



# MÉTHODES DE MESURE EN AÉRODYNAMIQUE

## Partie 4

## Mesures dans le champ

*Jean Délery*

*Conseiller émérite à l'Onera*

*jean.delery@free.fr*

# Méthodes de mesure en aérodynamique

## Partie 4

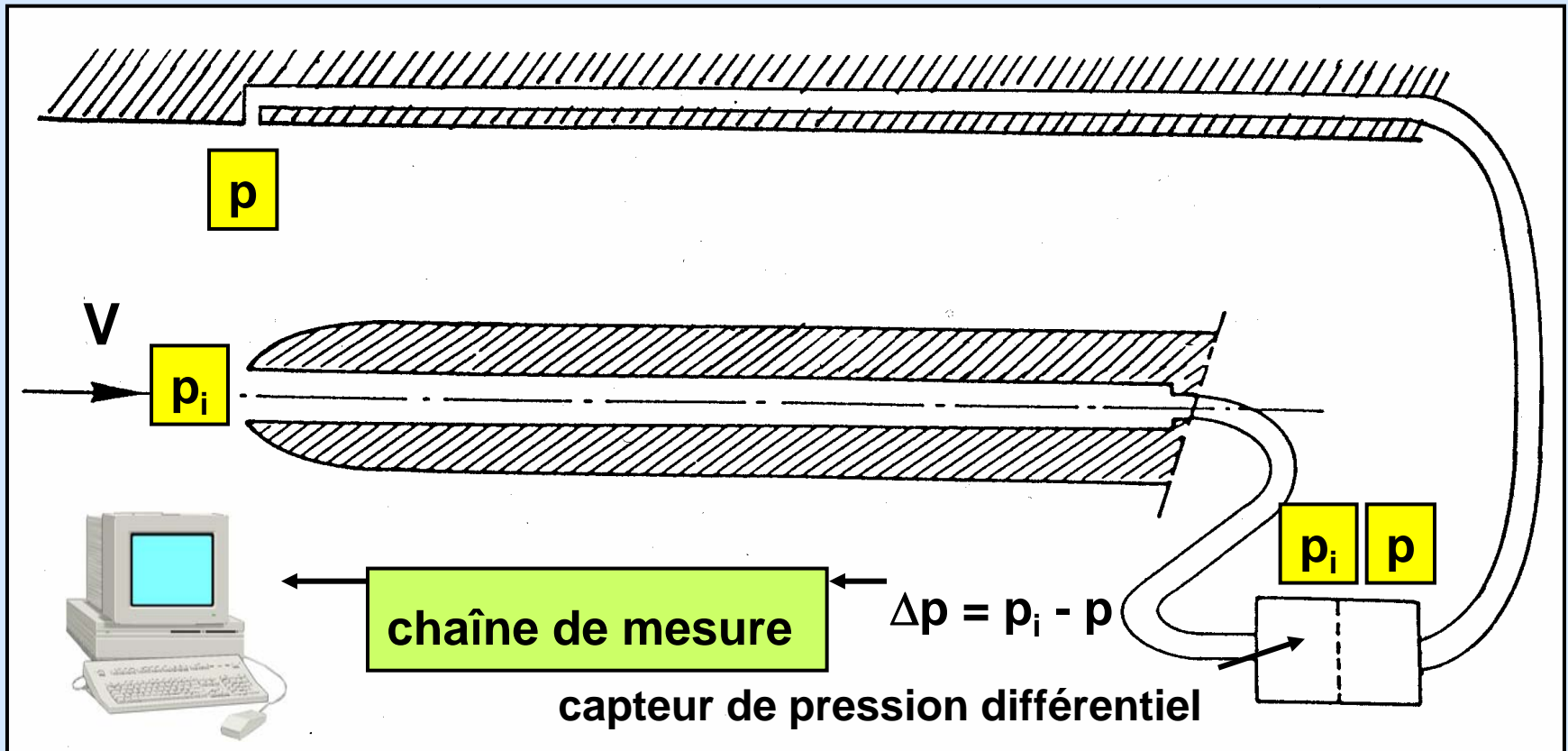
### Mesures dans le champ

### Méthodes de sondage intrusives



## Sondes de pression traditionnelles

### Tube de Pitot (1726)

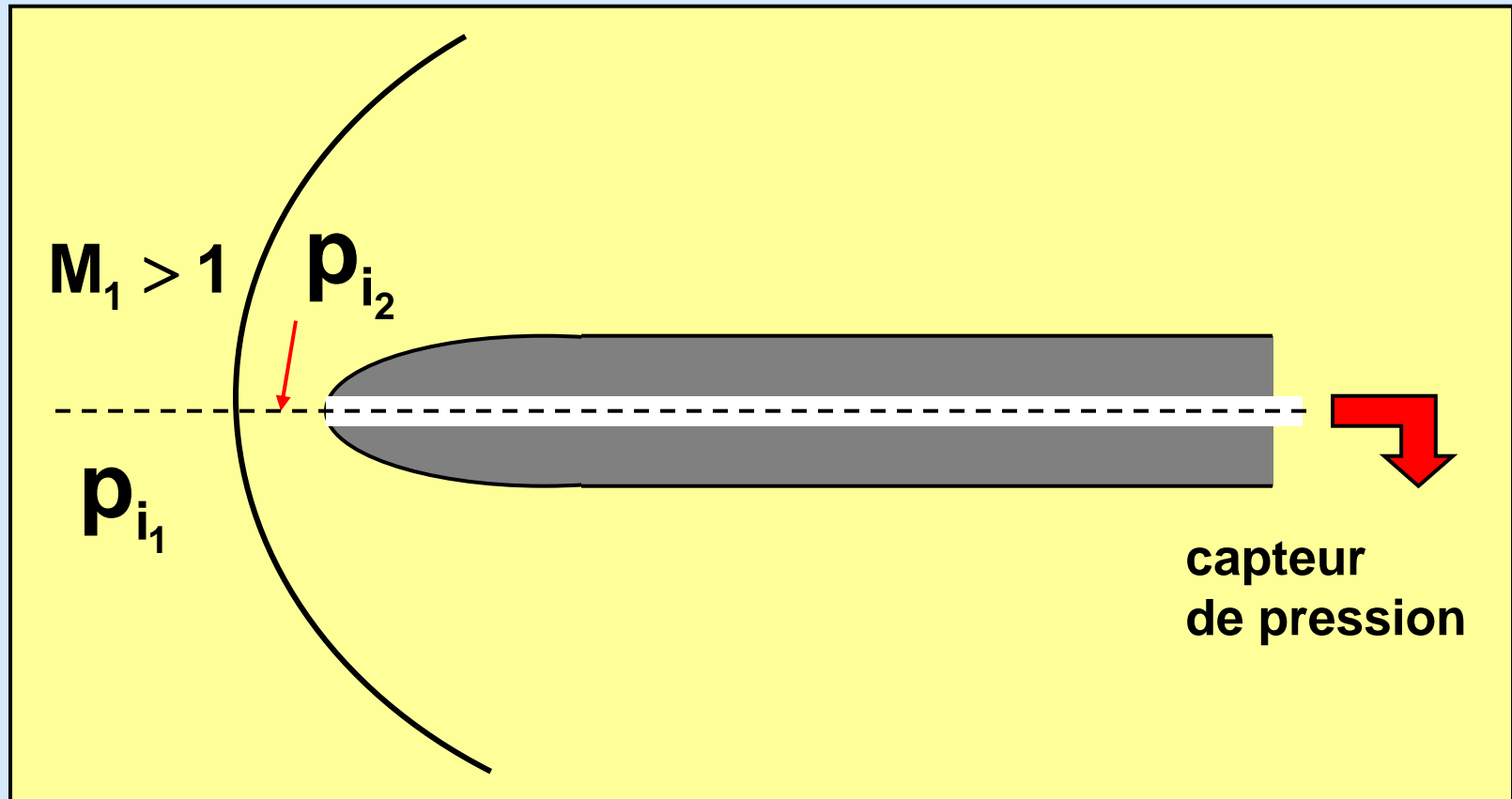


écoulement **incompressible**  $\longrightarrow$  Bernoulli  $\longrightarrow$

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho_0} (p_i - p)}$$

# Méthodes de mesure en aérodynamique

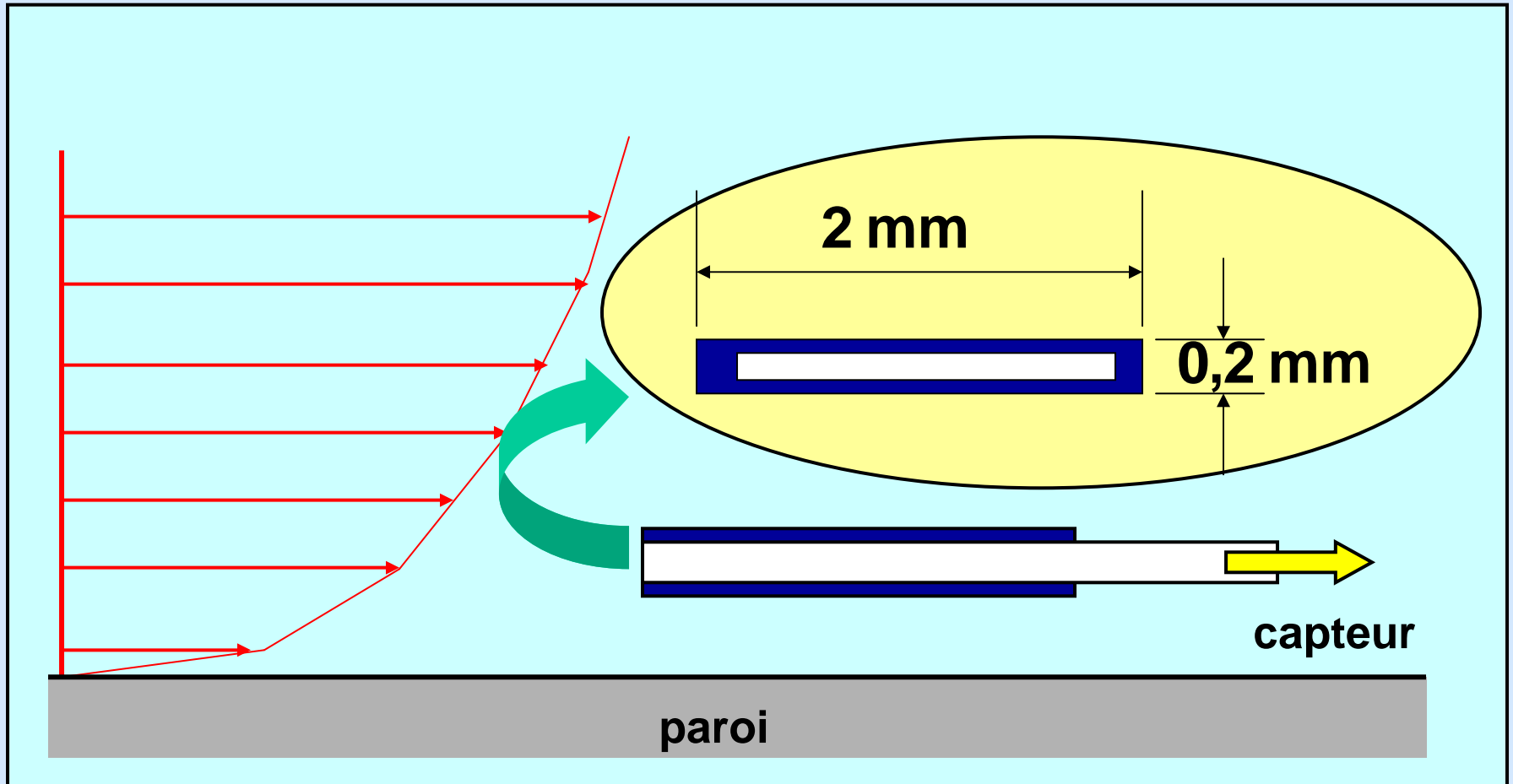
## *Tube de Pitot en écoulement supersonique*



mesure la pression d'arrêt **derrière un choc droit**

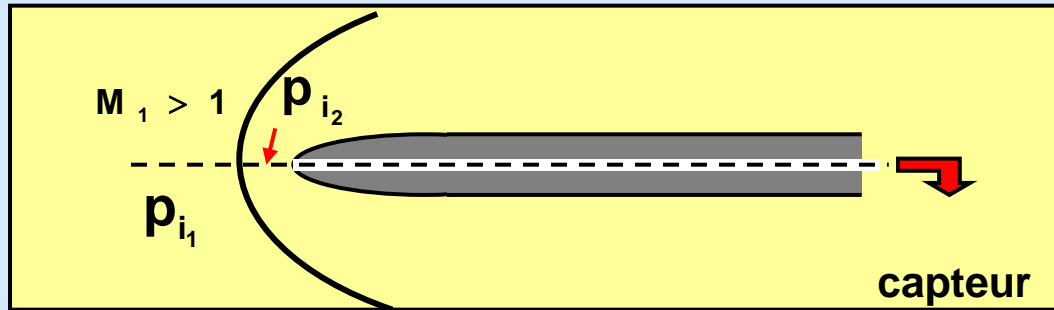
# Méthodes de mesure en aérodynamique

## *Sonde de Pitot aplatie pour exploration de couche limite*



# Méthodes de mesure en aérodynamique

## Mesure du nombre de Mach en soufflerie supersonique



$p_{i_1}$  → pression génératrice soufflerie connue

$p_{i_2}$  → sonde de Pitot

théorie onde de choc droit

$$\rightarrow \frac{p_{i_2}}{p_{i_1}} = \left[ 1 + \frac{2\gamma}{\gamma + 1} (M_1^2 - 1) \right]^{-\frac{1}{\gamma-1}} \left[ 1 - \frac{2}{\gamma + 1} \left( 1 - \frac{1}{M_1^2} \right) \right]^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

inversion numérique → nombre de Mach  $M_1$

## Méthodes de mesure en aérodynamique

### Sonde de pression anémoclinométrique



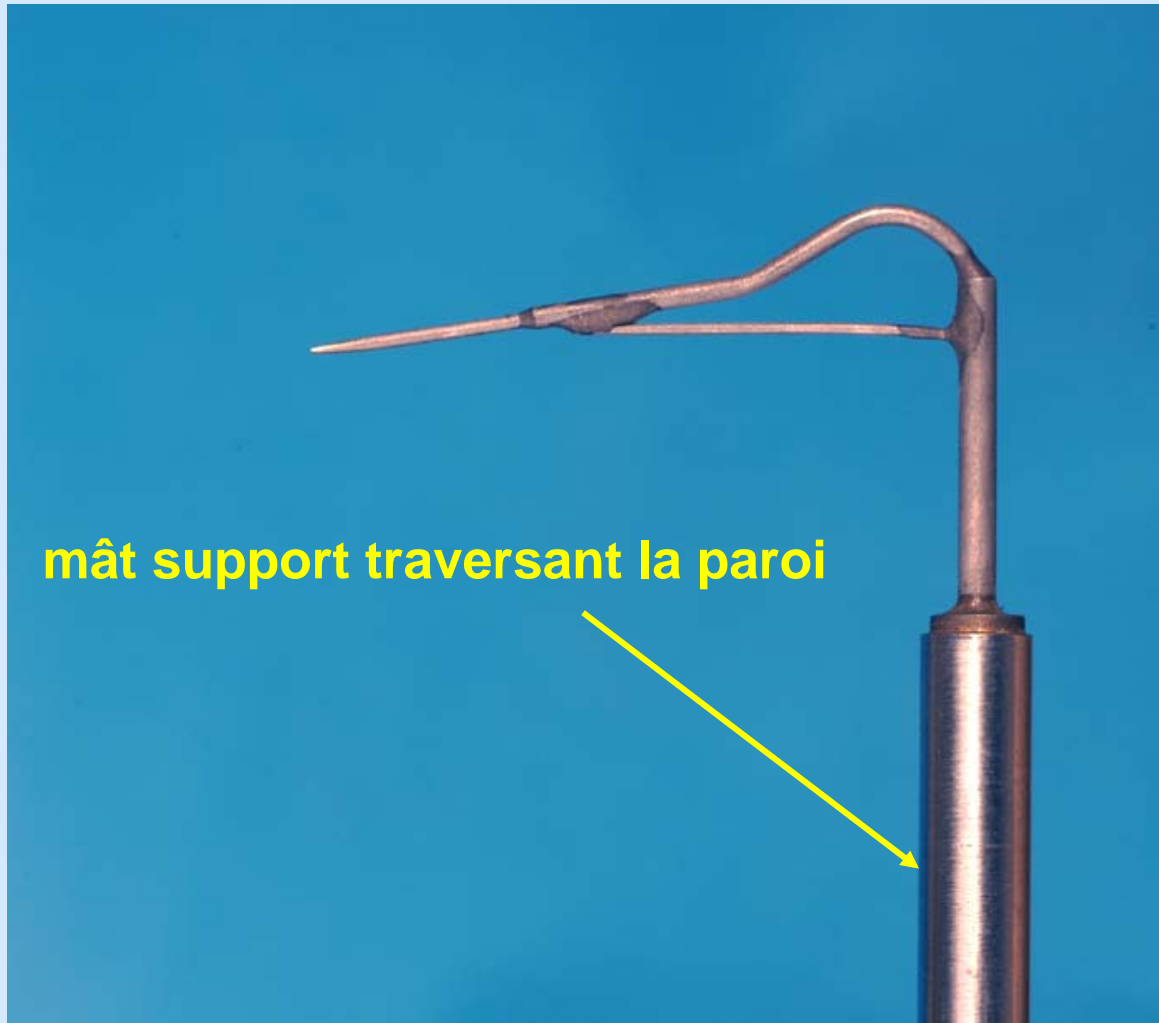
sonde Pitot simple



sonde Pitot aplatie pour  
exploration de couche limite

deux types de sonde Pitot

**Sonde de pression anémoclinométrique**



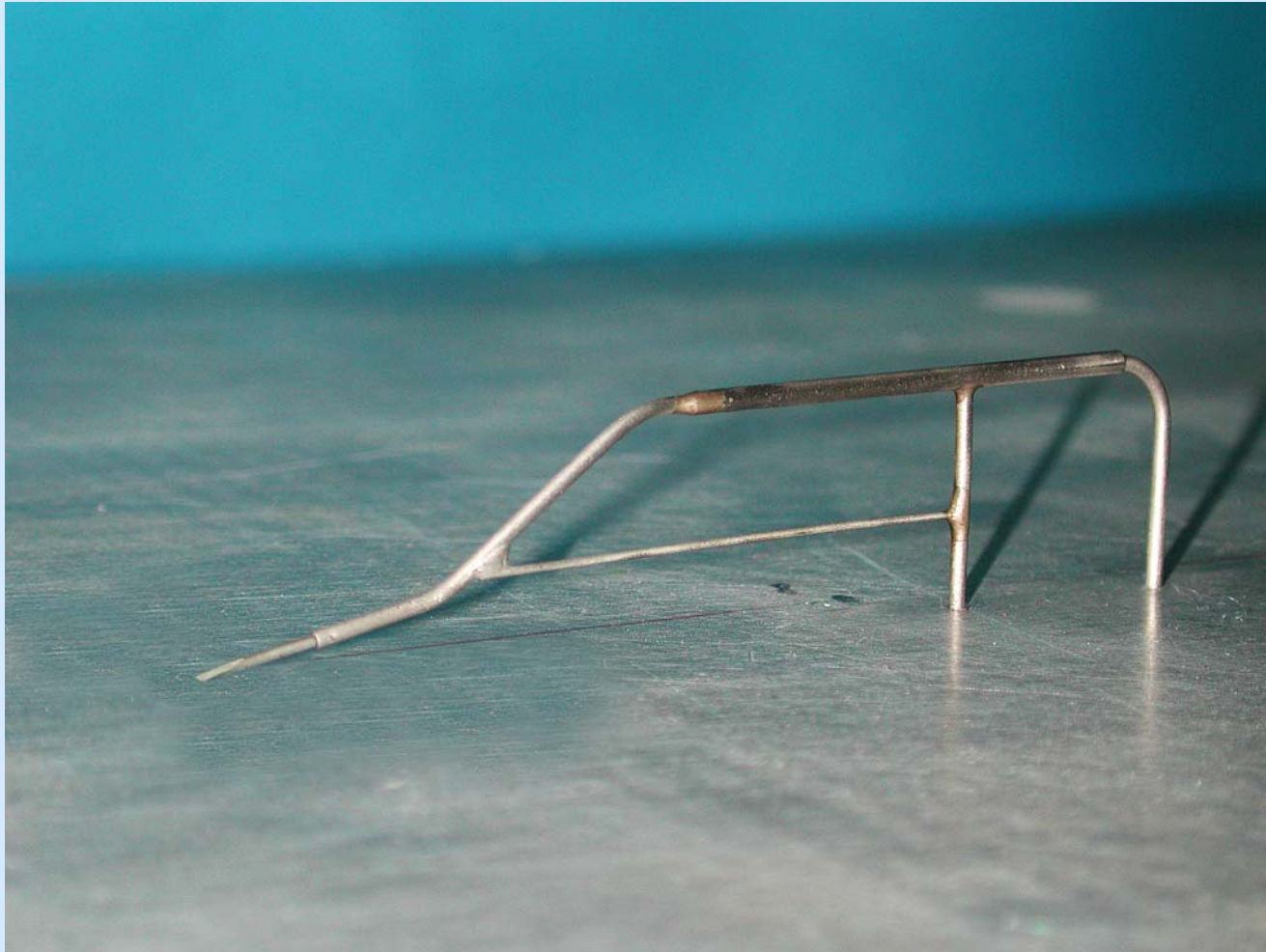
mât support traversant la paroi

**sonde Pitot avec raidisseur pour exploration de couche limite**



## Méthodes de mesure en aérodynamique

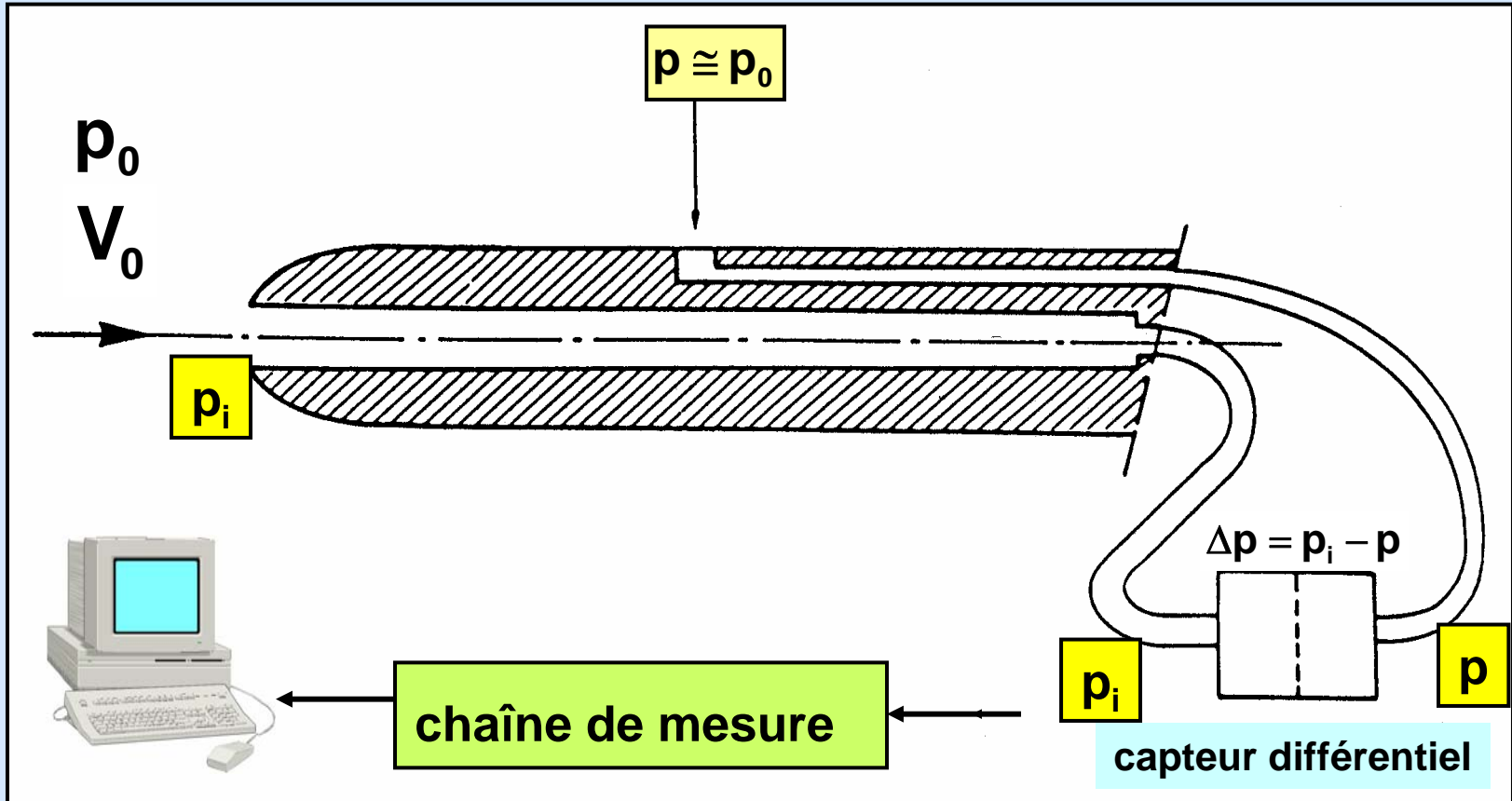
### Sonde de pression anémoclinométrique



sonde Pitot à deux mâts support pour exploration de couche limite

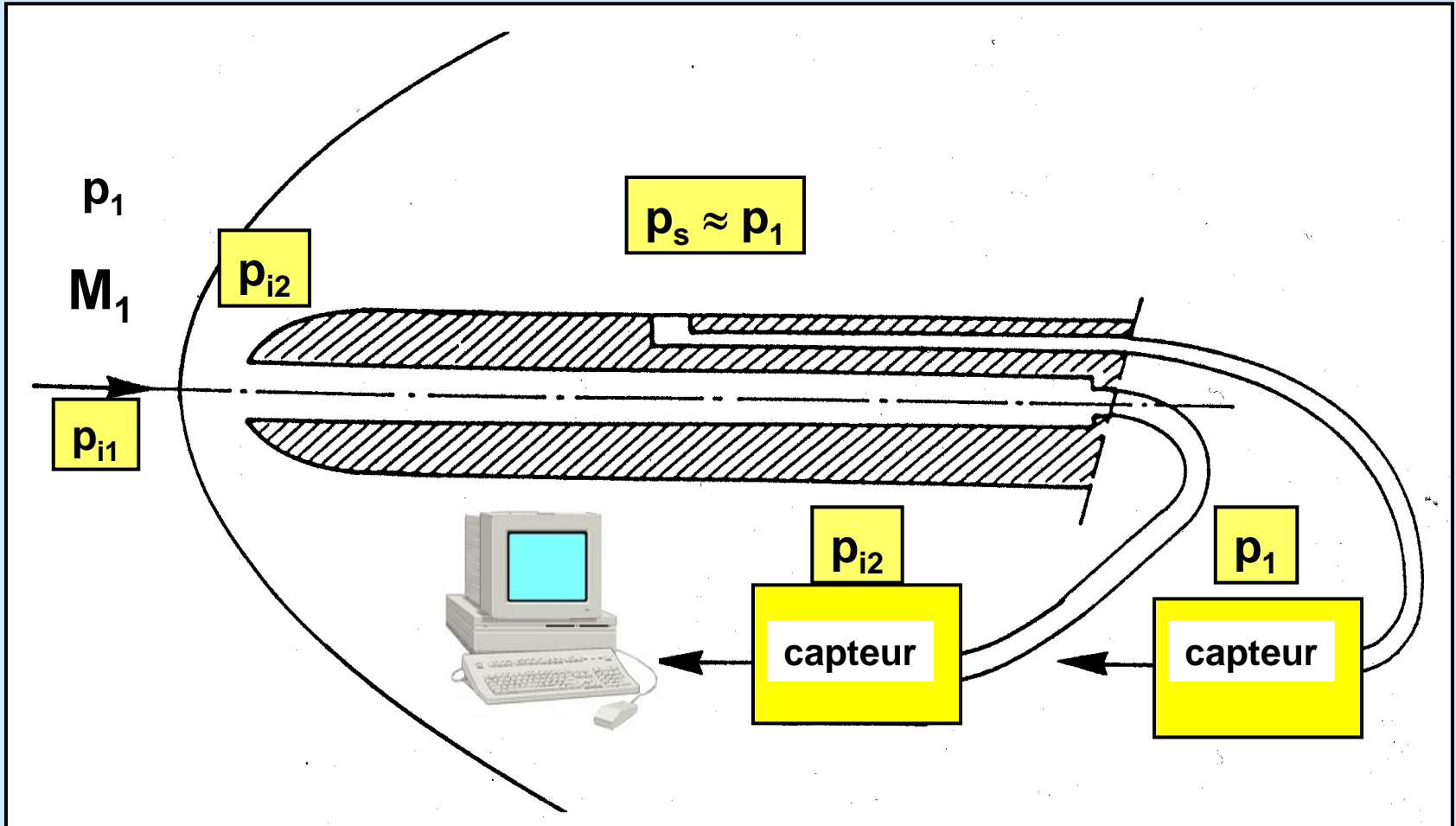
# Méthodes de mesure en aérodynamique

## L'antenne de Prandtl (mesure de la vitesse sur un avion)



incompressible  $\rightarrow$  mesure  $\Delta p = p_i - p$   $\rightarrow$   
relation de Bernoulli  $\rightarrow$  vitesse de l'écoulement

## Sonde pour mesure du nombre de Mach de vol en supersonique



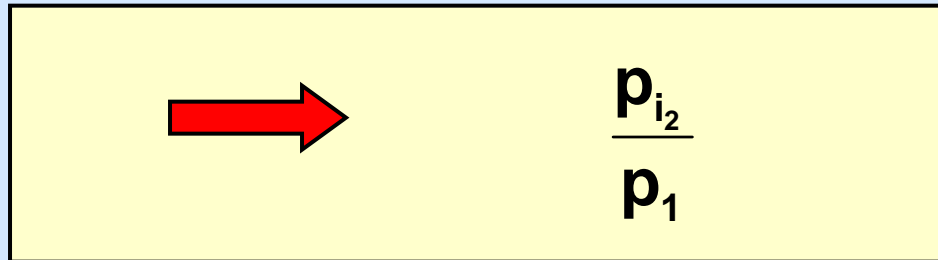
si orifice assez en aval  $\rightarrow$  pression sonde  $p_s \approx p_1$

# Méthodes de mesure en aérodynamique

## Sonde pour mesure du nombre de Mach de vol en supersonique

$p_{i_2}$   pression d'arrêt **derrière** le choc normal

$p_1$   pression statique **devant** le choc normal  $p_2 \approx p_1$


$$\frac{p_{i_2}}{p_1}$$

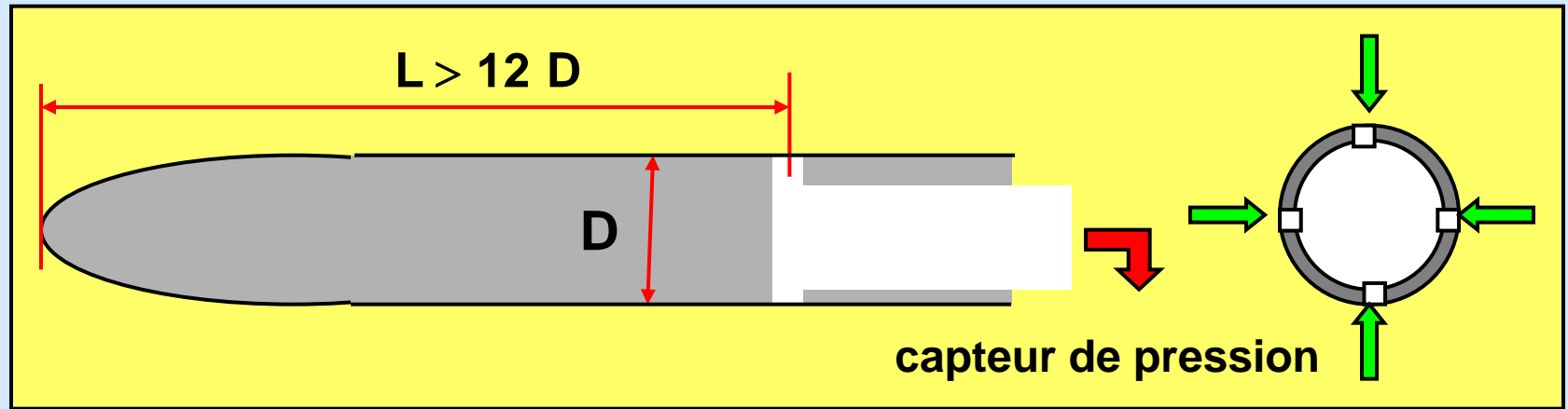
formule de Rayleigh

$$\frac{p_{i_2}}{p_1} = \left[ 1 + \frac{2\gamma}{\gamma+1} (M_1^2 - 1) \right]^{-\frac{1}{\gamma-1}} \left[ 1 - \frac{2}{\gamma+1} \left( 1 - \frac{1}{M_1^2} \right) \right]^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

