

#5797

centre technique des industries aéronautiques et thermiques



cetiat

Orsay

**TOMOGRAPHIE LASER
POUR ESSAIS INDUSTRIELS**

Siamak AREFI

DIFFUSION	
CONFIDENTIELLE	
INTERNE CETIAT	
GENERALE	X

**NTO 89.224
SEPTEMBRE 1989**

ORSAY Plateau du Moulon
B.P. n° 73 91402 Orsay Cédex
tél. (1) 69.41.18.64
téléx 600.871
télécopie (1) 60.19.12.80

VILLEURBANNE 27-29, boulevard du 11 novembre 1918
B.P. 6084 69604 Villeurbanne Cédex
tél. (16) 78.93.39.85
téléx 340.310
télécopie (16) 78.89.71.55

TOMOGRAPHIE LASER

1 - INTRODUCTION

L'intérêt de la tomographie laser qualitative est de fournir une vision générale de l'organisation d'écoulements complexes. Cette vision est souvent très utile, au moins dans une première approche, pour résoudre les problèmes d'aérodynamique ou contrôler le fonctionnement d'appareils.

La tomographie quantitative permet en plus d'accéder à la carte numérisée du champ des vitesses, projetée dans le plan de la tomographie.

Là encore, par rapport à une mesure locale ponctuelle, même très précise, la tomographie laser apporte une vision globale plus riche et plus compréhensible pour l'esprit.

Il s'agit donc d'un outil d'investigation très puissant, donnant des résultats sous forme d'images ou de valeurs numériques directement interprétable par l'utilisateur.

La tomographie qualitative est utilisable de 0 à 20 m/s sans problèmes particuliers. Pour obtenir des images quantifiées, s'il n'y a pas de problème de fond jusqu'à 200 ou 300 m/s, il est nécessaire, au delà de 10 m/s de disposer d'un matériel plus sophistiqué et donc plus onéreux.

2. DESCRIPTION

2.1 Principe de fonctionnement

Le principe de la tomographie laser consiste, fig. 1, à illuminer un plan de l'écoulement au moyen par exemple d'un miroir tournant sur lequel impacte le faisceau du laser.

L'écoulement que l'on désire visualiser estensemencé en particules.

Lorsque celles-ci atteignent le plan illuminé par le laser elles deviennent visibles et matérialisent l'écoulement. L'étude peut se faire directement à l'oeil nu ; Cependant la plupart du temps il est préférable de stocker les images soit par photographie, soit de manière plus pratique au moyen d'une caméra vidéo et d'un magnétoscope. Ceci permet, si l'écoulement est rapide et présente des structures instationnaires, de revoir les images ralenties. Il est aussi possible de les comparer, de faire des moyennes et finalement d'accéder à l'étude de la turbulence.

Pour aller plus loin dans l'analyse, et obtenir des informations quantitatives, on opère de la manière suivante :

Chaque passage du faisceau laser, très rapide par rapport à la vitesse de l'écoulement, permet d'obtenir une image des particules figées. Sur la même photographie, ou sur la même image vidéo, on enregistre deux passages successifs du faisceau laser. Ainsi chaque particule apparaît 2 fois sur le cliché, à des instants différents. Si on savait identifier les particules, il suffirait de mesurer sur le cliché la distance parcourue par chacune d'entre elles pour en déduire la valeur instantanée et locale du vecteur vitesse projeté dans le plan de la tomographie.

En pratique compte tenu du grand nombre de particules il vaut mieux raisonner statistiquement. Un certain nombre de particules créent sur l'image un doublet de points constitué par leurs positions initiales (premier passage du laser) et finales (deuxième passage). D'autres particules quittent le plan de la tomographie entre les deux passages et ne créent pas de doublets tout comme celles qui apparaissent entre les deux passages. Ces particules "célibataires" ne doivent pas être en trop grande proportion pour ne pas fausser le résultat, d'où la nécessité d'étudier un écoulement dont la composante du vecteur vitesse dans le plan perpendiculaire à la tomographie soit d'un ordre de grandeur inférieur à celui de la composante du même vecteur dans le plan de la tomographie elle-même.

