



FR9710020

Production d'énergie (hydraulique, thermique et nucléaire)

LA VELOCIMETRIE PAR IMAGES DE PARTICULES.
PRINCIPES - PREMIERS RESULTATS

*PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY - PRINCIPLES AND
FIRST RESULTS*

97NB00054

29 - 08

D



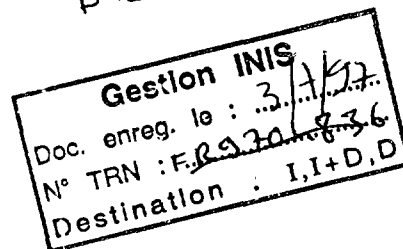
DIRECTION DES ÉTUDES ET
RECHERCHES

SERVICE RÉACTEURS NUCLÉAIRES ET ÉCHANGEURS
DÉPARTEMENT TRANSFERTS THERMIQUES ET
AÉRODYNAMIQUE



FR9710020

729710020



Juillet 1996

LAPORTA A.
MARECHAL J.P.

LA VELOCIMETRIE PAR IMAGES DE PARTICULES. PRINCIPES - PREMIERS RESULTATS

PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY - PRINCIPLES AND FIRST RESULTS

Pages : 29

97NB00054

Diffusion : J.-M. Lecœuvre
EDF-DER
Service IPN. Département PROVAL
1, avenue du Général-de-Gaulle
92141 Clamart Cedex

29 - 08

© EDF 1997

ISSN 1161-0611

SYNTHÈSE :

La Vélocimétrie par Images de Particules (ou PIV pour Particle Image Velocimetry) est une technique de mesure apparue à la fin de années 70, mais qui, depuis quelques années connaît un développement considérable. Le principe général de la PIV est très simple et permet d'accéder à des champs de vitesses instantanés. Il consiste à enregistrer des images de particules-traceurs introduites dans l'écoulement et à déterminer la distance parcourue par ces particules. Connaissant la durée séparant les images successives d'une même particule, on remonte à la vitesse locale du fluide.

Parmi les nombreuses méthodes existant pour acquérir et traiter les images, la technique d'analyse par intercorrélation d'images, associée à une source laser pulsée, est la plus performante. La connaissance de l'influence de différents paramètres (nombre de particules, puissance de la tranche lumineuse, durée entre deux images successives, taille des zones d'interrogation...) sur la qualité du résultat final, permet l'optimisation du réglage pratique d'une chaîne de mesure de PIV.

La PIV a été testée sur la maquette hydraulique LAVITA (maquette simulant le fonctionnement d'un ventilateur tangentiel). Les premiers résultats obtenus sont globalement très satisfaisants. Ils nous ont permis de dresser très rapidement des cartes de champs de vitesses, instantanés et moyens (l'obtention de 20 images nécessite un temps d'acquisition de moins de 90 secondes et un post-traitement d'une dizaine de minutes environ). L'observation des champs instantanés a permis de mettre en évidence la présence de phénomènes instationnaires à basses fréquences qui ne peuvent être dévoilés par la Vélocimétrie Laser Doppler (LDV). Des comparaisons quantitatives entre LDV et PIV, portant sur des champs moyens, ont montré que ceux-ci étaient proches, avec cependant des écarts qui, localement, pouvaient être relativement importants. Il faut tout de même noter que les mesures de PIV effectuées sur LAVITA n'ont pas été optimisées en vue d'obtenir partout une bonne précision. Nous avons préféré privilégier ici l'étendue du champ exploré, pour nous permettre d'observer les grosses structures instationnaires de l'écoulement.

La technique de mesure par PIV est donc opérationnelle et permet de caractériser rapidement des écoulements. Toutefois, pour conclure quant à la précision des mesures, des comparaisons ultérieures sont nécessaires. Celles-ci doivent d'abord être effectuées sur des configurations d'écoulements plus simples et permettre de tester les différents éléments des chaînes de mesure de PIV.

EXECUTIVE SUMMARY :

Particle Image Velocimetry (PIV) is a measurement technique elaborated towards the end of the '70s, but which has developed considerably in recent years. The general principle of PIV is very simple and enables access to instantaneous velocity fields. It consists in recording images of tracer-particles injected into the flow and determining the distance covered by these particles. Since we know the time lapse between successive images of the same particle, we can derive the local fluid velocity.

Among the many existing image acquisition and processing methods, the image intercorrelation analysis technique, used with a pulsed laser source, is the most effective. Since we know the influence of different parameters (number of particles, beam power, time lapse between two successive images, size of the query zones, etc.) on the quality of the final result, we can optimize practical adjustment of the PIV measurement scheme.

The PIV was tested on the LAVITA hydraulic mockup (simulating the operation of a tangential fan). First results are, all in all, highly satisfactory. These have enabled the rapid drafting of instantaneous mean velocity field maps (20 images acquired in less than 90 seconds, with a post-processing time of about 10 minutes). Observation of the instantaneous fields has evidenced the presence of low frequency non-stationary phenomena which are not revealed by Laser Doppler Velocimetry (LDV). Quantitative comparison between LDV and PIV, concerning average fields, showed close results, with, however, local divergences which could be relatively marked. It must nevertheless be noted that the PIV measurements performed on LAVITA have not been optimized with a view to obtaining a consistently good accuracy level. Priority in the present case was given to the scope of the field explored, with a view to observing the large non-stationary structures within a flow.

The PIV measurement technique is thus operational for prompt flow characterization. However, as to conclusions on the accuracy of the measurements, further comparisons will be required. These would be obtained, to begin with, on simpler flow configurations, aimed at testing the different elements of the PIV measurement scheme.

SOMMAIRE

0) INTRODUCTION.....	p. 4
1) LA PIV: PRINCIPES DE BASES.....	p. 5
1-1) L'acquisition.....	p. 5
1-2) L'analyse des images.....	p. 6
1-2-1) L'autocorrélation.....	p. 7
1-2-2) L'intercorrélation.....	p. 9
2) PARAMETRES DE REGLAGE EN PIV.....	p.10
2-1) Mesure du champ de vitesses.....	p.10
2-1-1) L'ensemencement.....	p.10
2-1-2) Taille des zones d'interrogation.....	p.11
2-1-3) Temps d'exposition.....	p.11
2-1-4) Durée entre deux impulsions laser.....	p.12
2-1-5) Précision sur la vitesse.....	p.12
2-2) Les procédures de validation.....	p.14
2-2-1) Les critères de validation.....	p.14
2-2-2) L'interpolation.....	p.15
3) CHAMPS DE VITESSES OBTENUS SUR LA MAQUETTE 'LAVITA'.....	p.15
3-1) Système de mesure par PIV utilisé.....	p.17
3-2) Mesures des champs de vitesses.....	p.17
3-2-1) Champs instantanés.....	p.18
3-2-1-1) Influence de la durée de séparation.....	p.18
3-2-1-2) Influence de la taille de la zone de corrélation.....	p.20
3-2-1-3) Influence des critères de validation.....	p.21
3-2-2) Champs moyennés, comparaison avec la LDV.....	p.23
4) CONCLUSION.....	p.27
BIBLIOGRAPHIE.....	p.28

LA VELOCIMETRIE PAR IMAGES DE PARTICULES

0) INTRODUCTION

La Vélocimétrie par Images de Particules (ou PIV pour Particle Image Velocimetry) est une technique de mesure apparue à la fin des années 70. Le principe général de la PIV est très simple et permet d'accéder à des champs de vitesses instantanés. Il consiste à enregistrer des images de particules-traceurs introduites dans l'écoulement, éclairées par une fine tranche de lumière à des instants successifs, et à déterminer la distance parcourue par ces particules. Connaissant la durée séparant les images successives d'une même particule, on remonte à la projection de la vitesse locale du fluide dans le plan créé par la tranche lumineuse. Bien que les bases de la PIV soient connues depuis maintenant bientôt une vingtaine d'années, elle ne connaît un réel essor que depuis peu. Ceci est lié d'une part aux progrès constants de l'informatique et à l'arrivée sur le marché de caméras CCD spécifiques, à haute résolution, qui permettent de traiter les images de particules quasiment en temps réel, et d'autre part aux besoins des laboratoires et des industriels souhaitant connaître rapidement l'ensemble d'un champ de vitesses.

Il existe différentes méthodes pour acquérir et traiter les images. Nous en ferons une présentation rapide en essayant de mettre en évidence les avantages et les inconvénients de chacune d'entre elles. Il apparaîtra à la suite de cette analyse que le traitement des images par intercorrélation est à privilégier (meilleure dynamique, meilleure résolution, meilleur rapport signal sur bruit). Cette analyse nous permettra également de dégager les paramètres essentiels influant sur la qualité du résultat final (nombre de particules, puissance de la tranche lumineuse, durée entre deux images successives, taille des zones d'interrogation...). Soulignons ici que le réglage pratique d'une chaîne de mesure par PIV s'appuie en grande partie sur une bonne maîtrise de ces paramètres.

Nous présenterons ensuite les différents éléments constituant la chaîne de mesure de PIV dont s'est équipé le département TTA. Ce système a été implanté et testé sur la maquette hydraulique LAVITA (maquette de simulation d'un ventilateur tangentiel). Les résultats obtenus seront présentés ainsi qu'une première comparaison avec des mesures de Vélocimétrie Laser Doppler.

Ce document ne prétend pas faire une présentation exhaustive du sujet. Le lecteur intéressé par de plus amples détails pourra se référer avec profit aux nombreux articles spécialisés traitant du sujet, dont une sélection est proposée en fin du présent rapport.