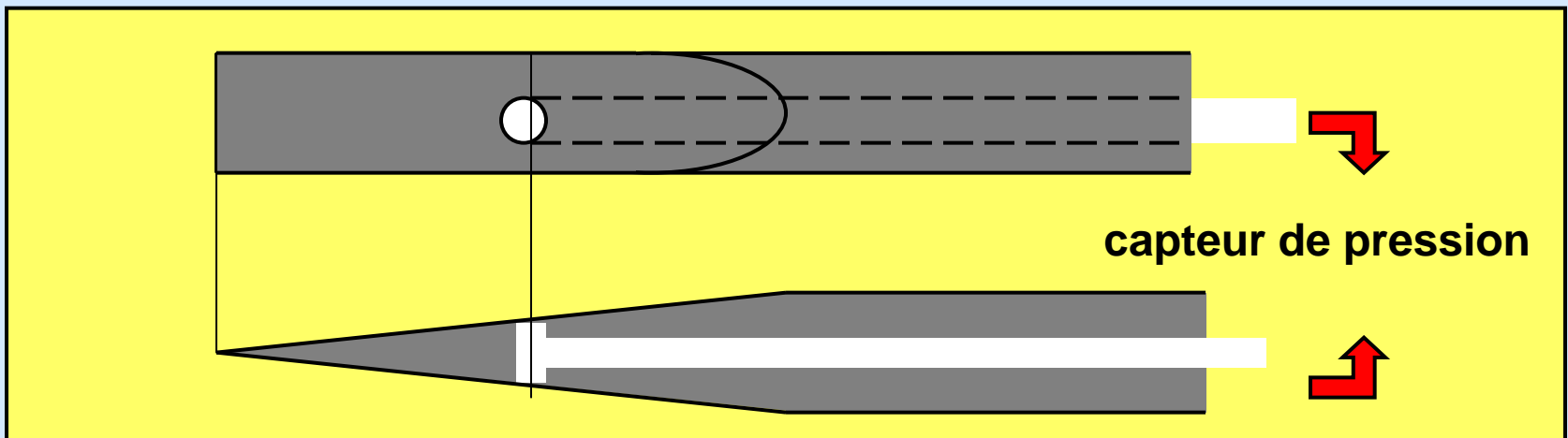
inversion de la formule de Rayleigh  **nombre de Mach**

# Méthodes de mesure en aérodynamique

## Sonde de pression statique



## Sonde de pression statique de type GG



## Méthodes de mesure en aérodynamique

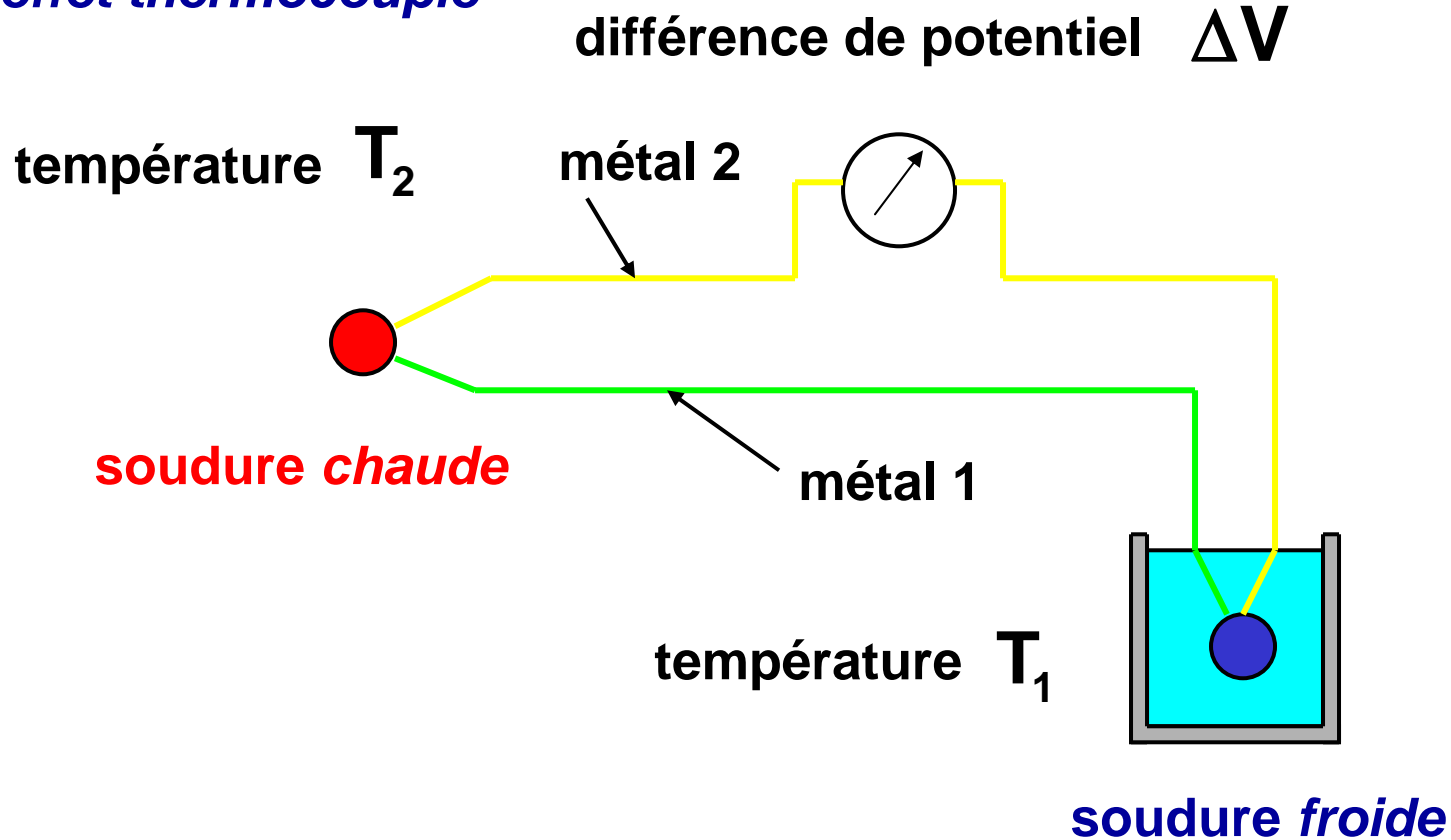
### **Sonde de pression anémoclinométrique**



*sonde de pression statique de type GG*

**Sondes de température d'arrêt**

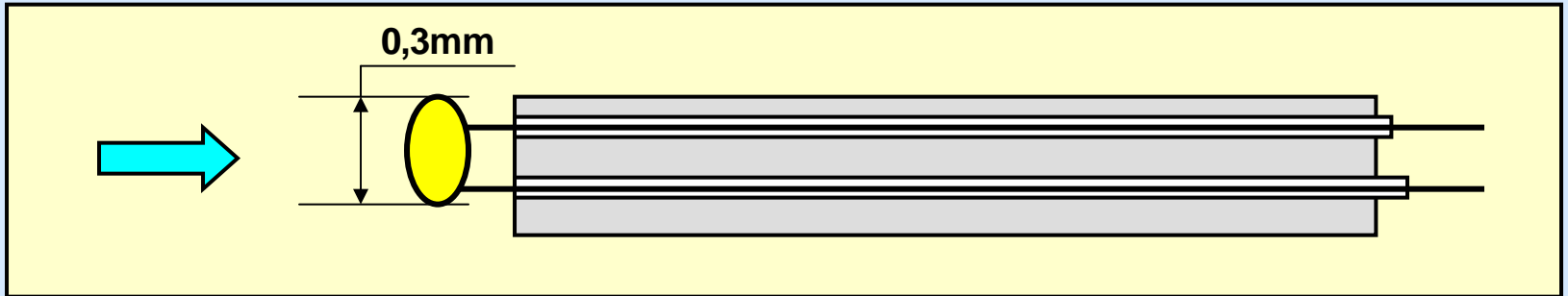
*effet thermocouple*



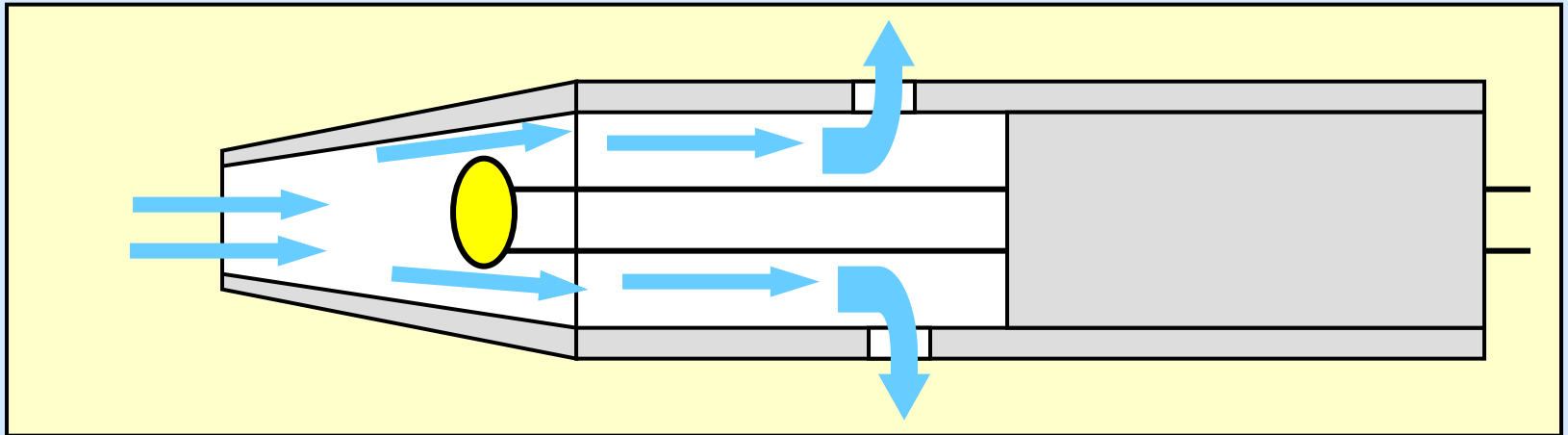
$$\Delta V = k \Delta T = k (T_2 - T_1) \rightarrow T_2 = T_1 + \frac{\Delta V}{k}$$

# Méthodes de mesure en aérodynamique

## Sondes de température d'arrêt



soudure simple placée face au vent → étalonnage, discrétion



sonde d'arrêt ventilée → coefficient proche de 1, encombrement



## Méthodes de mesure en aérodynamique

**Sonde triple : pression d'arrêt, pression statique, température**

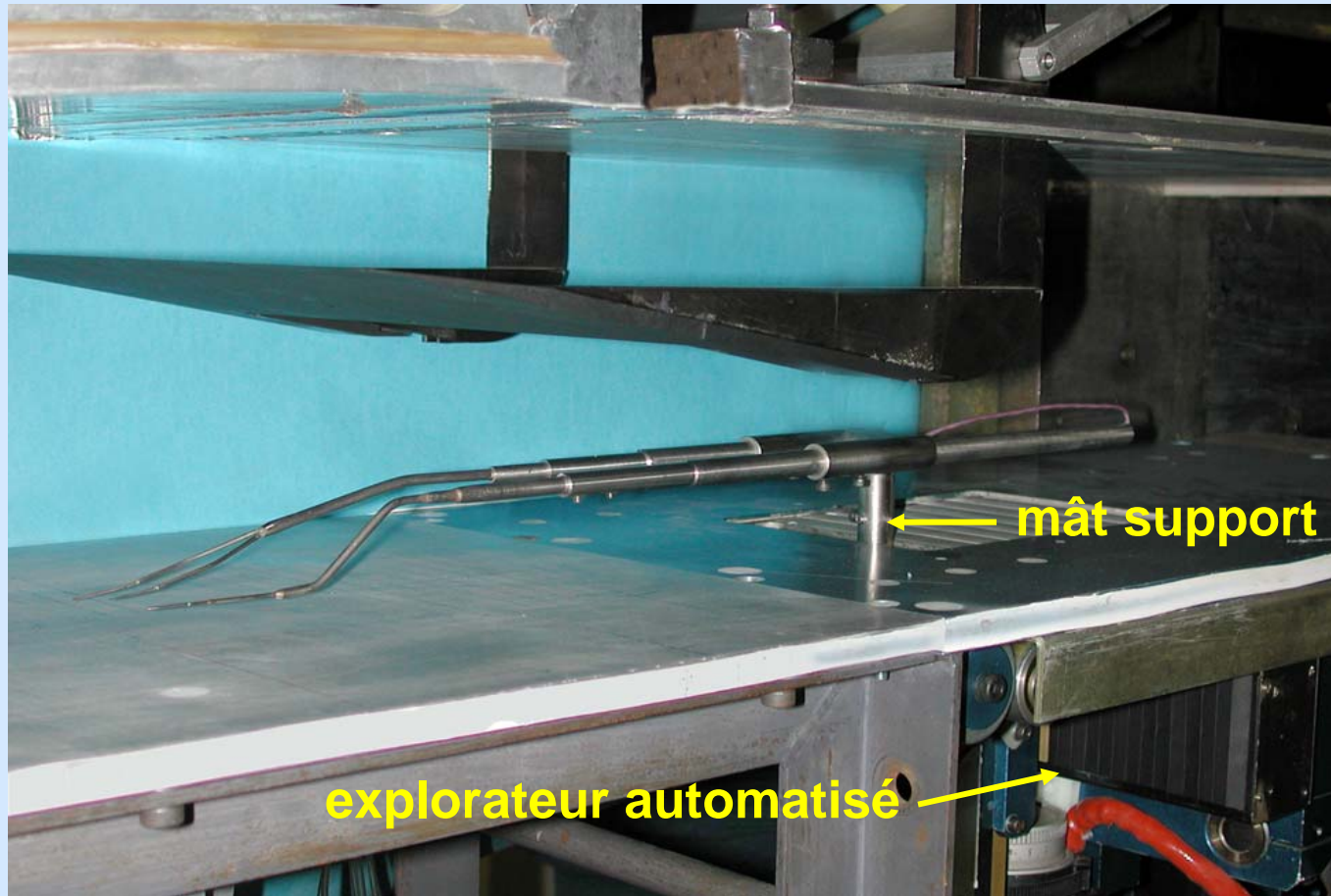
pression statique

pression Pitot

température d'arrêt

## Méthodes de mesure en aérodynamique

### Sonde de pression anémoclinométrique



sonde triple installée dans une veine de soufflerie supersonique

# Méthodes de mesure en aérodynamique

## Sonde de pression anémoclinométrique

### objectif

détermination du vecteur vitesse moyenne (module et angles directeurs), du nombre de Mach, de la pression au sein d'un écoulement

### application

sondage d'écoulements du subsonique au supersonique

### techniques

mesure de la pression en  $N$  orifices situés sur un embout de sonde (usuellement  $N= 3, 5$  ou  $7$ )

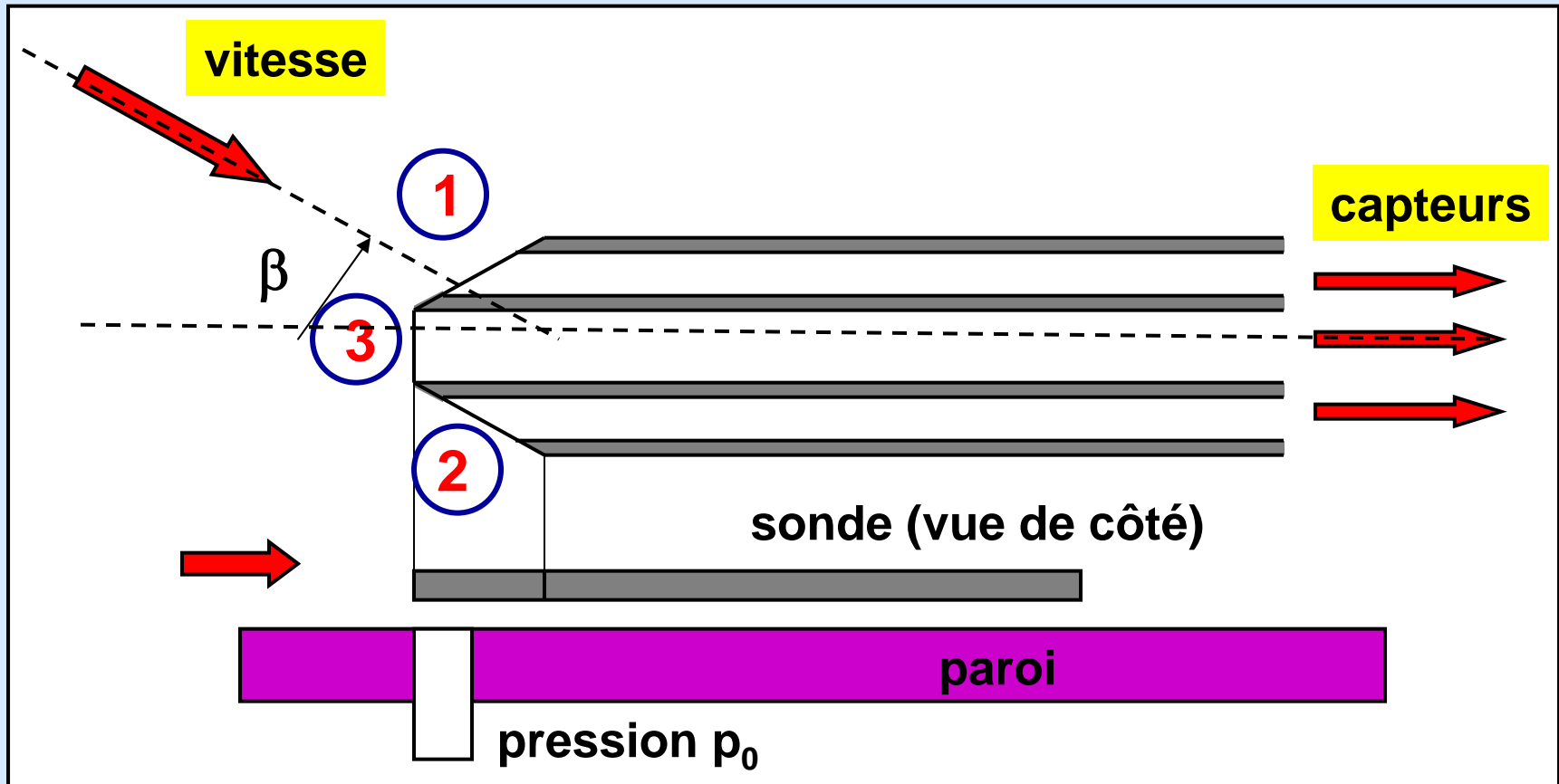
écarts de pression  direction de la vitesse par rapport à l'axe de la sonde

# Méthodes de mesure en aérodynamique

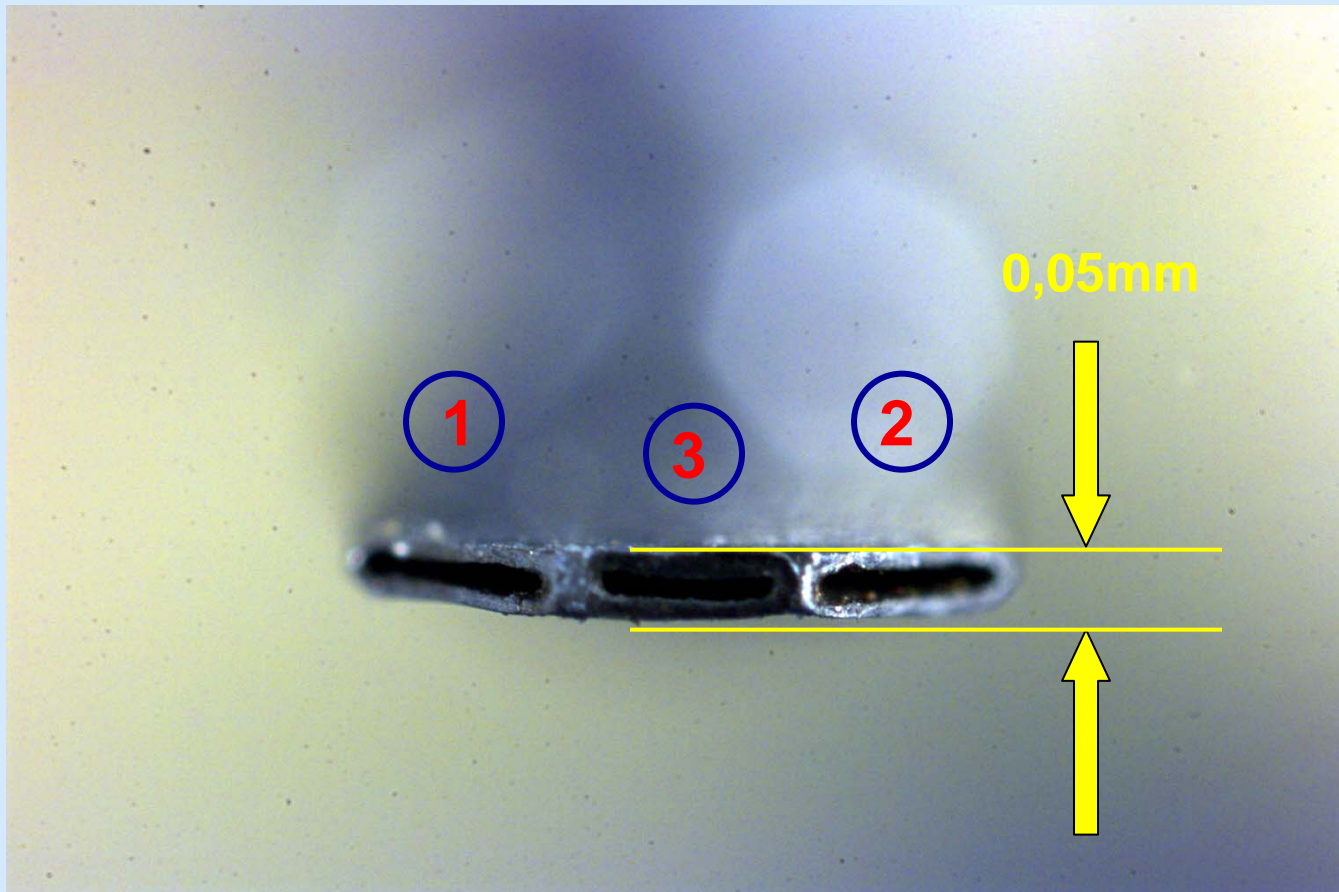
## Sonde de pression anémoclinométrique

*sonde à 3 trous aplatie pour exploration de couche limite*

Mesure de la vitesse (module et direction, nombre de Mach) dans une couche limite tridimensionnelle



## Sonde de pression anémoclinométrique



*sonde à 3 trous aplatie pour exploration de couche limite*

## Méthodes de mesure en aérodynamique

### Sonde de pression anémoclinométrique

#### sonde de couche limite à 3 trous

mesure des pressions  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  et  $p_0$  (statique paroi)

coefficients  $\rightarrow C_{p(\beta)} = \frac{p_2 - p_1}{\bar{Q}} \quad C_{p(st)} = \frac{p_3 - p_{st}}{\bar{Q}}$

avec  $\bar{Q} = (p_3 - p_0) - \frac{1}{2}(p_1 + p_2)$

étalonnage dans un écoulement connu : on fait varier  $\beta$

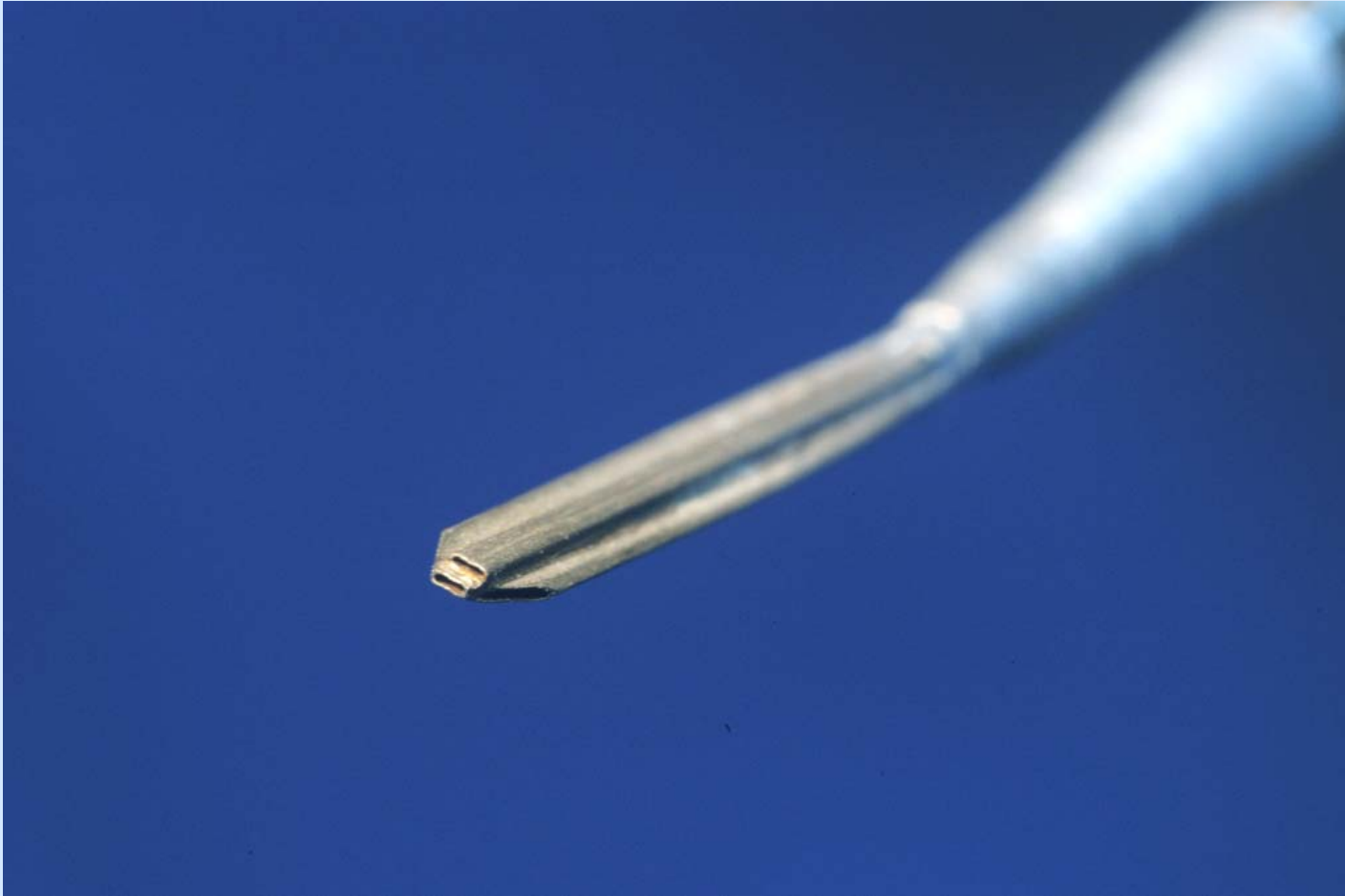
$\rightarrow C_{p(st)} = g(\beta) \quad C_{p(\beta)} = f(\beta)$

valeurs mesurées

$C_{p(\beta)} \rightarrow$  angle  $\beta$      $C_{p(st)} \rightarrow$  pression d'arrêt  $p_{st}$      $\rightarrow$  Mach

## Méthodes de mesure en aérodynamique

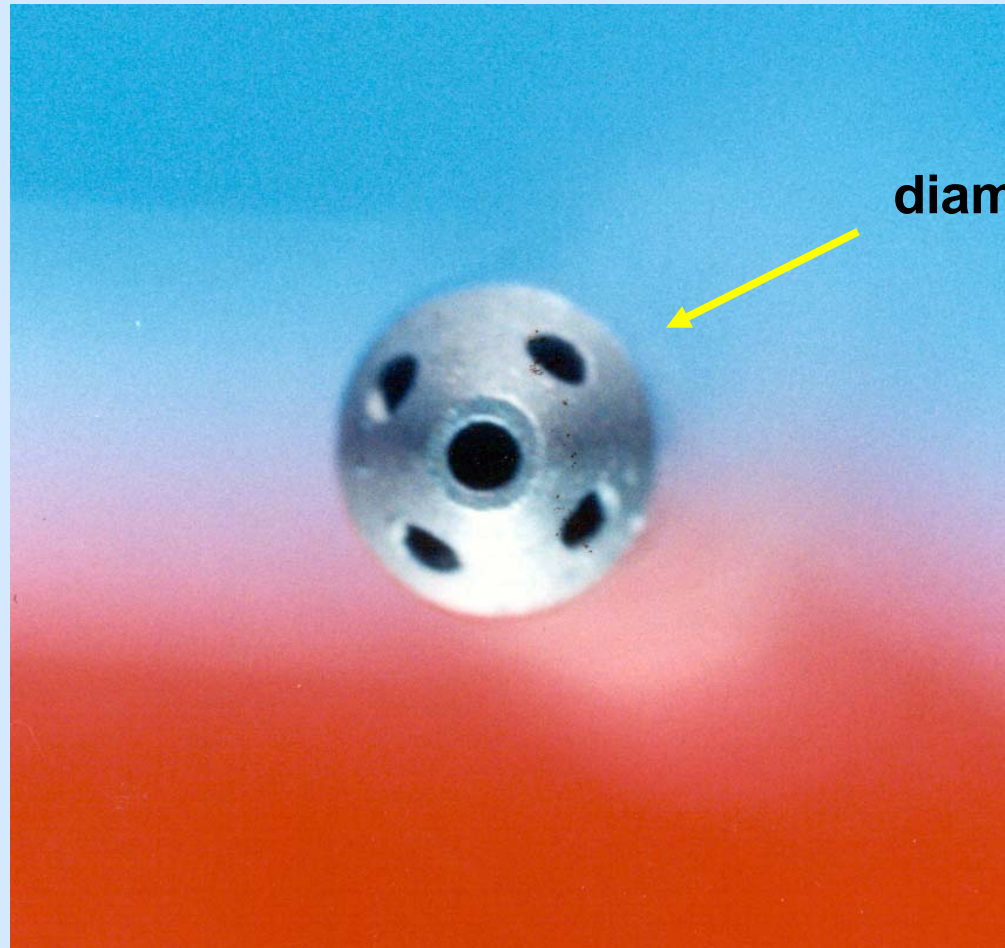
### **Sonde de pression anémoclinométrique**



