

METHODES OPTIQUES

DE

MESURE DE VITESSE

Table des matières.

I LES MESURES DE VITESSE TRADITIONNELLES.....	1
1/ Le tube de Pitot.....	1
a) Présentation.....	1
b) Fonctionnement.....	1
2/ Bien d'autres méthodes.....	2
a) Sonde de pression anémoclinométrique.....	2
b) Sonde de température d'arrêt.....	2
3/ ... qui présentent néanmoins certains inconvénients.....	2
a) Les limites des méthodes traditionnelles.....	2
b) Vers des méthodes optiques de mesure de vitesse.....	2
II LES METHODES DE MESURE OPTIQUE.....	3
1) Vélocimétrie laser à franges.....	3
a) Présentation.....	3
b) Mise en oeuvre.....	3
c) Mesure.....	5
d) Interprétation des résultats, calcul de la vitesse.....	6
2) Vélocimétrie par Images de Particules (PIV).....	7
a) Principe	7
b) Eclairage et prise de vue.....	8
c) Avantages :	10
c) Limites.....	11
3) Vélocimétrie laser à effet Doppler.....	12
a) Présentation.....	12
b) Le modèle	12
c) En pratique.....	13
3 bis) Une autre méthode de mesure par effet Doppler.....	15
a) Principe.....	15
b) Dispositif de mesure et cellule à iode.....	15
III ANNEXES.....	16
Annexe 1 : Choix des particules d'ensemencement.....	17
Annexe 2 : Calcule de l'éclairement.....	18
Annexe 3 : Strophotométrie.....	20

INTRODUCTION, BIBLIOGRAPHIE.

La mesure de la vitesse d'un fluide pose un réel défi. Quand bien même les trajectoires des particules de fluides sont relativement faciles à identifier, à l'aide d'un colorant introduit dans le fluide par exemple, il est bien plus délicat d'accéder aux lignes de champ de vitesse. De plus il est nécessaire de ne pas, ou très peu, perturber l'écoulement du fluide lors de la mesure. Nous allons ici présenter diverses techniques permettant de mesurer la vitesse d'un fluide. Nous verrons tout d'abord brièvement les méthodes dites « traditionnelles » de mesure dans le champ et leur limites. Dès lors nous introduirons les méthodes de mesures optiques, bien moins intrusives en détaillant trois méthodes de mesure par ensemencement de particules : vélocimétrie laser, PIV, Doppler.

Pour ce projet nous nous sommes appuyés, outre nos connaissances antérieures, sur les documents mis à disposition par l'ONERA (Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales). En effet, l'ONERA utilise au quotidien les méthodes que nous allons présenter et figure parmi les plus à même d'offrir une première approche de celles-ci.

Nous avons également consulté un livre, Application des lasers ([FAR]), dans lequel de nombreux problèmes relatifs au laser sont posés. Ainsi l'un d'entre eux a attiré notre attention. Ce livre présente l'avantage d'être clair, mais il reste bien théorique et ne répond bien entendu pas à toutes les questions, de part la forme sous laquelle il se présente. Une thèse ([RAM]) concernant la mesure de vitesse par PIV nous a aussi apporté nombre de renseignements concernant cette méthode.

D'autres sources nous ont été d'une grande aide, en particulier les sites Internet du laboratoire CORIA (Complexe de Recherche Interprofessionnel en Aéro-thermochimie) et du CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique).

I LES MESURES DE VITESSE TRADITIONNELLES.

Afin de mesurer l'intérêt des méthodes optiques de mesure de vitesse nous allons commencer par présenter brièvement les méthode dites « traditionnelles ».

1/ Le tube de Pitot.

a) Présentation.



Le tube de Pitot portant le nom de son inventeur fut le premier dispositif de mesure de la vitesse de fluide. Destiné, à l'origine, à mesurer la vitesse des eaux courantes et des sillages des vaisseaux, son principe succédera au système Etévé dans les mesures de vitesses en aéronautique.

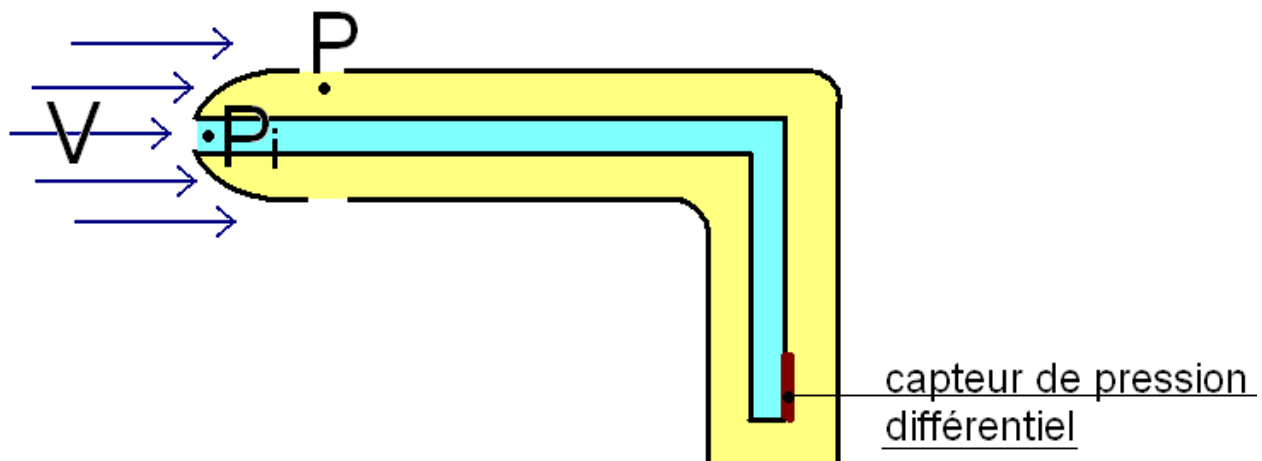
Photographie d'un tube de Pitot.
(source : wikipedia).

b) Fonctionnement.

Le tube de Pitot n'est en réalité autre qu'un capteur de pression dont l'information nous permet de remonter à la vitesse grâce aux lois de Bernoulli.

Il est constitué de deux tubes cylindriques concentriques percés en des points bien particuliers.

Principe du tube de Pitot (redessiné à partir de documents Onera et wikipedia) fig 111



Dans le cadre d'un écoulement incompressible et si on se place en régime stationnaire on peut appliquer les lois de Bernoulli le long des lignes de courant 1 et 2.

$$\frac{V^2}{2} + \frac{P_i}{\rho} + gz_1 = 0 + \frac{P}{\rho} + gz_2$$

Soit en négligeant la hauteur du dispositif ($z_1 - z_2 = 0$) :

$$V = \sqrt{\left(\frac{2}{\rho} \cdot (P_i - P)\right)}$$

2/ Bien d'autres méthodes...

a) Sonde de pression anémométrique.

Basé sur le même principe que le tube de Pitot ces sondes permettent la mesure de la vitesse à partir de mesures de pressions. Néanmoins ce dispositif permet non seulement la mesure du module de la vitesse mais aussi de la direction de cette dernière.

b) Sonde de température d'arrêt.

Le principe de mesure par cette sonde repose sur l'effet thermocouple.

3/ ... qui présentent néanmoins certains inconvénients.

a) Les limites des méthodes traditionnelles.

Les différentes méthodes exposées ci-dessus nécessitent toutes l'utilisation d'une sonde afin d'accomplir les mesures. Aussi petites les sondes soient-elles il est clair que leur présence perturbe tout de même l'écoulement. Ces méthodes sont dites « intrusives ».

