

CORRELATION IMAGING VELOCIMETRY

Météo France, 8 décembre 2000

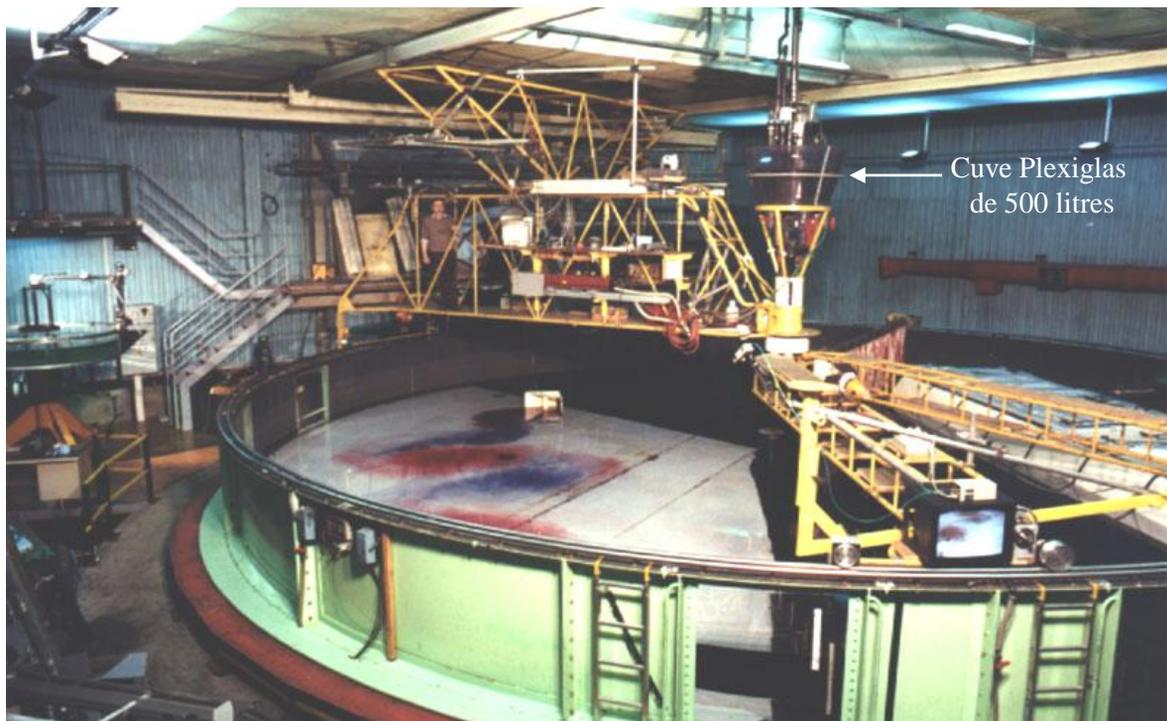
Gauthier DELERCE

Equipe CORIOLIS

**Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels
Grenoble**



LA PLAQUE CORIOLIS A GRENOBLE



Objectifs

Etudier les écoulements océanographiques ou atmosphériques en présence ou non de stratification ou de topographie, avec prise en compte de la rotation terrestre.

Caractéristiques

Diamètre	14 m
hauteur disponible	8 m
poids à vide des parties tournantes	150 T
charge admissible	180 T
vitesse de rotation	
-vitesse constante	
-possibilité de programmation de la vitesse 0 à 4 tour/min	$d\omega/\omega 10^{-4}$
Verticalité de l'axe de rotation	$3 \cdot 10^{-6}$ rad

Equipements

Construite en 1960, la plaque tournante sert notamment à l'étude de l'impact de l'usine marémotrice des Iles Chausey, à partir d'un modèle réduit de la Manche au 1/50.000ième. Rénovée en 1987, elle supporte actuellement un bassin cylindrique de 13 m de diamètre et de 1,2 m de hauteur. Des cuves annexes de grandes capacités permettent de réaliser des stratifications multi-couches ou continue. Une plateforme tournante annexe de 2 m de diamètre permet de vérifier la faisabilité des études prévues sur la grande plaque et d'optimiser son utilisation. Le matériel de mesure comporte, en particulier, vélocimètres ultra-sons, profileurs et suiveurs d'interface à ultra-sons, visualisation vidéo, trajectographie, traitement d'images, vélocimétrie par corrélation d'images (CIV) (précision 1-2% sur les vitesses).

Développement des techniques de mesures dans les fluides

Historique

Évolution au 20^{ème} siècle

Laser Doppler Anemometry – Phase Doppler
Anemometry

PIV

CIV

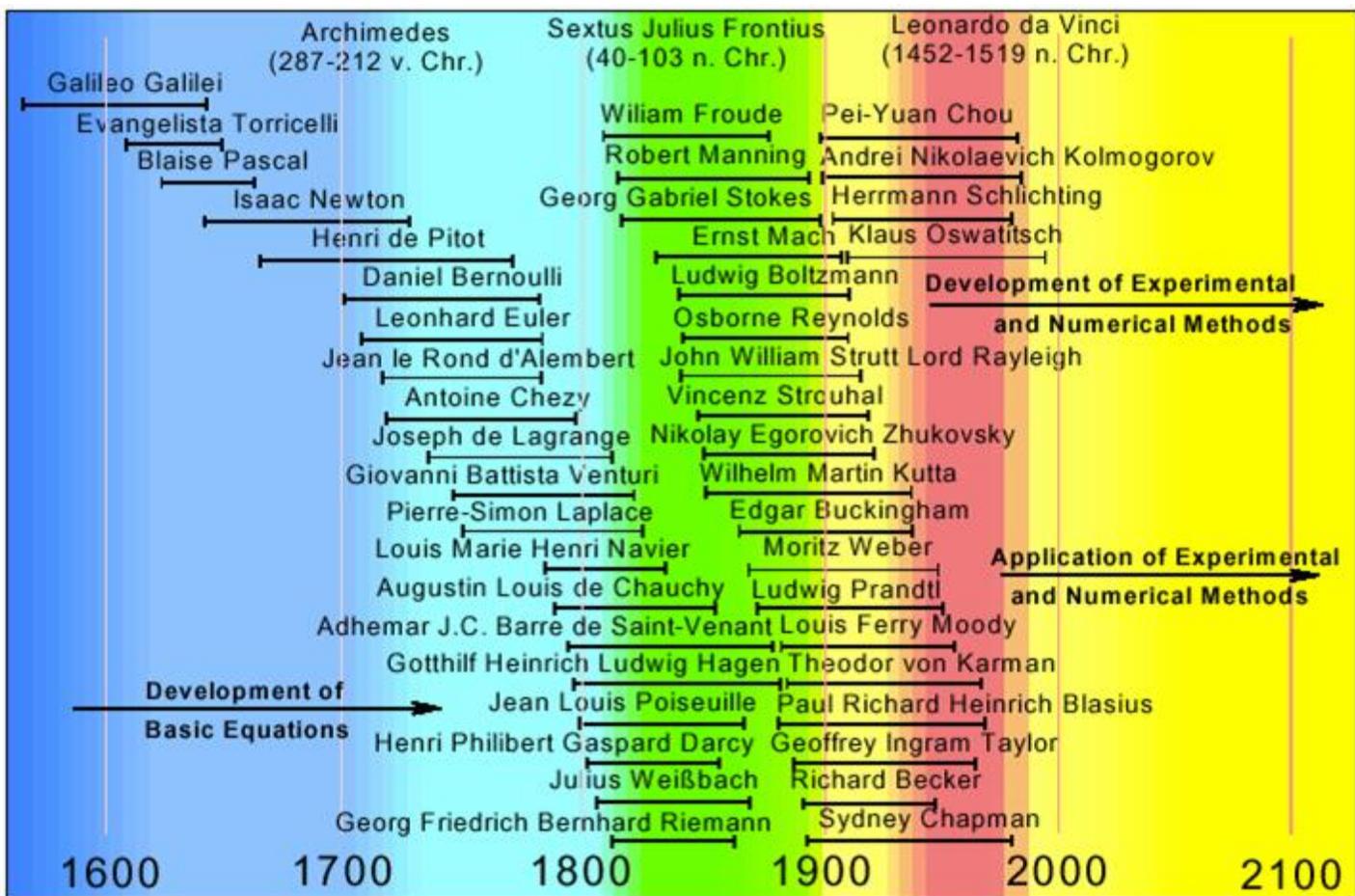


Fig. 1. Historical developments of fluid mechanics

Première visualisation par Léonard de Vinci

Équations de la dynamique des fluides : fin 18^{ème} siècle

Méthodes numériques : 2^{ème} moitié du 20^{ème} siècle

Pendant ce temps grands développements des méthodes optiques.

Durant la seconde moitié du 20^{ème} siècle, les développements suivants ont permis l'essor des méthodes de mesures actuelles :

- composants électroniques rapides
- lasers
- optique intégrée
- capteurs
- microtechniques

La résolution numériques des équations a vu ces dernières années sa puissance multipliée par :

10 tous les 5 ans par l'augmentation de la puissance des calculateurs.

10 tous les 8 ans grâce aux nouvelles méthodes numériques (Gauss, SOR, PCG, multigrid adaptivity (1-2))

Développement des films chauds à température constante:

première mesure de vitesse précise dans un écoulement turbulent, mais toujours limitée aux bas nombres de Reynolds; de plus méthode intrusive .

Laser doppler anemometry LDA

les particules dispersent la lumière, plus elles sont grosses , plus elles sont efficaces mais ne peuvent suivre les variations rapides de l'écoulement.

Figure : système à double faisceau

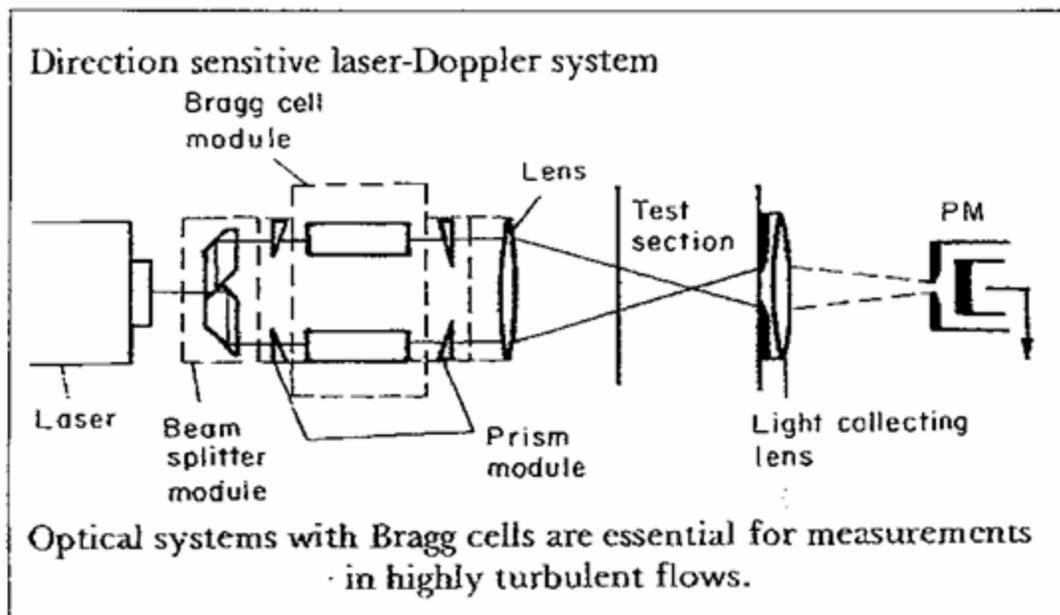


Fig. 9. Dual-beam laser-Doppler optical system

Exemple: mesures de la turbulence à la paroi dans un canal: mise en évidence de la dépendance en Reynolds.

Il est également possible de mesurer plusieurs composantes de la vitesse .

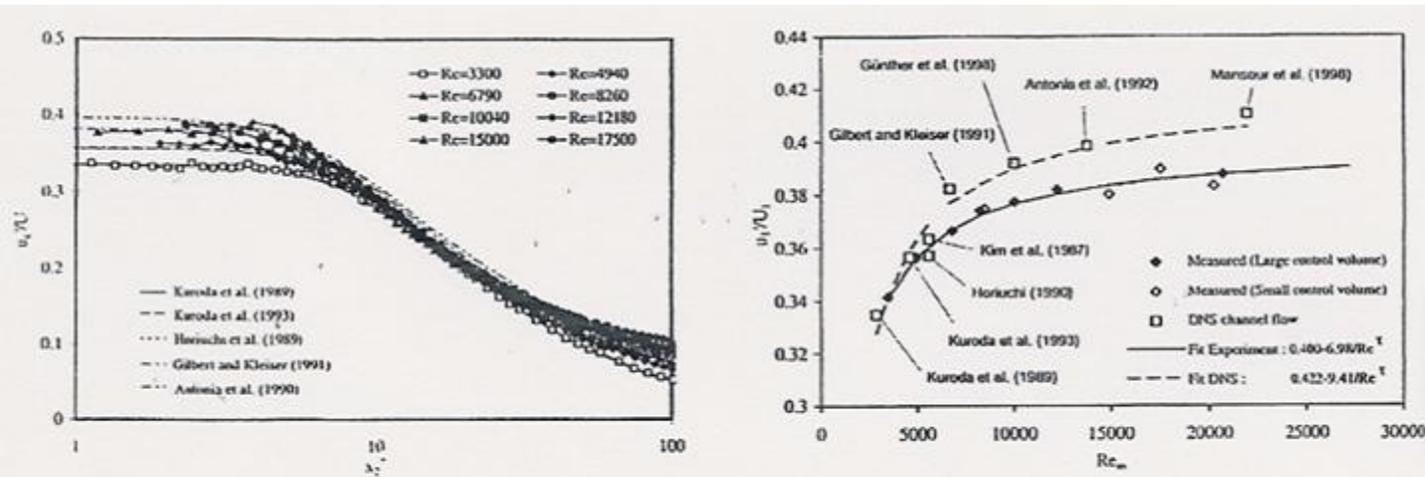


Fig. 12. Wall values of turbulence levels in fully developed channel flows

Phase doppler anemometry PDA

Franges d'interférences par réfraction et réflexion de deux faisceaux inclinés sur une particule.

Mesure de la vitesse et de la taille des particules.

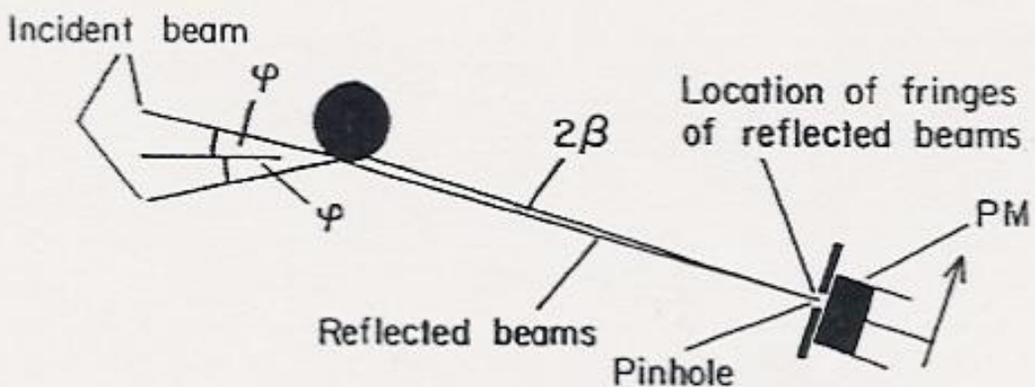


Fig. 13. Phase Doppler measurements in two-phase flows

Alors que les méthodes précédentes étaient ponctuelles : mesure en un point dans le temps (hypothèse de Taylor) ; la PIV permet de mesurer les vitesses dans un plan, et dans le temps.

