

# SOMMAIRE

<b>Remerciements</b>	<i>page 3</i>
<b>Jour après jour</b>	<i>page 4</i>
<b>Introduction</b>	<i>page 6</i>
<b>A. Présentation du laboratoire</b>	
1. Le CREST	<i>page 8</i>
<b>B. Présentation et description de la manipulation</b>	
1. Présentation	<i>page 12</i>
2. Principe de la vélocimétrie par imagerie	
a) La vélocimétrie 2D et 3D	<i>page 13</i>
b) La RVV	<i>page 16</i>
3. Calculs d'incertitudes	
a) Origines des incertitudes sur les mesures	<i>page 18</i>
b) Calcul de l'incertitude	<i>page 18</i>
c) Résultats – Interprétations	<i>page 19</i>
4. Acquisitions et résultats	
a) Acquisition des images	<i>page 20</i>
b) Traitements d'image	<i>page 21</i>
c) Résultats expérimentaux	<i>page 22</i>

## **C. Caractérisation du spectre continu**

### **1. Système optique : dispersion**

- a) Description du système
- b) Etude du réseau

*page 26*

*page 27*

### **2. Méthode de caractérisation**

- a) Principe de la caractérisation
- b) Pilotage LabView
- c) Traitement d'image

*page 30*

*page 32*

*page 33*

### **3. Résultats - Interprétations**

*page 34*

## **Conclusion**

*page 35*

## **Bibliographie**

*page 36*

# Remerciements

J'ai eu la chance d'effectuer mon stage au sein du laboratoire du Centre de Recherche sur les Ecoulements, les Surfaces et les Transferts (CREST).

Je remercie le professeur J.-P. Prenel, directeur du CREST, de m'avoir accueilli dans son laboratoire. Je tiens aussi à remercier le docteur Yannick Bailly, mon maître de stage, pour l'aide qu'il a pu m'apporter.

Je remercie également M. Didier Zibret, avec qui j'ai eu le plaisir de travailler dans l'élaboration de sa thèse, pour son encadrement et ses conseils, ainsi que toutes les personnes travaillant au CREST pour leur accueil et leur sympathie.

Enfin, je remercie le technicien Laurent Callegari pour les solutions techniques qu'il a pu apporter, ainsi que Jean-Elysée Rakotoniaina, François Guermeur et Laurent Girardot qui ont pris le temps de répondre à mes questions et de palier à certaines absences de mon maître de stage ou de mon responsable.

# Jour après jour

- **Semaine 1** (12 au 16 mai) : Le début de mon stage me permet de découvrir la manipulation et d'être présenté au personnel employé au CREST. On me fournit des documents me permettant de me familiariser avec les différents aspects de la manipulation. Les objectifs de mon stage sont fixés avec le Dr Yannick Bailly et Didier Zibret : il s'agit de caractériser un spectre de lumière blanche pour connaître la répartition des différentes longueurs d'onde. Je participe à ma première mise en eau du système, et apporte une première contribution en optimisant l'éclairement par le spectre de lumière blanche.
- **Semaine 2** (19 au 23 mai) : La deuxième semaine est essentiellement consacrée aux acquisitions et tests, après une vidange et le nettoyage des cuves. Avec l'aide d'un technicien, nous prenons les cotes permettant de réaliser un système de caractérisation du spectre après avoir correctement placé le banc optique. Ce système sera constitué d'une table à déplacement micrométrique 3D, d'un bras permettant l'accès au spectre et d'un bloc de résine contenant des particules diffusantes.
- **Semaine 3** (26 au 30 mai) : On me confie la tâche d'analyser les différentes images obtenues la semaine précédente grâce au logiciel Matrox Inspector, puis d'effectuer un calcul d'incertitudes sur nos mesures dues aux différences de milieux optiques (air, plexiglas et eau). Pour cela je dispose de documentations sur d'anciennes manipulations du même type. Je découvre le logiciel de pilotage de la table micrométrique, LabView, et procède à quelques essais avec un premier bloc de résine. Je commence également la rédaction du rapport de stage.
- **Semaine 4** (2 au 6 juin) : La majorité du personnel se rend à un Congrès Scientifique International à Chamonix organisé par le CREST. Pendant ce temps, je dois mettre en place le système de caractérisation du spectre : il me faut un nouveau bloc de résine, puis je devrai effectuer des essais avec le bras. Malheureusement, les problèmes techniques (résine manquante, bras non adapté) et informatiques (drivers manquant pour Matrox) me retardent et je ne peux finir les manipulations à temps. Ces problèmes résolus en fin de semaine, je pourrai terminer mes essais dès la semaine suivante.
- **Semaine 5** (9 au 13 juin) : Dès que la confection du nouveau bras est achevée, je continue mes essais, mais le bloc de résine ne convenant pas, il faudra en usiner un nouveau. On installe également un cylindre d'incidence  $15^\circ$  pour les manipulations. En attendant, je réalise des schémas et une traduction pour la calibration du débitmètre, avant de réaliser les manipulations avec le cylindre incliné. Je découvre également les logiciels MatLab et OpenGL, utilisés respectivement pour tracer différents graphes et pour visualiser les résultats (champs de vecteurs) en 3D.
- **Semaine 6** (16 au 20 juin) : Les visualisations du 13/06 ne sont pas exploitables, sans doute à cause du changement d'objectif sur la caméra. Je dois également étirer le faisceau sur toute la hauteur de la veine dans le but de visualiser l'ensemble des allées tourbillonnaires de Von Karman, pour cela j'utilise une lentille cylindrique de focale 22mm. Mais cet éclairage n'est pas utilisé de suite car aucune des caméras ni

appareils photos disponibles au laboratoire ne permet de visualiser l'écoulement dans cette configuration. Je définis les cotes du bloc de résine à mouler qui sera utilisable la semaine prochaine.

- **Semaine 7** (*23 au 27 juin*) : Cette semaine est essentiellement consacrée à la rédaction du rapport de stage. Parallèlement, j'effectue les tests pour la caractérisation qui permettent de valider les dimensions du bloc de résine. Je me consacre également à l'étude du réseau de diffraction. Un premier exemplaire papier du rapport est remis en fin de semaine à mon responsable, et montré aux professeurs MM. SAMSO et KEMPF lors de leur visite au laboratoire.
  
- **Semaine 8** (*30 juin au 4 juillet*) : La dernière semaine de mon stage nous permet d'effectuer les visualisations destinées au traitement d'image avec le cylindre en incidence normale ainsi que le lancement de la caractérisation du spectre. Malheureusement, le temps me manque pour participer pour les manipulations avec le cylindre en incidence.

# Introduction

Pour l'étude des écoulements fluidiques (en hydrodynamique et aérodynamique), l'optique constitue un procédé non intrusif ne perturbant en rien l'écoulement, contrairement aux capteurs mécaniques. L'éclairement de l'écoulement, l'acquisition et l'analyse d'images permettent la caractérisation d'un écoulement, c'est à dire la détermination des différents flux. Dans le but d'obtenir des informations tridimensionnelles, les dernières recherches mettent en œuvre un éclairage par spectre de lumière blanche, qui permet de coder l'une des dimensions par une information de couleur. Cette technique d'éclairage est nommée RVV.

C'est dans cet axe de recherche que M. Didier Zibret effectue sa thèse, en étudiant l'écoulement d'un fluide autour d'un profil dans un tunnel hydrodynamique vertical. Cette thèse est l'une des premières mettant en œuvre l'éclairage polychromatique par dispersion de la lumière blanche dans le but de valider cette méthode. J'ai pu apporter ma contribution à son travail, notamment pour caractériser le spectre de lumière blanche et ainsi établir une matrice permettant de décoder l'information de couleur donnée par les acquisitions pour obtenir une information de profondeur. Après des acquisitions réalisées à l'aide de Matrox Inspector, la chaîne de traitement d'image mise au point par M. Zibret sous Matlab permet d'obtenir un champ de vecteurs vitesse tridimensionnel.

# **A. Présentation du laboratoire**

## 1. Le CREST

Le Centre de Recherche sur les Ecoulements, les Surfaces et les Transferts est une unité Mixte de Recherche du CNRS implanté sur deux sites : le Parc Technologique de Belfort et le Pôle Universitaire des Portes du Jura de Montbéliard. Des chercheurs de l'Université de Franche-Comté (UFC) et de l'Université Technologique de Belfort-Montbéliard (UTBM) y collaborent sous la direction du professeur Jean-Pierre Prenel.

Les thématiques de recherche du CREST sont développées au sein de trois équipes :

### → ECOT : Ecoulements et Transferts

Dirigée par le professeur Panday, cette équipe travaille dans le domaine de la mécanique des fluides et des transferts thermiques et massiques. Les travaux sont classés en quatre groupes :

- Les écoulements diphasiques fluide-particules solides, qui sont les bases de développement de méthodes de calcul spécifiques pour la modélisation de ces écoulements.  
*Applications* : Moteurs thermiques, turbines à gaz (pollution, combustion).
- Les écoulements diphasiques liquide-vapeur : ces travaux concernent l'étude de la condensation de la vapeur et de l'évaporation des liquides sur des surfaces solides. Ces études impliquent la mise au point de programmes de calculs numériques et de bancs d'essais spécifiques pour caractériser les écoulements.  
*Applications* : systèmes de climatisation de voiture, échangeurs
- Les échanges thermiques monophasiques : les études (encore au stade des essais) des échanges thermiques sur des surfaces structurées ont entraîné le développement d'un banc d'essais et d'un programme de calculs numériques.  
*Applications* : systèmes de refroidissement d'air
- L'estimation des caractéristiques thermophysiques des matériaux : ces travaux concernent le développement des algorithmes de calcul pour les problèmes inverses mal posés en utilisant des données expérimentales et sont destinés à l'estimations des flux thermiques et des coefficients d'échanges locaux où les mesures directes ne sont pas possibles.  
*Applications* : freinage des véhicules, boucliers thermiques pour l'espace, les traitements thermiques.

### → IRMA/REV : Interaction Rayonnement Matière et Revêtements

L'équipe IRMA étudie les effets radioinduits dans la matière, les capteurs et leur environnement sous la direction du professeur Makovicka. Elle dispose de moyens informatiques importants et travaille en collaboration avec des industries locales, nationales et internationales. Les principaux travaux sont :

- La réalisations de nouveaux programmes de simulation dans le domaine de l'interaction des rayonnements ionisant avec la matière.