De plus comme nous l'avons vu ces méthodes reposent sur les liens entre température, pression et vitesse. En effet la grandeur directement mesurée par ces dispositifs n'est jamais la vitesse à proprement dite. Dès lors que dire lorsque les relations nous permettant d'accéder à la vitesse ne sont plus valables ?

b) Vers des méthodes optiques de mesure de vitesse.

Il nous faut donc trouver de nouvelles méthodes de mesure de vitesse non intrusives... pour cela nous allons avoir recours à l'optique.

II LES METHODES DE MESURE OPTIQUE.

Nous allons maintenant présenter plusieurs mesures de vitesse par méthodes optique, ces méthodes sont non-intrusives et se font par ensemencement de particules au sein du fluide.

1) Vélocimétrie laser à franges.

a) Présentation.

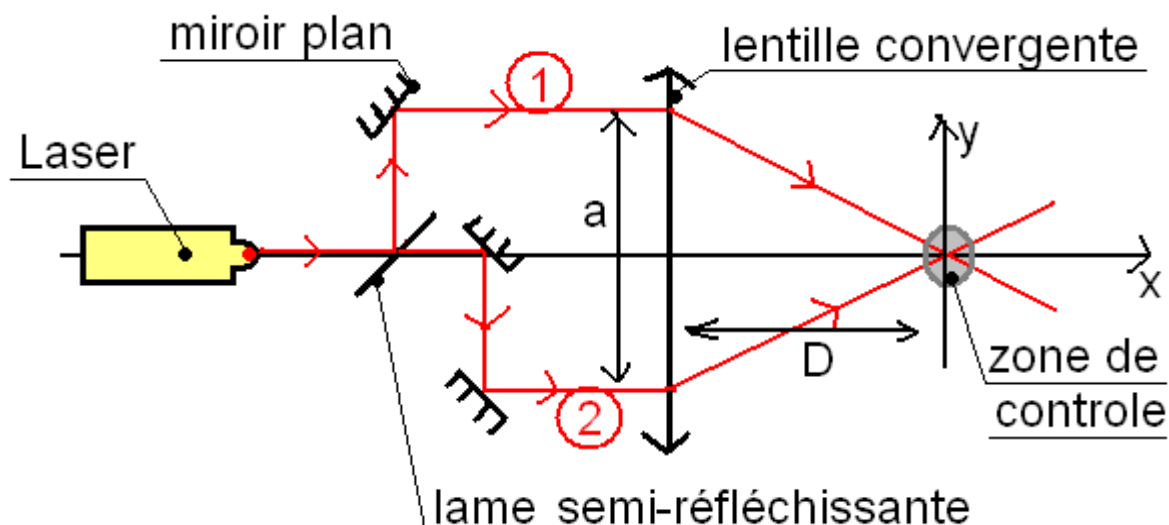
Cette méthode de mesure semble la plus simple à mettre en oeuvre. Elle permet de déterminer la vitesse du fluide d'un point de vue eulerien : on détermine la vitesse des particules traversant un petit volume de contrôle définie par une zone d'interférence.

Le fluide est tout d'abord ensemencé de particules légères entraînées par le fluide dans son mouvement. C'est en réalité la vitesse de ces particules que l'on va pouvoir mesurer. On crée un réseau de franges par interférence lumineuse, lorsqu'une particule traverse la zone d'interférence elle scintillera : il ne nous reste plus qu'à placer une caméra dirigée vers la zone de contrôle afin d'accéder à la fréquence de ce scintillement qui nous permettra de remonter à la vitesse instantanée de la particule, et donc du fluide, dans cette zone.

b) Mise en oeuvre.

Pour créer le volume de mesure on fait une interférence à deux ondes avec un dispositif proche d'un interféromètre de Michelson en configuration « coin d'air ». Cependant les franges étant à l'infini dans un tel dispositif on en fait l'image par une lentille convergente : on identifie donc un volume siège d'interférences au voisinage du point focal objet de la lentille.

Création du réseau de frange. (dessiné à partir du cours de spé et document onera) fig 211



On montre (*cf annexe*) que l'éclairement dans le plan focal image de la lentille convergente est donné par :

$$E = E_0 \cdot \left(1 + \cos\left(2 \frac{\pi \cdot \delta}{\lambda} + \pi\right)\right)$$

où δ la différence de marche entre les chemins notés 1 et 2 est donnée par :

$$\delta = \frac{a \cdot y}{D}$$

Avec y l'ordonnée du point du plan focal image que l'on observe.

On a donc un système de franges lumineuses :

- Les franges brillantes viennent pour : $\delta_s = k \cdot \lambda$
 - Les franges sombres : $\delta_b = \frac{(2k+1) \cdot \lambda}{2}$
- $k \in \mathbb{Z}$

Ce qui correspond respectivement aux ordonnées :

$$y_s = k \cdot \lambda \frac{D}{a} \text{ pour les franges sombres}$$

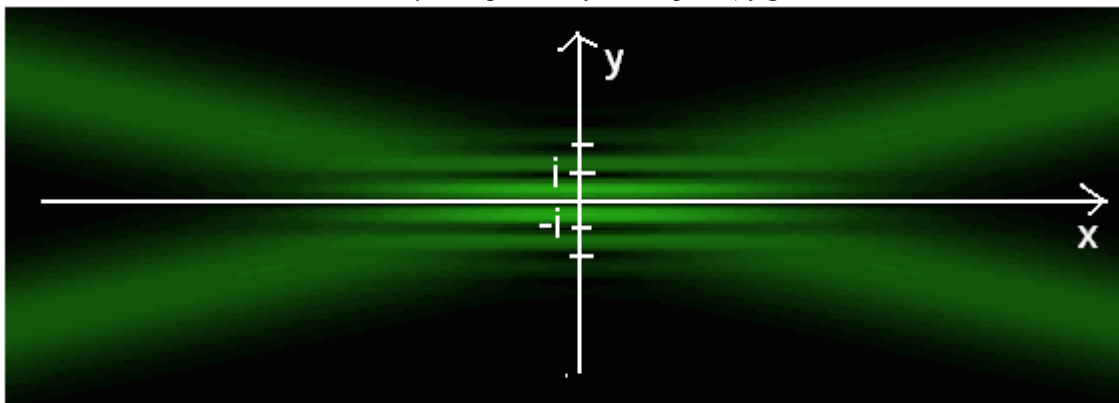
et

$$y_b = \frac{D \cdot (2k+1) \cdot \lambda}{2a} \text{ pour les franges brillantes.}$$

Ce qui donne un espace inter-frange de : $i = \lambda \frac{D}{a}$.

Inter-frange obtenue au niveau du point focal image de la lentille.