La turbulence était considérée comme un processus stochastique décrit par ses moments statistiques.

Towend en 1956 observe des phénomènes cohérents.

Brown et Roshko (1974) ont démontré que la structure spatiale instantanée de l'écoulement n'est pas accessible par des mesures ponctuelles.

La PIV donne accès aux quantités dérivées du champ de vitesse (tenseur de déformation) qui sont importantes pour la compréhension de la dynamique des structures cohérentes (Hussain 1986; Hunt *et al.* 1988).

PIV

Identification de textures par **corrélation** (auto ou inter).

En général, la texture est composée de particules éclairées par une tranche laser. Exemples à suivre.

Acquisition de couples d'images, à un intervalle de temps dt . Acquisition photo, analogique, numérique.

Traitement optique ou numérique (FFT ou corrélation directe (DCC))

Le principal inconvénient de la PIV est qu'elle multiplie les FFT des images pour obtenir leur corrélation; ce qui introduit d'importants biais.

CIV

La méthode CIV découple la zone de corrélation (B_x, B_y) de la zone de recherche (S_x, S_y).

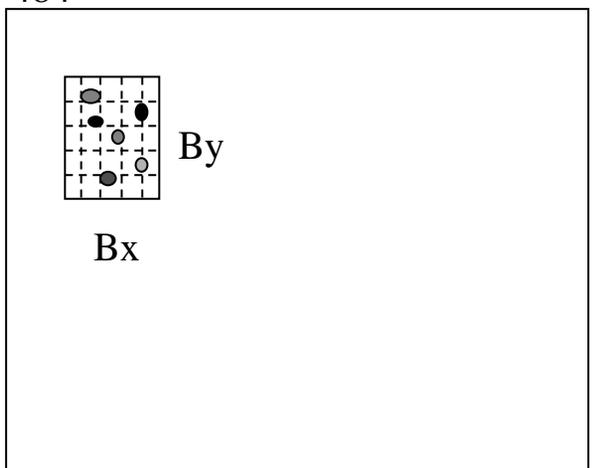
On effectue la corrélation entre deux boîtes de tailles (B_x, B_y) prises sur chaque image; la boîte sur l'image **a** est centrée dans la zone de recherche, et la boîte sur l'image **b** prend toutes les positions possibles dans la zone de recherche.

On obtient une fonction de corrélation 2D discrète de support ($S-B+1$)

Ces méthodes sont basées sur l'hypothèse que le maximum de corrélation correspond au déplacement cherché.

Pour obtenir une résolution sous-pixel, on interpole la fonction de corrélation discrète.

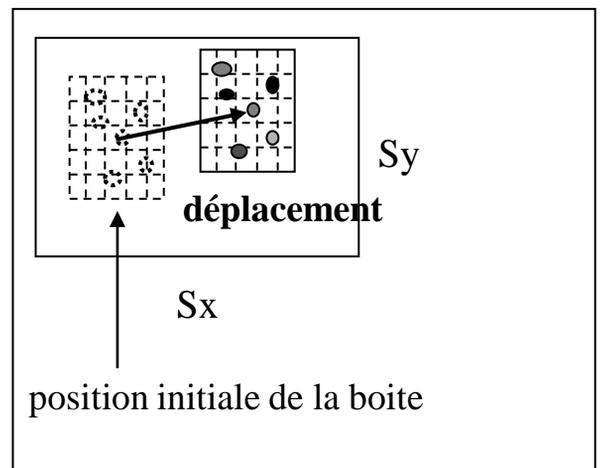
484



0

image a, temps t

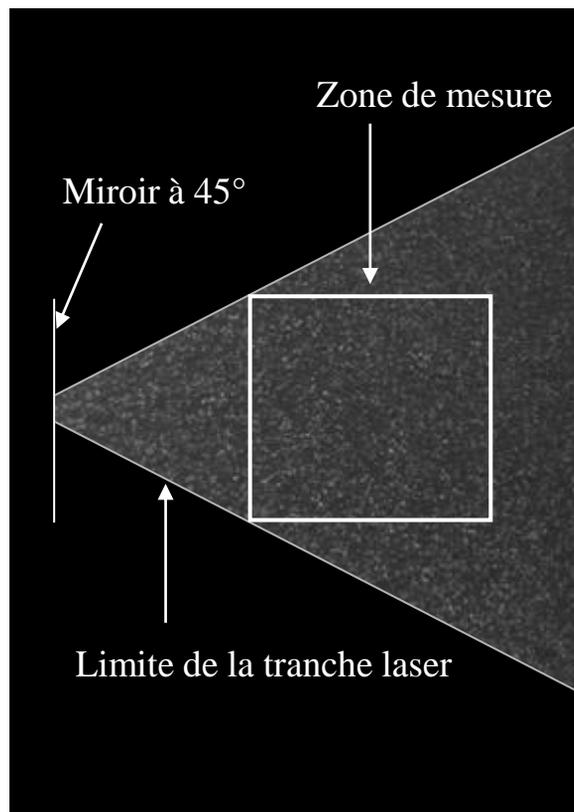
768



position initiale de la boîte

image b, temps t+dt

Acquisition des images



Cas des particules

Taille : 3-5 pixels de diamètre

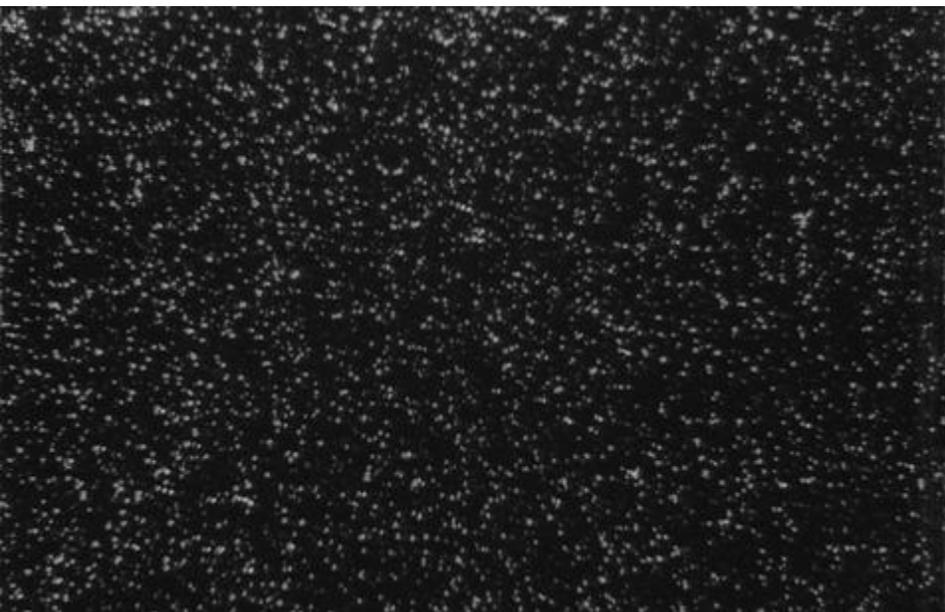
Densité d'information : autour de 0.05 particules par pixels

Intervalle de temps entre les images : tel que le déplacement soit de l'ordre de 5 pixels

Temps de pose : éviter que l'image des particules soient allongée.



Etude des ondes de
Rossby:
Tracer : fluoreceine
768*484 pixels



Turbulence de canal
768*484 pixels



Turbulence de grille
1024*1024 pixels

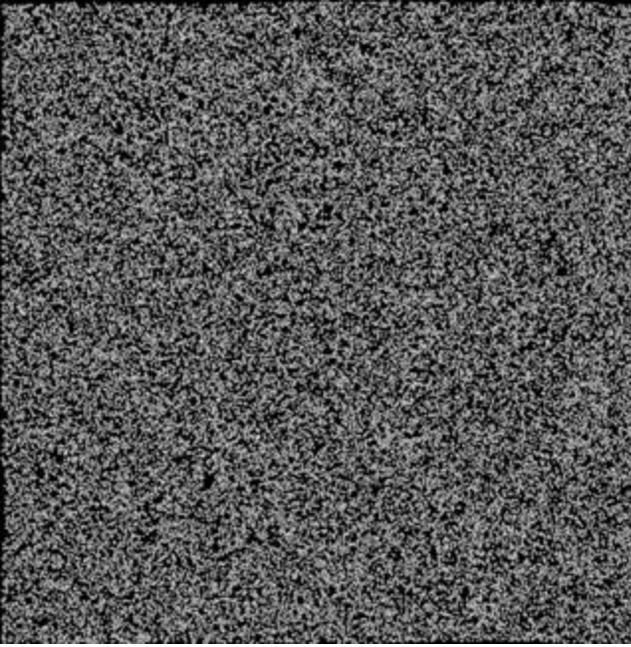


Image synthétique utilisée pour les simulations
1024*1024 pixels



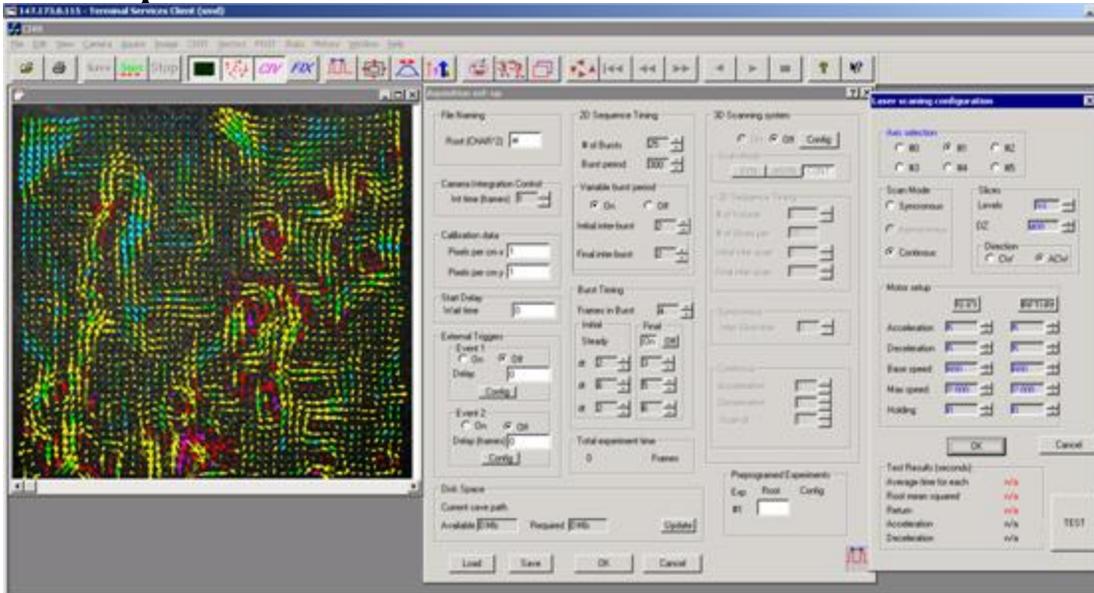
Sillage turbulent
1024*1024 pixels



Même image après égalisation de l'histogramme

Acquisitions des images

Exemple : Civit



Ce logiciel contrôle l'acquisition :

Camera : Analogiques
Numériques : avec librairies ITEX
Dans le labo : Pulnix 8bits 30fps
Kodak 1k*1k
SMD 1M60 120 fps 12 bits
Support l'intégration sur plusieurs images

Moteurs :

Contrôle des moteurs pas à pas, tranche, miroir

Laser :

Synchronisation de l'éclairage et de l'acquisition numérique

Affichage en temps réel des champs de vecteurs pour vérifier instantanément les paramètres utilisés .

Acquisition de séries d'images (2 à 5) permettant une optimisation des intervalles de temps durant le traitement .

Histogrammes d'intensité et de déplacements pour optimiser en temps réel les paramètres d'acquisition.

Masquage des images automatiques ou pré définit.

Choix entre plusieurs algorithmes de détections des pics de corrélation ;

Correction automatique des vecteurs faux .

Interface graphique développée pour Windows NT

Intégration au logiciel de traitement VSV

Acquisition en temps réel sur disques durs.

Synchronisation externe

Paramètres d'acquisition pré programmé permettant une complète automatisation de l'acquisition avec contrôle de tous les périphériques

Interface de contrôle de moteurs pas à pas pour l'acquisition 3D en mode synchrone, asynchrone et continu

Expérience type :

Turbulence dans un canal B. Launder

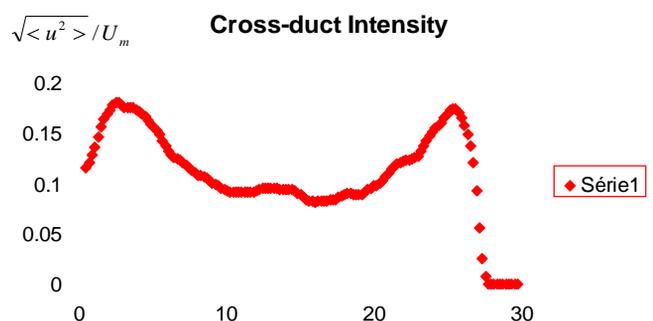
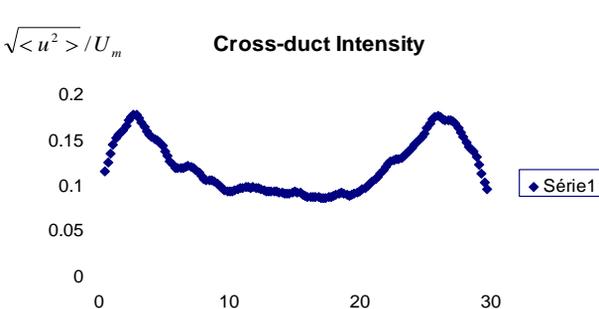
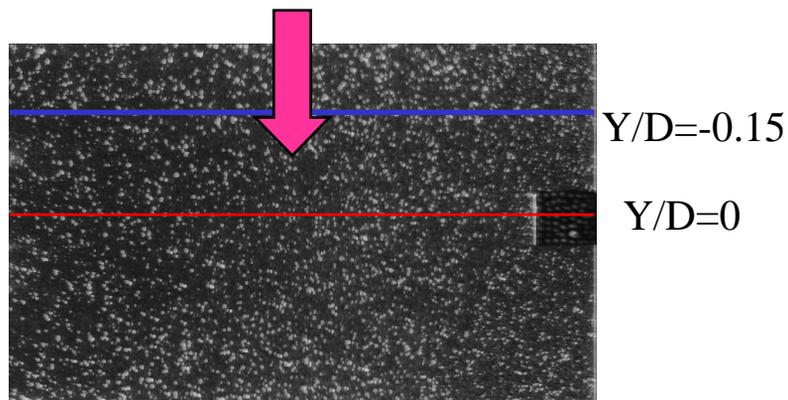
Étude de la turbulence dans une veine , en milieu tournant et en présence d'obstacles sur la paroi dans le but d'augmenter les échanges thermiques (modélisation du veine de refroidissement dans une pôle de turbine).