1) LA PIV: PRINCIPES DE BASES

La mesure par PIV consiste à enregistrer des images successives de particules-traceurs éclairés par une tranche de lumière à deux instants successifs, t_1 et $t_1 + \Delta t$, et à évaluer leur déplacement pour ensuite en déduire leur vitesse. La mesure se décompose donc en deux étapes principales:

- l'acquisition (génération d'un plan lumineux et l'enregistrement des images)
- l'analyse des images obtenues

1-1) L'acquisition

Pour obtenir des images des particules, nous devons créer un plan lumineux dans l'écoulement. Les particules traversant ce plan diffuseront la lumière et pourront être enregistrées par un appareil photographique ou une caméra (voir figure 1). La caméra est placée perpendiculairement à la tranche lumineuse. A priori n'importe quelle source de lumière peut convenir, mais rapidement les sources laser ont été privilégiées, à cause, d'une part, de leur puissance et parce que, d'autre part, elles permettent de mieux maîtriser les caractéristiques du plan lumineux, en particulier sa divergence. La puissance du laser est choisie en fonction de l'étendue du plan lumineux, de la taille des particules présentes dans l'écoulement (l'intensité diffusée par les particules est proportionnelle au carré de leur diamètre), du temps d'exposition¹. Pour des écoulements en eau et de très faibles vitesses, les particulesensemencées peuvent être relativement grosses (jusqu'à quelques centaines de microns) et l'utilisation d'un laser continu classique, délivrant quelques watts, peut s'avérer suffisant. Mais hors de ce cas spécifique, il apparaît nécessaire de disposer de sources beaucoup plus puissantes. Celles-ci sont actuellement constituées de lasers pulsés pouvant délivrer jusqu'à plusieurs dizaines de mégawatts (sur une durée de quelques nanosecondes).

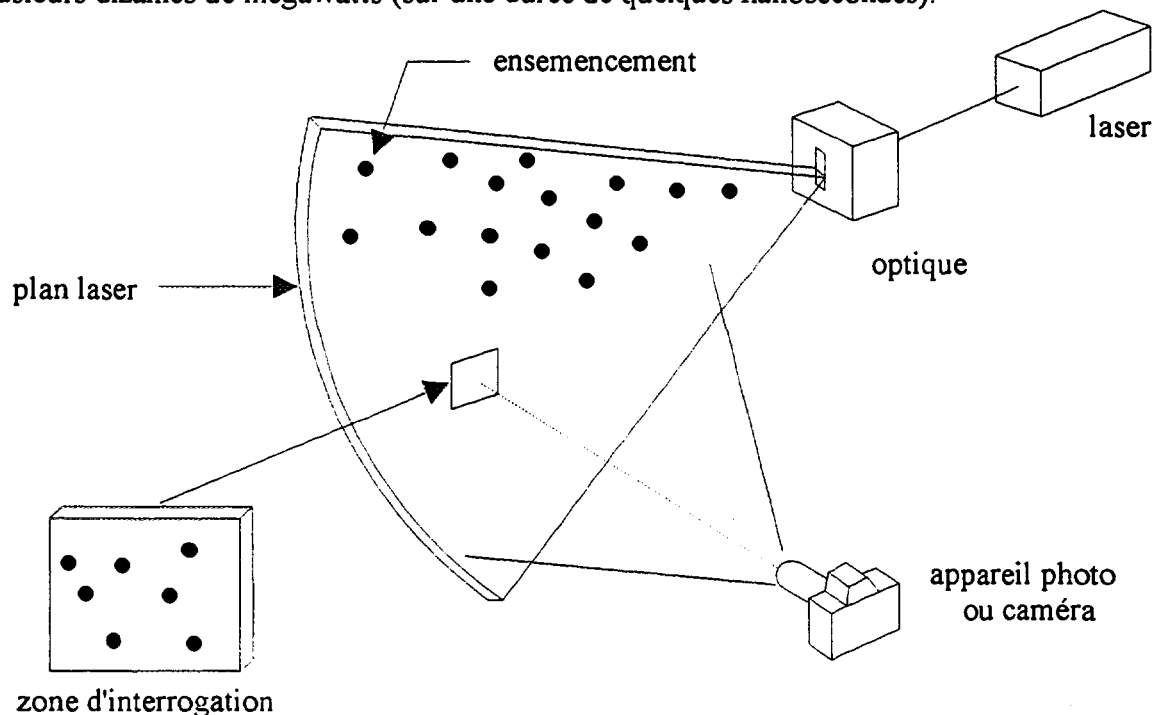


figure 1

¹ Plus la vitesse de l'écoulement est importante, plus le temps d'exposition est faible.

Les images des particules à différents instants peuvent soit être enregistrées sur un même support, soit sur des support différents: dans le premier cas, l'enregistrement sera analysé par **autocorrélation**; dans le second, on aura recours à l'**intercorrrelation**. Typiquement le Δt séparant deux images d'une même particule varie de quelques microsecondes à quelques millisecondes. Pour être utilisée, l'intercorrrelation doit donc obligatoirement être associée à une caméra spéciale permettant de sauvegarder rapidement deux enregistrements. De telles caméras ne sont réellement disponibles que depuis quelques années. Les premiers travaux de PIV ont donc essentiellement portés sur l'autocorrélation.

1-2) L'analyse des images

1-2-1) L'autocorrélation

Les particules sont éclairées à deux instants successifs (ou plus) et enregistrées sur le même support. Ce dernier sera décomposé en petites zones, appelées zones d'interrogations² (voir figure 1) et analysé. On évaluera pour chaque zone d'interrogation la vitesse moyenne des particules présentes. Typiquement, une zone d'interrogation se présente sous la forme suivante:

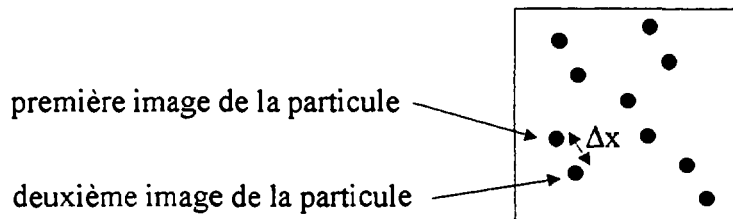


figure 2

Le schéma de la figure 2 correspond à une double exposition de $N=5$ particules. A partir de cet enregistrement, on peut évaluer le déplacement Δx de la particule, mais on ne peut pas en distinguer le sens. En pratique, l'analyse de l'image de la figure 2, caractérisée par une répartition d'intensité $I(x,y)$ est effectuée par autocorrélation. La fonction d'autocorrélation, $AC(x,y)$ est définie par:

$$AC(x,y) = \iint I(u,v) I(u+x,v+y) du dv = I(-x,-y) * I(x,y)$$

où * représente le produit de convolution. La fonction d'autocorrélation peut être facilement évaluée dans l'espace de Fourier. On obtient alors la formule:

$$AC(x,y) = TF^{-1} \left[|TF(I)|^2 \right]$$

² Cette zone d'interrogation définit un volume dont la troisième dimension est donnée par l'épaisseur de la tranche laser.

Cette transformation de Fourier était d'abord réalisée optiquement en faisant diffracter un faisceau laser à travers la zone d'interrogation³. Depuis l'avènement de processeurs de plus en plus rapides, celle-ci est effectuée informatiquement. L'allure typique de la fonction d'autocorrélation est présentée sur la figure qui suit:

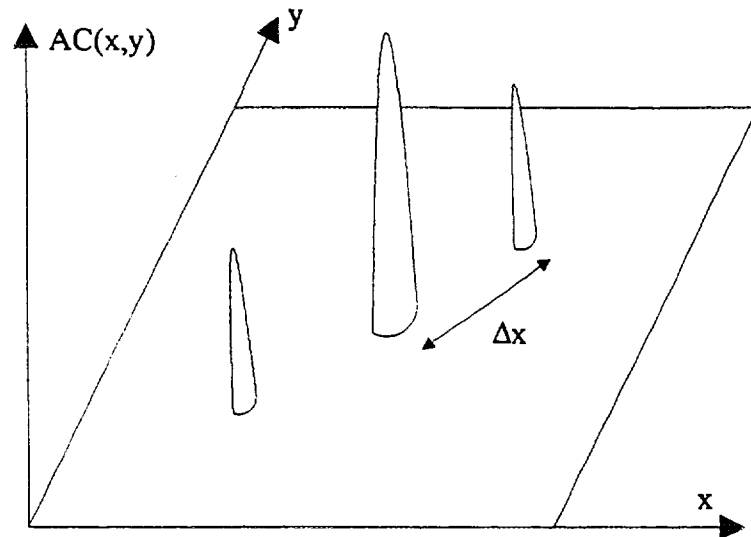


figure 3

Le pic principal correspond à la superposition de l'image avec elle-même. C'est le plus important puisque dans ce cas les $2N$ images de particules se superposent. La hauteur de ce pic est donc proportionnelle à $2N$. Les pics secondaires correspondent aux signaux engendrés par la superposition des images décalées respectivement de Δx et $-\Delta x$. Ils sont deux fois moins importants que le pic principal, car alors seules N images de particules se superposent (figure 4).

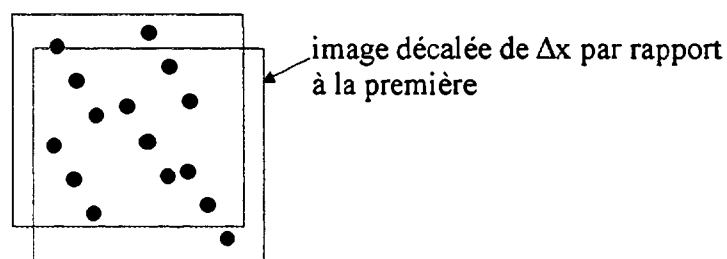


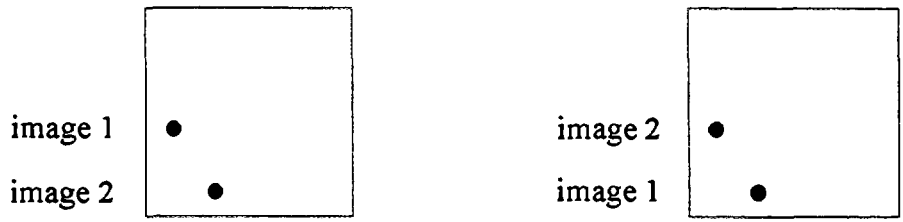
figure 4

En toute rigueur, il faudrait également représenter sur la figure 3 les nombreux petits pics correspondant à tous les appariements aléatoires possibles des images de particules, et

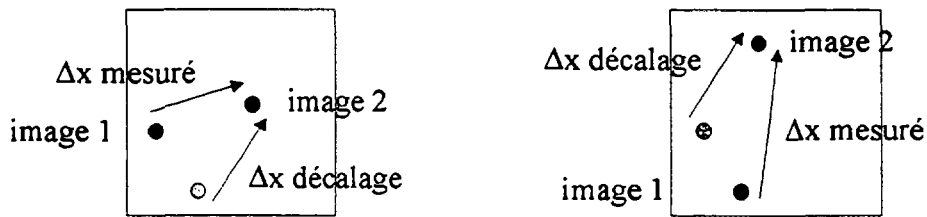
³ En fait, pour être plus précis, on visualisait ainsi la fonction $|TF(I)|^2$. La figure de diffraction obtenue se présentait alors sous forme de franges de Young. La direction du vecteur déplacement moyen des particules était donnée par la perpendiculaire à la direction des franges, et sa norme par la distance interfrange.

responsables d'un bruit de fond. Ce bruit de fond sera proportionnel au nombre d'images de particules au carré, ici $4N^2$ (ce bruit est constitué de N^2 pics de hauteur 2 et $2N^2$ pics de hauteur 1).