*sonde à 4 trous aplatie pour exploration de couche limite*

## Méthodes de mesure en aérodynamique

### Sonde de pression anémoclinométrique

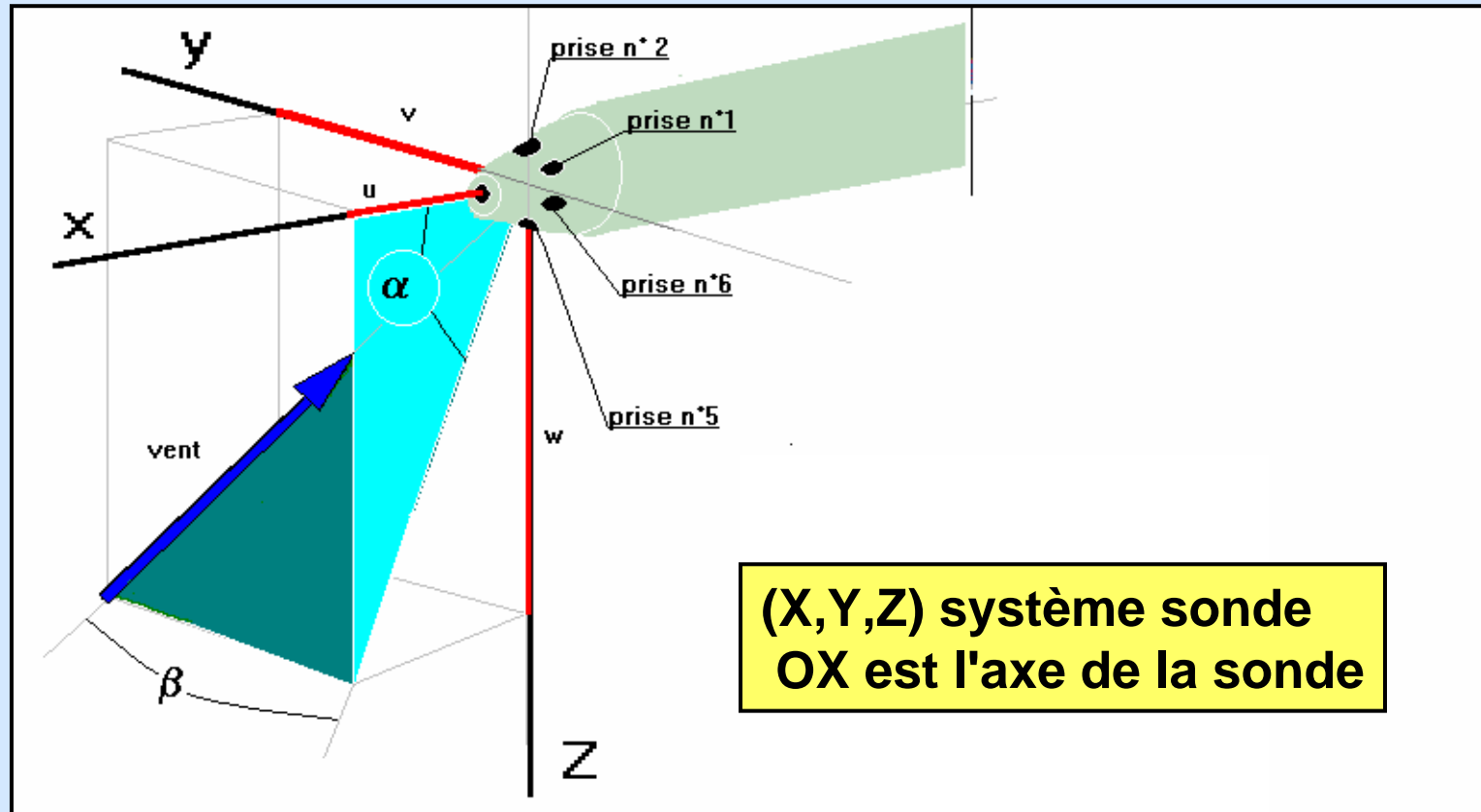


diamètre : 1,5 mm

macrophotographie d'un embout de sonde à 5 trous

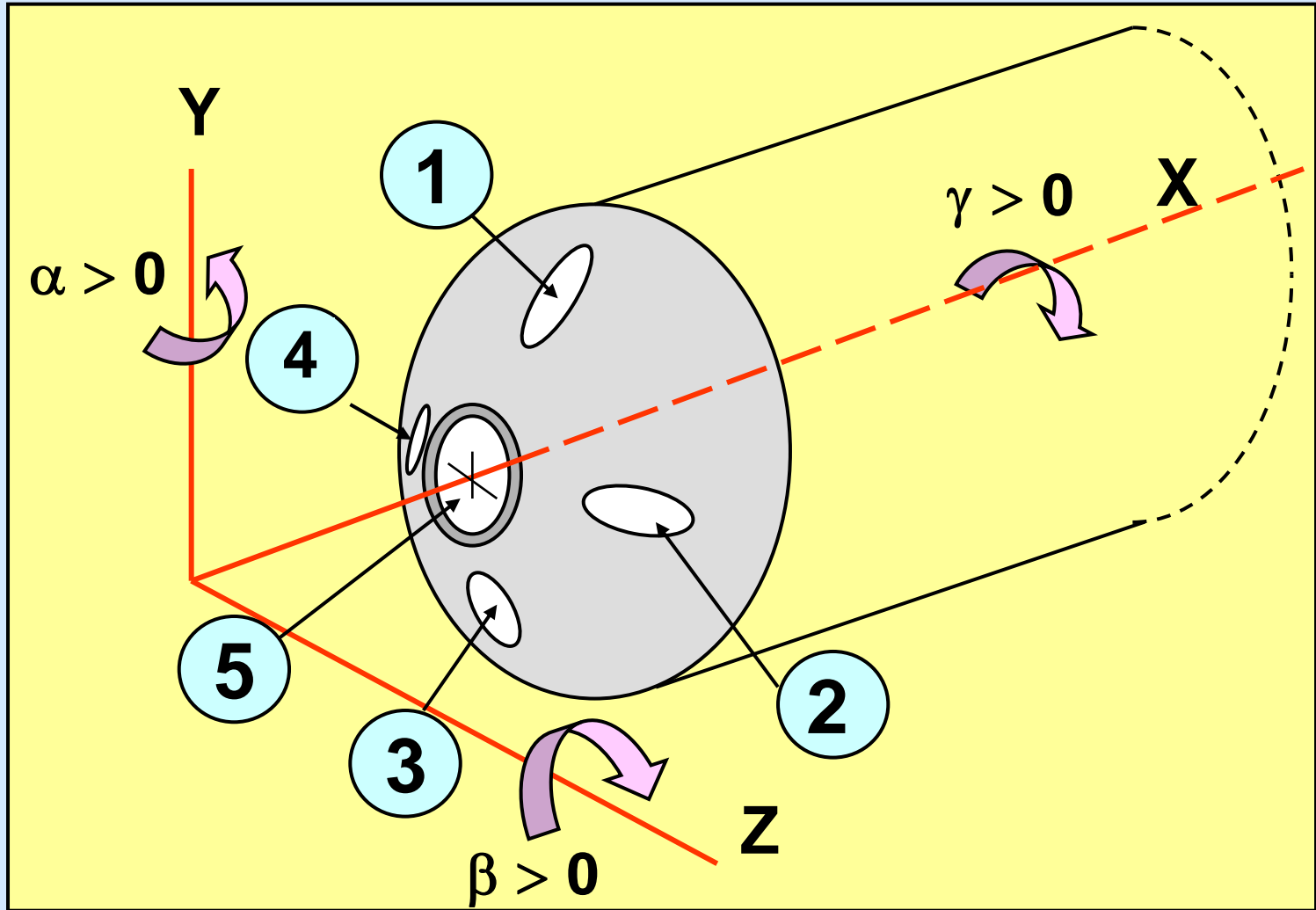


## Sonde de pression anémoclinométrique



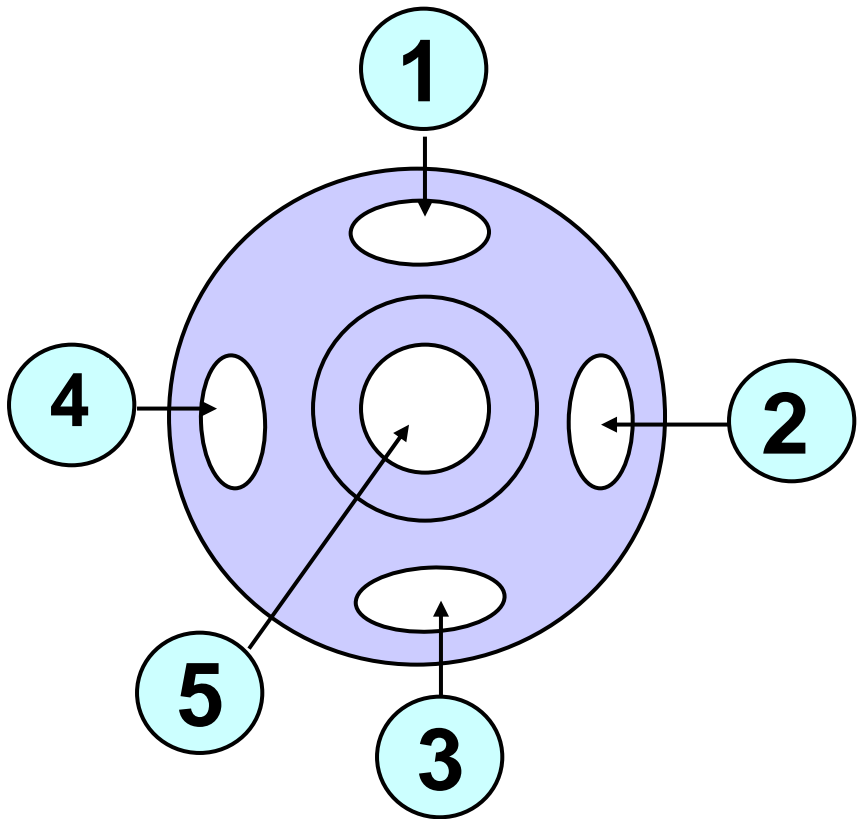
les angles  $\alpha$  et  $\beta$  repèrent la direction de la vitesse par rapport au système sonde

**Sonde de pression anémoclinométrique**

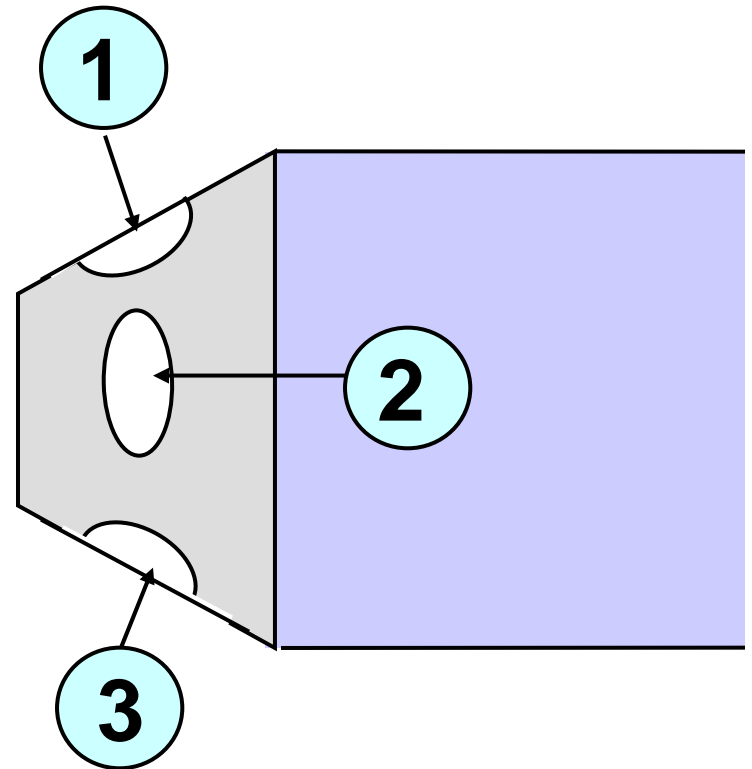


sonde à 5 trous - repérage des trous

## Sonde de pression anémoclinométrique



*vue de face*



*vue de côté*

sonde à 5 trous - repérage des trous

## Méthodes de mesure en aérodynamique

### Sonde de pression anémoclinométrique à 5 trous

mesure des pressions  $p_1, p_2, p_3, p_4$  et  $p_5$

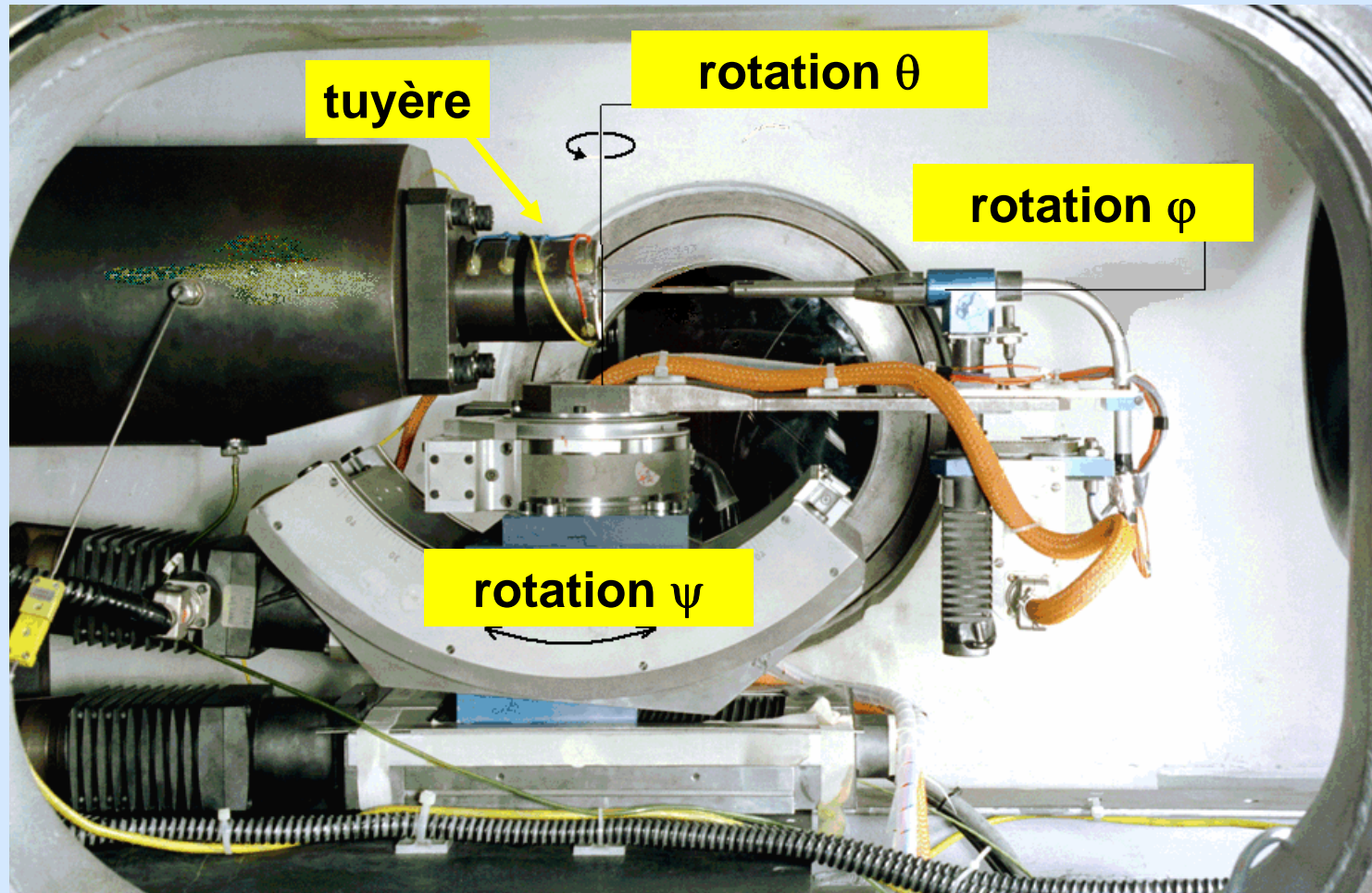
coefficients  $\rightarrow$

$$C_{s(st)} = \frac{p_5}{p_{st}} \qquad C_{p(s)} = \frac{p_m}{p_5}$$
$$K_\alpha = \frac{p_4 - p_2}{p_5 - p_m} \qquad K_\beta = \frac{p_3 - p_1}{p_5 - p_m}$$
$$p_m = \frac{p_1 + p_2 + p_3 + p_4}{4}$$

étalonnage : on fait varier le nombre de Mach, les angles  $\alpha$  et  $\beta$   
valeurs mesurées

$C_{s(st)} \rightarrow$  pression d'arrêt  $p_{st}$      $C_{p(s)} \rightarrow$  pression statique  $p_s$      $K_\alpha \rightarrow \alpha$      $K_\beta \rightarrow \beta$

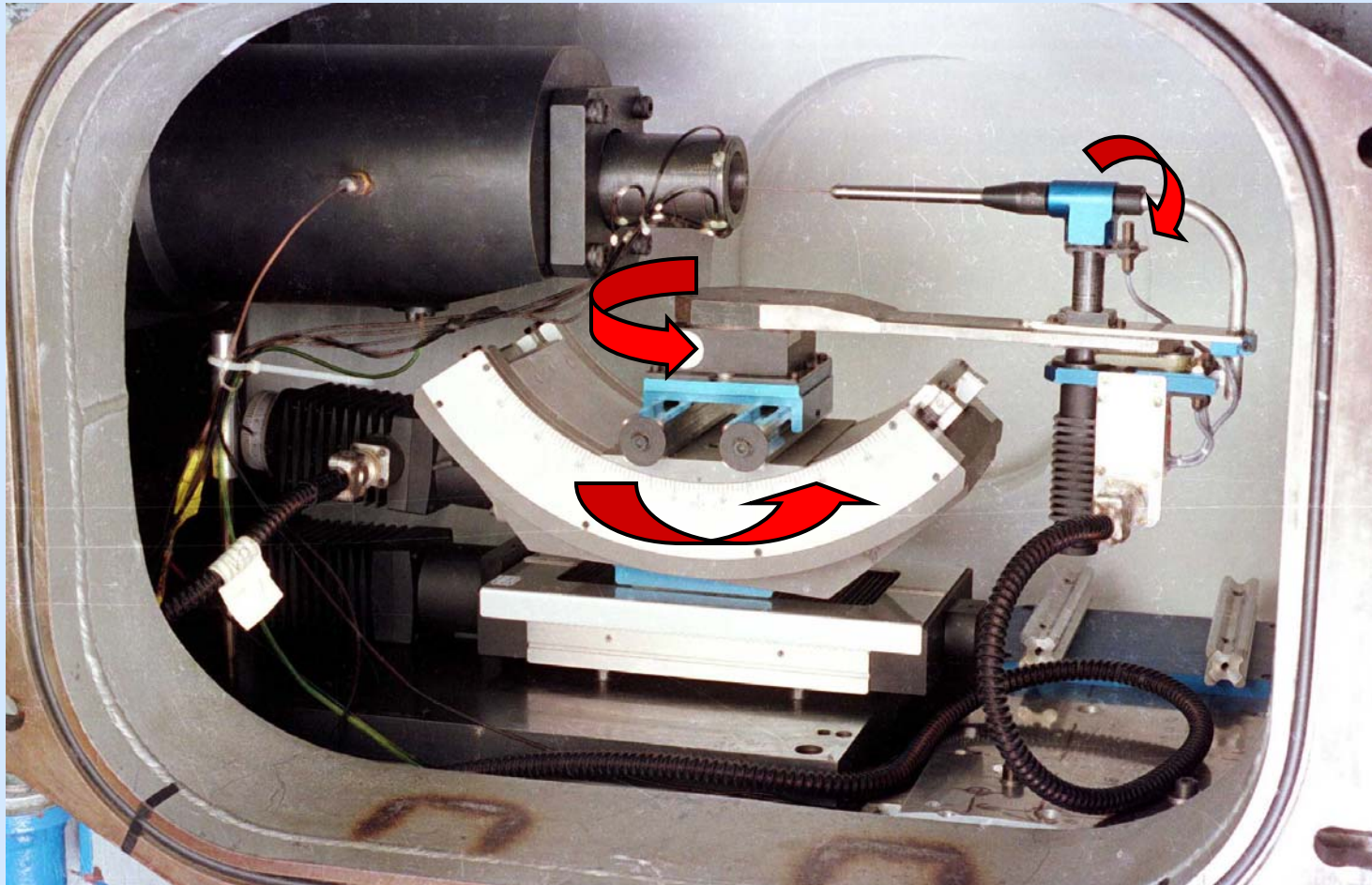
**Sonde de pression anémoclinométrique**



