

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE SAAD DAHLEB-BLIDA 01**



**Faculté des sciences**

**Département de physique**

**Mémoire de fin d'étude pour l'obtention de diplôme de master En physique**

**Option : nano physique**

**THEME :**

**Caractérisation des écoulements en micro fluide par vélocimétrie  
à l'échelle micron appliquée aux microsystèmes**

**Réalisé par :**

**-Zakaria Zahali**

**Soutenu le 21/10/2021 devant le jury compose de :**

Dr. Salah EddineAoudj	MCA	USDB	President
Mr. Abderrahmane Benhaffaf	MAA	USDB	Examineur
Dr. Ramou Naim	MRA	CRTI	Promoteur
Dr. AbdelkaderHassein-Bey	MCBUSDB		Co-promoteur

**Blida 2021**

## **REMERCIEMENTS**

**Avant tout nous Avant tout je remercie Allah le tout puissant qui**

**Nous éclaire le bon Chemin.**

**Nous adressons nos remerciements à tous ceux qui nous ont**

**Accompagnes au cours de ce travail.**

**A monsieur RamouNaim, notre promoteur, à Ces remarques successives ont**

**Permis d'améliorer les différentes versions de ce travail**

**Et je remercie Dr Abdelkader Hassen Beiy pour leur conseil de travaille**

**A**

**A tous mes enseignants tout au long de mes études, j'exprime mes sincères**

**Remerciements pour leurs conseils et leurs encouragements**

**A la fin mes remerciements :**

**A tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.**

**Et je remercie Dr Bencherchali Amine pour leur conseil et leur propre secret  
mots de travaille**

**Et Pr Aisset pour leurs exactes paroles de vie ... et son conseil d'études**

**Et tout le groupe et les nombres activentqui dans la société physique  
d'université de Saad dahlab à Blida .**

## **Dédicaces**

**mes parents qui je les aime beaucoup**

**Je dédier ce travail :**

**A mes frères : Hamza et Mohamed amine et ma sœur**

**A toute ma famille dezahali**

**Tous mes amis d'étude.**

# Sommaire

INTRODUCTION :.....	1
1 Naissance de la micro fluidique.....	2
1.1 Design des canaux microfluidique.....	4
1.2 Fabrication du moule micro fluidique par photolithographie.....	5
1.3 Les application des systèmes microfluidiques :.....	7
1.4 Theorie de la microfluidique.....	8
1.4.1. Nombre de Reynolds.....	9
1.4.2. Déffirent type d'écoulement.....	10
1.4.3. - Ecoulement en Micro-Hydrodynamique :.....	11
1.4.4. - Résistance hydraulique :.....	13
1.4.5. - Diffusion et mélange : Nombre de Pec let.....	15
II.1 Principe de la vélocimétrie par images de particules (PIV) :.....	16
II.2. Micro-PIV :.....	18
II.2.1 Différences par rapport à la PIV macroscopique :.....	20
II.3 Aspects matériels :.....	21
II.3.1 Particules :.....	21
II.3.2 Microscopie:.....	23
II.4 Aspects traitement d'image pour La PIV :.....	26
II.4.1 Principes de traitement :.....	26

II.4.2 L'acquisition :.....	28
II.4.3 L'autocorrélation :.....	30
II.4.4 La corrélation croisée (« cross-corrélation ») :.....	33
III.1 PIVLab :.....	37
III.4.1 Creation deux images à t et t+ $\Delta t$ :.....	38
III.4.2 Chargement des images depuis le dossier simulation1 :.....	41
III.4.3 Analyser les deux images :.....	42
III.4.4 Résultat :.....	43
III.4.5 Cas linéaire :.....	44
III.4.6 Cas d'un écoulement dans une membrane:.....	46
III.4.7 Cas réel du génération de gouttes.....	48
Conclusion.....	52
Référence.....	53

## Liste des figures

<b>Figure 1.1</b> Laboratoire sur puce.....	1
<b>Figure 1.2</b> Puce micro fluidique en verre.....	2
<b>Figure1.4</b> Masque photo lithographique sur substrat de verre avec chrom.....	4
<b>Figure1.5:</b> Applications de lamicrofluid.....	5
<b>Figure 1. 6:</b> Générateur de gradient.....	7
<b>Figure1. 7:</b> Caractérisation du type d'écoulement en fonction du nombre Re.....	8
<b>Figure 1. 8 :</b> Résolution de l'équation de Poiseuille dans le cas d'une canalisation circulaire .....	10
<b>Figure 1. 9 :</b> (a) Profil d'un écoulement plan, (b) Profil d'un écoulement section rectangulaire (Simulation logiciel Comsol©).....	11
<b>Figure 1. 11 :</b> un image explique un comparaison entre la résistance hydrolique et électrique qui a déjà etretelechargeraapartirdun site web.....	14
<b>Figure 1.13:</b> Exemple d'un circuit micro fluidique, (b) exemple d'un circuit électrique.....	14
<b>Figure 1.14:</b> (a) Exemple d'un circuit en Y et (b) la simulation du transport de matière (logiciel Comsol©).....	15
<b>Figure 1.15 :</b> (a) $Pe > 1$ , Convection des 2 produits, (b) $Pe < 1$ , convection et diffusion des 2 produits deux produitsPardiffusi.....	16