- L'élaboration et l'optimisation de systèmes de mesures, notamment l'optimisation de la réponse de capteurs semi-conducteurs par exemple
- La tenue des composants et des systèmes sous effets des rayonnements, par exemple les modifications de l'indice de réfractifs dans un guide optique sous les irradiations photoniques et électroniques.
- La caractérisation des effets des rayonnements sur les matériaux, en particulier l'étude du vieillissement et des effets de contraintes
- L'étude du transport de rayonnements à travers les milieux, domaine de recherche particulièrement utile en radiophysique et en physique médicale.

L'équipe REV (revêtement) est orientée vers le traitement de surface et étudie actuellement les nouveaux matériaux utilisés ainsi que les nouveaux moyens de déposer des traitements. En partenariat avec le CTTS (centre de Transfert de Traitement de Surface), le CREST accueille les travaux de recherche fondamentale.

## → **MiNaDO : Micro et Nanotechnologies et Diagnostic Optique**

Sous la direction du professeur Labrune, l'équipe MiNaDO travaille selon différents thèmes de recherche :

- Instrumentation Systèmes Fluidiques Energique Echelle Réduite : cette équipe a pour axe de recherche la confection de microcapteurs spécifiques et leur implantation, dans des domaines très variés tels que la mécanique de fluides (micro débitmètre), les transferts de chaleur (micro thermocouple), la thermoacoustique (application aux échappements automobiles).
- Métrologie Optique : une équipe qui a connu un gros essor avec l'introduction de la lumière laser. La recherche actuelle porte essentiellement sur la caractérisation de phénomènes tridimensionnels, une caractérisation géométrique (position de tourbillons) ou physique (vecteurs vitesse).
- Métrologie Thermique : un domaine en pleine expansion du fait de l'avènement des microtechniques où les besoins en capteurs sont particulièrement élevés. L'équipe du CREST développe des micro-thermocouples dans une gamme de 7,6 à 0,5  $\mu\text{m}$ . L'information thermique permet d'accéder à des paramètres physiques comme la vitesse, le débit, la distance...
- Electronique des Solides : cette équipe développe des recherches dans le domaine des nanotechnologies et de la microtechnique concernant le stockage de l'information selon deux axes de recherche : l'élaboration de couches minces à propriétés magnétiques spécifiques et l'étude des propriétés piézo-électriques et ferroélectriques de couches minces.
- Caractérisation Micrométrique des Surfaces : l'équipe CMS utilise la microscopie et la profilométrie pour étudier la structure des matériaux. La microscopie acoustique utilisée permet d'imager les couches subsurfaces des matériaux opaques et de découvrir leurs paramètres

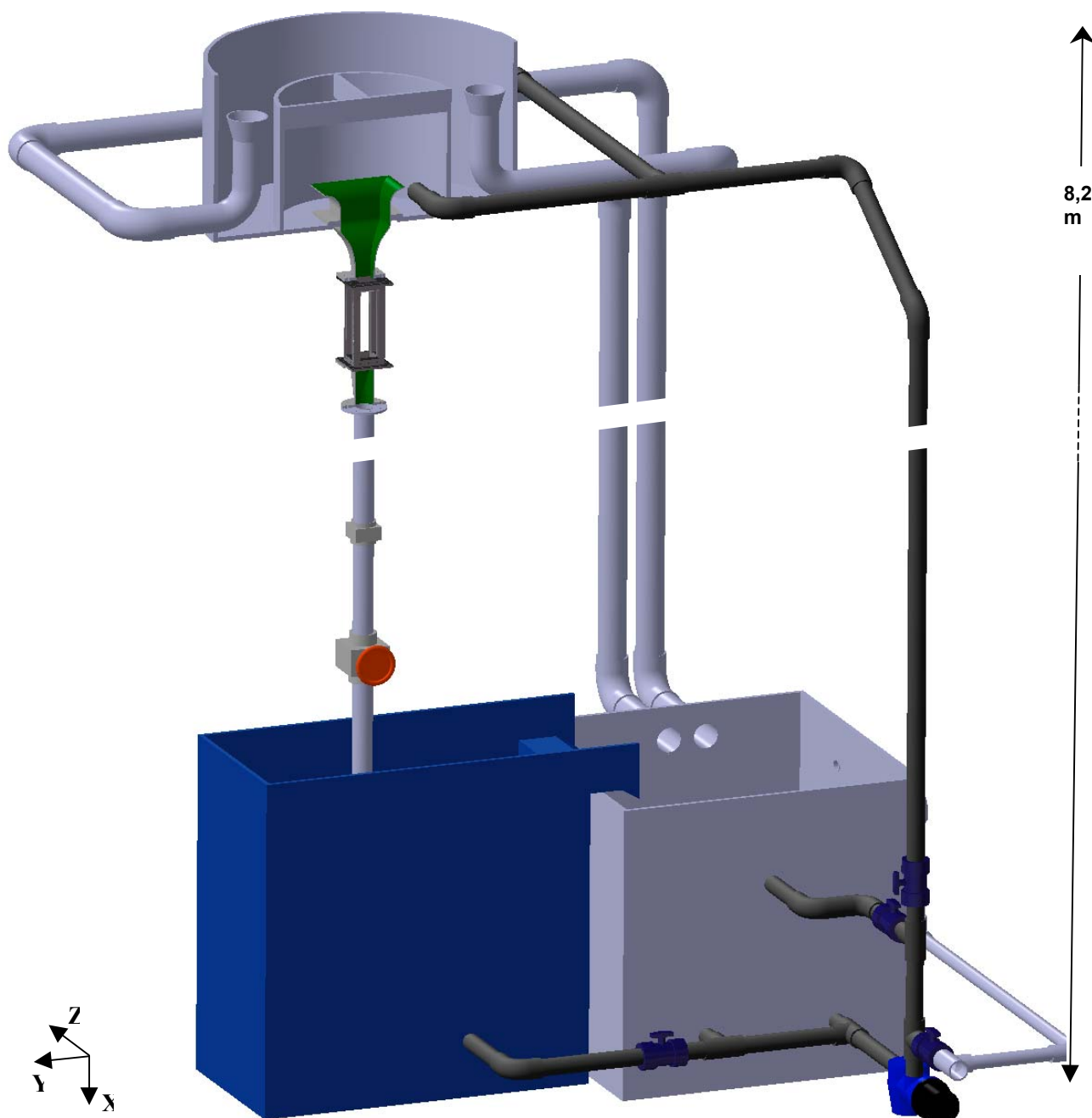
physiques (densité, viscosité, topographie). La profilométrie 3D permet de caractériser des surfaces telles que des échantillons industriels (pièces traitées), minéraux (érosions de pierres naturelles) ou biologiques (peau humaine).



## **B. Présentation et description de la manipulation**

## 1. Présentation

Toutes les expériences et les acquisitions faites au cours de mon stage se sont déroulées sur un tunnel hydrodynamique vertical, où une veine en plexiglas permet d'observer l'écoulement. Un profil (dans ce cas un tube de diamètre 8 mm) est fixé perpendiculairement à la veine, l'objectif étant d'observer le comportement du fluide en aval de ce profil. L'écoulement estensemencé de particules de rilsan, de diamètre moyen  $80\text{ }\mu\text{m}$ . Ces particules ont été choisies pour leur couleur très blanche afin de diffuser la même longueur d'onde que celle d'éclairage, ce sont elles qui matérialiseront l'écoulement.



*Fig. 1.1 : Schéma du tunnel hydrodynamique*



*Fig. 1.2 : Photographie du tunnel (réservoir supérieur)*

## 2. Principe de la vélocimétrie par imagerie

La vélocimétrie est la mesure de vitesse. La vélocimétrie par imagerie consiste à mesurer une vitesse par le traitement des images acquises lors du déplacement étudié.

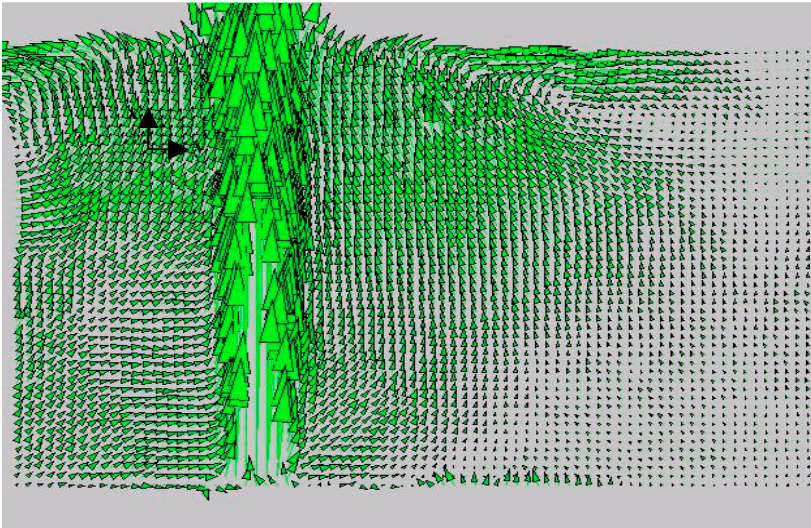
### a) La vélocimétrie 2D et 3D

Il existe différents types de vélocimétrie par imagerie, la plupart étant limitées à 2 dimensions par la projection de l'image dans un plan. Les trois principales techniques de vélocimétrie par imagerie sont :

- ☞ la **PIV** : Particle Image Velocimetry, la vélocimétrie par imagerie de particules,
- ☞ la **PTV** : Particle Tracking Velocimetry, la vélocimétrie par suivi de particules,
- ☞ la **PSV** : Particle Streak Velocimetry, la vélocimétrie par éléments de trajectoire de particules.

