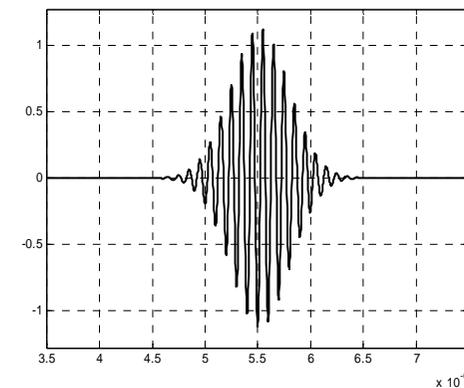
# Lidar Anemometre monoparticule : Modélisation instrumentale

⇒ Une particule en mouvement :  $x = V_t \cdot t$  ;  $Z = V_r \cdot t$



Doppler  $\propto$  à  $V_r$  vitesse longitudinale (suivant l'axe lidar)

Temps de passage  $\propto$  proportionnel à  $V_t$



# Lidar monoparticule

Courant heterodyne pour une particule en (p,Z)

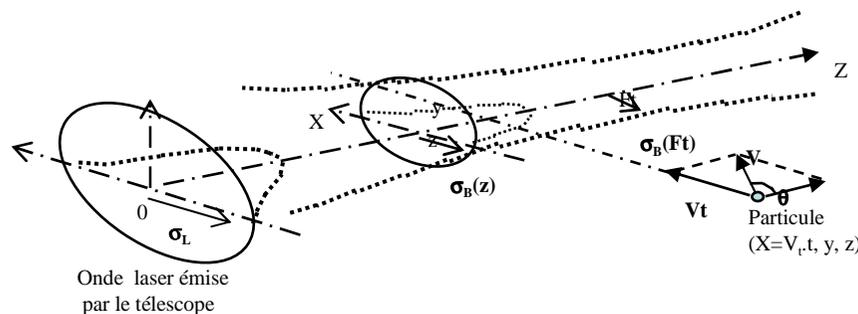
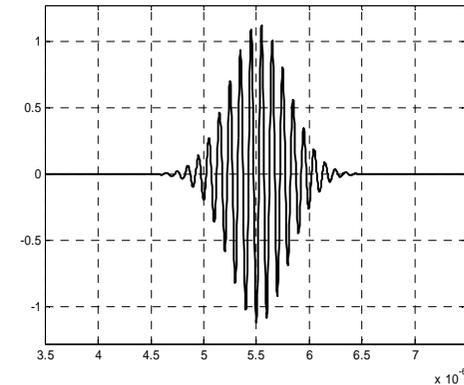
$$i_{het}(t) = \sqrt{2 \cdot \langle i_{het}^2 \rangle_{(p,Z)}} \cdot \cos(-2\pi(\nu_L - \nu_{OL}) \cdot t + 2kZ)$$

Courant heterodyne maximum lorsque la particule passe en (0, Ft) (centre du faisceau, waist)

$$\langle i_{het}^2 \rangle_{(p,Z)} = \langle i_{het}^2 \rangle_{(0,Ft)} \cdot \frac{\sigma_B^4(F_t)}{\sigma_B^4(Z)} \cdot \exp\left(-4 \cdot \frac{p^2}{\sigma_B^2(Z)}\right)$$

$$\langle i_{het}^2 \rangle_{(0,F_t)} = \sigma \cdot 2 \cdot S^2 \cdot T_{inst.} \cdot 4 \cdot P_{OL} P_L \cdot \frac{\lambda^2}{\pi^2} \cdot \frac{1}{\sigma_B^4(F_t)}$$

$$\sigma_B^2(Z) = \frac{\lambda^2 \cdot Z^2}{\pi^2 \sigma_L^2} + \sigma_L^2 \left(1 - \frac{Z}{F_t}\right)^2$$



# Lidar monoparticule : modelisation instrumentale

⇒ Rapport porteuse sur bruit pour une particule

$$\langle i_{het}^2 \rangle_t = \langle i_{het}^2 \rangle_{max} \exp\left(-4 \cdot \frac{(V_t \cdot t)^2}{\sigma_B^2(Z)}\right)$$

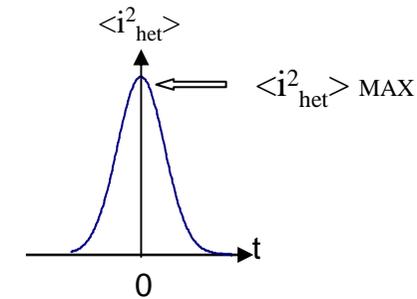
$$\langle i_{het}^2 \rangle_{MAX} = K^{transfert} \cdot \sigma(r_0) \cdot P_L \cdot \frac{\sigma_B^4(F_t)}{\sigma_B^4(Z)} \cdot \exp\left(-4 \cdot \frac{y^2}{\sigma_B^2(Z)}\right)$$

Fonction instrumentale

Rapport rayon faisceau

Section efficace de rétrodiffusion  
d'un aérosol de rayon  $r_0$

$$CNR = \frac{\langle i_{het}^2 \rangle}{\langle i_B^2 \rangle}$$



Dans le cas d'une détection électronique optimale, le bruit dans la bande de détection B (en Hz) est limité par le bruit de photons dû à l'éclairement du faisceau oscillateur local, soit :

$$\langle i_B^2 \rangle = 2 \cdot S \cdot P_{OL} \cdot B$$

où : S est la sensibilité du détecteur (en A/W).

# Lidar monoparticule DALAS



## Essais en vol de la sonde DALAS (sonde DALHEC modifiée)

L'objectif est de valider l'anémométrie  $1.5 \mu\text{m}$  monoparticule et d'évaluer les caractéristiques de rétrodiffusion de l'atmosphère avec :

- ⇒ altitude
- ⇒ météo (ciel clair/nuage)
- ⇒ variation journalière (jour/nuit)
- ⇒ zone géographique (mer/terre/montagne)
- ⇒ réglages de mesure ( focale, vitesse avion)

### Moyen d'essais

- ⇒ Mystère XX du CEV d'Istres

# Lidar monoparticule DALAS

## Préparation de la sonde DALAS (sonde DALHEC modifiée)

- ⇒ Modification de la tête optique pour permettre la focalisation aux distances focales retenues + réalisation de cales facilitant le réglage
- ⇒ Modifications laser : suppression du MAO, augmentation de la puissance optique de l'OL
- ⇒ Nouvelle architecture HF permettant de s'adapter aux fréquences Doppler rencontrées en configuration avion à haute altitude

DALHEC

Distance de mesure : 30m

Pupille : 30mm

DALAS

Distance de mesure : 1m

Pupille : 30mm

Tache focale  $< 100 \mu\text{m}$



# Lidar monoparticule DALAS



## Installation de la sonde DALAS



Le Hublot intégré à l'issue de secours

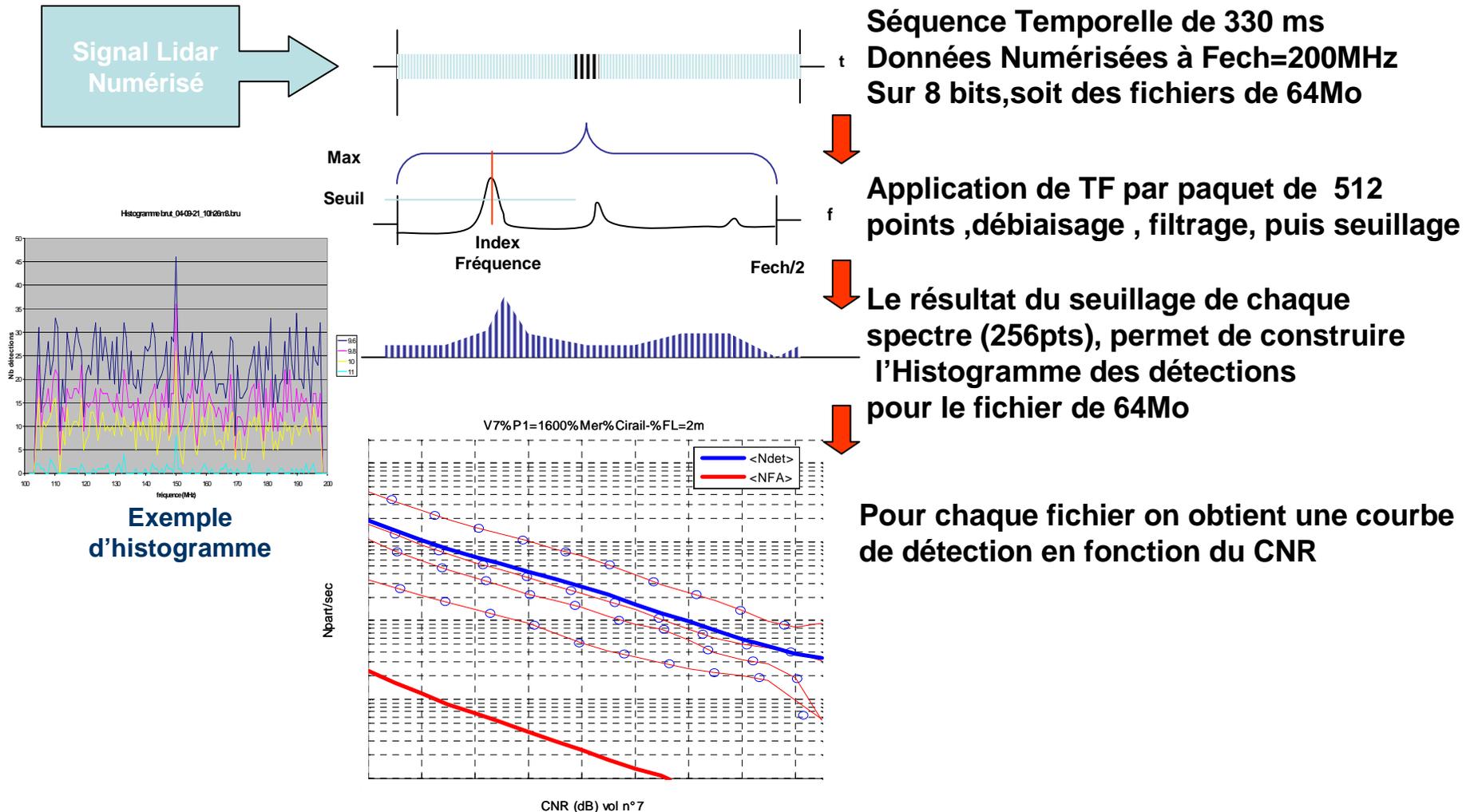


La tête optique DALAS installée à bord du MYSTERE XX



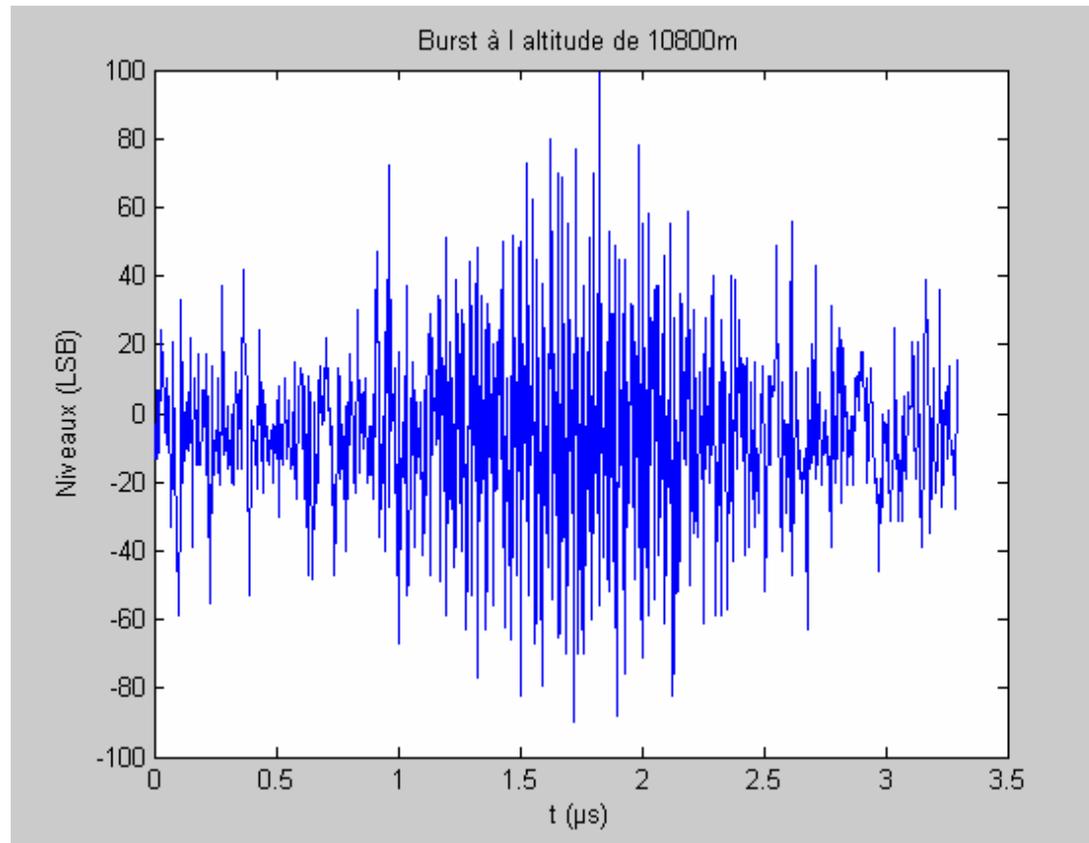
Le boîtier de commande DALAS

# Lidar monoparticule DALAS : Traitement du signal embarqué



# Lidar monoparticule DALAS : essais en vol

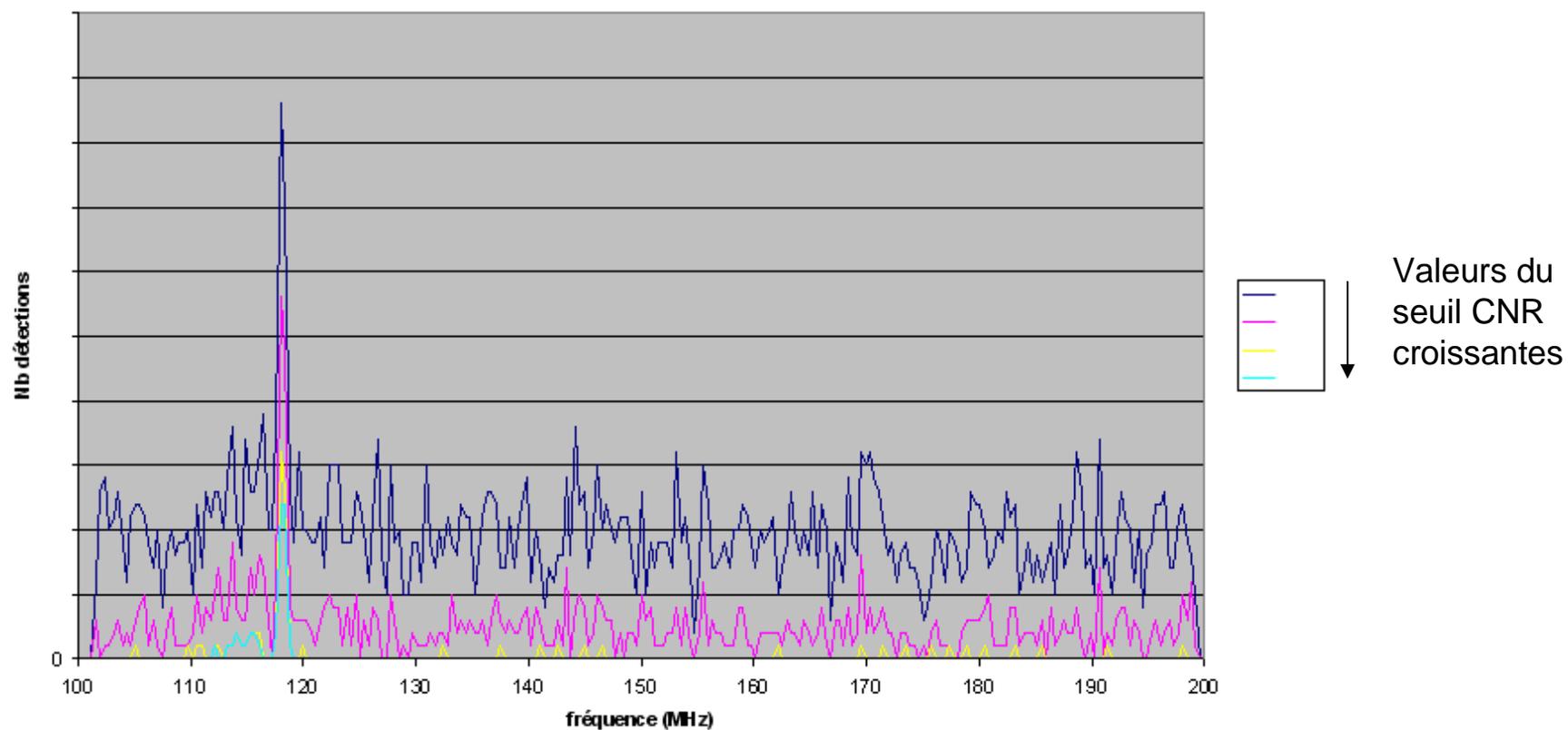
Vol n°4 : Exemple de burst (11000m, ciel clair)



# Lidar monoparticule : essai en vol de la sonde DALAS

Vol n°2 : Exemple d'histogramme (6000m, ciel clair)