<b>Figure 2.1</b> :Dispositif expérimental pour la vélocimétrie d'images de particules dans une soufflerie.....	16
<b>Figure 2.2</b> :Schéma d'un système $\mu$ PIV.....	19
<b>Figure 2.2</b> :Schéma d'un système de micro PIV avec Un laser Nd : YAG pulsé de haute puissance.....	28
<b>Figure 2.3</b> : Schéma type d'utilisation de la méthode PIV.....	28
<b>Figure 2.6</b> .Principe de décalage des images 1 et 2 pour la mesure $\Delta x$ .....	33
<b>Figure 2.7</b> : Division de l'image en zones d'interrogation. Les traits pointillés.....	34
<b>Figure 2.7</b> .Exemple de corrélation d'une paire d'images.....	35
<b>Figure 3.1</b> :Principe de la mesure. (a) mouvement des traceurs entre deux images, (b) corrélation entre deux images successives.....	38
<b>Figure 3.2</b> :l'interface principale de PIVlab.....	38
<b>Figure 3.3</b> :Génération des images synthétiques.....	39
<b>Figure 3.4</b> :sauvegarde des images sur un dossier.....	41
<b>Figure 3.6</b> :Analyse d'image.....	42
<b>Figure 3.8</b> :vitesse du fluide dans le cas linéaire.....	43
<b>Figure 3.9</b> :champ <i>de vecteurs</i> vitesse (casmembrane).....	44
<b>Figure 3.10</b> :vitesse du fluide dans le cas membrane.....	44
<b>Figure 3.11</b> :vitesse du fluide dans le cas membrane.....	45
<b>Figure 3.13</b> Géométrie typique utilisée pour la formation de gouttes.....	47

<b>Figure 3.14</b> Chargement des images pour le générateur de gouttes.....	47
<b>Figure 3.15</b> Champ de vitesse.....	45
<b>Figure 3.16</b> Profil de vitesse.....	45

## ملخص

لقد كان ميكروفلويد " علم السوائل " مجالاً بحثياً في توسع كامل لمدة عشر سنوات ، تتغذى حيويته من خلال تنوع تطبيقاته اليوم ، تتيح التقنيات الجديدة بالفعل تصنيع أنظمة كهروميكانيكية ذات حجم متناهي الصغر ونانومترية ، حتى مستويات كبيرة من التعقيد ، ومزود بجميع أنواع الوظائف. تم استخدام هذه الاحتمالات الجديدة بطريقة مذهلة للعديد من التطبيقات ، مثل المصفوفات الدقيقة للحمض النووي ، أو المختبر على الرقاقة. في كل هذه الأنظمة ، تنشأ مشكلة التحكم في التدفقات في الأجهزة التي تختلف أبعادها أو أنماطها الداخلية من بضع مئات من النانومترات إلى بضع عشرات من الميكرومترات ، وسيخصص هذا العمل لتحليل وتوصيف التدفقات المطبقة على الأنظمة الدقيقة.

## Résumé

La microfluidique est un domaine de recherche en pleine expansion depuis une dizaine d'années, dont la vitalité est nourrie par la diversité de ses applications. Aujourd'hui, les nouvelles technologies permettent en effet de fabriquer des systèmes électromécaniques de taille micro et nanométriques, jusqu'à des niveaux de complexité importants, et pourvus de toutes sortes de fonctionnalités. Ces nouvelles possibilités ont été utilisées de manière spectaculaire pour de nombreuses applications, telles que les puces à ADN, ou les laboratoires sur puces (lab-on-chip). Dans tous ces systèmes se pose le problème de la maîtrise des écoulements dans des dispositifs dont les dimensions ou les motifs internes varient de quelques centaines de nanomètres à quelques dizaines de micromètres ce travail sera consacré pour faire une analyse et caractérisation des écoulements appliquée aux microsystèmes.

## **Abstract**

Microfluidics has been a field of research in full expansion for ten years, whose vitality is nourished by the diversity of its applications. Today, new technologies indeed make it possible to manufacture electromechanical systems of micro and nanometric size, up to 'at significant levels of complexity, and equipped with all kinds of functionalities. These new possibilities have been used in a spectacular way for many applications, such as DNA microarrays, or lab-on-chip. In all these systems, the problem of controlling flows in devices whose dimensions or internal patterns vary from a few hundred nanometers to a few tens of micrometers arises, this work will be devoted to an analysis and characterization of the flows applied to microsystems.

# **Introduction Générale**

## Introduction

---

La micro fluidique est l'étude et la mise en œuvre des écoulements à petite échelle dans des réseaux de micro canaux de quelques micromètres de diamètre. Cette technologie permet la fabrication de dispositifs manipulant de très petites quantités de liquides, et trouve un grand nombre d'applications. Elle permet de réaliser des sortes de « microprocesseurs » pour la biologie qui remplacent de coûteux instruments encombrants et qui nécessitent moins de matière. . Son essor est considérable dans un grand nombre de domaines industriels comme l'alimentaire, les biotechnologies, l'analyse chimique... La micro fluidique est à la croisée des chemins de la biologie, de la physique, de la chimie et de l'ingénierie. Elle tire profit des progrès concernant la microélectronique pour sa réalisation, et des phénomènes physiques qui ont lieu à ces échelles par la réduction de taille des géométries. Grâce à la micro fluidique, on peut envisager l'arrivée prochaine de systèmes d'analyse Complets qui, à partir d'une simple goutte d'échantillon, véhiculeront les liquides vers des Capteurs pour en extraire des informations sur leur contenu [1].