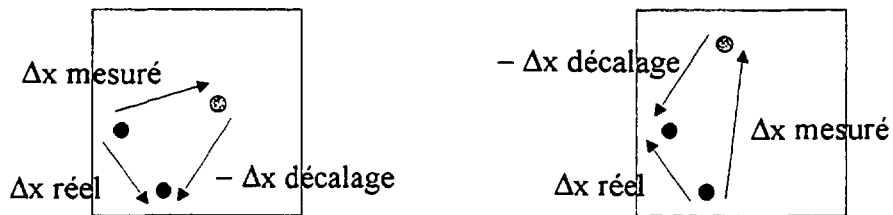
L'inconvénient de l'autocorrélation est qu'elle ne permet pas de remonter au sens de l'écoulement. De plus les trop faibles vitesses ne pourront pas être évaluées non plus puisque dans ce cas les pics secondaires seront noyés dans le pic central. Pour contourner ces deux problèmes, on décale artificiellement la deuxième image d'une distance fixe majorant la norme du plus grand déplacement attendu. Le nouveau déplacement sera alors suffisamment important pour que le pic central et le pic de déplacement soient distincts et, de plus, le vecteur vitesse associé sera toujours dirigé vers une zone précise de l'image (voir principe sur la figure 5). Ce décalage peut être réalisé mécaniquement à l'aide d'un miroir tournant placé devant l'objectif de la caméra, ou électroniquement en décalant les pixels de l'image avant la survenue du second flash.



Sans décalage d'image, ces deux configurations ne peuvent être distinguées



Un décalage est introduit pour que le déplacement mesuré soit toujours dirigé vers la partie supérieure droite de l'image



Connaissant sans ambiguïté Δx mesuré, on peut remonter à Δx réel

figure 5

1-2-2) L'intercorrélation

Pour l'intercorrélation, les images des particules sont enregistrées sur deux supports différents:

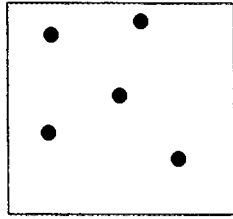


image des particules à l'instant t_1

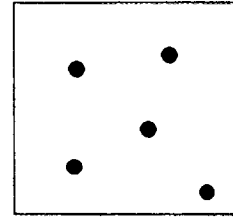


image des particules à l'instant $t_1 + \Delta t$

figure 6

Si l'on note I_1 la première image et I_2 la seconde, la fonction d'intercorrélation $IC(x,y)$ est définie par:

$$IC(x,y) = \iint I_1(u,v) I_2(u+x,v+y) du dv = I_1(-x,-y)^* I_2(x,y)$$

Dans l'espace de Fourier, on obtient:

$$IC(x,y) = TF^{-1} \left[\overline{TF(I_1)} TF(I_2) \right]$$

Le symbole $\overline{\quad}$ désigne le complexe conjugué. La fonction d'intercorrélation se caractérise par la présence d'un seul pic correspondant à la superposition de l'image 1 sur l'image 2 pour un déplacement Δx (figure 7). On se rend compte ici immédiatement des avantages de l'intercorrélation sur l'autocorrélation:

- présence d'un seul pic (de hauteur N) permettant de déterminer directement la direction et le sens du vecteur vitesse
- pas de pic central: la détermination de vitesses quasiment nulles ne pose plus de problème
- le bruit n'étant plus généré que par N images de particules, il devient proportionnel à N^2 (N^2 pics de hauteur 1). Le rapport signal sur bruit devient au moins deux fois meilleur que celui obtenu lors de l'autocorrélation
- la dynamique de la vitesse est deux fois plus importante que dans le cas de l'autocorrélation (la nécessité d'introduire un décalage fictif conduit en effet à mesurer des vitesses maximales deux fois plus élevées que les vitesses maximales réelles).

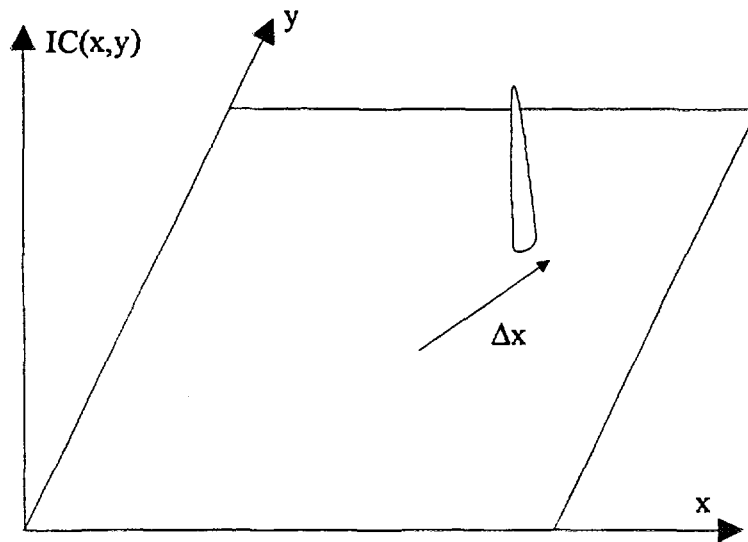


figure 7

Tous ces avantages font que les utilisateurs de systèmes de PIV se tournent de plus en plus vers l'intercorrélation et que des matériels spécifiques à l'intercorrélation de plus en plus performants sont développés.

2) PARAMETRES DE REGLAGE EN PIV

2-1) Mesure du champ de vitesses

La qualité d'une mesure en PIV dépend en grande partie de la qualité des images que l'on obtient. Nous allons donc ici mettre en évidence les paramètres influant sur la qualité de ces images et proposer les règles à respecter si l'on veut obtenir des résultats corrects. Ces différents paramètres seront présentés successivement, mais il faut garder à l'esprit qu'ils ne pourront être optimisés de manière indépendante. Le jeu de paramètres idéal résultera d'un compromis entre des contraintes opposées qu'il n'est pas toujours facile de trouver. Cependant l'expérience montre qu'il est relativement aisé d'obtenir des résultats corrects, même si le jeu de paramètres choisi s'éloigne sensiblement du jeu idéal. Ce dernier point constitue un des avantages de la PIV.

2-1-1) L'ensemencement

La taille des particules introduites doit être assez petite pour qu'elles puissent suivre les fluctuations de vitesse de l'écoulement, mais en même temps, elles doivent diffuser suffisamment de lumière. L'utilisation de lasers pulsés permet grâce à leur puissance une assez grande marge de manoeuvre, et ce point ne pose généralement pas de problèmes.

La densité de l'ensemencement doit être calculée pour que chaque zone d'interrogation contienne un nombre suffisant de particules, et ce pour obtenir une bonne statistique et permettre au pic de déplacement d'émerger de manière nette du bruit. Typiquement, chaque zone d'interrogation doit contenir au moins une quinzaine de particules. Il existe néanmoins une valeur limite de densité des particules, C_L , au dessus de laquelle les performances chutent. Cette valeur limite correspond au chevauchement des images des différentes particules⁴.

2-1-2) Taille des zones d'interrogation

La taille des zones d'interrogation doit être choisie de telle sorte que la vitesse de l'écoulement y soit pratiquement constante. Une non uniformité de cette vitesse⁵ conduit à un élargissement du pic de déplacement et à une réduction de sa hauteur. Le rapport signal sur bruit se dégrade alors et la probabilité de détecter un pic erroné croît (figure 8).

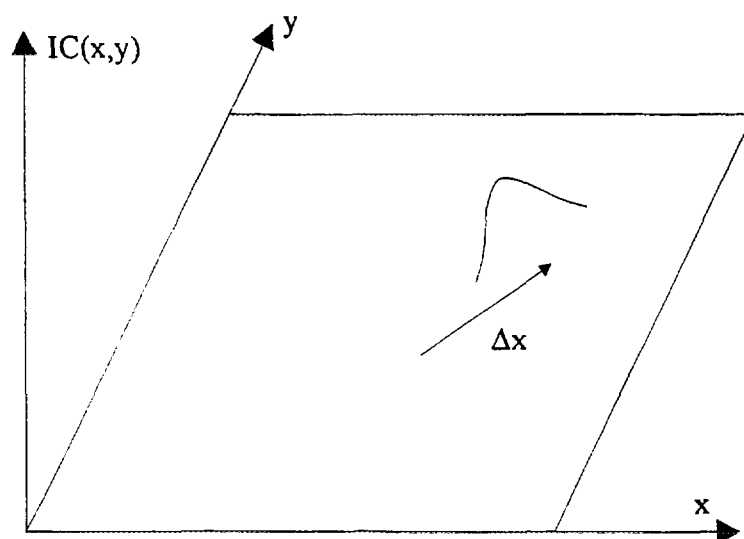


figure 8

2-1-3) Temps d'exposition

Le temps d'exposition des particules (égal à la durée d'une impulsion laser) doit être suffisamment faible pour que le mouvement de la particule puisse être considéré comme gelé. On peut s'imposer un déplacement maximal pendant l'exposition égal au dixième de son diamètre.

Pour un Nd-Yag, la durée de l'impulsion vaut 4 ns. Une particule animée d'une vitesse de 100 m/s se déplacera alors de 0.4 μm , ce qui permet l'utilisation de particules microniques.

⁴ L'existence d'une valeur limite de densité peut également s'expliquer si l'on observe que l'intensité du signal correspondant au pic de déplacement est proportionnelle à N tandis que le bruit de fond est proportionnel à N^2 . Notons que la valeur de C_L est plus importante dans le cas de l'intercorrélation que dans celui de l'autocorrélation.

⁵ Cette non uniformité peut être due aux fluctuations turbulentes ou à la présence d'un gradient de vitesse moyenne.