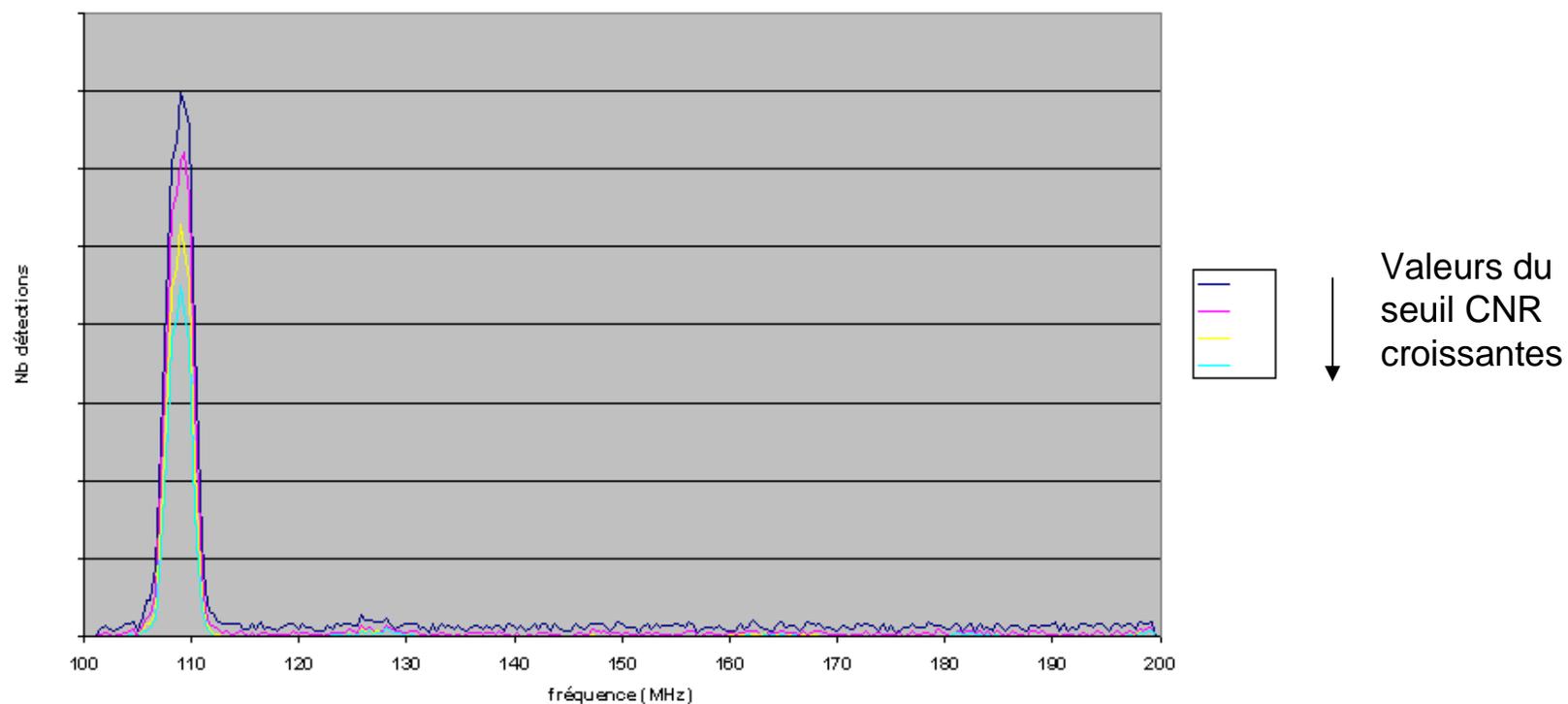
Histogramme brut\_04-12-14\_14h01m37



# Lidar monoparticule DALAS : essais en vol

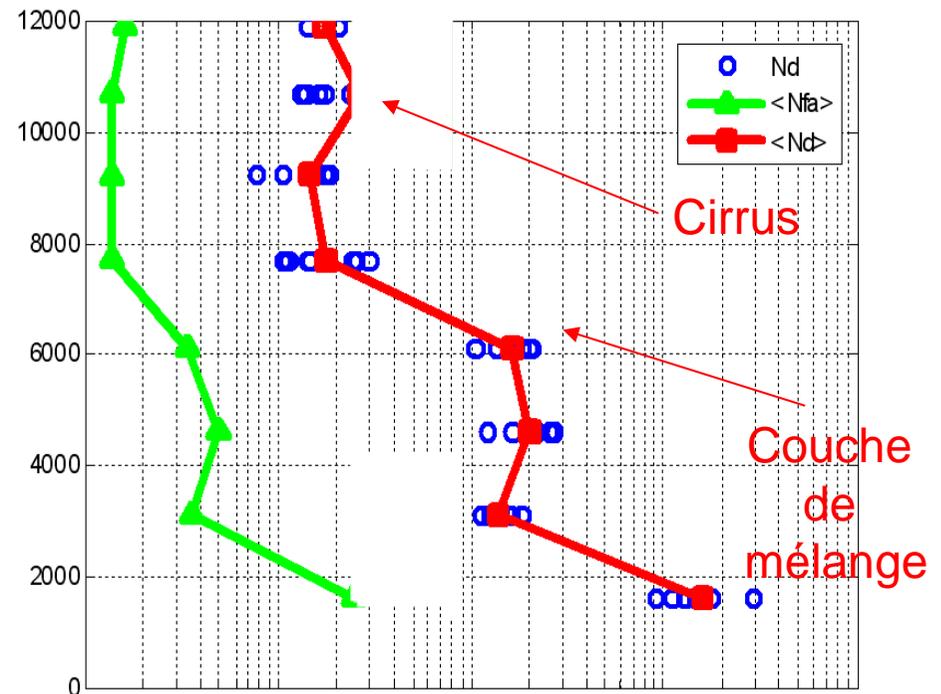
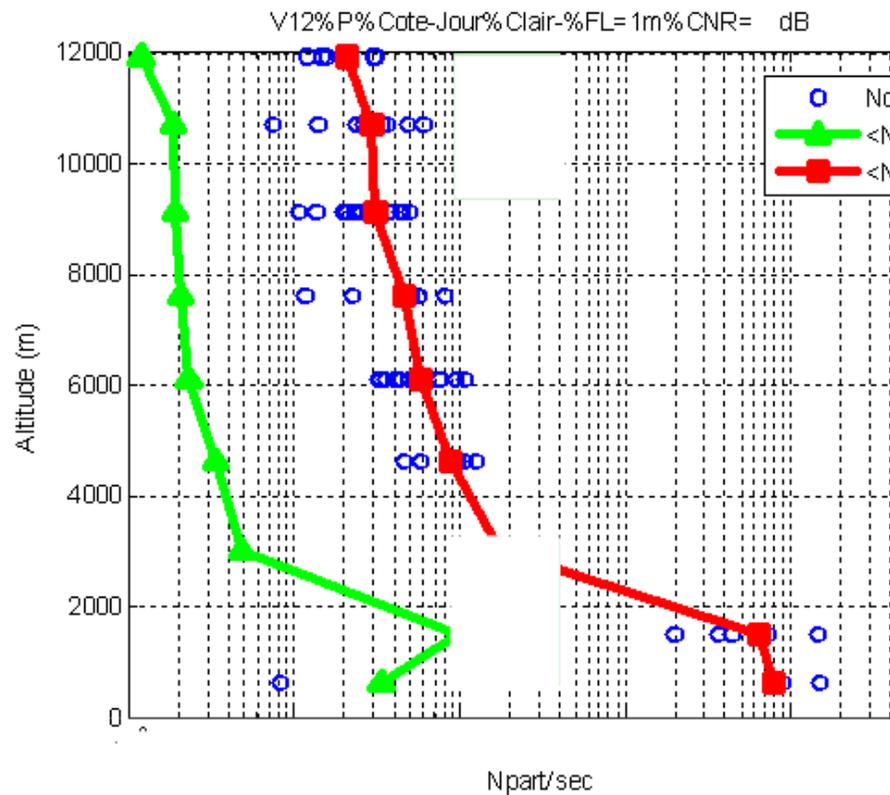
Vol n°2 : Exemple d'histogramme (6000m, nuage)

Histogramme brut\_04-12-14\_14h05m48



# Lidar monoparticule DALAS : essais en vol

NbDétection = f(altitude)



# Autre lidar anemo monoparticules

Table 7-2: Characteristics of the Boeing Doppler lidar airspeed system.

Factor	Detail
anemometer type	reference-beam laser anemometer
laser	NdYAG
wavelength	1.064 $\mu$ m
operating mode	continuous wave (cw)
power	0.5 Watt
detection	coherent mode using an indium gallium arsenide detector
measurement	single component flow velocity at a point
focal distance	between 1 and 2 m
velocity range	10 m/s to 400 m/s
altitude range	tested up to FL 410
TAS uncertainty	1 m/s
update rate	dependent upon particle passage rate
format	RS 232
physical characteristics	
scanning	none
size (optical unit)	7.5 x 17.5 x 27.5 cm
weight (optical unit)	<5 kg
developed by:	Boeing Information Systems

## Boeing Doppler lidar airspeed system.

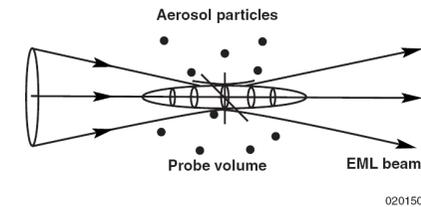


Figure 7-3: Detection volume geometry.

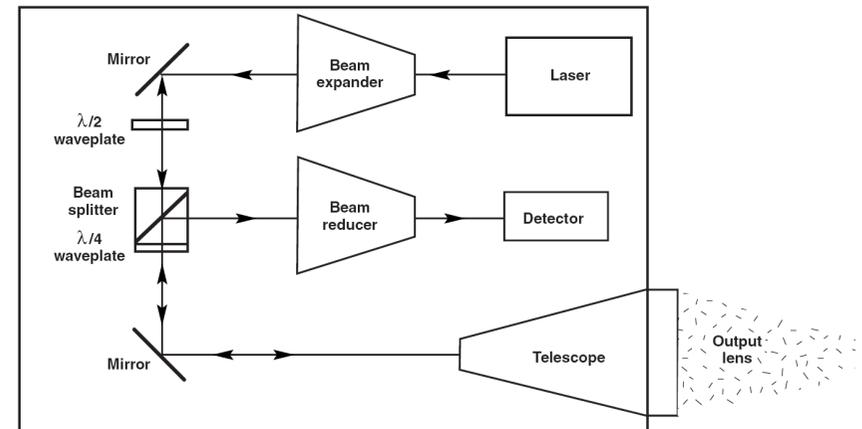


Figure 7-4: Continuous-wave Doppler lidar brass board configuration.

Source : “optical air flow measurement” (OTAN)

# Applications aéronautiques des lidars vent

## Applications éoliens des lidars vent

### Applications aéronautiques des lidars vent

#### Senseurs de navigation

- **mesure de vitesse air 1 point 3 composantes**
  - Mie multiparticules
  - Mie monoparticules
  - **Rayleigh**

#### Senseurs d'alertes

- **Au sol**
  - Turbulence de sillage / wake vortex
  - Cisaillements ( « wind hazard » )
- **Embarqués**
  - Turbulence de sillage /wake vortex
  - Cisaillements / Turbulence en air clair

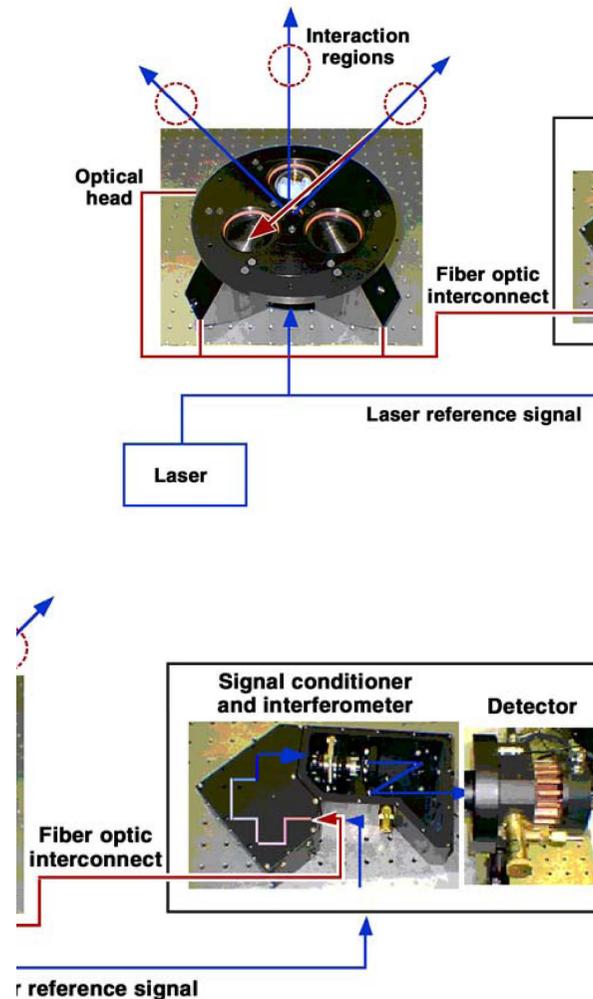
### Applications éoliens des lidars vent

- **Caracterisation de site**
- **Optimisation des turbines**

# Autre lidar Rayleigh : MOADS

Table 7-3: Characteristics of Michigan Aerospace Molecular Optical Air Data Sensor (MOADS).

Factor	Actual Detail (as tested in the laboratory)	Projected Detail
anemometer type	spectrometric anemometer, bistatic configuration	
laser	NdYAG laser quadrupled	
wavelength	1.064 mm quadrupled to 0.266 mm	
operating mode	continuous wave or pulsed	continuous wave or pulsed
power	.5 W (dependent on update rate)	.5 W
detection	direct mode detection by a high-finesse etalon using a charge-coupled-device (CCD) detector	
measurements	vector true airspeed (TAS, AoA, and AoS), static pressure, and temperature. Derived measurements include: Mach and Pressure Altitude	
measurement distance	2m. and 10m.	2m. and 15 m
velocity range	0 to 25 m/s	0 m/s to 1200 m/s
altitude range	Sea level (SL)	SL to FL 1000
TAS uncertainty	±0.57 m/s (1 sec. integration) (1W laser power)	±.2 m/s (80 Hz update) (2 W laser power)
update rate	1 Hz	80 Hz for AoA and AoS 20 Hz for others
pressure uncertainty	± 700 Pa (127mW laser power)	± 63 Pa (80 Hz update) (2 W laser power)
temperature uncertainty	none quoted	± .9 °C (10 Hz update)
format	RS 232	MIL-1553
physical characteristics		
scanning	none (measurements from 3 separate axes)	
size	0.127 m <sup>3</sup> (not including laser)	.04 m <sup>2</sup>
weight	42 kg	20 kg
developed by	Michigan Aerospace Corporation, Ann Arbor, MI and University of Michigan, Ann Arbor, MI	
funded by	US Navy and US Air Force (AFRL)	



Source : "optical air flow measurement" (OTAN)

020152

- **Au sol**
  - **Turbulence de sillage /wake vortex**
  - **Cisaillement / rafale (Wind hazard)**
  
- **Embarqués**
  - **Turbulence de sillage /wake vortex**
  - **Turbulence en air clair**
  - **Cisaillement / rafale (Wind hazard)**

# Les turbulences de sillage ( « wake vortex » )



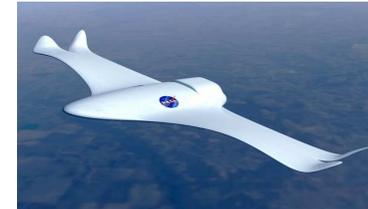
*@ Joseph P. Willems, 2002*

Courtesy from  
S. Wolf, IFALPA



### Conception des voilures / réduction des trainées :

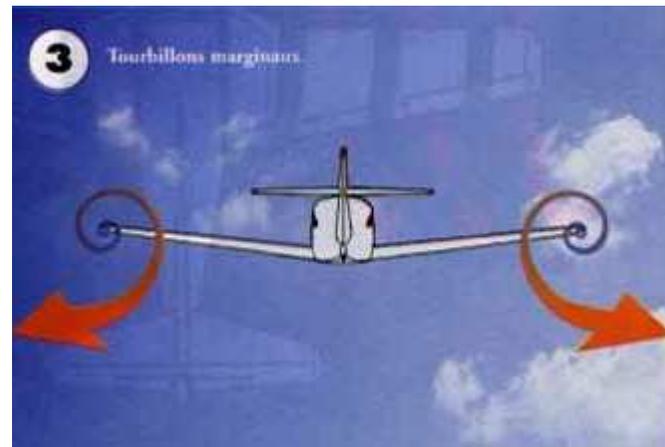
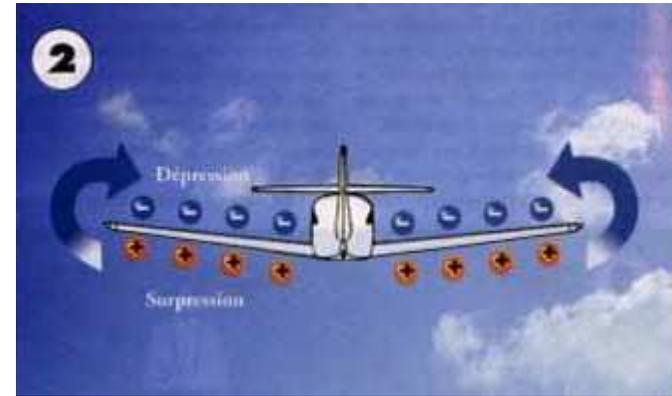
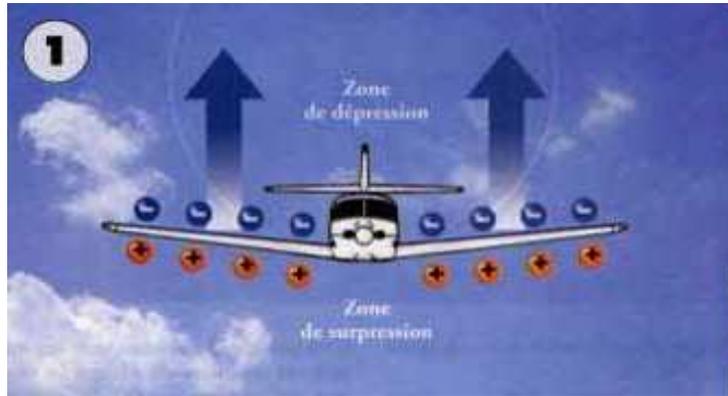
- **mesures sur maquettes**
- **mesures sur site aéroportuaire**



### Sécurité du vol :

- **mesures embarquées**
- **mesures sur site aéroportuaire**
  - **Augmentation du trafic aéroportuaire : Réduction des espacements entre les décollages et entre les atterrissages**

# origine aérodynamique la turbulence de sillage

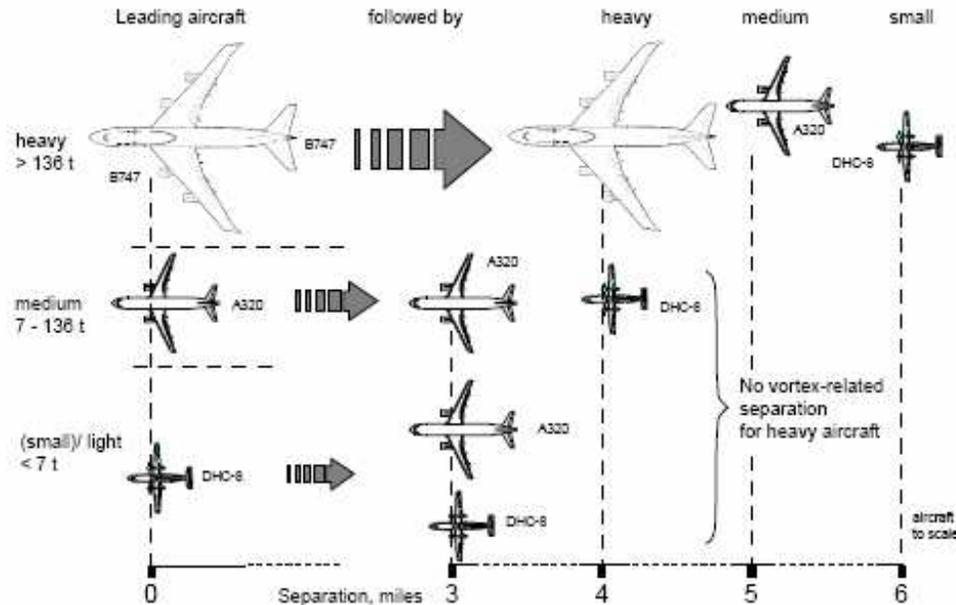


## Anti- vortex : « winglets »



Reduction de la traînée de 5 à 7 %

# Les espacements à l'atterrissage

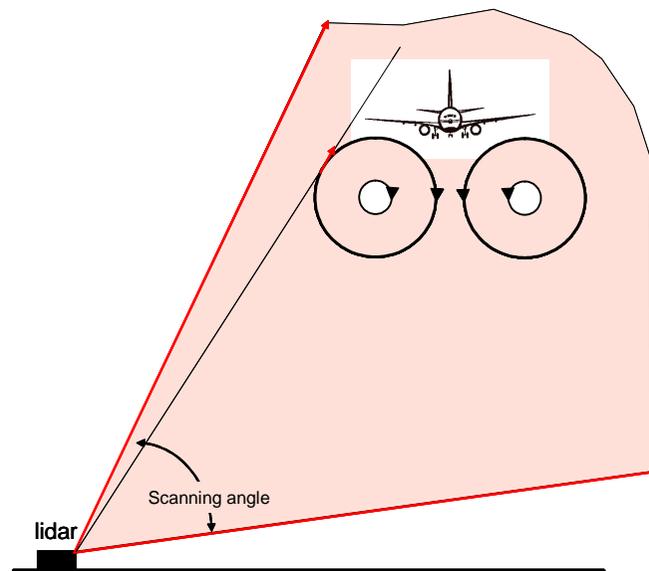


	Leading aircraft	Following aircraft	Separation distance		Time delay (approach speed $70ms^{-1}$ )
			(Nm)	(km)	
(a)	Heavy ( $>136000kg$ )	Heavy	4	7.4	106
		Medium	5	9.3	133
	Medium ( $7-136000kg$ )	Light ( $<7000kg$ )	6	11.1	159
(b)	A380-800	Heavy	6	11.1	158
		Medium	7	13	186
		Light	8	14.8	211

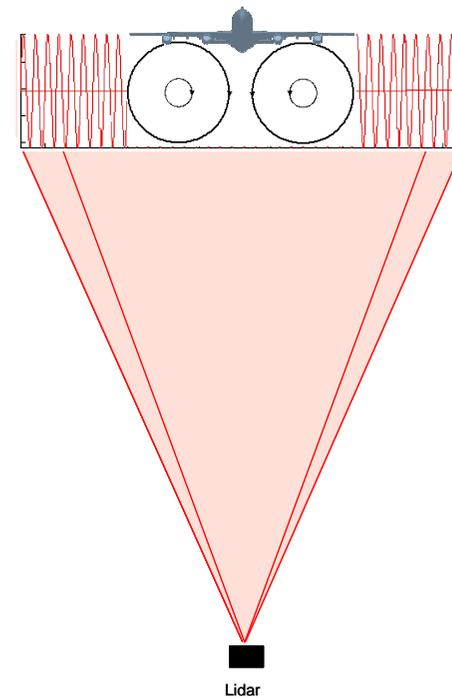
ICAO aircraft separation distances to avoid wake vortex encounters during approach: (a) standards, (b) provisional values for the A380 (2008).