Contrairement à un objet macroscopique, où le volume a une plus grande importance que la surface, les effets de surface prédominent dans les microcapillaires, ce qui modifie les propriétés des écoulements.

La laminarité, les instabilités d'écoulement sont supprimés ; la capillarité, les fluides sont assujettis aux forces capillaires comme la sève dans un arbre ; la mouillabilité, l'écoulement dépend du caractère hydrophobe ou hydrophile de la surface ; les échanges thermiques, le chauffage et le refroidissement sont quasi instantanés ; et enfin, les effets électrocinétiques (le champ de vitesse dans le fluide est en tous points identiques).

**Chapitre 1:**  
**Systeme**  
**Micro fluidique**

## 1.Naissance de la micro fluidique

Les technologies développées pour miniaturiser les transistors et fabriquer les microprocesseurs ont permis de fabriquer des canaux de taille microscopique et de les intégrer sur des puces [2]. L'utilisation des procédés de gravure du silicium développés pour l'industrie microélectronique a permis de fabriquer les premiers dispositifs contenant des microéléments mobiles intégrés sur une galette de silicium. Ces nouveaux types de dispositifs appelés MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) ont donné naissance à des applications industrielles, particulièrement dans le cadre des capteurs de pression et des têtes d'imprimante

Un important effort de recherche a été effectué pour le développement de laboratoires sur puces figure 2 pour permettre l'intégration de la

quasi-totalité des opérations nécessaires pour un protocole biologique, chimique ou biomédical sur une simple puce micro fluidique

A cette époque, la majorité des dispositifs microfluidiques étaient encore fabriqués en silicium ou en verre et nécessitaient de ce fait les lourdes infrastructures de l'industrie microélectronique.



**Fig 1.2** Puce micro fluidique en verre

A partir des années 2000, les technologies basées sur le moulage de micro-canaux dans des polymères[3](figure 3) ont connu un fort

développement. La réduction des coûts et du temps de fabrication des dispositifs a permis à un grand nombre de laboratoires de mener des recherches en micro fluidique.

De nos jours, des milliers de chercheurs travaillent dans la micro fluidique pour permettre d'étendre son champs d'application notamment via les



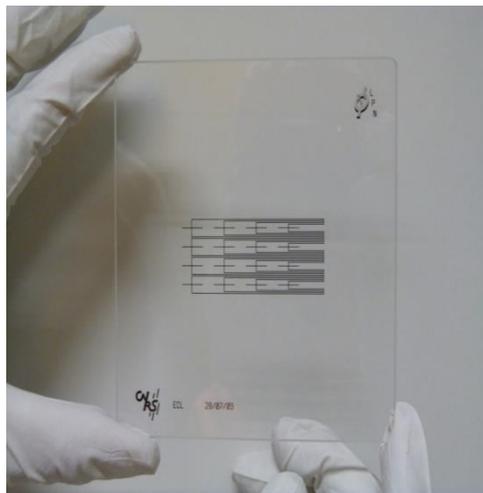
laboratoires sur puces pour les hôpitaux

**Fig 1.3** Polymères block

Les dispositifs microfluidique actuels les plus simples sont constitués dans un polymère qui est collé sur une surface plane le polymere le plus utilisé est le PDMS (poly-di-methyl-siloxane) qui est un élastométretransparent, biocompatible, déformable, peu cher, facile a mouler et coller sur du verre.

### 1.1. Design des canaux microfluidique

La fabrication d'un dispositif micro fluidique commence par le dessin des canaux sur un logiciel dédié (AUTOCAD, LEDIT, Illustrator ...). Une fois ce dessin effectué, il est transféré sur un masque optique: plaque de verre recouvert de chrome ou un film plastique pour la majorité des masques. Ceci peut être effectué avec des fabricants dédiés ou dans une salle blanche avec des masques en verre. Les micro canaux sont imprimés avec une encre opaque aux UV (si le support est un film plastique) ou gravés dans le chrome (si le support est une plaque de verre) figure 4.



**Fig 1.4** Masque photo lithographique sur substrat de verre avec chrome gravé

## 1.2. Fabrication du moule micro fluide par photolithographie

Etape qui explique que ce passe dans la fabrication ;