2-1-4) Durée entre deux impulsions laser

La durée Δt séparant deux impulsions laser sera estimée à partir du déplacement maximal que l'on autorise pour une particule. Si ce déplacement est trop important un grand nombre de particules, présentes lors de la première impulsion, ne seront plus dans la zone d'interrogation lors de la deuxième impulsion (ou vice-versa) (voir figure 9: sur la figure, le schéma correspond à un champ de vitesse bidimensionnel). Le nombre de couples de particules responsables du pic de déplacement diminuera en conséquence, dégradant le rapport signal sur bruit. On limite donc le déplacement maximal au quart environ de la taille de la zone d'interrogation, et ce suivant les trois directions. On doit donc avoir, dans le plan du laser:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x_{\max}}{u_{\max}} \quad \text{avec} \quad \Delta x_{\max} = \frac{L_{\text{int}}}{4}$$

où u_{\max} est la vitesse maximale du champ de vitesse dans ce plan et L_{int} est la taille de la zone d'interrogation, et

$$\Delta t \leq \frac{\Delta z_{\max}}{w_{\max}} \quad \text{avec} \quad \Delta z_{\max} = \frac{e}{4}$$

où e est l'épaisseur de la tranche laser et w_{\max} est la vitesse maximale suivant la normale au plan laser. L'épaisseur de la tranche laser étant de l'ordre de quelques millimètres (alors que L_{int} atteint souvent le centimètre), cette deuxième condition est largement plus contraignante que la première lorsqu'on s'intéresse aux écoulements fortement tridimensionnels.

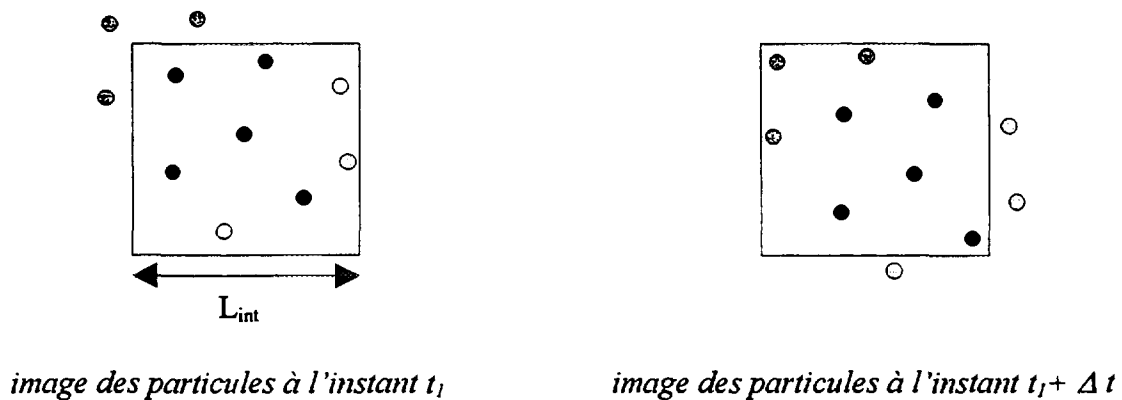


figure 9

2-1-5) Précision sur la vitesse

La vitesse est obtenue en estimant le déplacement Δx des particules et en le divisant par la durée séparant deux impulsions, soit Δt :

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

La précision de mesure est alors donnée par:

$$\frac{\delta_u}{u} = \frac{\delta_{\Delta x}}{\Delta x} + \frac{\delta_{\Delta t}}{\Delta t}$$

ou, en remarquant que $\Delta x_{\max} = u_{\max} \Delta t$:

$$\frac{\delta_u}{u_{\max}} = \frac{\delta_{\Delta x}}{\Delta x_{\max}} + \frac{u \delta_{\Delta t}}{\Delta x_{\max}}$$

δ_u , $\delta_{\Delta x}$, $\delta_{\Delta t}$ représentent les incertitudes de mesures sur la vitesse, le déplacement des particules et l'écart entre les impulsions laser. Δt étant déterminé avec une précision meilleure que le pour-cent, la principale source d'incertitude provient de l'estimation de Δx et dépend de la précision avec laquelle on peut localiser le centre d'une image de particule. De nombreux paramètres interviennent, parmi lesquels on peut citer la taille de l'image de la particule, sa forme, la résolution de l'optique employée ainsi que celle des supports d'enregistrement, les algorithmes utilisés...

Le diamètre de l'image de la particule est donné approximativement par la formule:

$$d = (M^2 d_p^2 + d_d^2 + d_r^2)^{1/2}$$

où M est le grandissement du système optique, d_p le diamètre de la particule-traceur, d_r est la résolution du support d'enregistrement et d_d le diamètre minimal dû à la diffraction. d_r est déterminé par le grain dans le cas d'une plaque photographique et par la taille d'un pixel pour une caméra CCD. d_d est donné par:

$$d_d = 2.44 (1 + M) NO \lambda$$

NO est le nombre d'ouverture de l'objectif de l'appareil photographique (ou de la caméra), λ la longueur d'onde du faisceau laser.

L'influence de la forme de la particule et celle des algorithmes de détermination des centres de particules peuvent être modélisées par l'intermédiaire d'une constante c , qui intervient dans la détermination de $\delta_{\Delta x}$:

$$\delta_{\Delta x} = c d$$

Si les particules sont sphériques, c peut être très faible (le déplacement de l'image de la particule peut être déterminée à une fraction de pixel près)⁶. On évalue finalement l'incertitude sur les vitesses par la relation:

⁶ Un des algorithmes les plus couramment utilisés par les systèmes de PIV, pour améliorer la précision d'une mesure et obtenir des incertitudes finales inférieures au pixel, consiste à effectuer une interpolation du pic de corrélation.

$$\frac{\delta_u}{u_{\max}} = c \frac{d}{\Delta x_{\max}}$$

L'incertitude obtenue ne dépend pas de la norme de la vitesse. Si la dynamique du champ est importante ($\frac{u_{\max}}{u_{\min}}$ grand), une bonne précision sur les plus basses vitesses nécessitera des incertitudes pleine échelle $\frac{\delta_u}{u_{\max}}$ très faibles.

2-2) Les procédures de validation

Dans les mesures de PIV, le vecteur vitesse est obtenu en déterminant le pic maximal de la fonction d'intercorrélation ou d'autocorrélation (dans ce dernier cas, le pic central est ignoré). Cependant, le bruit peut affecter la position de ce pic. On peut distinguer deux types d'influence du bruit. Le premier affecte la précision avec laquelle on détermine la position du pic et se traduira par un bruit additif sur les vecteurs de vitesse. Ce bruit peut par exemple être d'origine électronique ou optique. On peut le considérer avec une bonne précision comme étant gaussien, et le traiter efficacement. Le second type de bruit donne un faux pic qui peut s'avérer être plus intense que le vrai pic de corrélation. On obtient dans ce cas un vecteur "hors champ". La distribution aléatoire des particules dans l'écoulement (paragraphe 1-2) joue un rôle prépondérant dans l'origine de ce second type de bruit. Si le nombre de particules dans une zone d'interrogation est insuffisant, le pic de bruit peut dépasser le pic de corrélation et conduit souvent à une fausse détection. On peut également citer l'influence néfaste des réflexions parasites, sur des parois, par exemple.

L'obtention de vecteurs erronés est inévitable. Il faut essayer de diminuer au maximum la probabilité d'en obtenir en choisissant le jeu de paramètres le plus adéquat (voir paragraphe précédent). Les faux vecteurs restants doivent ensuite être détectés et corrigés.

2-2-1) Les critères de validation

Le premier critère de validation repose sur la valeur de la détectabilité du pic de corrélation, D , définie comme le rapport de l'amplitude maximale du pic de corrélation et de l'amplitude maximale du bruit. Le vecteur est validé si la valeur de D est supérieur à un D_{seuil} . Plus D_{seuil} est élevé, plus le nombre de vecteurs erronés éliminé est important. Mais on risque également d'éliminer un certain nombre de vecteurs corrects. Ce critère permet d'éliminer, en général, 40 à 60% des vecteurs erronés. Il doit donc être complété par une autre procédure de validation. Cette deuxième procédure est basée sur la continuité du champ de vecteurs. A chaque vecteur, on associe un vecteur calculé à partir de ces voisins immédiats (3x3 voisins ou même 5x5 voisins). Ce vecteur peut correspondre à la moyenne de ces voisins ou encore être obtenu par interpolation linéaire, en s'appuyant sur la méthode des moindres carrés. Les vecteurs hors champ sont détectés en comparant les vecteurs mesurés aux vecteurs calculés. Ils seront éliminés si un critère d'acceptation tel que le suivant:

$$\|u_{\text{calculé}} - u_{\text{mesuré}}\| \leq \alpha \|u_{\text{mesuré}}\|$$

n'est pas respecté. α est le facteur d'acceptance. Il est généralement situé dans la gamme 0.01-0.1.