→ SESAR : Single European Sky Air traffic management Research

# Mesure des « wake vortex » par lidar

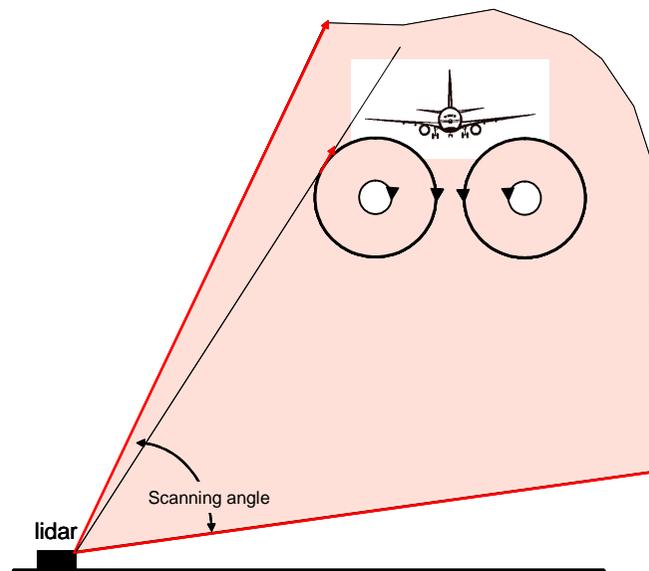


Détection transversale Sol



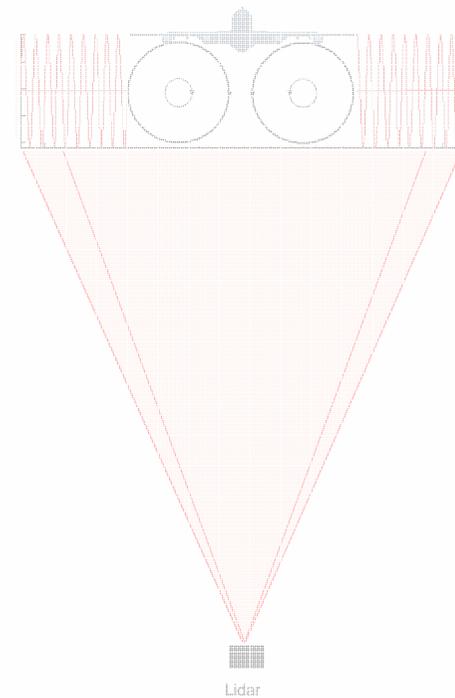
Détection axiale  
Embarquée ou sol

# Mesure des « wake vortex » par lidar



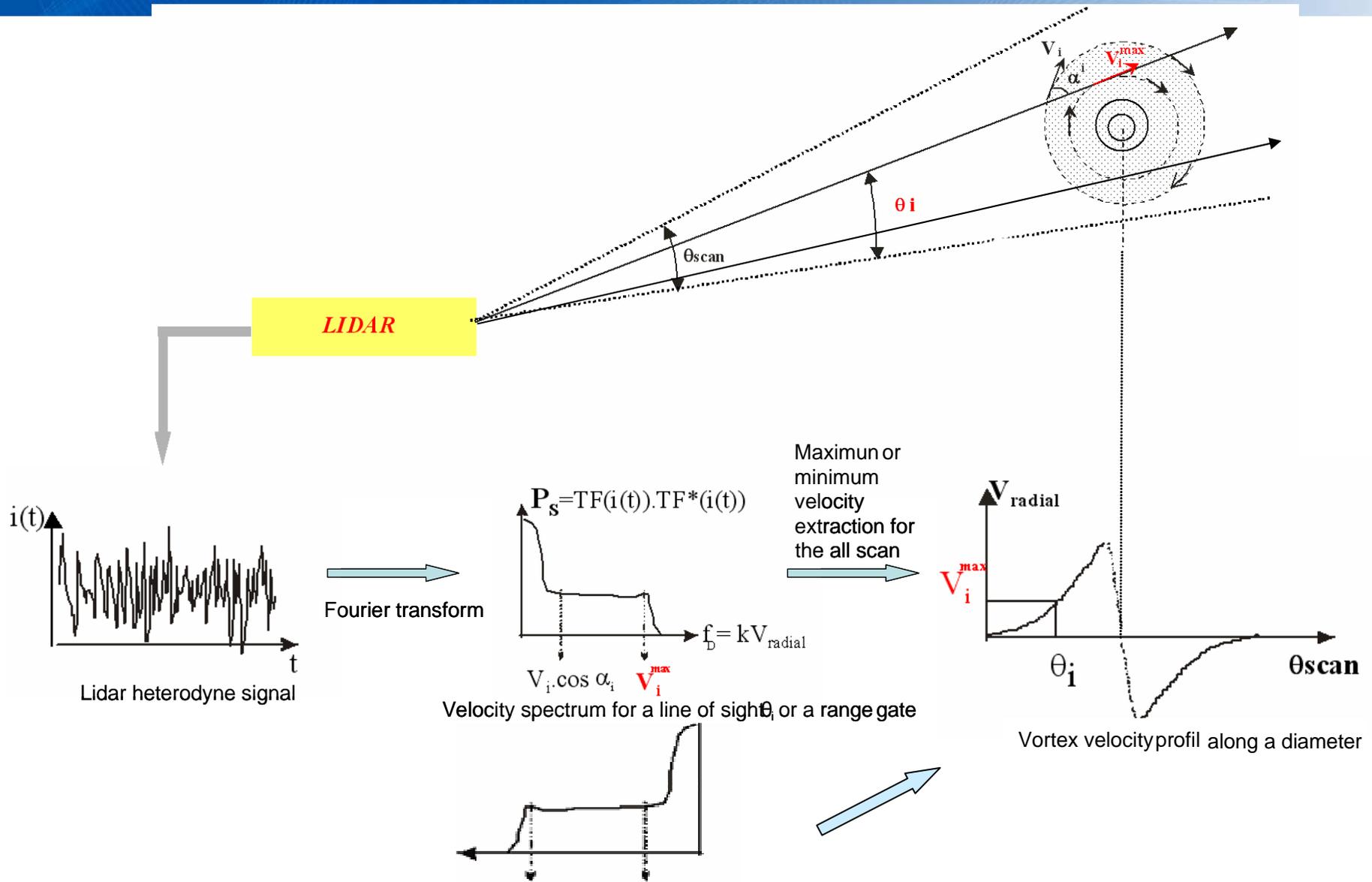
## Détection transversale sol :

- mesures sur maquettes
- mesures sur site aeroportuaire

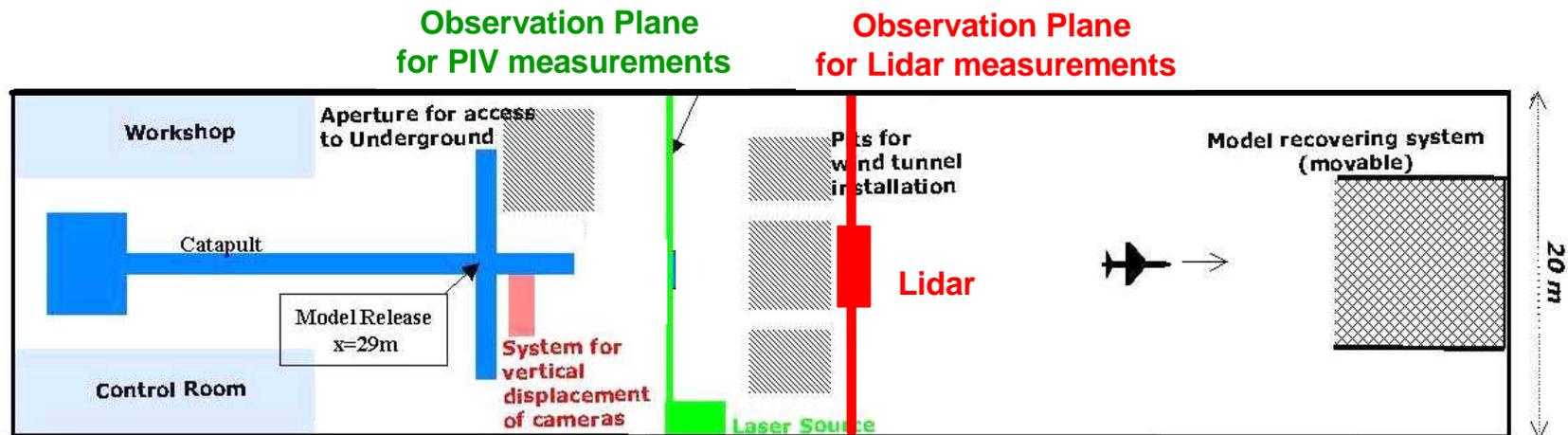


## Détection axiale Embarquée ou sol

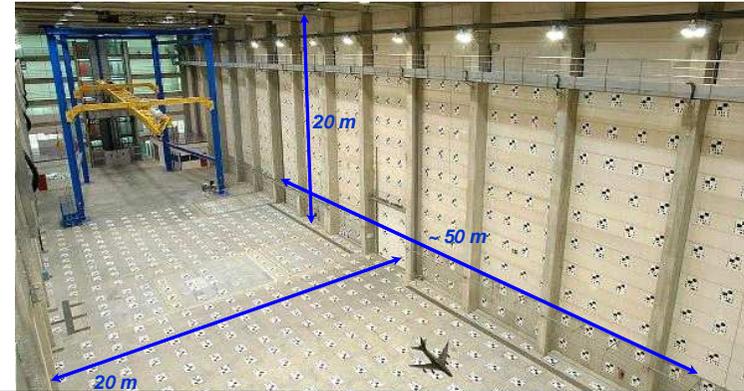
# Lidar Doppler wake vortex : Mesure transverse



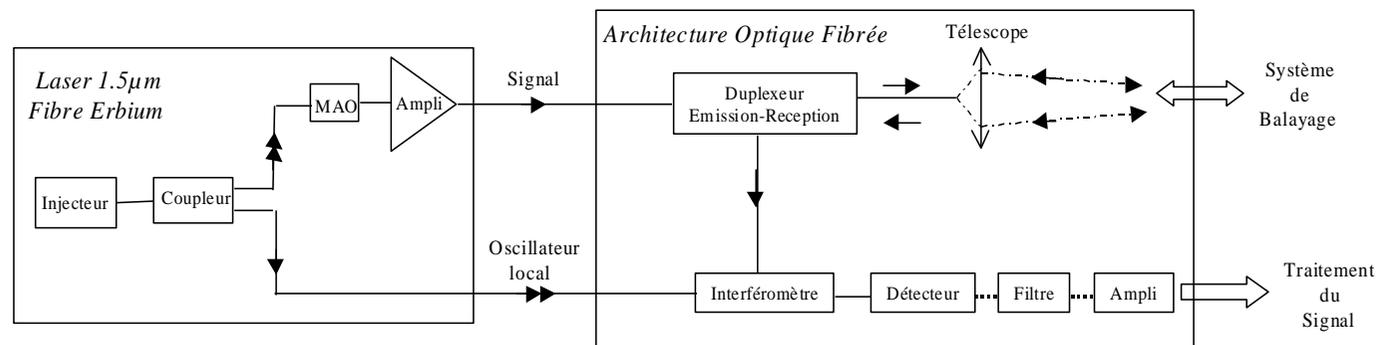
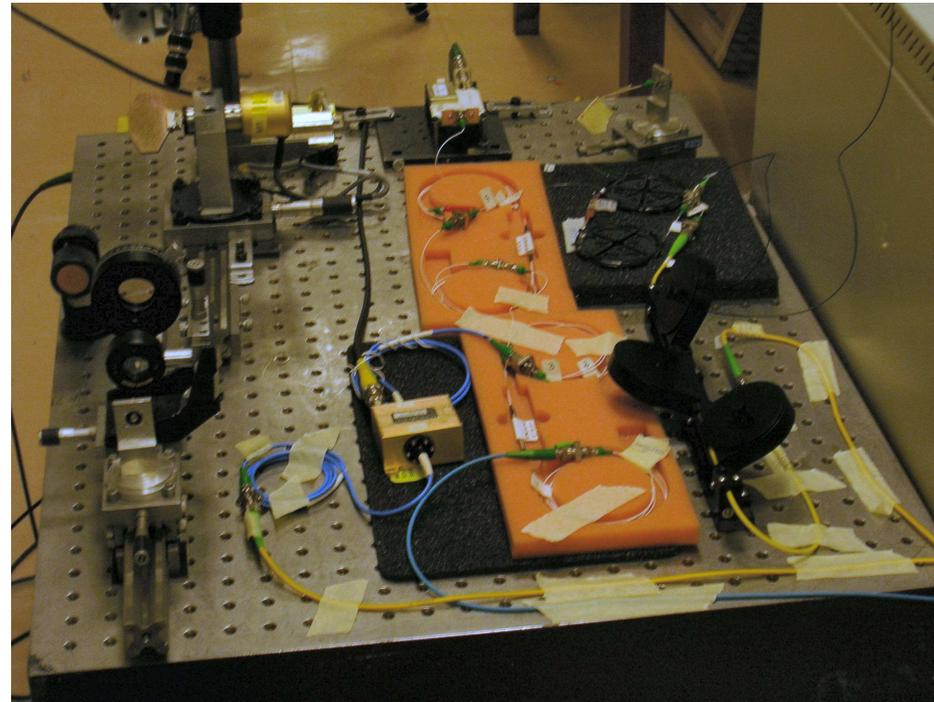
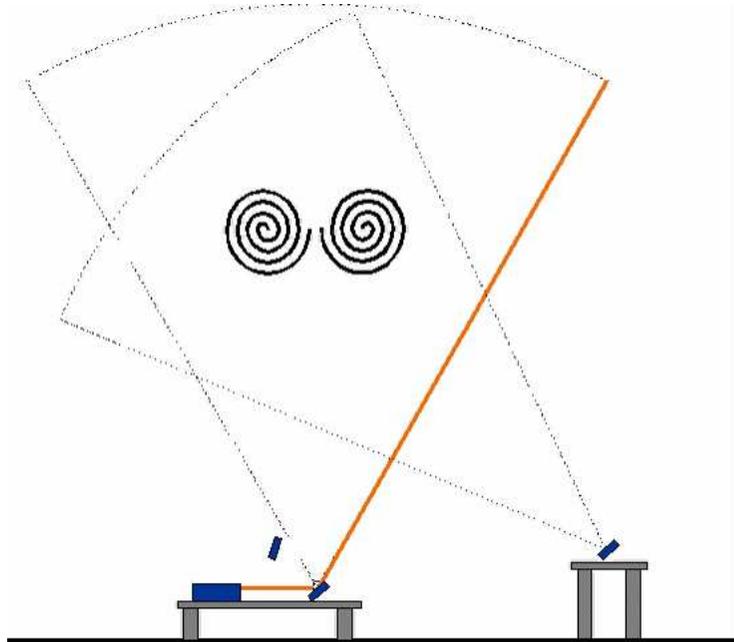
# Wake vortex de maquettes d'avions : Mesures au B20



# Wake vortex de maquettes d'avions : Mesures au B20

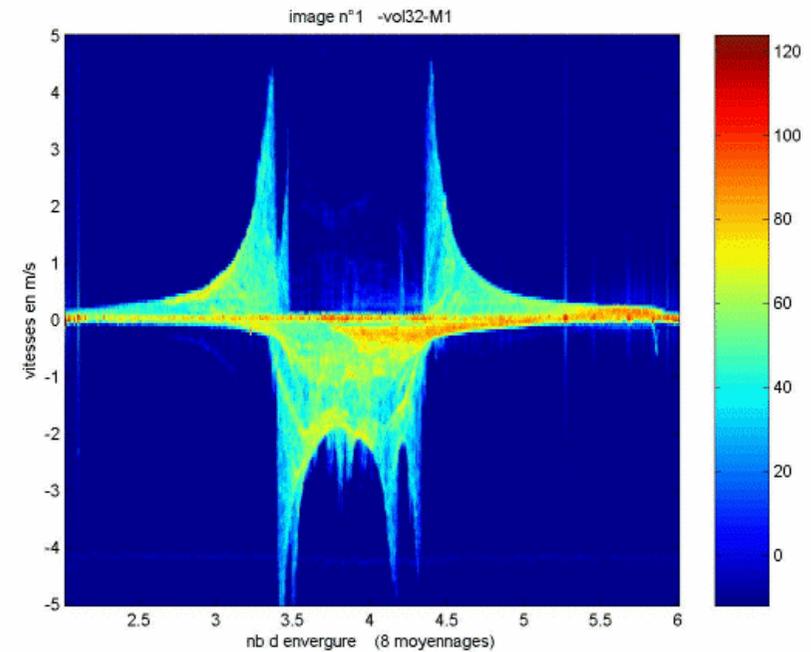
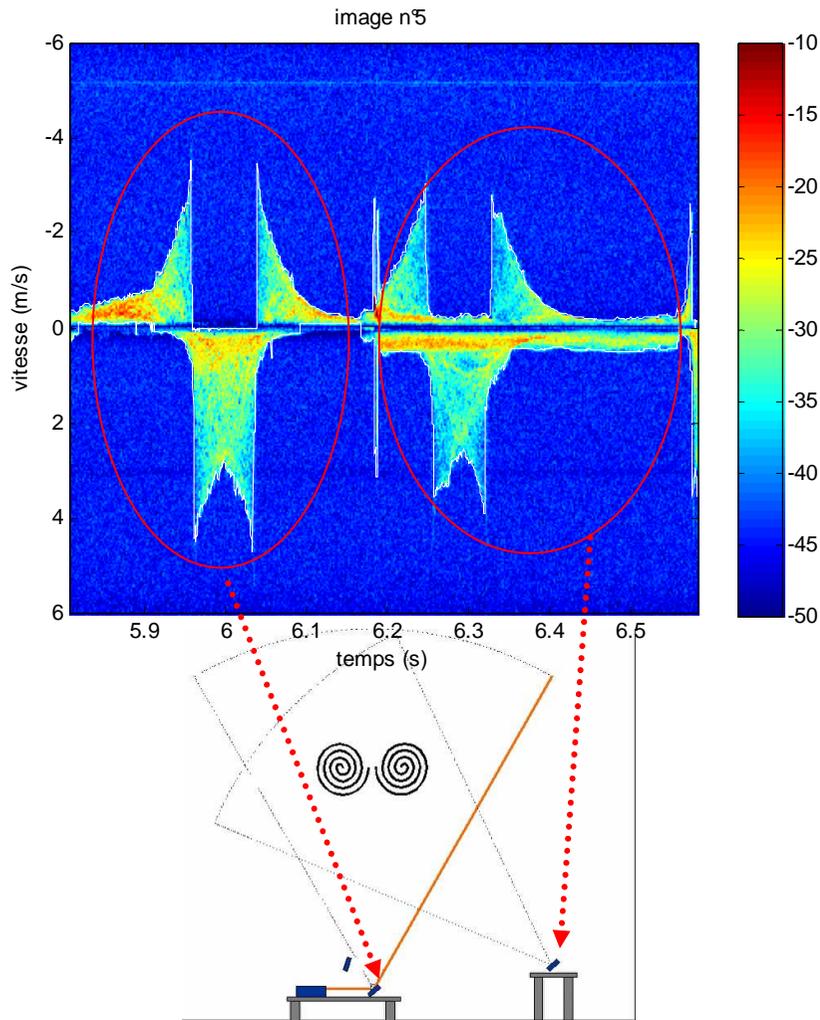


# Mesure de turbulence de sillage en échelle réduite



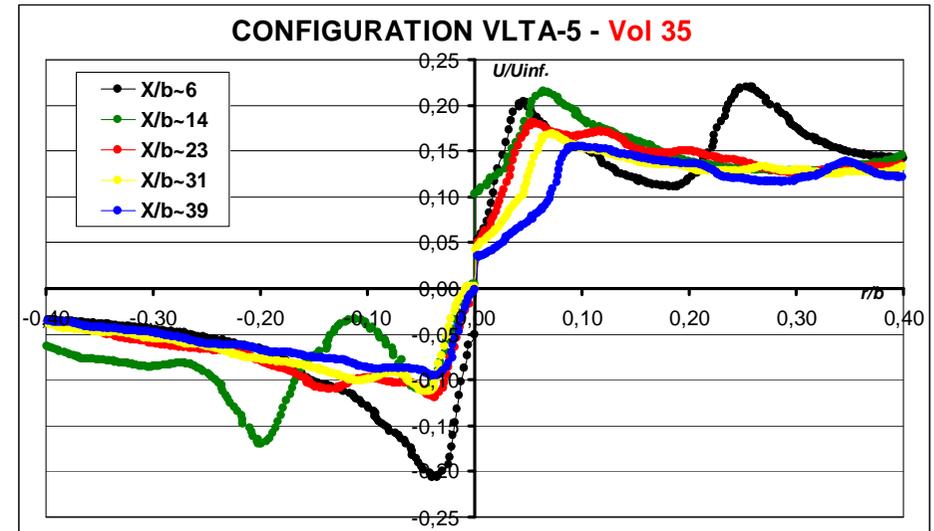
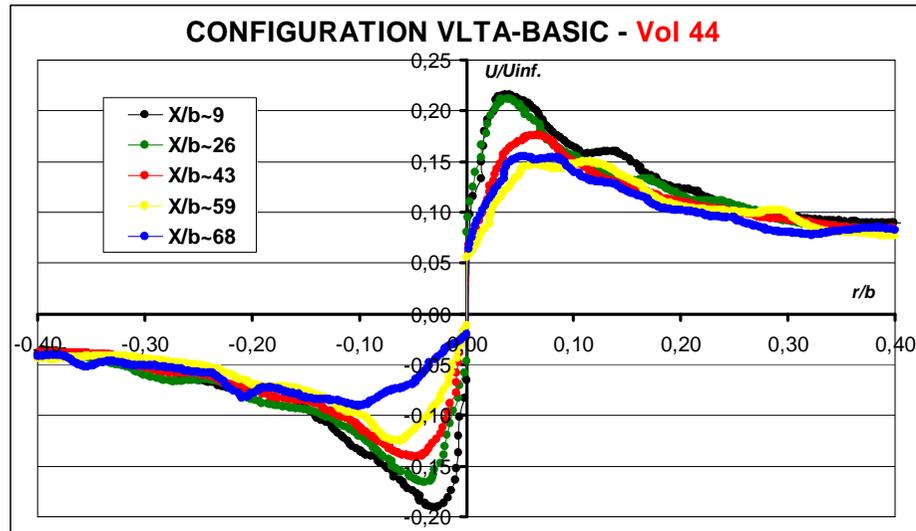
# Mesure de turbulence de sillage en échelle réduite

l'atmosphère estensemencée avec de fines gouttelettes d'huile d'olive.