**banc d'étalonnage de sondes multi trous**

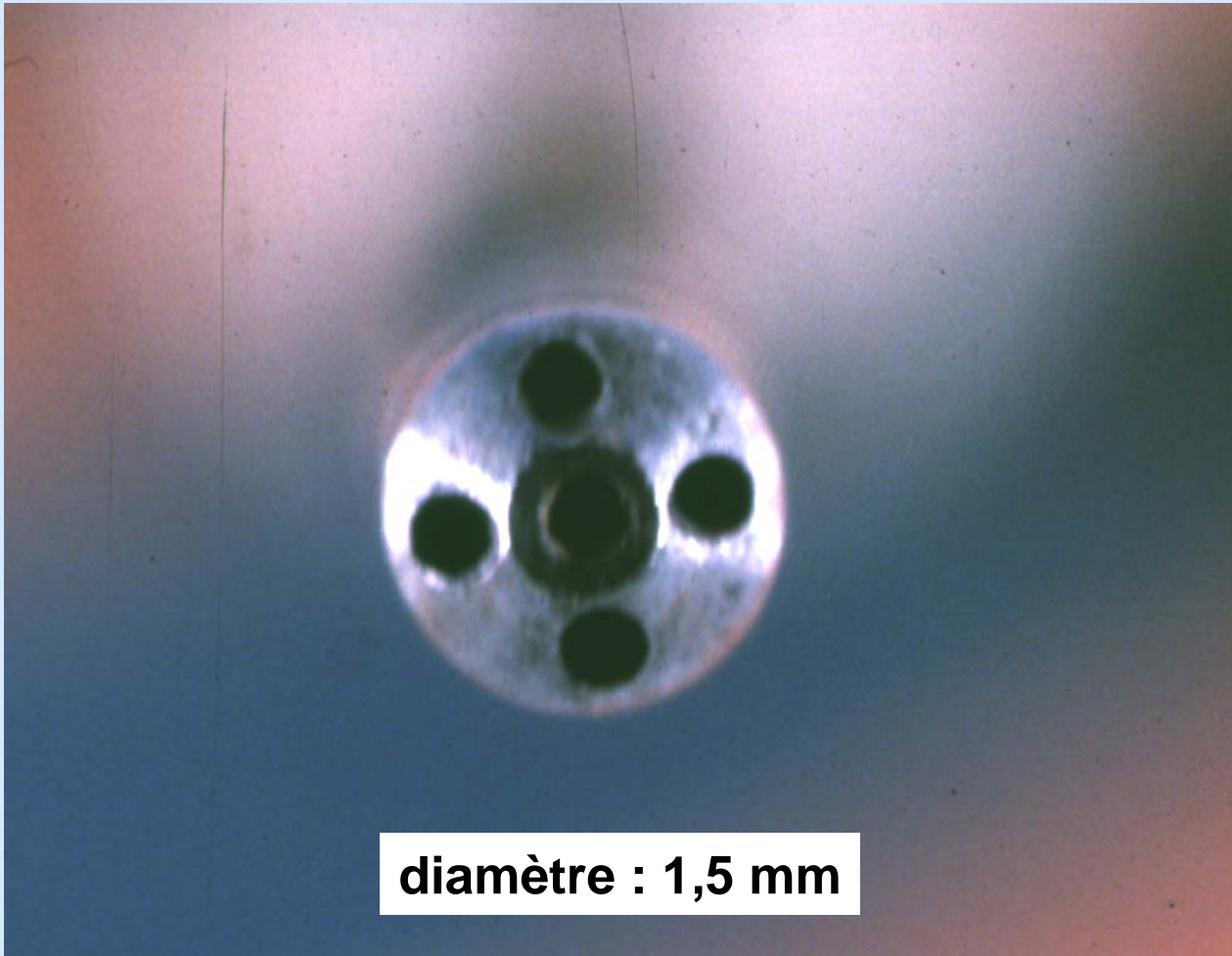
## Méthodes de mesure en aérodynamique

### Sonde de pression anémoclinométrique



banc d'étalonnage de sondes multi-trou

**Sonde de pression anémoclinométrique**

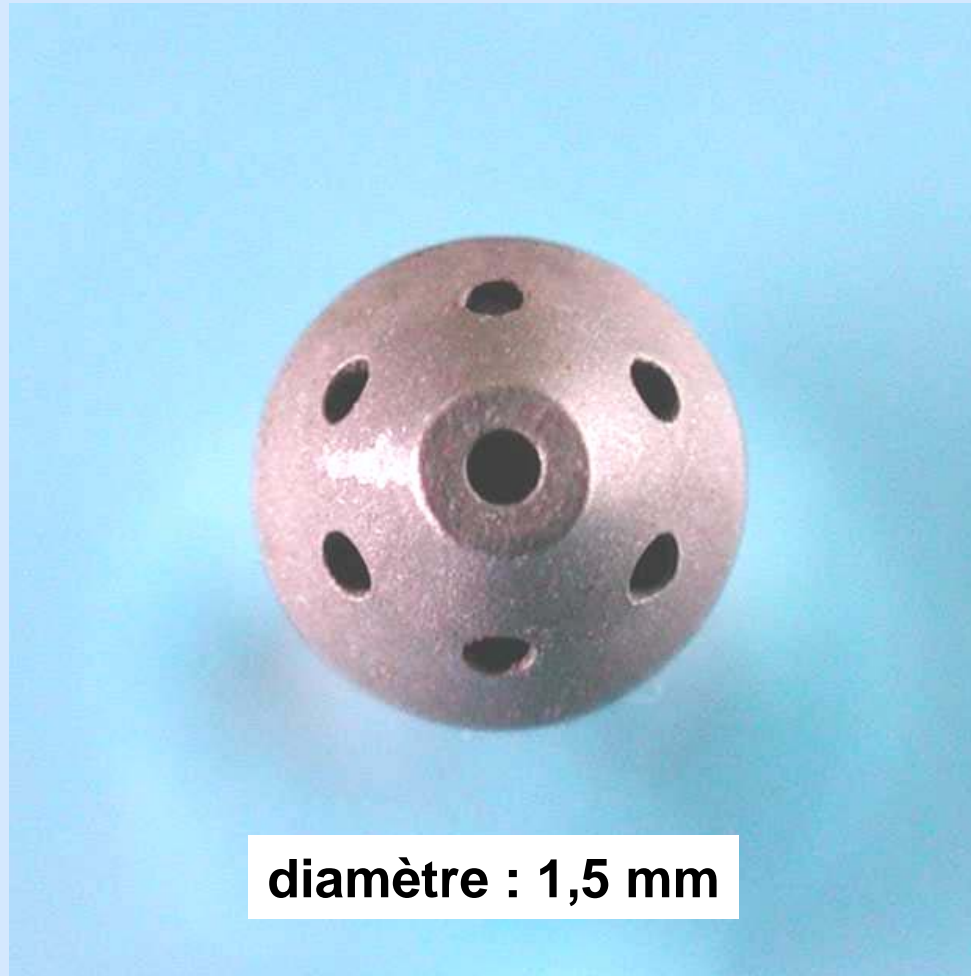


diamètre : 1,5 mm

macrophotographie d'un embout de sonde à 5 trous

## Méthodes de mesure en aérodynamique

### Sonde de pression anémoclinométrique

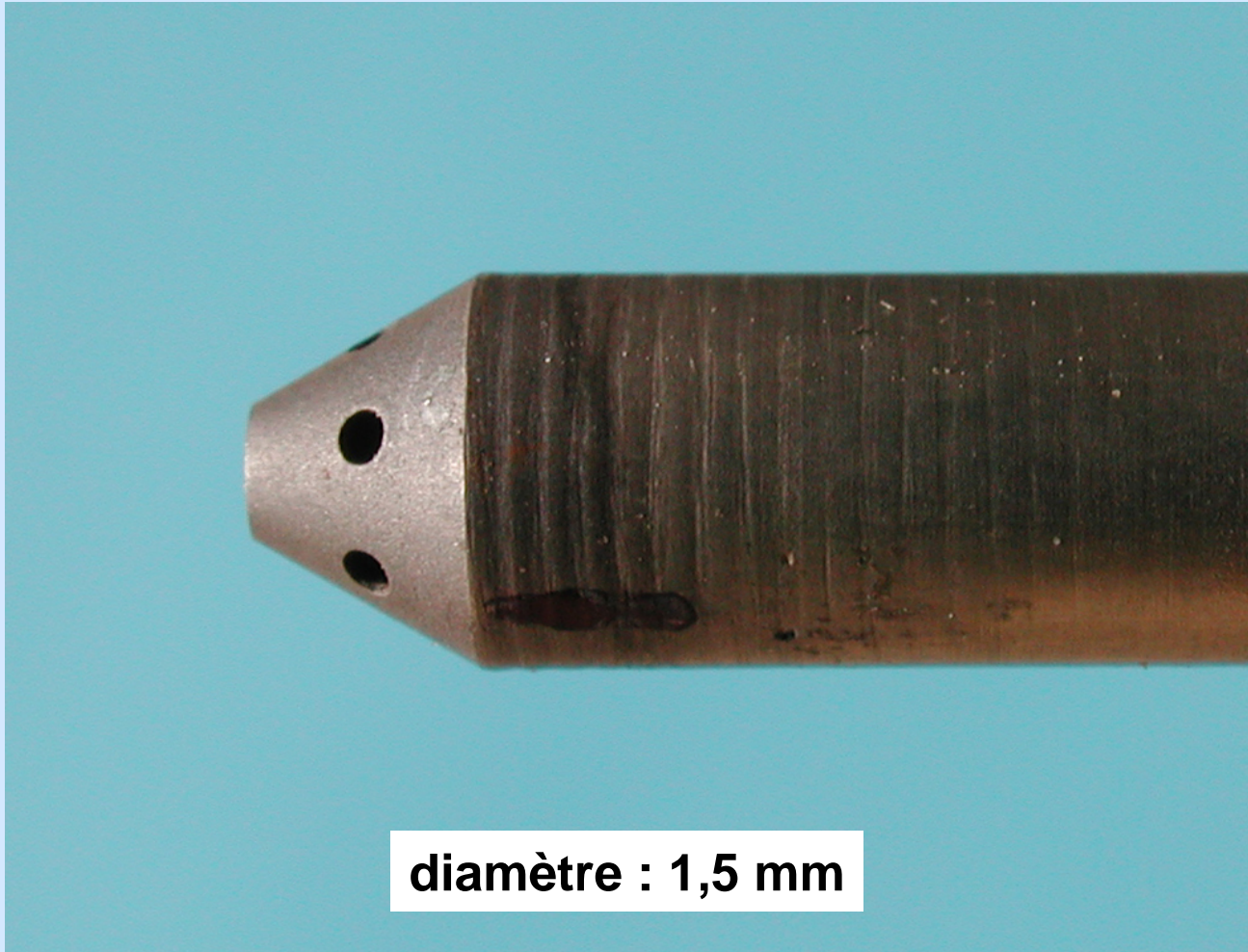


diamètre : 1,5 mm

macrophotographie d'un embout de sonde à 7 trous



**Sonde de pression anémoclinométrique**

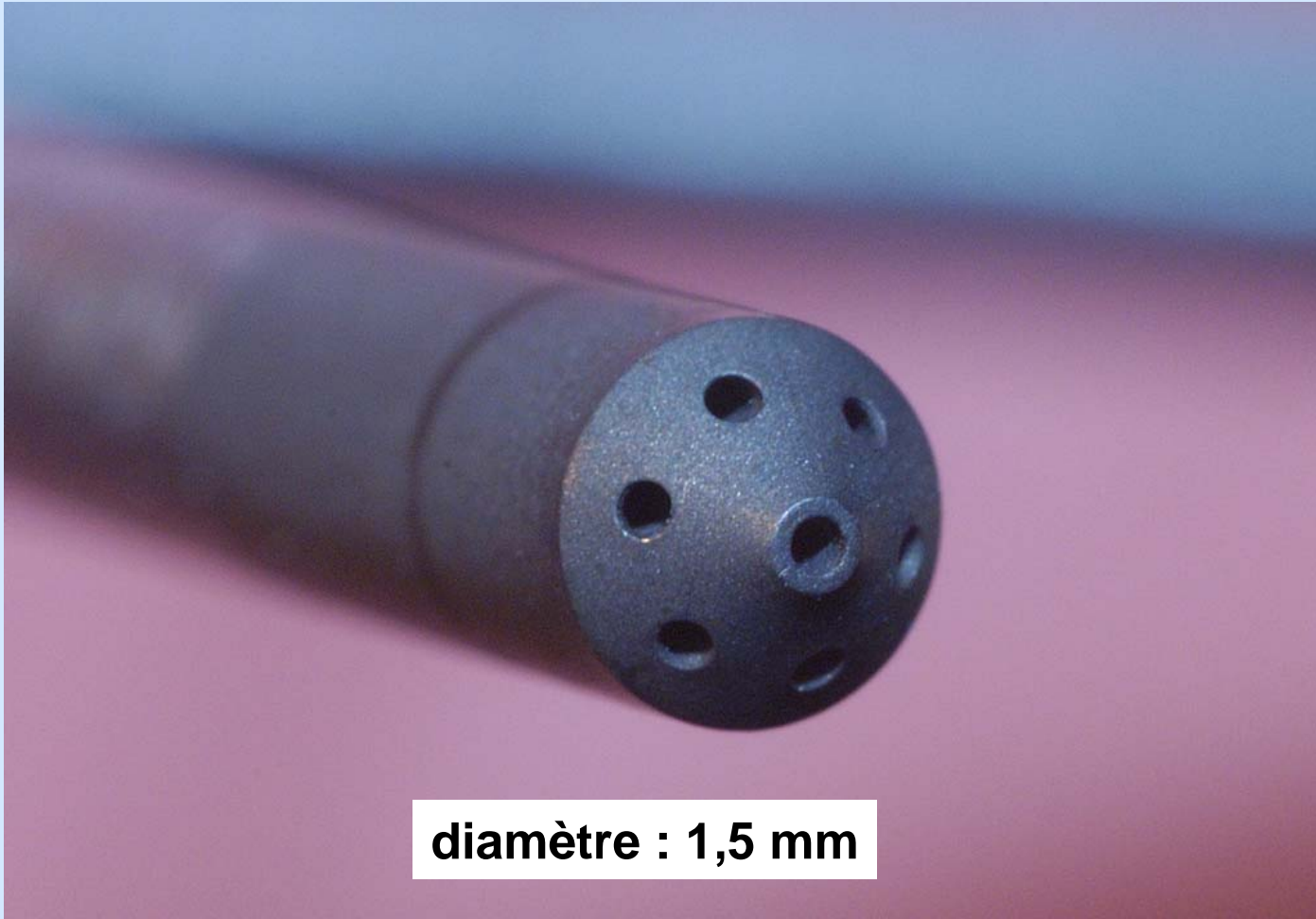


diamètre : 1,5 mm

macrophotographie d'un embout de sonde à 7 trous

## Méthodes de mesure en aérodynamique

### Sonde de pression anémoclinométrique

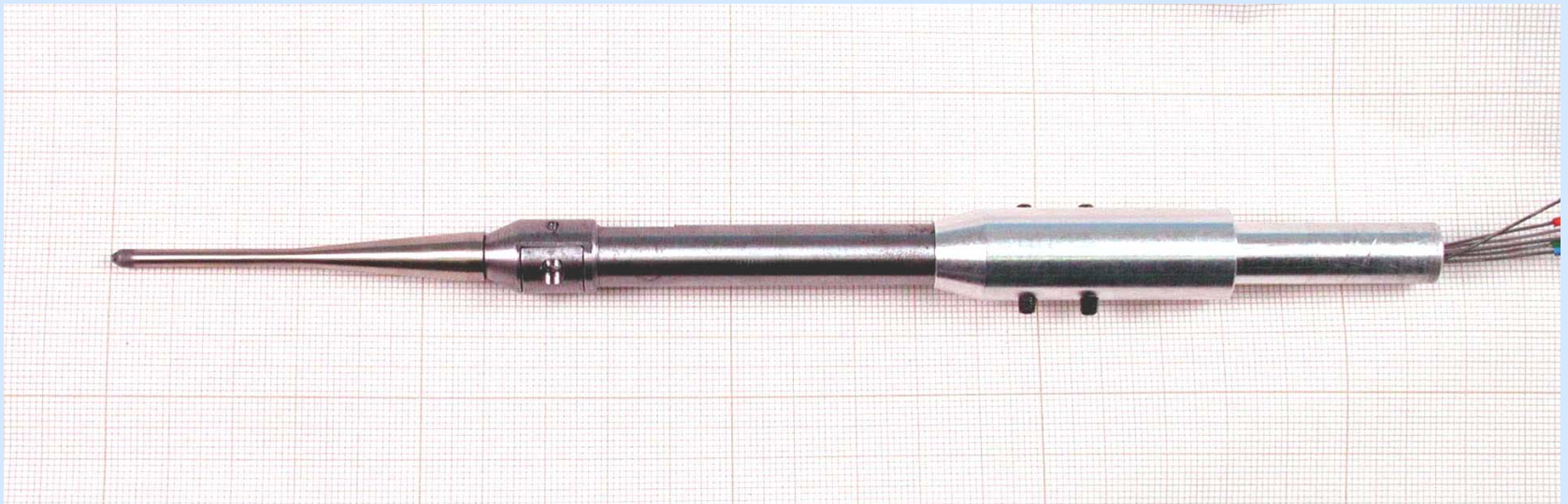


diamètre : 1,5 mm

macrophotographie d'un embout de sonde à 7 trous

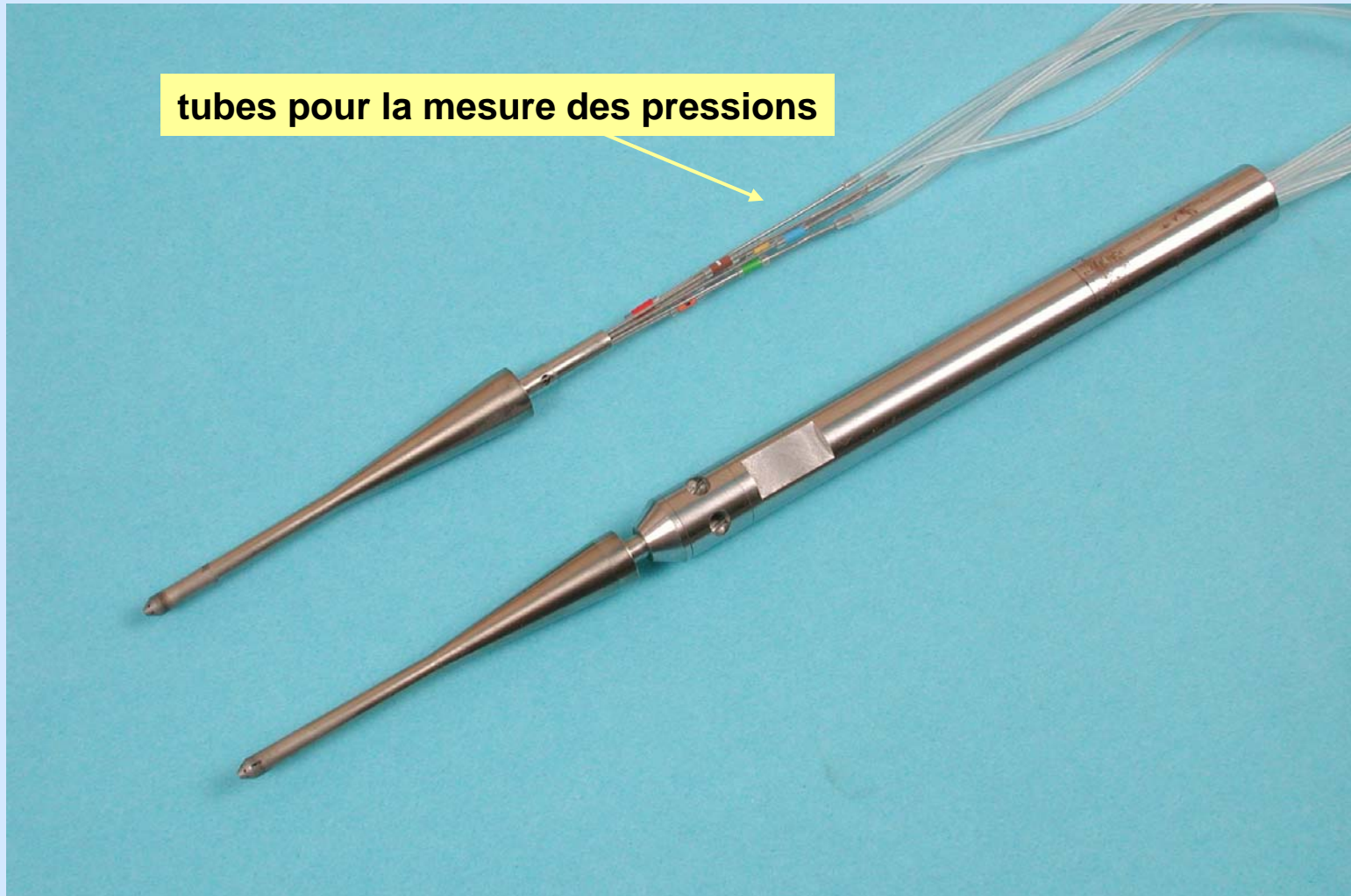
## Méthodes de mesure en aérodynamique

### Sonde de pression anémoclinométrique



sonde à 7 trous avec son support

## Sonde de pression anémoclinométrique

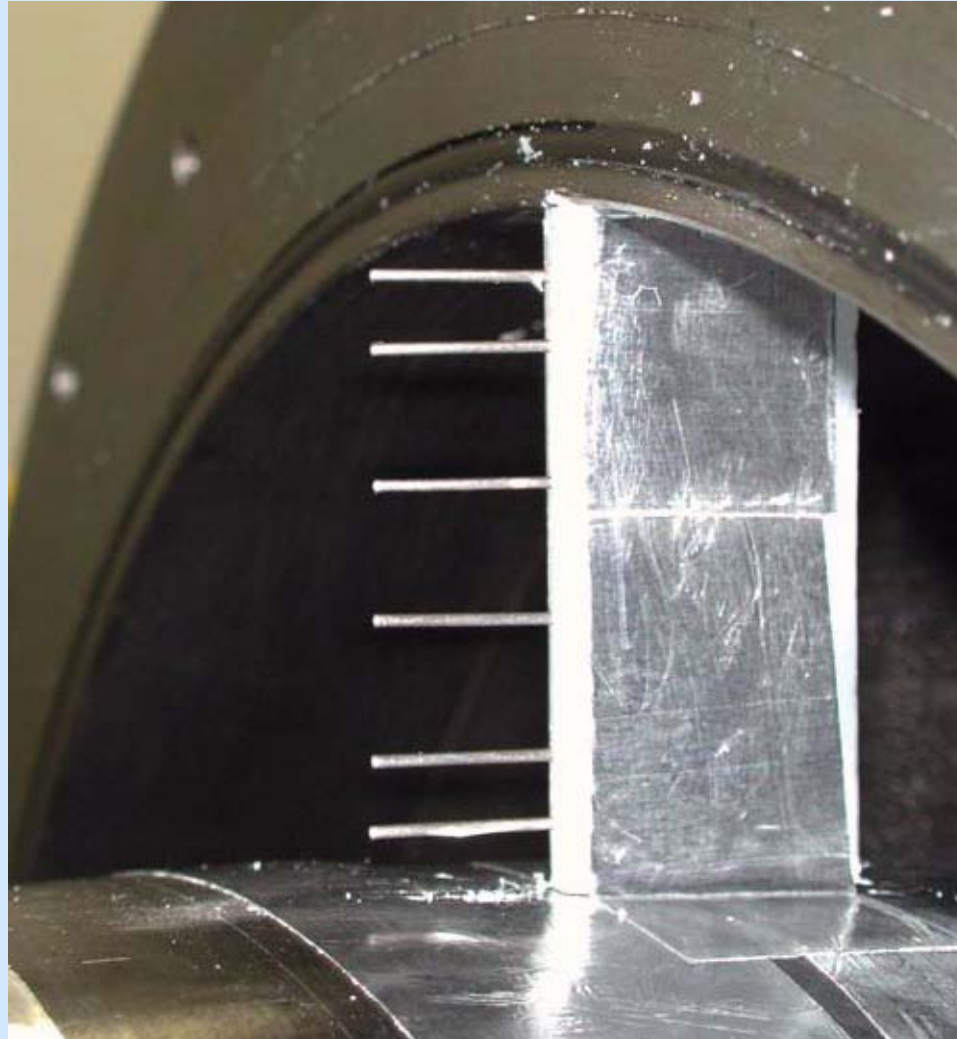


tubes pour la mesure des pressions

sonde à 7 trous avec son support

## Méthodes de mesure en aérodynamique

### Peigne de sondes de pression



# Méthodes de mesure en aérodynamique

## Sonde anémométrique à fil chaud



document Dantec

## Méthodes de mesure en aérodynamique

### Sonde anémométrique à fil chaud

- ★ un fil très fin est chauffé par passage d'un courant électrique d'intensité  $I$

l'équilibre thermique du fil résulte du bilan 

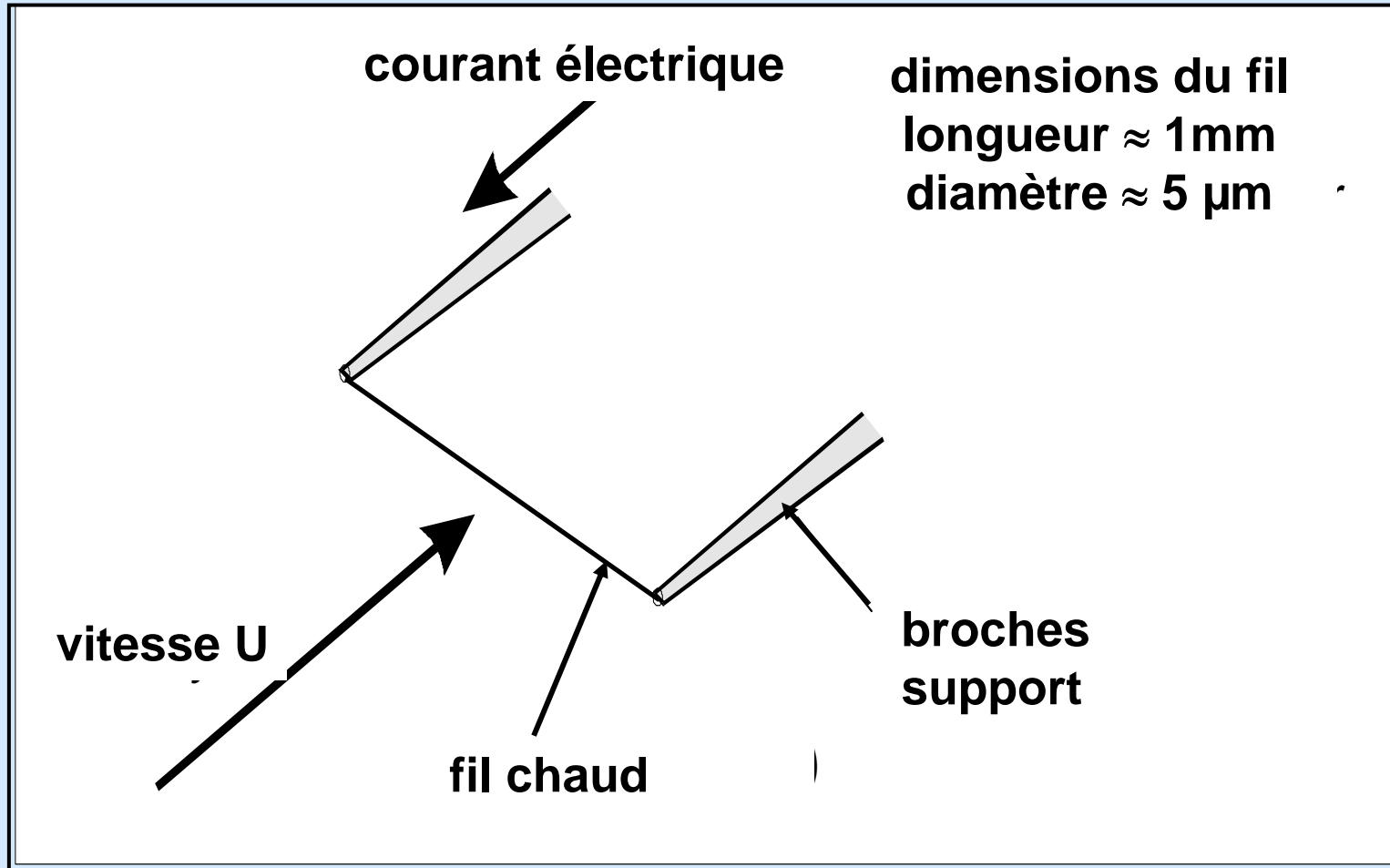
**chauffage électrique - refroidissement convectif**

- ★ si la vitesse de l'écoulement change le transfert convectif change ainsi que la température du fil

- ★ si la température change la résistance du fil change

**variations de résistance  variations de vitesse**

## Sonde anémométrique à fil chaud



sonde à un fil : mesure la composante de vitesse normale au fil

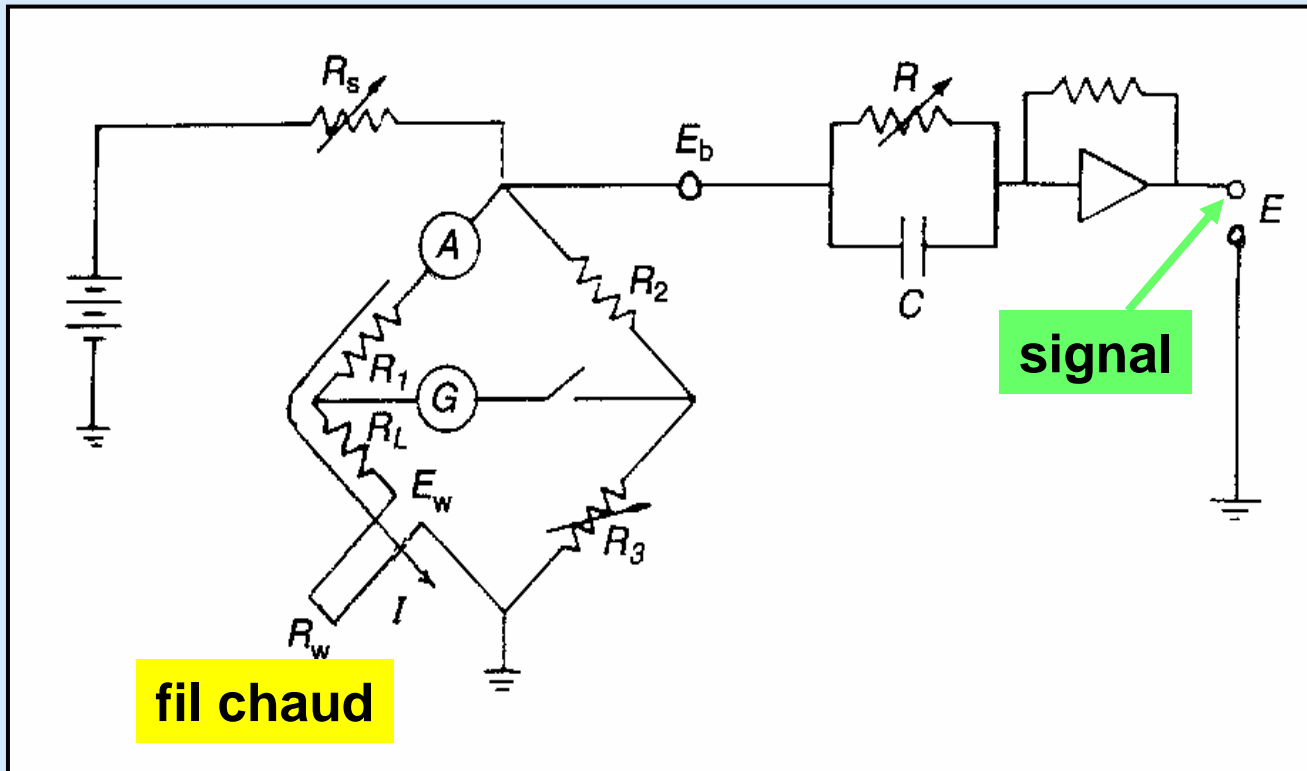


# Méthodes de mesure en aérodynamique

## Sonde anémométrique à fil chaud

### modes de fonctionnement

**courant constant**  $\rightarrow$  intensité  $I$  maintenue constante  $\rightarrow$  résistance  $R_w$  du fil varie  $\rightarrow$  mesure de  $R_w$  par pont de Wheatstone

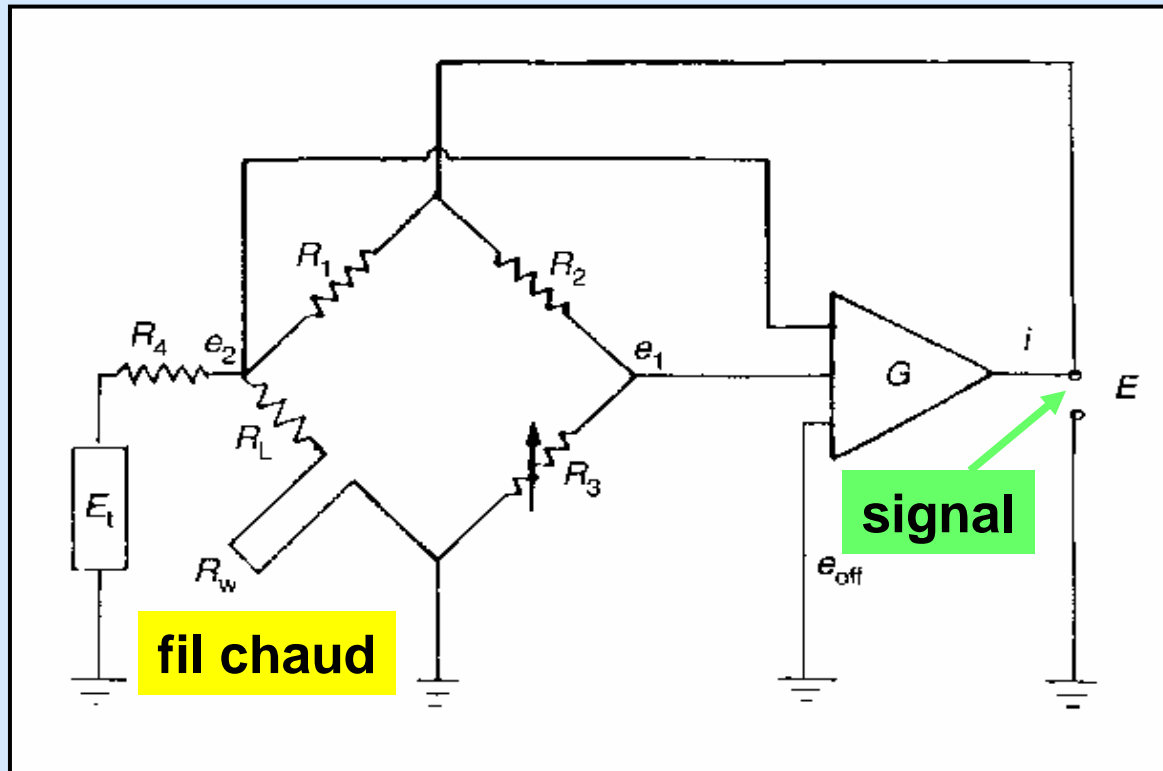


# Méthodes de mesure en aérodynamique

## Sonde anémométrique à fil chaud

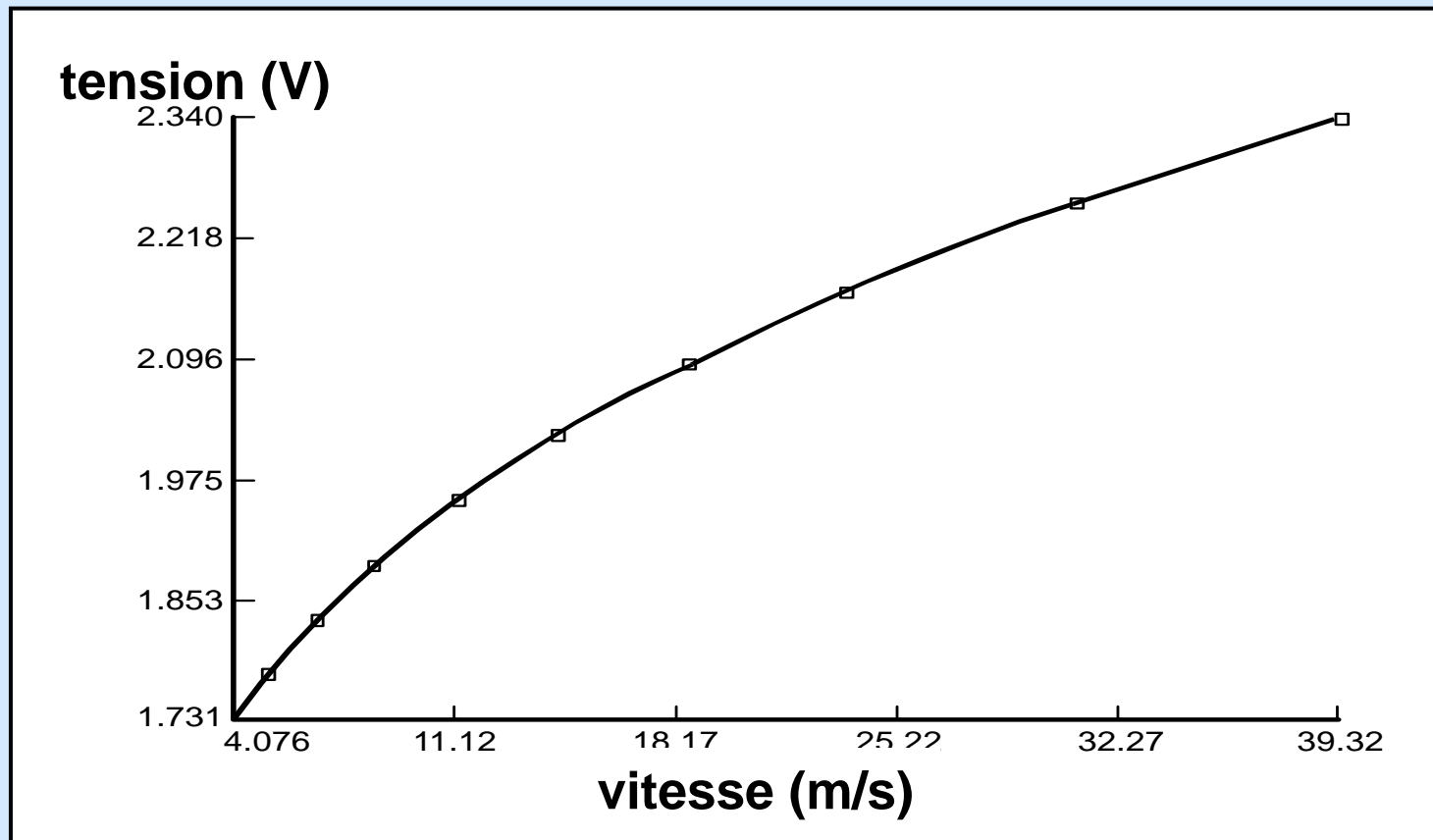
*modes de fonctionnement*

température constante  $\rightarrow$  résistance du fil  $R_w$  maintenue constante (par un asservissement)  $\rightarrow$  mesure de l'intensité  $I$



## Sonde anémométrique à fil chaud

Le fil est étalonné dans un écoulement de vitesse connue



**courbe d'étalonnage d'un fil chaud**

## Méthodes de mesure en aérodynamique

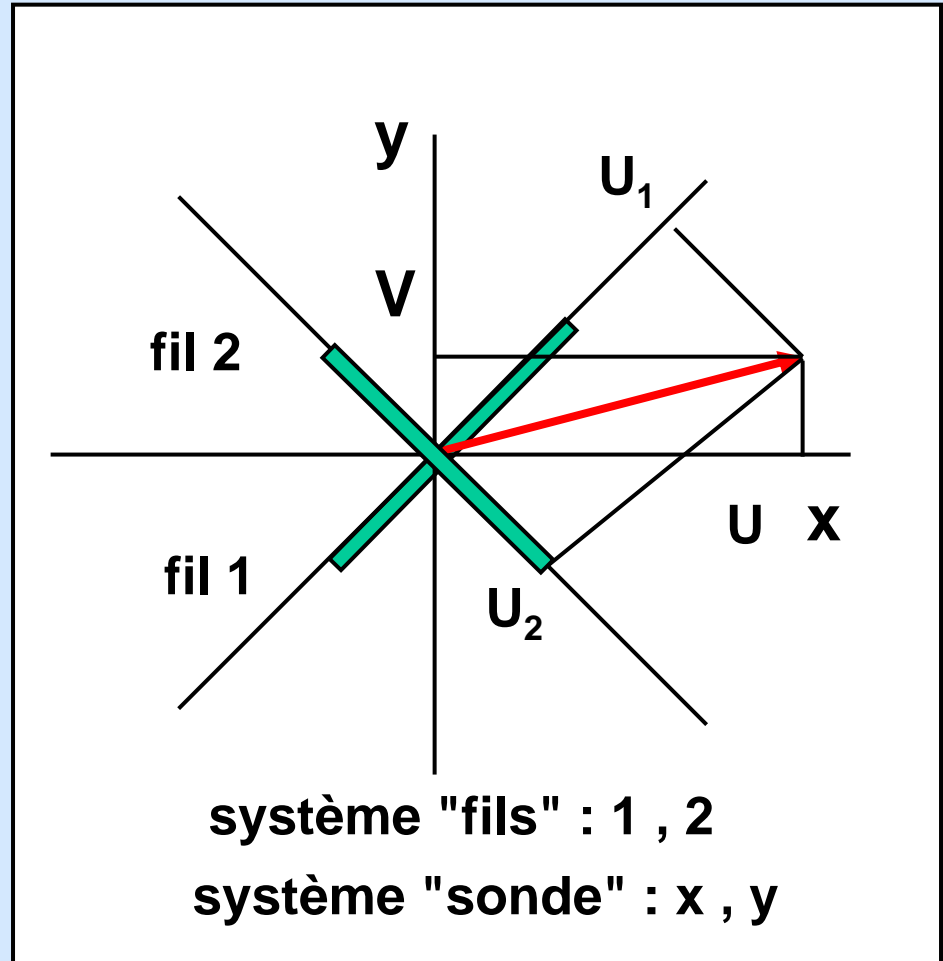
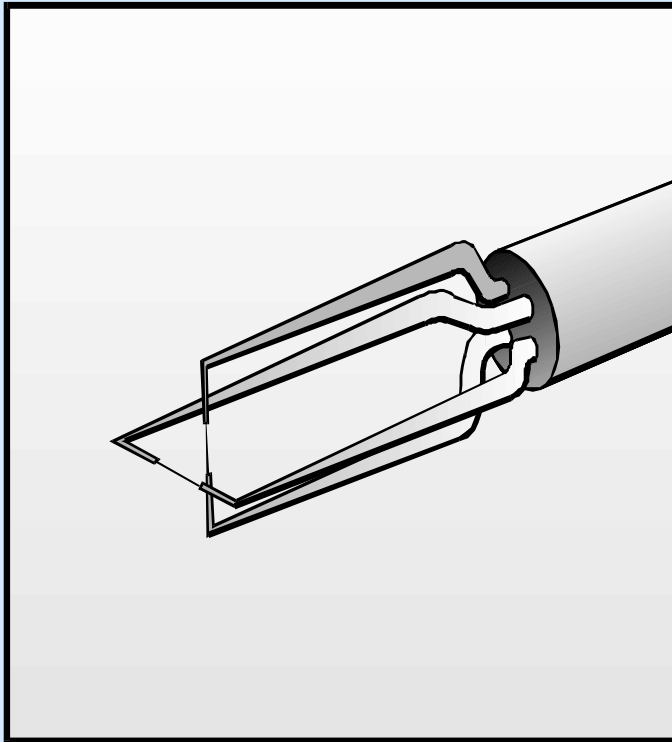
### Sonde anémométrique à fil chaud

#### domaine d'utilisation

- ★ bien adapté à la mesure des faibles vitesses dans l'air et dans l'eau
- ★ peut être utilisé en supersonique, mais étalonnage délicat
- ★ très large bande passante (plusieurs centaines de kHz)
  - étude de la turbulence