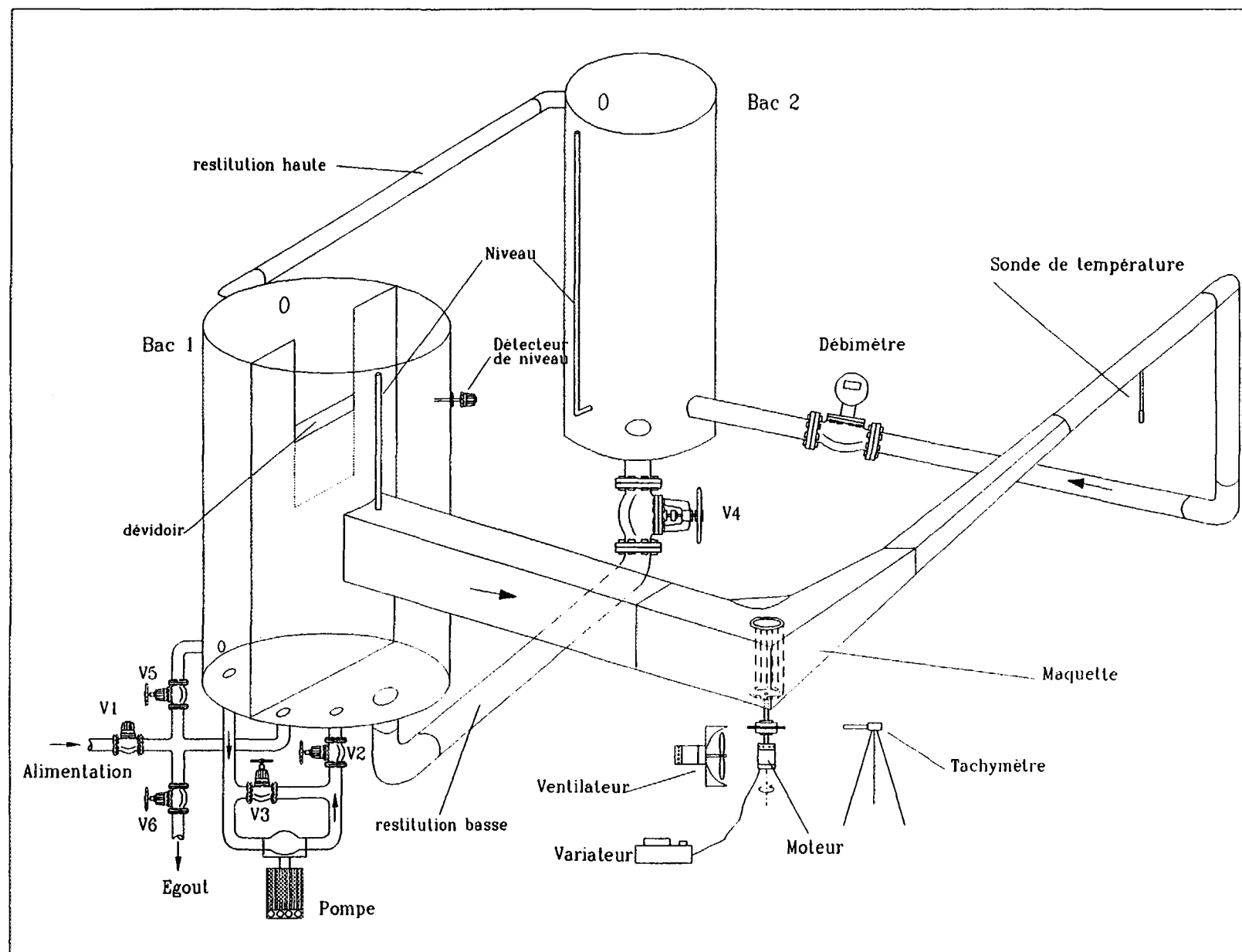
2-2-2) L'interpolation

Les vecteurs, éliminés par les divers critères de validation énumérés ci-dessus, doivent être remplacés, afin d'obtenir un champ complet. Ce champ complété nous permettra alors d'extraire des informations supplémentaires de l'écoulement telles que la vorticité, ou un champ de vitesses moyennes...

Le champ est interpolé en s'aidant des vecteurs existants et en supposant, comme dans le cas de la validation, que celui-ci est régulier. On peut s'appuyer à nouveau sur la moyenne des vecteurs avoisinants, effectuer une interpolation linéaire ou utiliser toute autre méthode. Aucune méthode ne s'avère vraiment plus efficace qu'une autre et, de plus, leur efficacité relative varie d'un écoulement à un autre. Mais de manière générale, les résultats obtenus sont très satisfaisants.

3) CHAMPS DE VITESSES OBTENUS SUR LA MAQUETTE 'LAVITA'

L'installation LAVITA (LAsEr VISualisation TAngentiel) est destinée à caractériser l'écoulement à travers la roue d'un ventilateur tangentiel. Le fluide de simulation utilisé est de l'eau de ville (voir schéma de principe ci-dessous).



Les résultats expérimentaux serviront à qualifier le code de mécanique des fluides N3S. L'objectif, à moyen terme, est d'utiliser cet outil de simulation numérique pour faciliter les études d'optimisation géométrique du ventilateur.

Plusieurs campagnes de LDV (Laser Doppler Velocimetry) ont été réalisées sur la maquette. Les cartographies de vitesses moyennes qui ont été dressées serviront de base à une première évaluation des performances de la PIV.

Il est important de souligner que la LDV et la PIV ne sont pas des techniques de mesures concurrentes. Elles permettent au contraire d'accéder à des informations complémentaires (informations statistiques locales pour la LDV, informations instantanées globales pour la PIV). Des comparaisons entre LDV et PIV pourront cependant être menées et porteront sur la vitesse moyenne. Le champ de vitesse moyenne sera obtenu en PIV en moyennant plusieurs images instantanées.

3-1) Système de mesure par PIV utilisé

Le département TTA s'est équipé d'un système de vélocimétrie par images de particules qui permet d'évaluer le champ de vitesses d'un écoulement par intercorrélation d'images.

Ce système comporte:

- une source laser constituée de deux lasers Nd-YAG pulsés couplés: longueur d'onde 532 nm; fréquence des impulsions pour un laser 10 Hz, énergie délivrée par impulsion 160 mJ; durée de l'impulsion 4 ns - classe 4; alimentation électrique 220 V monophasé - 10 A; refroidissement par circuit d'eau fermé
- un bras articulé servant à guider les faisceaux laser, associé à une optique de mise en forme de la nappe laser
- une caméra video CCD spéciale intercorrélation: vitesse 15 images par seconde, résolution 1024x1024 pixels, délai minimal entre deux images 5 μ s. Lentille macro zoom
- un PC processeur Pentium 133 MHz, 32 MO RAM, disque dur 1.51 GO
- une carte d'acquisition video pour bus PCI
- un processeur vectoriel de 50 MFLOP
- une électronique de synchronisation des différents éléments du système PIV

3-2) Mesures des champs de vitesses

Les mesures ont été effectuées dans un champ perpendiculaire à l'axe de la roue du ventilateur tangentiel (voir schéma ci-dessous):

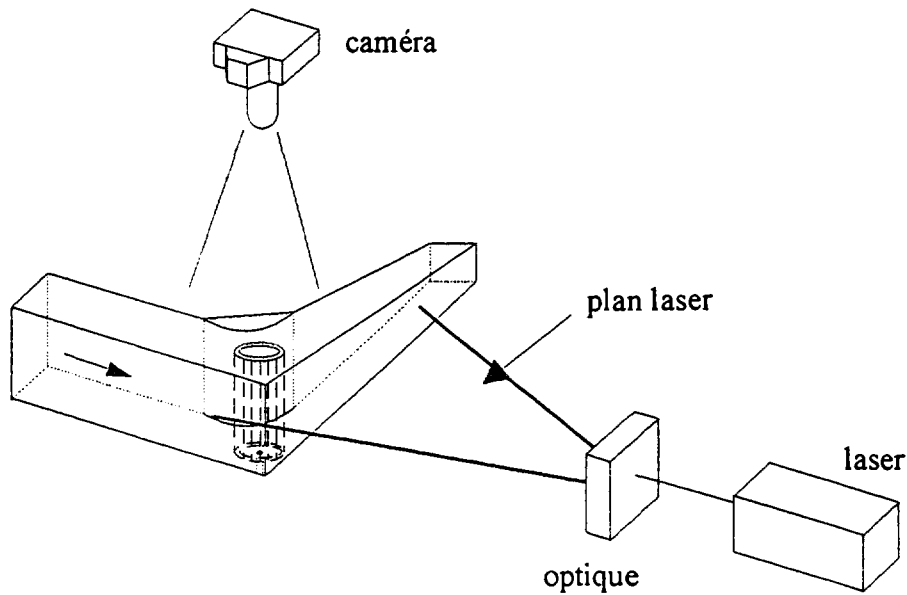


figure 10

L'écoulement estensemencé de particules sphériques, en polystyrène, d'un diamètre de 300 μm . Le plan est situé à une distance de 60mm de la paroi supérieure de la maquette. Plusieurs séries de mesures ont été prises en faisant varier deux des paramètres les plus importants que sont la durée de séparation des impulsions laser et la taille de la zone de corrélation. On a également tenté d'évaluer l'influence des critères de validation.

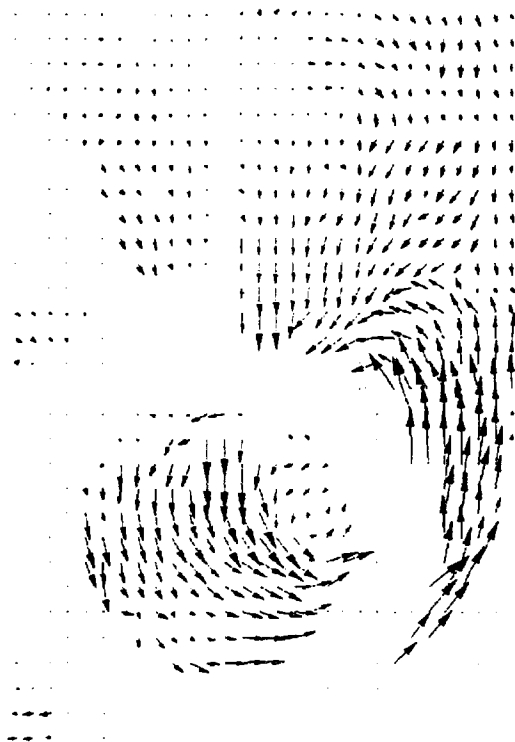
3-2-1) Champs instantanés

3-2-1-1) Influence de la durée de séparation

Les figures 11 à 13 représentent les champs de vecteurs bruts obtenus pour des Δt variant de 0.5 ms à 3 ms. La taille des zones de corrélation a été fixée à 64 pixels, ce qui, au niveau de l'écoulement, définit des aires de 9.6 mm de côté.

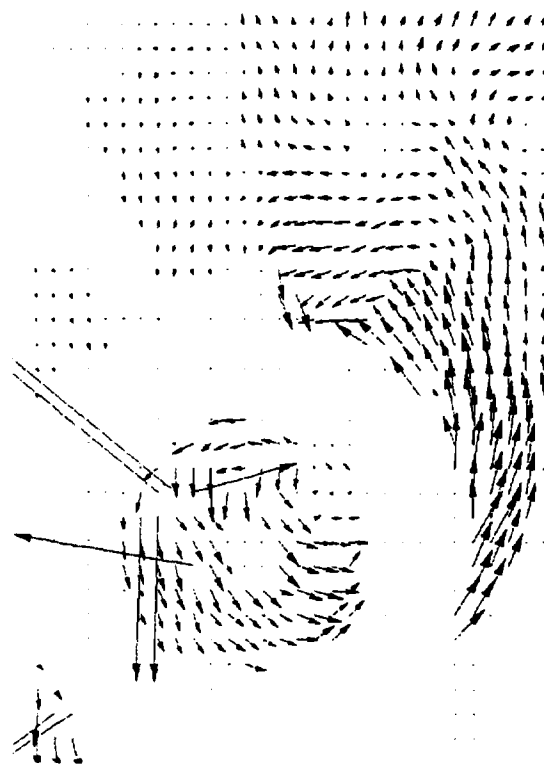
Le nombre de vecteurs hors champ croît avec la durée de séparation des impulsions laser. Ce phénomène affecte surtout une zone située à environ 50 cm à l'aval de la roue, qui se caractérise par la formation vraisemblable d'un tourbillon tridimensionnel de forte intensité. On peut estimer l'ordre de grandeur des vitesses de l'écoulement à 50 cm/s. En 3 ms, une particule se déplace alors de 1.5 mm. Cette distance est proche de l'épaisseur du plan laser (2 à 3 mm). Un nombre important de particules quittent donc la zone de corrélation entraînant une forte dégradation du rapport signal sur bruit (figure 13).