Re : 10 000 à 50 000

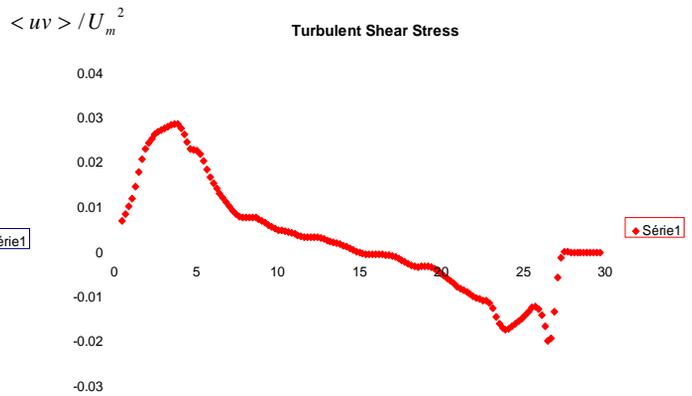
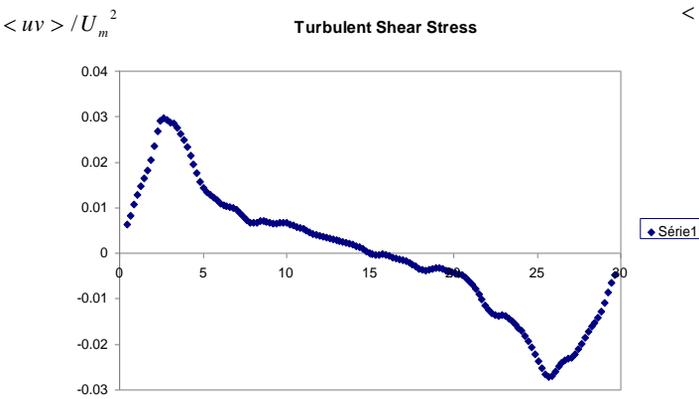
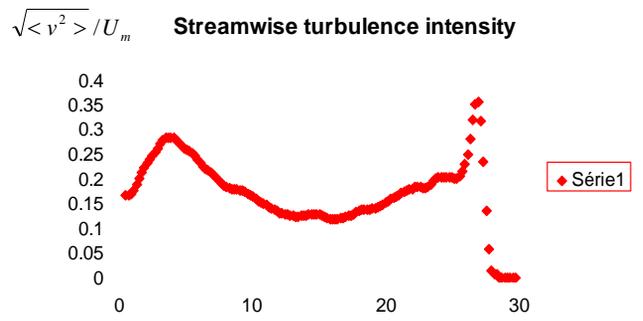
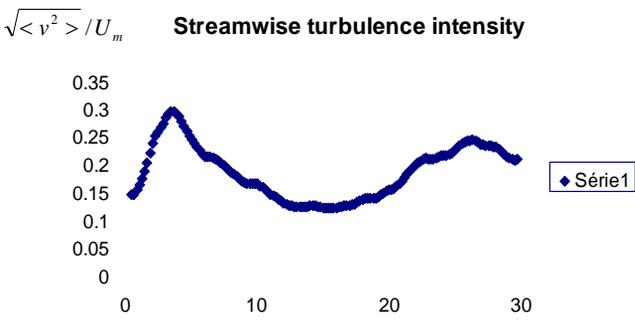
Ro : jusqu'à 0.2

Serie g1 350 images

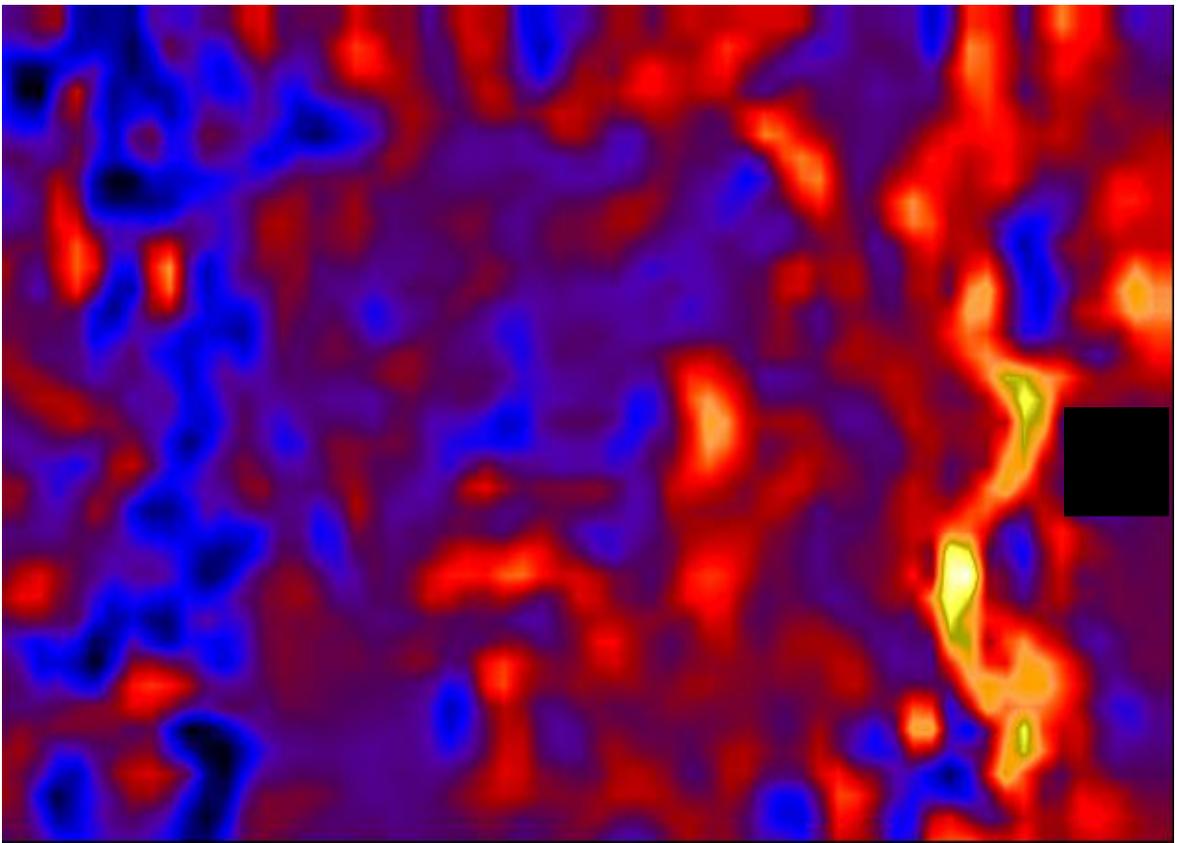
$$U_m = 7.7 \text{ cm/s}$$



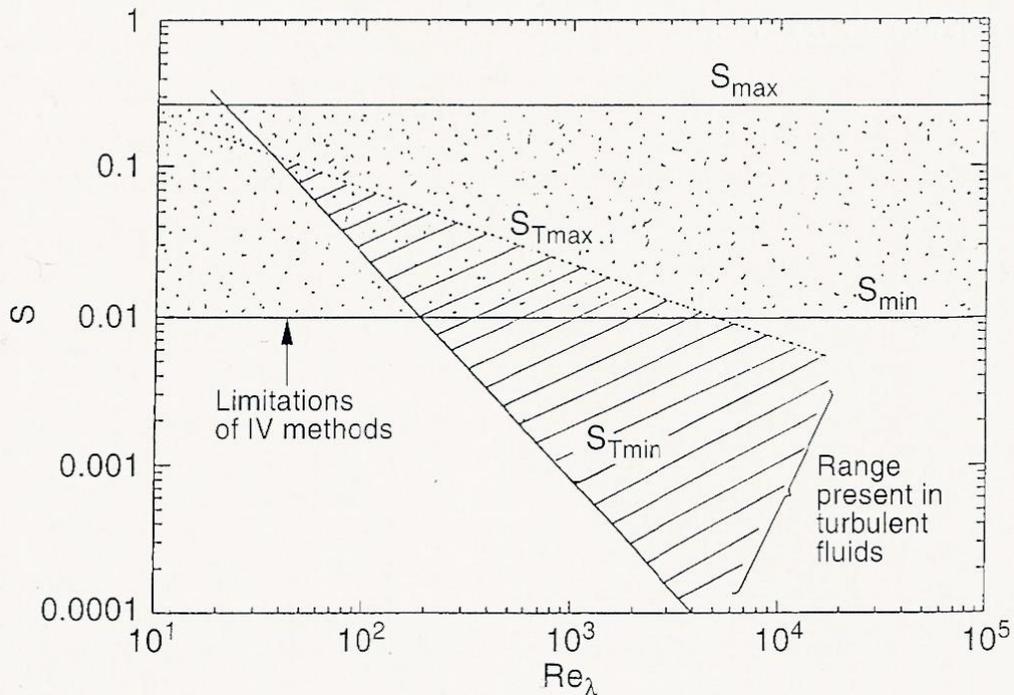
Serie g1 350 images



Champ de vorticite verticale



Limites fondamentales de ce type de méthodes



The fundamental limits of IV-methods can be expressed as constant values of maximum and minimum measurable shear, (S_{\max} , S_{\min}) as explained in the text. With increasing Re_λ , the range of shear in fully developed inertial-range turbulence expands in a cone. For $Re_\lambda < 50$ there is no inertial-range. The intersection of the two domains is the theoretically-realizable set of all planar IV turbulence measurements. The full range of S_T is measurable up to $Re_\lambda \cong 200$. The strongest vortices can still be accurately measured for $Re_\lambda \cong 5000$

Algorithmes avancées pour la CIV

Les erreurs

décomposition

peak locking

erreurs aléatoires

Corrections

faux vecteurs

hart

peak locking

zoom

translation sous pixel

pastis

erreurs aléatoires

déformations

Résultats

simulations

Turbulence 2D

Méthode pour mesurer les erreurs

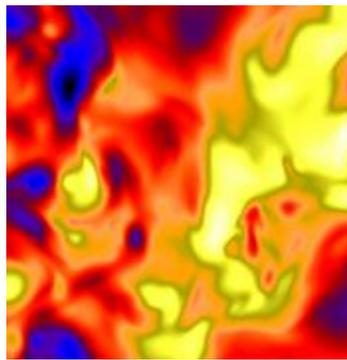
Champs connus :

1-vortex de Burger

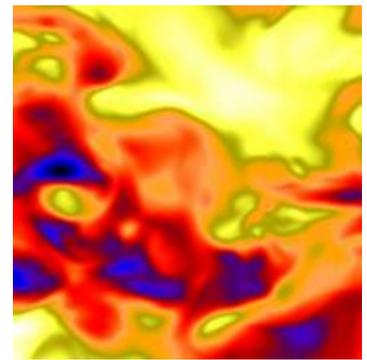
$$\omega_z = Ce^{-\left(r^2/r_0^2\right)}$$

$$u_\theta = \frac{r_0^2}{2Cr} \left(1 - e^{-\frac{r^2}{r_0^2}} \right)$$

2-DNS de Bogucki et al.



u



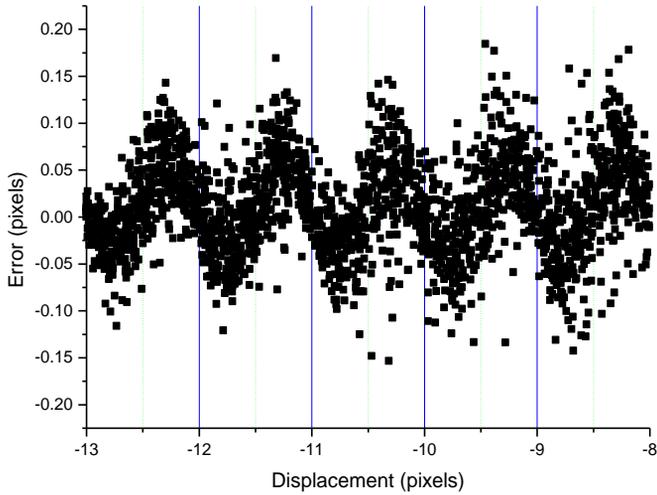
v

Des particules de profils gaussien sont projetées sur une première image puis translatées en fonction du champ connu et projetée sur la seconde image

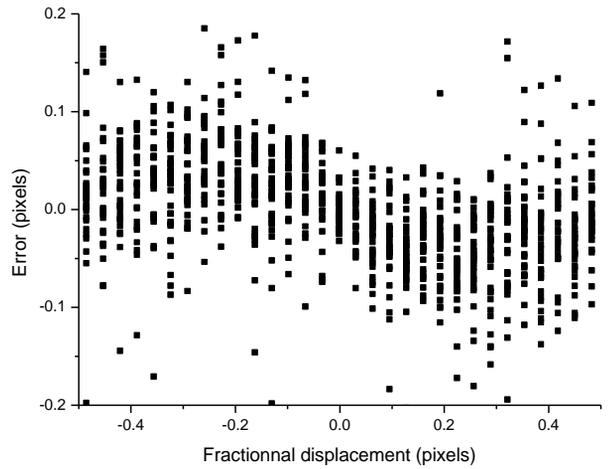
On calcul les champs de vitesses à partir des paires d'images ainsi obtenues puis les comparons au champ donné.