Dans les systèmes de mesure de vitesse par **PIV**, l'éclairement se fait par nappe laser pulsée. Ainsi, une première impulsion éclaire un plan et la position des particules est enregistrée, puis on envoie une deuxième impulsion après un temps  $\Delta t$  éclairant le même plan et on enregistre une seconde position des particules. On peut ainsi déterminer les déplacements  $\Delta x$  et  $\Delta y$  pendant la durée  $\Delta t$ , on « reconnaît » les particules grâce à la transformation de Fourier dans de petites zones d'étude balayant toute l'image. On obtient alors les vitesses instantanées dans le plan de mesure :

$$V_x = \Delta x / \Delta t \quad \text{et} \quad V_y = \Delta y / \Delta t$$

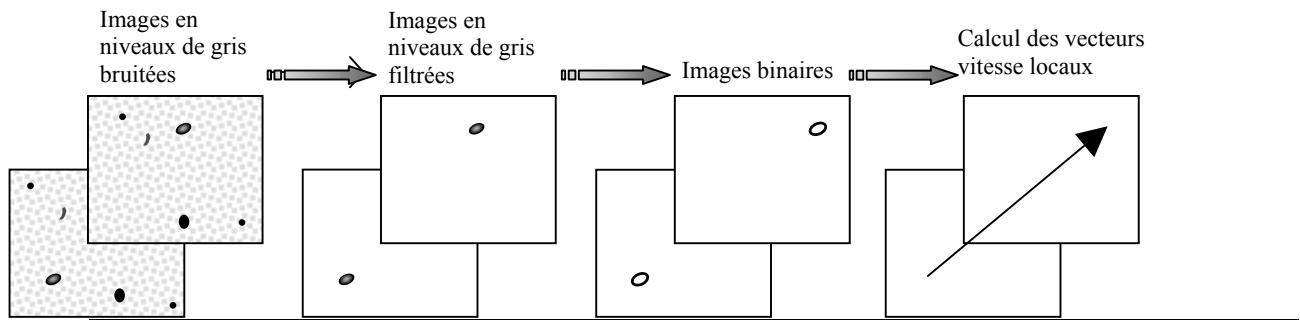


*Fig. 2.1 : Exemple de champs de vecteur vitesse obtenu à partir de PIV*

Dans le cas de vélocimétrie par suivi de particules (**PTV**), on injecte moins de particules pour permettre une meilleure compréhension des résultats. Il s'agit d'enregistrer sur une même image plusieurs positions des particules séparées d'une durée  $\Delta t$  définie par l'éclairage. On peut alors suivre l'évolution de la particule et définir ainsi sa vitesse moyenne, son sens de déplacement, voire une accélération. La vitesse instantanée peut être obtenue en diminuant le temps d'exposition  $\Delta t$ .

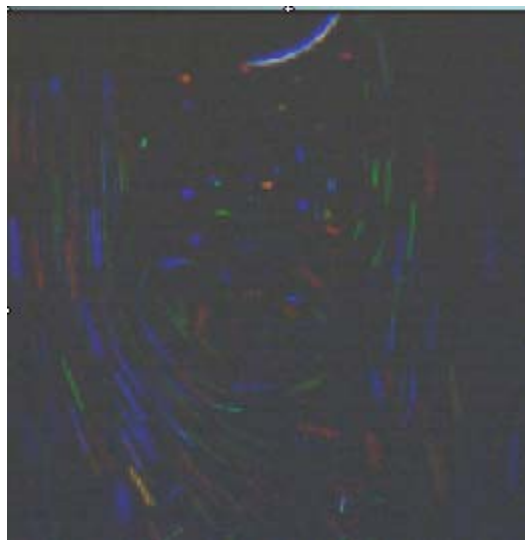


*Fig. 2.2 : Exemple d'image par PTV*

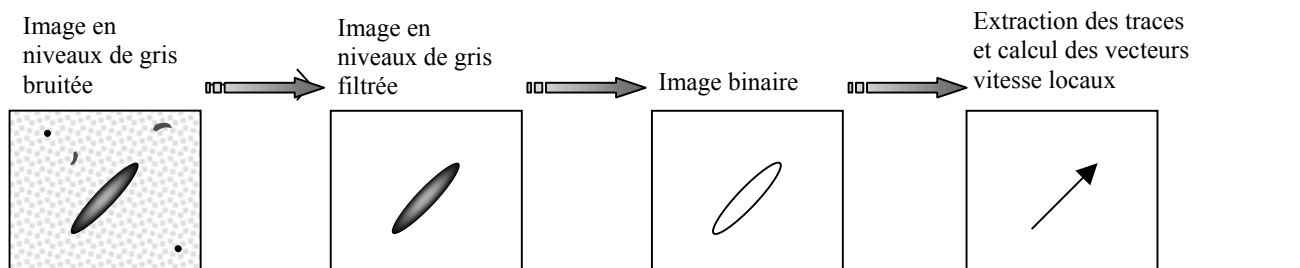


*Fig. 2.3 : Schématisation d'une exploitation en PTV*

La **PSV**, la vélocimétrie par éléments de trajectoire de particules, s'apparente à la **PTV** à la différence que, pour la **PSV**, le temps d'exposition est beaucoup plus long, ce qui permet d'obtenir des tirets plutôt qu'un ensemble de point. Il s'agit d'une sorte de trajectographie des particules dans l'écoulement. Les mesures de vitesse sont alors basées sur la norme des tirets obtenus.



*Fig. 2.4 : Exemple d'image par PSV*

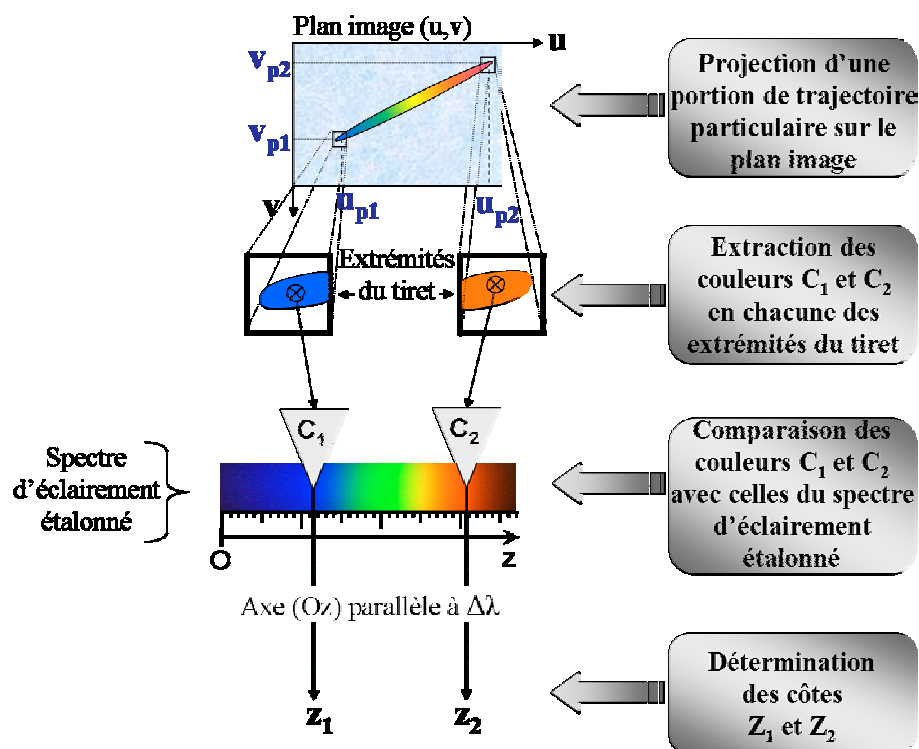


*Fig. 2.5 : Schématisation d'une exploitation en PSV*

Il est à noter que la principale différence entre les trois méthodes réside dans la densité de traceurs dans l'écoulement. Ainsi, la **PIV** est une méthode haute densité, alors que la **PSV** et la **PTV** sont des méthodes dites de basse densité. De plus, ces trois méthodes sont utilisées pour des mesures 2D mais aussi tridimensionnelles en adoptant une visualisation avec plusieurs caméras (stéréoscopique). Mais l'encombrement, le coût et les contraintes géométriques limitent les applications de ces méthodes en 3D.

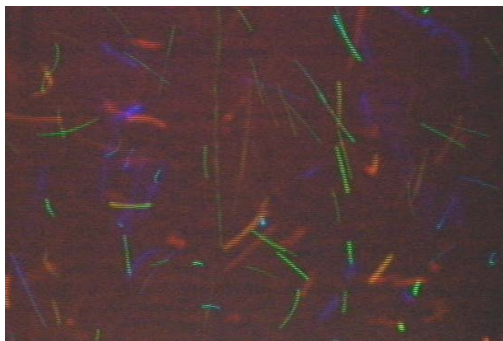
## b) La RVV

La **RVV** est la méthode utilisée pour nos expériences. La « vélocimétrie volumique polychromatique tridimensionnelle par arc-en-ciel » ou **RVV** de l'anglais Rainbow Volumic Velocimetry, consiste à éclairer l'écoulement par un volume de lumière polychromatique obtenu par dispersion de la lumière blanche (voir C. I.). Ainsi, les déplacements des particules dans le plan de la caméra sont analysés grâce à leurs coordonnées, alors que les déplacements dans un plan perpendiculaire sont codés par les changements de couleur des particules selon la profondeur. La **RVV** utilise le mode d'acquisition **PTV** (acquisition de tirets colorés) ou **PSV** (acquisition de subtirets colorés : le temps d'intégration est fractionné grâce à un shutter).



*Fig. 2.6 : Schéma de principe de la RVV*





*Fig. 2.7 : Exemple d'image par RVV*

#### *Les limites intrinsèques de la méthode :*

- ☞ L'utilisation de lumière blanche limite l'intensité lumineuse émise par rapport à l'éclairage laser. Les suites des recherches sur ce thème devraient concerner la mise en œuvre d'un spectre polychromatique en lumière laser.
- ☞ Les dispositifs actuels d'acquisitions d'image (caméra, appareil photo) ne permettent qu'une étude tridimensionnelle sur une profondeur limitée, en raison des faibles profondeurs de champ. En effet, une particule « floue » ne peut être traitée numériquement sans induire de fortes imprécisions.



*Fig. 2.8 : Problèmes de profondeur de champ*

Ce dispositif d'éclairage polychromatique compacte en est encore au stade des recherches permettant de valider cette méthode en comparaison aux méthodes citées précédemment qui sont reconnues dans le domaine de la recherche, on peut donc penser que des solutions pourront être trouvées rapidement.

### 3. Calculs d'incertitudes

#### a) Origines des incertitudes sur les mesures

Lors des acquisitions, un objectif de focale 60 mm focalise l'image en un point F (voir schéma ci dessous). L'intersection entre la direction d'un rayon et le capteur CCD de la caméra matérialise un point image. Ce point est interprété comme l'image d'une particule dans l'air par la calibration géométrique de la caméra. Or, dans notre cas, le rayon issu de la particule subit deux déviations dues aux deux dioptres eau / plexiglas et plexiglas / air. Le calcul d'incertitude permettra de quantifier l'erreur sur les différents axes introduite par ces deux dioptres, et ainsi connaître leur influence sur nos mesures.