De très faibles écarts de temps entre deux impulsions permettent d'obtenir des champs propres (figure 11), mais ceci se fait au détriment de la précision. D'où la nécessité d'un compromis. Nous choisirons pour les mesures ultérieures un Δt égal à 1.5 ms (figure 2).



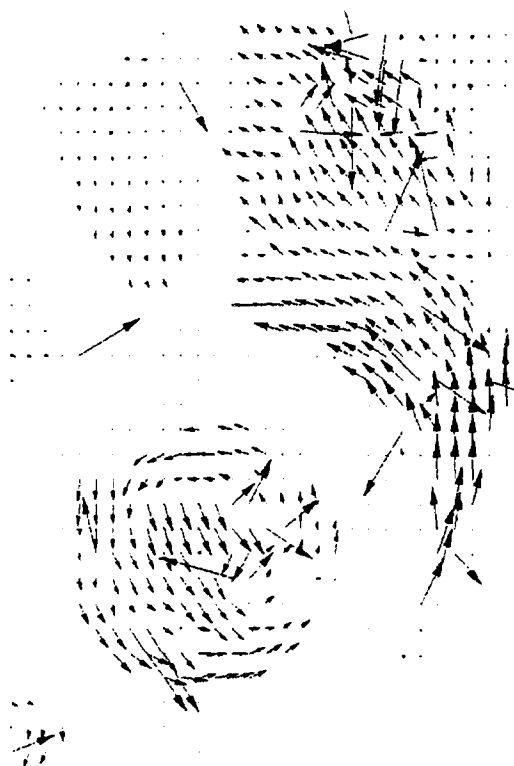
$\Delta t = 0.5$ ms, 64x64, vecteurs bruts

figure 11



$\Delta t = 1.5$ ms, 64x64, vecteurs bruts

figure 12



$\Delta t = 3$ ms, 64x64, vecteurs bruts

figure 13

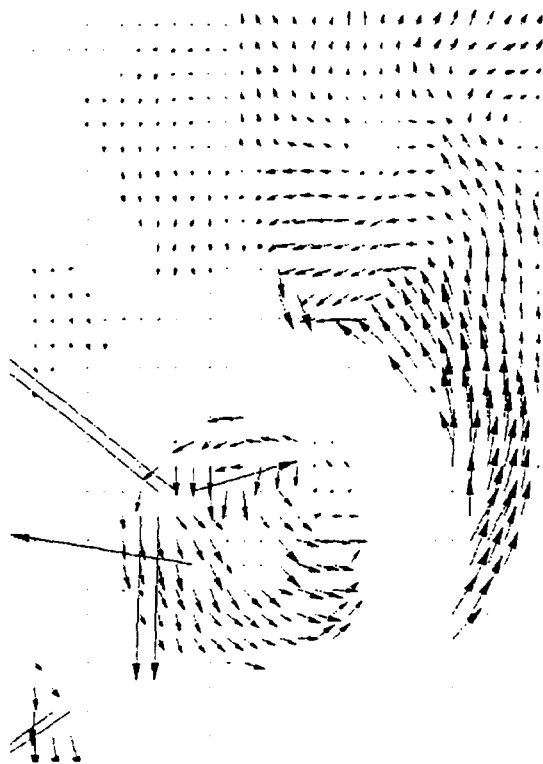
3-2-1-2) Influence de la taille de la zone de corrélation

Sur les figures 14 à 16, nous avons fait varier la taille de la zone de corrélation de 16 à 64 pixels. Les trois champs de vecteurs ont été obtenus à partir des mêmes images brutes. La durée de séparation des deux images a été fixée à 1.5 ms.

La qualité du champ de vecteurs dépend fortement de la taille de la zone de corrélation. 64 pixels semble nécessaire pour obtenir un champ acceptable (figure 14). Avec une fenêtre d'analyse de 16 pixels, le nombre important de vecteurs hors champ ne permet même plus de reconnaître la forme globale du champ de vitesse (figure 16). Deux phénomènes peuvent jouer un rôle majeur dans cette dégradation, qui est liée à une diminution du rapport signal sur bruit:

- le déplacement maximal des particules dans le plan du laser représente une proportion de plus en plus importante de la taille de la zone de corrélation
- à densité fixée, le nombre de particules-traceurs présents dans la zone de corrélation décroît lorsque sa taille décroît. Ainsi lorsqu'on passe de 64 à 16 pixels, le nombre de particules est divisé par 16!

On peut penser ici que c'est surtout le deuxième phénomène qui est à l'origine de la dégradation observée. En effet, dans notre cas, le déplacement d'une particule-traceur ne dépasse jamais une fraction de l'épaisseur de la tranche laser et ce déplacement reste toujours relativement faible devant la taille de la zone de corrélation.



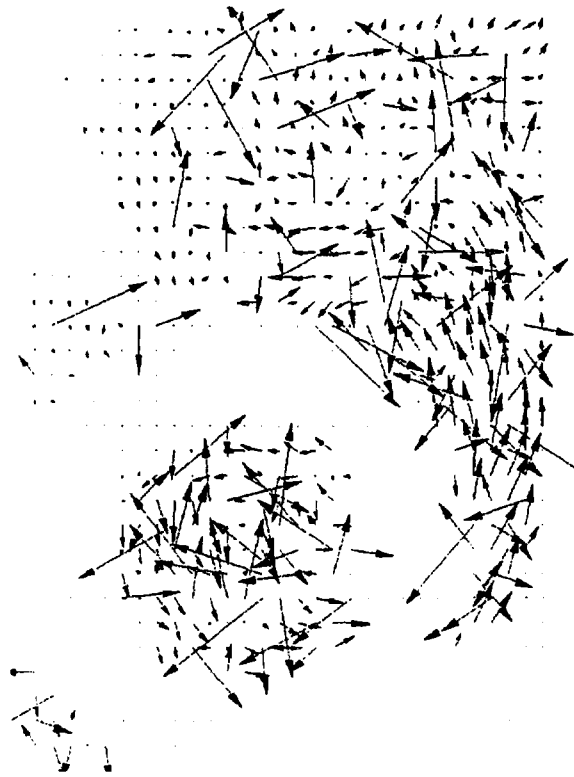
$\Delta t = 1.5$ ms, 64x64, vecteurs bruts

figure 14



$\Delta t = 1.5$ ms, 32x32, vecteurs bruts

figure 15

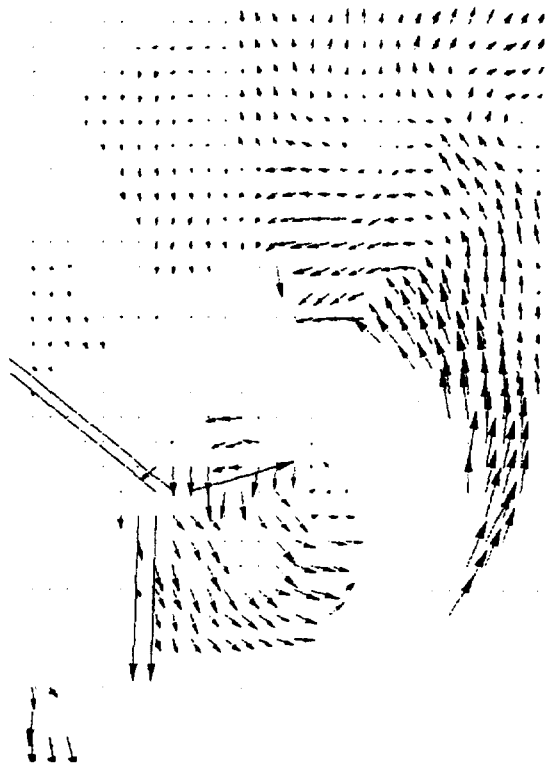


$\Delta t = 1.5 \text{ ms}$, 16x16, vecteurs bruts

figure 16

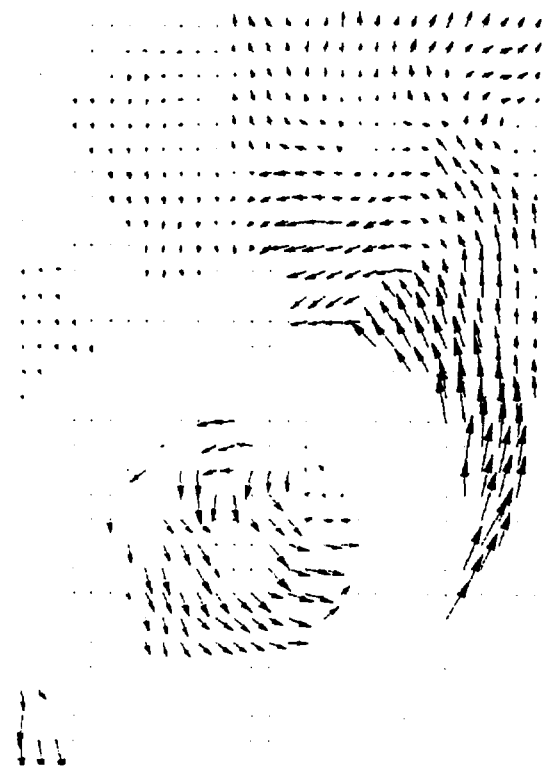
3-2-1-3) Influence des critères de validation

Il apparaît sur la figure 14 un certain nombre de vecteurs manifestement erronés qu'il convient d'éliminer. La manière la plus simple de les détecter consiste à s'appuyer sur le rapport signal sur bruit. Sur la figure 17, sont tracés uniquement les vecteurs vitesse correspondant à des pics caractérisés par un rapport signal sur bruit supérieur à 1.15. Une partie des vecteurs hors champ sont ainsi éliminés, mais il subsiste malgré tout des faux vecteurs qui n'ont pas été détectés. Augmenter la valeur limite du rapport signal sur bruit conduirait à éliminer également un nombre non négligeable de vecteurs corrects. Il faut donc utiliser une autre procédure. Elle consiste à comparer la valeur du vecteur vitesse à celle de ces voisins, et à l'éliminer si elle s'en éloigne trop. Le résultat obtenu est présenté sur la figure 18. Il ne reste alors plus qu'à recalculer les vecteurs éliminés (figure 19), pour obtenir un champ complet. Ceci est réalisé par interpolation polynomiale en appliquant la méthode des moindres carrés.