Le cliché obtenu est divisé en carré élémentaire, et l'on cherche à déterminer dans chacun d'entre eux la valeur moyenne du vecteur vitesse (projeté dans le plan de la tomographie).

Si par exemple, on trace sur le cliché 8 lignes et 8 colonnes on obtient 64 carrés. Il serait tentant d'augmenter le nombre de carré. La limitation vient de ce que l'on doit disposer dans chaque carré d'un nombre de doublets suffisants pour donner une valeur moyenne fiable. Le nombre de doublets obtenu est lui-même déterminé par la concentration de particules et la sensibilité de la caméra vidéo ou du film photographique. De toute manière, surtout avec une caméra vidéo, on est limité par la définition de l'image elle-même : 512 x 512 ligne x colonne pour du matériel classique.

Pour obtenir la valeur moyenne du vecteur vitesse dans chaque carré élémentaire on effectue le traitement suivant de l'image :

- renforcement du contraste
- binarisation
- autocorrélation de l'image par elle-même au moyen d'une double transformée de Fourier. On en déduit la direction et le module du vecteur vitesse moyenne par carré.

2.2 Difficultés de la méthode

Deux points sont essentiels dans la tomographie laser :

- l'ensemencement en particules
- la qualité de l'image

Une activité importante du laboratoire d'Orsay concerne le domaine des filtres, du dépoussiérage, des salles à empoussièrément contrôlé, dites salles blanches. L'expérience ainsi acquise dans le maniement des aérosols est précieuse et permet au CETIAT de bien maîtriser les problèmes d'ensemencements .

En ce qui concerne la taille des particules, la tomographie présente des exigences contradictoires :

Il faut que les particules soient plus fines, de diamètre équivalent inférieur à quelques microns, pour être sûr que la trajectoire des particules représente bien les lignes de courant de l'écoulement.

Inversement les particules seront d'autant plus visibles qu'elles sont grosses.

La quantité de lumière émise est également proportionnelle à la durée de l'illumination pour le faisceau laser. Dans ce cas c'est la vitesse de l'écoulement qui produit une limitation. Plus cette vitesse est grande, plus la durée de l'illumination doit être courte pour éviter un "flou". (Cette limitation n'apparaît pas en tomographie qualitative car on ne cherche pas à identifier la particule).

Une autre manière d'améliorer l'identification des particules est de diminuer le bruit de fond, en améliorant la qualité de l'image. Il faut utiliser des optiques de bonnes qualités, présentant de faibles profondeurs de champ et éliminer les lumières parasites ne provenant pas directement du champ de mesure.

Enfin, la quantité de lumière reçue est proportionnelle à la puissance de la source et il est nécessaire d'utiliser un laser de plusieurs watt.

3. INTERET INDUSTRIEL DE LA METHODE

Les méthodes de visualisation sont utilisées depuis fort longtemps pour étudier les phénomènes aérodynamiques, en particulier dans le domaine de l'aéronautique.

Par exemple, de nombreuses photographies de maquettes de "Concorde", ont été publiées montrant l'enroulement tourbillonnaire de l'aile delta.

Jusqu'ici, ces méthodes de visualisation étaient réservées au domaine des études avancées et le plus souvent ignorées du tissu industriel. Hors, l'évolution des techniques de visualisation permet maintenant une mise en oeuvre plus souple, moins onéreuse et les résultats obtenus sont plus exploitables.

En outre, l'amélioration des techniques vidéo et des traitements numériques des images permet d'extraire en "quasi" temps réel des renseignements quantitatifs. Ce qui était une technique de laboratoire de recherche avancée devient utilisable dans les laboratoires industriels, et applicable à des produits ou composants de faible coût.