# Méthodes de mesure en aérodynamique

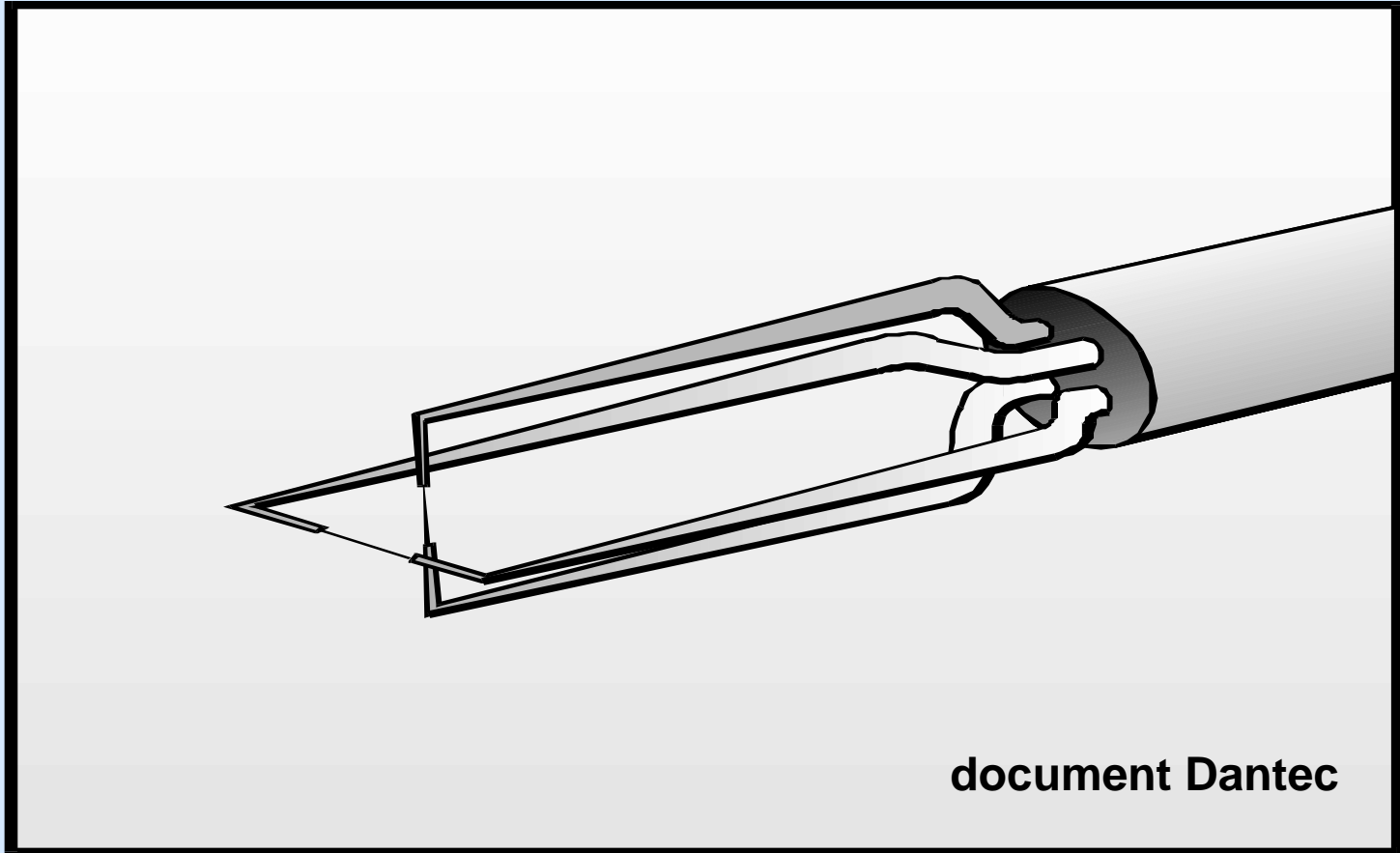
## Sonde anémométrique à fil chaud



sonde à deux fils en X pour la mesure de deux composantes

## Méthodes de mesure en aérodynamique

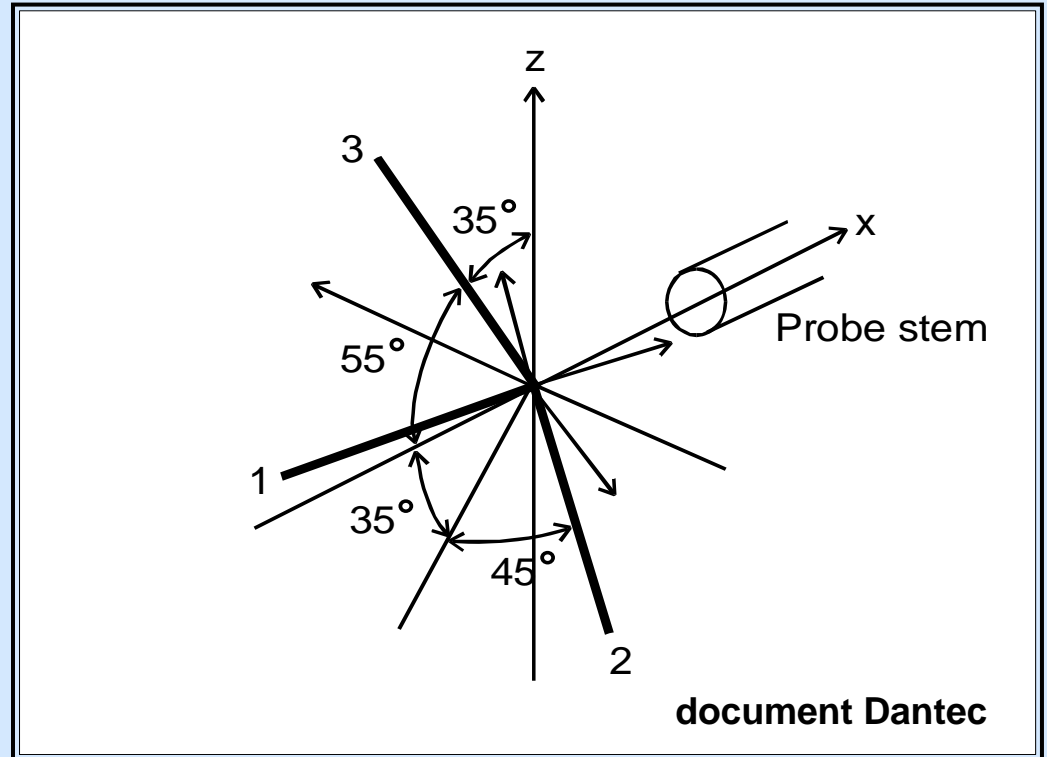
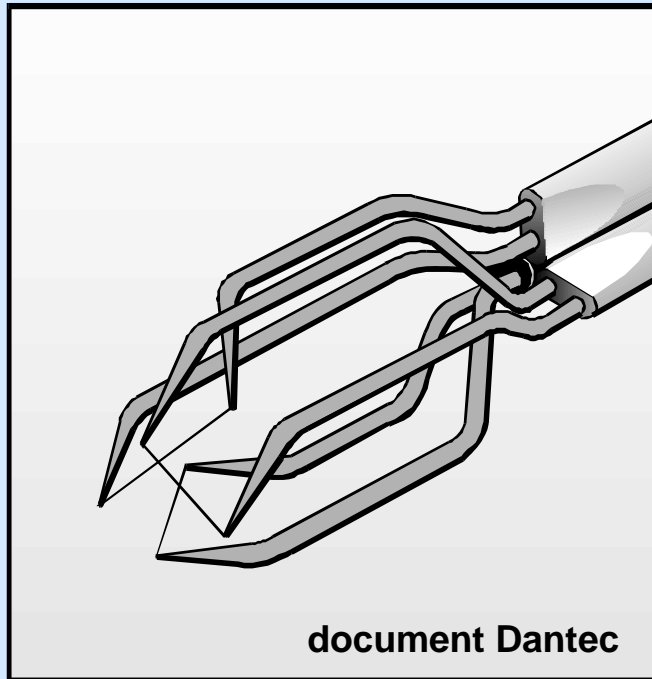
### Sonde anémométrique à fil chaud



Sondes à deux fils pour la mesure de deux composantes de la vitesse

## Méthodes de mesure en aérodynamique

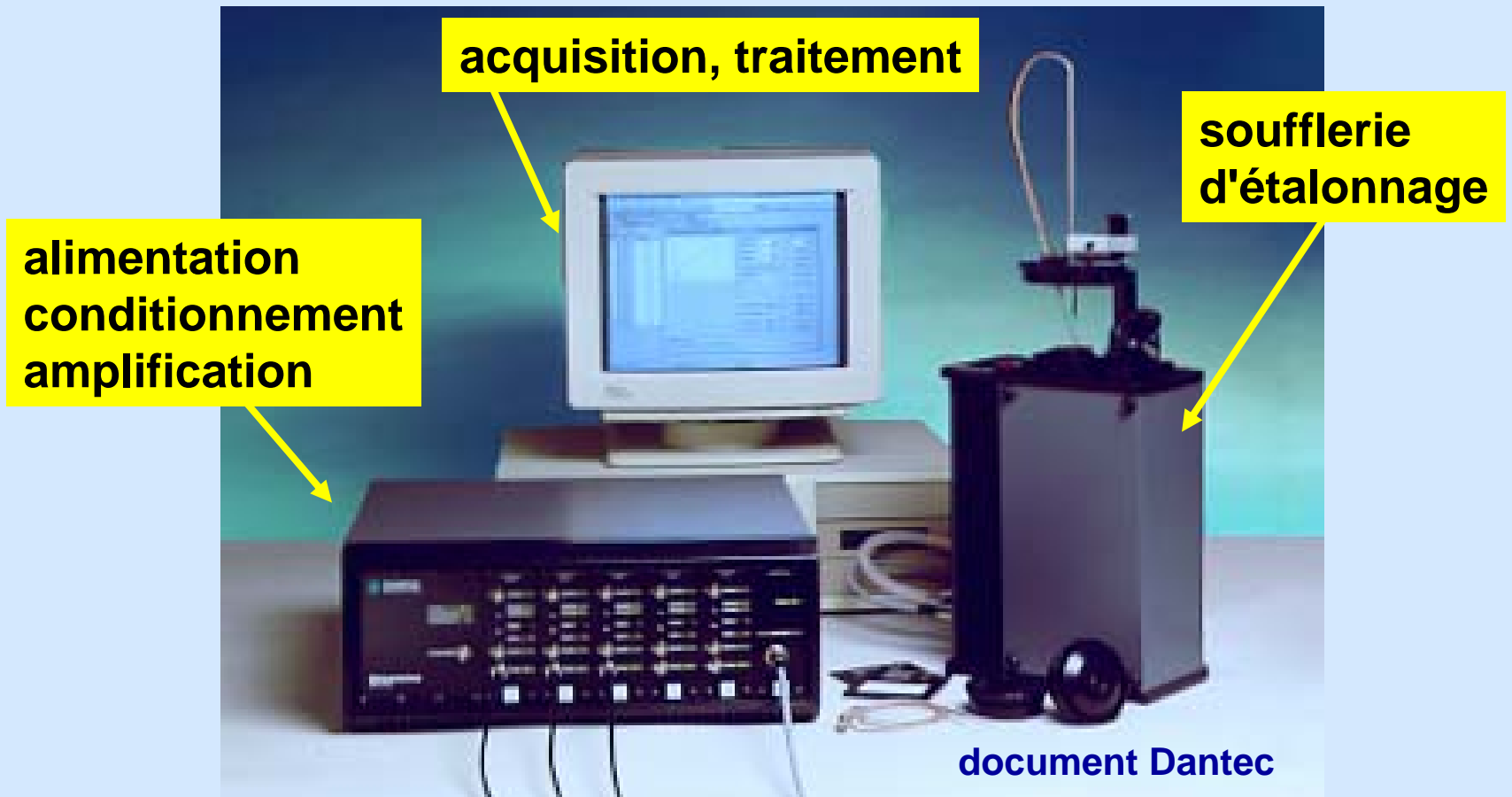
### Sonde anémométrique à fil chaud



sonde tri-axiale pour les mesures en tridimensionnel

## Méthodes de mesure en aérodynamique

### Sonde anémométrique à fil chaud



chaîne fil chaud typique

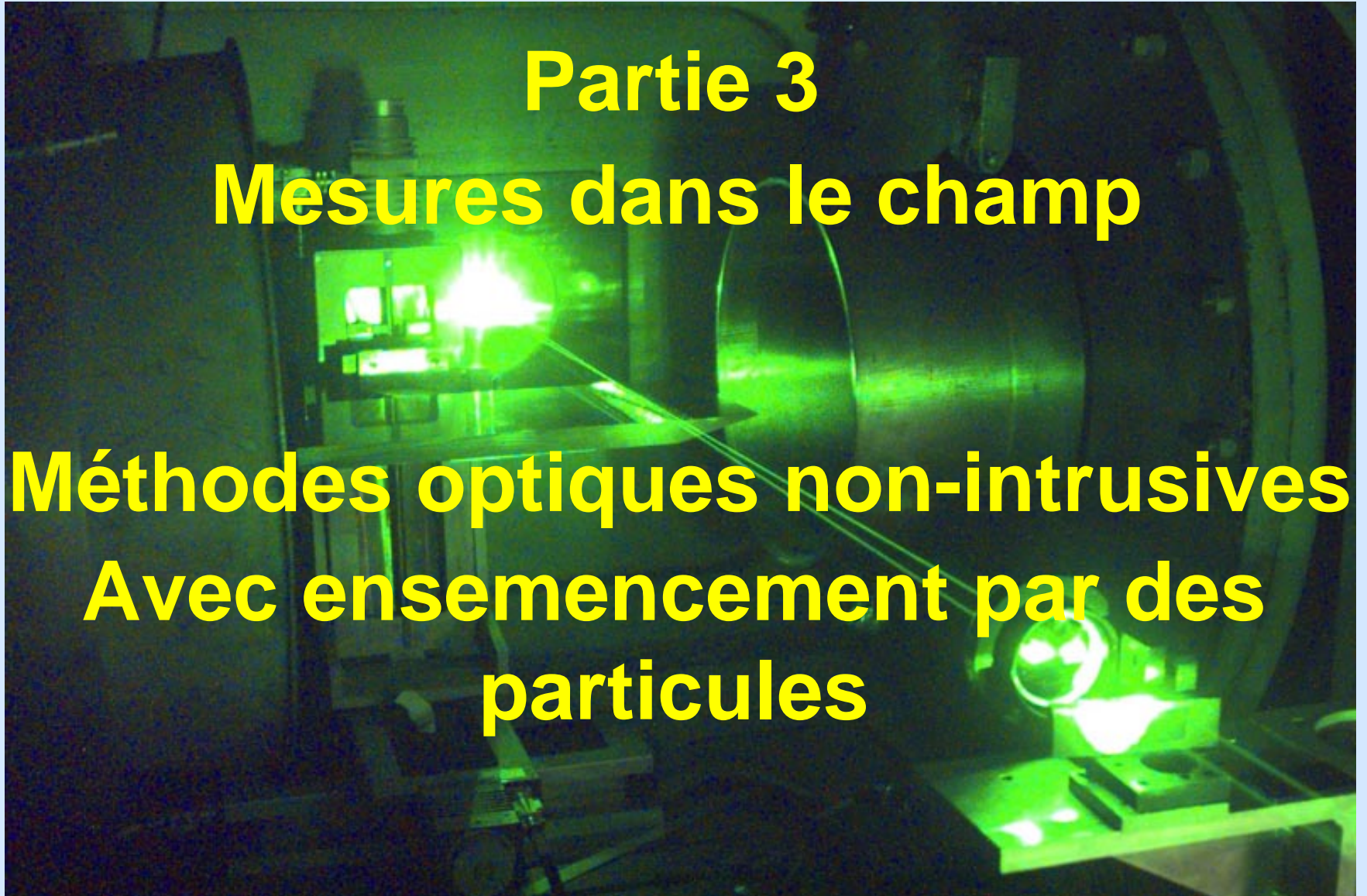


# Méthodes de mesure en aérodynamique

## Partie 3

### Mesures dans le champ

**Méthodes optiques non-intrusives  
Avec ensemenement par des  
particules**



# Méthodes de mesure en aérodynamique

## Vélocimétrie laser à franges



## Méthodes de mesure en aérodynamique

### Vélocimétrie laser à franges

#### principe de base

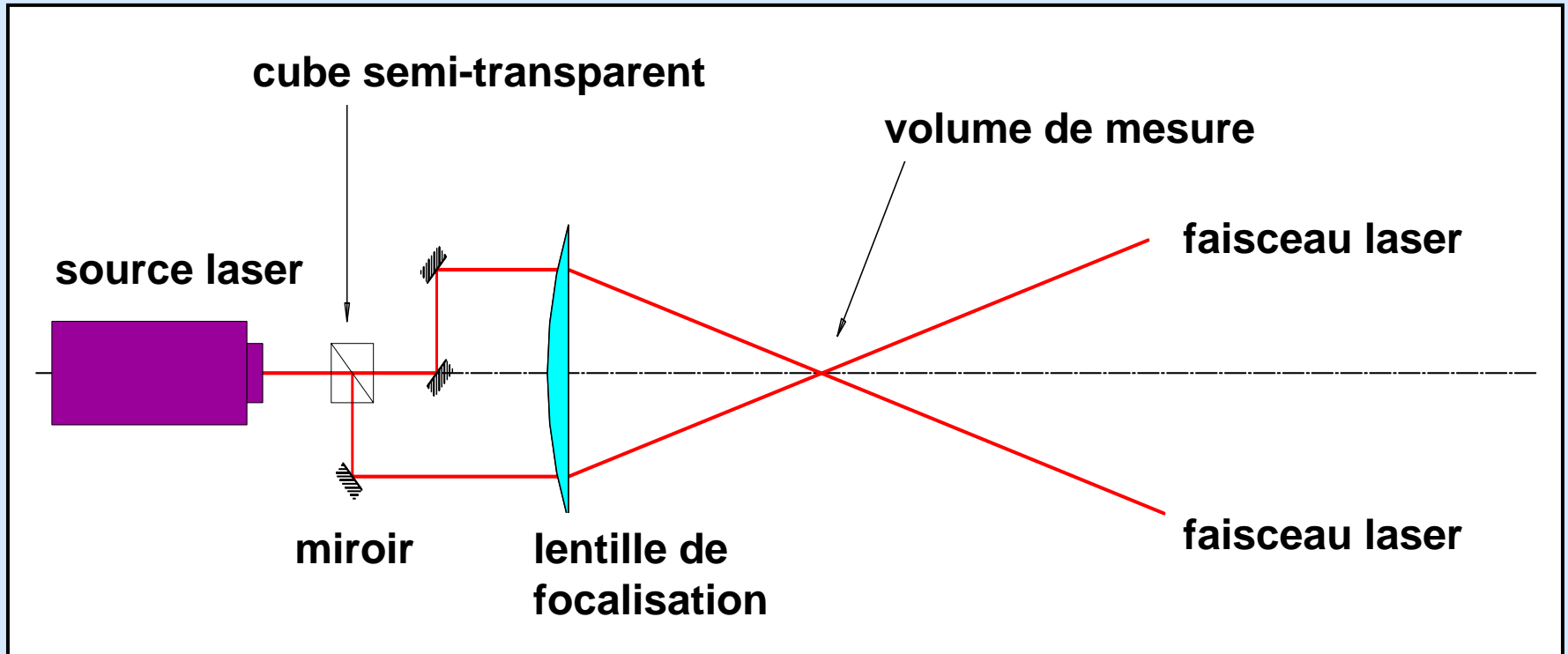
mesure de la vitesse de particules entraînées par l'écoulement

#### méthode

déterminer la fréquence du scintillement produit par une particule traversant un réseau de franges

création du réseau de franges → interférence de deux faisceaux émis par un laser

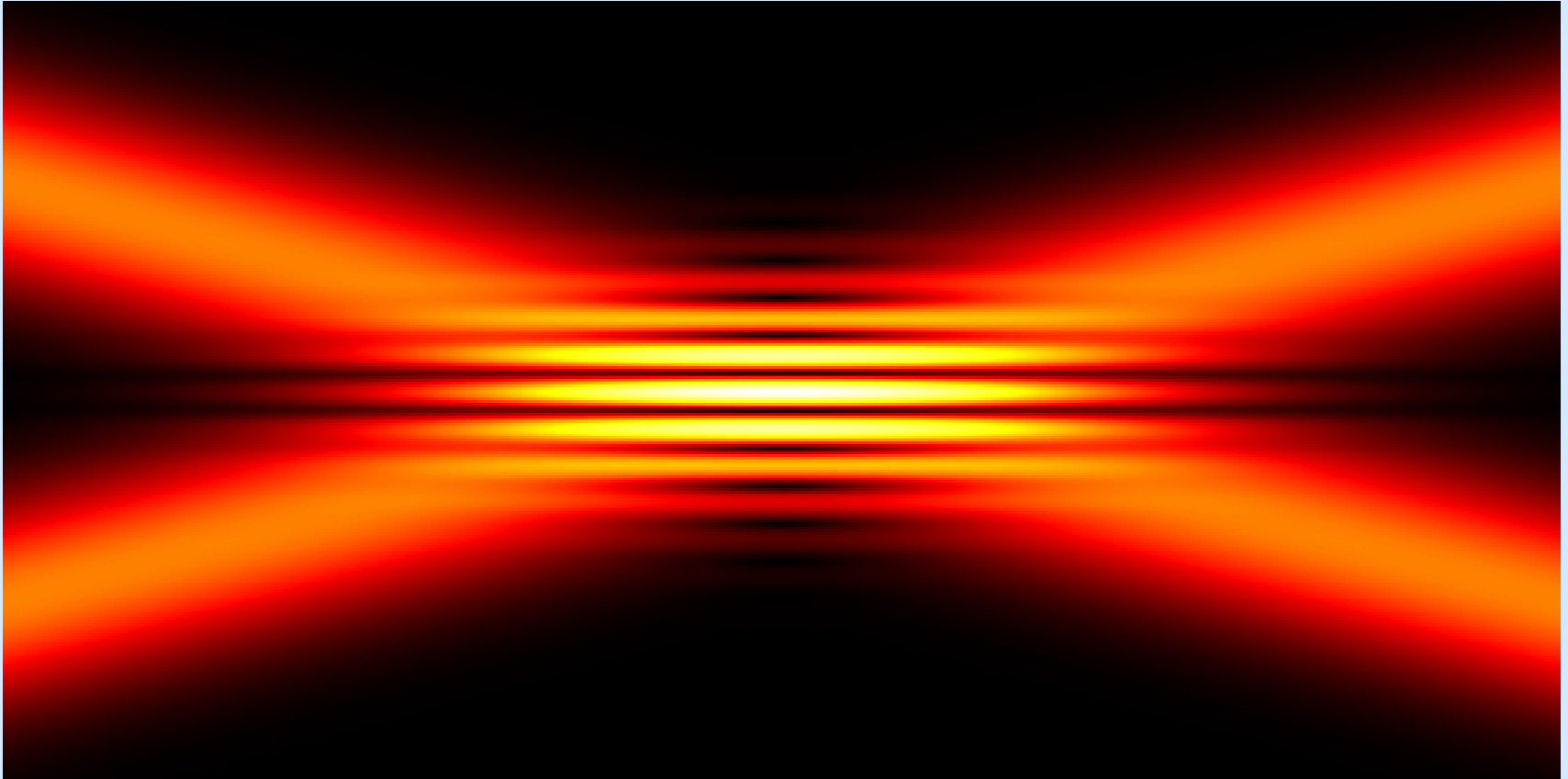
## Vélocimétrie laser à franges



partie émission → création du réseau de franges

## Méthodes de mesure en aérodynamique

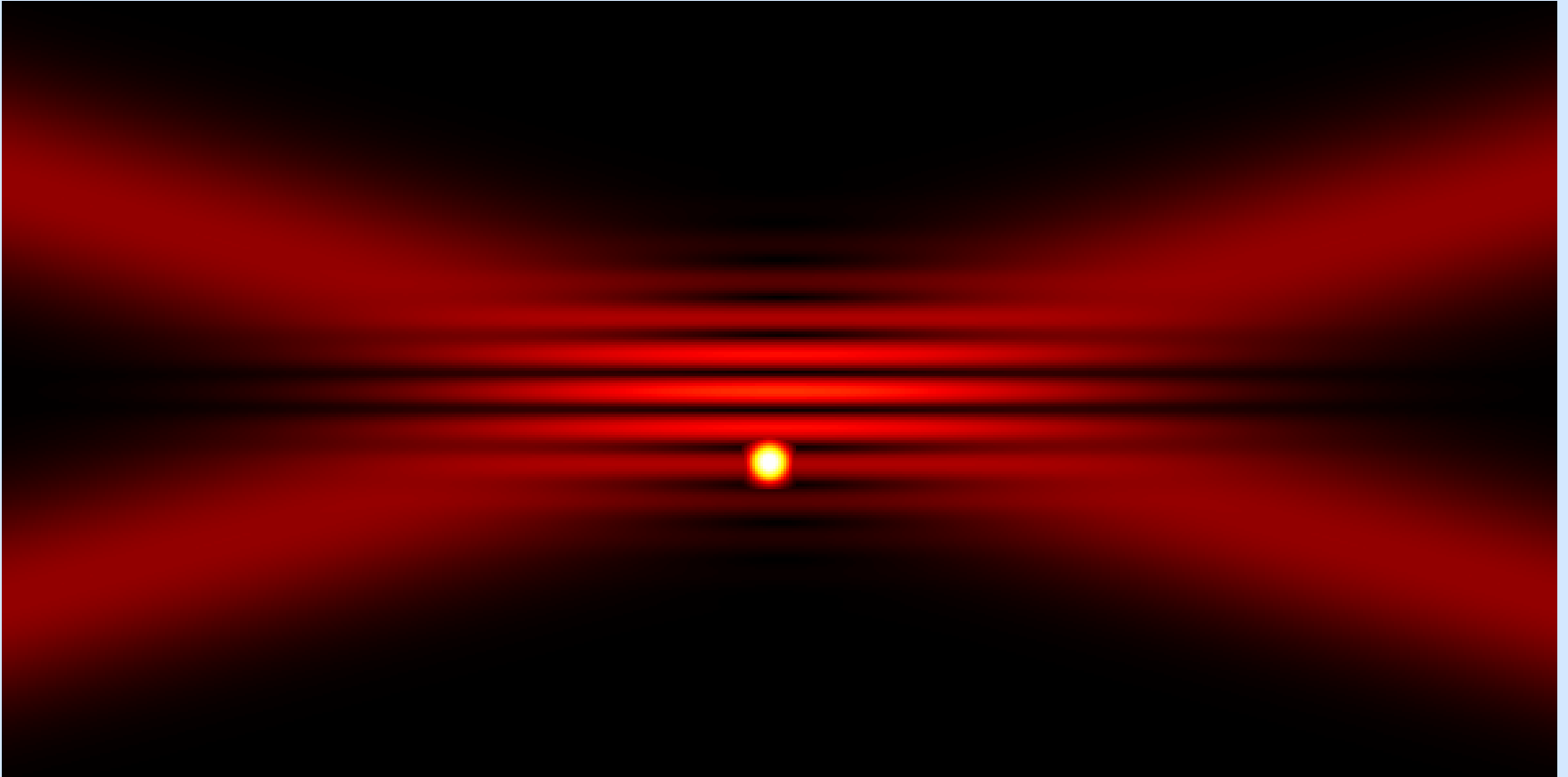
### Vélocimétrie laser à franges



réseau de franges à l'intersection de deux faisceaux laser

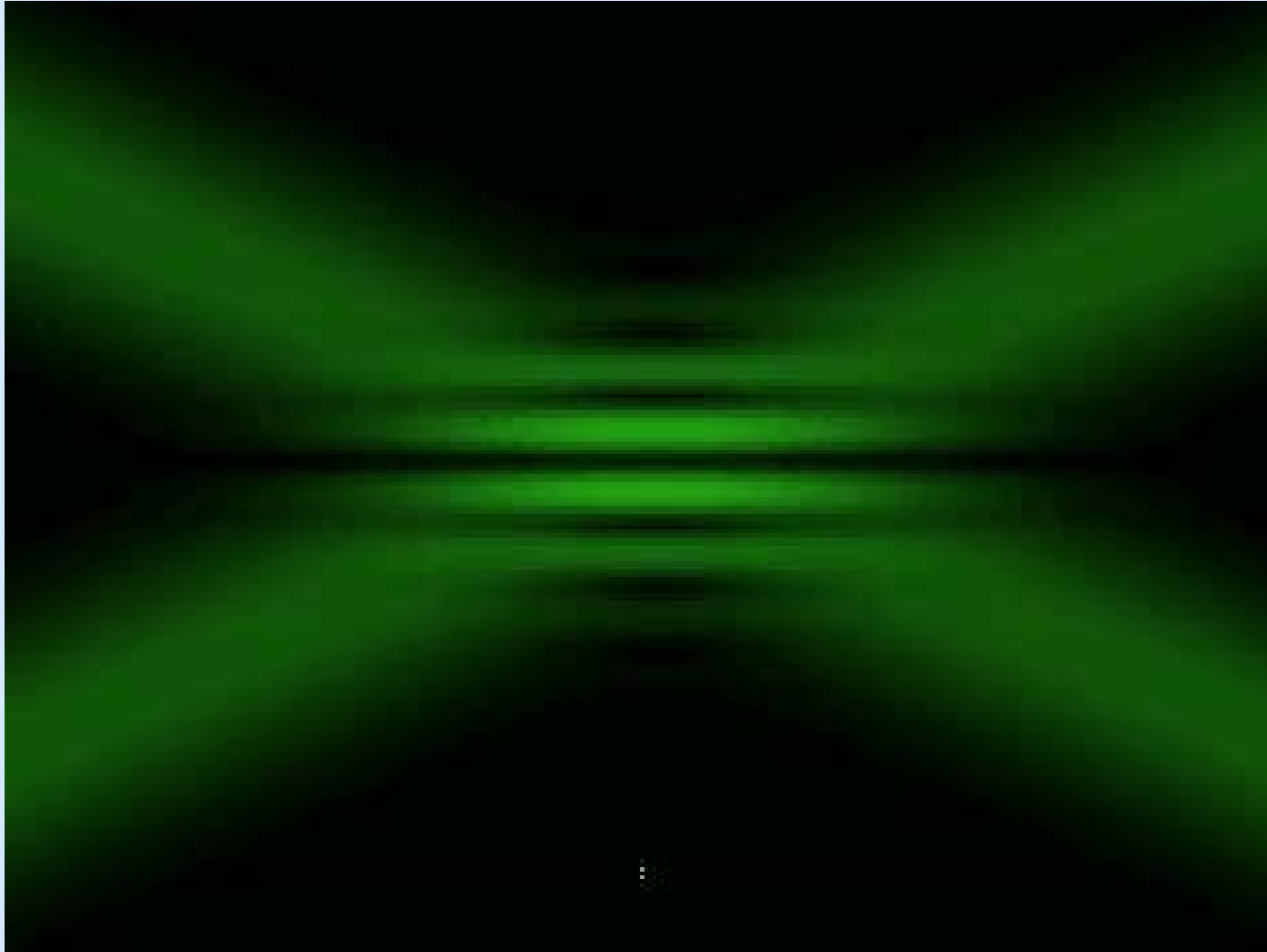
## Méthodes de mesure en aérodynamique

### Vélocimétrie laser à franges



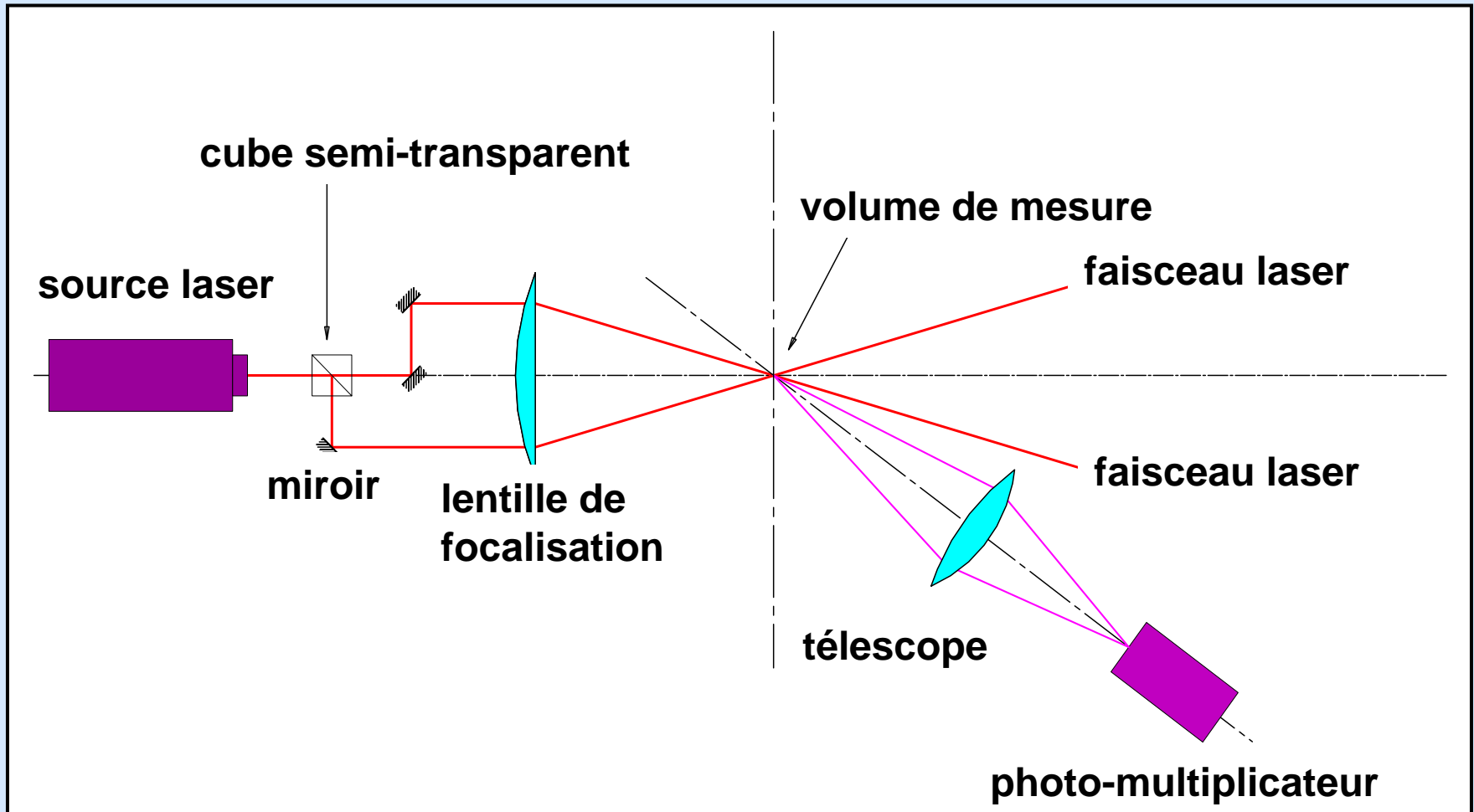
scintillement d'une particule passant par une frange brillante