Les erreurs en PIV-CIV

Périodicité de l'erreur



Réduction de l'étude sur un pixel

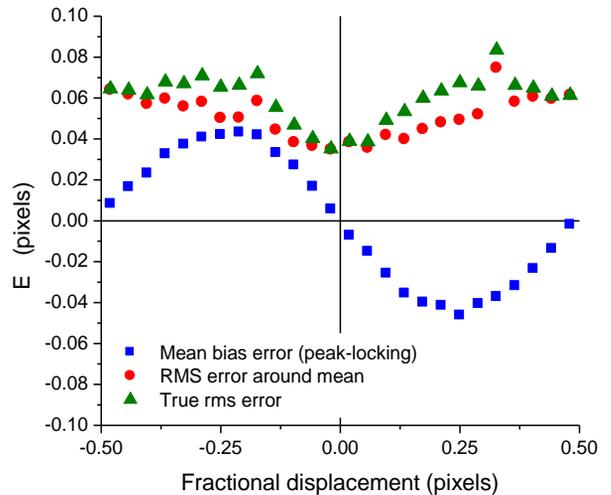


$$\Delta D = \text{exact} - \text{mesuré}$$

$$E_{mb}(j) = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} \Delta D(i, j)$$

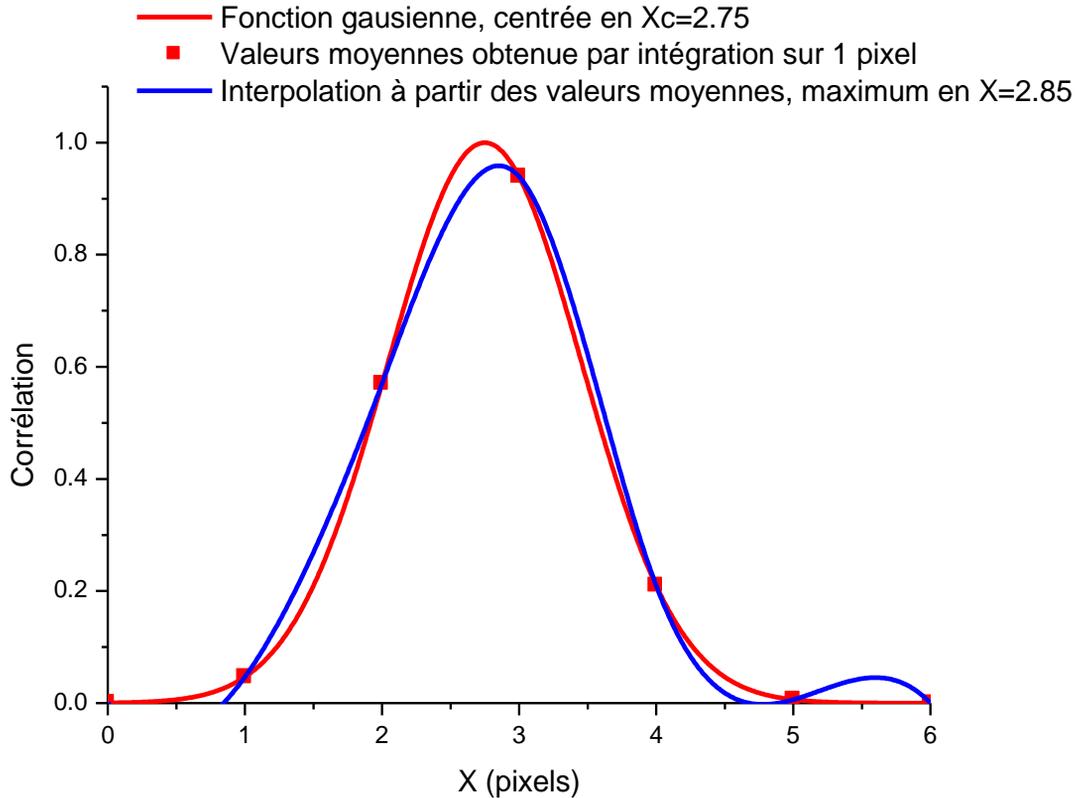
$$E_{rms}(j) = \left[\frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} (\Delta D(i, j) - E_{mb}(j))^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$E_{true}(j) = \left[\frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} \Delta D(i, j)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

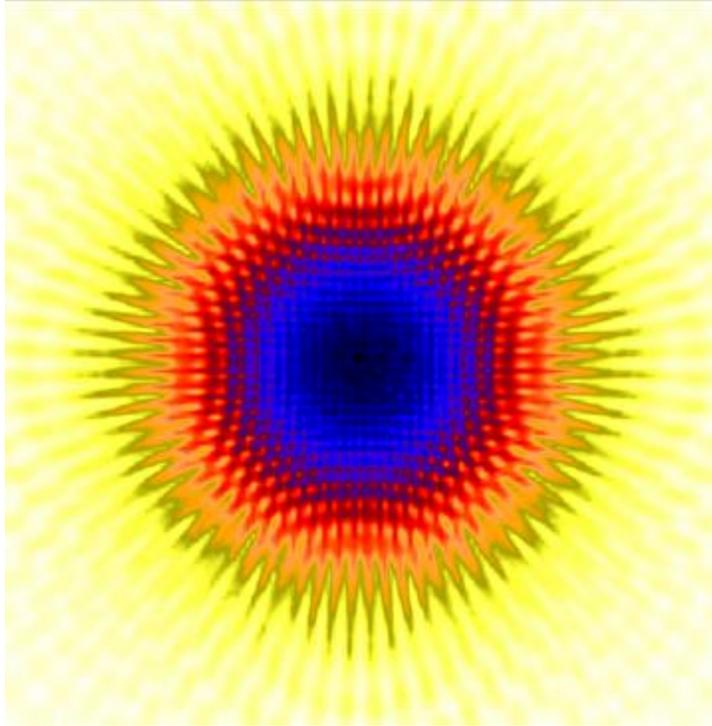


PEAK LOCKING

Le peak locking est le problème majeur en PIV car il empêche de mesurer précisément les zones peut cisailées

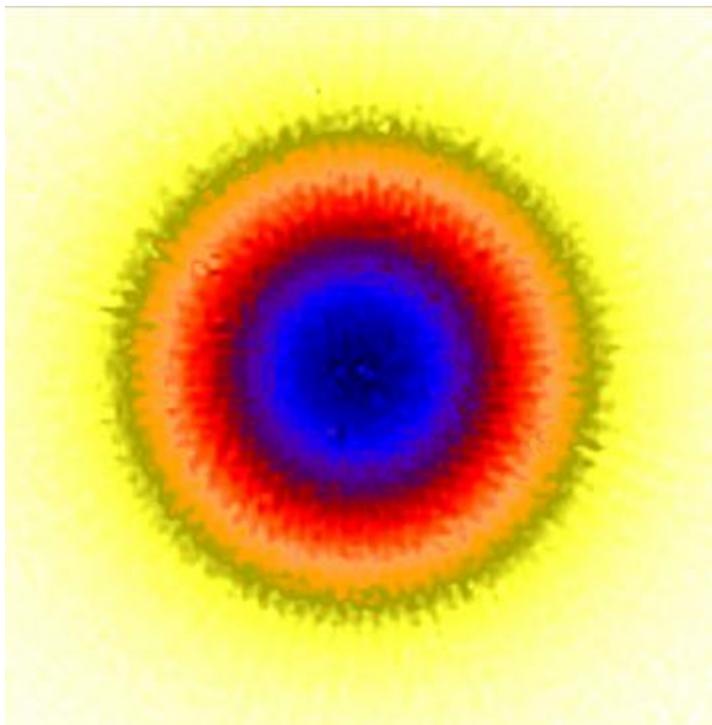


Effets visuels du peak locking sur la vorticité



Champ corrigé pour les erreurs aléatoires mais pas pour les effets de peak-locking

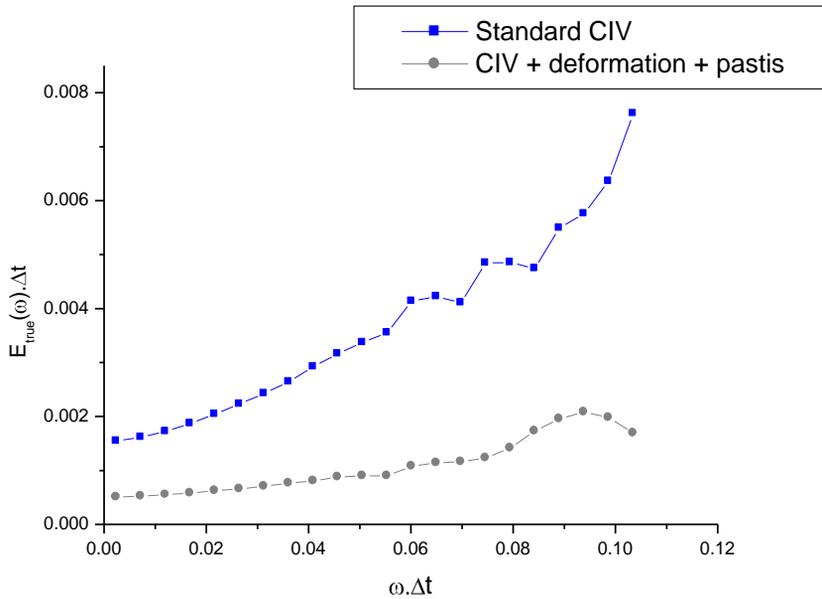
ω_z



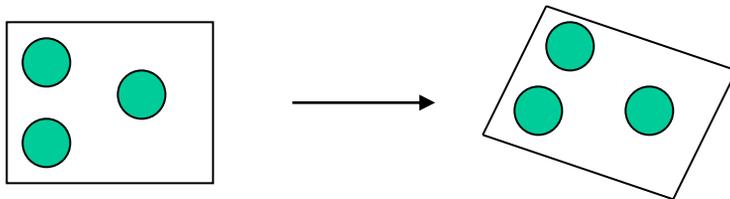
Champ corrigé complètement

Déformation

La déformation des zones fluides est une composante principale des erreurs aléatoires.



Si $du/dy > 0$ et $dv/dx < 0$, la zone de fluide devient:



Les techniques pour réduire les erreurs sont itératives :

Première étape : obtenir un champ sans faux vecteurs :
techniques de multiplication des fonctions de corrélations:
(HART + FIX)

Deuxième étape : réduire le peak locking afin d'obtenir de
bonnes dérivées. (RMS réduit par filtrage)

Troisième étape : appliquer la technique de déformation.

PREMIERE ETAPE :

HART : les pics dus au bruit
sont distribués aléatoirement,
donc non corrélés. Ils
disparaissent par multiplication
par un champ voisin.

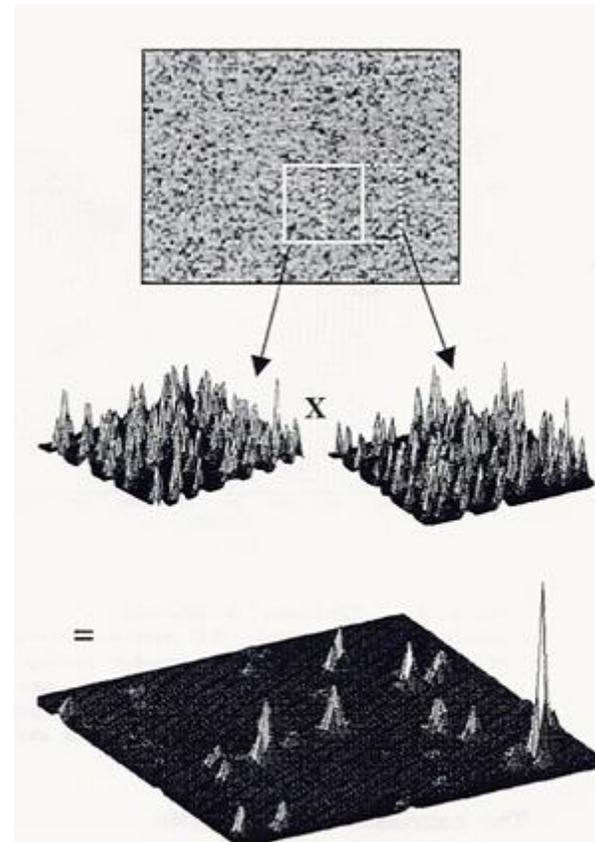


Figure 1. - Elimination of correlation anomalies by multiplying the correlation tables from adjacent regions. Correlation values that do not appear in both tables are eliminated allowing tracer particle displacement to be resolved.

DEUXIEME ETAPE : REDUCTION DU PEAK LOCKING

3 techniques :

Déplacements décimaux

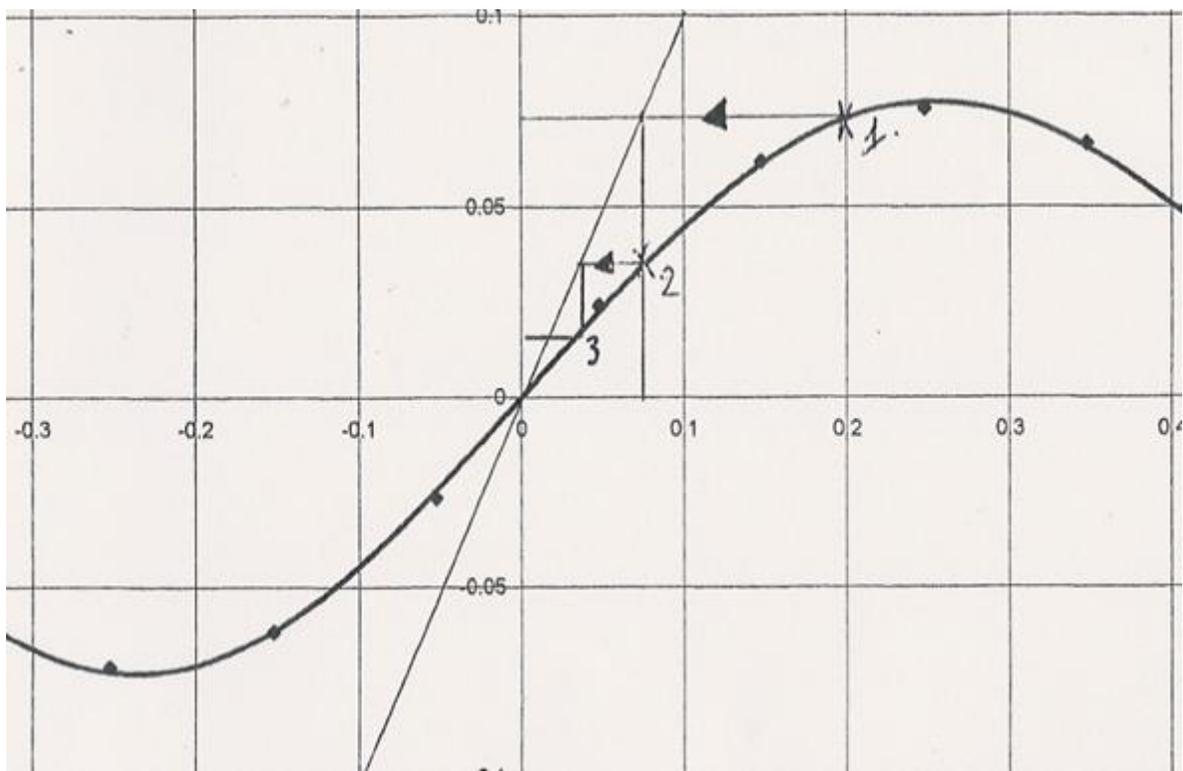
Zoom

PASTIS

Déplacements décimaux :

L'erreur est minimale pour un déplacement entier.

Translation d'une image par rapport à l'autre de la valeur décimale du déplacement calculé à l'itération précédente => mesure de déplacements entiers.