DOMAINES D'APPLICATION -

- Economie d'énergie - confort

Dans le domaine de l'habitat, des locaux de travail, des salles de spectacle... :

mise au point des composants de ventilation, conditionnement d'air : bouches d'extraction ou de soufflage, convecteurs, ventilo-convecteurs, climatiseurs, etc...

- Aérodynamique - étude des écoulements

Brûleurs, chaudières, ventilateurs, études d'alimentation des échangeurs, écoulements dans les réacteurs chimiques.

- Salle à empoussièrement contrôlé, chambres stériles...

Contrôle de l'efficacité des filtres, de la laminarité des écoulements, ...

- Epuration de l'air : captage des polluants.

4. INSTALLATION DE TOMOGRAPHIE LASER AU CETIAT

L'installation de visualisation du CETIAT vise à mettre la tomographie laser au service d'utilisateurs industriels très divers. ce système est destiné aussi bien à fournir des informations qualitatives de façon rapide que des informations quantitatives moyennant des traitements d'images appropriés. une installation de ce type doit donc, avant tout se caractériser par une grande souplesse. cette souplesse doit se retrouver pour chaque composante du système à savoir :

- . la génération des particules.
- . l'éclairage.
- . la prise de vues.
- . sauvegarde d'image
- . le traitement d'image.

chacun de ces éléments du système a donc été conçu pour être modifié ou remplacé aisément.

4.1. Description générale de l'installation

La figure n° 2 nous donne l'implantation du système de tomographie laser. les systèmes de génération de particules, la source laser et le système de traitement d'images sont dans des locaux extérieurs à la chambre d'essai. une source d'air et un extracteur aisément modifiable permettent l'essai de systèmes très divers de ventilation ou de climatisation. l'espace disponible pour les expériences correspond à une surface au sol de 9 m x 5,3 m² sur une hauteur de 2,50 m. divers systèmes de protection assure la sécurité des utilisateurs.

4.2. Systèmes de génération des particules

L'expérience déjà ancienne du CETIAT sur les problèmes de filtration, a entraîné le développement d'un certain nombre de systèmes de génération d'aérosols couvrant un très large spectre en ce qui concerne leur diamètre.

Deux systèmes de conception interne ont été utilisés d'une part un système de génération de particules de chlorure de sodium par passage d'air comprimé dans une solution saline, d'autre part un système d'aspiration de particules par un système d'éjecteur sur un plateau tournant.

Deux générateurs de fumée par combustion d'huile sont également employés.

Le premier est équipé avec une sonde à fumée type NPL et il est destiné à des vitesses jusqu'à 90 m.s^{-1} .

Le deuxième est utilisé pour générer un nuage très dense dans les débits d'air important.

4.3. Système d'éclairage

(Laser, fibre optique, miroir tournant, banc optique)

Le faisceau lumineux nécessaire à la création du plan de visualisation est fourni par un laser. Il est transmis par une fibre optique et ensuite acheminé vers un miroir tournant positionné sur un banc optique.

4.3.1. La source lumineuse

(Laser)

Il s'agit d'un laser à base d'argon dont la puissance de sortie peut atteindre 6 Watts en fonctionnement multiraies. Il fournit un faisceau dont le diamètre est de 1,4 nm. Le laser fonctionne en mode continu et dans un domaine spectral situé entre 450 nm et 520 nm dont les raies les plus importantes sont de 488 nm et 514 nm (nano mètres).

4.3.2. Fibre optique

Deux systèmes sont utilisés pour conduire le faisceau laser vers le miroir tournant.

Le premier comprend une fibre gainée d'une longueur de 15 m, couplée avec des lentilles aux extrémités et qui est destinée aux interventions in situ.

Le deuxième comprend une fibre non gainée d'une longueur de 10 m. Le couplage entre la fibre et les lentilles de focalisation s'effectue sur deux bancs optiques au niveau de réception et d'émission. Ce montage est destiné aux essais de laboratoire.