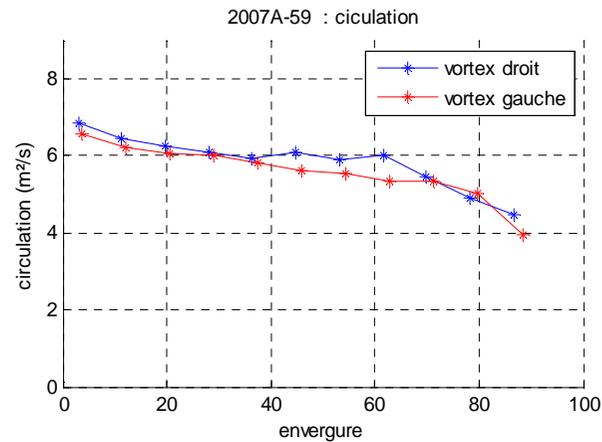
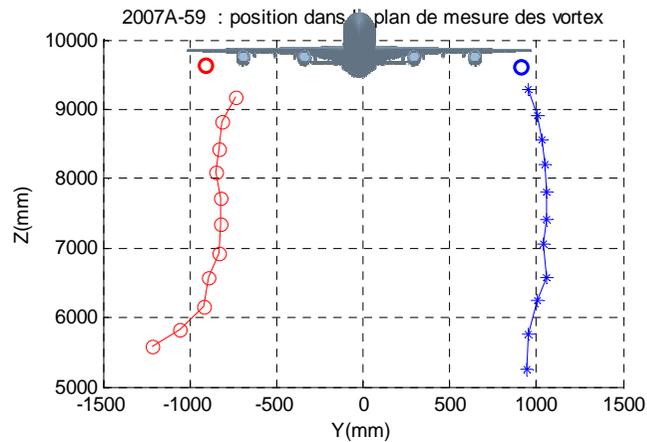
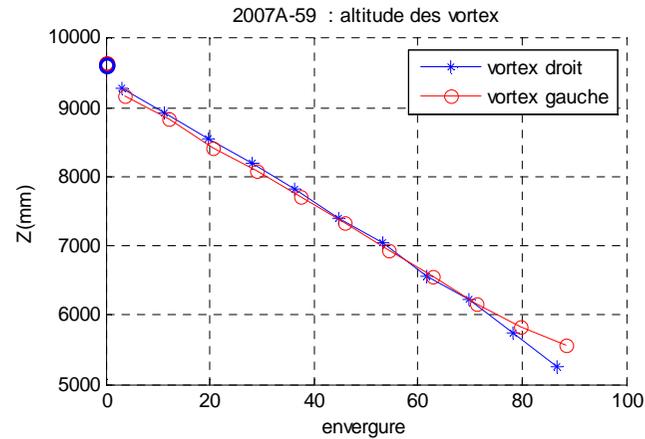
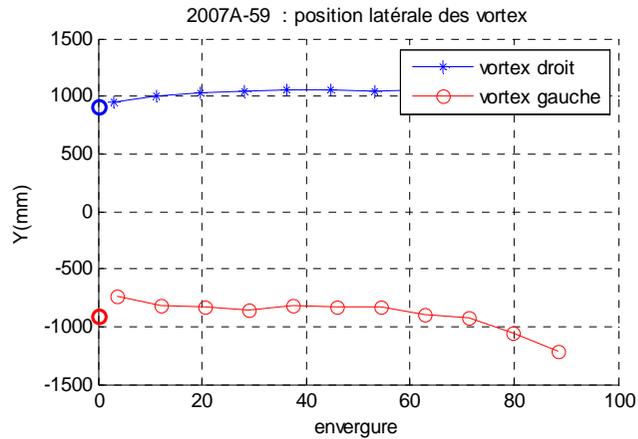


# Mesure de turbulence de sillage en échelle réduite

## Comparaison de configurations de voilure

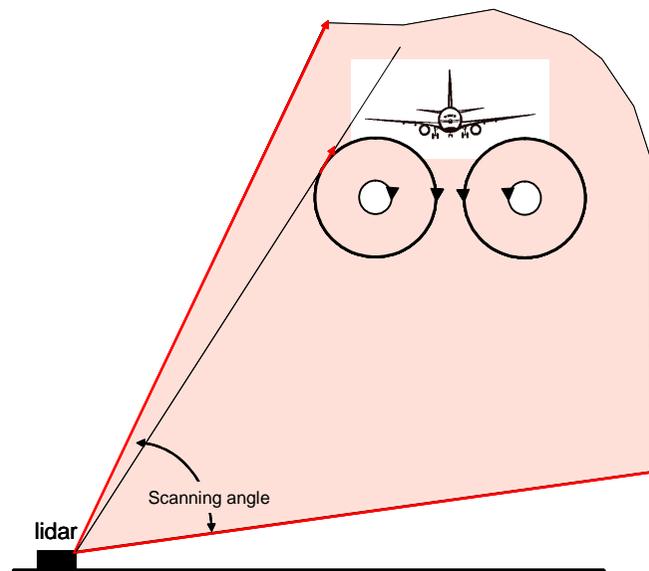


# Mesure de turbulence de sillage en échelle réduite



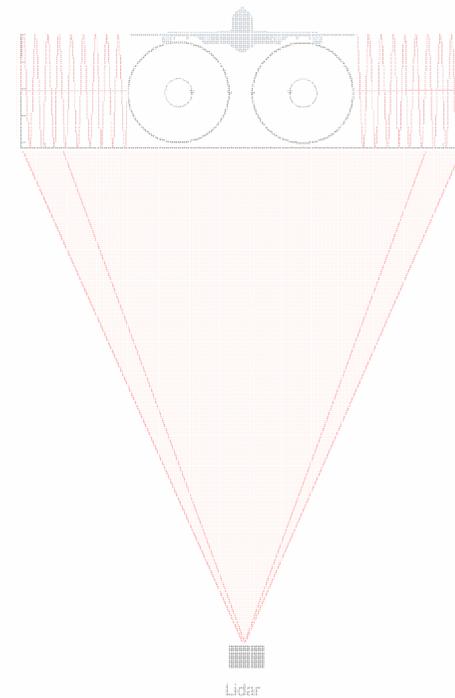
Circulation :  $\Gamma(r) = 2\pi r v_{\theta}(r).$

# Mesure des « wake vortex » par lidar



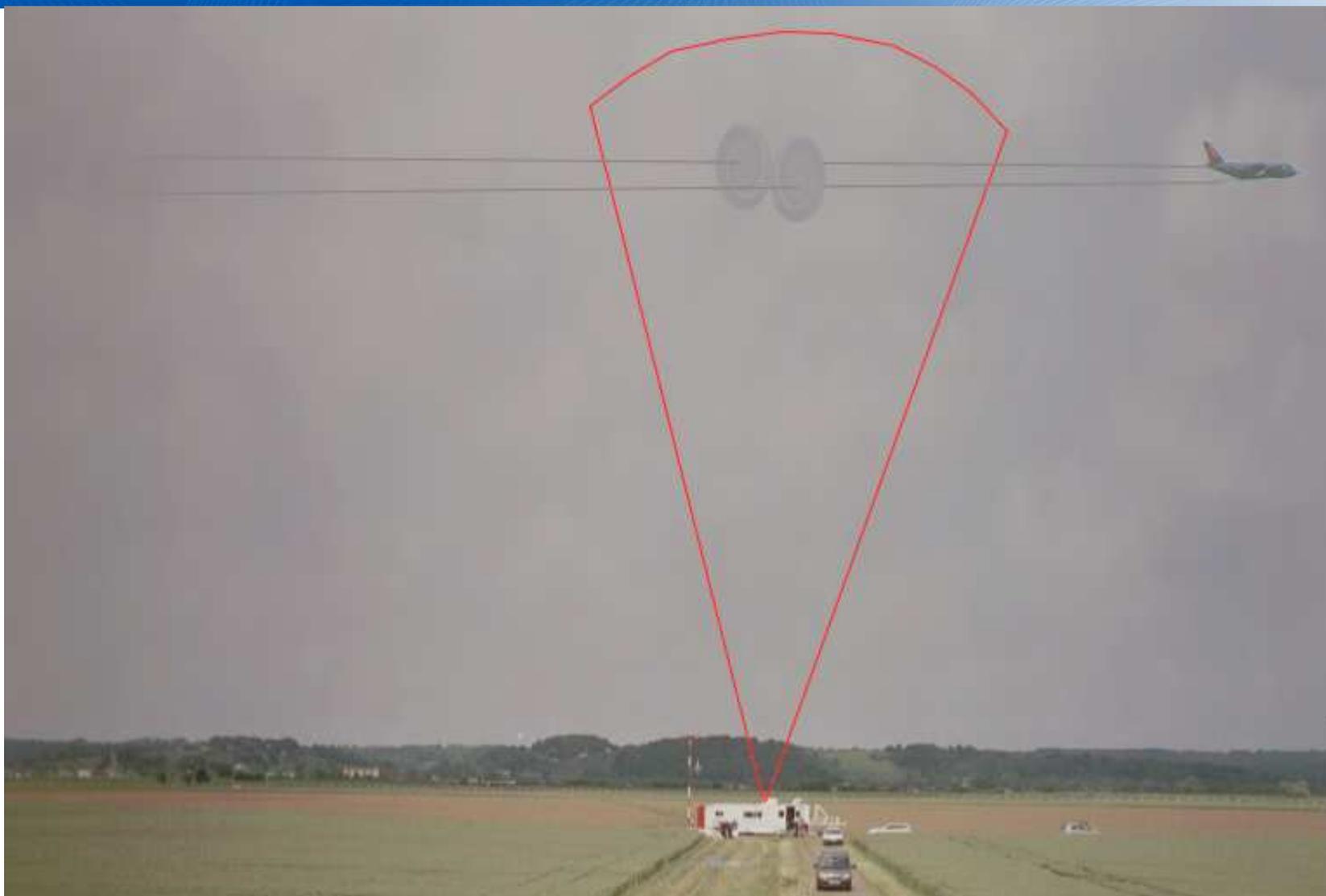
## Détection transversale sol :

- mesures sur maquettes
- mesures sur site aeroportuaire



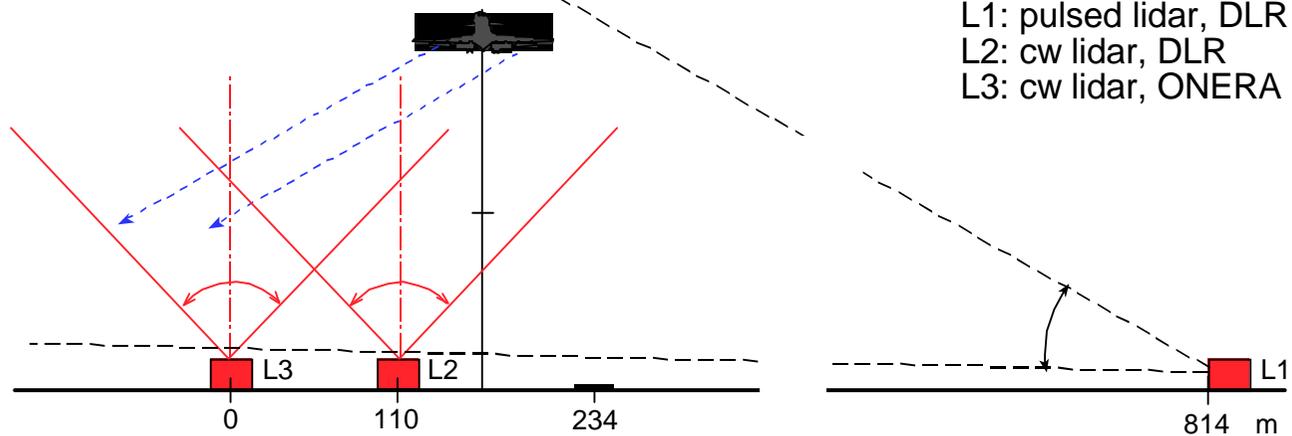
## Détection axiale Embarquée ou sol

# Mesures sur site aéroportuaire

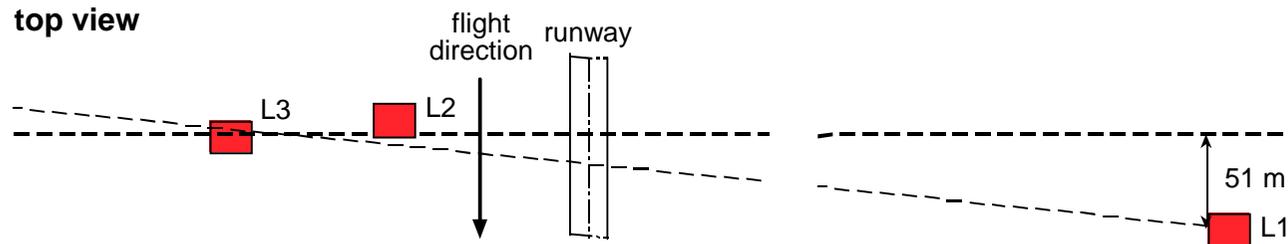


# Mesures sur site aéroportuaire Campagne AWIATOR à Tarbes

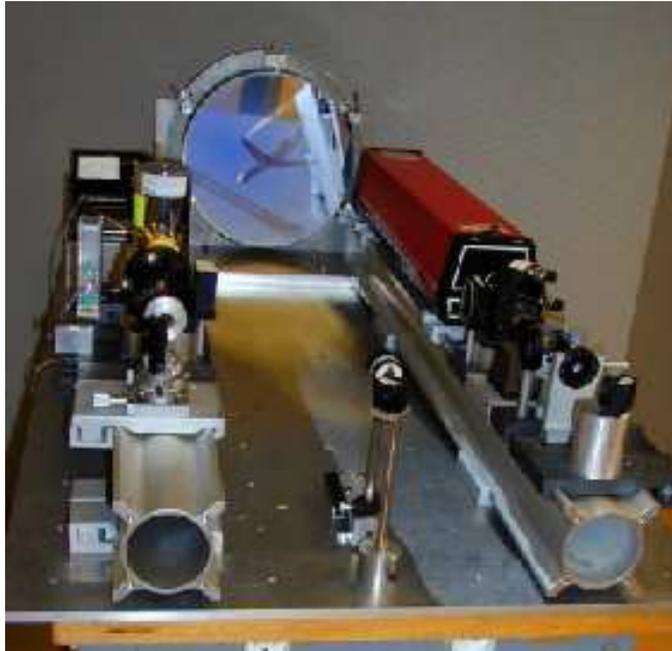
view along  
LOS of lidar L1



top view



# Mesures sur site aéroportuaire Campagne AWIATOR à Tarbes



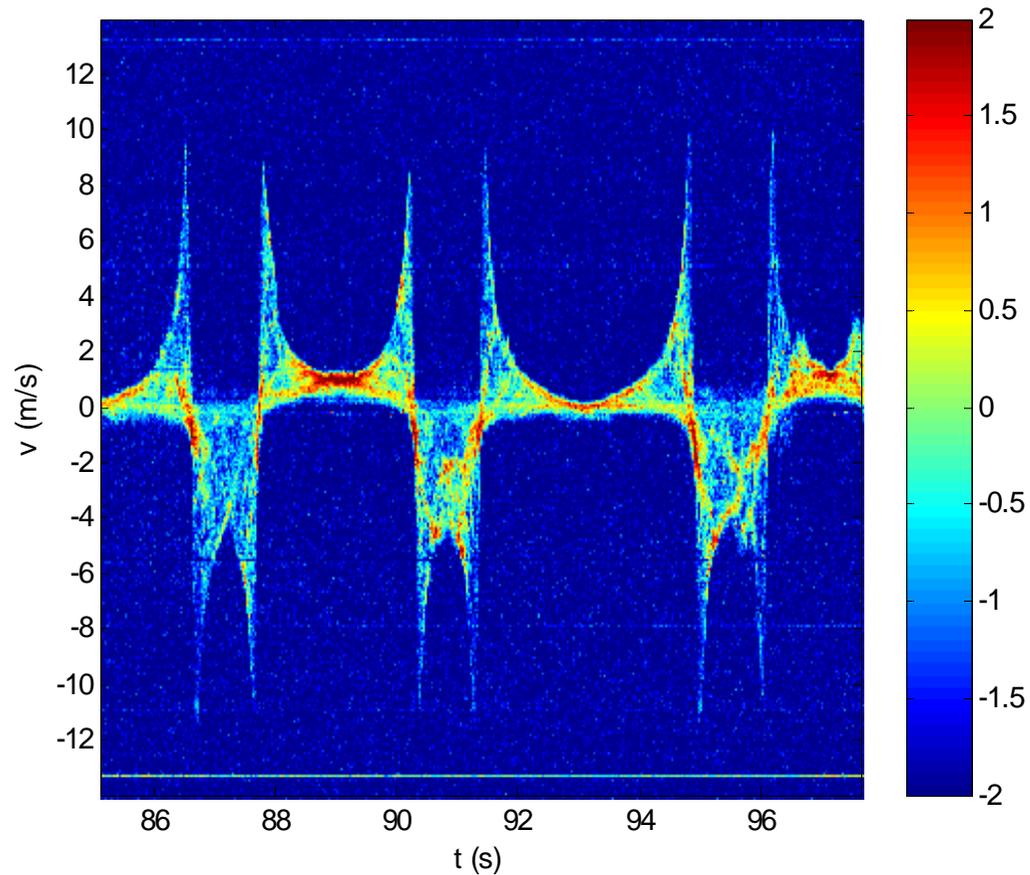
30 cm diameter aperture  
6W CO<sub>2</sub> CW laser  
+ heterodyne detection  
velocity resolution      5 cm/s  
velocity range:          +/-50m/s



Maximum speed :      35° / s  
Max acceleration : 200° /s<sup>2</sup>  
Position accuracy :    0.04°

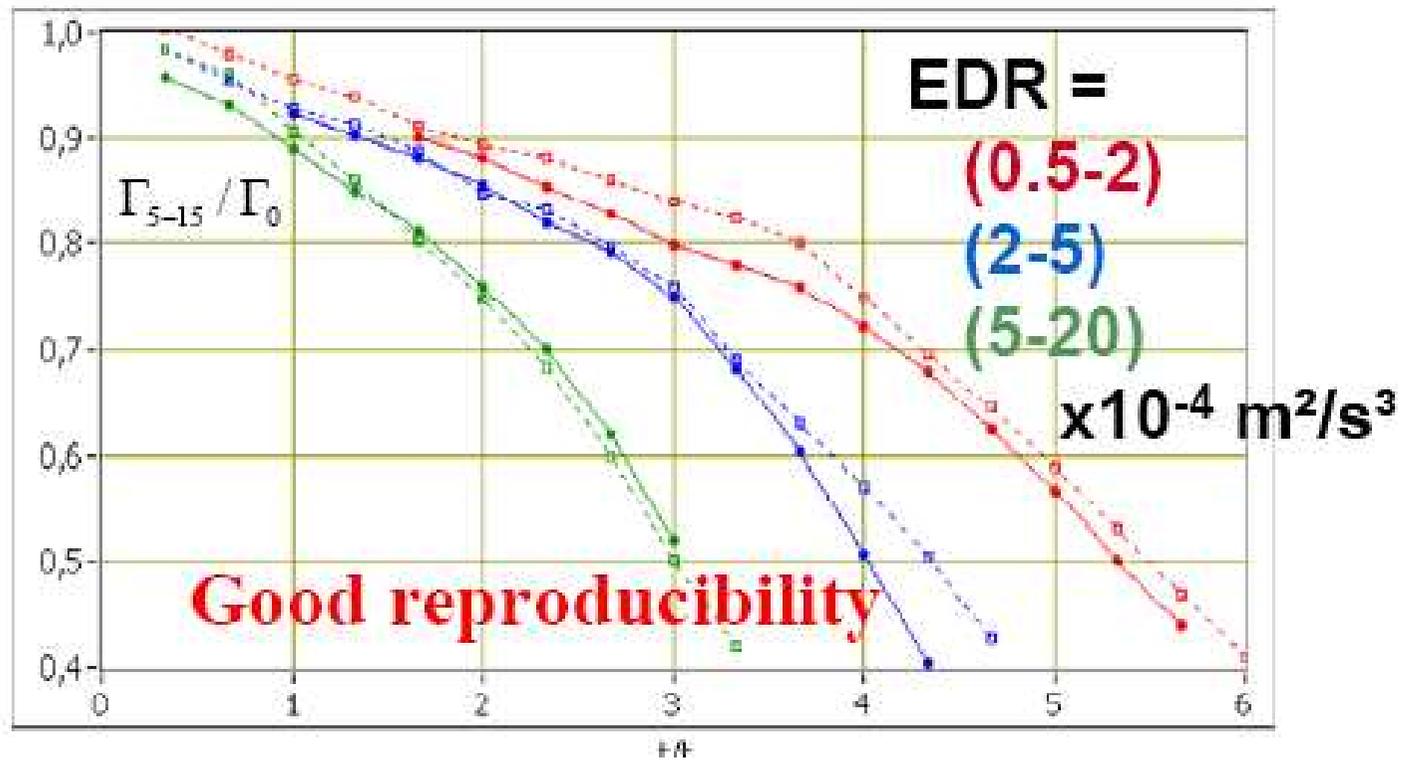
# airport measurements

Velocity (au)



Time (s)

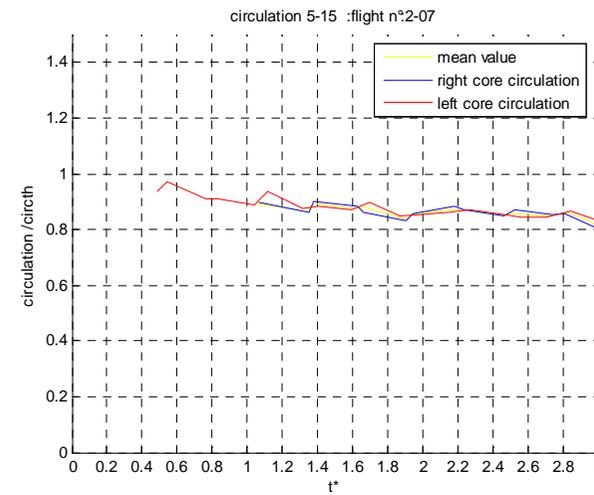
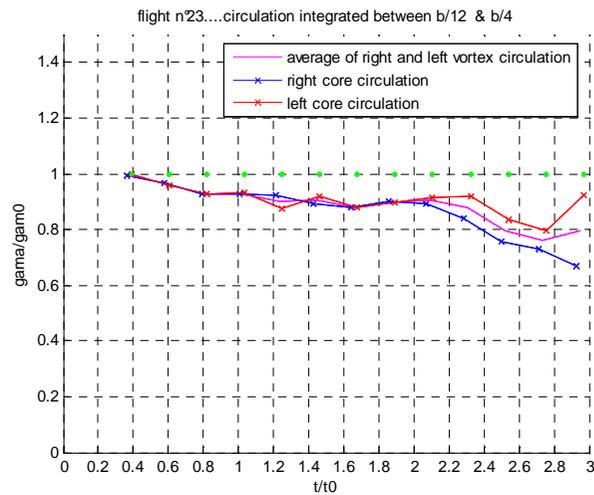
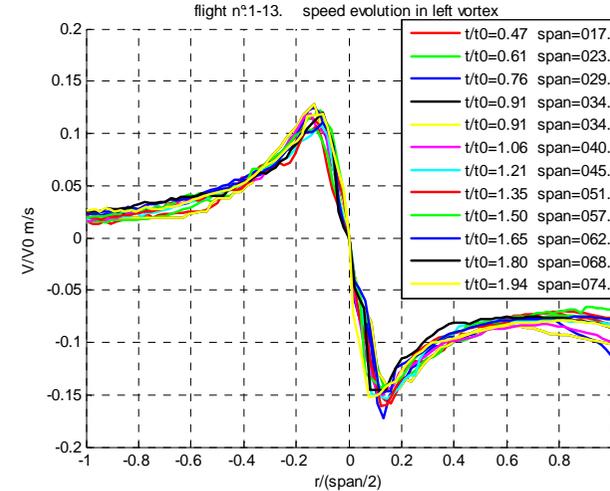
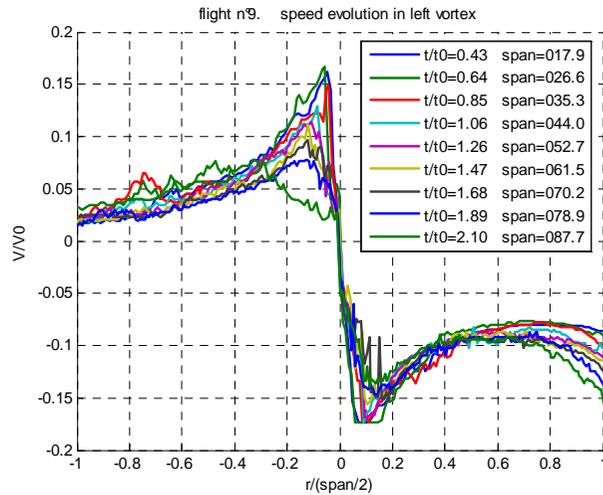
# Influence de l'atmosphère sur la durée de vie des vortex