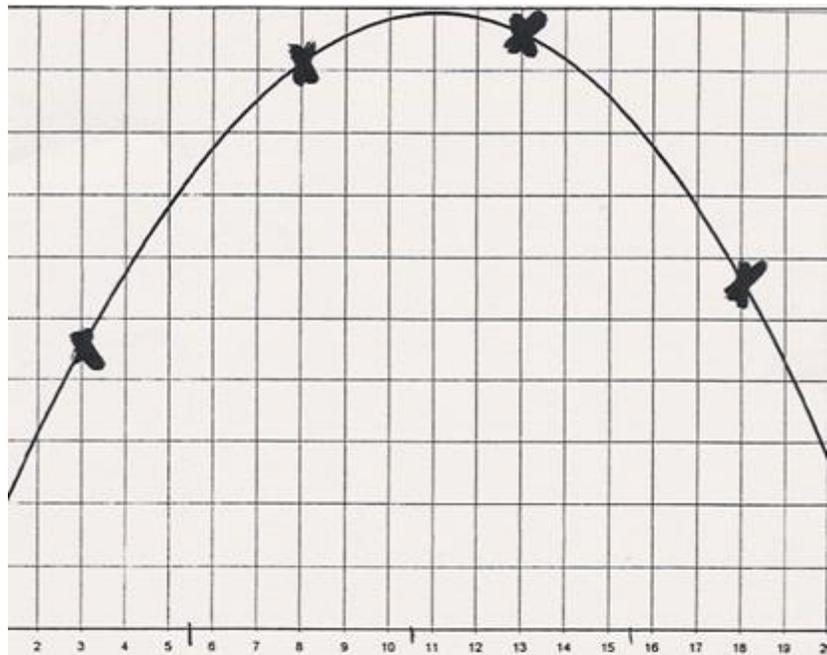


Zoom :

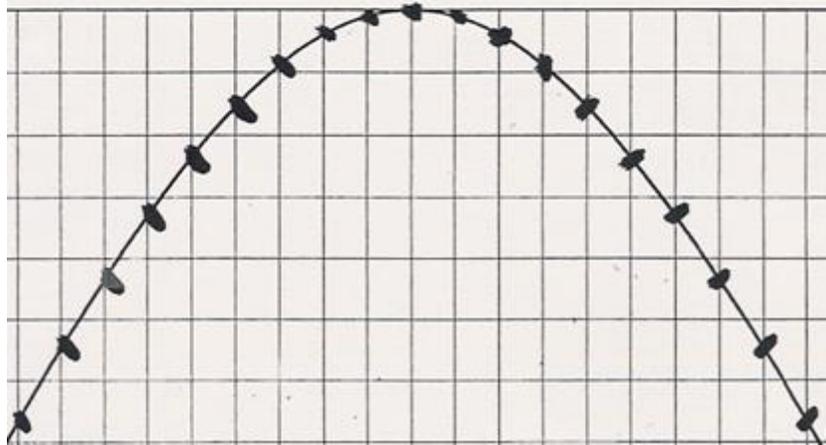
Le peak locking est dû au sous échantillonnage des images qui aboutit à une fonction de corrélation discrète sous échantillonnée.

En augmentant par interpolation la résolution des images, on augmente le nombre de points définissant le pic de corrélation.

Résolution normale



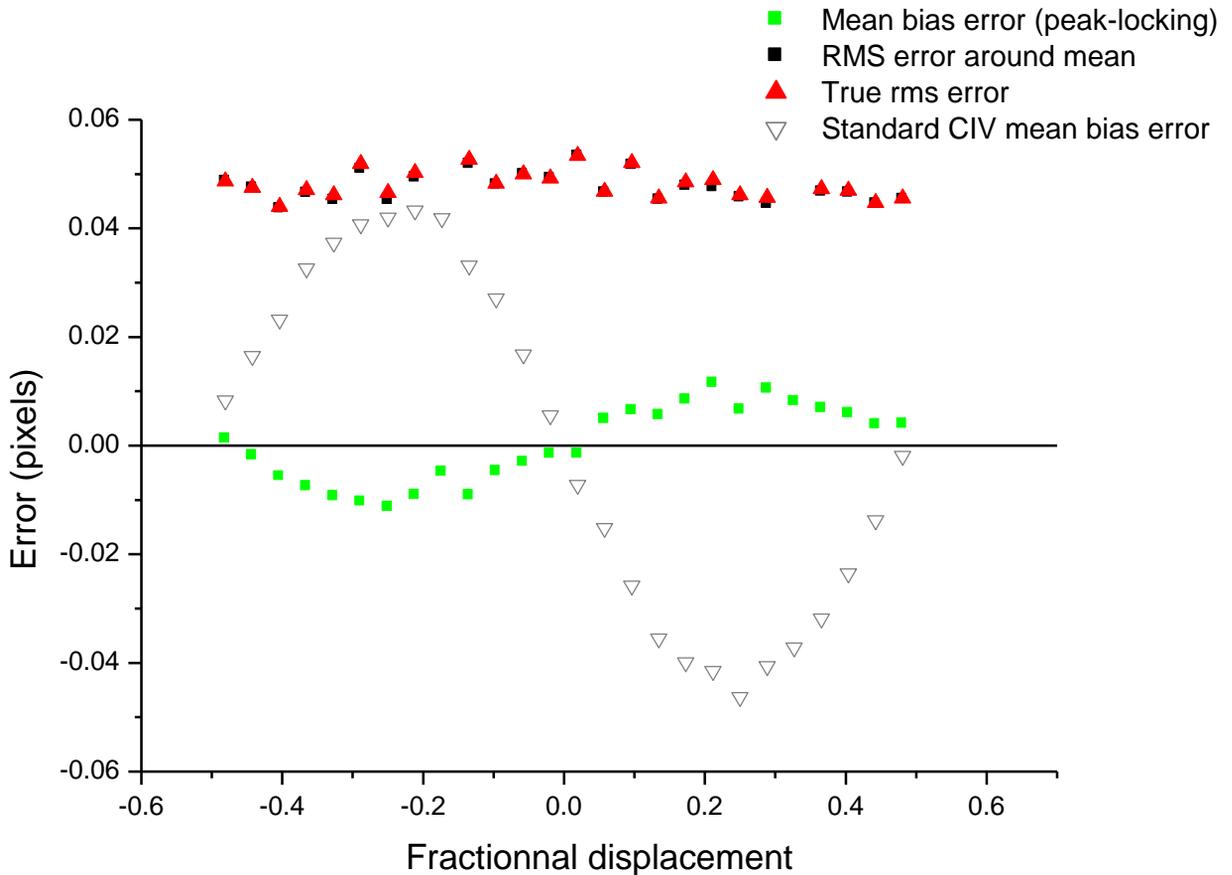
Sur échantillonnage



Peak Anti-aliasing Spline Transformed Interrogation Scheme : P.A.S.T.I.S.

PASTIS minimise l'écart entre le spline de la première image et la seconde image (discrète).

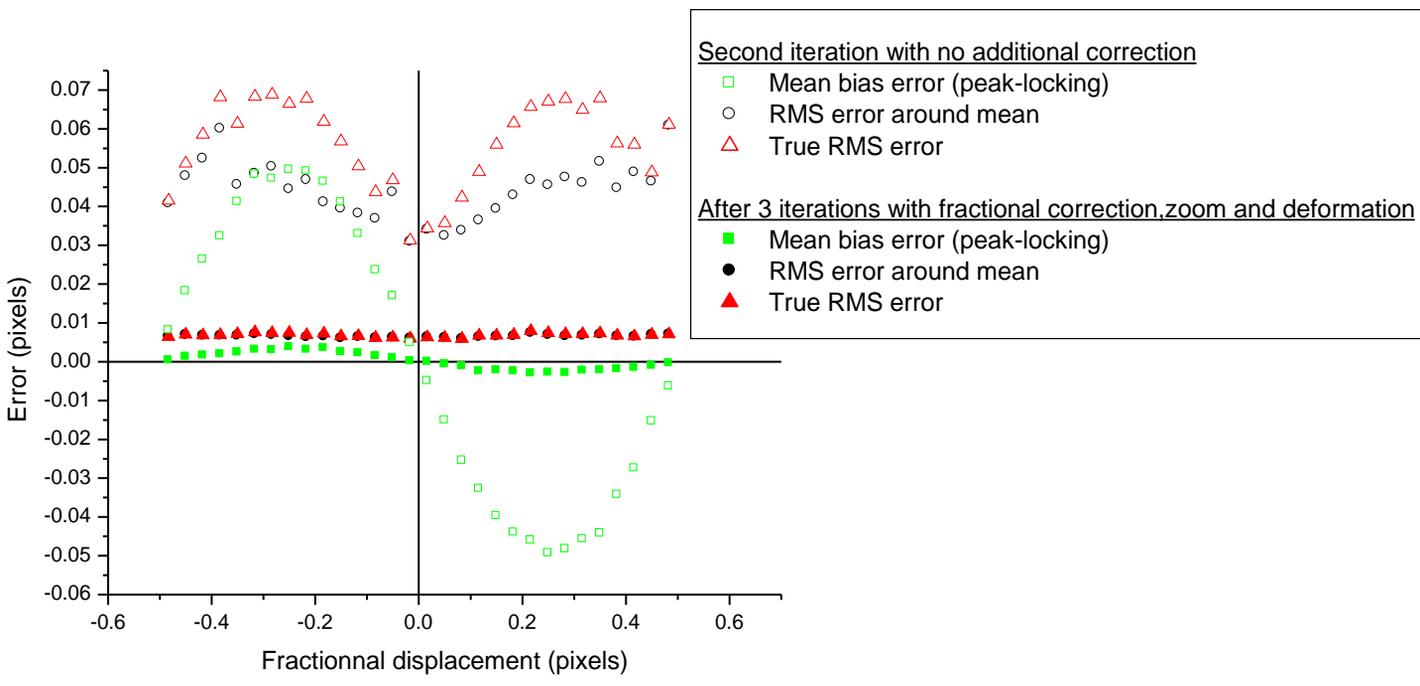
C'est équivalent à la technique de zoom.



TROISIEME ETAPE : DEFORMATION DES BOITES DE CORRELATION

Deuxième étape => tenseurs de déformation locaux

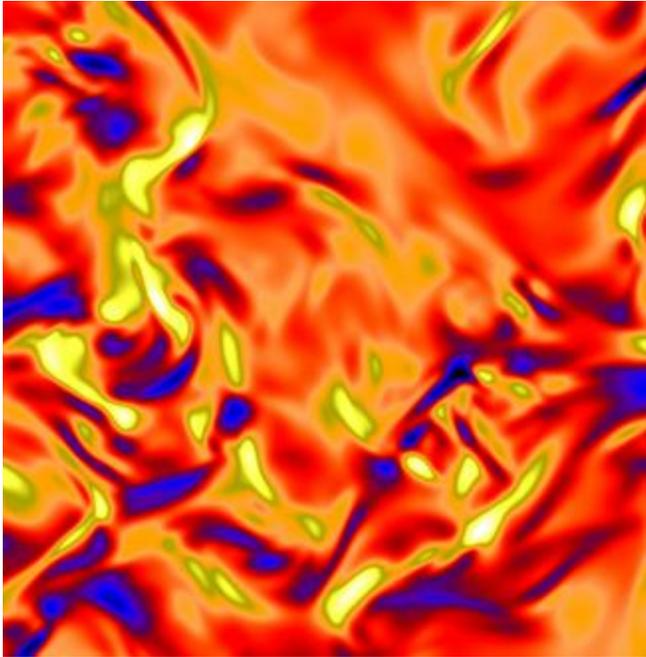
Applique déformation à une des deux boites avant la corrélation=>obtient une meilleure identité pour les zones très déformées.