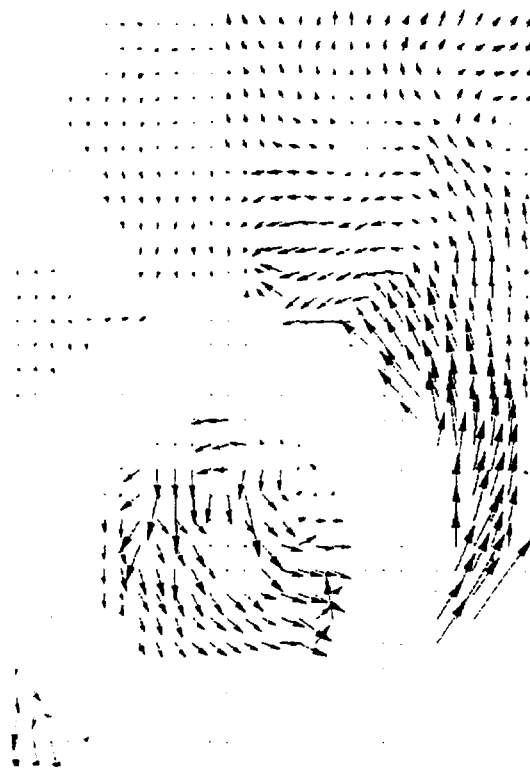
$\Delta t = 1.5$ ms, 64×64 , $RSB=1.15$

figure 17



$\Delta t = 1.5$ ms, 64×64 , $RSB=1.15$, seuillage

figure 18



$\Delta t = 1.5$ ms, 64×64 , $RSB=1.15$, seuillage, interpolation

figure 19

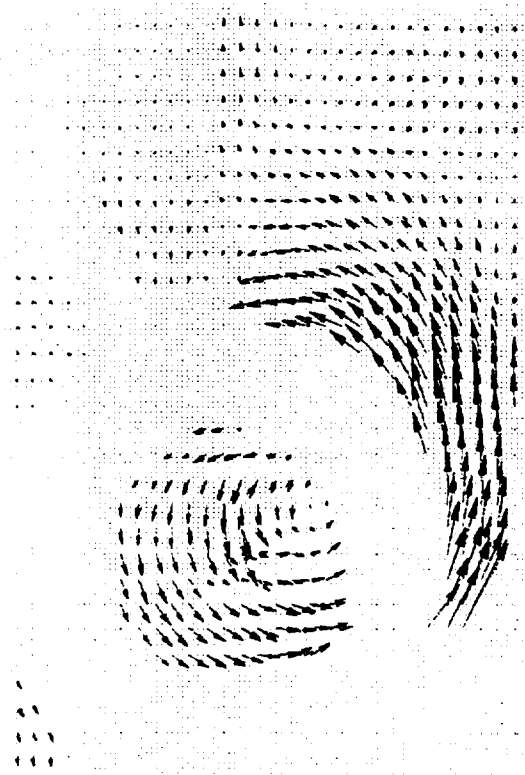
Il est difficile de vraiment qualifier le champ final ainsi obtenu, et ceci pour plusieurs raisons. Il n'existe pas vraiment d'autres alternatives pour obtenir expérimentalement des champs globaux instantanés, ce qui exclut toute comparaison directe. On peut essayer d'évaluer dans l'absolu la qualité d'une mesure PIV, mais ce n'est pas immédiat. En effet, la chaîne de mesure complète est relativement complexe et fait intervenir un grand nombre de systèmes très différents. Elle inclut le dispositif expérimental lui-même (écoulement étudié, ensemencement...), l'optique (lentille, caméra), l'électronique, les logiciels de traitement, etc... Il faudrait estimer avec précision l'influence de chacun de ces composants sur le résultat final. Ceci constitue à lui seul un sujet d'étude qui, pour l'instant, n'a encore été mené à terme de manière satisfaisante.

Pour essayer de contourner ces difficultés, on peut se limiter à une validation partielle, indirecte, de la PIV, en moyennant plusieurs images instantanées et en comparant le résultat à des mesures de LDV (Laser Doppler Velocimetry). C'est ce que l'on a tenté de faire.

3-2-2) Champs moyennés, comparaison avec la LDV

Sur la figure 20, sont tracés les champs de vecteurs obtenus à partir d'une moyenne de 10 et 20 champs instantanés. On constate qu'une moyenne sur quelques images (une dizaine) suffit pour faire apparaître les structures moyennes de l'écoulement. La convergence au centre de la roue est apparemment moins rapide. Ceci est imputable au niveau de bruit très élevé dans cette zone⁷ (voir les images brutes en figure 21) qui engendre de nombreux vecteurs hors champ qu'il est difficile de traiter parfaitement. On peut espérer diminuer l'influence des vecteurs hors champ non éliminés en augmentant le nombre d'images moyennées.

⁷ Il est assez surprenant que l'on parvienne à effectuer des mesures dans cette zone. En effet à cause de la présence de la roue le plan lumineux ne peut pénétrer directement à l'intérieur. La lumière y accède uniquement par réflexion sur les pales, ce qui explique la qualité médiocre des images dans cette partie de l'écoulement (figure 21).



moyenne de 10 et 20 images (respectivement en noir et rouge)

figure 20

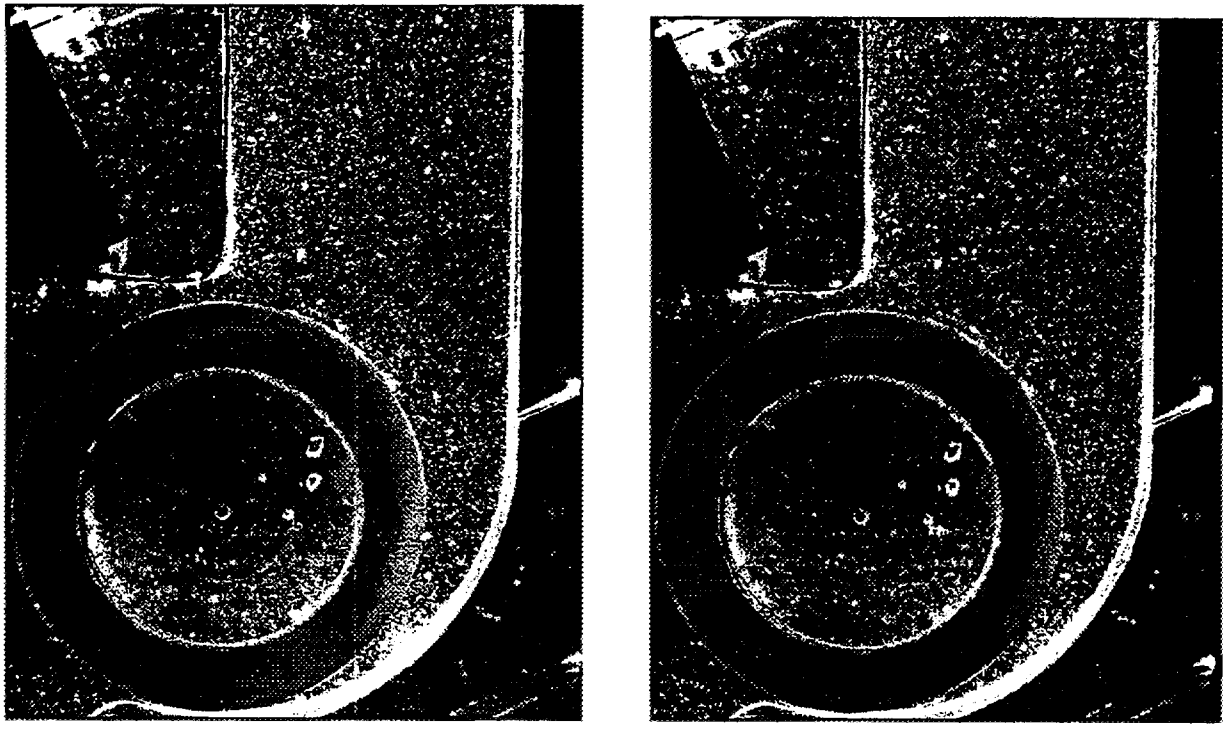


figure 21

Des comparaisons quantitatives sont présentées sur la figure 22. Les champs calculés sont similaires avec cependant des écarts non négligeables, en particulier sur les faibles vitesses. Il est difficile de cerner l'origine de ces écarts mais on ne doit pas s'en étonner. Plusieurs explications peuvent être avancées:

- la LDV fournit une mesure locale de la vitesse alors que la PIV donne une vitesse filtrée, moyennée sur une zone carrée d'environ 1 cm de côté. En présence de forts gradients, ces deux vitesses peuvent fortement varier. De plus, la localisation précise des zones de mesures n'est pas toujours facile en PIV (présence d'un effet de perspective, le plan lumineux étant situé à 60 cm de la paroi supérieure)⁸.
- la moyenne a été effectuée sur 20 images pour la PIV. Bien que les champs de vitesses soient filtrés spatialement, ceci est insuffisant pour permettre la convergence en moyenne et en écart-type du champ de vitesse (par comparaison, les mesures par LDV ont été menées sur des populations de 8000 particules et les écarts-types obtenus se sont avérés être très importants, de l'ordre de grandeur de la vitesse moyenne).
- le Δt séparant deux impulsions laser étant faible (limité par le fort caractère tridimensionnel de l'écoulement), le déplacement des particules est peu important (d'une fraction de leur diamètre à 2 ou 3 diamètres au maximum). Une erreur de localisation de la particule de seulement 75 μm , soit le quart de son diamètre, conduit alors à une erreur absolue de 5 cm/s sur la vitesse, ce qui est déjà relativement important. Une telle sensibilité de la vitesse à la précision de positionnement de la particule provient du fait que l'on a privilégié ici l'étendue du champ exploré. Si l'on veut augmenter la précision de la mesure, il suffit par exemple d'augmenter le grandissement M de la caméra⁹ (ce qui revient à faire un zoom de l'écoulement) et/ou d'utiliser des particules de plus petite taille.