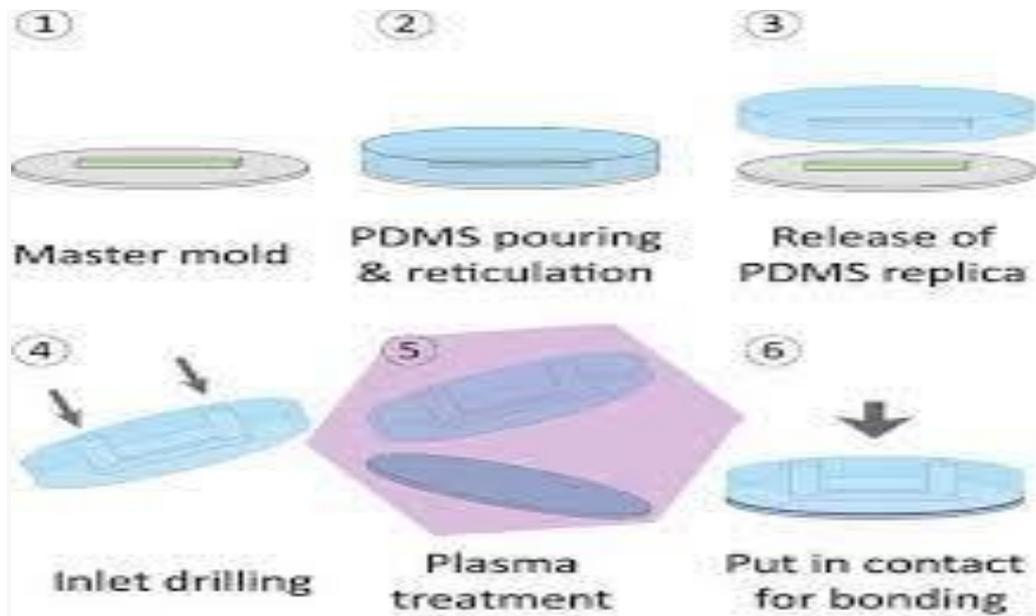


Fig 1.5

C'est au cours de cette étape que les dessins représentant les micro canaux sur le photo masque sont transformés en véritables micro canaux sur un moule [4]. Les micro canaux fabriqués en relief sur le moule permettront par la suite d'obtenir des répliques creusées dans le futur matériau de la puce micro fluidique. Une résine est étalée sur un **support plat (souvent une plaque de silicium)** avec l'épaisseur voulue (qui déterminera la hauteur des canaux). La **résine**, protégée par le masque sur lesquels les canaux sont dessinés, est partiellement exposée aux UV. Ainsi (dans le cas d'une résine négative, type SU8) seule les parties représentant les canaux sont exposées aux UV et polymérisées, les autres parties du moule étant protégées par les zones opaques du masque. Le **moule** est développé dans un solvant qui détruit toutes les zones de résine qui n'ont pas été exposées aux UV. Nous obtenons ainsi un moule micro fluidique avec une réplique en résine des motifs qui étaient présents sur le photo masque (les futurs micro canaux sont des "reliefs" sur le moule). La hauteur des canaux est déterminée par l'épaisseur originale de la résine étalée sur la plaque. La plupart du temps, le moule est ensuite traité avec du silane pour faciliter le détachement des composants micro fluidiques durant les étapes de moulages (voir le prochain paragr

### 1.3. Les applications des systèmes microfluidiques :

Depuis une dizaine d'année, l'homme a imité la nature en produisant des objets traversés par des écoulements micrométriques. Les applications sont multiples. En général, manipuler à l'échelle du micron permet de travailler plus vite, moins cher, dans un environnement plus propre et plus sûr. Les systèmes microfluidiques sont des dispositifs qui comportent un ensemble de composants miniaturisés autorisant l'étude et l'analyse d'échantillons chimiques ou biologiques. Véritables «microprocesseurs pour la biologie», ils permettent de remplacer des instruments encombrants et très coûteux.

Aujourd'hui, le volume d'activité des technologies microfluidiques est estimé à une dizaine de milliards d'euros. Le nombre d'applications industrielles est considérable : en médecine, dans l'énergie, dans la chimie verte, la cosmétique, l'industrie agro alimentaire (figure 5

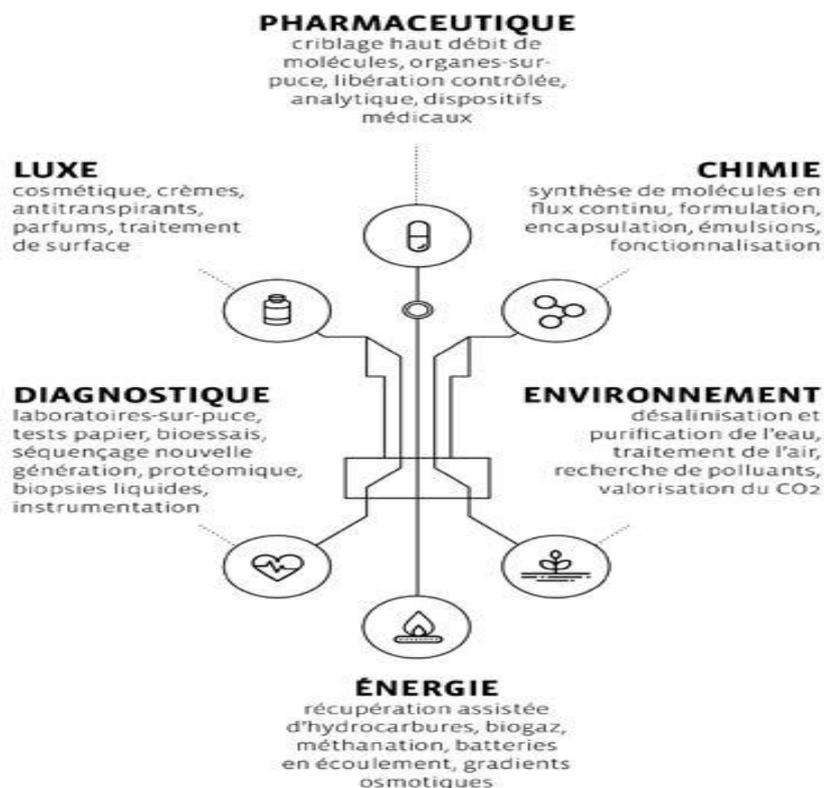
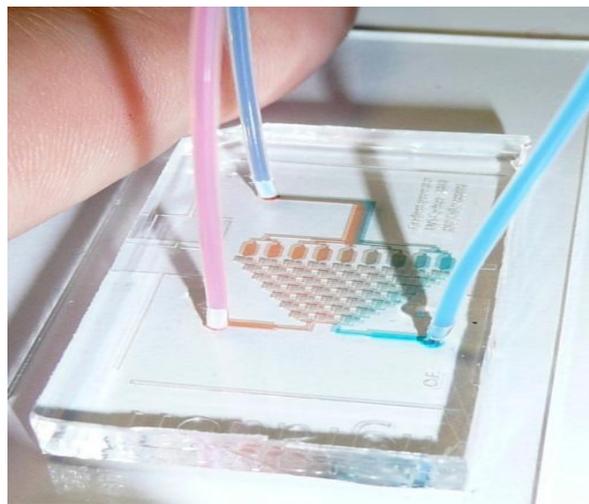