(source : Onera : méthode de mesure en aérodynamique, modifié sous paint) fig 212

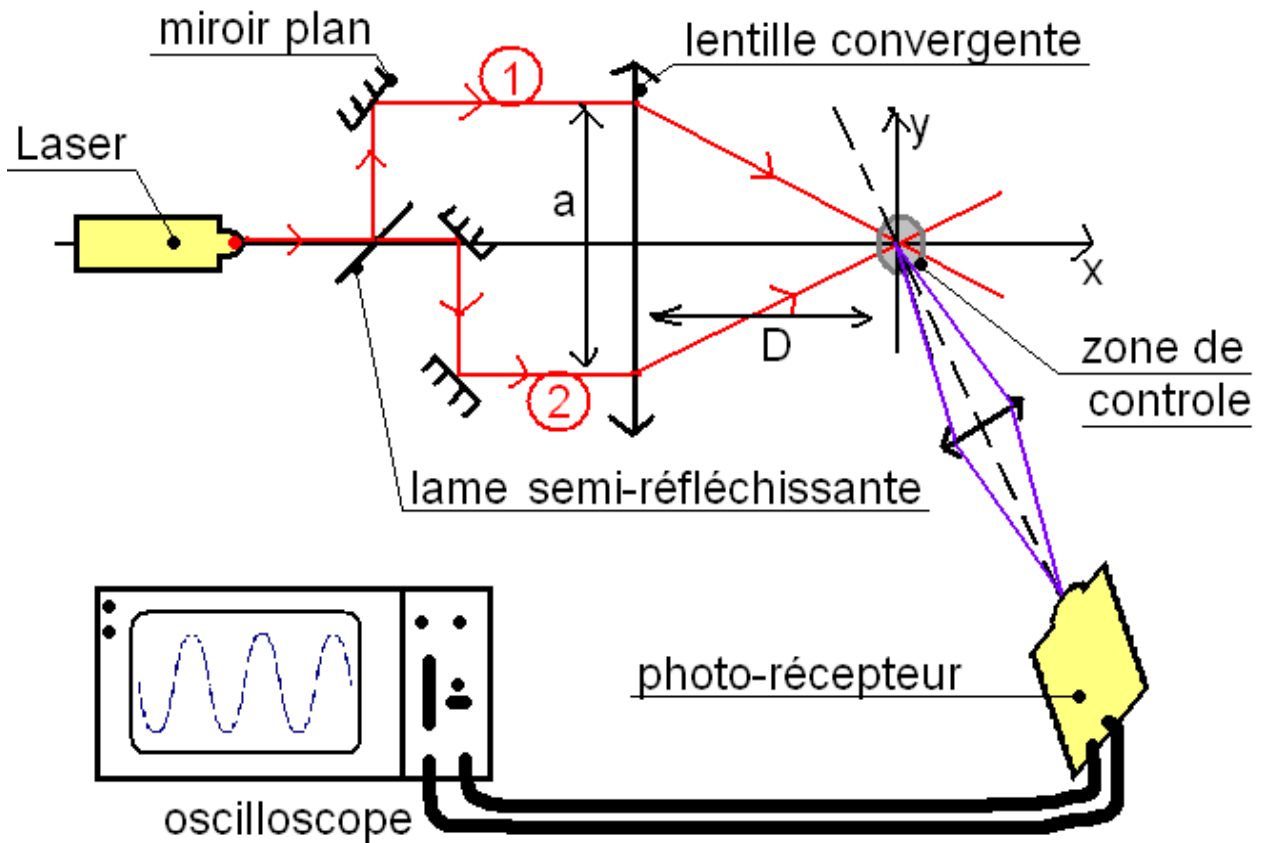


c) Mesure.

Pour accéder à la vitesse du fluide au niveau de la zone d'interférence on place un photo-récepteur vers la zone de mesure qui récupère la lumière réfléchie par une particule en suspension dans le fluide : on a des pics lors du passage par une frange brillante.

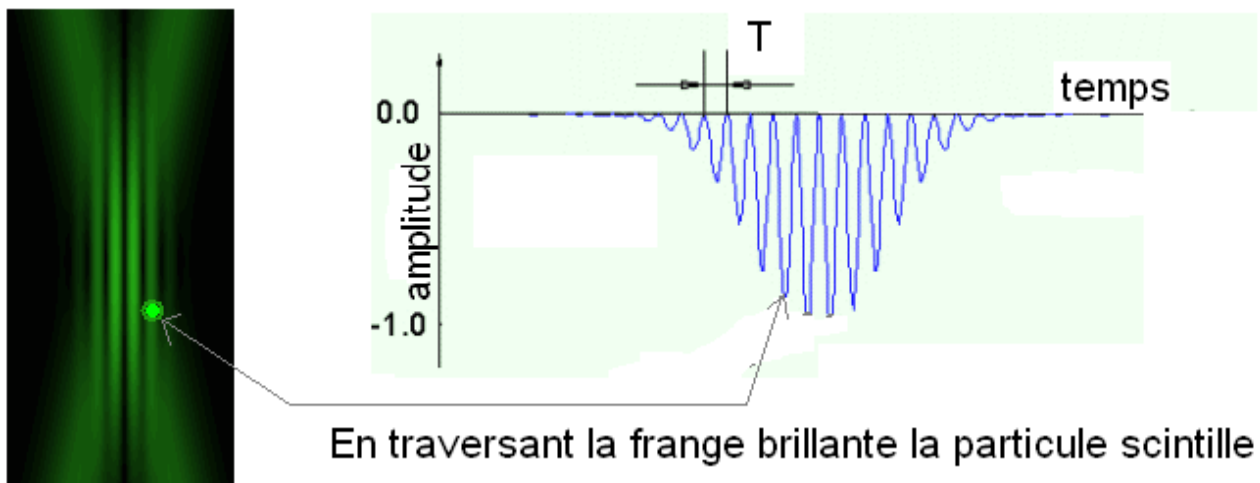
Réception de la lumière émise par les particules surnageantes.

(réalisé à partir de document Onéra) fig 213



Le photo-récepteur rend un signal électrique proportionnel au signal lumineux qu'il capte.

Lien entre le signal rendu et la position de la particule. (doc Onéra modifié) fig 214

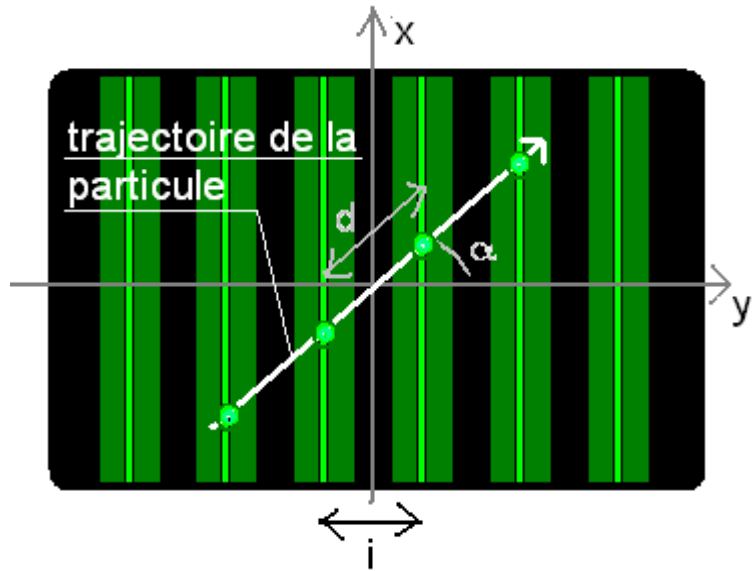


d) Interprétation des résultats, calcul de la vitesse.

Connaissant la valeur de l'inter-frange i et la période T (intervalle de temps entre 2 passages de la particule par une frange brillante) on en déduit la vitesse de la particule dans la direction perpendiculaire aux franges : u_y ici. La zone de mesure est assez petite pour que l'on puisse assimiler la trajectoire de la particule à sa tangente (donc a une trajectoire rectiligne).

Particule progressant au travers des franges lumineuses.