#### b) Calcul de l'incertitude

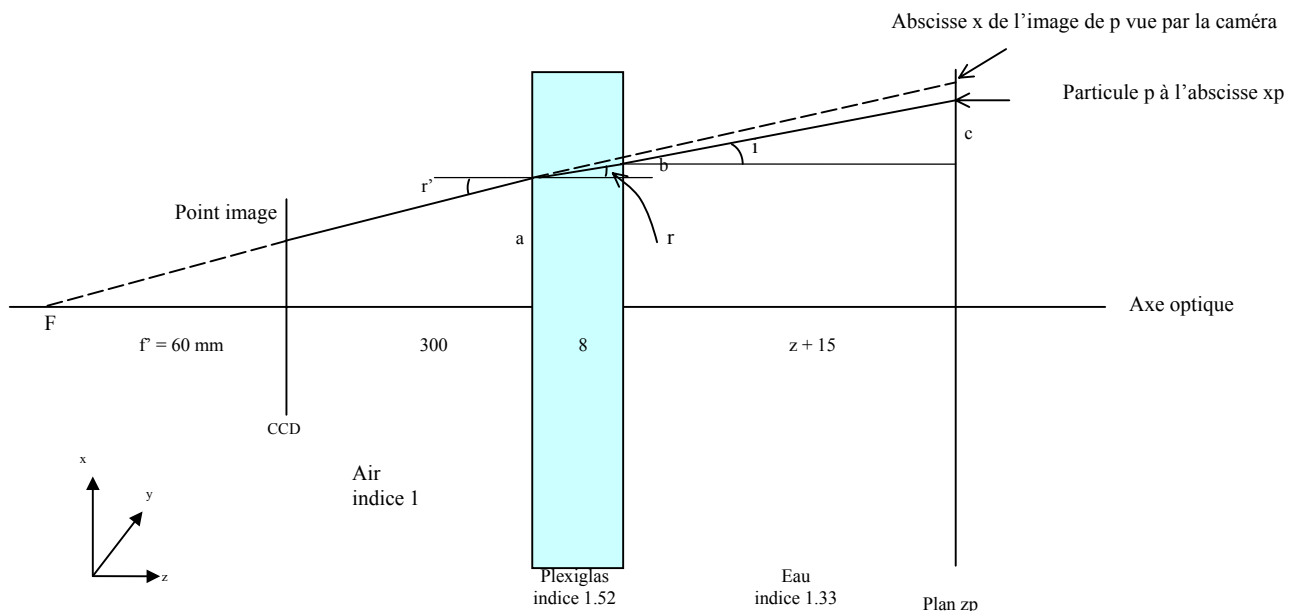


Fig. 3.1 : Schéma d'un rayon parvenant sur la caméra (coupe transversale)

Notations :	$f'$ :	focale de l'objectif, fixée à 60 mm
	$n_0, n_1, n_2$ :	indices respectifs de l'eau (1.33), du plexiglas (1.52) et de l'air (1.0)
	$i$ :	angle d'incidence du rayon issu de la particule sur le premier dioptre
	$r$ :	angle réfracté du premier dioptre, est égal à l'angle d'incidence sur le second (lame à faces parallèles)
	$r'$ :	angle réfracté du second dioptre
	$z$ :	profondeur de la particule variant entre 0 et 18 mm (largeur du spectre)
	$x$ :	abscisse de la particule vue par la caméra
	$x_p$ :	abscisse réelle de la particule
	$\Delta x$ :	incertitude sur l'abscisse

D'après la loi de Snell-Descartes, on obtient  $n_0 \sin i = n_1 \sin r$   
 $n_1 \sin r = n_2 \sin r'$

On obtient par trigonométrie  $x = \tan r' \cdot (f' + 300 + 8 + 15 + z) = \tan r' \cdot (383 + z)$  (1)

On a  $x_p = a + b + c$ , avec  $a = \tan r' \cdot 360$ ,  $b = \tan r \cdot 8$  et  $c = \tan i \cdot (z + 15)$ ,

On utilise alors les approximations d'usage pour des angles petits exprimés en radians, à savoir  $\sin \alpha = \tan \alpha = \alpha$  (dans notre cas, on a des angles d'environ 0.12 rad)

Soit, en utilisant Snell-Descartes :  $x_p = \sin r' \cdot 360 + \sin r' \cdot \frac{8 \cdot n_2}{n_1} + \sin r' \cdot \frac{(z + 15) \cdot n_2}{n_0}$   
 $x_p = \sin r' \cdot (360 + \frac{8 \cdot n_2}{n_1} + \frac{(z + 15) \cdot n_2}{n_0})$

D'après (1), on a  $\sin r' = \frac{x}{383 + z}$

Ainsi  $\Delta x = x - x_p = x - \frac{x}{383 + z} \cdot (360 + \frac{8 \cdot n_2}{n_1} + \frac{(z + 15) \cdot n_2}{n_0})$

Soit  $\Delta x = x \cdot (\frac{1}{383 + z} \cdot (360 + \frac{8 \cdot n_2}{n_1} + \frac{(z + 15) \cdot n_2}{n_0}))$ ,

D'où une incertitude relative sur  $x$  en fonction de  $z$  :  $\frac{\Delta x}{x} = (\frac{1}{383 + z} \cdot (360 + \frac{8 \cdot n_2}{n_1} + \frac{(z + 15) \cdot n_2}{n_0}))$

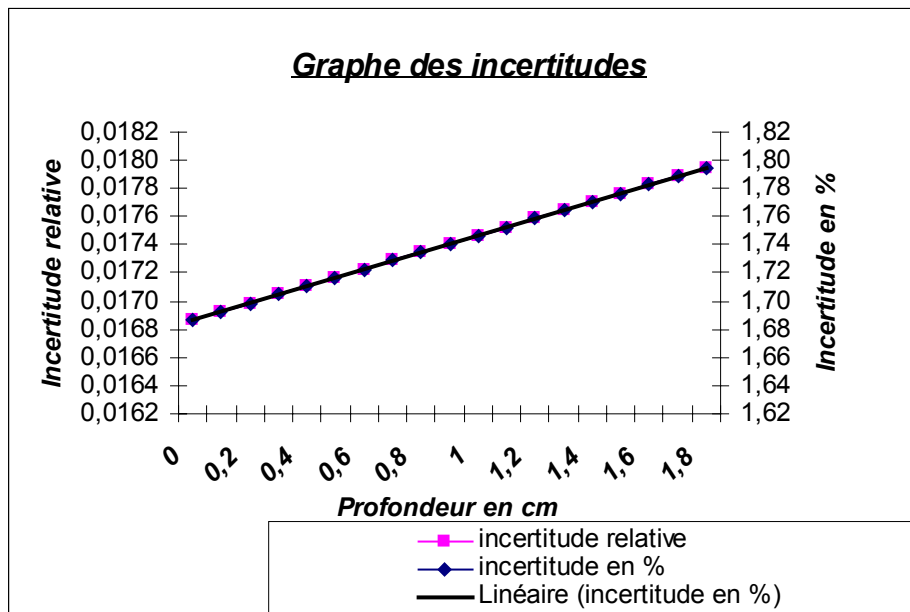
Remarque : Ces résultats sont applicables à l'axe Oy de la même façon.  
On introduit un décalage de 15 mm entre le plan d'origine de Oz et le premier dioptré.

### c) Résultats - Interprétations

Profondeur z (mm)	Incertitude relative	Incertitude en %
0	0,0169	1,6863
0,1	0,0169	1,6924
0,2	0,0170	1,6984
0,3	0,0170	1,7044
0,4	0,0171	1,7105
0,5	0,0172	1,7165
0,6	0,0172	1,7225
0,7	0,0173	1,7285
0,8	0,0173	1,7345
0,9	0,0174	1,7405
1	0,0175	1,7466
1,1	0,0175	1,7526
1,2	0,0176	1,7586
1,3	0,0176	1,7646
1,4	0,0177	1,7706
1,5	0,0178	1,7765
1,6	0,0178	1,7825
1,7	0,0179	1,7885
1,8	0,0179	1,7945

Tab 3.1. : Résultats des calculs d'incertitude

L'incertitude sur l'abscisse  $x$  est comprise entre 1.68 % et 1.80 % selon la profondeur  $z$ .



Graphe 3.2. : Résultats des calculs d'incertitude

## 4. Acquisitions et résultats

### a) Acquisition des images

Les phénomènes observés durant nos manipulations ont été étudiés pour la première fois par Théodore Von Karman, un ingénieur aéronauticien américain d'origine hongroise né à Budapest en 1881 et mort à Aix-la-Chapelle en 1963. De ses études résultent un phénomène de « lâcher de tourbillons » mis en évidence sur les prises de vue ci-dessous : ce phénomène est appelé « Allées tourbillonnaires de Von Karman ».

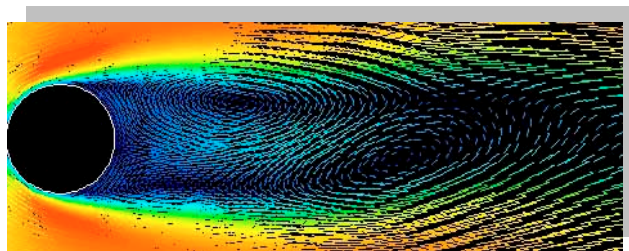


Fig. 4.1. : Allées tourbillonnaires de Von Karman (simulation)

Il existe différents types d'écoulements :

- ☞ les écoulements laminaires, où le fluide se déplace à vitesse constante en tout point de l'écoulement ( $Re < 2000$ )
- ☞ les écoulements turbulents, où la vitesse du fluide à un même point varie dans le temps ( $Re > 2000$ )

Lors des études d'écoulements, on définit les conditions d'écoulement grâce au nombre de Reynolds  $Re$ . Le nombre de Reynolds est un nombre adimensionnel de formule :

$$Re = \frac{S.v}{V}$$

Où  $S$  est le diamètre hydraulique du profil,  $v$  la vitesse d'écoulement et  $V$  la viscosité du fluide.

Dans le cas du cylindre d'incidence  $15^\circ$ , nous souhaitons travailler à  $Re = 1\,000$ , avec en guise de fluide l'eau de viscosité dynamique  $10^{-6}$  autour d'un tube de diamètre 8 mm : d'après la formule ci dessus, nous avons une vitesse d'écoulement de l'ordre de  $0.125 \text{ m.s}^{-1}$  dans la veine.

Pour les manipulations avec le cylindre d'incidence normale, nous travaillons à une vitesse donnée de  $0.044 \text{ m.s}^{-1}$  dans la veine soit un  $Re$  de 350.

Pour être capables d'exploiter les informations de couleur, les acquisitions sont réalisées à l'aide d'une caméra tri-CCD Sony. Il s'agit en fait d'une caméra renfermant trois capteurs CCD sensibles chacun à un intervalle de longueurs d'onde, correspondant au rouge, vert ou bleu. Chaque capteur traduit la proportion de rouge, vert ou bleu de chaque pixel. Les acquisitions se font à la cadence d'une image toutes les 40 ms.

Sur la caméra est monté un objectif *Nikkon micronicor 50 mm 1,4x*.