Fig 1.6: Applications de la microfluide

### 1.4.Theorie de la microfluidique

Aux dimensions micrométriques [5], les lois d'écoulement restent celles de la fluidique classique et peuvent être étudiées avec l'équation de Navier-Stokes dans le cas de liquide incompressible dont les termes inertiels peuvent être ici négligés. Le régime d'écoulement est majoritairement laminaire, caractérisé par un faible nombre de Reynolds  $E$  ( $Re < 1$ ). Les phénomènes de diffusion au sein de ces écoulements sont bien maîtrisés et permettent le développement d'applications associées telles que des micros mélangeurs ou des générateurs de gradient de Concentration (figure 6).



**Fig 1.7:** Générateur de gradient

**1.4.1. Nombre de Reynolds**

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\eta} \dots\dots\dots(1.1)$$

**Le nombre de Reynolds – Définition**

2020-03-02 par Nick Connor

Le nombre de Reynolds est le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses et constitue un paramètre pratique pour prédire si une condition d'écoulement sera laminaire ou turbulente. Génie thermique

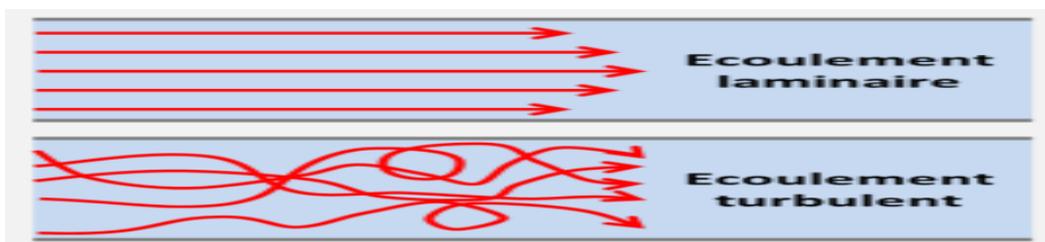
Le nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est le rapport des forces d'inertie aux forces visqueuses et est un paramètre commode pour prédire si une condition d'écoulement sera laminaire ou turbulent. On peut interpréter que lorsque les forces visqueuses sont dominantes (flux lent, Re faible) elles sont suffisantes pour maintenir toutes les particules de fluide en ligne, alors le flux est laminaire. Même un très faible Re indique un mouvement de fluage visqueux, où les effets d'inertie sont négligeables. Lorsque les forces d'inertie dominent sur les forces visqueuses (lorsque le fluide s'écoule plus rapidement et que Re est plus grand), l'écoulement est turbulent.

$$Re = \frac{\text{inertial forces}}{\text{viscous forces}} = \frac{\rho v L}{\mu} \quad \dots\dots\dots(1.2)$$

Où  $\rho$  est la masse volumique du fluide,  $V$  est la vitesse caractéristique de l'écoulement,  $L$  est la longueur caractéristique de l'écoulement du fluide.

#### 1.4.2. Différent types d'écoulements :



**Fig 1.8:** Caractérisation du type d'écoulement en fonction du nombre  $Re$   
En micro fluidique, considérant un écoulement liquide type eau, les valeurs typiques rencontrées sont :

1. Dimension caractéristique du microsysteme : de 1 à 500 $\mu\text{m}$
2. Vitesse de l'écoulement  $V$  : de 100 $\mu\text{m/s}$  à 1mm/s
3. Viscosité dynamiques du fluide :  $1 \times 10^{-3} \text{Pa.s}$
4. Masse volumique du fluide : 1000kg/m<sup>3</sup>,
5. Longueur caractéristique de l'écoulement :  $L = 100\mu\text{m}$ .

Si l'on calcule le nombre de Reynolds en micro fluidique, il varie tel que :  
 $0.0001 < Re < 0.5$

Ainsi, les écoulements dans le domaine de la micro fluidique sont majoritairement laminaire, les forces visqueuses dominant les effets inertiels.

**1.4.3. - Ecoulement en Micro-Hydrodynamique : Equation de Navier-Stokes**

L'hydrodynamique des écoulements liquides est valide jusqu'à quelques nanomètres. Ainsi à l'échelle du micron, on peut appliquer l'équation constitutive d'un fluide newtonien incompressible qui est décrite par l'équation de Navier-Stokes :

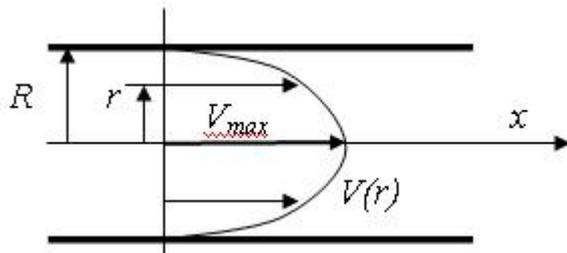
$$\begin{aligned}
 p &= f(t) \\
 \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) &= 0 \\
 \frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) &= -\nabla p_1 + \nabla \cdot \Sigma + \rho \mathbf{g} \\
 \frac{dp}{dt} + p \nabla \cdot \mathbf{V} &= -\nabla \cdot (\lambda \nabla T)
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