EDR mesurés par le lidar pulsé 2  $\mu\text{m}$

# Comparison des mesures échelle réduite / aéroport

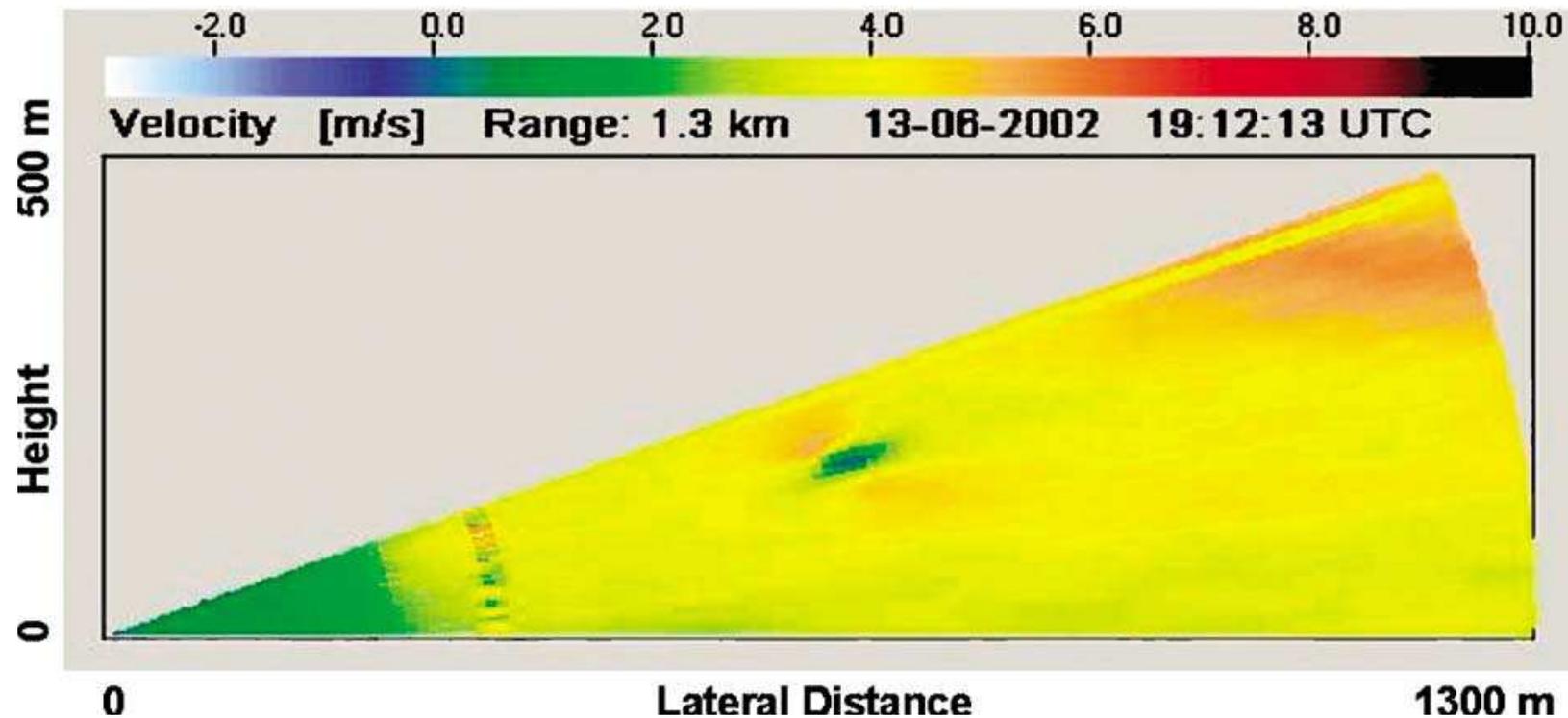
Utilisation d'échelles réduites (spatiale  $x/b$ , vitesse  $V/V_0$ , temporelle  $t/t_0$ )



## Détection des vortex par lidar impulsif

Etat de l'art : techno laser solide à 2 $\mu$ m

Système lidar du DLR avec source laser Looked Martin Coherent Technologie (LMCT)



# Détection des vortex par lidar impulsif

## Technical details of DLR's Lidar

pulsed Doppler, heterodyne  
light backscattered by aerosols

Transceiver MAG-1 (prototype CTI -> LM):

Tm:LuAG laser	
wavelength	2.022 $\mu\text{m}$
repetition rate	500 Hz
pulse energy	2 mJ
pulse length	0.5 $\mu\text{s}$

Off-axis telescope:

aperture	10 cm
----------	-------

Scanner (2 prisms):

elevation sector	0 - 30°
scan speed	2 °/s

Data acquisition:

early digitising with quick-look	500 MHz
-------------------------------------	---------

Signal processing:

four-stage algorithm



# Détection des vortex par lidar impulsif

Etat de l'art : techno laser solide à  $2\mu\text{m}$

Windtracer ( LMCT)

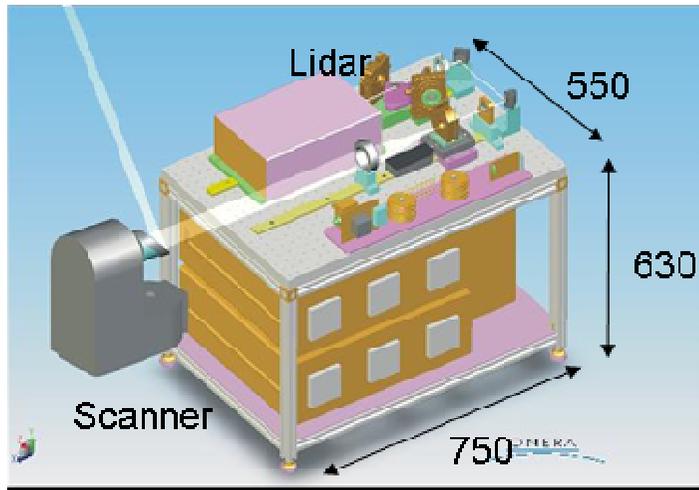


Techno chère

Alternative : laser à fibre impulsif  $1.5\mu\text{m}$

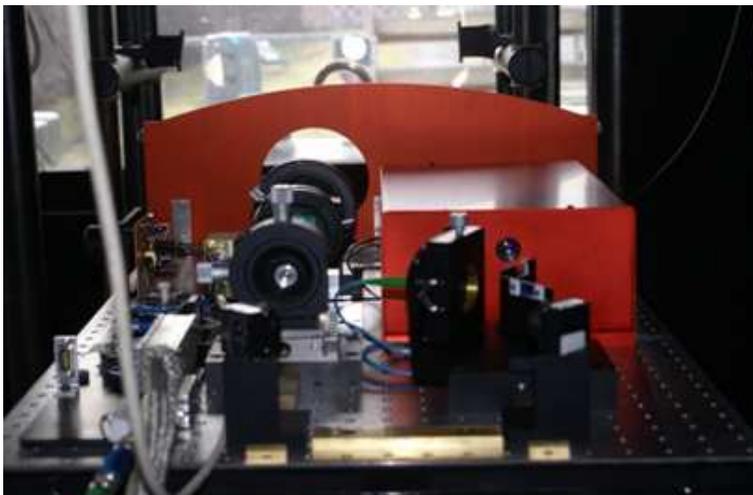
Utilisation de composants optiques telecom

# Description du lidar SWAN réalisé pour la campagne de mesures CREDOS à Francfort (Février-Mars 2007)



## Caractéristiques du lidar

- Longueur d'onde: **1.55  $\mu\text{m}$**
- Energie laser: **60  $\mu\text{J}$**
- Durée pulse laser : **200ns** Paramètres ajustables
- Cadence laser: **15kHz**
- largeur spectrale laser: **<0.5MHz**
- M2=1.3
- Maintien de polarisation



- Portée : **50m à 400m**
- Résolution en vitesse: **< 1 m/s**
- Cadence image : **0.25Hz**

# Tests CREDOS à l'aéroport de Francfort (Février-Mars 2007)



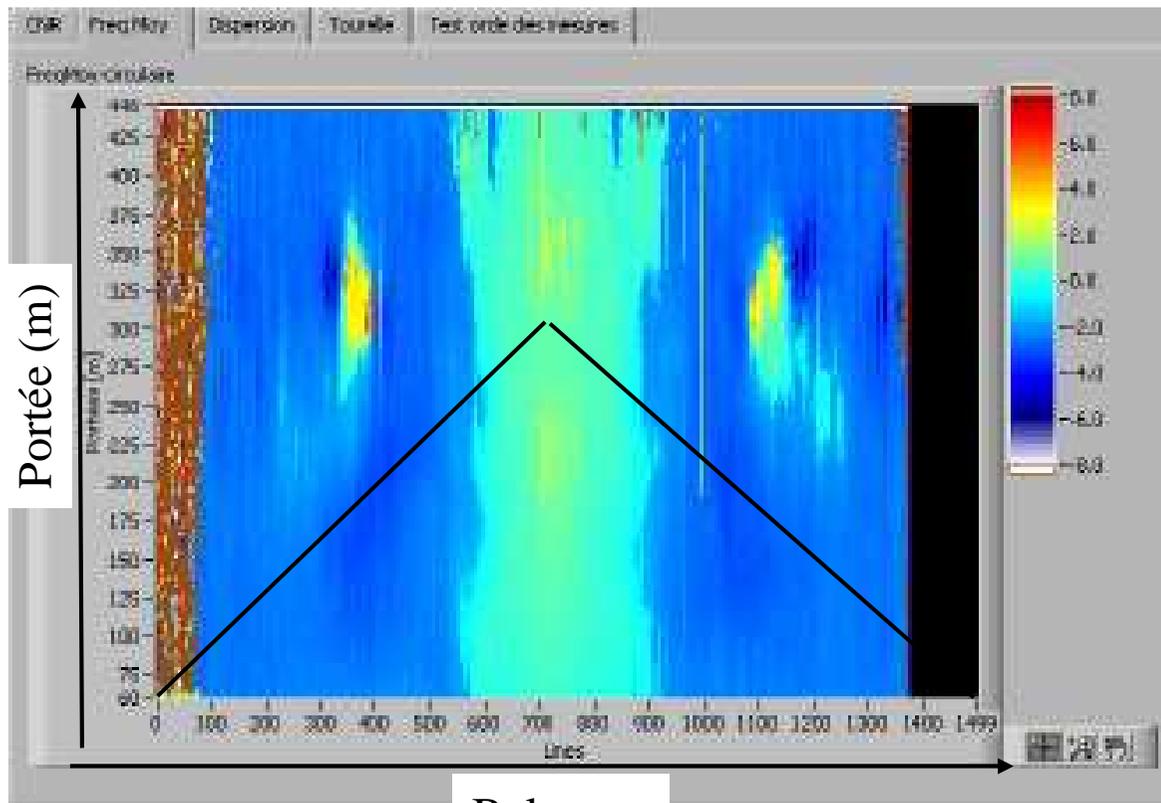
# CREDOS : Affichage temps réel du champ de vitesses

Développement d'un traitement et affichage temps reel du champ de vitesse

Résolution spatiale longitudinale : 2.4 m

Résolution spatiale latérale : 35 cm@200m(0,1°)

Résolution vitesse: < 1 m/s



Carte des barycentres de vitesse

Temps 1 balayage=4s

Nombres cases distance=185

Balayage

# CREDOS : Affichage temps réel du champ de vitesses

Résolution spatiale longitudinale : 2.4 m

Echantillonnage 500 MHz,

FFT sur des portes de de 512 points, et décalage de 8 points

→ resolution spatiale =  $c * (8 / 500E6) / 2 = 2.4 \text{ m}$

Résolution spatiale latérale : 35 cm@200m(0,1°)

laser 15 kHz + balayage 15°/s : un tir laser tout les 0.001 °

**moyennage de 100 spectres** → 0.1 °

Résolution vitesse: < 1 m/s

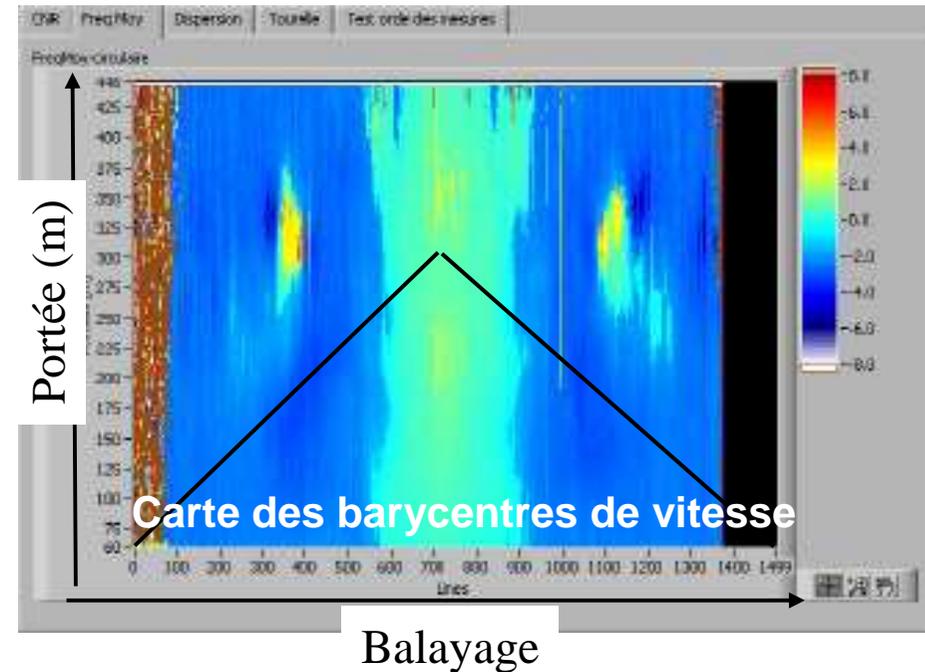
Fech=500Mhz → Fmax = 250 Mhz

$$\rightarrow V_{\max} = \frac{F_{\max} * \lambda}{2} \quad V_{\max} = 193 \text{ m/s}$$

$$\Delta V = V_{\max} / 512 * 2 = 0.75 \text{ m/s}$$

Temps 1 balayage=4s

Nombres cases distance=185



# Traitement du signal pour le lidar vortex

Les paramètres des vortex à mesurer sont :

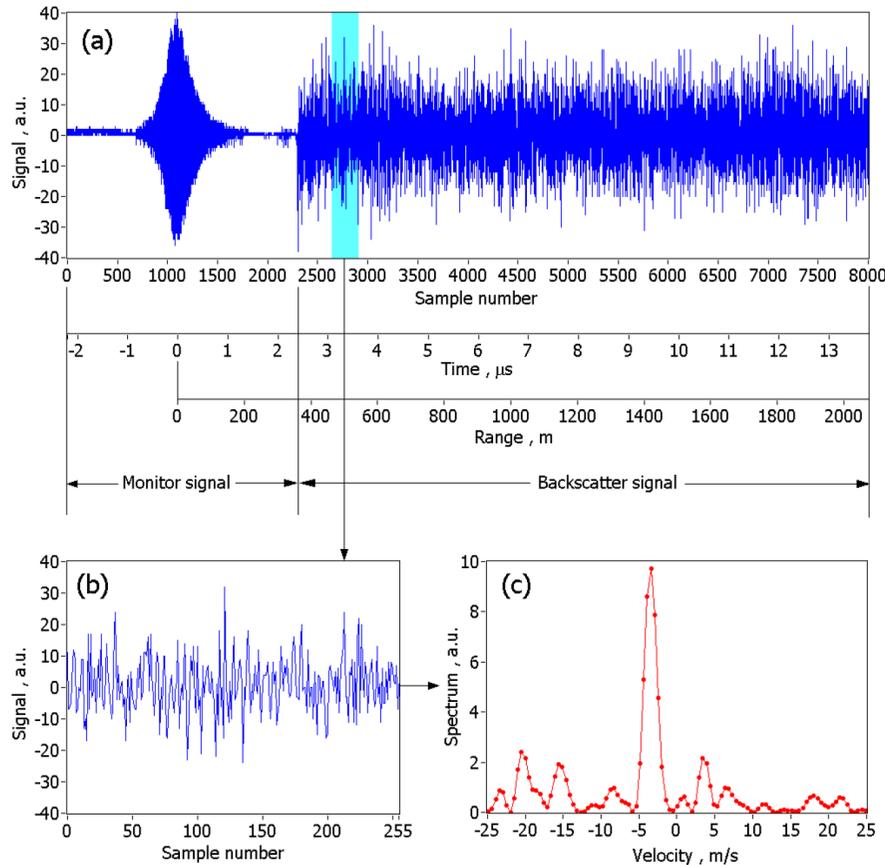
- La position des cœurs des tourbillons
- Les profils de vitesse des tourbillons
- La circulation

# Traitement du signal pour le lidar Doppler vortex pulsé (1/6)

## Four-stage process: Stage 0

raw data:

- heterodyne signal of laser pulse
- atmospheric backscatter signal (2 ns/sample)

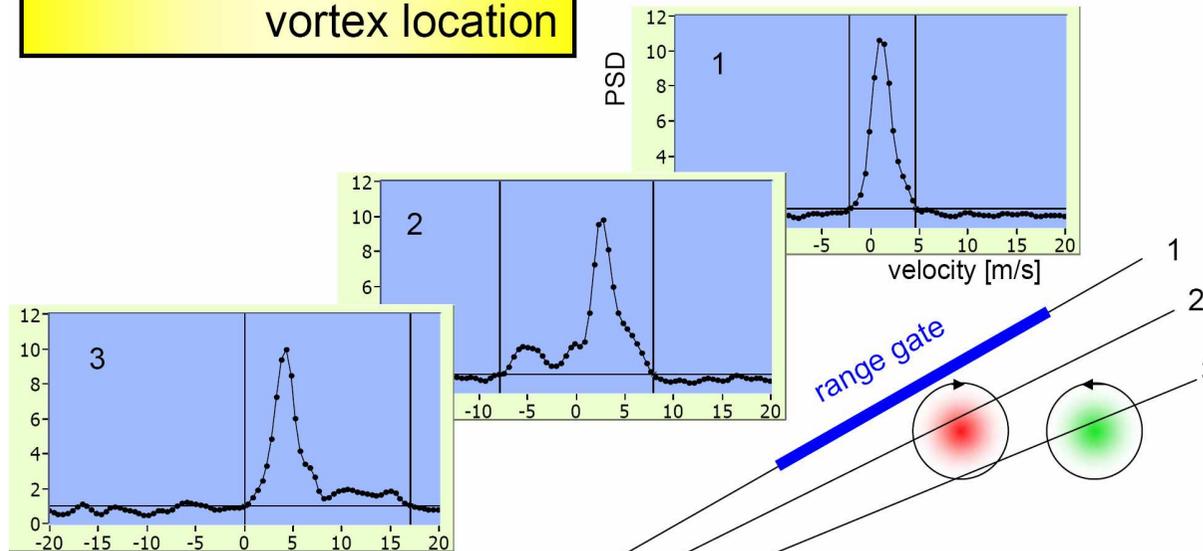


Doppler spectra:

- Fourier transform (256 samples)
- with zero padding (768 samples)

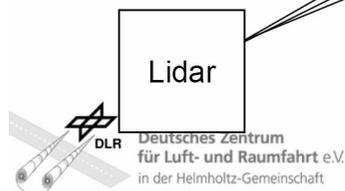
# Traitement du signal pour le lidar Doppler vortex pulsé (2/6)

Stage 1: Spectra at wake vortex location



25 shots accumulated  
definition of velocity minima and maxima:

- selection of threshold
- search of first intersections  
left and right of main spectral peak