(inspiré de doc Onera) fig 215



La vitesse instantanée de la particule est donnée par $\vec{V} = (V_x, V_y, V_z)$ dans la base (u_x, u_y, u_z)

On définit f la fréquence associée à la période T définie dans la figure 214.

On a :

$$f = \frac{1}{T}$$

$$\|\vec{V}\| = \frac{d}{T} = \frac{if}{\cos(\alpha)}$$

$$V_y = \vec{V} \cdot \vec{u}_y = \|\vec{V}\| \cdot \cos(\alpha) = i \cdot f$$

L'expérience est réalisée pour chaque particule traversant la zone de mesure. Il faut ensuite traiter les résultats statistiquement (cf annexe) pour obtenir une valeur de la vitesse du fluide selon u_y .

Enfin pour obtenir le vecteur vitesse instantanée il nous faut déterminer les deux autres composantes de ce dernier. Pour cela on réalise deux autres montages en utilisant des lasers de couleurs différentes et dirigés suivant uy et uz . On en tirera respectivement les composantes Vz et Vx de la vitesse.

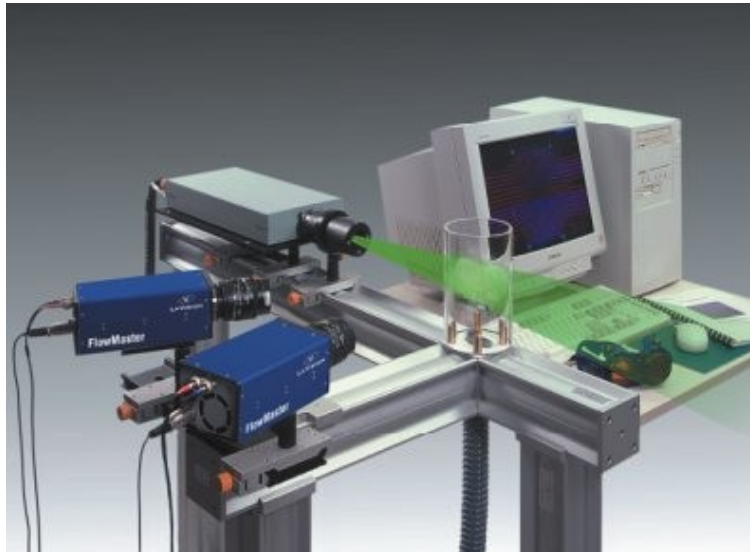
e) Limites de la méthode

La vélocimétrie par laser mesure, nous l'avons dit, la vitesses de particules légères préalablement injecté dans le fluide. La mesure de cette vitesse repose sur la détection d'un « scintillement » et la mesure de la fréquence de ce scintillement. On se rend donc facilement compte de deux limitations de cette techniques :

- S'il est impossible d'injecter des particules dans le fluide cette méthode est mise en défaut
- Si l'écoulement est trop rapide alors le signal du photorécepteur sera brouillé, on ne parviendra pas à identifier les « pics » qui traduisait le passage de la particule par les franges brillantes.

De plus la vélocimétrie laser ne permet qu'une mesure locale de vitesse, ainsi mesurer la vitesse d'un fluide en tout point d'un volume macroscopique devient vite fastidieux.

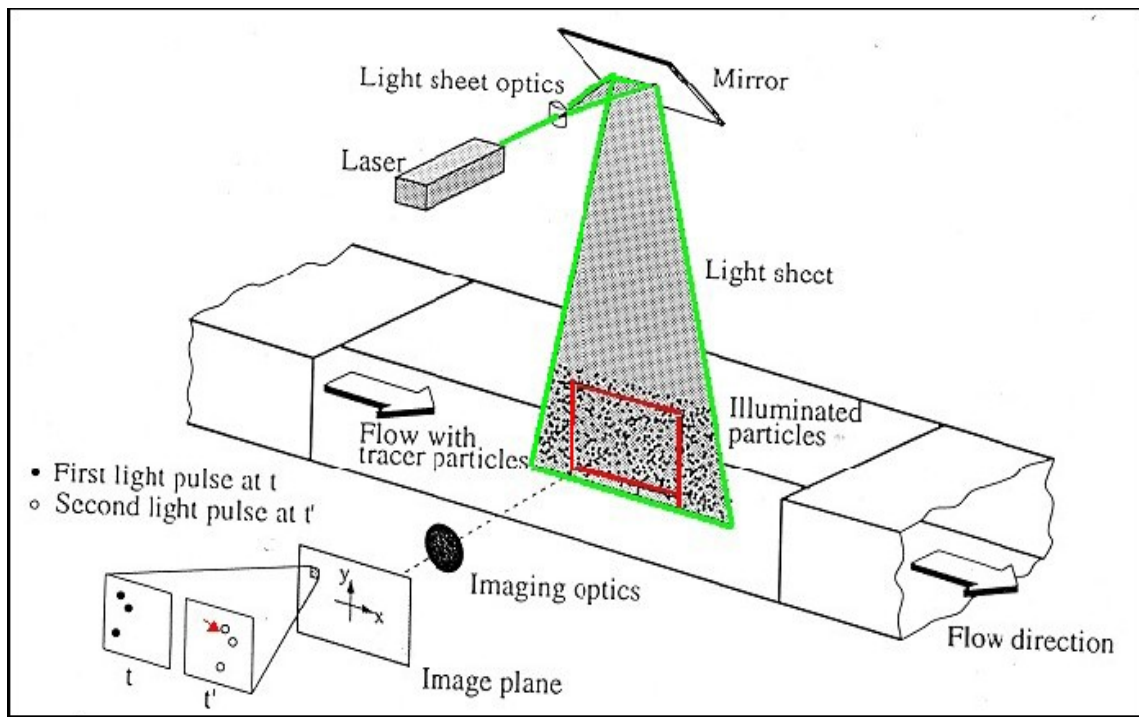
2) Véllocimétrie par Images de Particules (PIV)



a) Principe

Pour l'enregistrement des clichés ou d'une séquence de PIV, l'écoulement estensemencé par des micro-particules servant d'indicateurs. Dans le souci d'avoir des particules entraînées par le mouvement global à accélération non nulle, il faut garantir que leur vitesse s'approche le plus possible de celle du fluide. Le choix sera également conditionné par la faculté qu'a la particule à rediffuser (diffusion de Mie) la lumière du plan laser vers le plan de prise de vue. Des exemples de ces particules peuvent être du polystyrène, du polyamide, des sphères de verre creuses .

Il est aussi intéressant de noter qu'on utilise d'autres types de traceurs pour les gaz qui tiennent compte des spécificités de cette catégorie de fluides ainsi, pour l'air, utilise-ton généralement des fumées froides (générateurs de fumée à l'eau glycolée), de l'eau pulvérisée en micro-gouttelettes, ou des particules solides microniques. Il est aussi important d'insister sur l'homogénéité de l'ensemencement puisque, en l'absence de cette condition cruciale, un certain biais dans le traitement des fenêtres d'interrogation apparaît, biais dès lors causé par une différence spatiale du taux d'ensemencement.