.....02

En régime établi, dans le cadre de la micro fluidique où l'on peut négliger les termes d'inertie, cette équation se réduit à la loi suivante :

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} &= 0 \\
 \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) + f_x \\
 \frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) + f_y \\
 \frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) + f_z
 \end{aligned}
 \tag{1.4}$$

C'est l'équation de Poiseuille qui peut se résoudre selon la géométrie du canal. Le profil de l'écoulement est alors de nature parabolique. La vitesse ( $v_{max}$ ) de ce profil dépend directement de la pression appliquée :

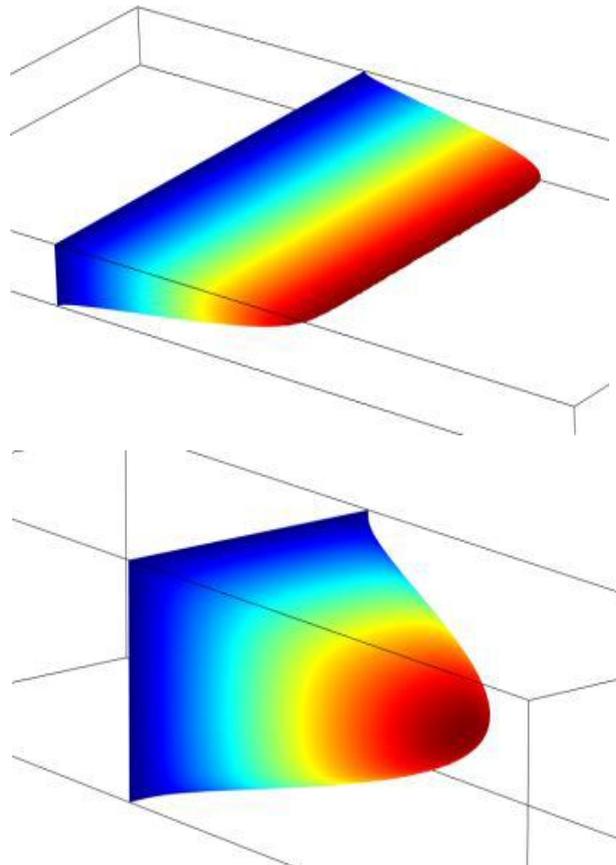


**Fig 1.9 :** Résolution de l'équation de Poiseuille dans le cas d'une canalisation circulaire.

$$V(r) = Vmax(1 - \left(\frac{r^2}{R^2}\right)).....(1.5)$$

$$Vz(r) = \frac{\Delta PR^2}{4nL} (1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 ).....(1.6)$$

En micro fluidique en lien avec les procédés de micro-fabrication les sections



de canalisation sont plutôt de nature rectangulaire (figure 9)

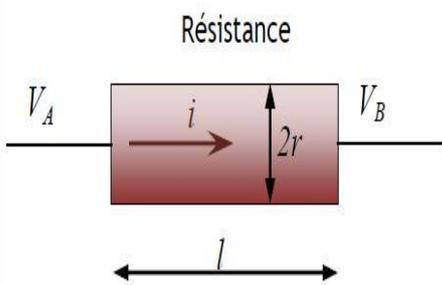
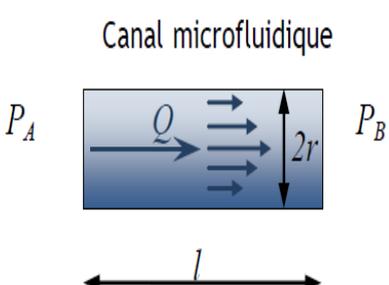
**Fig 1.10 :** (a) Profil d'un écoulement plan, (b) Profil d'un écoulement section rectangulaire (Simulation logiciel Comsol©)

Il y a un comportement linéaire entre la différence de pression  $\Delta P$  et le débit  $Q$  au sein du canal. Dans le cas d'un canal circulaire, on obtient classiquement :

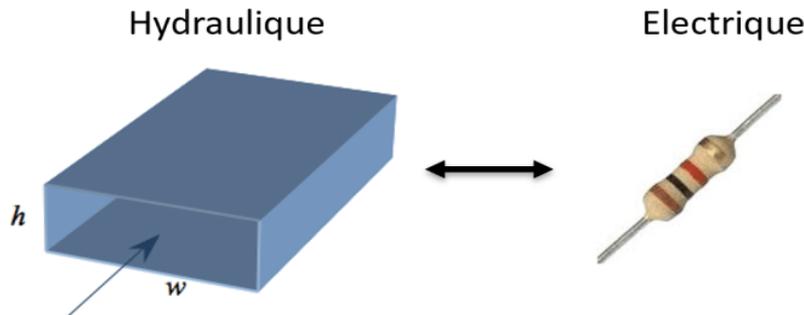
$$Q = \int_0^R v_r 2\pi r dr = \frac{\pi \Delta PR^4}{8nL}.....(1.7)$$

**1.4.4. - Résistance hydraulique :**

En reprenant l'équation précédente, les écoulements dans un réseau micro fluide peuvent se modéliser en utilisant la notion de « résistance hydraulique », par analogie directe avec un réseau électrique de résistance (figure 10). La pression est associée à la tension, le débit au courant électrique. Ainsi, la résistance hydraulique est définie par le rapport entre la différence de pression appliquée et le débit :