**Vélocimétrie laser à franges**



**scintillement d'une particule traversant le réseau de franges**

## Vélocimétrie laser à franges



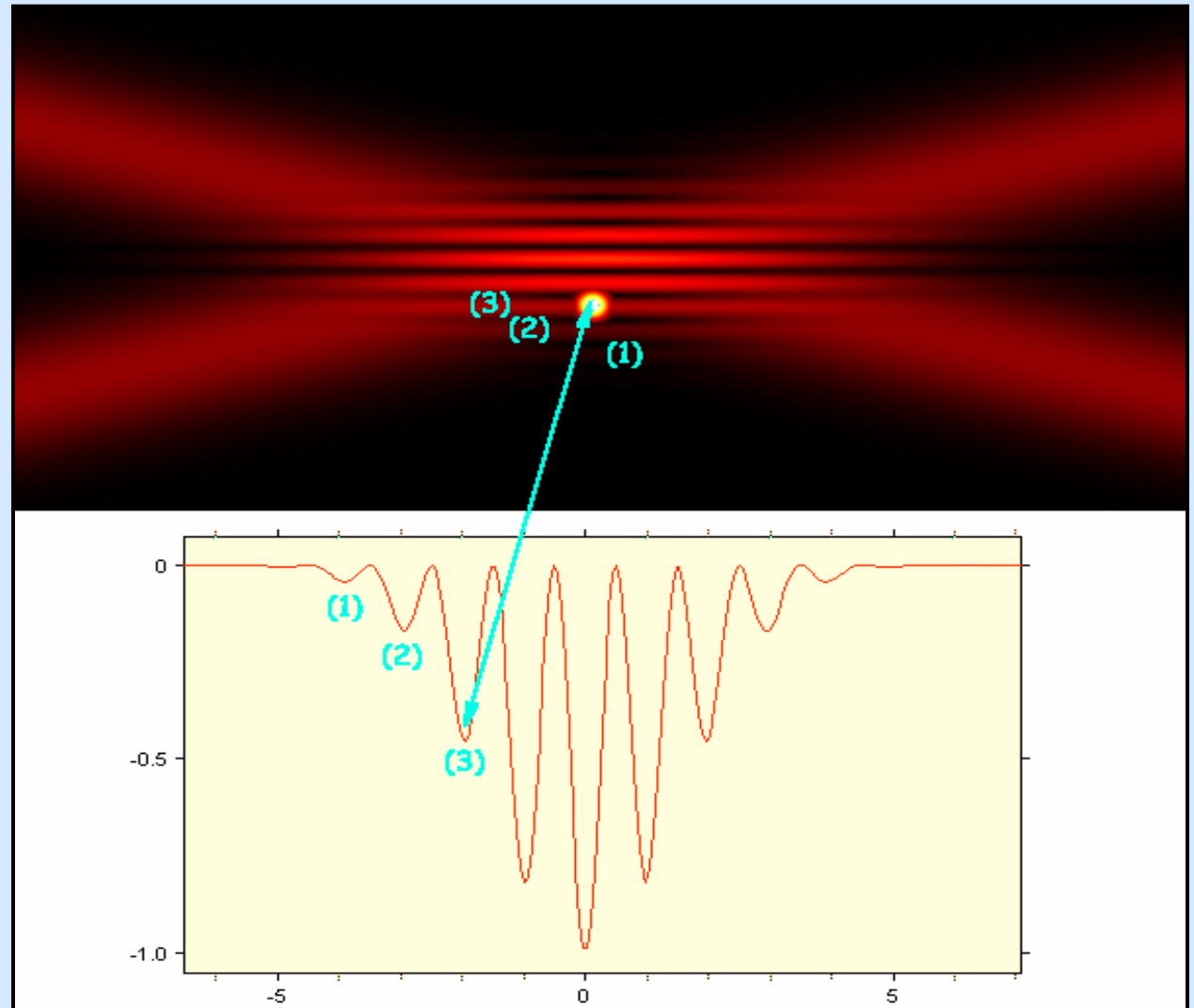
partie réception de la lumière diffusée par la particule



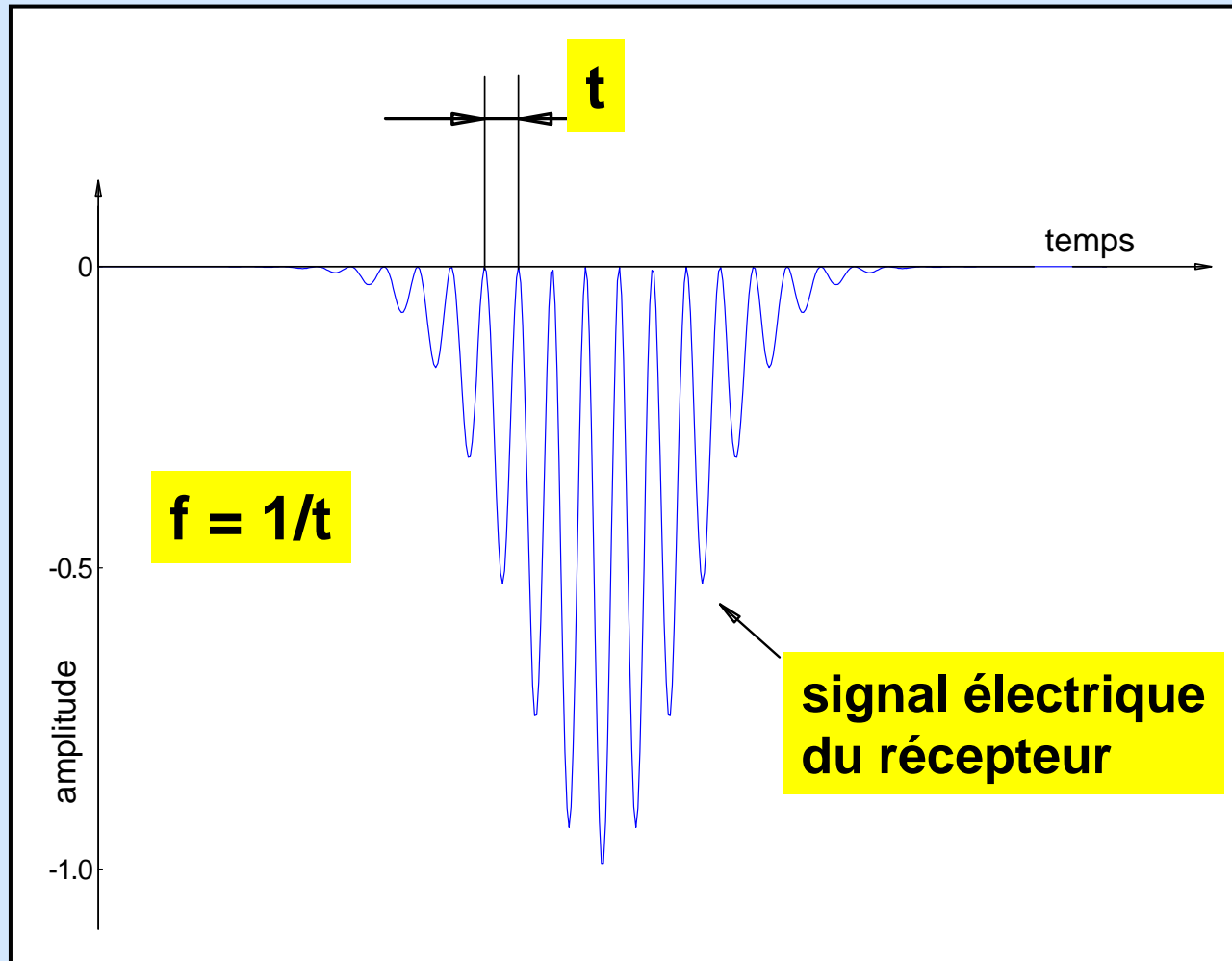
# Méthodes de mesure en aérodynamique

## Vélocimétrie laser à franges

signal issu du  
photo-multiplicateur

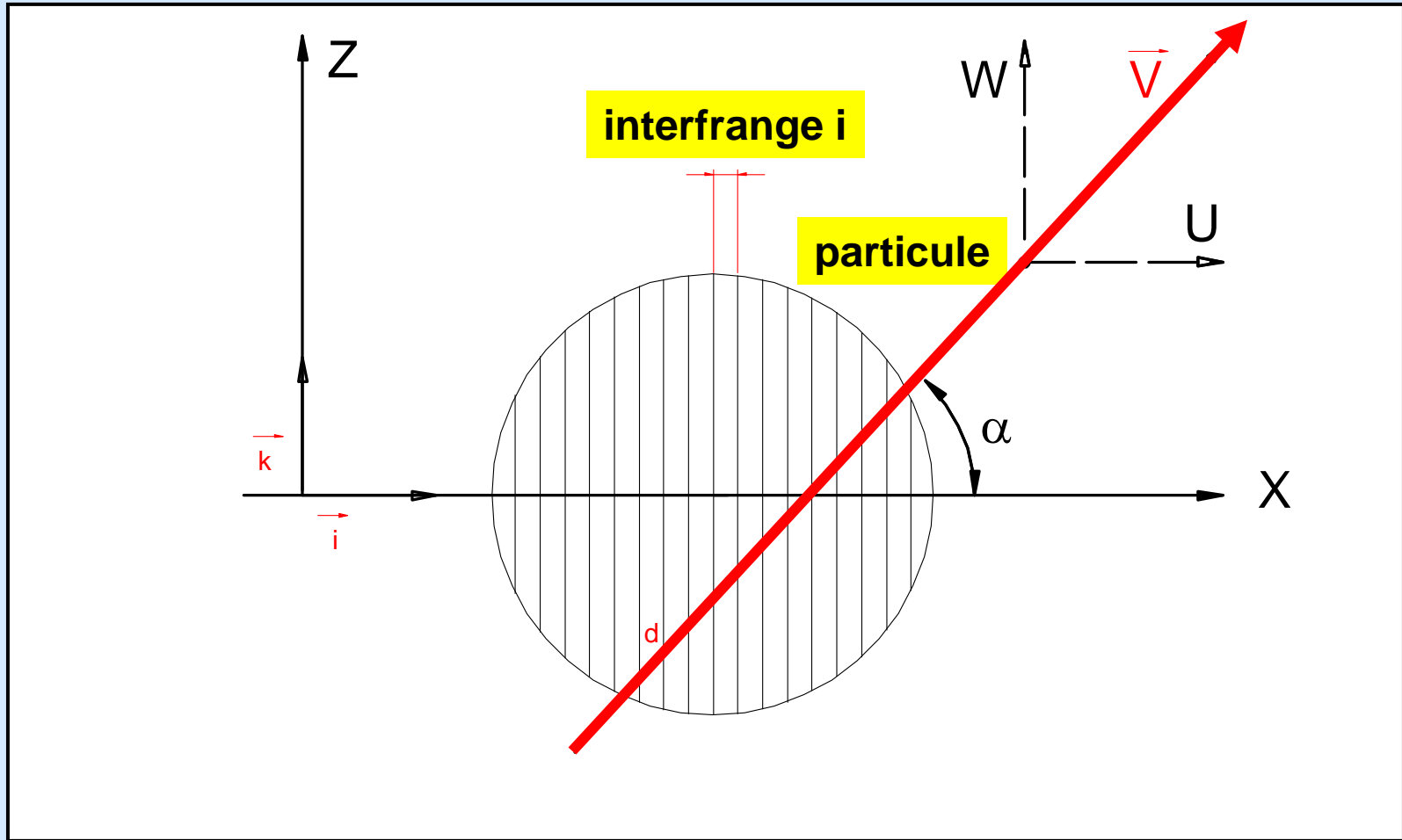


## Vélocimétrie laser à franges



fréquence  $f$  caractéristique du signal électrique

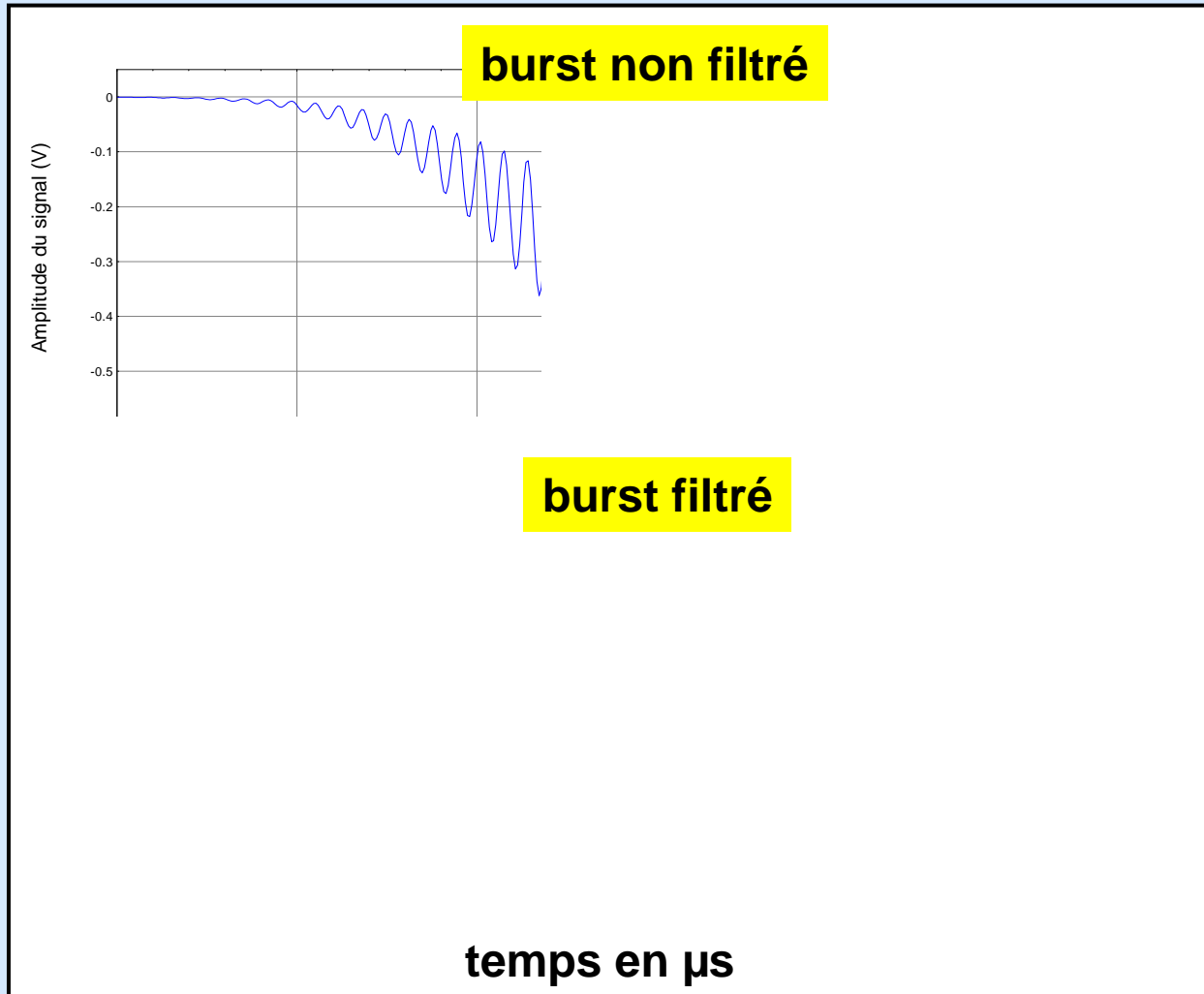
## Vélocimétrie laser à franges



$$t = i / (V \times \cos \alpha) \quad \Rightarrow \quad f = 1/t = U / i \quad \Rightarrow \quad \boxed{U = i \times f}$$

# Méthodes de mesure en aérodynamique

## Vélocimétrie laser à franges




mesure de la fréquence

## Méthodes de mesure en aérodynamique

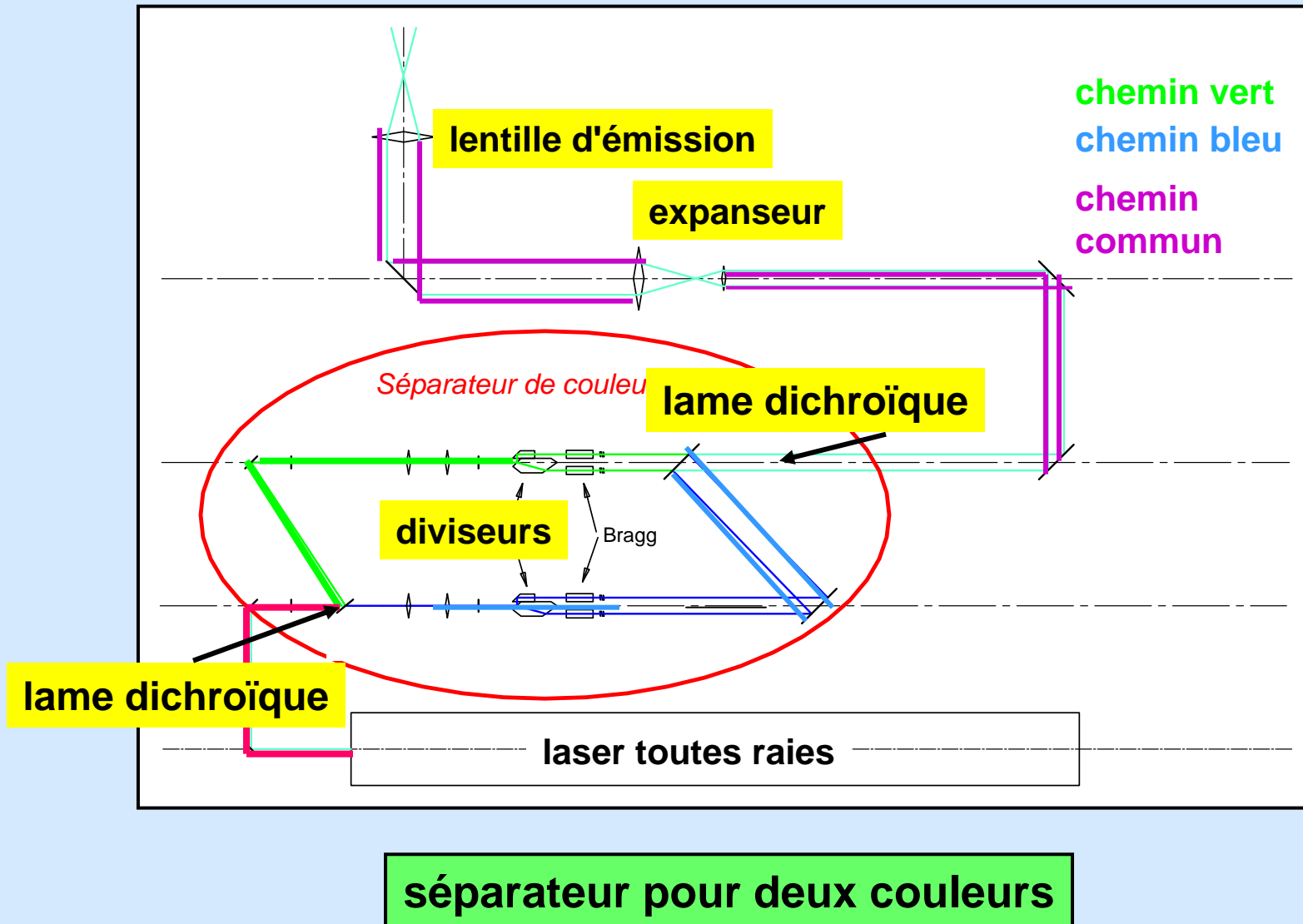
### Vélocimétrie laser à franges

#### mesure de la fréquence

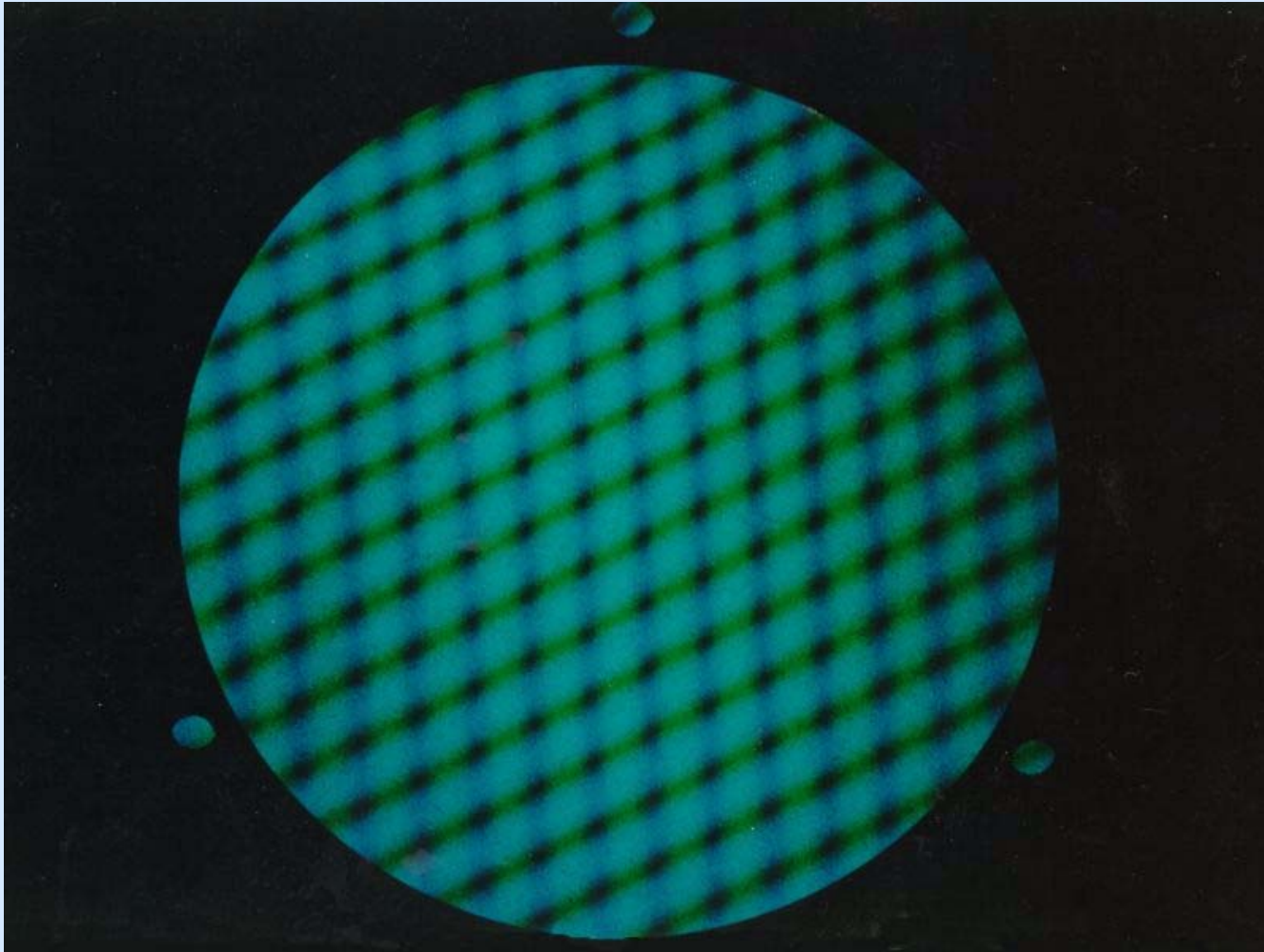
problème  extraire une fréquence très élevée (plusieurs MHz)  
d'un signal très bref (quelques  $\mu\text{s}$ )

- ★ corrélateur de photon
- ★ suiveur de fréquence (basses vitesses)
- ★ compteur électronique (mesure la période)
- ★ analyseur de fréquence (transformée de Fourier du signal)

## Vélocimétrie laser à franges pour 2 composantes

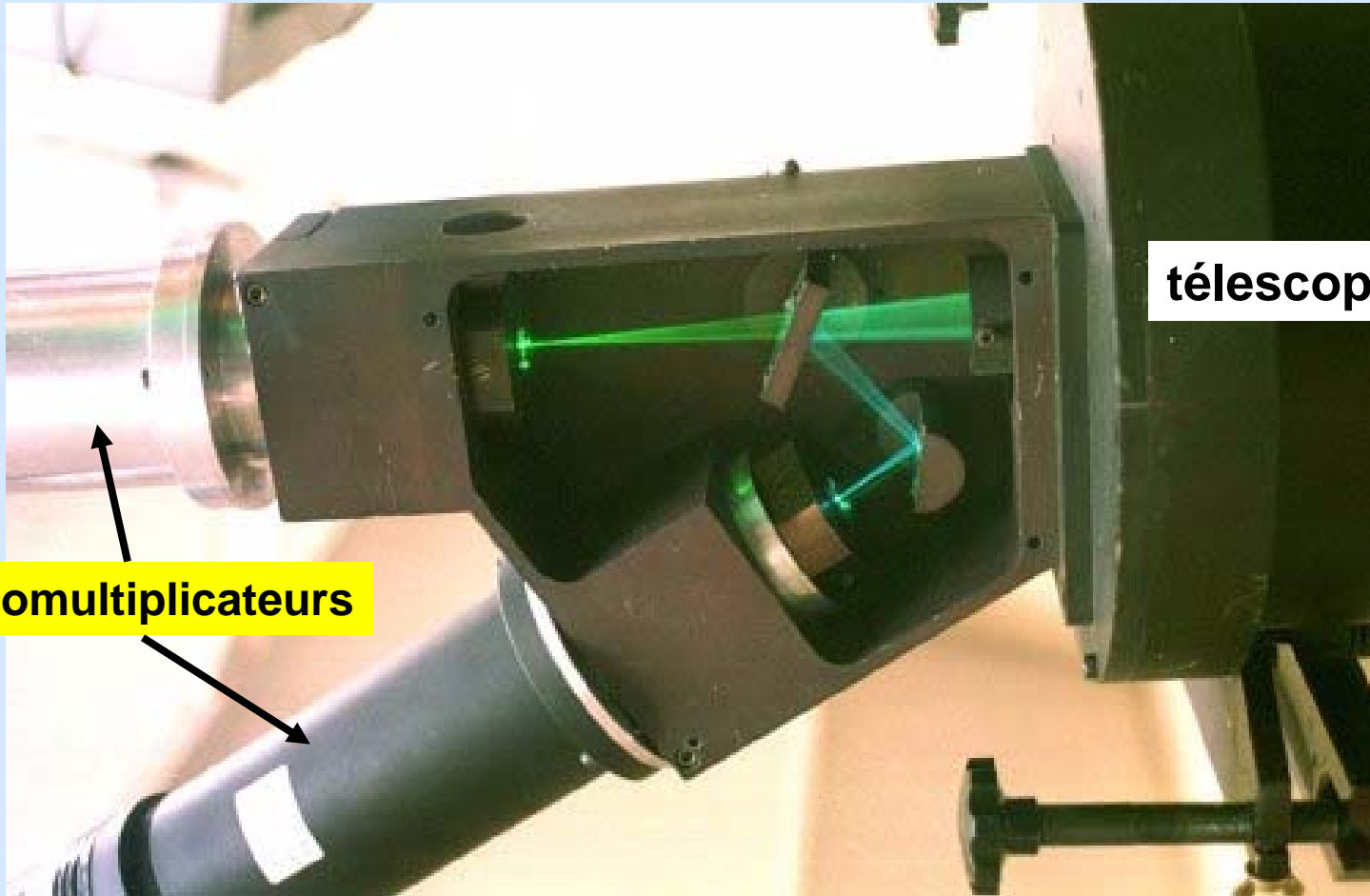


**Vélocimétrie laser à franges pour 2 composantes**



création de deux réseaux de franges de couleurs différentes

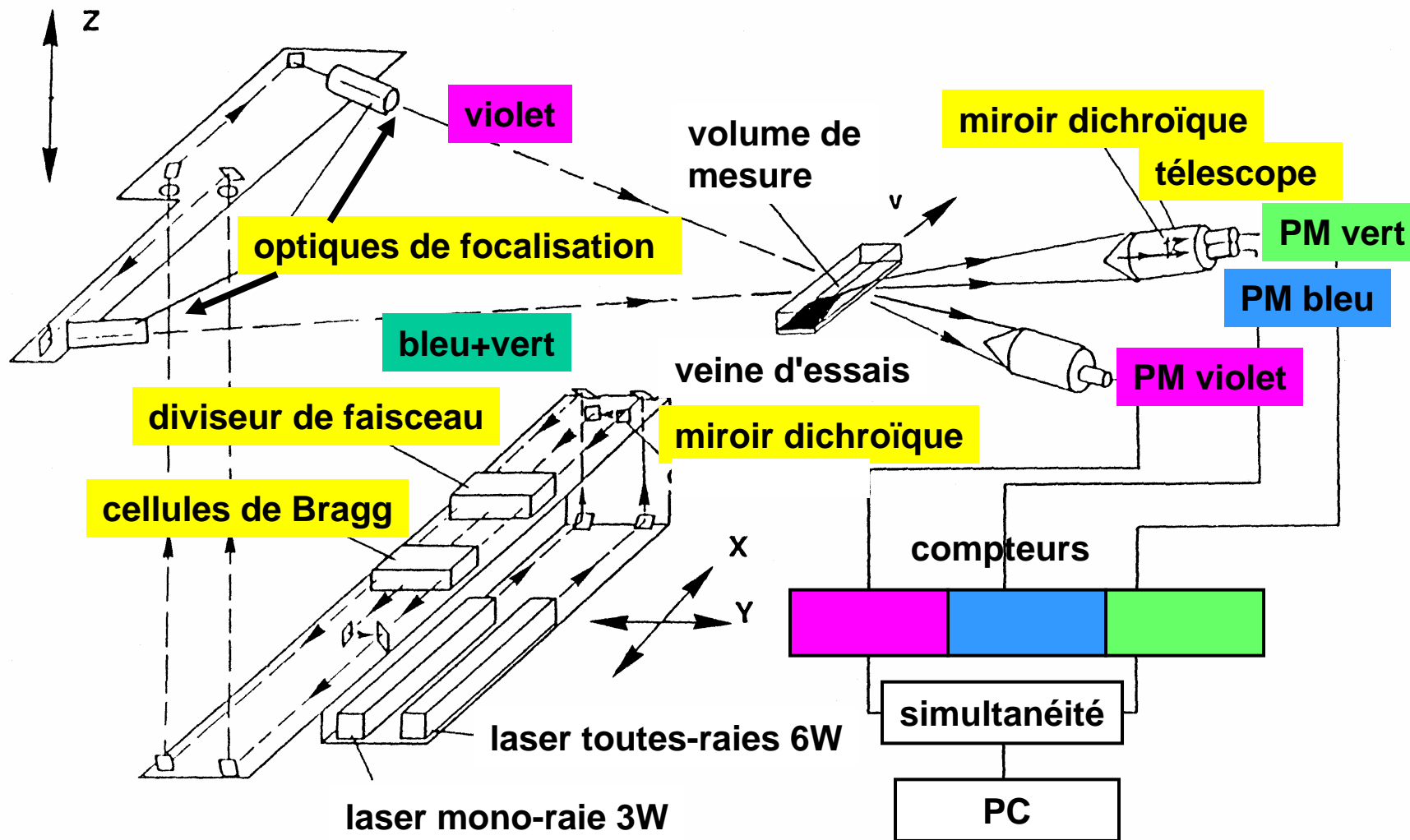
**Vélocimétrie laser à franges pour 2 composantes**