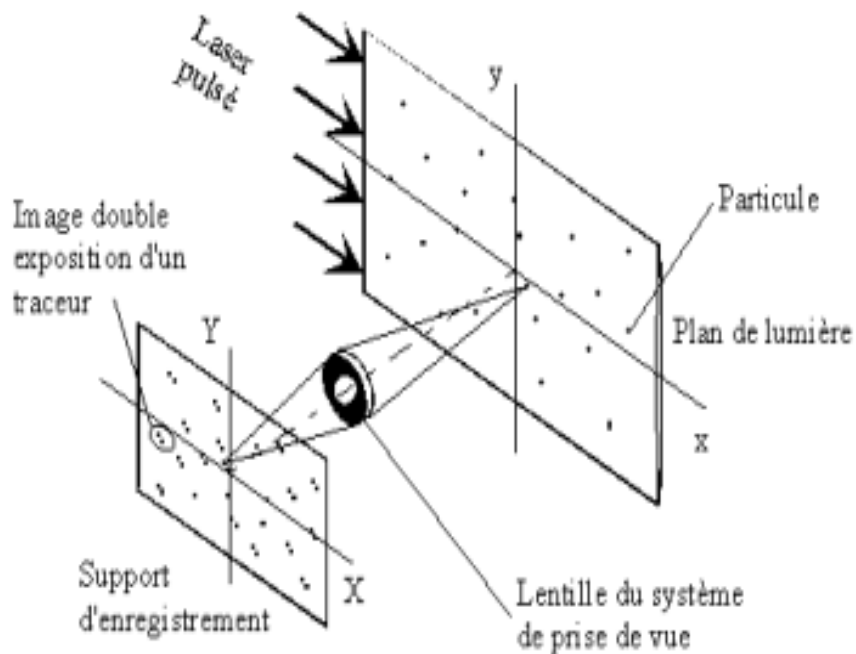


Principe général de la méthode

b) Eclairage et prise de vue.

Une source Laser pulsée génère sur un même axe optique deux impulsions lumineuses décalées dans le temps d'un intervalle Δt programmable et qui sera l'intervalle de capture de paires d'images soit par un appareil photo, soit par une caméra CCD. La connaissance de ce temps d'émission et la possibilité du contrôle qu'on exerce dessus sont considérées comme un avantage de la méthode. En effet, de ce temps dépend la fréquence de la prise de vues de la caméra CCD ou du capteur. On pourra donc, utiliser une gamme variées de ces capteurs de position et accompagner les progrès qui s'opèrent sur eux quant à l'accroissement de leurs fréquences.

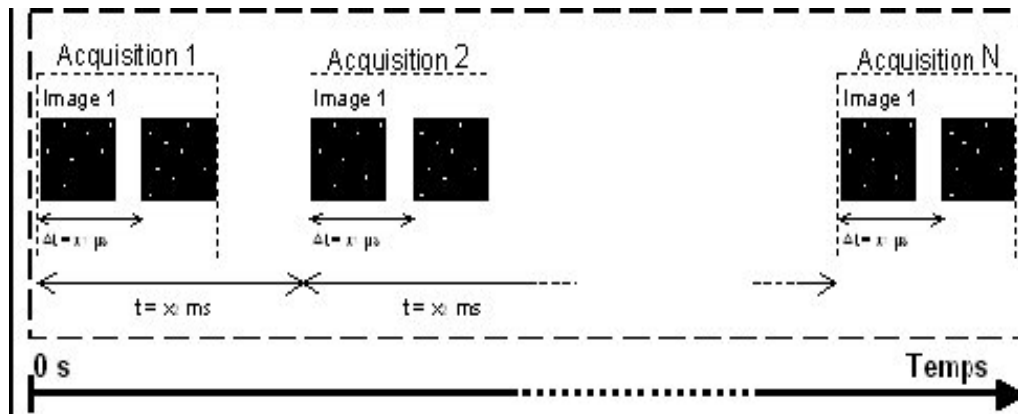
Les impulsions émises par le Laser traversent un dispositif optique. C'est une lentille cylindrique qui diverge le faisceau réalisant un plan de lumière. Les particules présentes dans ce plan sont donc éclairées périodiquement et celles qui ont servi à l'ensemencement diffusent la lumière reçue. Dès lors, on peut choisir une zone du plan de lumière qu'on appelle fenêtre d'analyse ou fenêtre d'interrogation et qui va être surveillée par la lentille du système de prise de vue. Régulièrement captée (à des intervalles de temps correspondant à la fréquence de la caméra CCD ou du capteur), cette zone est ainsi projetée sur un support d'enregistrement, en principe numérique, pour pouvoir traiter ces informations et dresser les différentes cartes sus-indiquées.



Eclairage du fluide par une source Laser et capture de clichés

Les images sont stockées par doublets, corrélation oblige. En effet pour pouvoir calculer le comportement du champ de vitesse dans le temps, il est nécessaire de comparer des positions successives prises par différents indicateurs. Chaque paire d'images sera stockée en temps réel dans la mémoire vive d'un processeur dans l'attente d'un traitement du signal reçu.

Les dimensions des fenêtres d'analyse (ou d'interrogation) sont comprises entre 16×16 et 64×64 pixels pour un capteur CCD de 1024×1024 pixels ce qui correspond à un champ de l'ordre de 200 à 4000 vecteurs vitesse instantanée.



Séquencement de doublets d'images au cours du temps

Enfin arrive l'étape du traitement de l'information, traitement informatique bien entendu, qu'on ne détaille pas ici .

c) **Avantages :**

Non intrusivité :

La Vélocimétrie à Image de Particules (PIV de l'Anglais Particles Image Velocimetry) a, comme les autres techniques exposées ici, la particularité de ne pas perturber le milieu où l'on effectue la mesure de vitesse . En effet, vers les années quatre-vingt, l'utilisation des lasers a commencé à prendre de l'ampleur, et c'est ce qui a permis d'éviter l'utilisation de sondes matérielles et par conséquent perturbatrices. Tout l'intérêt était donc d'utiliser le caractère immatériel de la lumière et sa faible interaction avec le fluide.

Instantanéité du champ des vitesses :

Il est très important de noter ce progrès que la méthode a été pionnière d'apporter . En effet, la LDA (Anémométrie optique à effet Doppler) qui se contentait de mesurer la vitesse des particules dans l'espace mais figée dans le temps s'est vue réduite à néant avec l'apparition de la PIV qui, elle, suit le champ de vitesses au cours du temps et accompagne le fluide grâce à des prises de clichés du phénomène à travers des fenêtres d'interrogation . Elle permet, enfin, moyennant une corrélation opérée par un automate de comparer les différentes positions prises par les particules d'ensemencement à des intervalles de temps bien réguliers. Une fois le traitement du signal abouti, on peut avoir une carte instantanée du champ des vecteurs vitesse de la zone illuminée par le laser. Cette possibilité offre particulièrement de nouvelles voies d'investigation des écoulements turbulents. Ce type d'écoulement ne permet aucune simplification de l'équation de Navier-Stokes.

Précision :

Grâce à la nature de la sonde (optique) utilisée, la limite d'une mesure effectuée par

vélocimétrie à Image de particules est déterminée par rapport aux propriétés de l'onde lumineuse. C'est ainsi qu'une précision de l'ordre de quelques centaines de micromètres peut être atteinte . La résolution est d'autant plus satisfaisante que l'appareillage informatique, les capteurs ou les caméras CCD dont on dispose sont précis .

c) Limites.

Malgré tous les progrès que la PIV a apporté, la technique présente un certain nombre de limites qui peuvent poser de problèmes dans certains types d'écoulement .

Limite spatiale :

Il est impossible avec les moyens employés d'espérer un jour dépasser la précision de la longueur d'onde . En effet, bien qu'on ait présenté cette précision comme un point fort de la technique, elle peut être une limite potentielle dans l'avenir de la méthode si jamais on veut s'attaquer à des échelles plus petites .