4.3.3. Miroir tournant

Il s'agit d'un ensemble de 12 miroirs tournants qui fournit un champ de 60°. La vitesse de rotation des miroirs étant réglable, on peut obtenir des temps de balayage (temps mis pour décrire 60°) compris entre 1 ms et 1 s.

Le miroir dévie seulement le faisceau sans modifier son allure, le faisceau gaussien conserve sa forme avec le même diamètre et la même divergence.

4.3.4. Banc optique

4.3.5. Prise de vue

Le système de prise de vue est composé de 3 caméras :

- Le caméscope (CCD)
- Caméra haute résolution (CCD)
Résolution 525 x 415 - éclairage minimum 0,07 lux.
- Caméra haute sensibilité (CCD)
Haute résolution.
Elle est équipée d'une part avec un intensificateur de lumière (éclairage minimum 5×10^{-5} lux) et d'autre part avec un dispositif d'obturation électronique permettant des temps d'exposition de 100 ns (nano secondes).

4.3.6. Sauvegarde d'image

Deux magnétoscopes professionnels 3/4 pouce permettent de sauvegarder les images analogiques fournies par les caméras, tout en conservant la définition des images.

4.3.7. Traitement d'image

Le système de traitement d'image comprend un micro ordinateur, une carte de numérisation du signal vidéo, un moniteur de haute résolution et un logiciel de traitement d'image.

- Micro ordinateur IBM PC : AT3
- Carte de numérisation : MATROX
Résolution 512 x 512 pixels.
- Moniteur couleur haute résolution

Ces trois éléments composant la partie HARD du système, permettent de convertir l'image analogique en image numérique. L'image numérique ainsi obtenue, fait l'objet de traitement au moyen du logiciel (SOFT).

Actuellement les possibilités de ce logiciel appliqué à la mécanique des fluides sont :

5. DETERMINATION DE LA VITESSE PAR MESURE DU DEPLACEMENT DES PARTICULES ENSEMENCANT LE JET (PIDV)

La méthode consiste à obtenir plusieurs images d'une même particule sur une image filmée. En pratique, on obture de 2 à 7 fois sur une image, pour obtenir de 2 à 7 fois la particule éclairée en permanence.

Nous avons travaillé sur les images brutes, et déterminé le déplacement de la particule considérée d'une façon identique à la mesure sur les fronts (étalonnage avec mire dimensionnelle). Champ affecté : 260 x 210 mm.

Résultats : voir tableau N° 1

Observations :

- La méthode PIDV fournit la vitesse moyenne et le taux de turbulence.
- Les résultats obtenus (vitesse moyenne, taux de turbulence) sont proches à ceux de l'anémométrie à fil chaud.

TABLEAU N° 1

Tableau des résultats

Comparaison des mesures de vitesse d'air obtenues par le banc DISA (anémométrie à fil chaud) et par la méthode PIDV (vélocimétrie par déplacement de particules).

Prise de vue : Caméra avec intensificateur de lumière et obturateur.

Particules : poussière ambiante.

Ecoulement : jet plan.

Plage de vitesse m.s ⁻¹	METHODE PIDV					Anémométrie à fil chaud	
	nombre de mesures par point	nombre ouverture caméra	vitesse moyenne m.s ⁻¹	écart type m.s ⁻¹	écart type vi. moyenne	vitesse moyenne m.s ⁻¹ (V)	intensité turbulenc = $\frac{V}{V}$
1	20	2	0,98	0,11	11,3	0,93	13
	20	3	0,96				
	20	4	1				
5	20	2	5,3	1,88	35,6	5,6	12,5
	20	3	4,79				
	20	4	5,28				
	20	5	5,29				
	12	7	5,25				
10	17	2	9,26	1,18	12,8	9,4	11,3
	20	3	9,3				
	20	4	9,16				
	19	5	8,5				
	20	7	9,83				