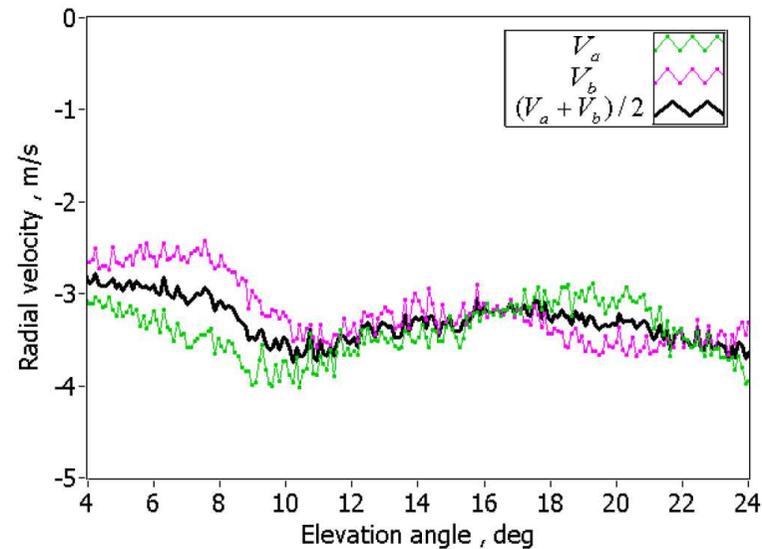
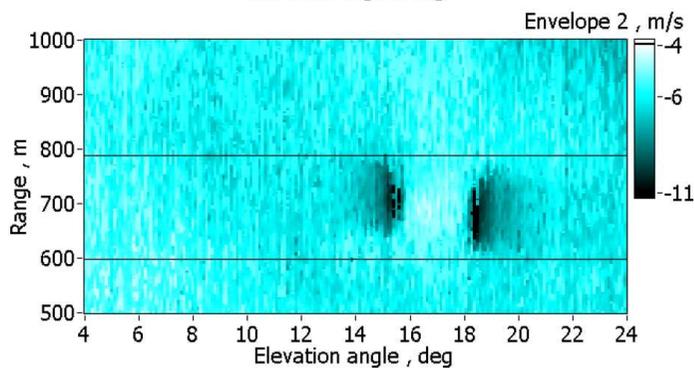
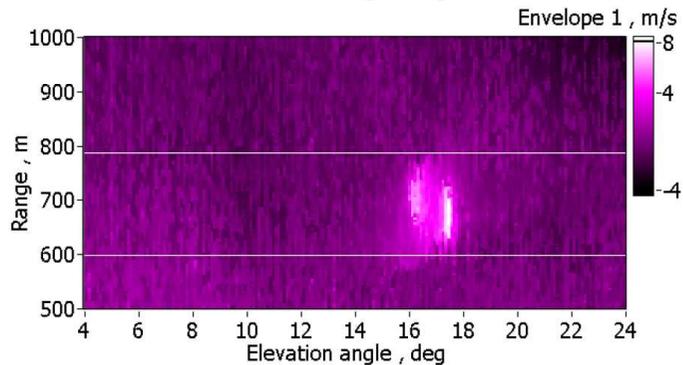
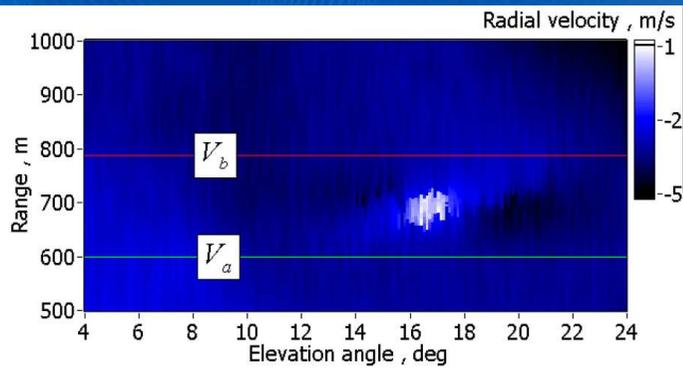
Thomas Gerz, Institut für Physik der Atmosphäre

WakeNet-3 / GreenWake WS on WV & Wind Monitoring, 29. -30. March 2010 at Thales R&D in Palaiseau, 6

# Traitement du signal pour le lidar Doppler vortex pulsé (3/6)

## Stage 2:

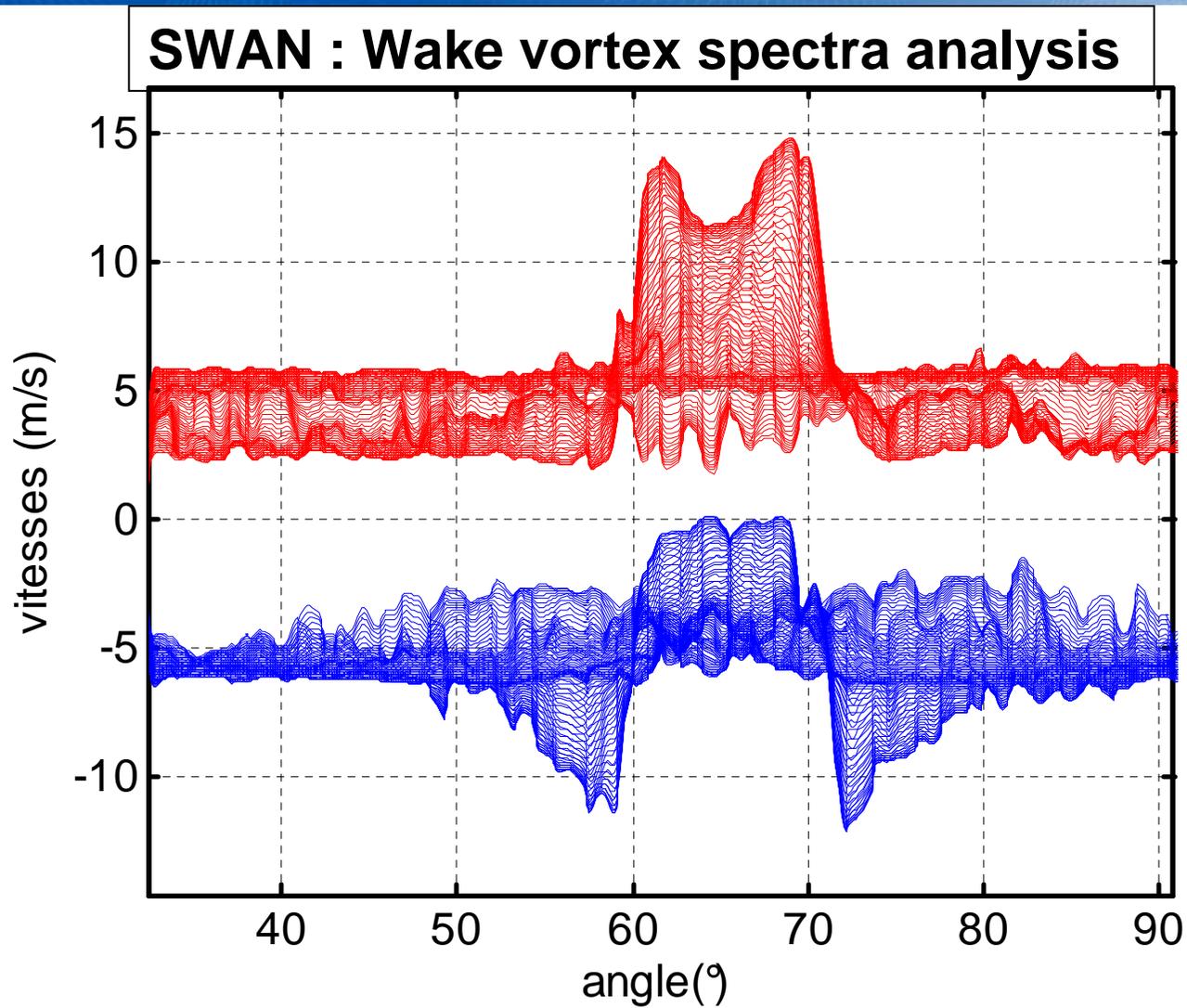
- eliminate background wind
- determine envelopes



background wind

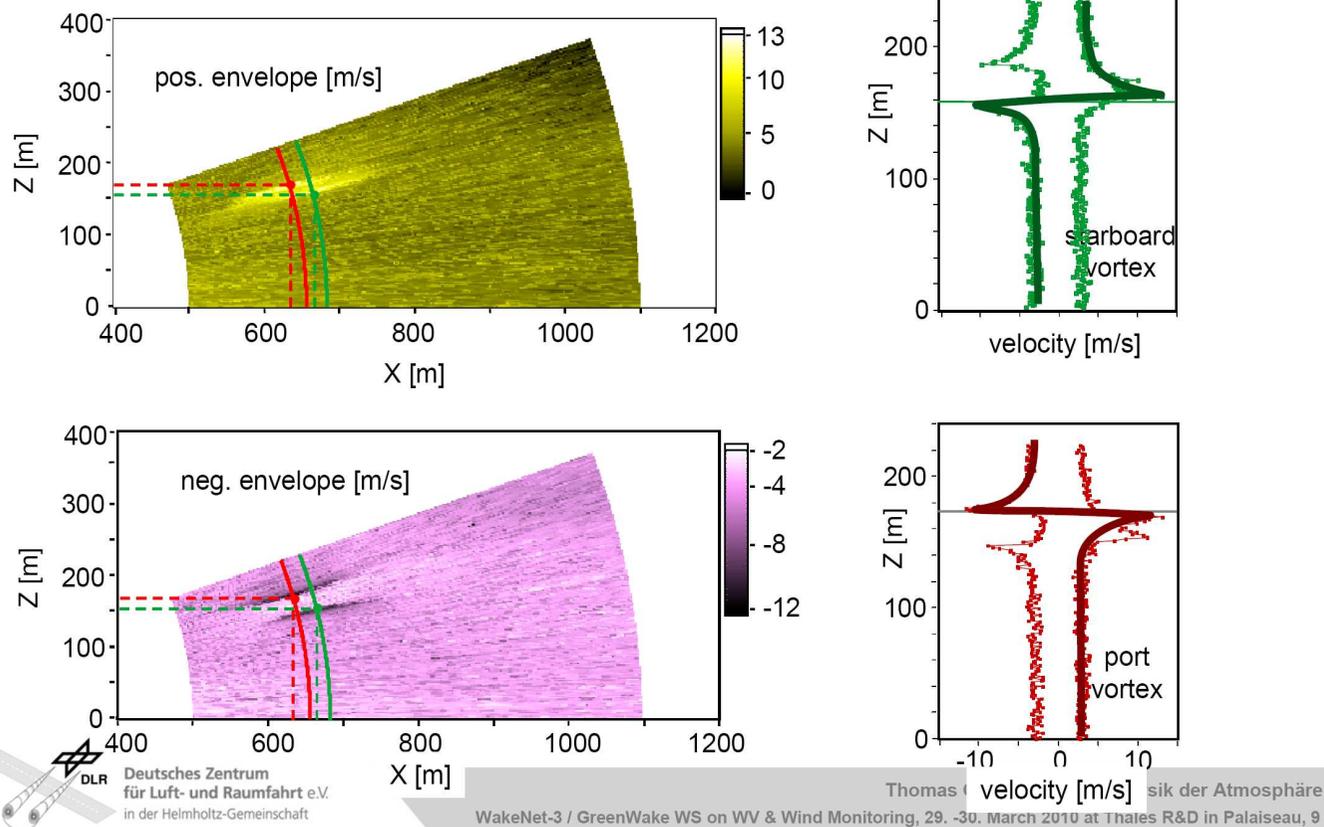
positive and negative envelopes  
of radial (LOS) velocities

## Traitement du signal pour le lidar Doppler vortex pulsé (4/6)



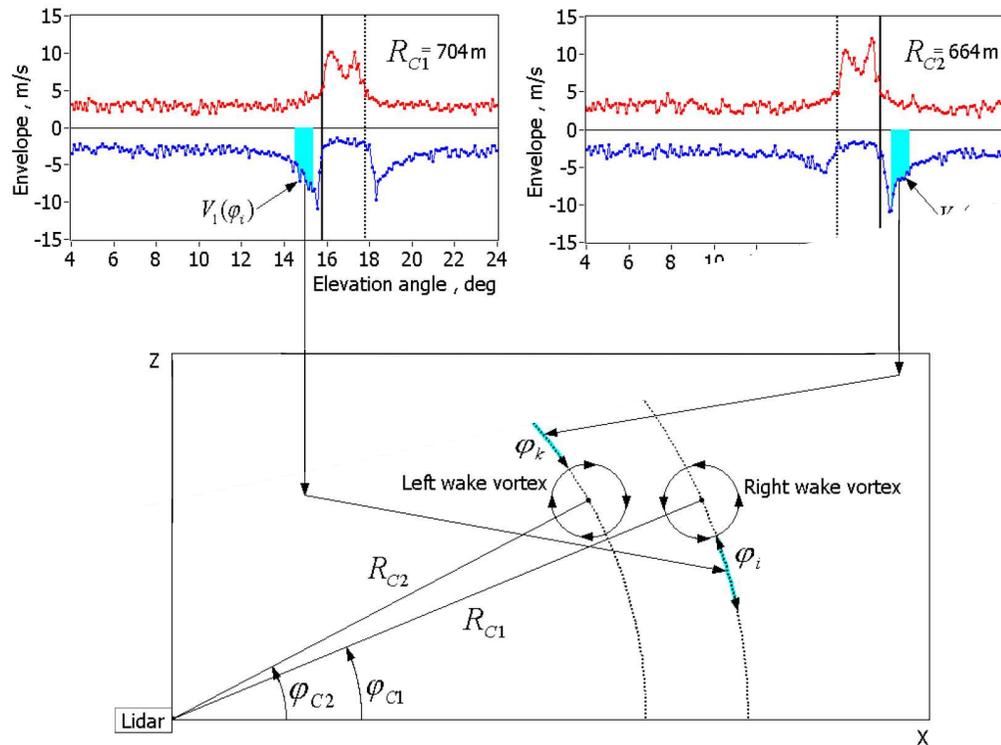
# Traitement du signal pour le lidar Doppler vortex pulsé (5/6)

**Stage 3:** (i) range and elevation of max/min signal strength: estimation of core position  
(ii) profiles of tangential velocity at identified ranges



# Traitement du signal pour le lidar Doppler vortex pulsé (6/6)

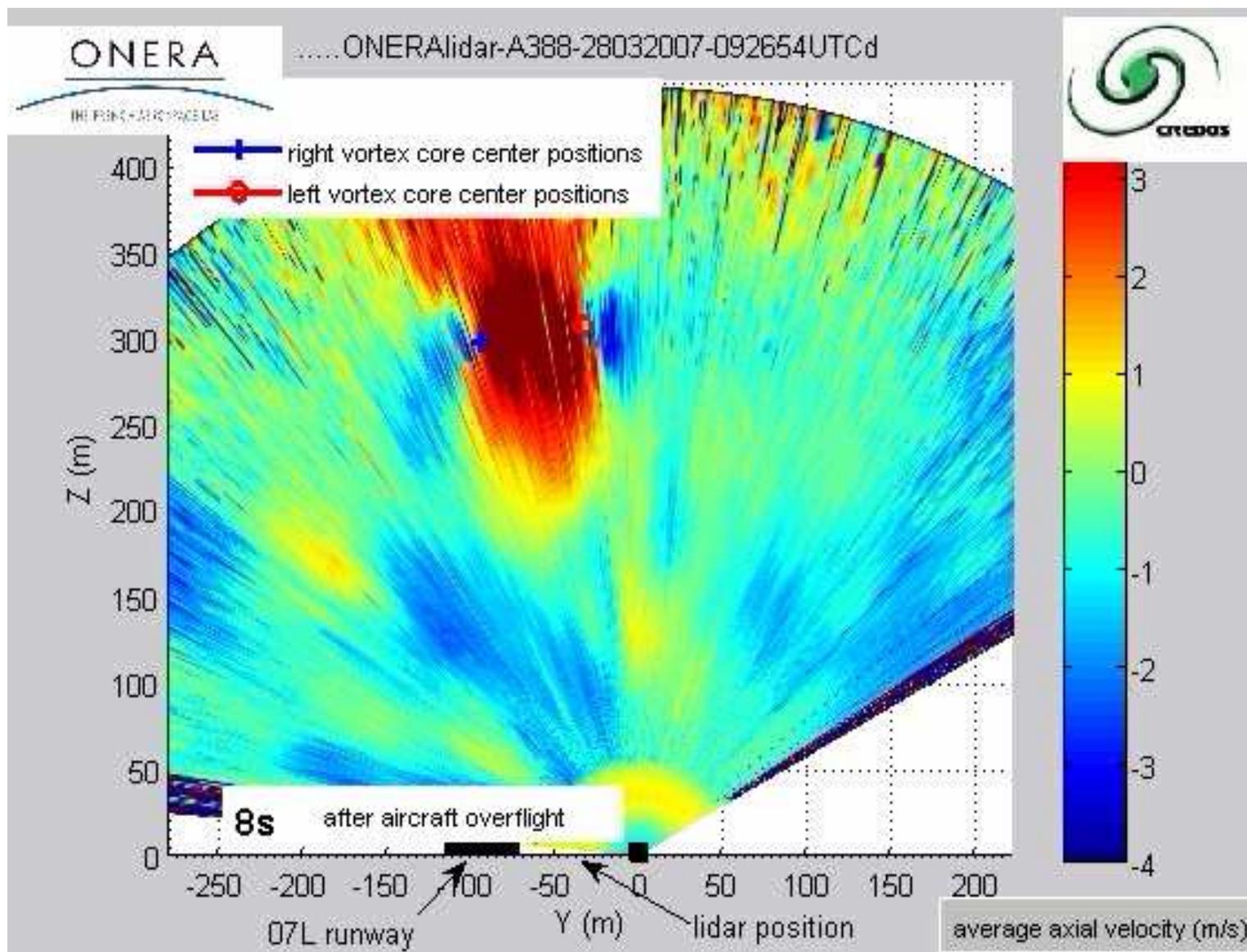
## Stage 4: compute circulation



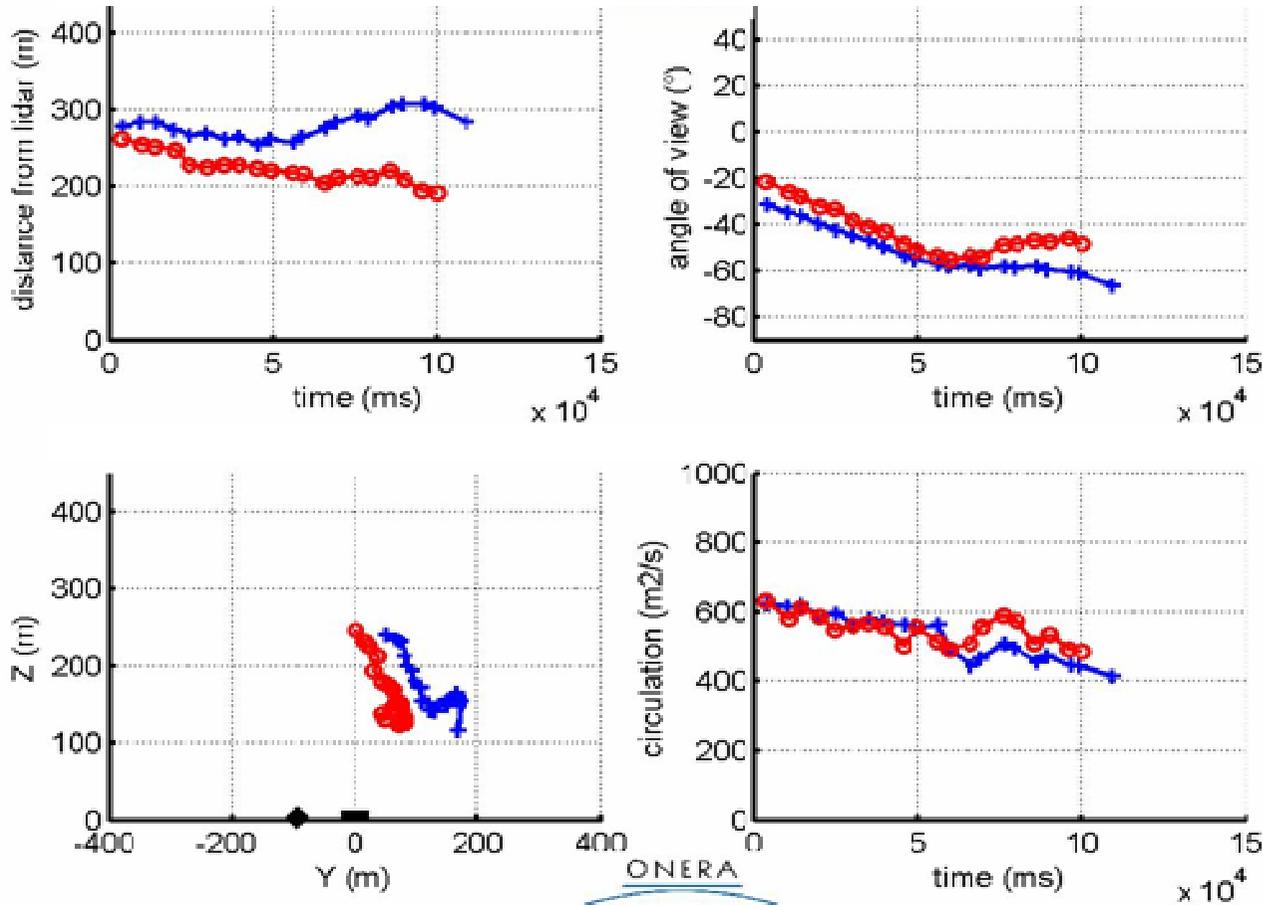
vortex circulation:  
integration method  
e.g. 5 - 15 m for  
vortices of large  $a/c$