Limite fréquentielle :

Une autre limite est que cette technique ne permet pas, comme toutes les techniques qui l'ont précédée, l'anémométrie laser à effet Doppler notamment, de délivrer des signaux à très hautes fréquences . Ceci constituera probablement l'un des défis que la PIV devra relever pour continuer à être l'une des méthodes les plus utilisées pour la mesur de vitesse des fluides .

3) Vélocimétrie laser à effet Doppler

a) Présentation

Il s'agit en fait de la même méthode que précédemment, si ce n'est que nous l'interprétons différemment. Sa mise en oeuvre est donc la même. Nous considérons alors la particule réceptrice du premier signal en mouvement dans le milieu, et nous ne considérons tout d'abord que ce signal.

Par effet Doppler, la fréquence des signaux reçus par la particule sera différente de celles des signaux émis par la source (système laser-séparatrice). La diffusion de l'onde incidente par la particule donnera une nouvelle onde, de fréquence égale à la fréquence du signal précédemment reçu.

La particule émettra par diffusion deux ondes dont la fréquence sera donc différente, bien que très proche (la vitesse de la particule est faible comparée à la célérité de la lumière). Il y aura ainsi interférence entre ces deux ondes.

b) Le modèle

Reprenons le montage précédent (schéma 211) constitué d'un laser (émettant un signal sinusoïdal de fréquence f_e), d'une séparatrice et d'un montage permettant d'envoyer les deux faisceaux obtenus sur la particule par des chemins optiques de même longueur.

Considérons que la particule se déplace à la vitesse \mathbf{v} dans le repère du laboratoire, dans lequel la source laser et le capteur sont fixes. Considérons la direction \mathbf{u}_i ($i=1$ ou 2) du faisceau optique atteignant la particule. Alors la fréquence $f_{p,i}$ du signal reçu, puis réémis, par la particule est égale à :

$$f_{r,i} = f_e \cdot \frac{1 + \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{u}_i}{c}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{u}_i}{c}\right)^2}}$$

Bien entendu, l'effet Doppler agira à nouveau entre la particule et le capteur. La fréquence obtenue au récepteur ne sera alors plus la même.

Mais ce qui importe ici est la fréquence reçue par la particule. En effet, chaque signal sera réémis par diffusion par une particule se déplaçant à la même vitesse, puis parcourra le même chemin optique pour arriver au capteur. Nous multiplierons donc la fréquence de chaque signal par la même constante. Si l'on considère \mathbf{u} la direction de la particule au capteur, on obtient pour la fréquence des signaux transmis :

$$f_{t,i} = f_{r,i} \cdot \frac{1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{u}}{c}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{u}}{c}\right)^2}}$$

Le signal obtenu sera la somme des deux signaux diffusés par la particule. A cause des fréquences très proches des deux signaux, on verra apparaître une figure d'interférence. Son contraste dépend de la différence d'intensité entre les deux signaux. Si l'on considère des intensités égales, nous obtiendrons un contraste maximal. Il faudra donc veiller aux intensités des signaux.

c) En pratique

Une différence d'intensité entre les signaux peut provenir notamment d'une mauvaise séparatrice, ou d'un milieu non homogène qui absorberait plus la lumière sur l'un ou l'autre des chemins, hypothèses que nous considérerons non réalisées ici. Ainsi, la différence ne peut venir que de la diffusion par la particule. Ainsi qu'il est représenté sur la figure 2.1, la diffusion se fait principalement vers l'avant, c'est-à-dire dans la direction et le sens de l'onde incidente.

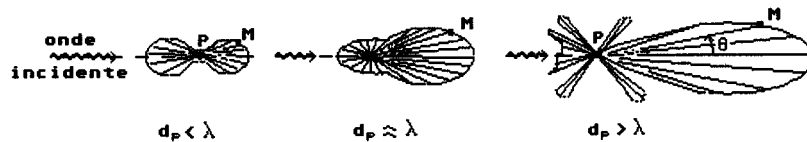


Figure 2.1 – Diagrammes de diffusion ([FAR] p. 187)

Pour avoir une même intensité diffusée pour les deux rayons, il convient de se placer dans le plan bissecteur des directions des deux ondes incidentes. Pour avoir une plus grande intensité, il convient aussi de se placer dans le plan de ces deux directions. Ainsi la place optimale du capteur est déterminée.

Il est à noter que la diffusion dépend du diamètre de la particule (noté d_p sur la figure 2.1) et que plus le diamètre de celle-ci est grand, plus la dispersion est aléatoire. Une taille optimale de la particule ensemencée apparaît ainsi.

Une partie du problème de cette méthode va être liée au traitement du signal. Si plusieurs particules diffusent les faisceaux en même temps, les signaux vont s'ajouter, et la théorie de traitement du signal va devoir être utilisée. Le cas idéal est donc celui où la concentration de diffuseurs est assez faible pour n'avoir qu'une particule diffusant les faisceaux en chaque instant.

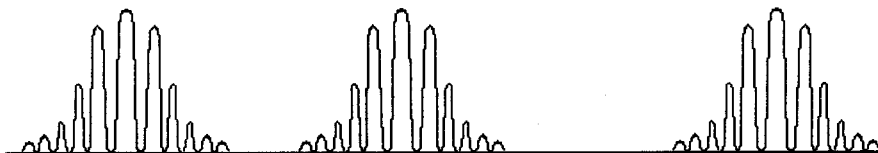


Figure 2.2 – Signal obtenu pour de faibles concentrations de diffuseurs ([FAR] p.189)

Tandis que pour des concentrations de diffuseurs plus importantes, il va falloir traiter le signal à l'aide notamment de filtres passe-haut ou d'un poursuiveur de phase.



Figure 2.3 – Signal obtenu pour de fortes concentrations de diffuseurs ([FAR] p.189)

L'interprétation de ce signal donnera une information sur la vitesse dans la direction de $(\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2)$: pour obtenir une information à 3 dimensions, il faut placer un système optique de longueur d'onde distincte dans chaque direction, et filtrer le résultat selon la longueur d'onde convenant avant chaque capteur.