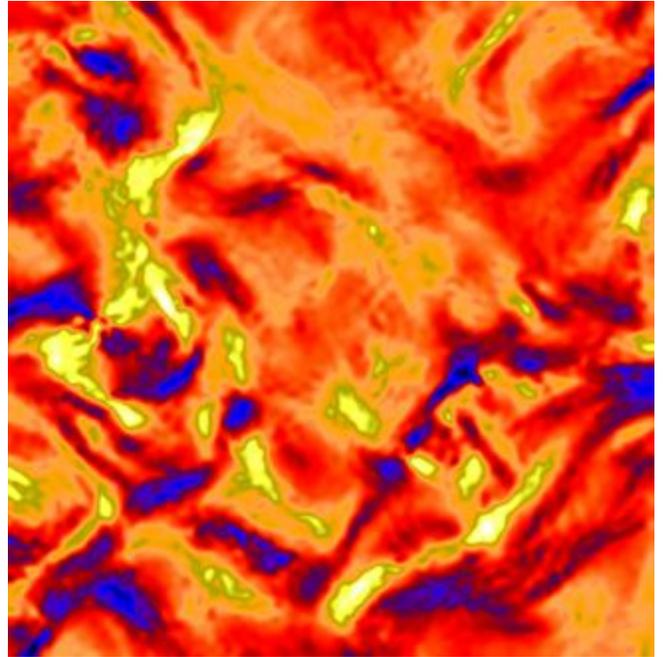
Résultats à partir de la DNS

Champs de vorticité

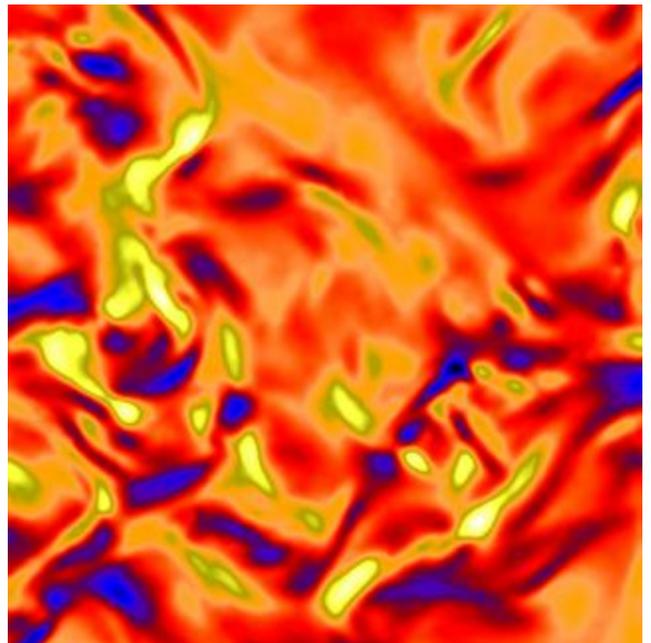
DNS



CIV standard



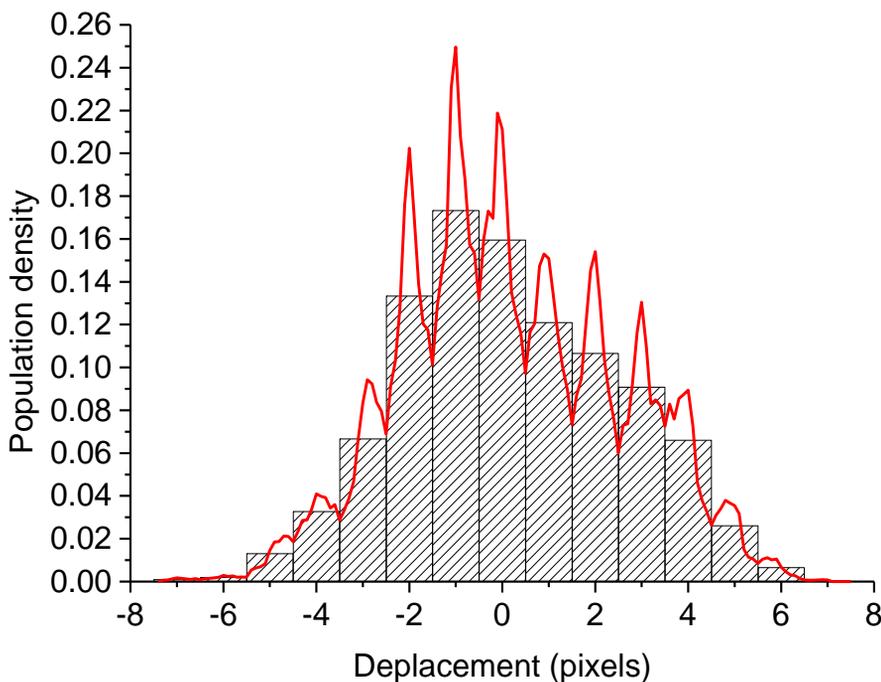
CIV optimisée



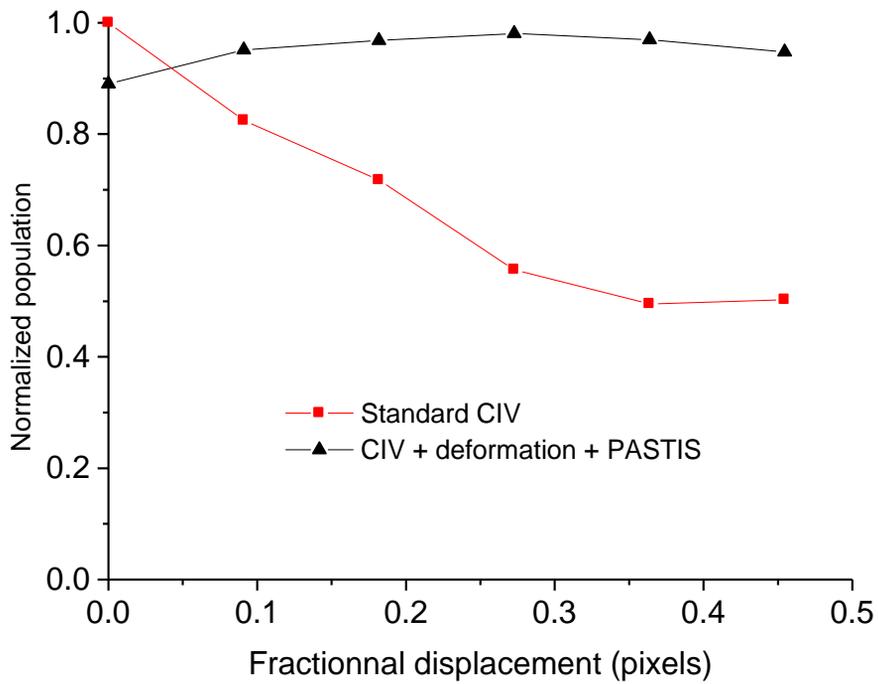
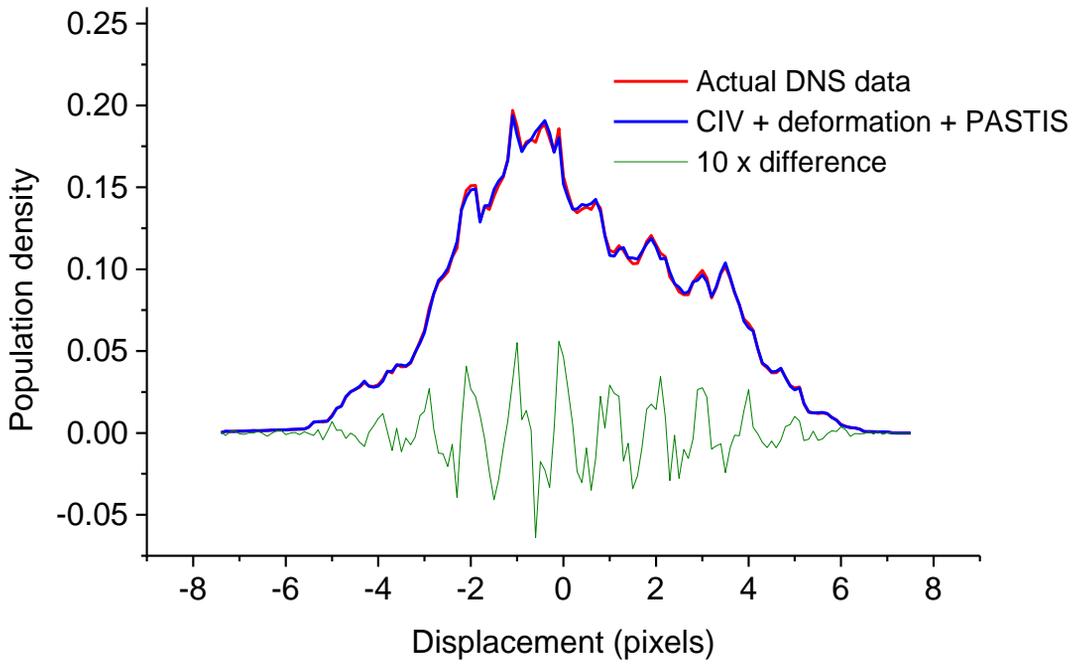
Comme beaucoup d'autres techniques, elles donnent de très bons résultats sur des images synthétiques, mais qu'en est-il sur des données réelles ?

Sur les données réelles, il n'est pas possible de construire les erreurs comme précédemment car nous n'avons pas accès au champ exact.

La fonction de distribution de probabilités du déplacement en pixel du champ mesuré peut être utilisée pour révéler les biais du au peak-locking.

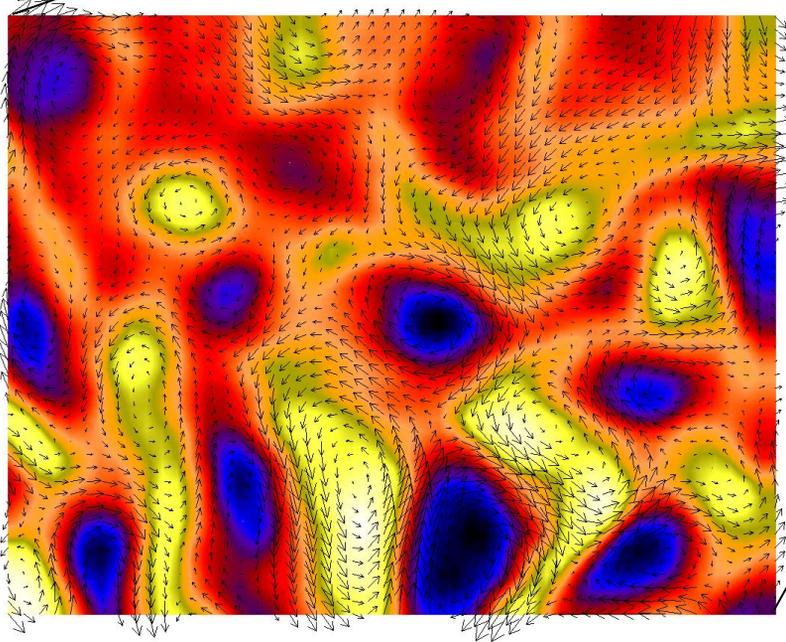
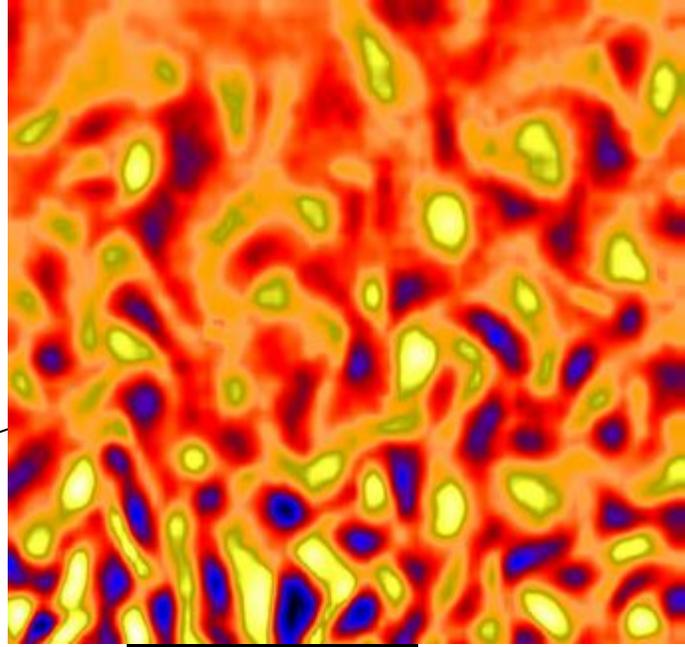


Standard CIV

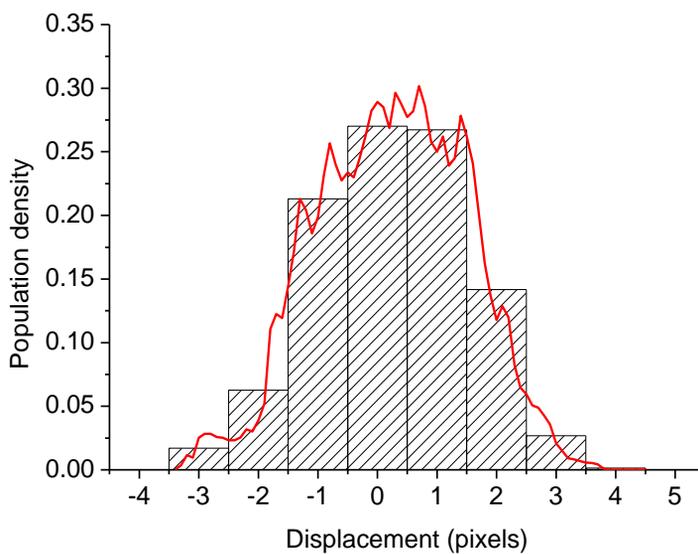


Turbulence de grille en milieu stratifié

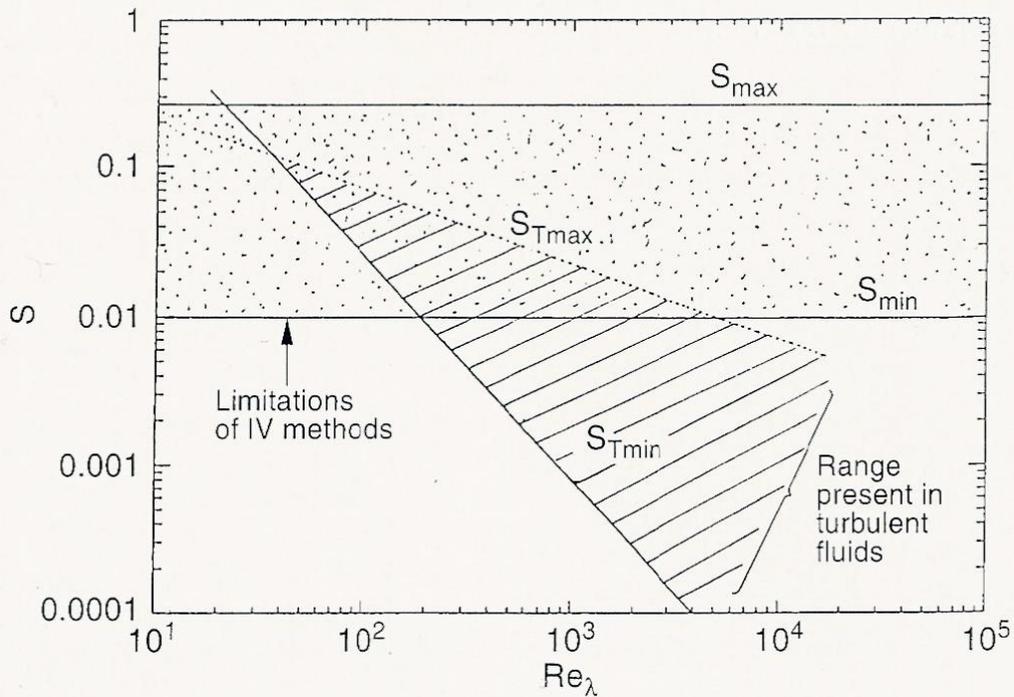
Champs de vorticité



Zoom avec champ de vecteurs superposé.



Limites fondamentales de ce type de méthodes



The fundamental limits of IV-methods can be expressed as constant values of maximum and minimum measurable shear, (S_{max} , S_{min}) as explained in the text. With increasing Re_λ , the range of shear in fully developed inertial-range turbulence expands in a cone. For $Re_\lambda < 50$ there is no inertial-range. The intersection of the two domains is the theoretically-realizable set of all planar IV turbulence measurements. The full range of S_T is measurable up to $Re_\lambda \cong 200$. The strongest vortices can still be accurately measured for $Re_\lambda \cong 5000$

CIV 3D

Technique de balayage

Description

Matériel

3D 2C détermination des vitesses
horizontales dans un volume de fluides
stratifié

Technique

Résultats

3D3C mesure des 3 composantes de la
vitesse dans un volume

Algorithmes

Simulations

Difficultés

Construction d'un volume :

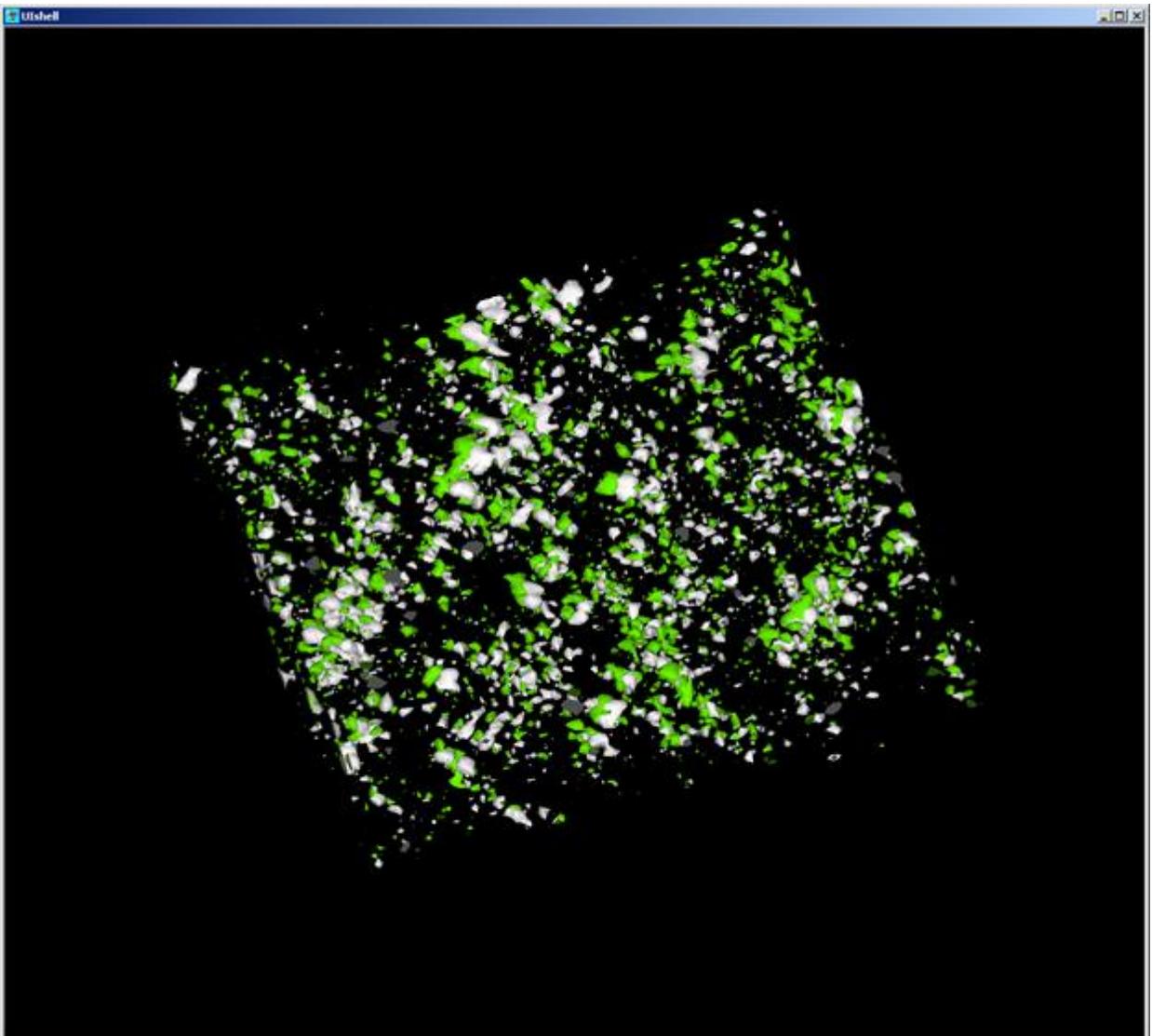
Holographie :

Avantages : prise de vue instantanée.