Le système est supporté par une table à déplacement 3 axes qui permet de modifier la distance caméra-veine, soit le champ de vision de la caméra, selon le type d'acquisitions souhaitées (point de décollement, allées tourbillonnaires, ensemble de la veine)

Les images sont ensuite exploitées grâce au logiciel Matrox Inspector 4.0, distribué par la société Matrox Imaging. Il s'agit d'un logiciel complet qui permet de visionner, enregistrer et exploiter les images (mesure de l'intensité lumineuse, des composantes RGB et du bruit de fond par exemple).

## **b) Traitement d'images**

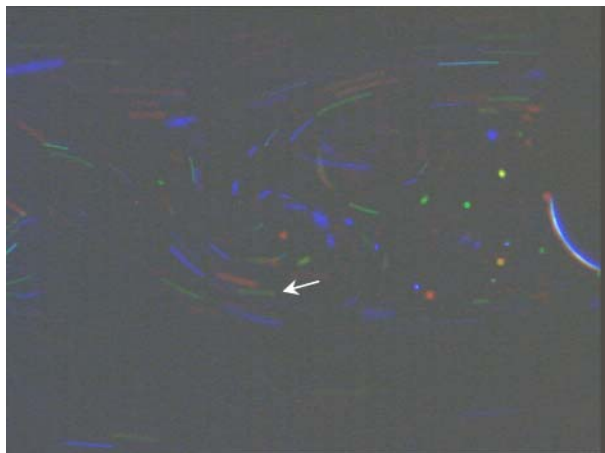
La chaîne de traitement et d'analyse d'image mise au point par D. Zibret a pour objectif de traduire les acquisitions en champ de vecteurs vitesse. Elle a été conçue sous le logiciel de traitement d'image MatLab et automatisée par un programme sous Visual C++ (programmation en langage C). Elle se décompose en plusieurs étapes :

- ☞ Traitement de l'image dans le but de la rendre exploitable : suppression du bruit de fond par seuillage, mise en évidence des particules en augmentant le contraste.

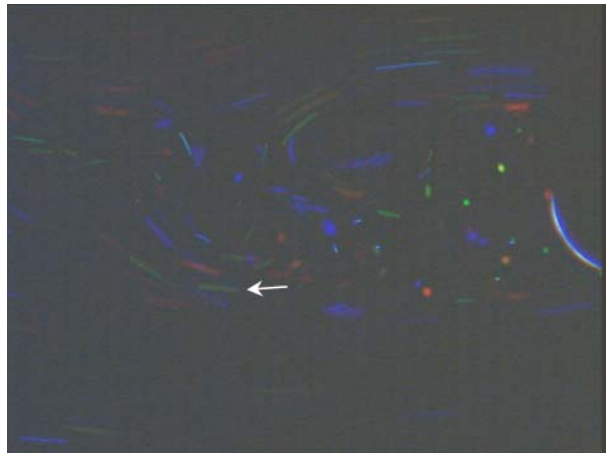
- ☞ Traduction de toutes les données numériques (position  $(X,Y)$  dans le repère image, composantes RGB) grâce aux matrices géométrique de la caméra et spatio-colorimétrique établie par la caractérisation (voir également C.2.c.).
- ☞ A partir des coordonnées spatiales  $(x, y, z)$  du repère réel et du temps d'exposition, détermination des vitesses  $(V_x, V_y, V_z)$  selon les trois dimension.
- ☞ Détermination du sens de déplacement des particules selon les pixels illuminés : le temps d'exposition est scindé en deux parties où sont consécutivement actifs les lignes de pixels paires puis impaires.
- ☞ Définition des vecteurs vitesse.
- ☞ Création de la matrice des vitesses en tout point de l'écoulement et représentation tridimensionnelle grâce au logiciel Open GL.

### c) Résultats expérimentaux

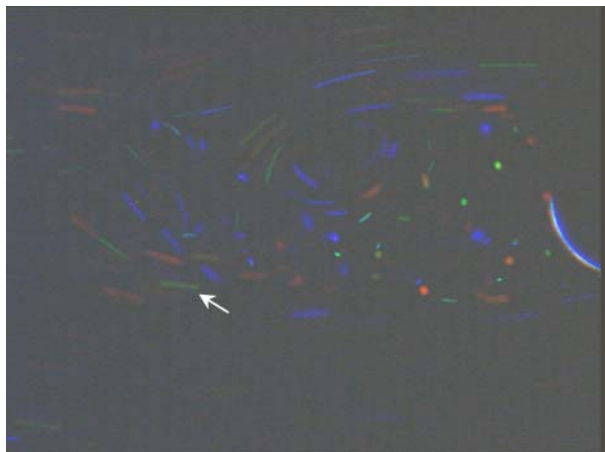
#### Acquisitions (suivi d'un traceur) :