# CREDOS CAMPAIGN Orly/Francfort 2007

## B744



# Données vortex



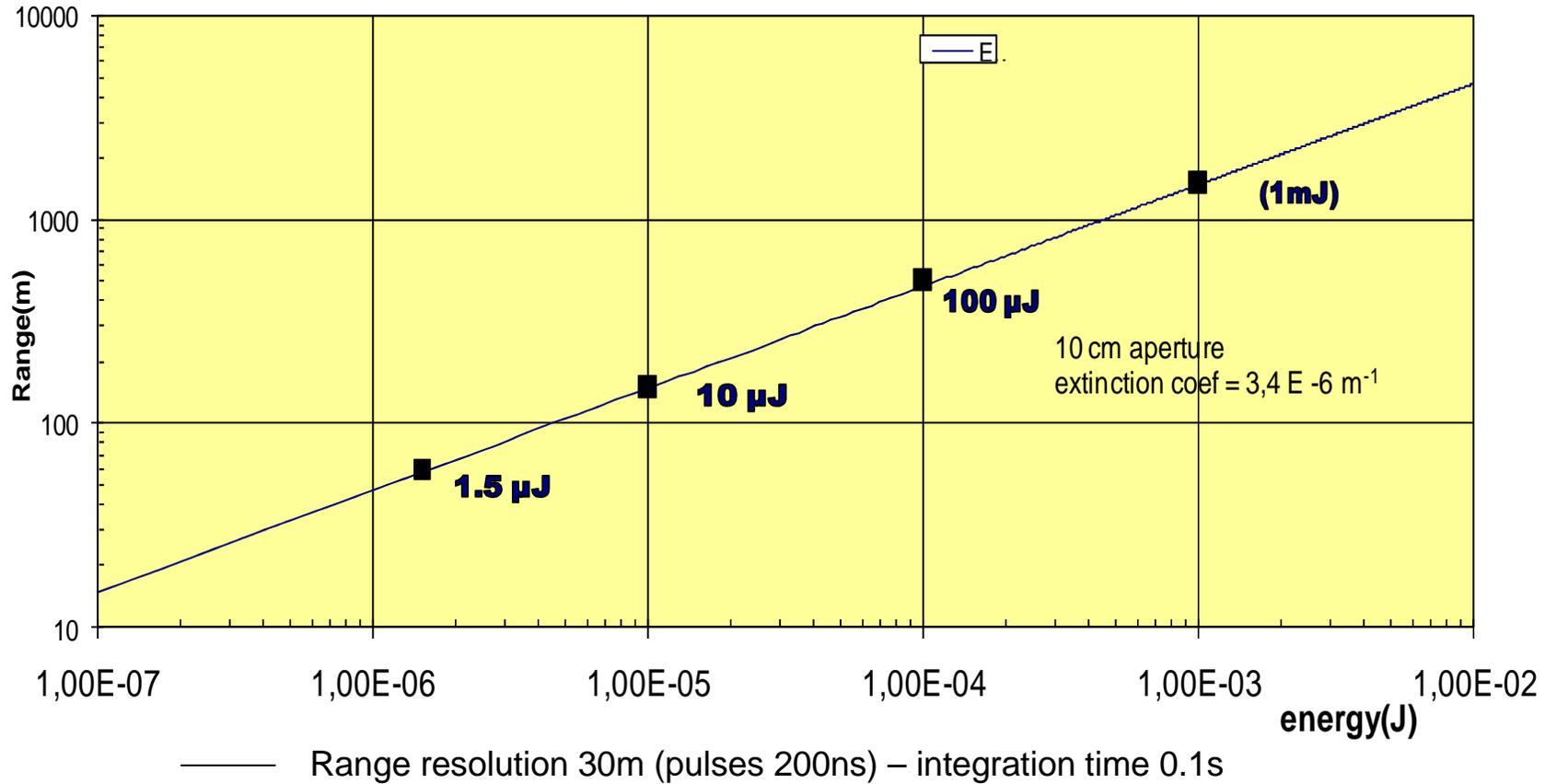
Ex : B747

The core position error is about  $\pm 2$  m

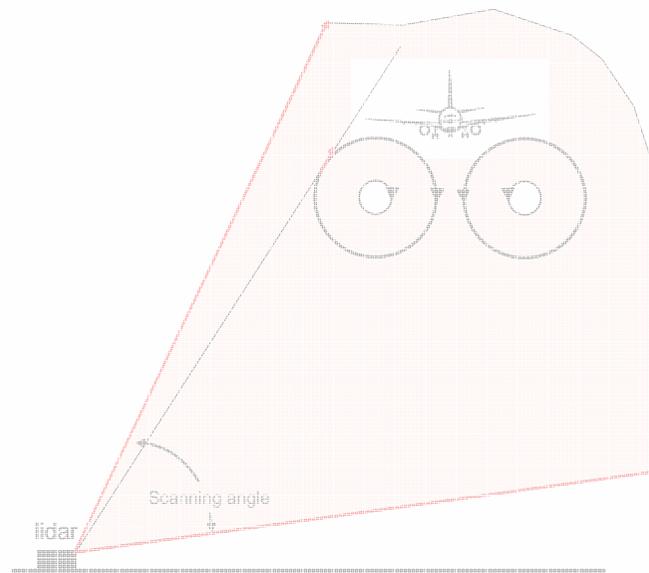
The circulation error is about 10%.

# Lidar range vs Pulse Energy

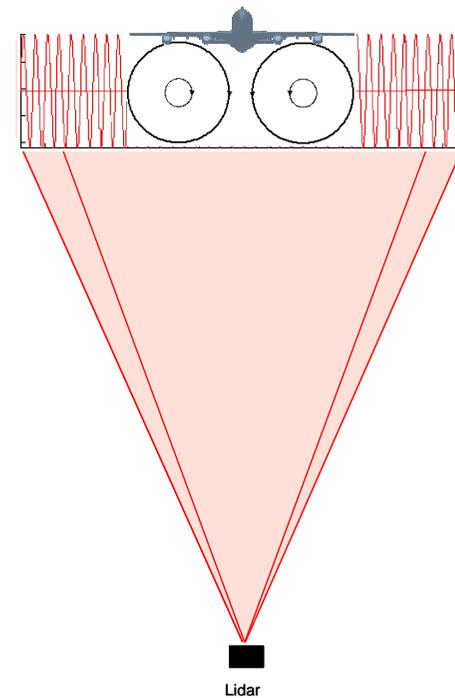
## 1.5 $\mu\text{m}$ pulsed Lidar range as a function of laser energy



# Mesure des « wake vortex » par lidar



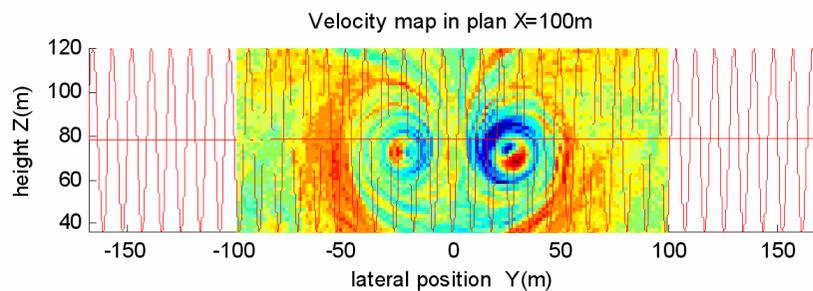
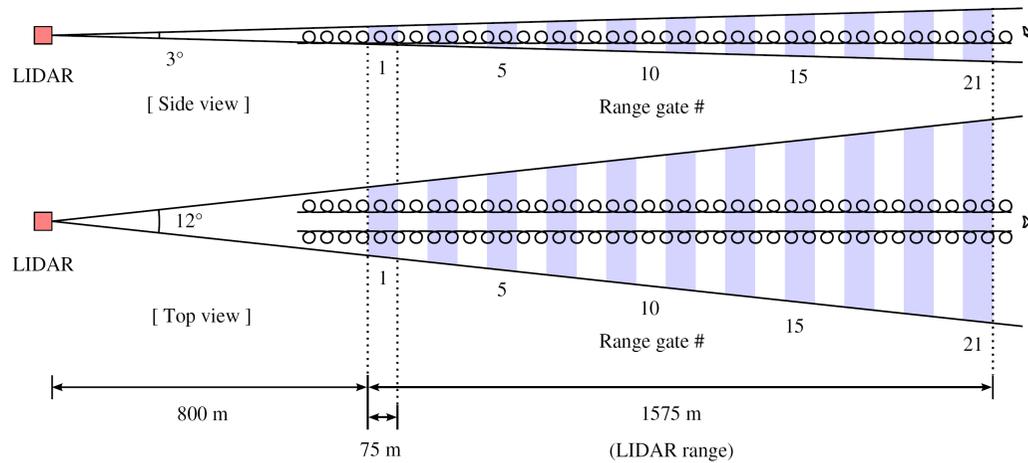
Détection transversale  
sol



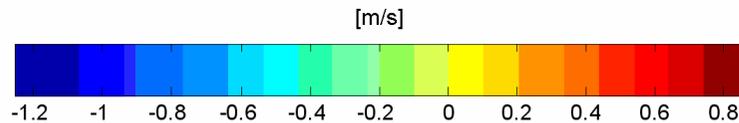
Détection axiale  
Embarquée ou sol

# Detection axiale des tourbillons de sillage

## Geometrie de detection

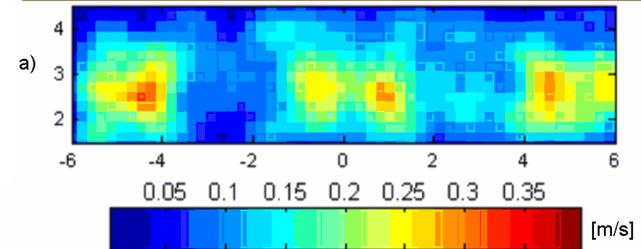


## Modélisation du tourbillon projeté sur l'axe lidar



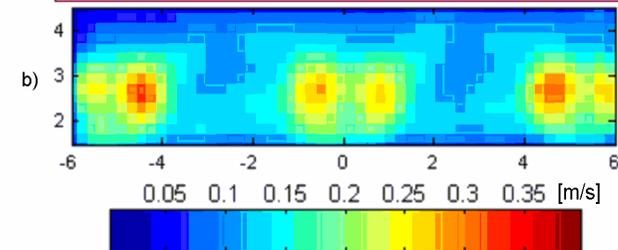
## Projet FIDELIO simulation lidar + tourbillon

Lidar simulations: Radial velocities dispersion. MLE. X=2120

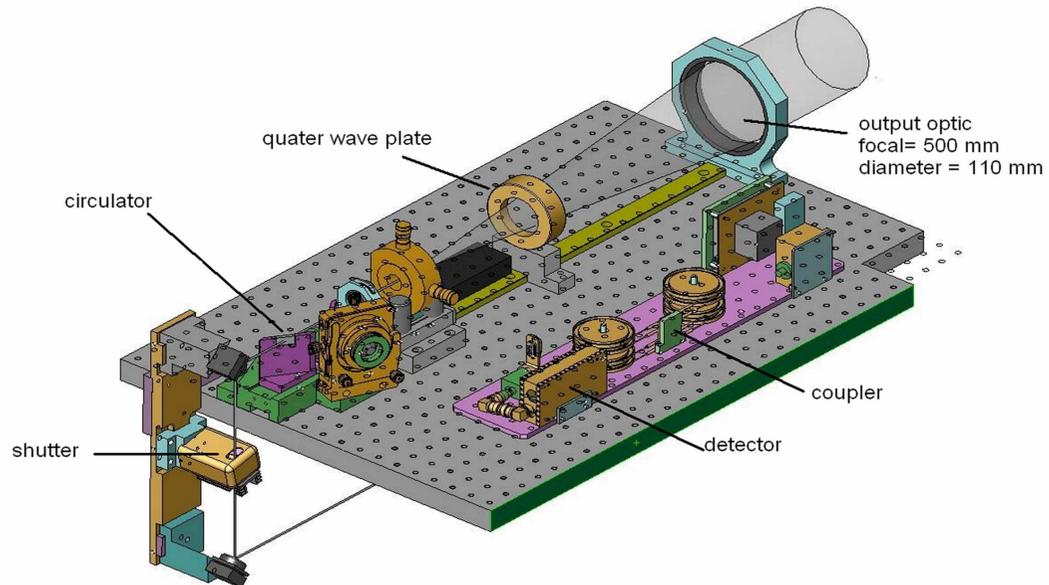


CC=0.74 laser energy :0.001; pulse duration:8e-007  
PRF:4000; Beta :1e-007; overlap:0Nbf=0Cn2=1e-014

Theoretical Radial velocities dispersion ...X=2118.75



# FIDELIO : architecture lidar

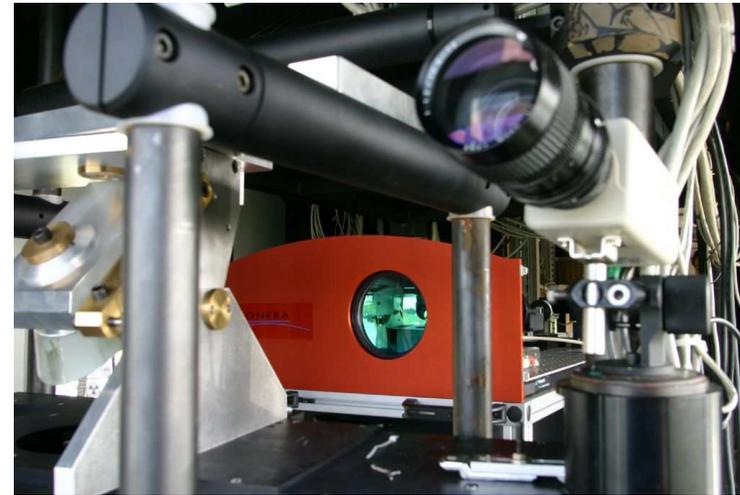


## Caractéristiques du lidar

- Longueur d'onde: **1.55  $\mu\text{m}$**
- Energie laser: **0.1 mJ**
- Durée pulse laser: **800ns**
- Cadence laser: **10kHz**
- M2=1.3
- Maintien de polarisation
  
- Portée : **0.5 à 1.6 km**
- résolution : **: 1 m/s**
- Cadence image : **0.2Hz**

Acquisition and  
real time display

# FIDELIO :Field tests



2008-05-07 17:41:30.52 UTC - MARK 02 - FIDELIO Ground Tests

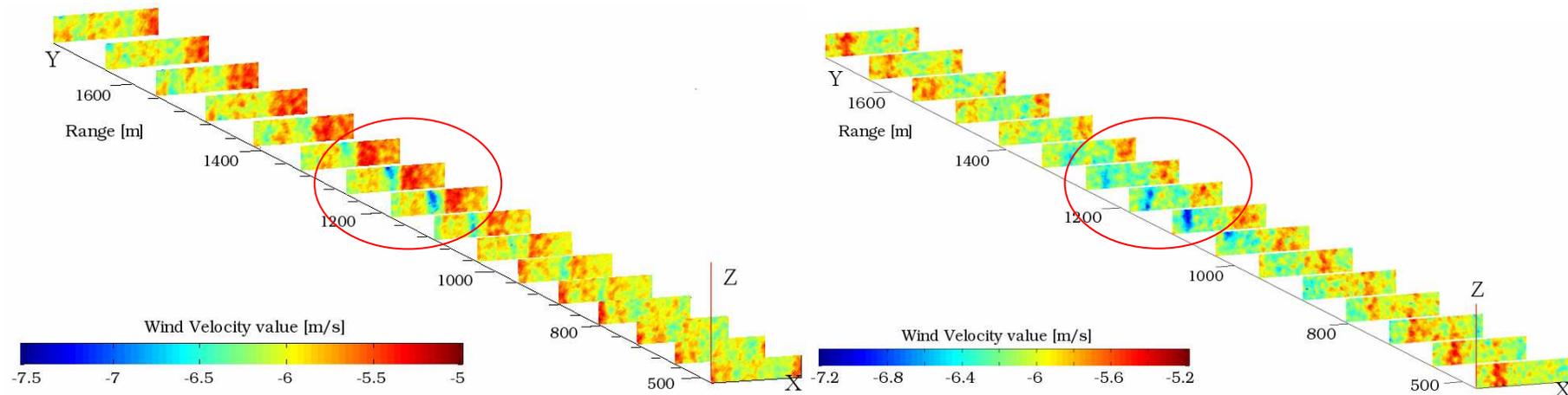
Estimated parameters:

Aircraft type: A310  
Distance: 799,0 m  
Roll: 0,0 deg

(c) 2008 S. Lugan - UCL TELE



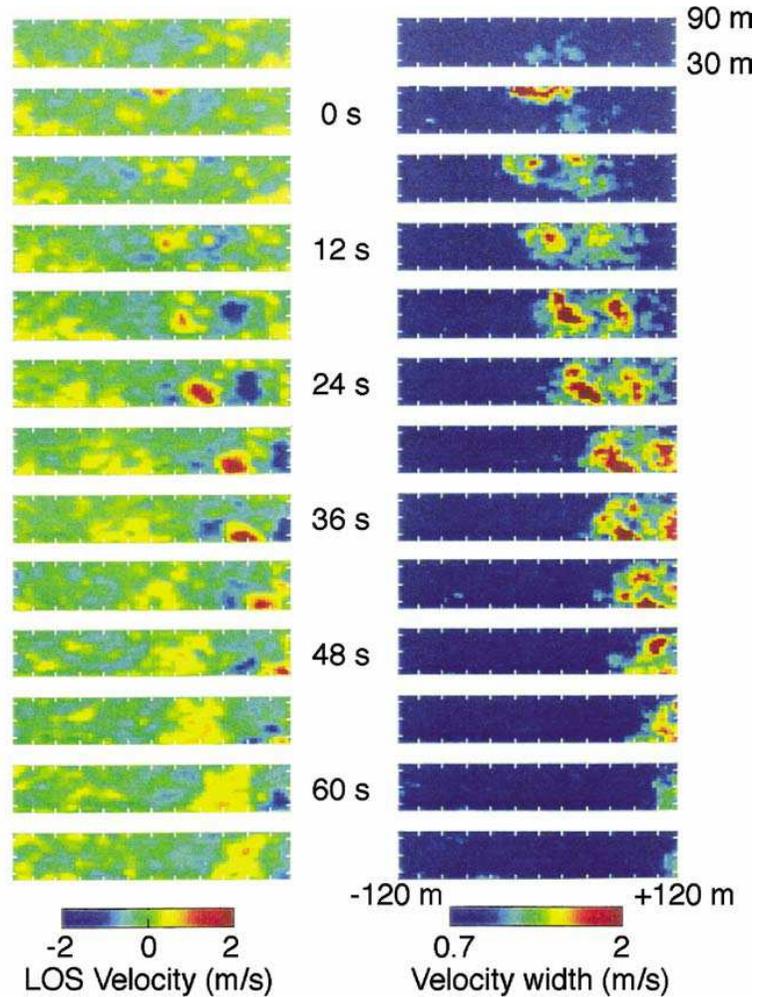
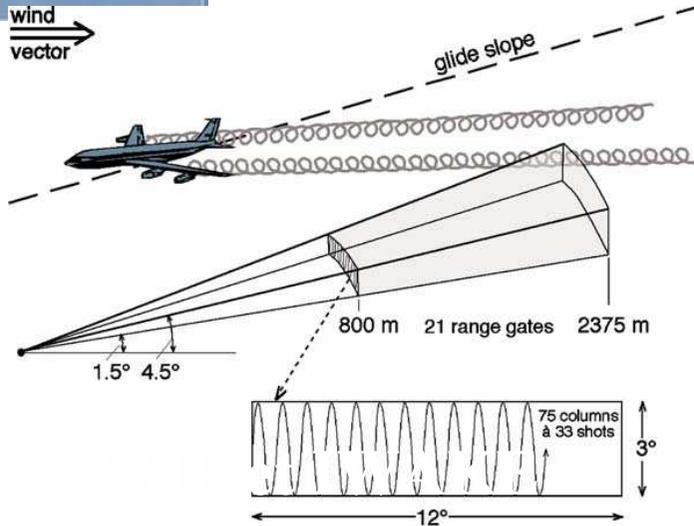
# FIDELIO :Field tests



- 3D representation of wake vortex detection
- two successive scans a few seconds after a B747 landing.
- each rectangle corresponds to a range gate



# Détection axiale des wake vortex



- Faisabilité de la détection axiale démontrée dans projets MFLAME and IWAKE

Projets européens ( Thales, DLR, UCL ...)