Inconvénients : densité limitée.

redondance (une solution par Sven Herrmann
solutionne ce problème (light-in-flight holography))

Exemple : jet turbulent (champ réduit $100 \times 2 \times 20$)



THE LIGHT-IN-FLIGHT CONCEPT

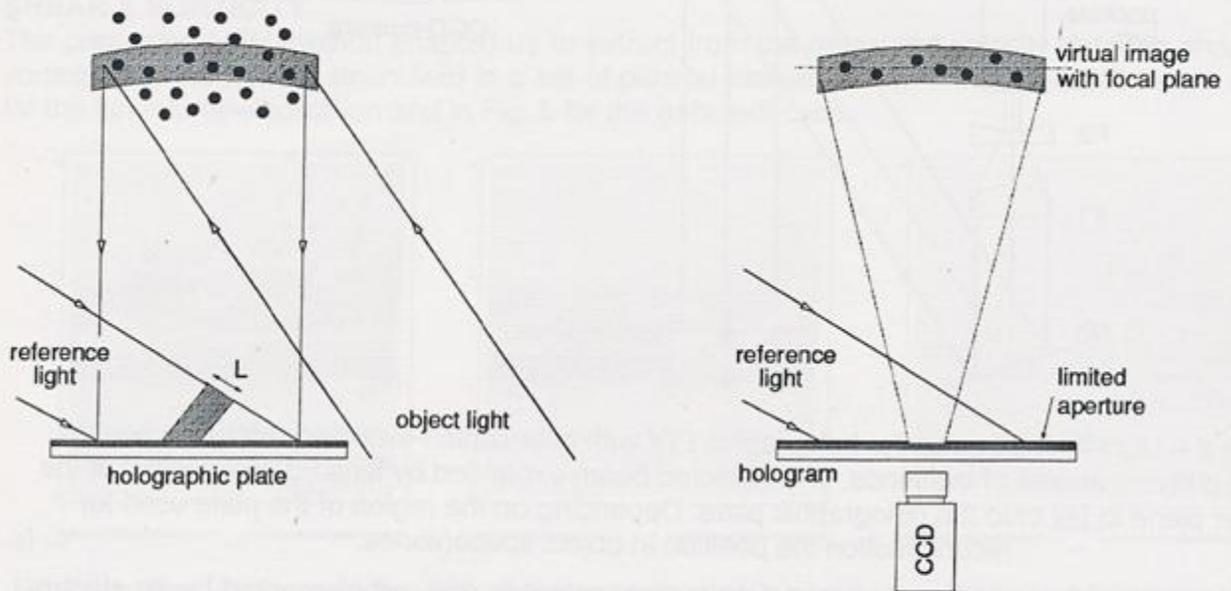


Figure 1 – Schematic of light-in-flight holography with short coherence length for particle recording (left) and reconstruction of particle images (right).

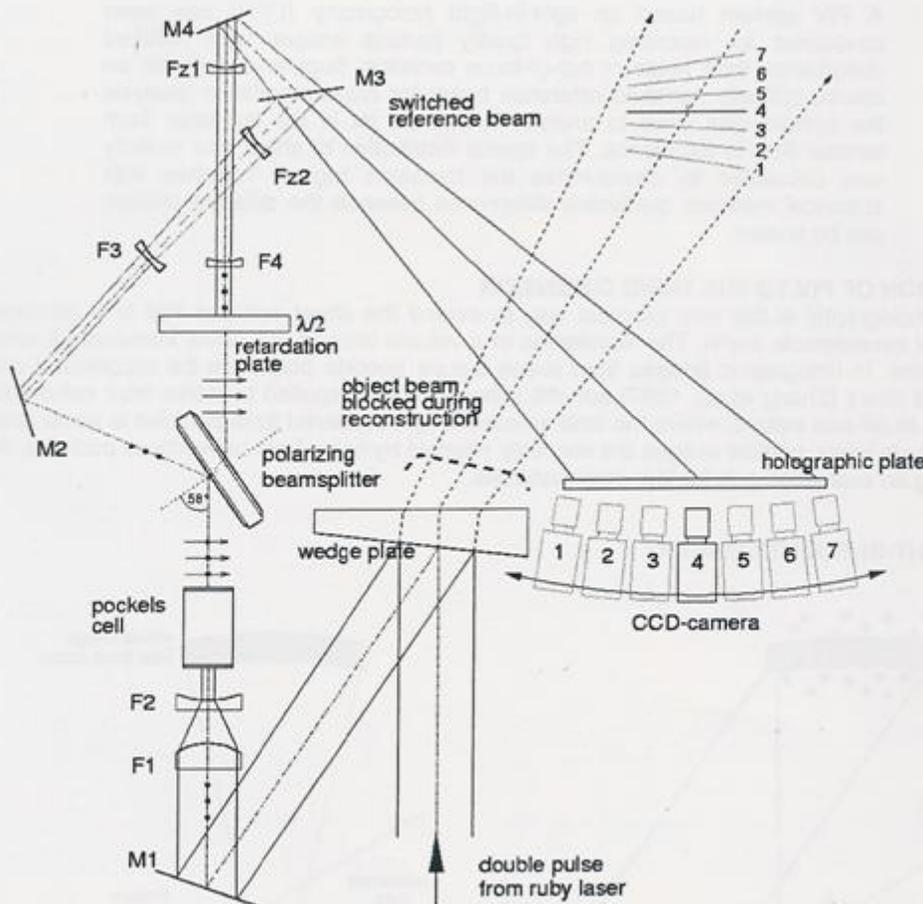


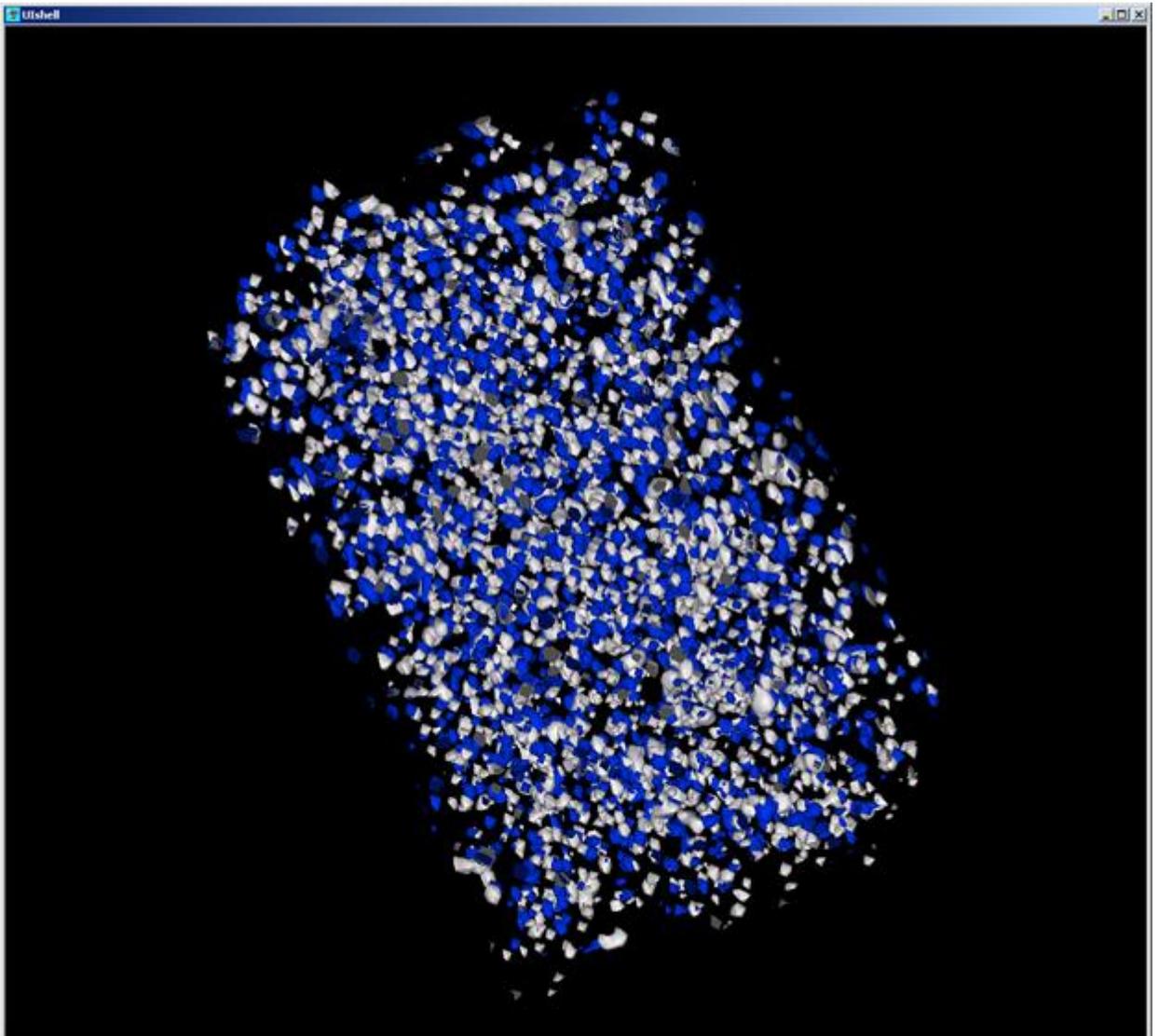
Figure 2 – Light-in-flight setup for holographic PIV with polarization-switched reference beams offering different angles of incidence. The reflected beam expanded by lens F3 projects out of the paper plane to fall onto the holographic plate. Depending on the region of the plate used for reconstruction the position in object space varies.

Balayage progressif :

Avantages : facilité

Inconvénients : à réserver
aux écoulements lent

Exemple : turbulence de grille en milieu
stratifié (champ réduit 50×3):