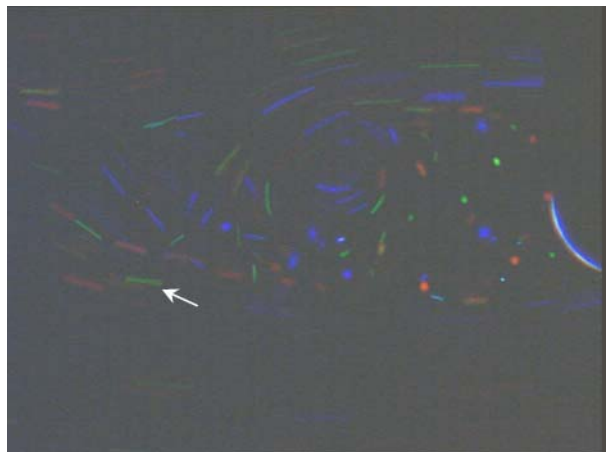
instant  $t_1$



instant  $t_2$

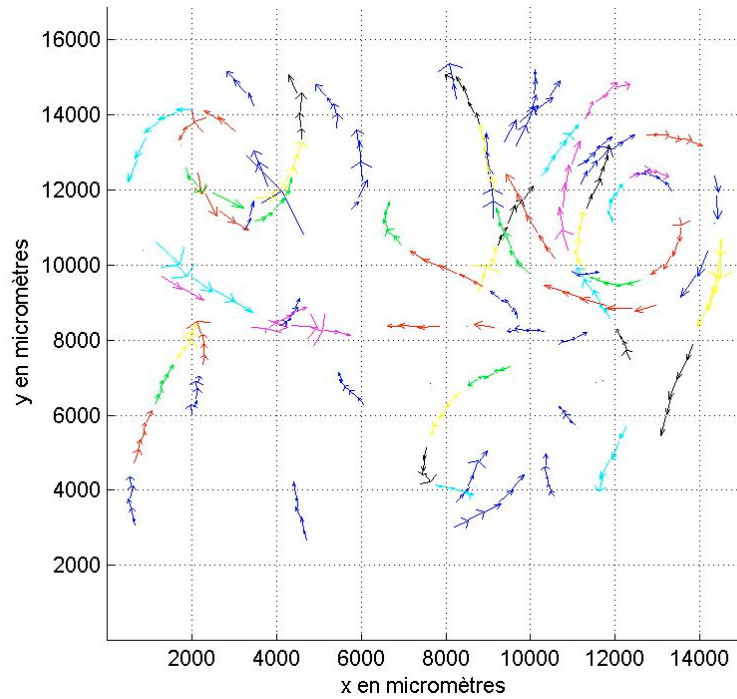


instant  $t_3$

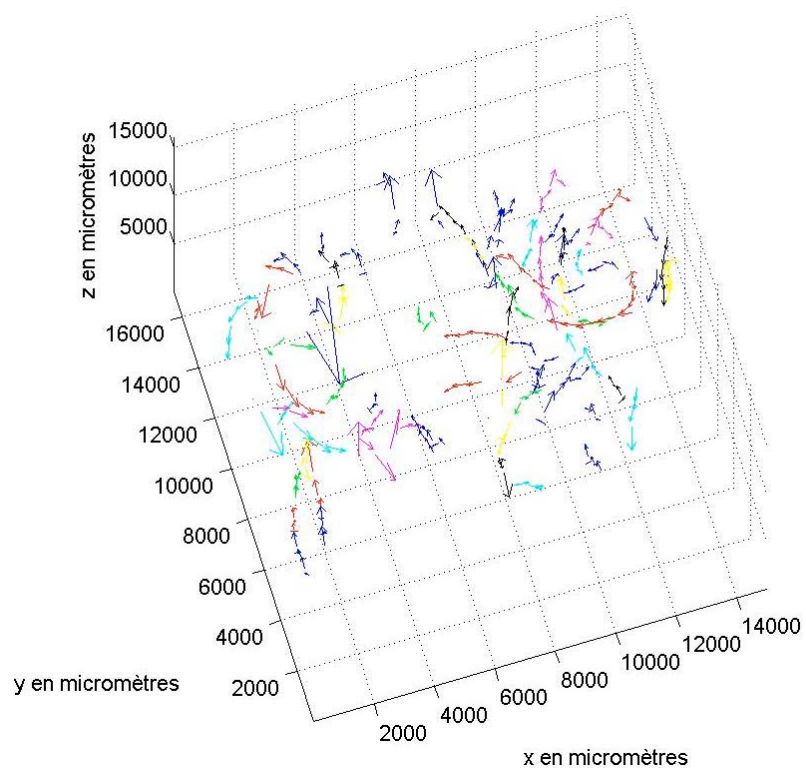


instant  $t_4$

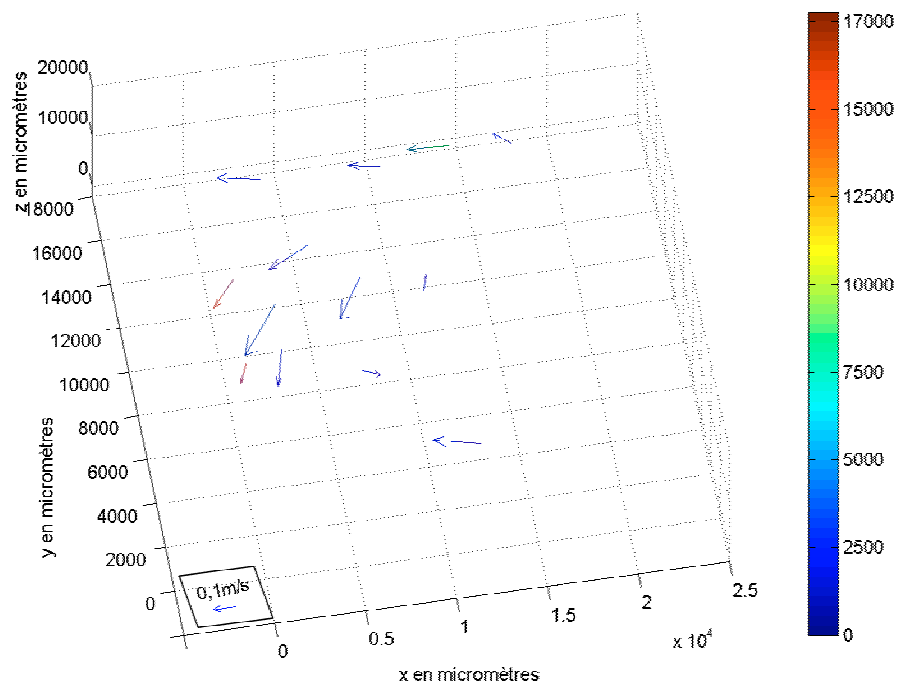
**Résultats après traitement :**



*Fig. 4.2. : Représentation typique des résultats d'acquisition en RVV*



*Fig. 4.3. : Même champ de vecteur vitesse en 3D*



*Fig. 4.4. : Autre champ de vecteur vitesse en 3D*



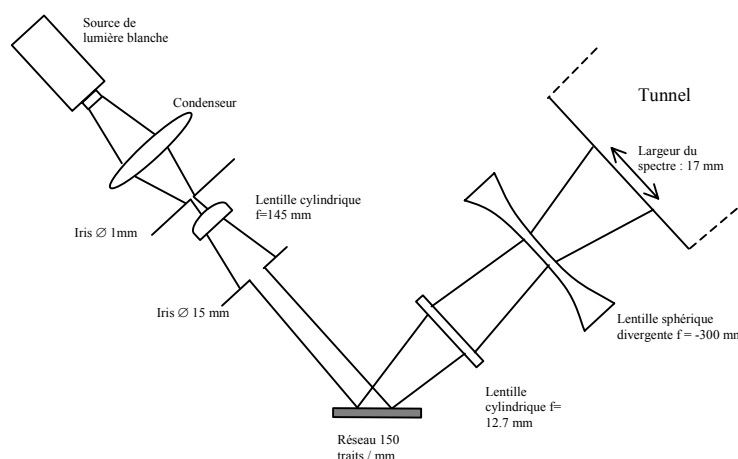
## **C. Caractérisation du spectre continu**

# 1. Système optique : dispersion

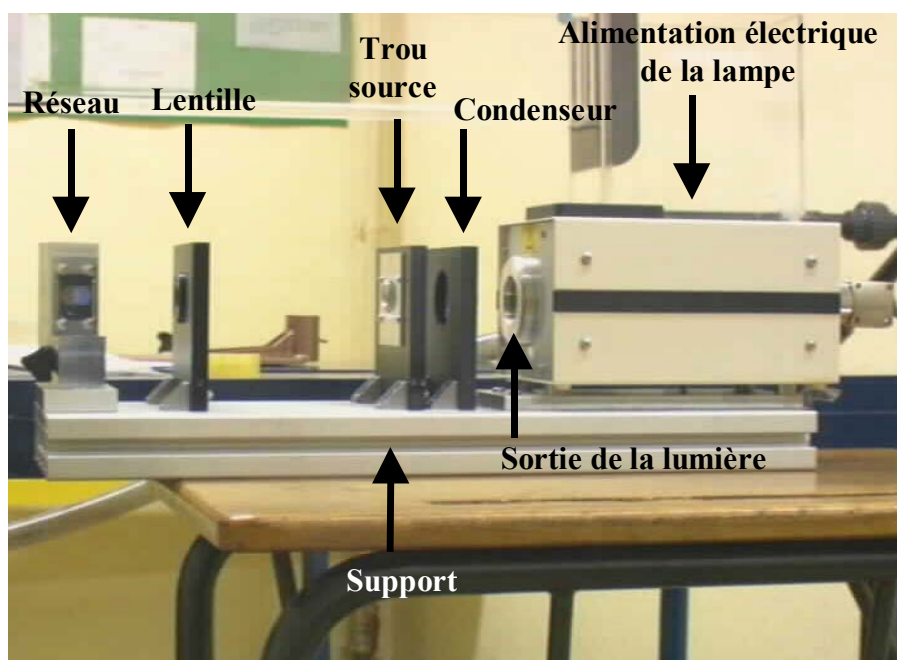
## a) Description du système

Le système optique utilisé permet d'obtenir un éclairage polychromatique de manière très simple :

Une source de lumière blanche au xénon émet, puis la lumière est concentrée et mise en forme vers un réseau de diffraction blazé sur l'ordre 1 (*voir C.I.b*). Celui-ci diffracte la lumière, on obtient ainsi un spectre de lumière blanche. A l'aide d'une lentille cylindrique de focale 6.5mm, on « éclate » le faisceau pour augmenter sa hauteur, puis une lentille sphérique divergente de focale -300mm permet de projeter ce spectre dans la veine.



*Fig. 1.1. : Système optique, vue de dessus*



*Fig. 1.2. : Photographie du système optique*

Ce montage nous permet d'obtenir un « arc-en-ciel » perpendiculaire à la direction d'observation, et permet de coder la coordonnée  $z$  par la couleur : l'origine est prise au premier plan de couleur, l'axe étant orienté dans le sens du gradient de longueur d'onde (du violet vers le rouge).

La difficulté d'interprétation lors de l'utilisation d'un tel éclairage réside dans la répartition de la couleur à l'intérieur du faisceau polychromatique après traitement par les optiques. En effet, le spectre est mis en forme par deux lentilles avant de traverser une fenêtre de plexiglas de 8 mm d'épaisseur avant de se propager dans l'eau. La caractérisation du spectre permet d'étudier cette répartition : il en découlera une matrice traduisant la correspondance entre la coordonnée  $z$  et la couleur.

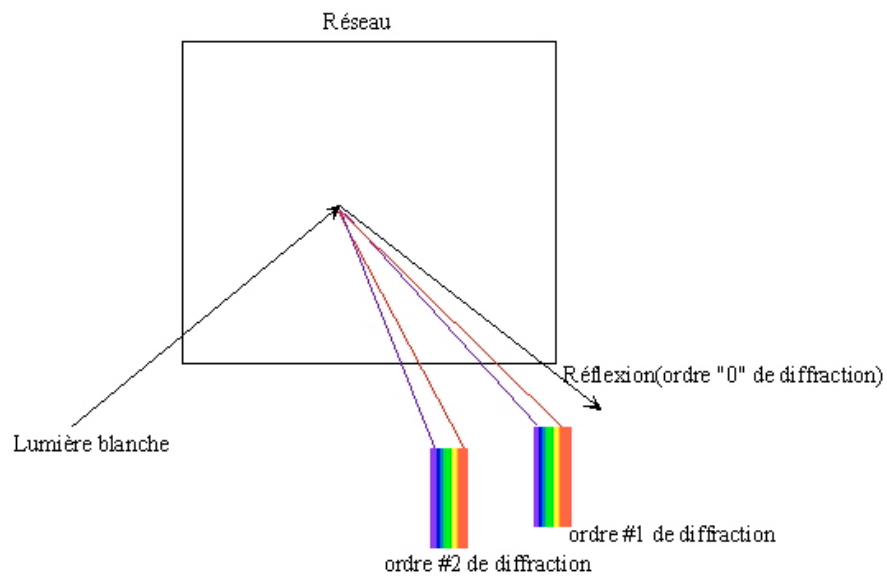
## b) Etude du réseau

Il existe deux grands types de réseaux : les réseaux à transmission et les réseaux à réflexion. Dans notre système, le réseau utilisé est un réseau à échelottes blazé sur l'ordre 1 de 150 traits/mm (JOBIN YVON-SPEX) dont les caractéristiques sont rassemblées dans le tableau ci-dessous :

Fournisseur	Dimension tracée (mm)	Nb de traits / mm	$\lambda$ de blaze	Angle des échelottes
JOBIN YVON-SPEX	33 x 33	150	500 nm	2° 09'

*Tab. 1. 1. : Caractéristiques du réseau*

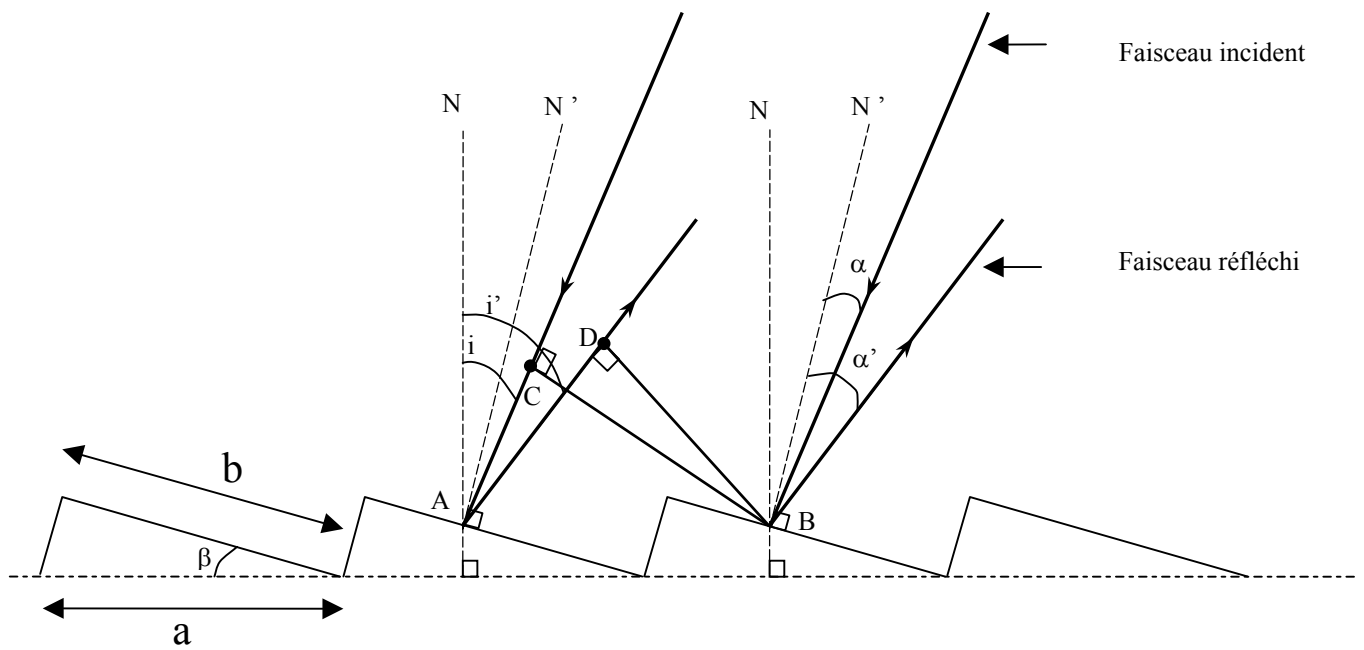
Le réseau est « blazé » signifie qu'une majorité de l'intensité lumineuse est concentrée sur un seul ordre, dans notre cas, le maximum de lumière de la longueur d'onde centrale du visible est concentrée sur l'ordre 1 : nous obtenons ainsi un ordre 1 de diffraction particulièrement lumineux idéal pour notre utilisation.