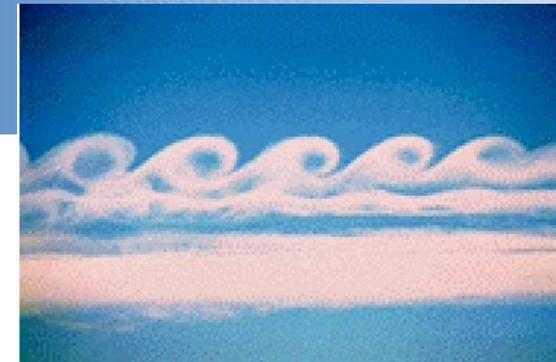
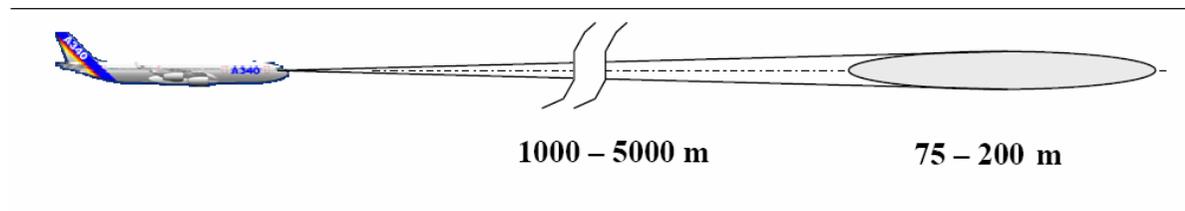
Source laser solide  $2 \mu\text{m}$  ,  $5\text{mJ}$  ,  $500 \text{ Hz}$

- **Au sol**
  - Ⓢ Turbulence de sillage /wake vortex
  - Ⓢ Cisaillement / rafale (Wind hazard)
  
- **Embarqués**
  - Ⓢ Turbulence de sillage /wake vortex
  - Ⓢ **Turbulence en air clair**
  - Ⓢ **Cisaillement / rafale (Wind hazard)**

# Senseur d'alerte : turbulence en air Clair

Détection longue portée : > 10 km

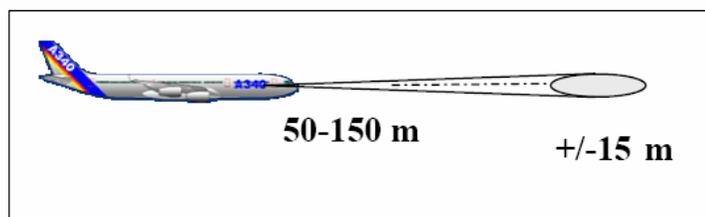
Mid-range WARNING systems



lidar DELICAT  
lidar Rayleigh densité

Detection courte portée : 50 à 100 m

Shorter range systems with high depth resolution suitable for CONTROL (feed-back into flight control)



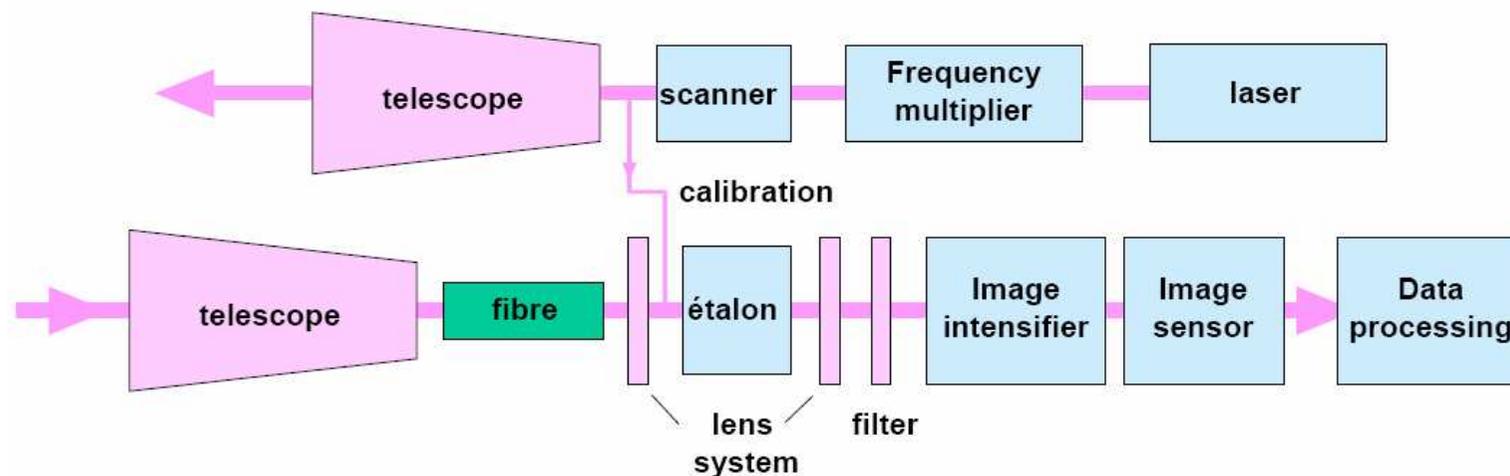
Method of AWIATOR

*Illustrations extraites de la présentation à CLRC 2009 de N.Schmitt EADS*

# AWIATOR Lidar



AWIATOR turbulence sensor layout (UV, direct detection):



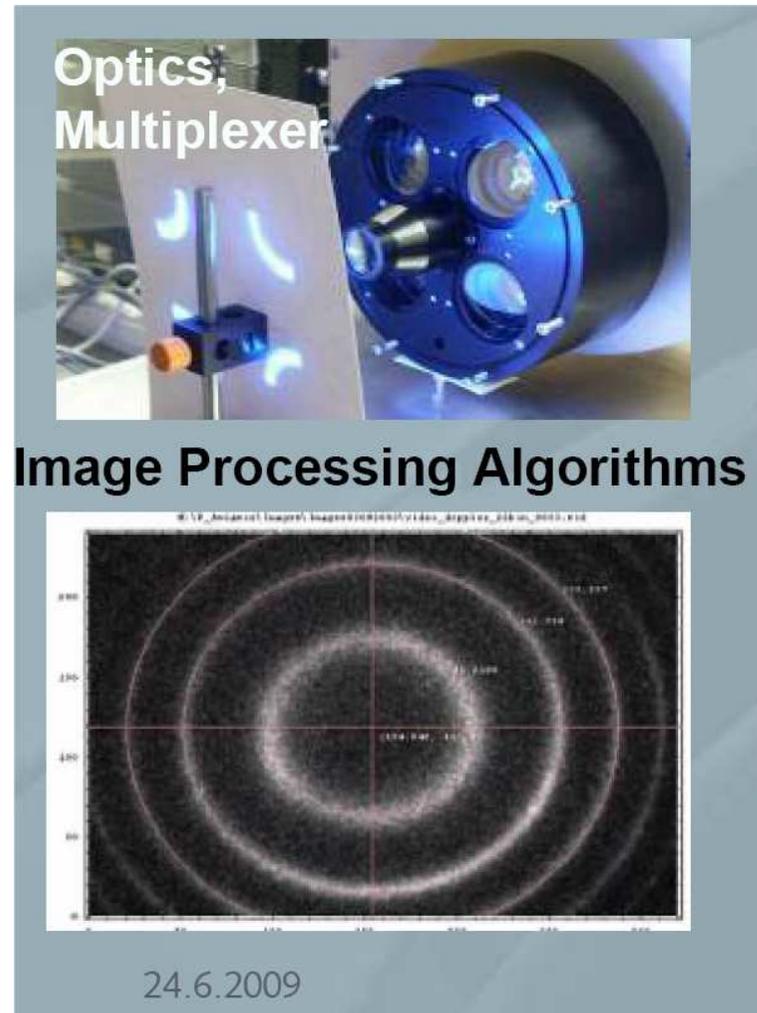
Using

- UV, micropulse lidar (355 nm, ~ 10 ns, 20 kHz, 150  $\mu$ J, 3W av.)
- direct detection, fringe imaging technique (60 Hz)

# Lidar AWIATOR



**Forward looking turbulence/gust UV  
LIDAR beneath A340-300 cockpit**



*Illustrations extraites de la présentation à CLRC 2009 de N.Schmitt EADS*

## Résumé : Senseurs lidar pour les applications aéronautiques (1)

<i>Type de senseurs</i>	<i>Type de mesure</i>	<i>Principe de la mesure</i>	<i>Type de lidar</i>	<i>exemple</i>
<b>Senseurs de navigation :</b> mesure la vitesse vraie de l'avion Étalonnage des sondes pitots / mesure primaire				
	1 point , 3 composantes Quelques mètres à une 50 mètres devant l'avion	Doppler Mie multiparticules	Hétérodyne continu ou pulsé 10.6 $\mu\text{m}$ , 1.5 $\mu\text{m}$	ALEV DALHEC DALEV
	1 point , 3 composantes Quelques centimètres/mètres devant l'avion	Doppler Mie monoparticule	continu Hétérodyne 1.5 $\mu\text{m}$ 1.06 $\mu\text{m}$	DALAS Boeing Doppler lidar
	1 point , 3 composantes Quelques mètres à une 50 mètres devant l'avion	Doppler Rayleigh	pulsé détection directe 266 nm	MOADS

## Résumé : Senseurs lidar pour les applications aeronautiques (2)

Type de senseurs	Type de mesure	Principe de la mesure	Type de lidar	Exemple
<b>Senseurs d'alerte</b> d'évènements dangereux				
Turbulence de sillage Wake vortex	Cartographie vitesses projetées (2D transverse / 3D axial)	Doppler Mie  (Rayleigh directe)	Pulsé hétérodyne 1.5 $\mu\text{m}$ , 2 $\mu\text{m}$  Pulsé directe 355 nm	CREDOS, FIDELIO MFLAME/ IWAKE Greenwake (nouveau projet )
Cisaillement / turbulence	Multipoint différentiel 50 /150 m devant l'avion	Doppler Rayleigh  Doppler Mie heterodyne	Pulsé directe 355 nm  Pulsé hétérodyne	AWIATOR
Turbulence en air clair	Le long de l'axe 10 km devant l'avion	Rayleigh densité	Détection directe Pulsé , 355 nm	DELICAT (nouveau projet)

# Applications aéronautiques des lidars vent

## Applications éoliens des lidars vent

### Applications aéronautiques des lidars vent

#### Senseurs de navigation

- mesure de vitesse air 1 point 3 composantes (
  - ④ Mie multiparticules
  - ④ Mie monoparticules
  - ④ Rayleigh

#### Senseurs d'alertes

- Au sol
  - ④ Turbulence de sillage / wake vortex
  - ④ Wind hazard
- Embarqués
  - ④ Turbulence de sillage /wake vortex
  - ④ Turbulence en air clair
  - ④ Wind hazard

### Applications éoliens des lidars vent

- **Caracterisation de site**
- **Optimisation des turbines**

# Lidar Doppler pour l'éolien

## Étude locale du gisement éolien :

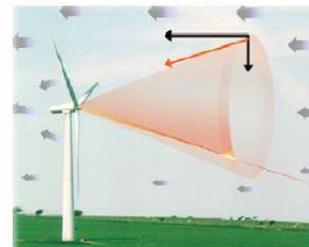
### Centrale éolienne :

qq dizaines de machines  
espacement moyen 500 m  
hauteur 80 à 100m

### Utilisation du lidar pour :

- Etude de la répartition du vent à la hauteur des moyeux
- Etude de la repartion du vent entre les différents moyeux

### Optimisation du fonctionnement



# Lidar Doppler pour l'éolien

Fiche technique issue d'un étude comparative

Risø DTU, Technical University of Denmark, Renewable Energy Lab



## Zephyr – Natural Power Consultants

- Continuous Wave
- Variable focus setting
- VAD Scan 50 points, rotating wedge
- 60° elevation angle
- Cloud correction algorithm
- CE marked – eyesafe IEC 60825-1

- 1.56  $\mu\text{m}$  fiber laser
- 1 W output power
- 7 cm diameter lens
- No offset on LO
- RIN and not head or tail wind
- One LOS every 20 ms
- Frequency resolution 200 kHz

- Measures to 200 m in good conditions
- Minimum range 10 m
- 5 heights sequentially
- 3 sec per height, 1 sec to change
- about 30 measurements at one height in 10 min
- € 125.000



16 Risø DTU, Technical University of Denmark

# Lidar Doppler pour l'éolien

Fiche technique issue d'un étude comparative

Risø DTU, Technical University of Denmark, Renewable Energy Lab



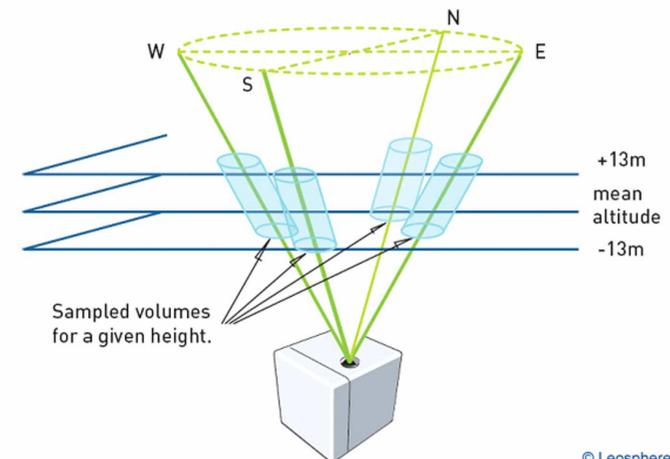
## WindCube – Léosphère

- Range gated
- Fixed focus at ~100 m
- 4 directions, 90° start-stop wedge
- 60° elevation angle
- eyesafe IEC 60825-1

- Measures to 200 m in good conditions
- Minimum range 40 m
- 10 heights in parallel
- 4 sec per full revolution
- about 600 measurements in 10 min (125 completely uncorrelated)
- € 150.000

- 1.54  $\mu\text{m}$
- 200 ns pulse
- 10  $\mu\text{J}$
- 20 kHz
- 500 ms to get one LOS velocity
- 10000 averages per LOS
- 5 cm diameter lens
- Offset on LO
- Frequency resolution 5 MHz

17 Risø DTU, Technical University of Denmark



# Lidar Doppler pour l'éolien

Fiche technique issue d'un étude comparative

Risø DTU, Technical University of Denmark, Renewable Energy Lab

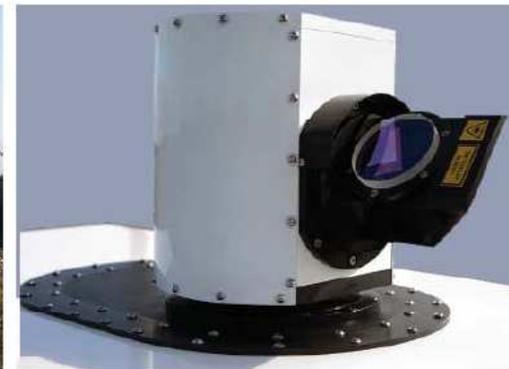


## Galion – Sgurr Energy

- Range gated
- Collimated
- two axis scanner head
- eyesafe IEC 60825-1
- 9 month warranty

- Measures to 200 m in good conditions
- 20 sec per full revolution
- 30 uncorrelated meas in 10 min (in 4 direction mode)
- + 30 vertical meas
- € 150.000

- 1.54  $\mu\text{m}$
- 180 ns pulse
- 10  $\mu\text{J}$
- 20 kHz
- 50 mm aperture
- Offset on LO



# Lidar Doppler pour l'éolien

Fiche technique issue d'un étude comparative

Risø DTU, Technical University of Denmark, Renewable Energy Lab

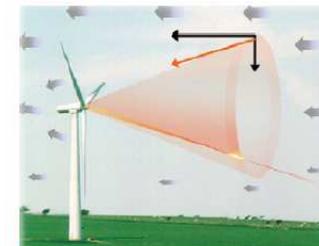


## Vindicator – Catch The Wind

- Range gated
- Three telescopes
- No moving parts
- Turbine mounted

- Measures to 300 m in good conditions
- Aim price \$125.000

- 200 ns pulse



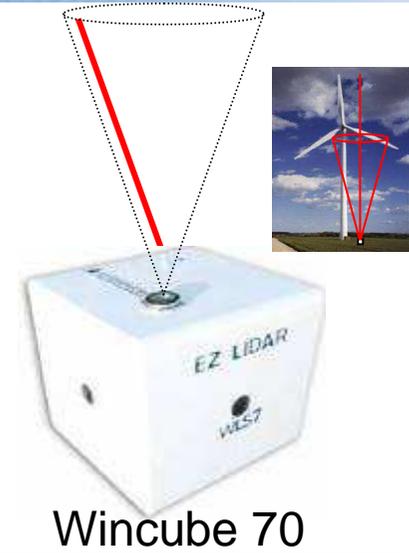
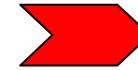
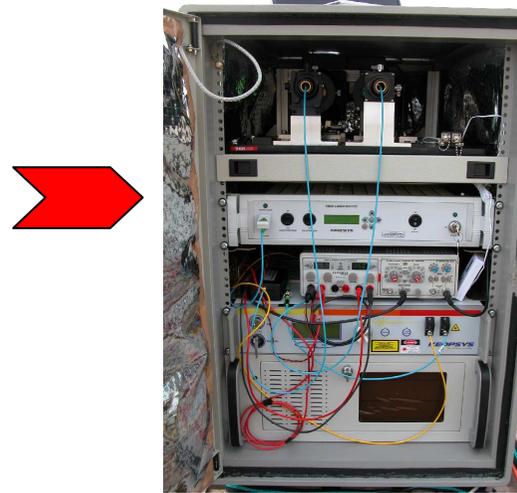
19 Risø DTU, Technical University of Denmark

# From Laboratory to operational product

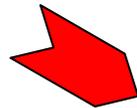
Onera Lab 2005



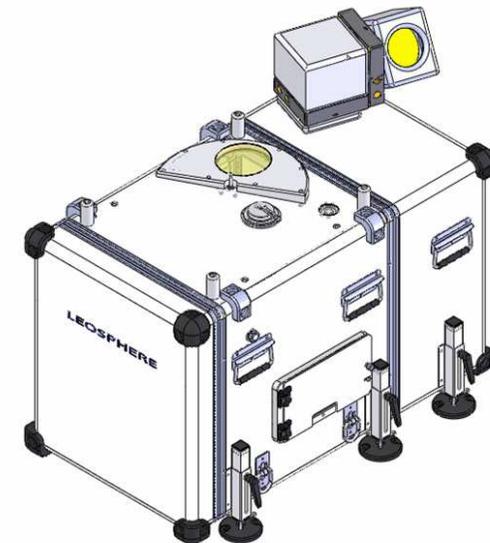
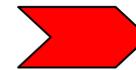
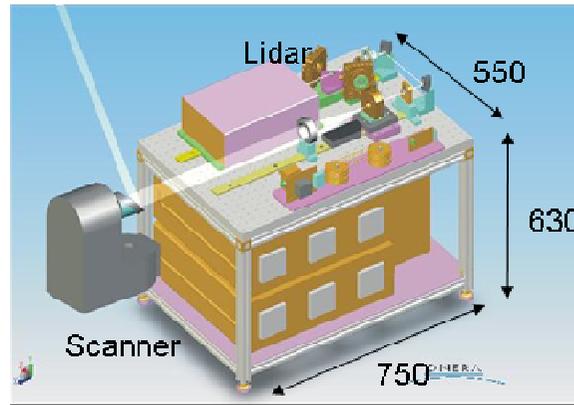
Leosphere/Onera 2006 2007



Wincube 70

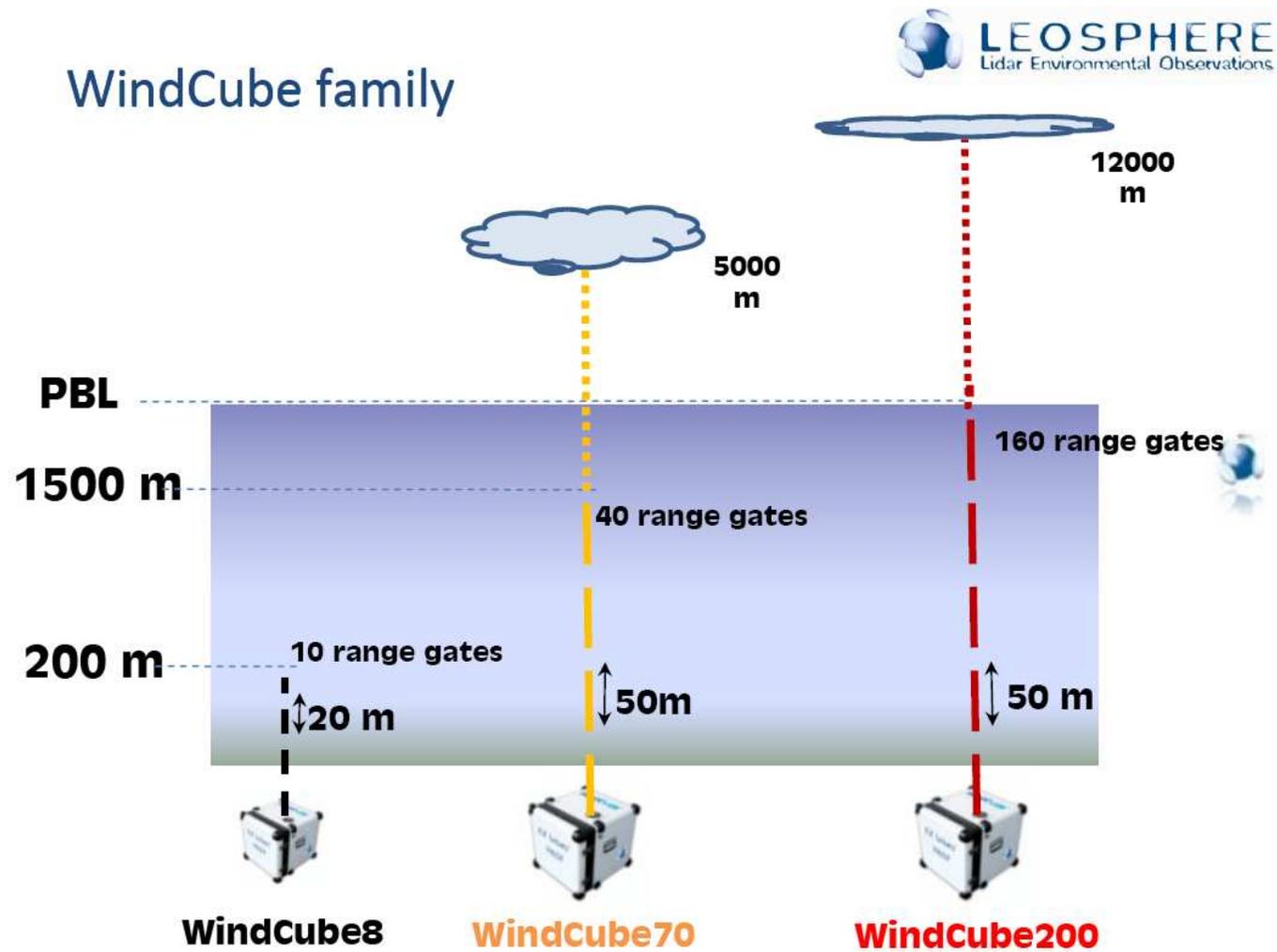


2007



Wincube 200S

# LIDAR Windcube



# Lidar Doppler pour l'éolien

Besoins futurs accessibles au lidar:

- Mesure des turbulences (fluctuations rapides de vitesse) pour estimer la charge sur les pales
- Vérification de la courbe de puissance, en fonction de la vitesse du vent.