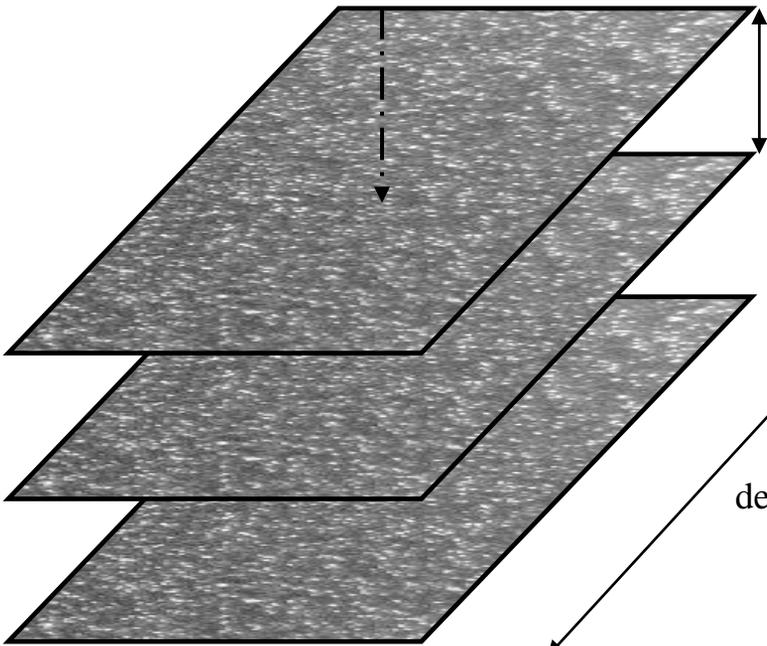
caméra numérique



objectif



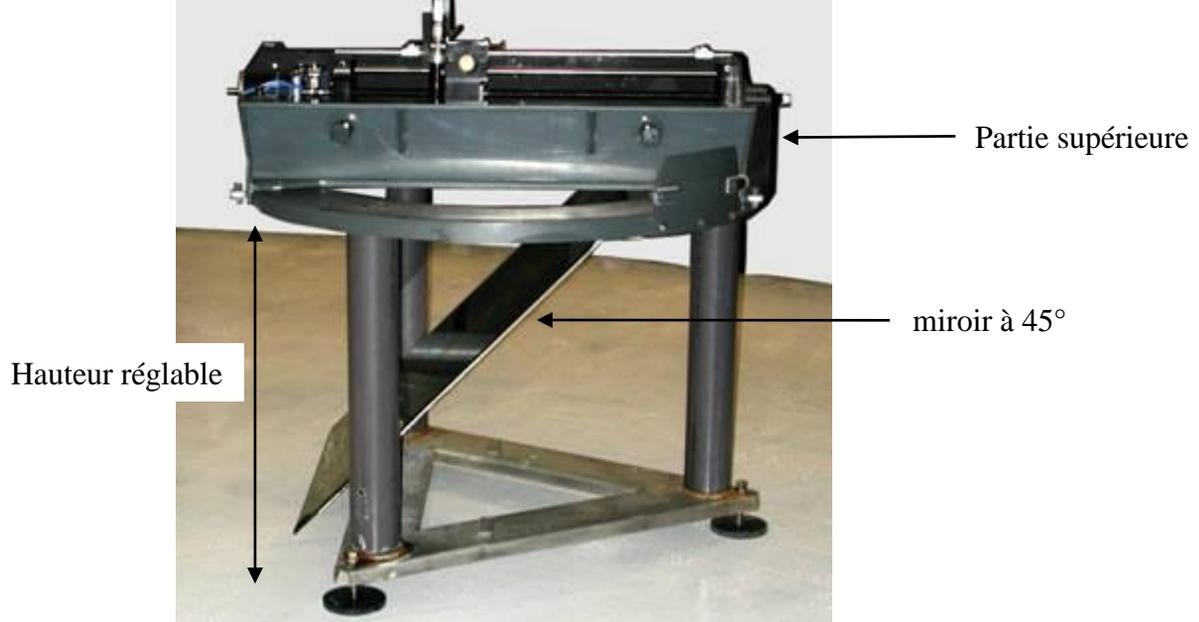
4m



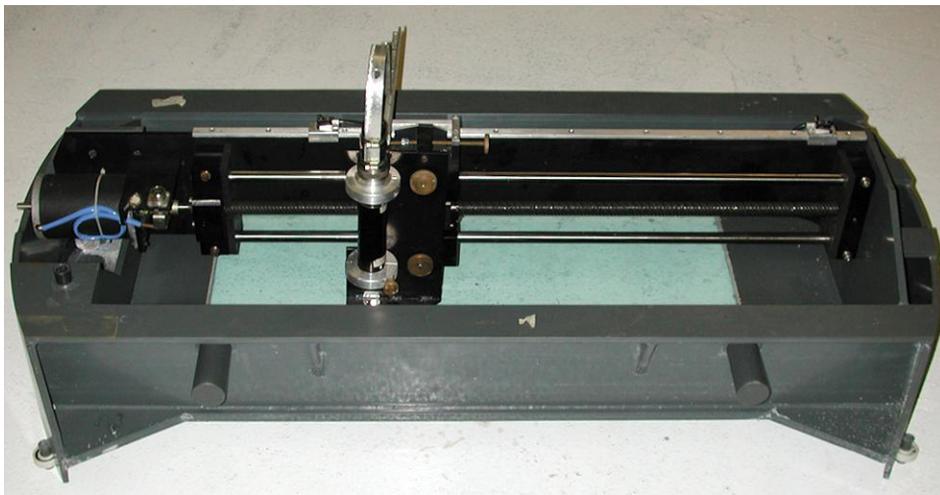
1.5cm

de 1 à 2m

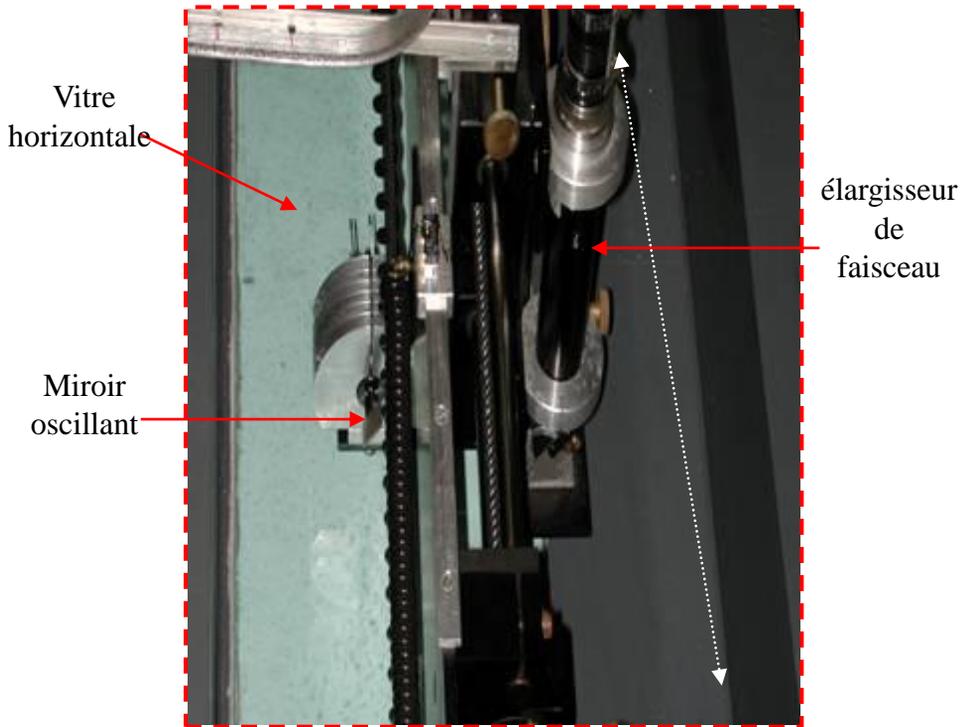
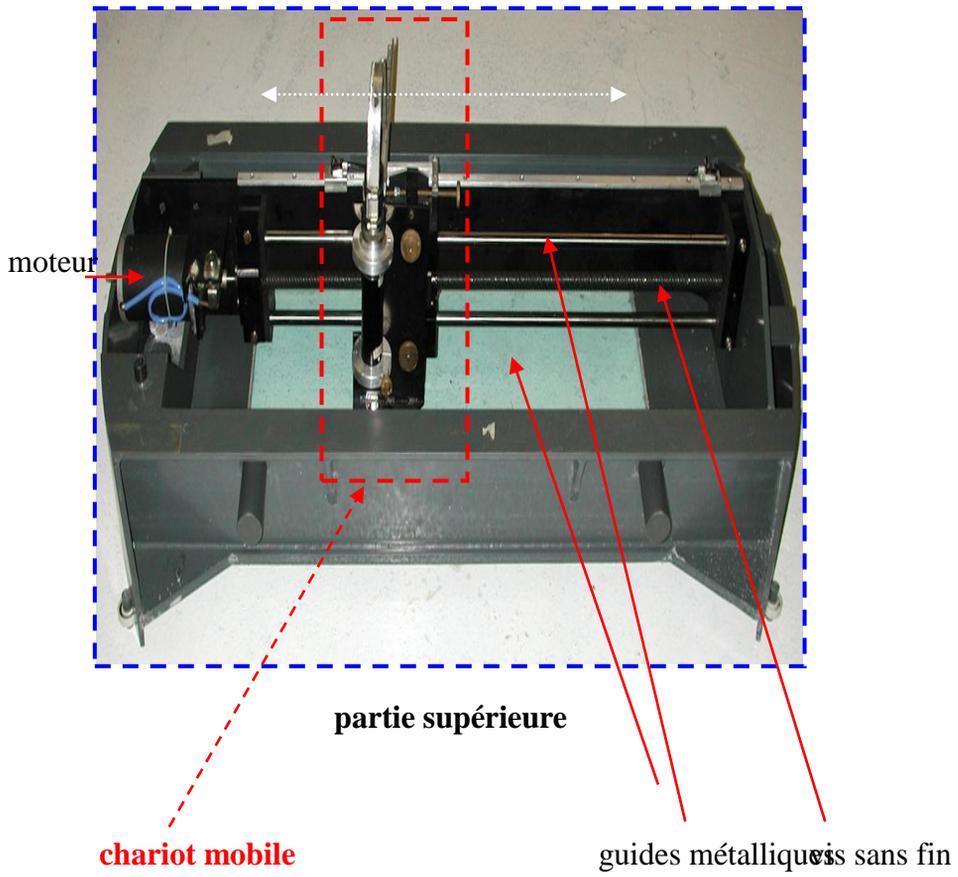
de 1.6 à 2.8m suivant l'objectif



Vue d'ensemble de l'appareil



détails de la partie supérieure



chariot mobile

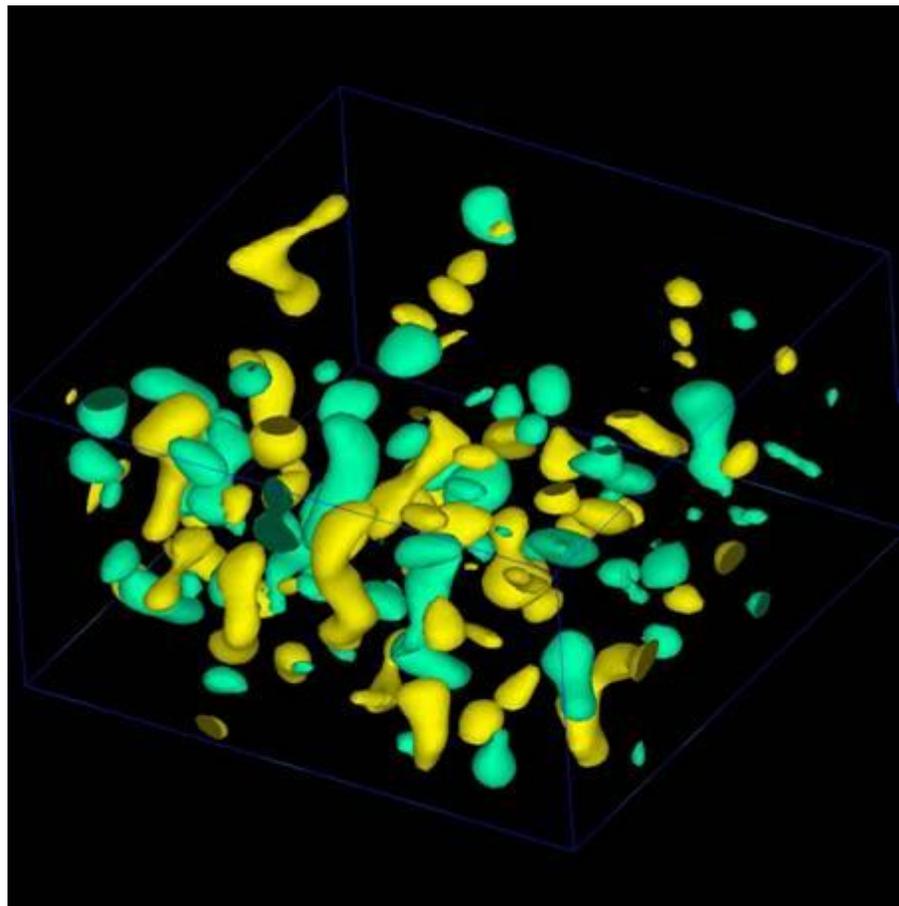
Turbulence de grille verticale Praud 2000

Stratification linéaire 2.5%

Grille : $\sigma = 0.34$, 1cm/s

50 tranches horizontales

Juste après le passage de la grille



Simulations 3D de la méthode de balayage .

But : déterminer les paramètres optimaux pour l'acquisition de volumes par balayage.

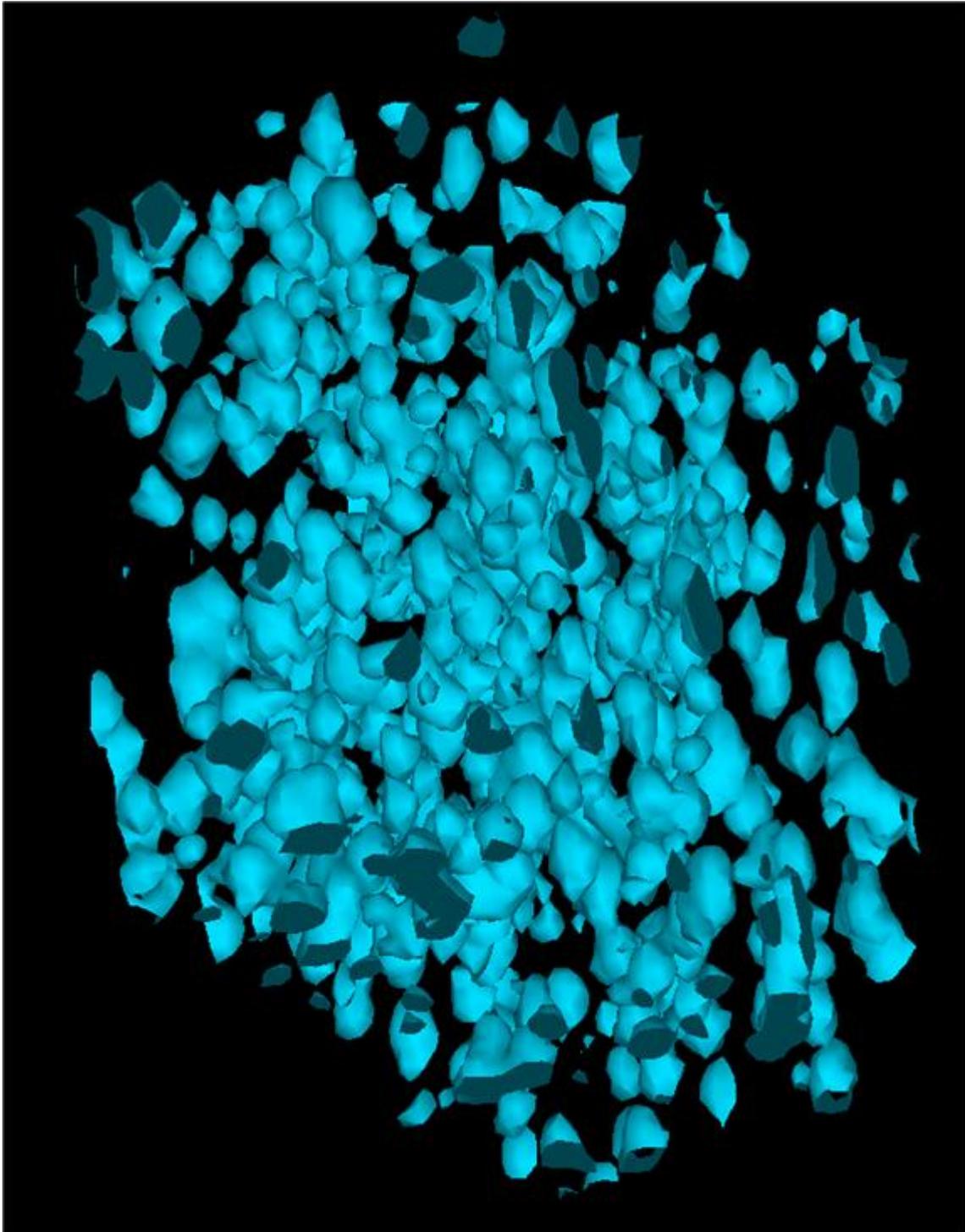
Place des particules de profils gaussiens dans un volume et on les éclaire par une tranche laser de profil connu (gaussien , carré) . On intègre suivant z pour obtenir une image. On déplace la tranche en z et répétons l'opération pour obtenir une nouvelle image jusqu'à avoir balayé tout le volume. En assemblant les images on obtient le volume.

Cette étape permet de déterminer l'épaisseur de la tranche par rapport à la taille des particules ainsi que le Δz entre chaque tranches.

Un bloc de résine ensemencé de particules est utilisé ensuite. Il permet d'intégrer les phénomènes suivants aux calculs des erreurs :

 éclairage par une tranche laser de côté
 intégration sur un écran CCD (microlentilles, espaces vides ...) et transfert vers la mémoire du PC.

Exemple du volume de résine, extrait de
 $50*50*30$, d'un volume de $768*484*50$



Calcul parallèle

2D : Le calcul en parallèle n'est pas utile en 2D car nous avons toujours des séries de plusieurs images à traiter , il est alors plus simple de lancer plusieurs calculs sur différentes images en même temps plutôt que de paralléliser le code.

Création de batch files

3D :

Dans le cas 3D, le code est multi-thread, une série de nœuds est alloué à chaque processeur, il n'y a pas redondance des calculs, dès qu'un processeur a fini sa série, il cherche un nœud dans une autre série non calculé.

Des tests sur un même champ 3D avec différents nombre de processeurs alloués ont montré que, à quelques pourcents près, le temps de calcul est divisé par le nombre de processeurs ; ce qui montre l'excellente aptitude à la parallélisation des codes CIV ; l'utilisation des bibliothèques MPI est prévu pour l'utilisations de clusters.

Graphe : 2000 nœuds , boites de corrélation : $10*10*10$; zone de recherche : $20*20*16$