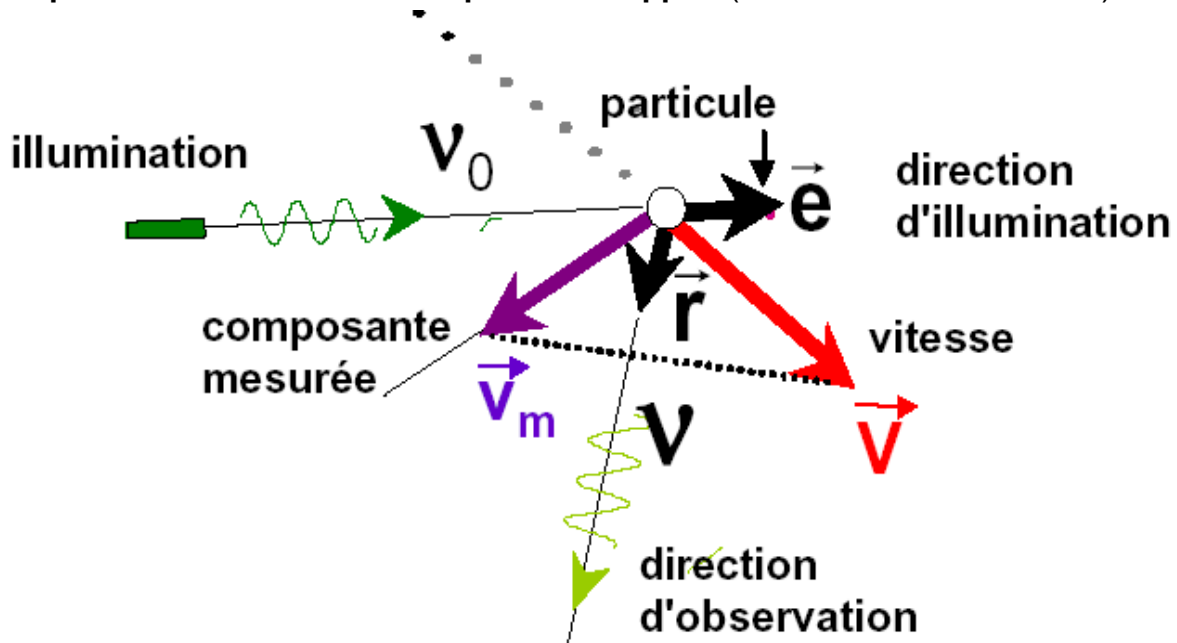
On constate qu'en plus de lasers de précision, et de longueurs d'onde distinctes, le système de mesure va nécessiter un outil (informatique ou électronique) de traitement du signal adapté à la concentration de diffuseurs.

3 bis) Une autre méthode de mesure par effet Doppler.

a) Principe

Le fluide est illuminé par un plan de lumière laser. Les particules en suspensions dans le fluide vont diffuser cette lumière incidente, et, puisqu'elles sont animées d'une vitesse, la fréquence de l'onde diffusée va être modifiée par effet Doppler. L'analyse de cette fréquence permet de remonter à la vitesse des particules dans une direction dépendant de la direction d'observation.

Principe de la mesure de vitesse par effet Doppler (source : document Onera).



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

Cependant la vitesse d'écoulement du fluide donc des particules en suspension est très faible devant la vitesse de la lumière donc cette différence de fréquence va être difficile à repérer et quantifier. On résout ce problème en utilisant une cellule à iode.

b) Dispositif de mesure et cellule à iode.

Afin de mesurer l'écart de fréquence dû au mouvement des particules on sépare le signal diffusé par la particule en deux. Le premier est enregistré directement sur une caméra : c'est le signal de référence, alors que le second passe au travers d'une cellule à iode avant d'atteindre à son tour une caméra. Une cellule à iode est une enceinte

contenant de l'iode gazeux. En choisissant bien le laser source on peut faire en sorte qu'il corresponde a un front ascendant ou descendant d'une des bandes d'absorption du diode. Dès lors une très légère variation de fréquence entraînera une grosse absorption de la part du diode. Ainsi en comparant les intensités du signal a la sortie de la cellule à iode et le signal de référence on peut déterminer la fréquence de l'onde diffusée par la particule en mouvement et donc le décalage en fréquence recherchée.

Ici encore le traitement est relativement lourd et délicat, un inconvénient dont on s'affranchit avec d'autres méthodes comme la strophotométrie (cf annexe s.v.p.).

EN CONCLUSION.

Nous avons donc dressé une liste (non exhaustive) des méthodes de mesure de vitesse dans le champ d'un fluide en mouvement. Les avantages des méthodes optiques en matière de précision de et perturbation de l'écoulement par rapport aux méthodes traditionnelles sont considérables. Cependant la lourdeur du matériel mis en oeuvre et l'opération de traitement de signaux liés a ces méthodes sont les causes majeures de leurs limites. De plus il s'avère sans cesse nécessaire d'ensemencer le fluide de « mouchards » afin de mesurer sa vitesse. Il est néanmoins possible de mettre au point des techniques où l'on s'affranchit de cette opération mais leur utilisation nous a semblé marginale (et leur principe bien complexe...).

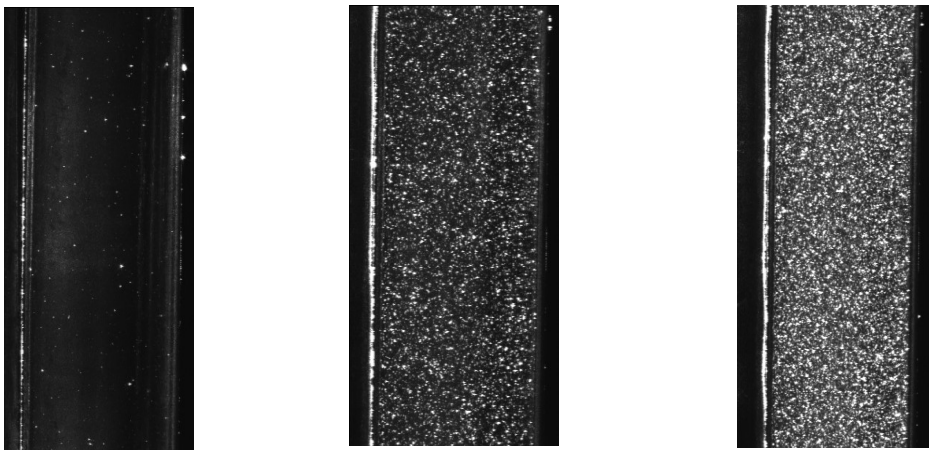
ANNEXE 1 : Choix des particules d'ensemencement (mouchards)

Ceci constitue aussi une des tâches les plus difficiles pour que la mesure par PIV puisse avoir des résultats significatifs ; en effet il faut que leur taille soit suffisamment petite afin d'éviter leur sédimentation et qu'elles ne possèdent pas leur propre vitesse, différente de celle de convection des particules fluides. Il est nécessaire qu'elles n'interagissent pas entre elles.

Toutefois, les traceurs doivent aussi diffuser suffisamment la lumière pour assurer un enregistrement correct et cela interdit donc l'usage de particules de diamètres trop faibles. On fera appel à des particules de diamètre de l'ordre de 1 à 10 μm . Un autre facteur important est la concentration des traceurs au sein de l'écoulement. Si elle est trop élevée, les particules sont difficilement discernables sur les enregistrements. Dans ce cas l'image présentera une apparence nébuleuse avec des tâches multiples qui se déplacent, le mode diffusion de lumière ne sera plus le même .

En ce qui concerne la technique PIV, la concentration est telle que les images individuelles des particules sont visibles. Néanmoins si la concentration est trop faible, les particules ne seront pas distribuées partout ; il est alors difficile de connaître la distribution de vitesse en tout point du champ étudié. Il faut donc ajuster la concentration des traceurs de telle sorte qu'elle soit la plus élevée possible tout en restant en mode PIV. En pratique, la concentration est de 10^{10} à 10^{11} particules par m^3 .