	Résistance électrique	Résistance hydraulique
Schémas		
Analogie des caractéristiques	Tension électrique $\Delta V$	Pression hydraulique $\Delta P$
	Courant $i$	Débit $Q$
Loi physique	Loi d'Ohm : $V_A - V_B = R \cdot i$	Loi de Poiseuille : $P_A - P_B = R_H \cdot Q$
Résistances	$R = \frac{\rho_{elec} * L}{\pi r^2}$	$R = \frac{8nl}{\pi r^4}$

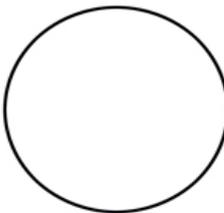
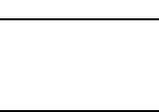
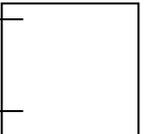
D'un point de vue micro-technologique, il est compliqué de réaliser des canaux avec des sections circulaires, les sections sont plutôt de type rectangulaire de hauteur h et de largeur w. Le calcul de la résistance hydraulique peut s'obtenir dans le cas général sous la forme (par décomposition en série de Fourier):



$$R_H = \frac{12\eta L}{wh^3} \left[ 1 - \frac{h}{w} \left( \frac{192}{\pi^5} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^5} \tanh \left( \frac{\pi n w}{2h} \right) \right) \right]^{-1} \dots\dots\dots(1.8)$$

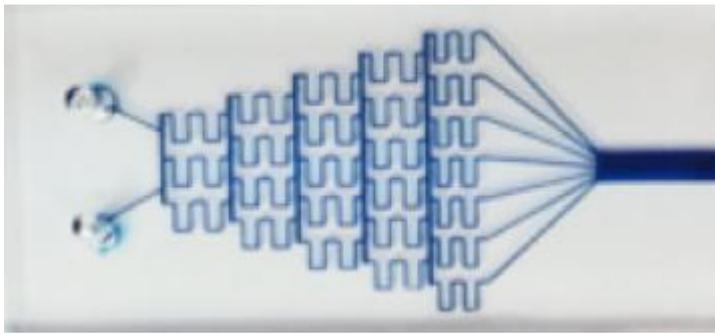
**Fig. 12 :** un image explique un comparaison entre la résistance hydolique et electrique qui a déjà etretelechargeraapartirdun site web

De manière plus classique, on prend les ordres de grandeurs suivants pour le calcul de RH :

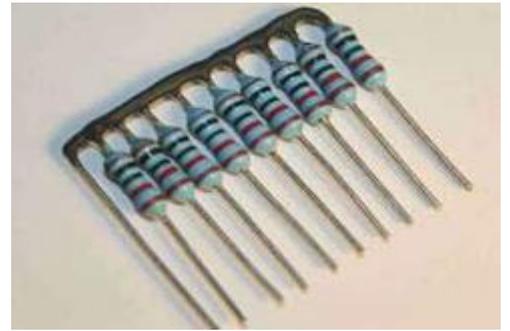
	Cercle	2 plaques	Carré	Rectangle
Schéma				
Caractéristiq ue	Rayon a	$h \ll w$	$h = w$	$0.2 < h/w < 1$
Résistance hydrauliqueR H	$\frac{8}{\pi} nL \frac{1}{a^4}$	$12nl \frac{1}{h^3 W}$	$4.28 nL \frac{1}{h^4}$	$\frac{12nL}{1 - 0.63 \left(\frac{h}{w}\right) h^3 *}$

**Fig1.13:**Formules simplifiées de la résistance hydraulique pour différents cas de section

L'analogie « électrique/hydraulique » simplifie le dimensionnement d'un réseau micro fluidique et l'étude de son comportement. On peut appliquer la loi des nœuds (débit conservé à un nœud) et de mailles (variation de pression nulle sur une maille) en représentant un réseau micro fluidique par son schéma équivalent électrique (figure 8). La figure 9 montre des exemples concrets de circuits hydraulique et électrique.



(b)

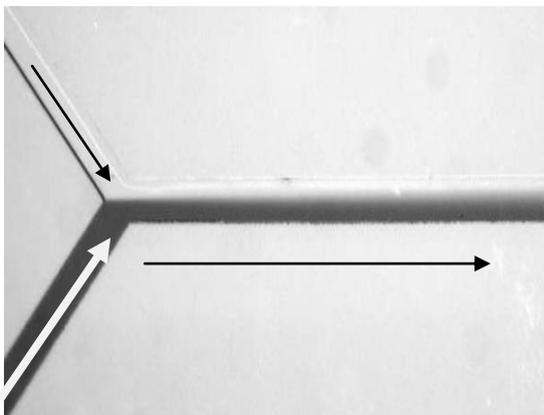


(a)

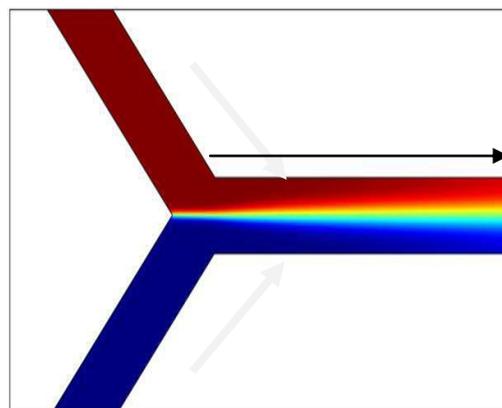
**Figure 1.14:** Exemple d'un circuit micro fluidique, (b) exemple d'un circuit électrique

#### 1.4.5. - Diffusion et mélange : Nombre de Pec let

Les écoulements à l'échelle de la micro fluidique étant laminaire, il en résulte que la mise en contact de deux milieux se traduit par un écoulement qui sera « bidimensionnel », l'absence de turbulence n'entraînant un mélange que par diffusion (figure 10).