**partie réception : séparation des couleurs bleu et verte**

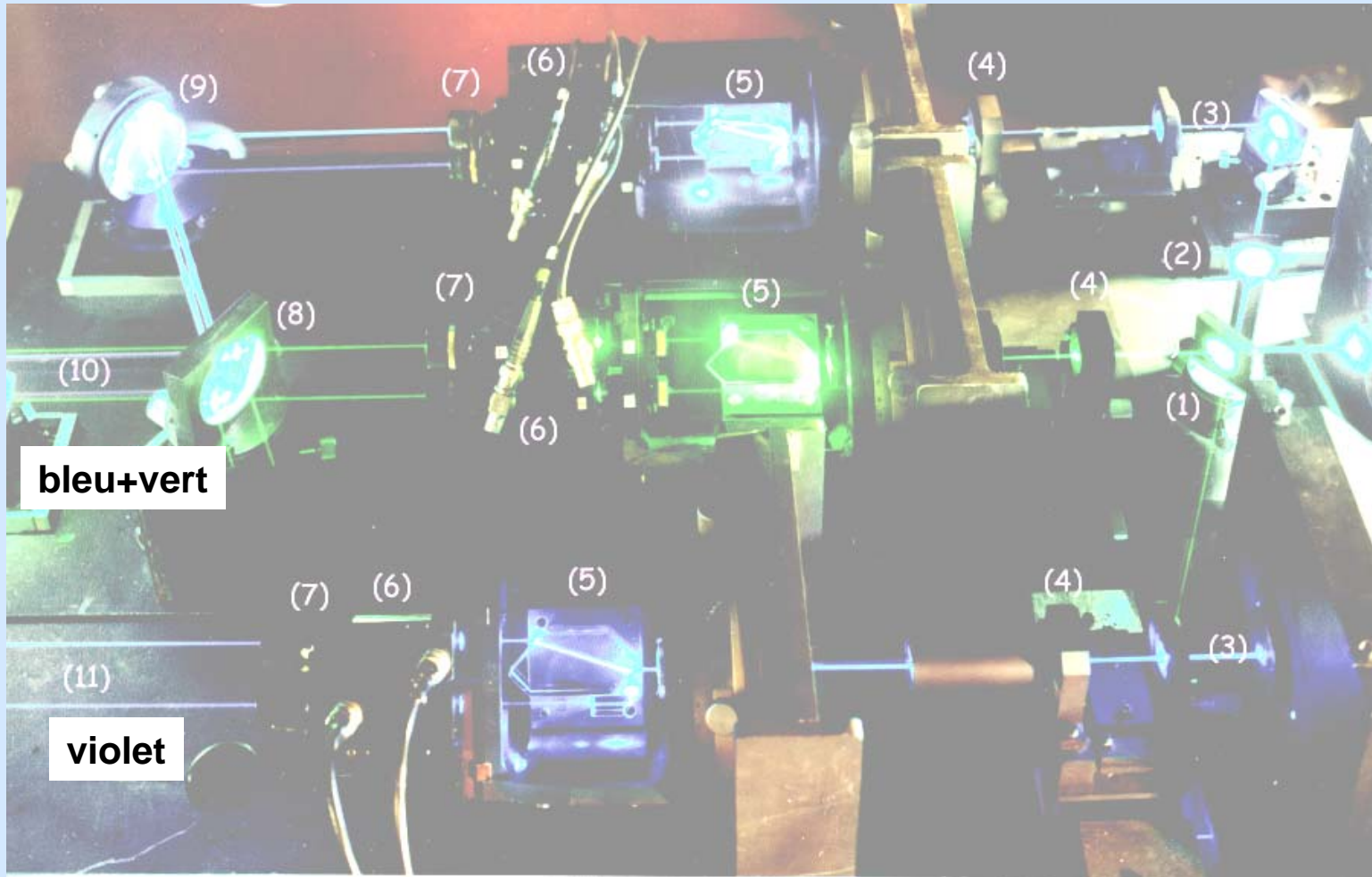


## Vélocimétrie laser à franges pour 3 composantes



# Méthodes de mesure en aérodynamique

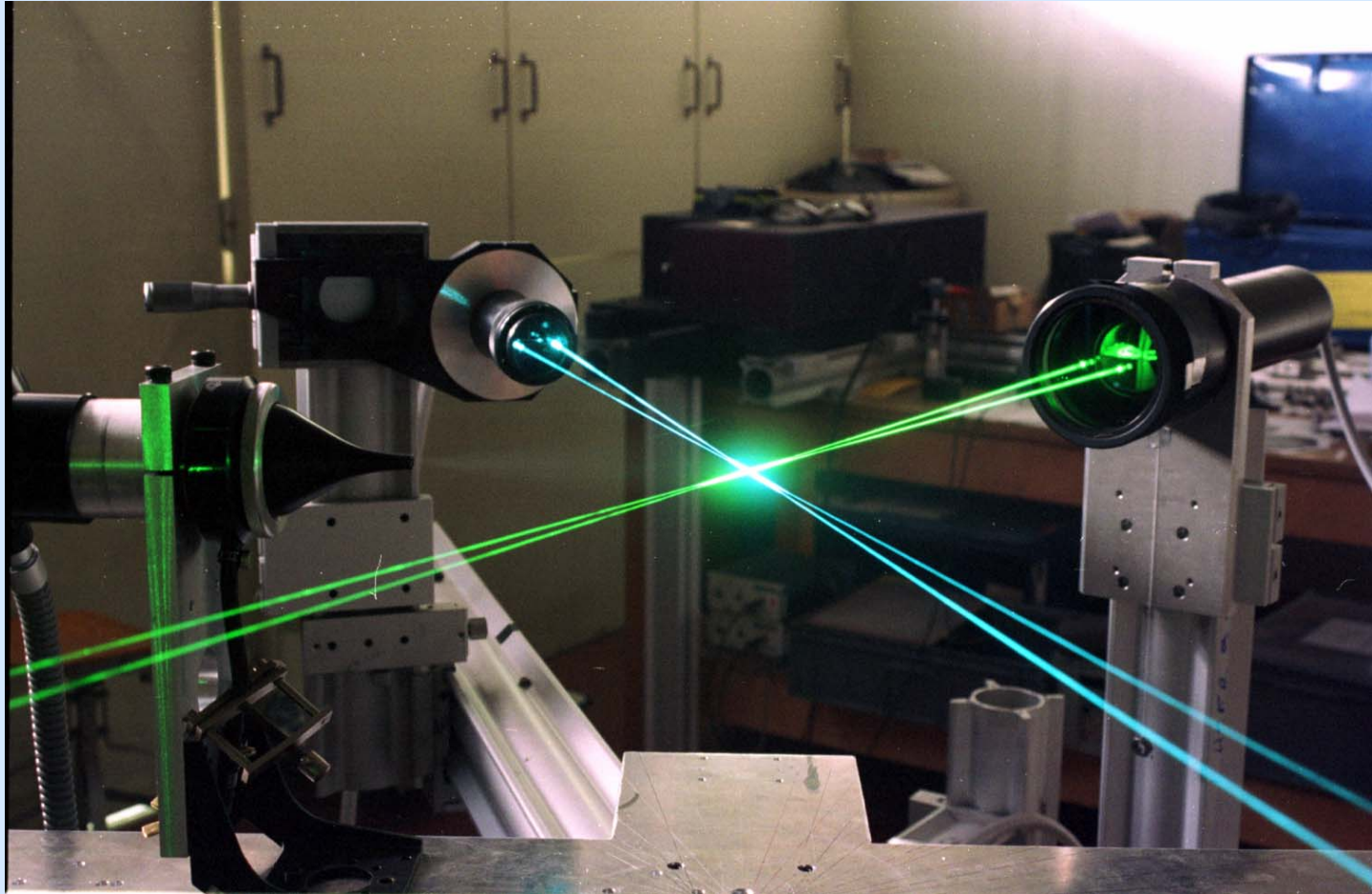
## Vélocimétrie laser à franges



séparateur de couleurs pour trois composantes

## Méthodes de mesure en aérodynamique

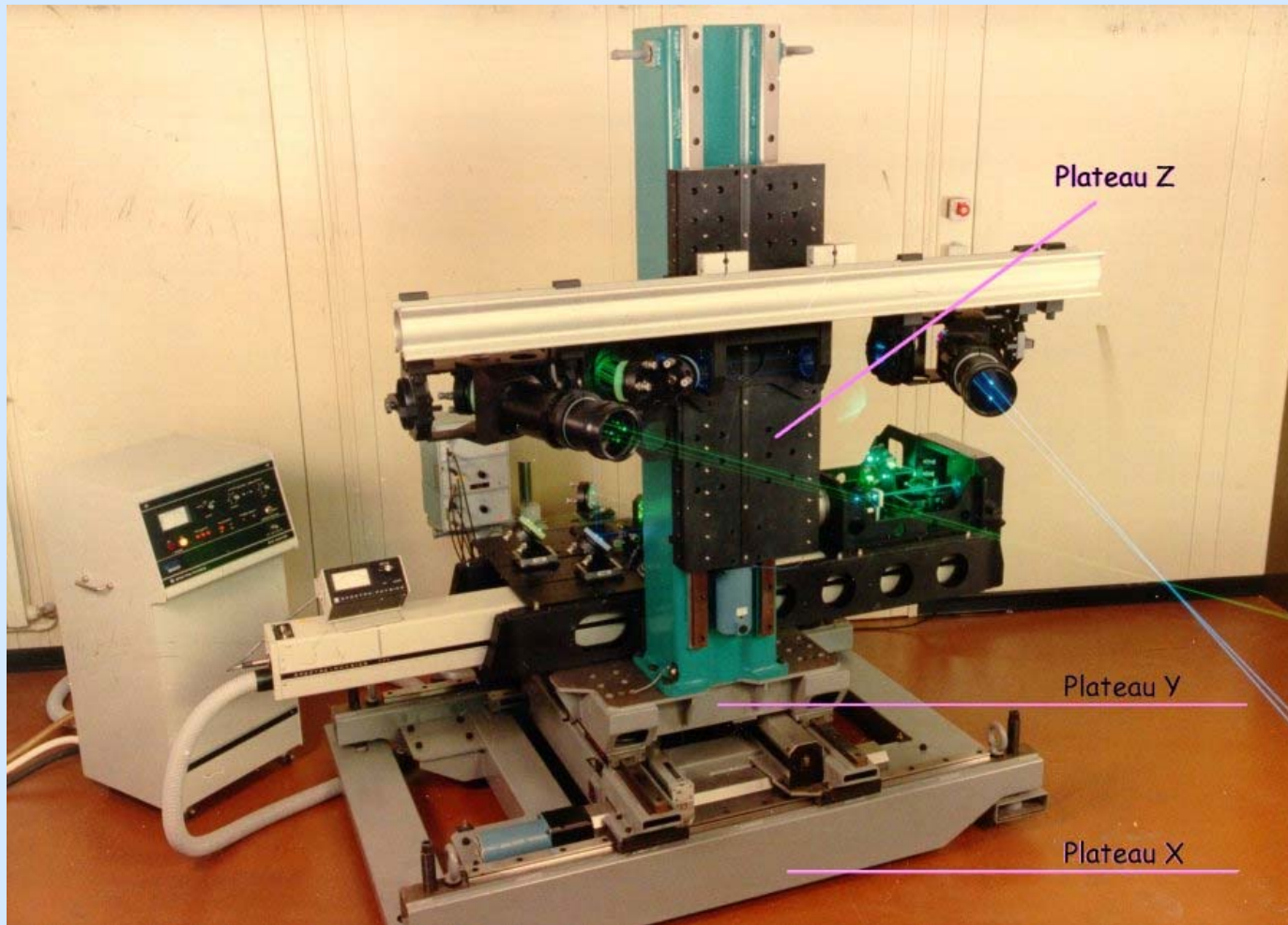
### Vélocimétrie laser à franges



faisceaux laser d'un système à trois composantes

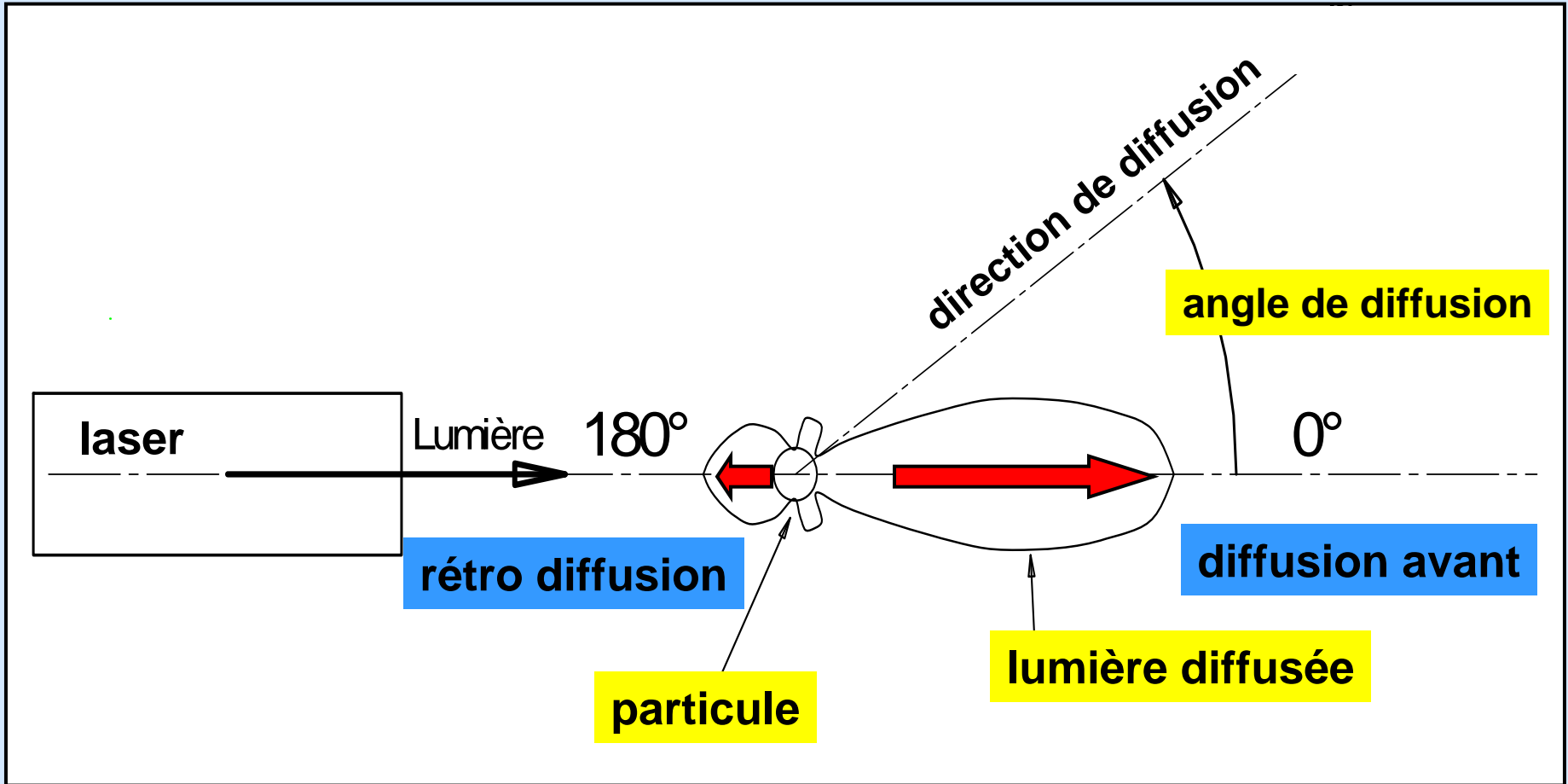
## Méthodes de mesure en aérodynamique

### Vélocimétrie laser à franges. Système à 3 composantes



banc émission et système de déplacement

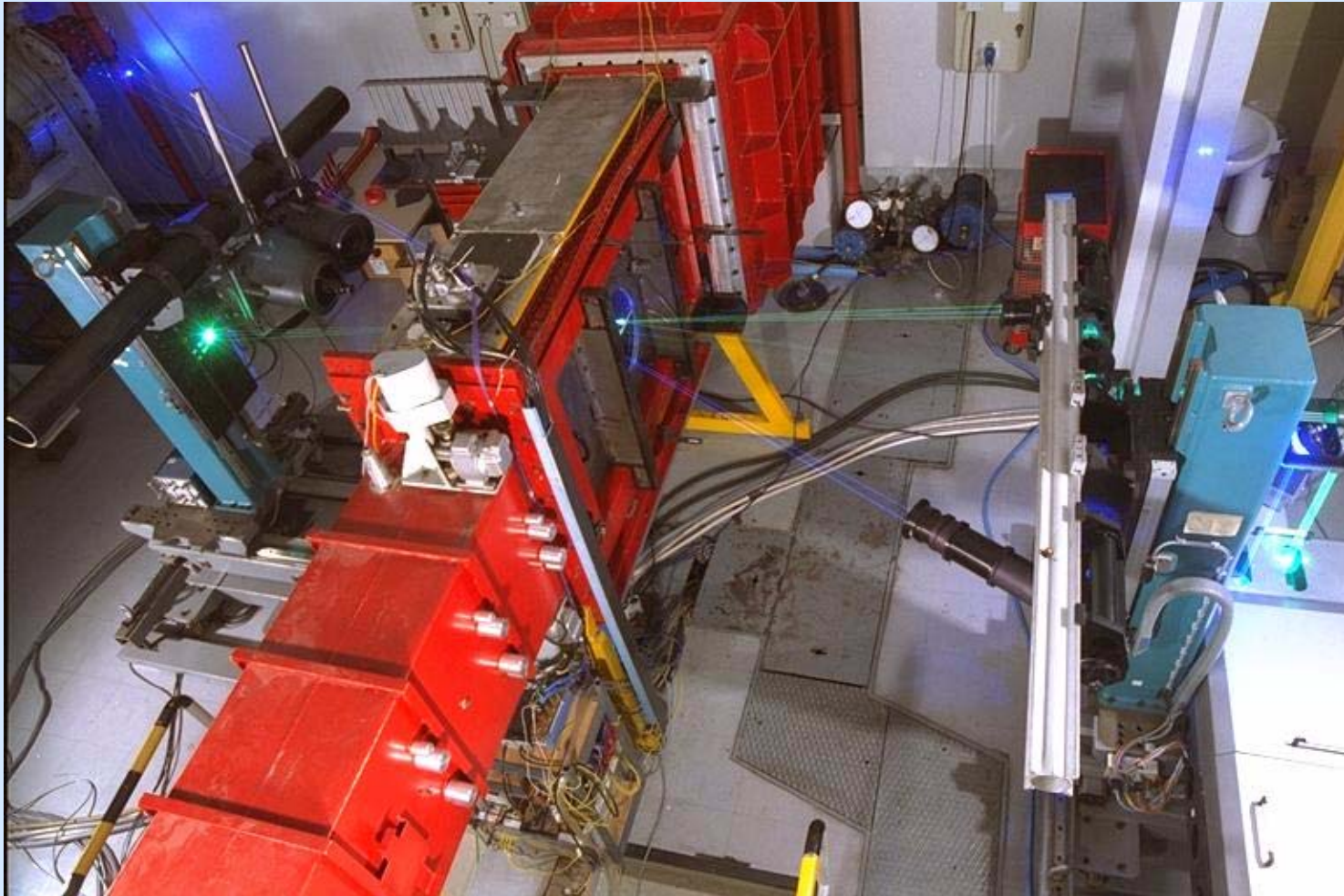
**Vélocimétrie laser à franges**



**diffusion de la lumière par une particule**

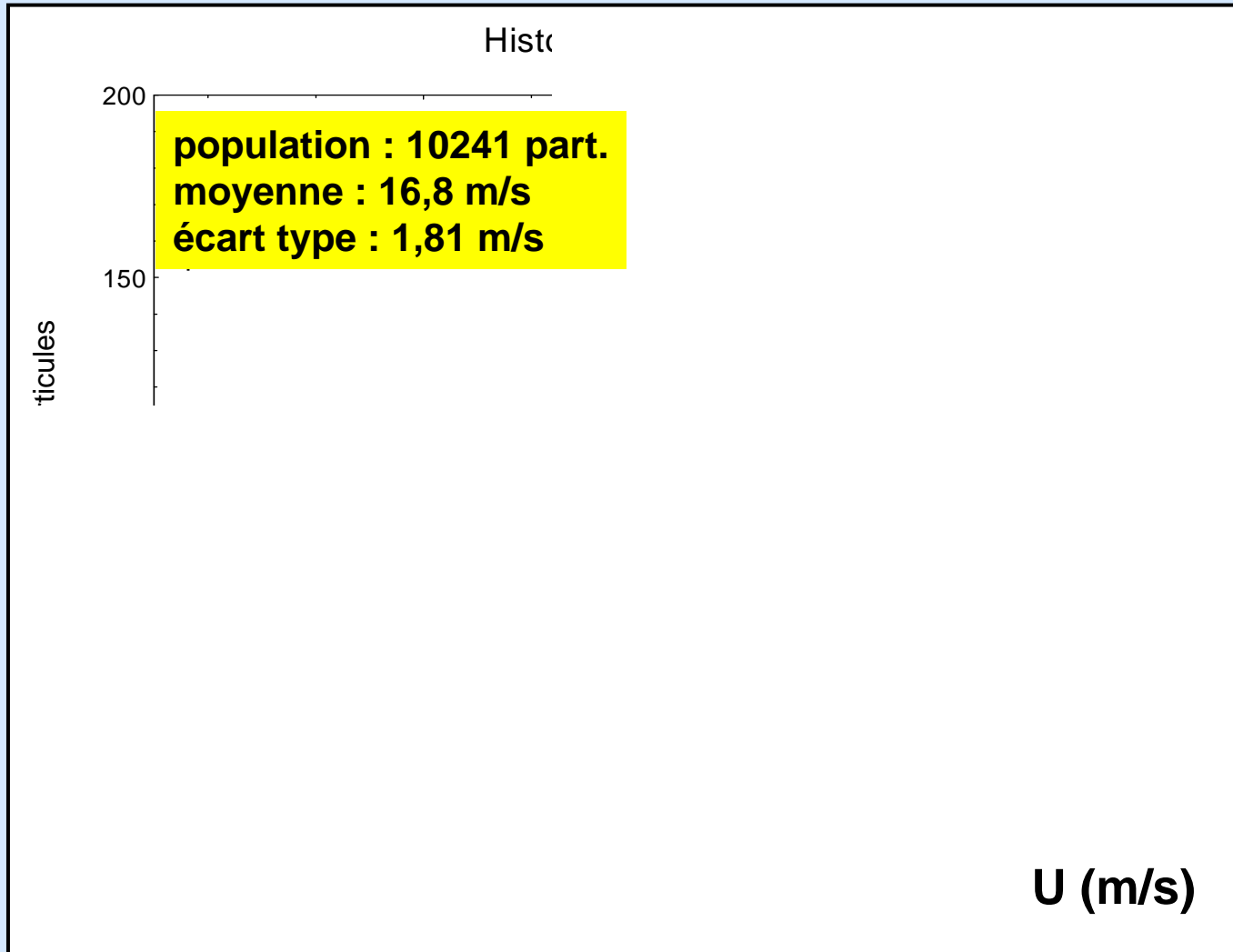
## Méthodes de mesure en aérodynamique

### Vélocimétrie laser à franges



banc en diffusion avant autour d'une soufflerie

## Vélocimétrie laser à franges



histogramme de vitesse en écoulement turbulent

# Méthodes de mesure en aérodynamique

## Vélocimétrie laser à franges

### traitement statistique

acquisition au point de mesure d'un échantillon de N valeurs de la composante de vitesse instantanée  $U_i$

★ vitesse moyenne

$$\overline{U}_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{n=N} U_i^n$$

★ tensions de Reynolds

$$\overline{u_i u_j} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{n=N} (U_i^n - \overline{U}_i)(U_j^n - \overline{U}_j)$$



# Méthodes de mesure en aérodynamique



Vélocimétrie Doppler globale

The image shows a 2D flow field visualization of a wing profile. The color scale ranges from blue (low velocity) to red (high velocity). A large blue region is on the left, and a red region is on the right. A small red spot is visible near the trailing edge of the wing.

ou



The image shows a 2D flow field visualization of a wing profile, similar to the one above. The color scale ranges from blue to red. A large blue region is on the left, and a red region is on the right. A small red spot is visible near the trailing edge of the wing.



Doppler Global Velocimetry (DGV)

The image shows a 2D flow field visualization of a wing profile, similar to the ones above. The color scale ranges from blue to red. A large blue region is on the left, and a red region is on the right. A small red spot is visible near the trailing edge of the wing.

## Méthodes de mesure en aérodynamique

### Vélocimétrie Doppler globale ou DGV

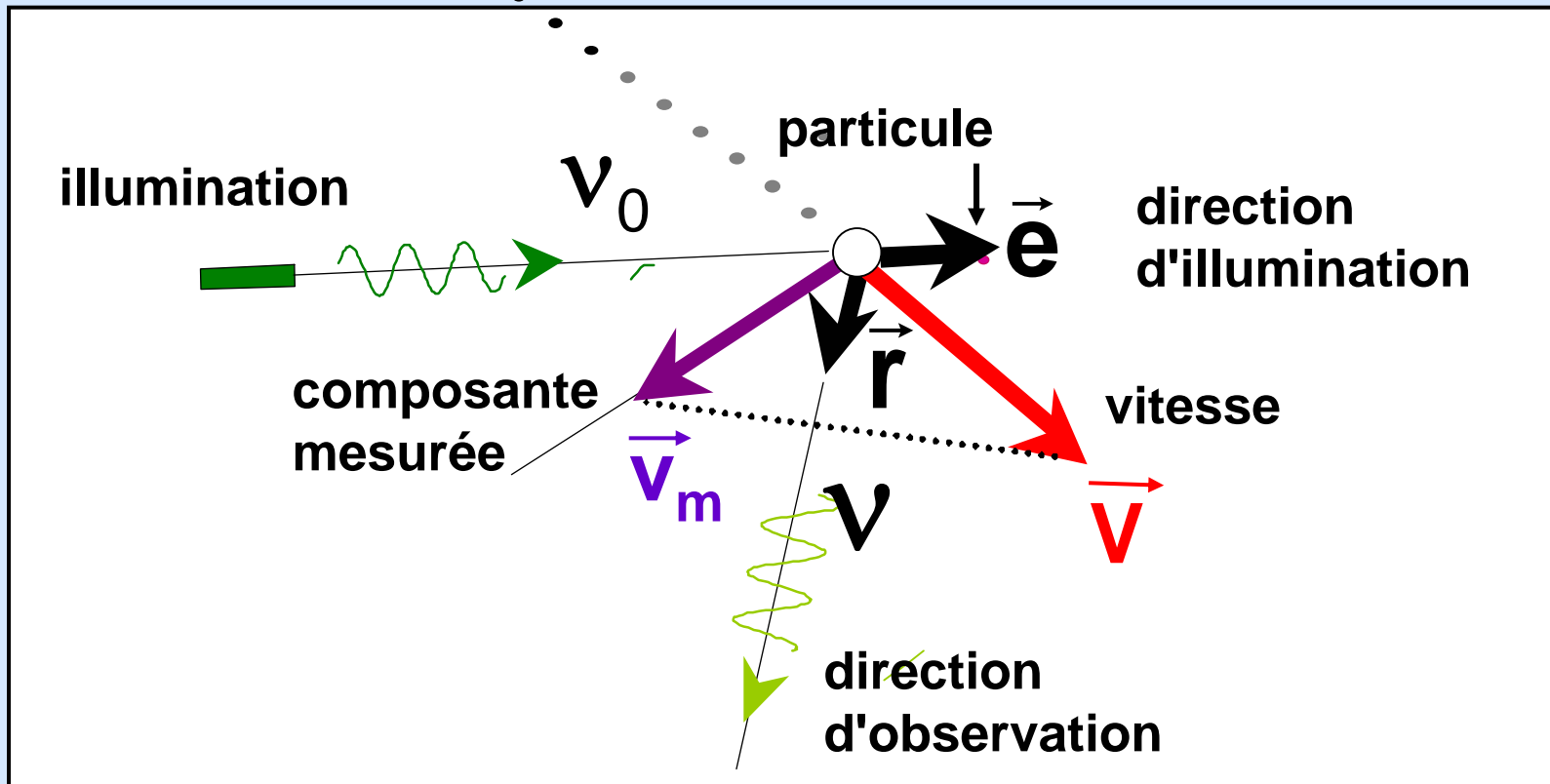
#### principe de base

détermination de la vitesse par **mesure de l'effet Doppler** sur la lumière diffusée par des particules entraînées par l'écoulement

#### méthode

- ★ **ensemencement par des particules submicroniques**
- ★ **illumination par un plan de lumière laser**
- ★ **mesure de l'écart de fréquence (effet Doppler) via une cellule à iode à bandes d'absorption très étroites**
- ★ **enregistrement de la lumière transmise sur une caméra vidéo et traitement**