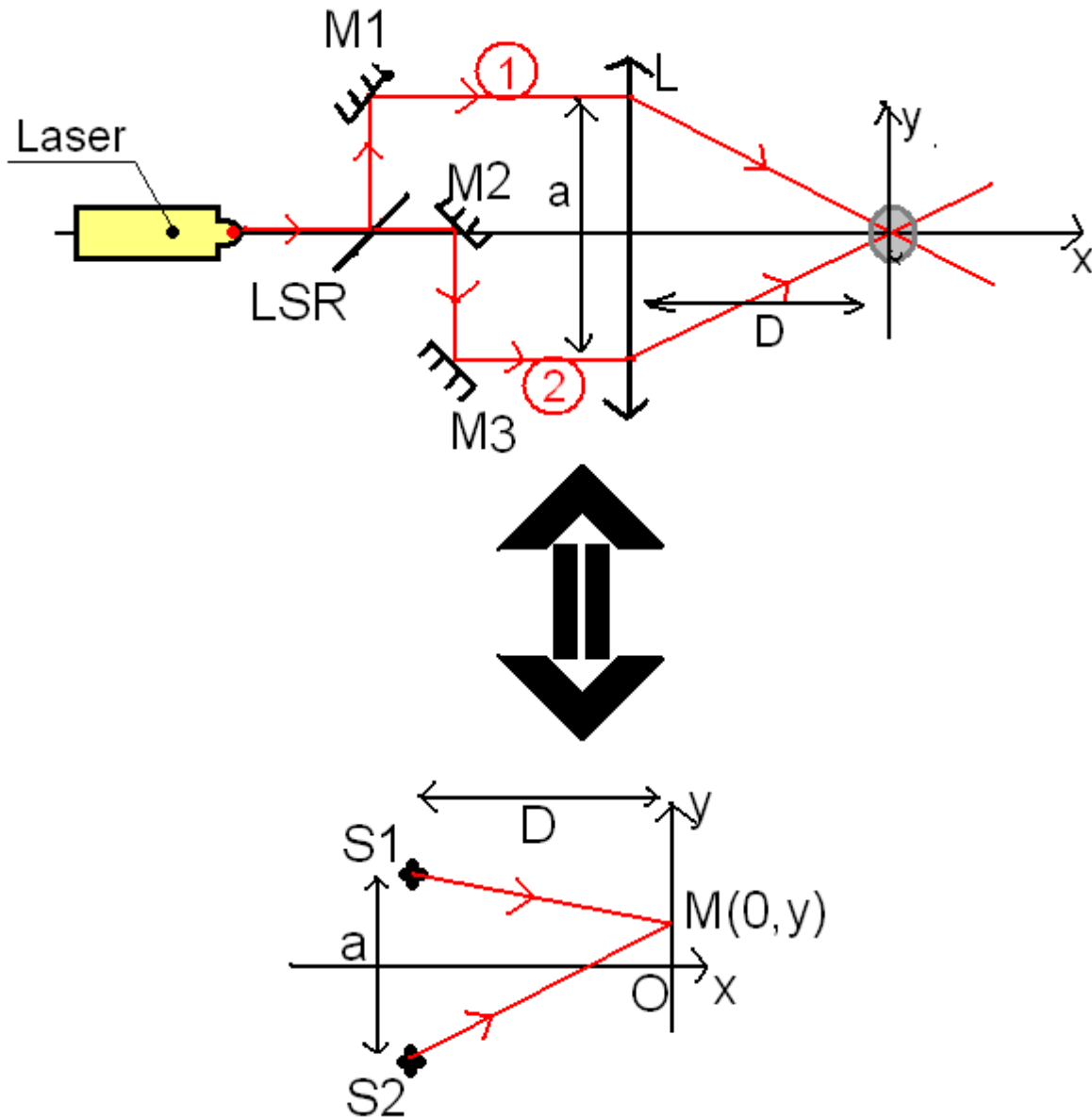
Nous présentons ci-après trois concentrations de particules différentes dont seule la seconde conduit à une bonne détermination du champ de vitesse en PIV .



Images de concentrations différentes pour l'étude de l'écoulement dans un tube d'échangeur thermique : a) peu dense, b) bon ensemencement pour la PIV, c) très dense (mesures PIV en mode "speckle" possibles néanmoins).

ANNEXE 2 : calcul de l'éclairement.

Dispositif équivalent :



Le dispositif est équivalent à deux sources cohérentes déphasées de π par réflexion vitreuse (un paquet d'onde empruntant le chemin 2 subit une réflexion vitreuse en plus).

En un point M la différence de marche entre un paquet d'onde issue de S1 et issue de S2 est donnée par :

$$\delta = \sqrt{\left(\frac{a}{2} + y\right)^2 + D^2} - \sqrt{\left(\frac{a}{2} + y\right)^2 - D^2}$$

En mettant D en facteur qui est grand devant a et y on peut faire un développement limité à l'ordre 1 :

$$\delta = D \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{a}{2} + y\right)^2}{D^2} + 1} - \sqrt{\frac{\left(\frac{a}{2} - y\right)^2}{D^2} + 1}$$

$$\delta = D \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{a}{2} + y\right)^2}{D^2} - 1 - \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{a}{2} - y\right)^2}{D^2}\right)$$

$$\delta = D \cdot \left(\frac{ay}{2D^2} - \left(\frac{-ay}{2D^2}\right)\right)$$

$$\delta = \frac{ay}{D}$$

Ainsi le déphasage total en M(0,y) est de $\phi = \frac{ay}{D} + \pi$.

L'éclairement est la moyenne temporelle de la somme des signaux lumineux interférant :

$$\Psi_1 = A e^{i(\omega \cdot t - k \cdot x)}$$

$$\Psi_2 = A e^{i(\omega \cdot t - k \cdot x + \phi)}$$

$$E = \|\Psi_1 + \Psi_2\|^2$$

$$E = (\Psi_1 + \Psi_2) \cdot (\overline{\Psi_1} + \overline{\Psi_2})$$

$$E = 2 E_0 + E_0 e^{i\phi} + E_0 e^{-i\phi}$$

$$E = 2 E_0 \cdot (1 + \cos(\phi))$$

ANNEXE 3 : Strophotométrie.

La strophotométrie reprend dans les grandes lignes le principe de fonctionnement du système précédent basé sur les interférences. Les avantages et inconvénients sont les mêmes en ce qui concerne notamment l'ensemencement et la lourdeur du matériel mis en oeuvre. Il convient de noter toutefois que dans ce système, l'observation peut être totalement visuelle et ne nécessite alors aucun élément de traitement du signal.

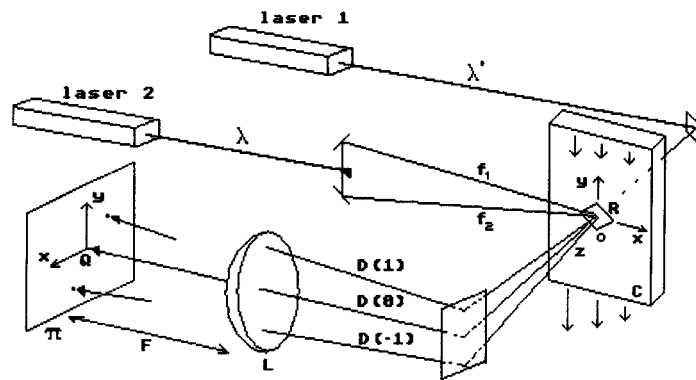


Figure 3.1 – Schéma du strophotomètre ([FAR] p. 175)

Cette méthode est constituée de deux étapes, qui reposent sur deux parties du système : tout d'abord, des marqueurs photochromes introduits dans le fluide sont éclairés à l'aide du système précédent, muni d'un laser puissant (laser 2). On obtient des lignes sombres aux endroits qui ont été réellement éclairés, c'est-à-dire aux raies lumineuses de la figure d'interférence.

La deuxième étape repose sur un second laser (laser 1) de puissance moindre, dont la lumière va être diffractée par le réseau créé par le premier laser et modifié par le déplacement dans le fluide. L'observation de la figure de diffraction donne alors les renseignements sur le champ de vitesse dans le fluide.