*Fig. 1. 3. : Principe du réseau à réflexion*

Le réseau est un système dispersif comme le prisme, à la différence que la répartition des couleurs avec un réseau est plus homogène. Ceci est dû aux différences de déviation entre les petites longueurs d'onde et les grandes longueurs d'onde dans le prisme: la zone bleue est plus étalée que la zone rouge.

L'étude suivante nous montre qu'il est théoriquement possible d'obtenir une répartition homogène de la couleur en utilisant un réseau à réflexion.



*Fig. 1. 4. : Schéma de la surface du réseau*

On note  $a$  la distance entre deux traits du réseaux (pas du réseau) et  $b$  la largeur d'une facette. Les angles  $i$  et  $\alpha$  sont les angles du faisceau incident par rapport à  $N$  et  $N'$  (respectivement),  $i'$  et  $\alpha'$  les angles entre le faisceau réfléchi et respectivement  $N$  et  $N'$ .

On note également  $\delta$  la différence de marche entre les vibrations diffractées par deux échelottes successives. D'après le schéma précédent,  $\delta = AC + AD$ .

Par trigonométrie dans les triangle  $ABC$  et  $ABD$ , on obtient aisément :

$$\cos(\pi/2 - i) = \frac{AC}{a}, \text{ soit } AC = a \sin(i)$$

$$\cos(\pi/2 - i') = \frac{AD}{a}, \text{ soit } AD = a \sin(i')$$

On obtient alors  $\delta = a(\sin i + \sin i')$ . L'intensité lumineuse est maximale lorsque les vibrations sont en phase, ce qui signifie que la différence de marche  $\delta$  est un multiple de la longueur d'onde  $\lambda$ . Soit alors  $k$  un nombre entier (ordre de diffraction) : on a alors

$$k\lambda = a(\sin i + \sin i') \quad (1)$$

L'équation différentielle qui en résulte pour une incidence  $i$  donné et un  $k$  donné :

$$a \, di' \cos i' = k \, d\lambda \quad (2)$$

La dispersion angulaire du réseau, notée  $D$ , s'exprime selon :

$$D = \frac{di'}{d\lambda} = \frac{k}{a \cos i'} \text{ (d'après (2))}$$

$$\text{et } D = \frac{\sin i + \sin i'}{\lambda \cos i'} \text{ (d'après (1))}$$

Le but de l'utilisation de ce réseau est d'obtenir une répartition linéaire de la longueur d'onde. Pour un angle  $i'$  petit, on obtient  $\cos i' \approx 1$  et  $\sin i' \approx i'$  : les expressions précédentes de  $D$  deviennent alors :

$$D = \frac{k}{a} = \frac{\sin i + i'}{\lambda}$$

On en déduit l'expression de la longueur d'onde  $\lambda$  selon l'angle de diffraction :

$$\lambda = \frac{a (\sin i + i')}{k}$$

En définissant  $\varepsilon = a/k$  et  $\gamma = (a \sin i)/k$  on obtient une fonction linéaire de  $\lambda$

$$\lambda = \varepsilon i' + \gamma$$

On obtient donc une fonction linéaire de  $\lambda$  selon l'angle de diffraction  $i'$  : la répartition des longueurs d'onde est homogène.

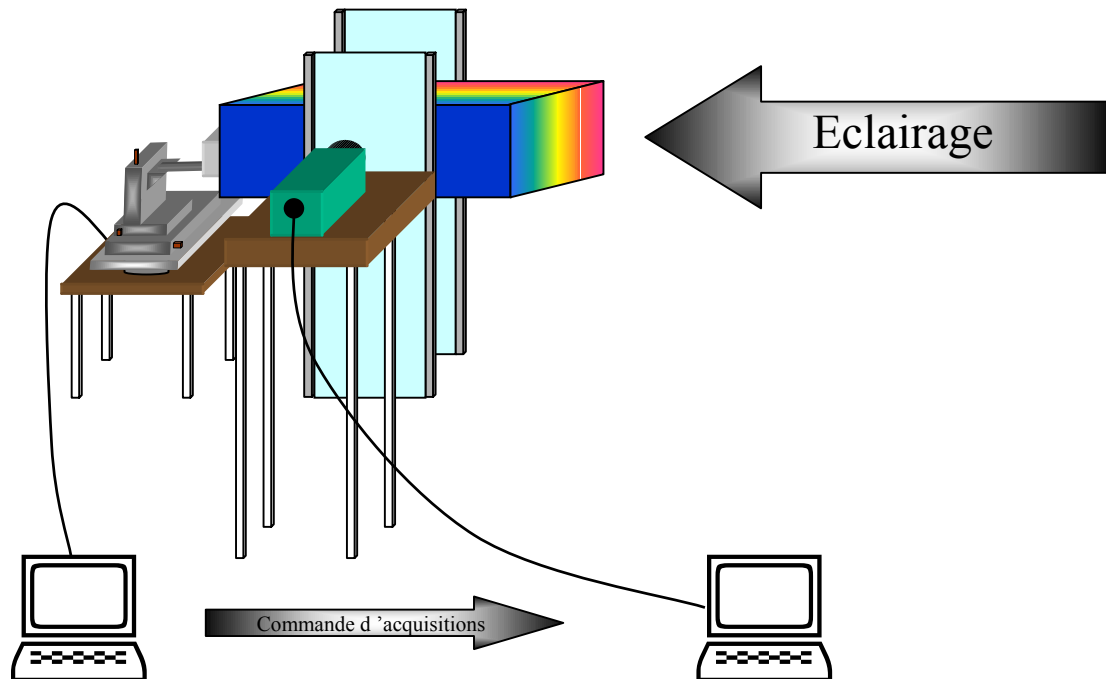
Malheureusement, les aberrations chromatiques et géométriques des optiques utilisées et les approximations utilisées dans la démonstration ne permettent pas de vérifier cette homogénéité dans la pratique. Or, les résultats de la RVV ne peuvent être exploités qu'à partir d'une parfaite connaissance du volume de lumière polychromatique. C'est pour cette raison qu'il est nécessaire et indispensable de caractériser le volume obtenu.

## 2. Méthode de caractérisation

### a) Principe de la caractérisation

L'objectif principal de mon stage est la caractérisation du spectre : il nous faut établir une matrice qui permettra de passer aisément de l'information de couleur à l'information de coordonnée. Pour cela, nous utilisons un cube de résine renfermant des particules de rilsan identiques à celles utilisées lors des acquisitions. Ce cube est déplacé à l'intérieur du spectre à l'aide d'une table micrométrique 3 axes pilotée à l'aide du logiciel LabView. Nous choisissons une « particule cible » qui nous semble adaptée à tous les déplacements en ce qui concerne sa visibilité et sa position à l'intérieur du cube. Chaque position du cube est photographiée par la caméra, ces images sont ensuite traitées en analysant la couleur de la particule selon le déplacement micrométrique.

Il est très important d'effectuer cette caractérisation dans les conditions exactes de l'expérience : réglages optiques, configuration de la caméra, géométrie de la manipulation et luminosité ambiante. Les résultats obtenus seront alors utilisables pour exploiter les mesures.



*Fig. 2.1. : Système de caractérisation*

La couleur est codée numériquement par la caméra tri-CCD selon le système RGB (Red, Green, Blue), c'est à dire qu'une couleur est assimilée à ses composantes rouge, verte et bleue. Mais ces données étant influencées par les réglages de la caméra (notamment du contraste), on préfère utiliser les coefficients de chromaticité de la couleur  $r$ ,  $v$  et  $b$  tel que

$$r = \frac{R}{R + V + B}$$

$$v = \frac{V}{R + V + B}$$

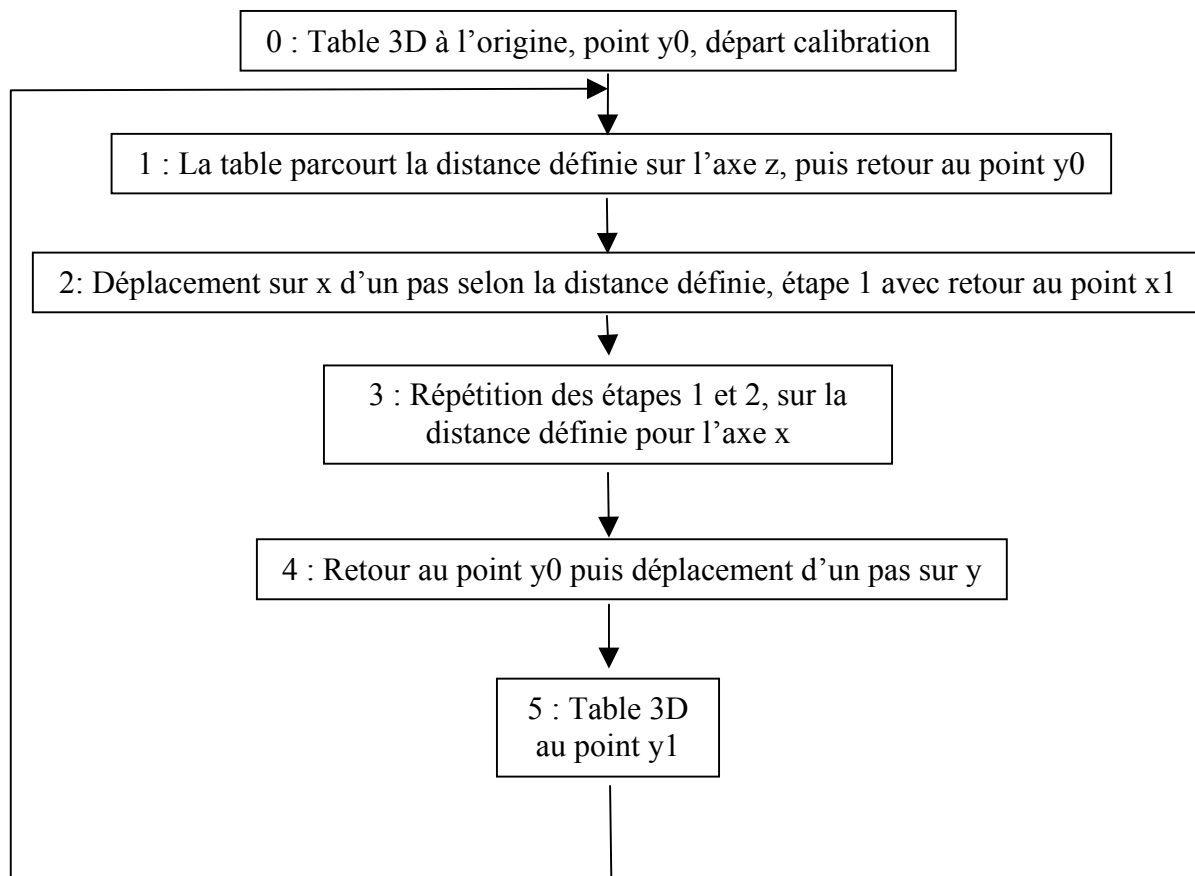
$$b = \frac{B}{R + V + B}$$

Cette transformation permet de considérer la proportion de chaque composante dans la couleur de la particule, avec  $r + v + b = 1$ .