## Vélocimétrie Doppler globale ou DGV

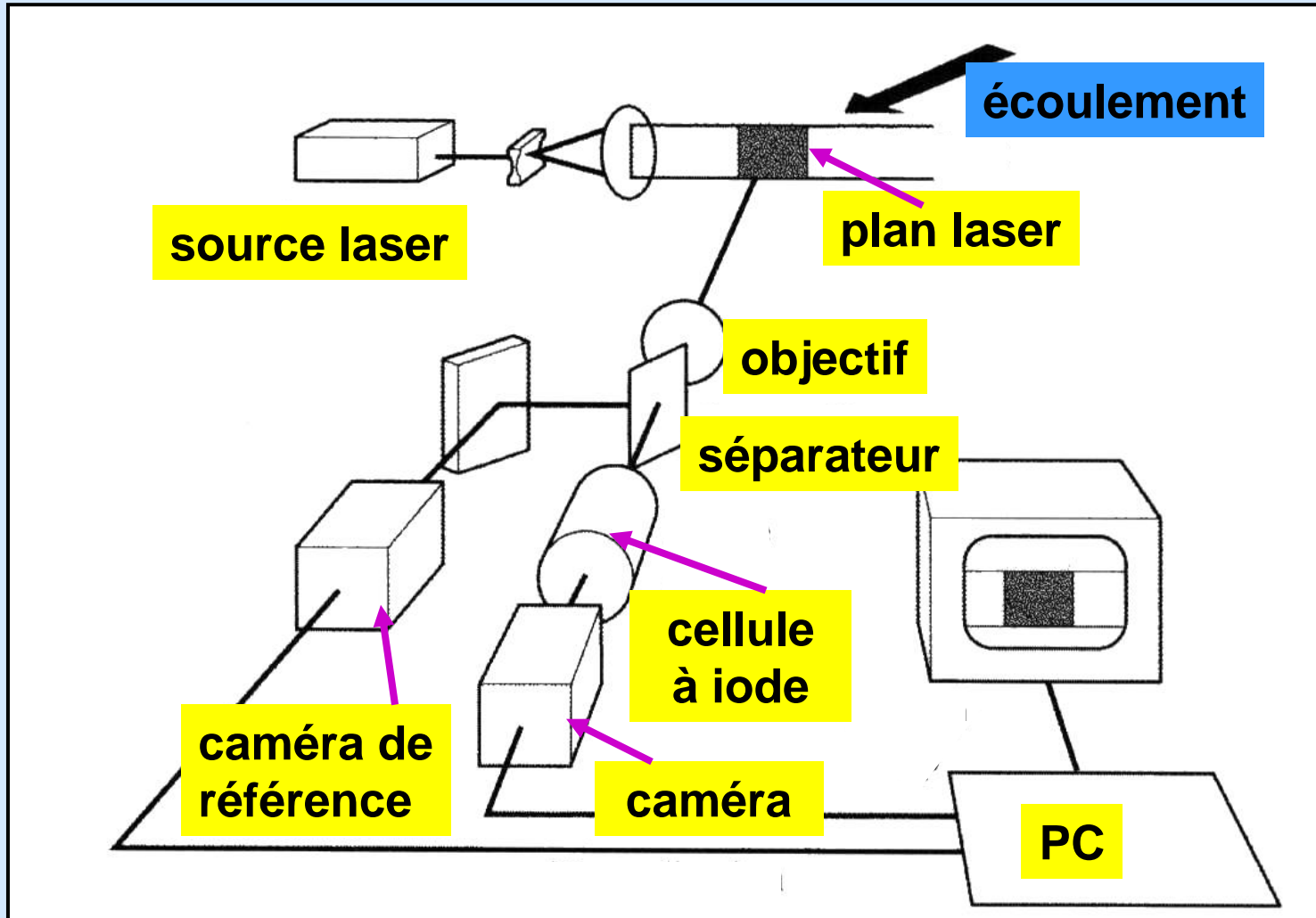


effet Doppler



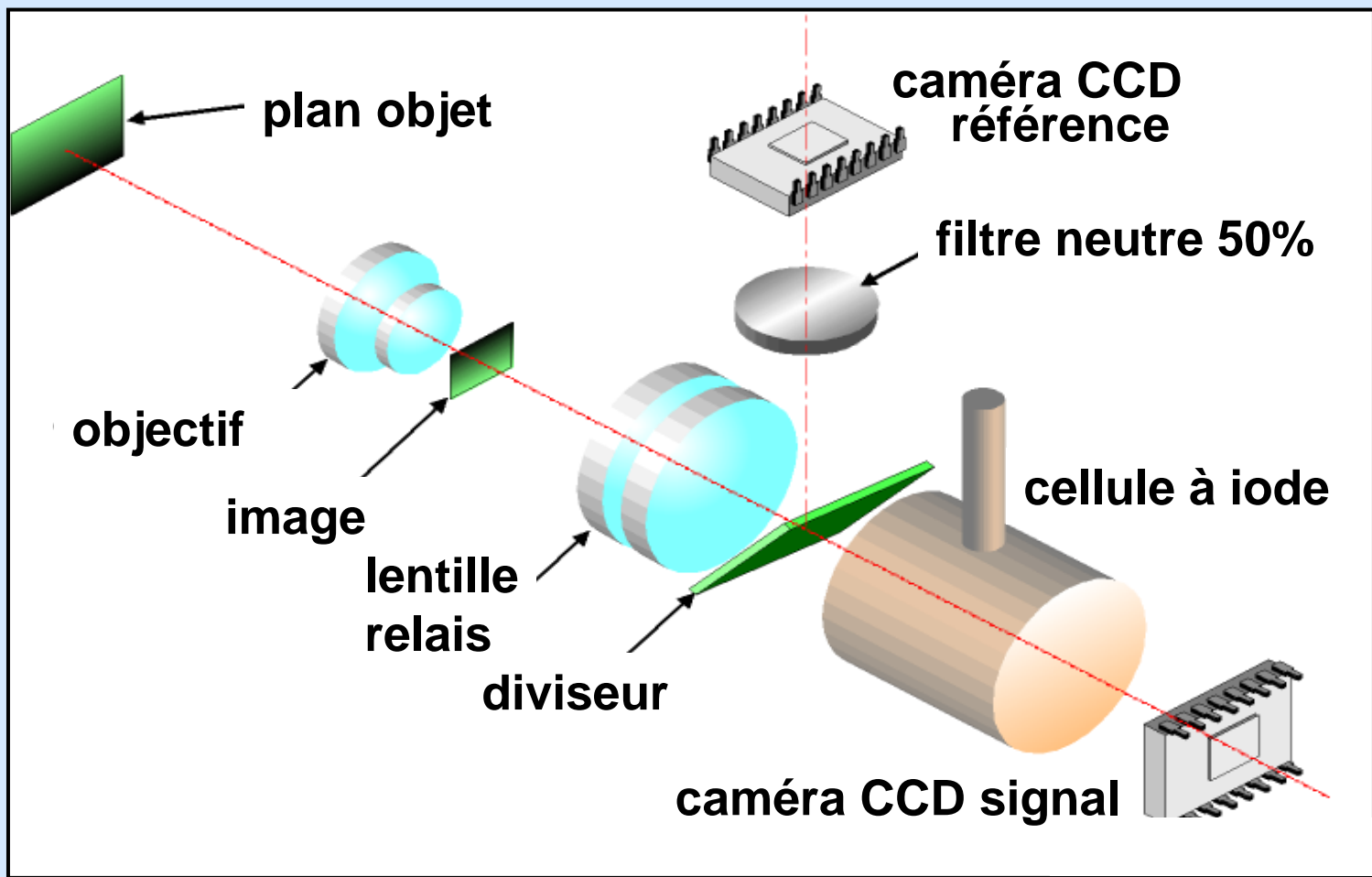
$$\Delta \nu = \nu - \nu_0 = \frac{\nu_0 \vec{V} \cdot (\vec{r} - \vec{e})}{c}$$

**Vélocimétrie Doppler globale ou DGV**



**schéma du dispositif**

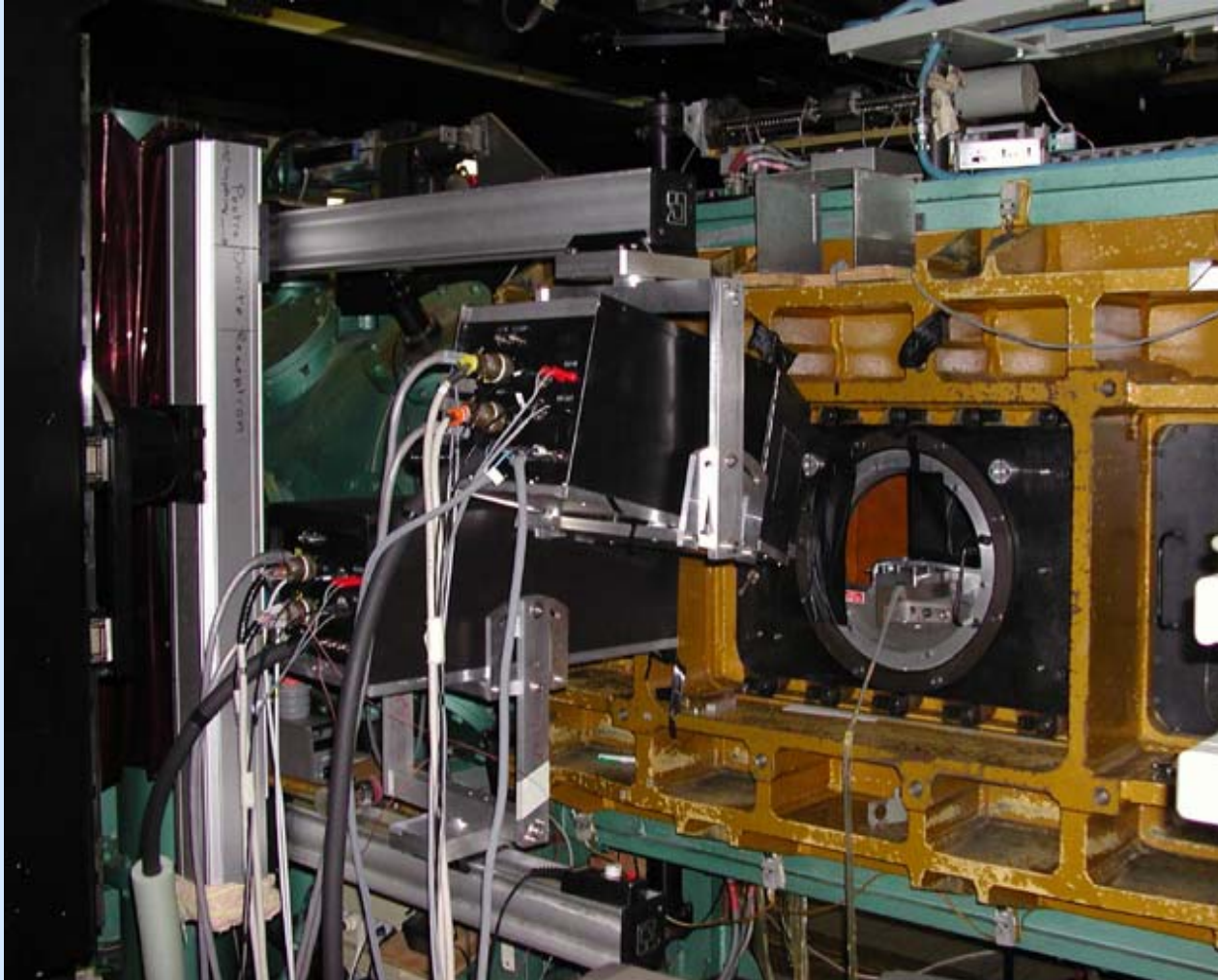
**Vélocimétrie Doppler globale ou DGV**



**système d'enregistrement à un seul objectif**

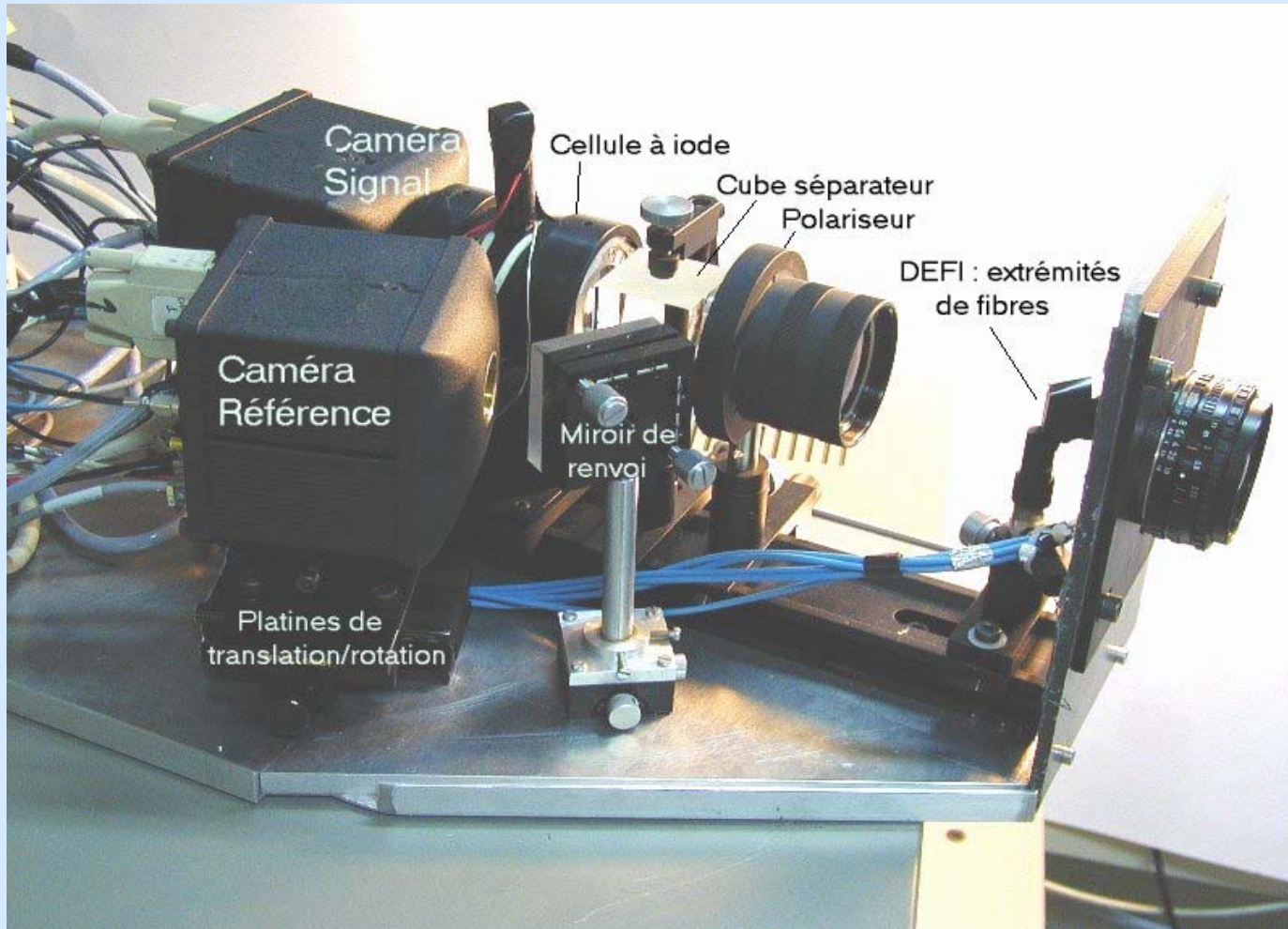
## Méthodes de mesure en aérodynamique

### Vélocimétrie Doppler globale ou DGV



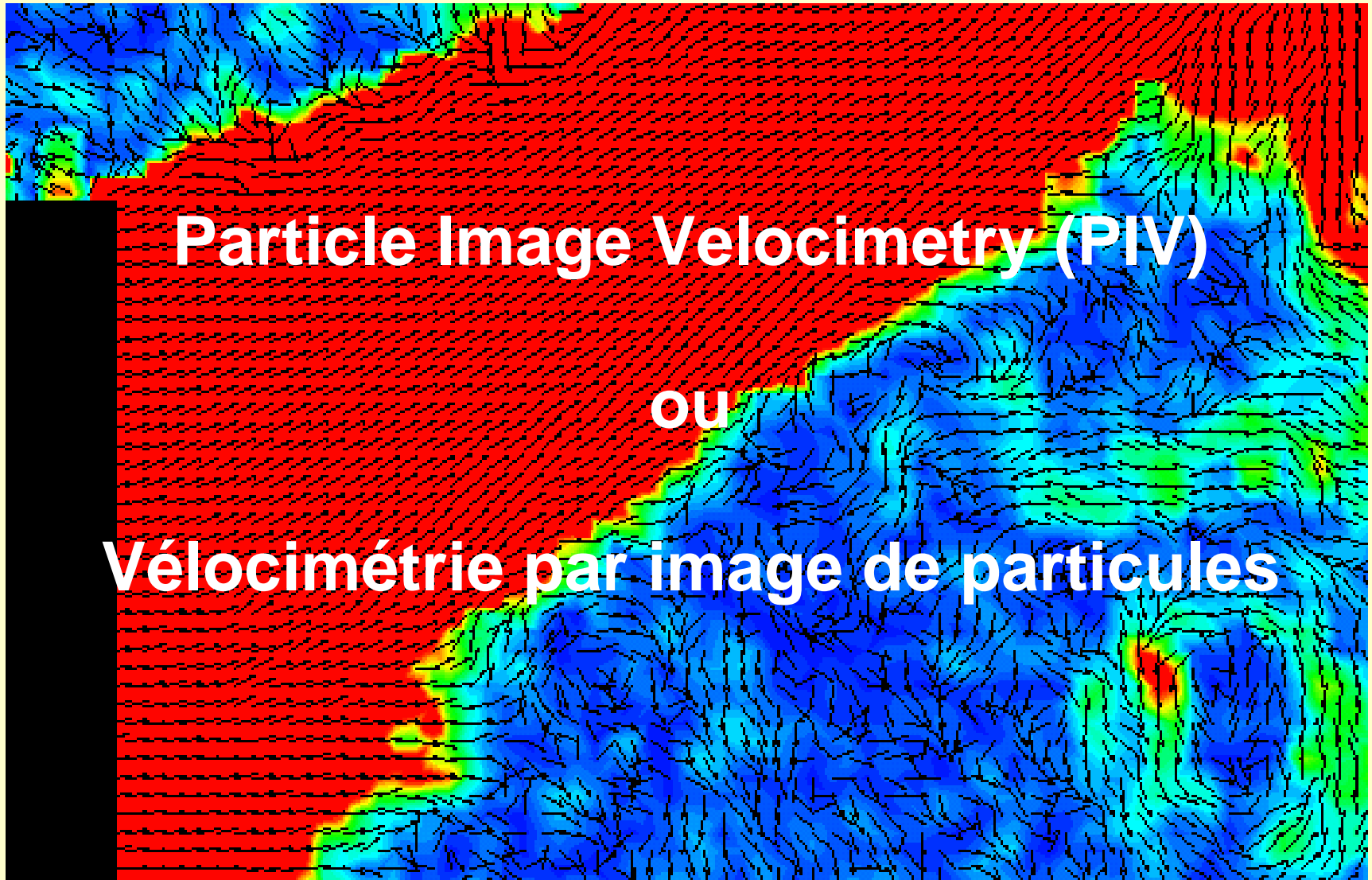
## Méthodes de mesure en aérodynamique

# Vélocimétrie Doppler globale ou DGV



**ensemble réception d'un banc DGV**

# Méthodes de mesure en aérodynamique



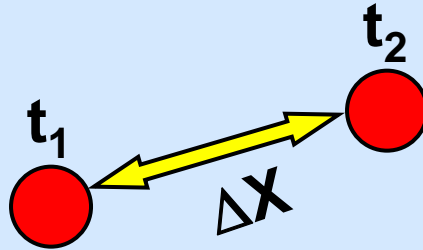


# Méthodes de mesure en aérodynamique

## Particle Image Velocimetry (PIV)

### principe de base

mesure de la vitesse de particules entraînées par l'écoulement à partir de deux photos successives prises à un très court intervalle de temps



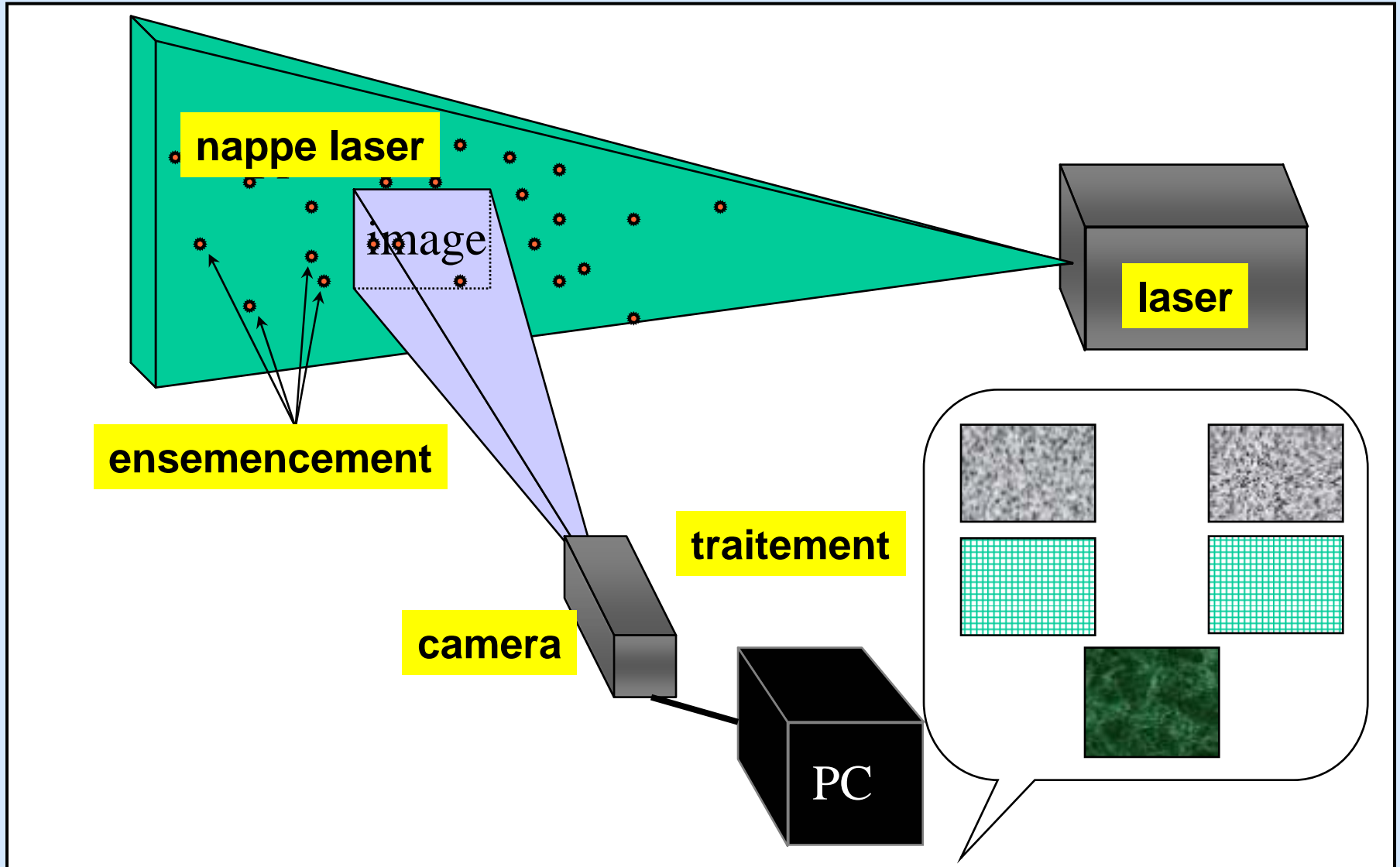
$$\mathbf{V} = \frac{\Delta \mathbf{X}}{t_2 - t_1}$$

### méthode

- ★ ensemencement de l'écoulement par des particules submicroniques
- ★ deux illuminations successives par deux flashes laser
- ★ enregistrement sur caméra CCD des deux images
- ★ traitement par techniques de corrélation pour déterminer les positions successives de la même particule

# Méthodes de mesure en aérodynamique

## Particle Image Velocimetry (PIV)



# Méthodes de mesure en aérodynamique

## Particle Image Velocimetry (PIV)

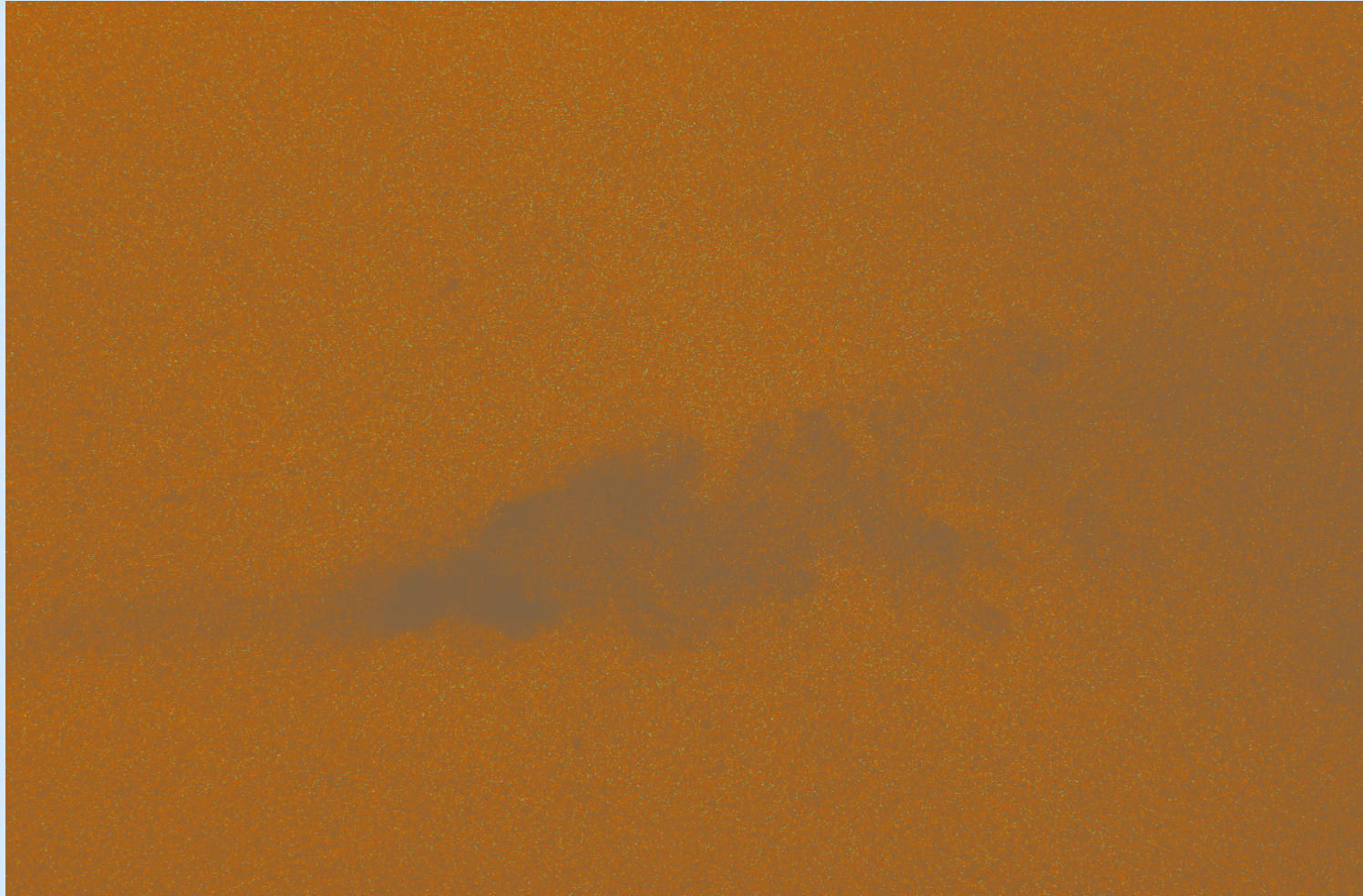
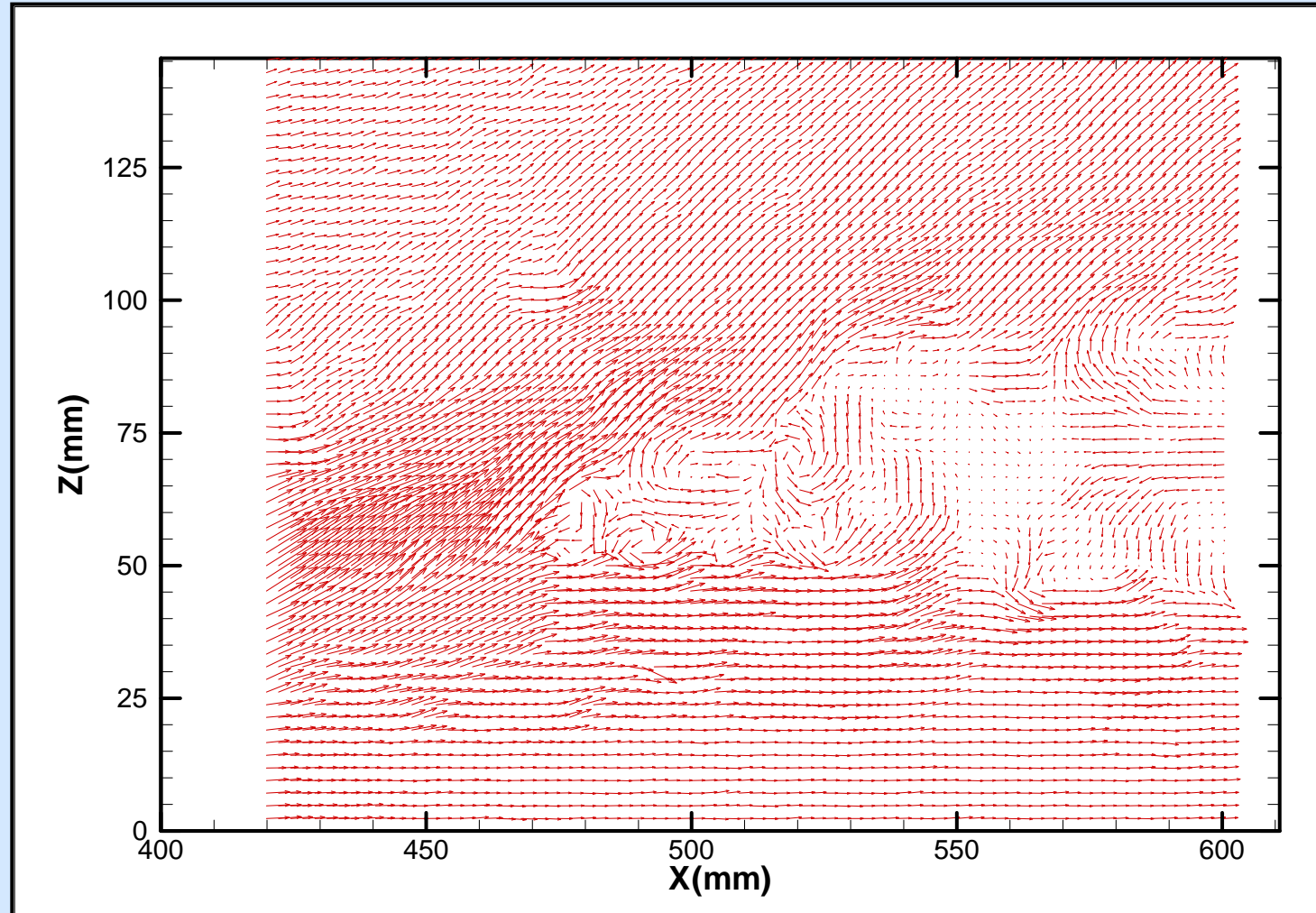


image des particules dans la nappe laser

# Méthodes de mesure en aérodynamique

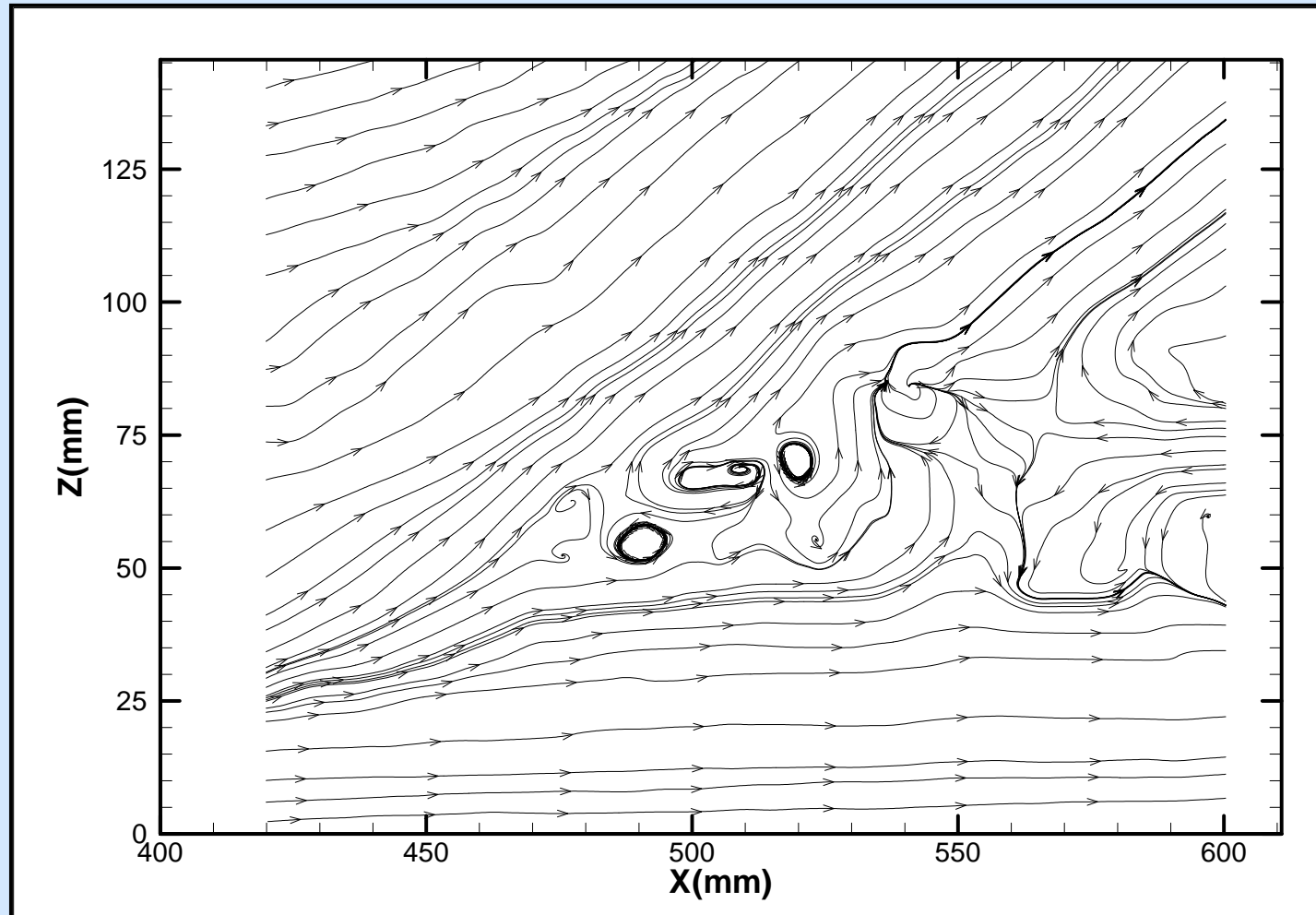
## Particle Image Velocimetry (PIV)



champ des vecteurs vitesse après traitement

# Méthodes de mesure en aérodynamique

## Particle Image Velocimetry (PIV)



**lignes de courant associées**

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

# MÉTHODES DE MESURE EN AÉRODYNAMIQUE

Fin de la partie 4

Mesures dans le champ

L'aventure continue  
dans la prochaine partie