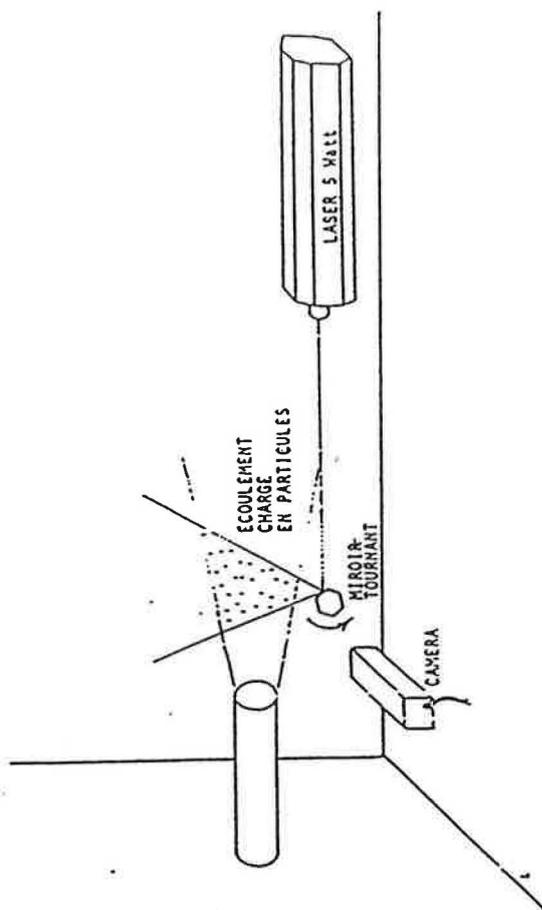
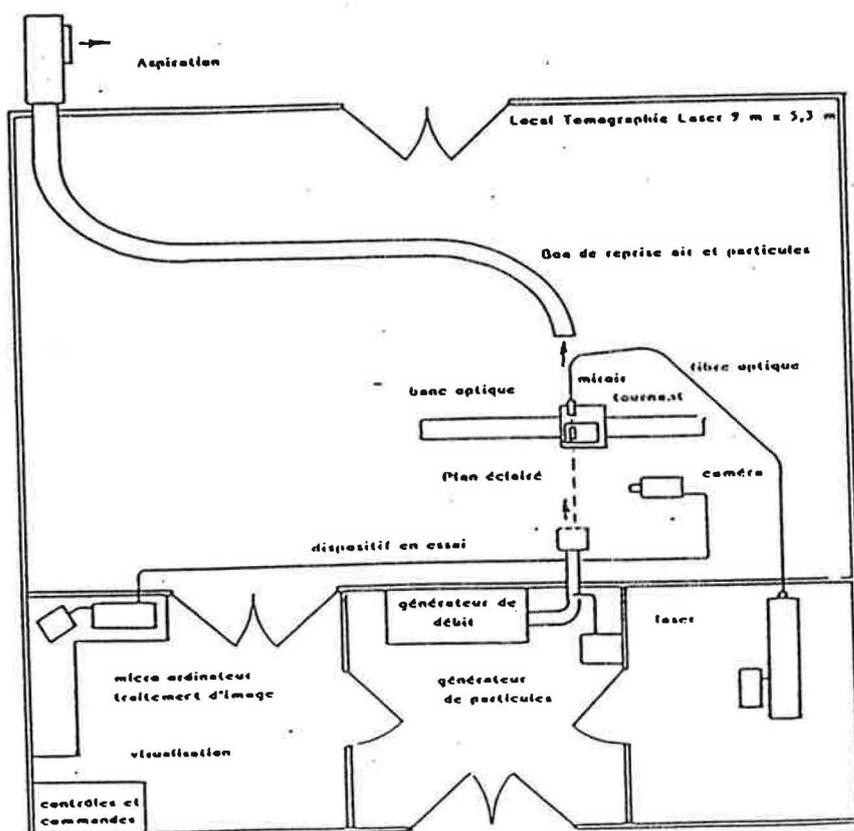


FIGURE 1
Principe de la tomographie laser



SCHEMA DE L'INSTALLATION
DE TOMOGRAPHIE LASER