## b) Pilotage LabView

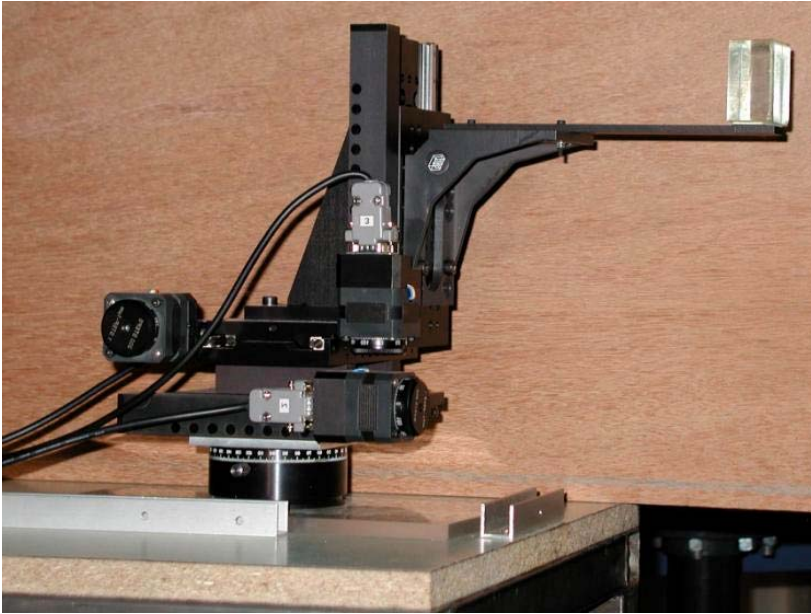
La caractérisation est entièrement automatisée par un programme créé sous LabView par un ingénieur du CNRS, J.-E. Rakotoniaina. LabView est un logiciel distribué par National Instrument et créé il y a 16 ans par Jeff KODOWSKI. Il réunit un panel permettant un pilotage en temps réel et un module de programmation graphique utilisant des diagrammes : il s'agit du langage de programmation G. L'utilisateur extrait d'une base de données les actions à réaliser, qu'il relie par un « flux de données », le tout sous forme de diagrammes. C'est le logiciel qui traduit ces exigences sous forme de lignes de programmes.

Dans notre cas, il s'agit d'explorer un spectre. Le logiciel élaboré, nommé «Spectre», permet à la table 3D de parcourir un espace parallélépipédique en choisissant un pas pour chaque axe  $x$ ,  $y$  et  $z$ , en fonction du volume de mesure. Le processus se traduit par l'imbrication de plusieurs boucles correspondant à chaque axe. On étudie alors la répartition des couleurs dans des plans  $(\vec{x}, \vec{z})$  très proches, le long de l'axe  $\vec{y}$ .



*Fig. 2.2. : Diagramme de fonctionnement du code Spectre*





*Fig. 2.3. : Système de caractérisation du spectre*

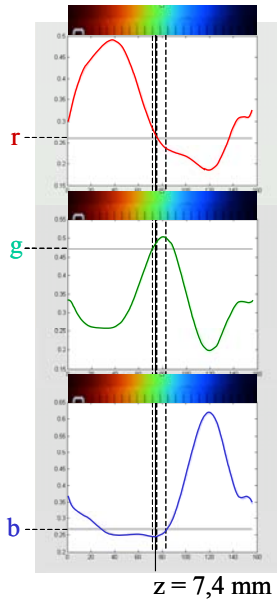
### c) Traitement d'image

La procédure de caractérisation décrite ci-dessus implique l'acquisition de quelques 28 000 images pour caractériser le volume étudié. Ces images devront être enregistrées puis traitées pour obtenir la matrice spatio-colorimétrique désirée. C'est pour cela qu'une seconde chaîne de traitement d'images a été mise au point dans les mêmes conditions (voir B.4.b.). Cette étape est particulièrement importante puisque le principe de la RVV réside précisément dans la connaissance du volume de lumière utilisé. Pour permettre ce traitement, il a fallu mettre en place un maillage définissant le volume de lumière : chaque position du cube de résine correspond à un « nœud », c'est à dire un point du volume qui sera analysé. Le volume de lumière sera donc représenté par un ensemble de point de mesure. Il s'agit d'un procédé de discrétisation. Le traitement se fait de la manière suivante :

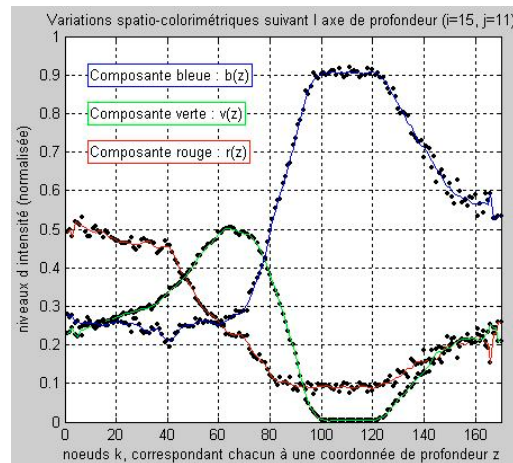
- ↳ Traitement de l'image pour permettre l'analyse (réduction du bruit, contraste).
- ↳ Sélection de la zone où est présente la particule cible.
- ↳ Relevé des informations dimensionnelles et colorimétriques puis mise en relation avec les déplacements de la table micrométrique.
- ↳ Création de la matrice spatio-colorimétrique contenant les valeurs dimensionnelles  $x$ ,  $y$  et  $z$  et les valeurs colorimétriques  $r$ ,  $g$  et  $b$  pour chaque nœud du maillage.

### 3. Résultats – Interprétations

Les résultats obtenus par cette méthode ont permis de tracer les graphes ci-après représentant l'intensité lumineuse de chaque composante en fonction de sa position sur l'axe du gradient de longueur d'onde. Ces graphes sont reproductibles pour tous les axes de profondeur parcourus lors de la calibration.



*Fig. 3.1. : Répartition des composantes R,G et B le long d'un axe de profondeur*



*Fig.3. 2. : Répartition des composantes R,G et B le long d'un axe z*

# Conclusion

Grâce à cette nouvelle méthode d'éclairage, il sera plus simple d'étudier des phénomènes d'écoulement tridimensionnels. Le but de ces recherches est de valider l'éclairage polychromatique en le comparant à des simulations numériques et à d'autres méthodes de vélocimétrie par imagerie (PIV). Présentée ici dans le domaine de l'hydrodynamique, la méthode de la RVV est également utilisable en aérodynamique.

Le traitement numérique des résultats permet d'obtenir des représentations en 3D du champ de vecteurs vitesses très explicites et très fidèles à l'écoulement étudié. Ce traitement exploite toutes les données recueillies par la caméra (coordonnées, couleur).

Malheureusement, les exploitations sont limitées par la profondeur de champs de la caméra et par l'intensité lumineuse. En effet, le traitement d'image est moins précis lorsqu'il est appliqué à des particules moins nettes, et la faible intensité de la lumière blanche empêche d'éloigner la caméra pour obtenir une meilleure profondeur de champs tout en augmentant le champ visualisé. L'éclairage par une lumière laser permettrait de minimiser ces problèmes et ainsi améliorer la méthode.

Lors de ce stage, j'ai pu découvrir plus particulièrement une des applications de l'optique, la vélocimétrie, sa mise en œuvre et les derniers axes de recherches. Cela m'a permis de voir des applications réelles des systèmes étudiés au cours de ma formation.

J'ai aussi eu l'occasion de me familiariser quelque peu avec le traitement d'images et d'en découvrir quelques principes et procédés.

Sur un plan personnel, j'ai découvert les méthodes de travail et les différents rouages de la recherche. J'ai pu comparer le monde la recherche et le monde de l'industrie qui diffère par la mentalité et les méthodes de travail. Ce stage m'a permis d'améliorer mes connaissances et mon raisonnement que j'ai pu comparer à un raisonnement plus scientifique.

# Bibliographie

## Littérature

*Analyse quantitative d'écoulements complexes par imagerie polychromatique* ; GMABELE Y.M. ; Thèse de doctorat ; Université de Franche-Comté ; 2001.

*Pilotage d'un dispositif de déplacement tridimensionnel par LabView pour la caractérisation énergétique et spectrale d'un faisceau laser et d'une technique d'analyse d'écoulement par imagerie* ; RAKOTONIAINA J-E. , ZIBRET D., BAILLY Y. ; CREST ; 2003.

*Particle tacking velocimetry in three dimensional flows* ; SPRINGER-VERLAG ; Experiments in Fluids ; 1993.

*Développement d'une technique de visualisation et de vélocimétrie volumique polychromatique dédiée aux écoulements tridimensionnels instationnaires. Application en tunnel hydrodynamique* ; ZIBRET Didier ; Thèse de doctorat ; Université de Franche-Comté ; 2003.

## Internet

Réfraction : <http://sc.physiques.free.fr/htmlfiles/cours/dejenef/applrefract.html>

Lab View : [www.ni.com/france/labview](http://www.ni.com/france/labview)

Documentation : <http://www.dma.utc.fr/RAPPORT/node8.html>

Von Karman : [http://fr.encyclopedia.yahoo.com/articles/k/k0000264\\_p0.html](http://fr.encyclopedia.yahoo.com/articles/k/k0000264_p0.html)  
<http://joas.free.fr/karman/vonkarma.htm>