Ce début de comparaison ne nous permet pas de conclure ici. Mais elle a au moins le mérite de mettre en évidence qu'il est nécessaire de mener des campagnes systématiques dans des configurations d'écoulements plus simples, ou à partir d'images brutes créées numériquement, si l'on veut arriver à estimer de manière fiable la qualité d'un résultat de PIV.

⁸ Ceci est particulièrement vrai à l'intérieur de la roue.

⁹ On peut également utiliser une caméra de résolution supérieure (si elle existe!).

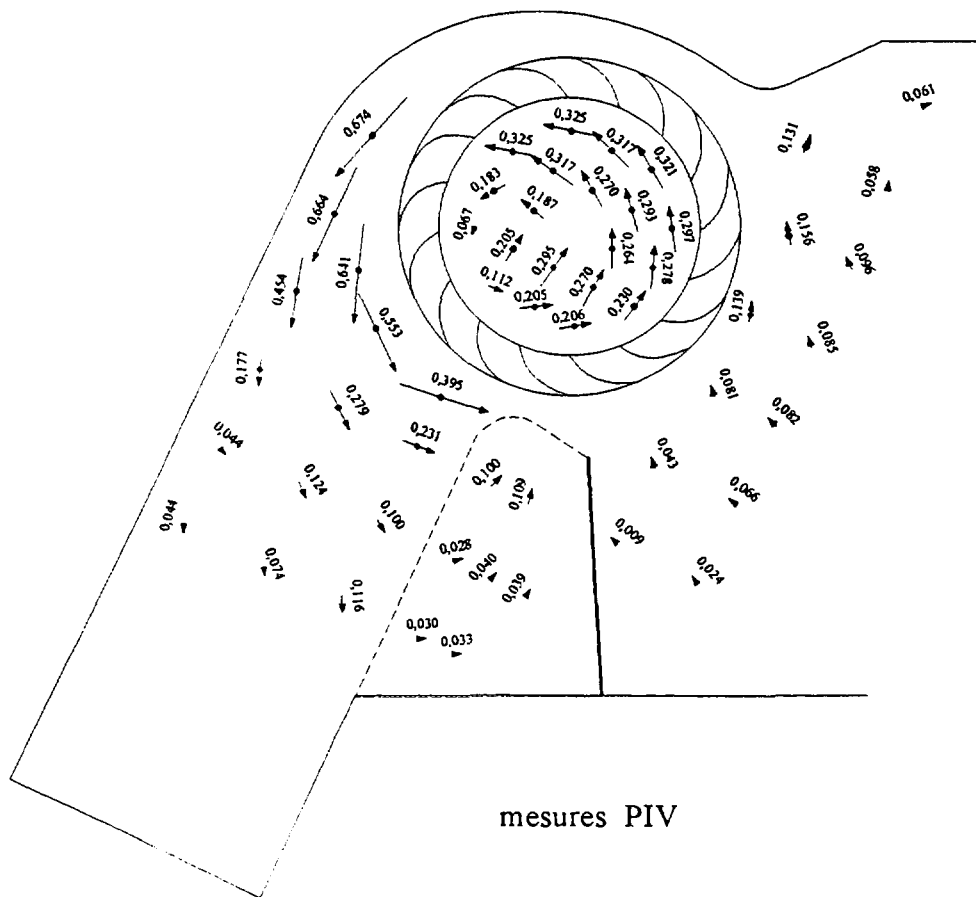
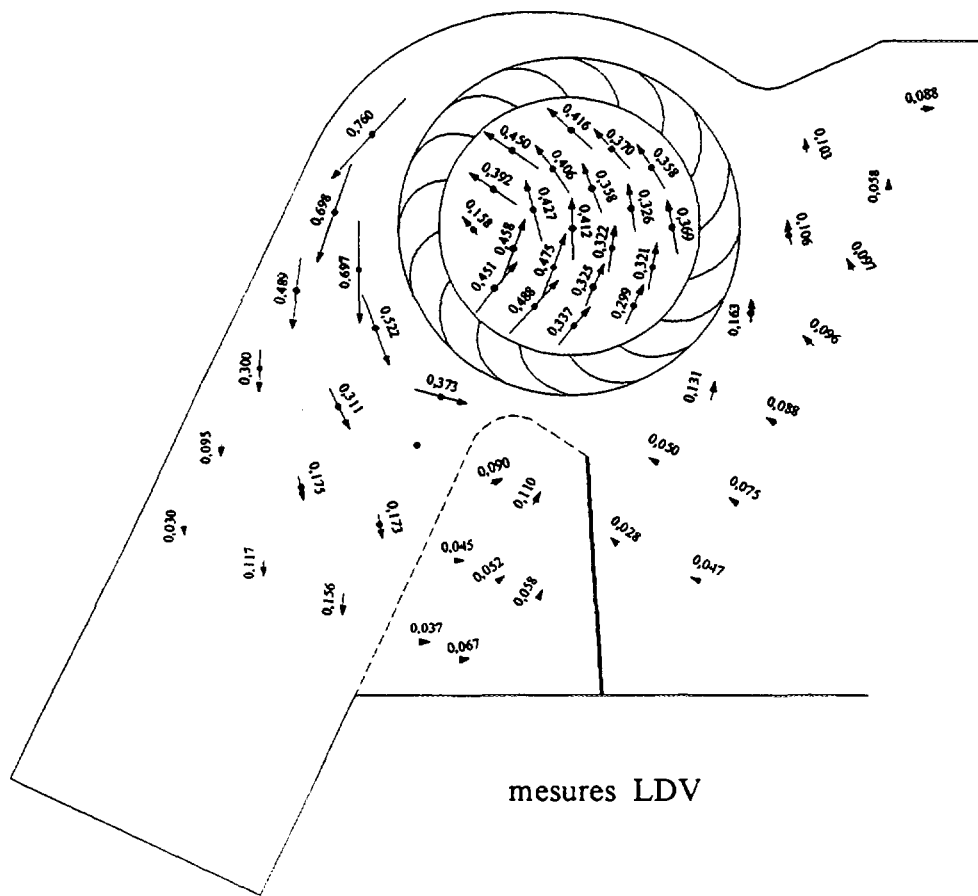


figure 22

4) CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce document les principes sous-tendant la mesure de vitesse par image de particules (PIV), et analysé l'influence des différents paramètres de réglage sur la qualité du résultat final.

Les premières mesures de vitesses ont été conduites sur la maquette hydraulique 'LAVITA'. Elles sont globalement très satisfaisantes. Elles nous ont permis de dresser très rapidement des cartes de champs de vitesses, instantanés et moyens (l'obtention de 20 images nécessite un temps d'acquisition de moins de 90 secondes et un post-traitement d'une dizaine de minutes environ). L'observation des champs instantanés a permis de mettre en évidence la présence de phénomènes instationnaires à basses fréquences, qui ne peuvent être dévoilés par la LDV. Des comparaisons quantitatives entre LDV et PIV, portant sur des champs moyens ont montré que ceux-ci étaient similaires, avec cependant des écarts qui, localement, pouvaient être relativement importants. Il faut tout de même noter que les mesures de PIV effectuées sur LAVITA n'ont pas été optimisées en vue d'obtenir partout une bonne précision. Nous avons préféré privilégier ici l'étendue du champ exploré, pour nous permettre d'observer les grosses structures instationnaires de l'écoulement. Il est donc difficile de conclure quant à la précision des mesures de PIV.

Des comparaisons ultérieures entre LDV et PIV sont donc nécessaires. Celles-ci doivent d'abord être effectuées sur des configurations d'écoulements plus simples et doivent permettre de tester les différents éléments des chaînes de mesures de PIV.

BIBLIOGRAPHIE

- ADRIAN R.J., 1986, Multi-point optical measurement of simultaneous vectors in unsteady flows - a review, *Int. J. Heat & Fluid Flow*, Vol. 7, n°2
- ADRIAN R.J., 1988, Double exposure, multiple-field Particle Image Velocimetry for turbulent probability density, *Optics and Lasers in Engineering* 9, pp.211-228
- ADRIAN R.J., 1988, Statistical properties of particle image velocimetry measurements in turbulent flow, *Laser anemometry in fluid mechanics*, Vol. III (LADOAN Institute Superior Tecnico, Lisbon, Portugal)
- GUIBERT P., PINATEL E. et MURAT M., 1992, Mesures de vitesse par PIV: validation par LDA et application à des écoulements complexes, *3^{ème} Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser, Toulouse*
- HASSAN Y.A., BLANCHAT T.K., SEELY C.H. Jr and CANAAN R.E., Simultaneous velocity measurements of both components of a two-phase flow using particle image velocimetry, *Int. J. Multiphase Flow* Vol. 18, N°3, pp. 371-395
- HOST-MADSEN A., MENGEL F. et Mc CLUSKEY D., 1994, Analyse comparative des méthodes de validation des vecteurs, *4^{ème} Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser, Poitiers*
- KEANE R.D. and ADRIAN R.J., 1990, Optimization of particle image velocimeters. Part I: Double pulsed systems, *Meas. Sci. Technol.* 1, pp. 1202-1215
- PHILIP O.G., SCHMIDL W.D., and HASSAN Y.A., Development of high speed Particle Image Velocimetry technique using fluorescent tracers to study steam bubble collapse,
- RIETHMULLER M.L., 1992, La vélocimétrie à images de particules ou PIV: synthèse des communications récentes, *3^{ème} Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser, Toulouse*
- ROULAND E., ALLANO D., TRINITE M. et FRECHOU D., 1994, Vélocimétrie par intercorrélation d'images de particules appliquée à un milieu faiblement ensemené en particules diffusantes présentant une granulométrie inhomogène, *4^{ème} Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser, Poitiers*
- STEPHANINI J. et COGNET G., 1994, Critères de validation pour la vélocimétrie par suivi de particules, *4^{ème} Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser, Poitiers*