(a) (b)



Canaux d'entrée de section carrée de coté  $100\mu\text{m}$

**Figure 1.15:** (a) Exemple d'un circuit en Y et (b) la simulation du transport de matière (logiciel Comsol©).

C'est à la fois une force et une faiblesse pour la micro fluidique. Faiblesse car le mélange n'est que diffusif, force car on peut alors tirer avantage de ce profil de diffusion pour analyser des réactions en écoulement ou séparer les particules de tailles différentes entre elle.

Le nombre de Pec let permet de caractériser la nature du transport de matière. Il est défini par le rapport entre le temps de diffusion et le temps de convection :

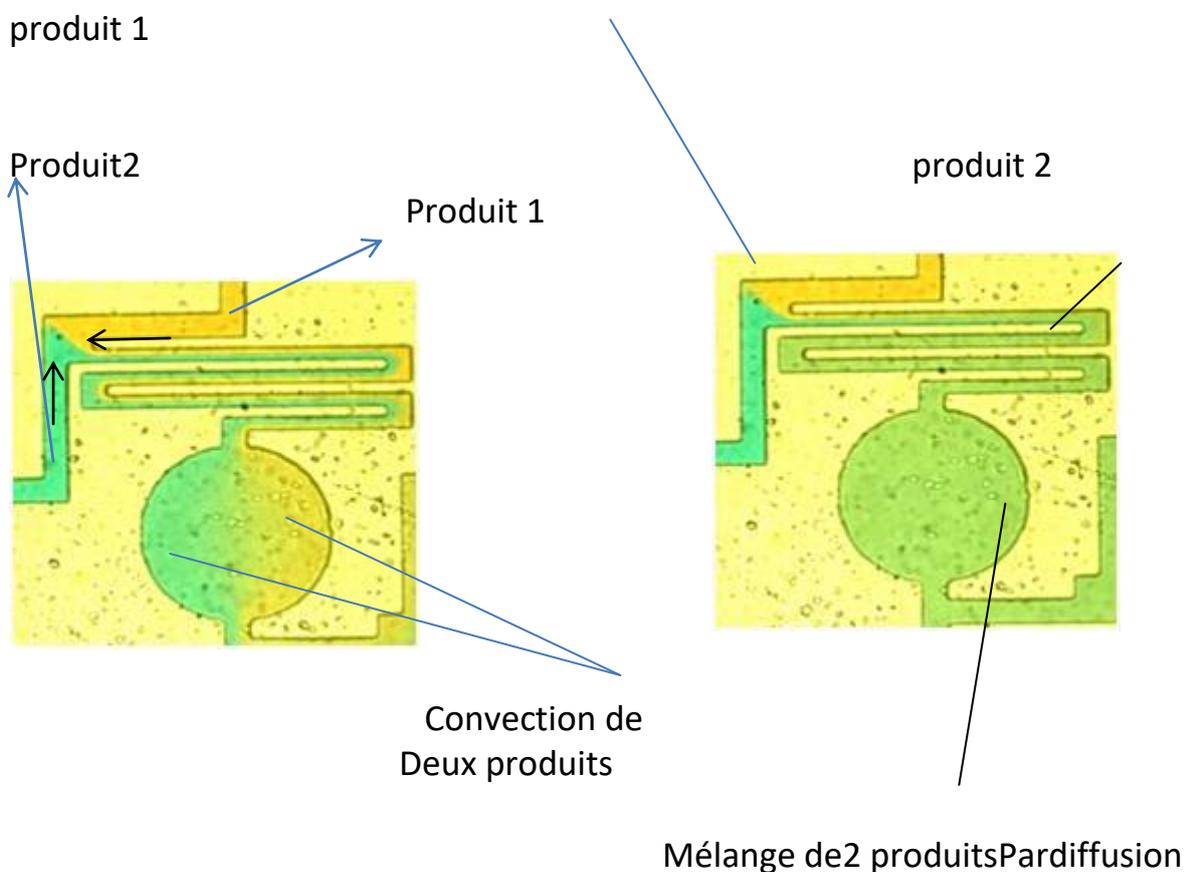
$$\text{Nombre de Pec let} = \text{temps de diffusion/temps de convection} : Pe = \frac{T_D}{T_C} \dots\dots(1.9)$$

$$\text{Avec le temps de diffusion} : T_D = \frac{L_r^2}{2R}, \quad R : \text{ est le coefficient de diffusion, } \dots\dots(1.10)$$

$$\text{Et le temps de convection} : T_C = \frac{L_C}{v} \dots\dots(1.11)$$

Si  $Pe > 1$  : l'écoulement est convectif la matière est principalement transporté par l'écoulement (figure 11a)

Si  $Pe < 1$  : c'est la diffusion qui domine (figure 11b) permettant un « mélange » entre les deux liquides.



**Figure 15:** (a)  $Pe > 1$ , Convection des 2 produits, (b)  $Pe < 1$ , convection

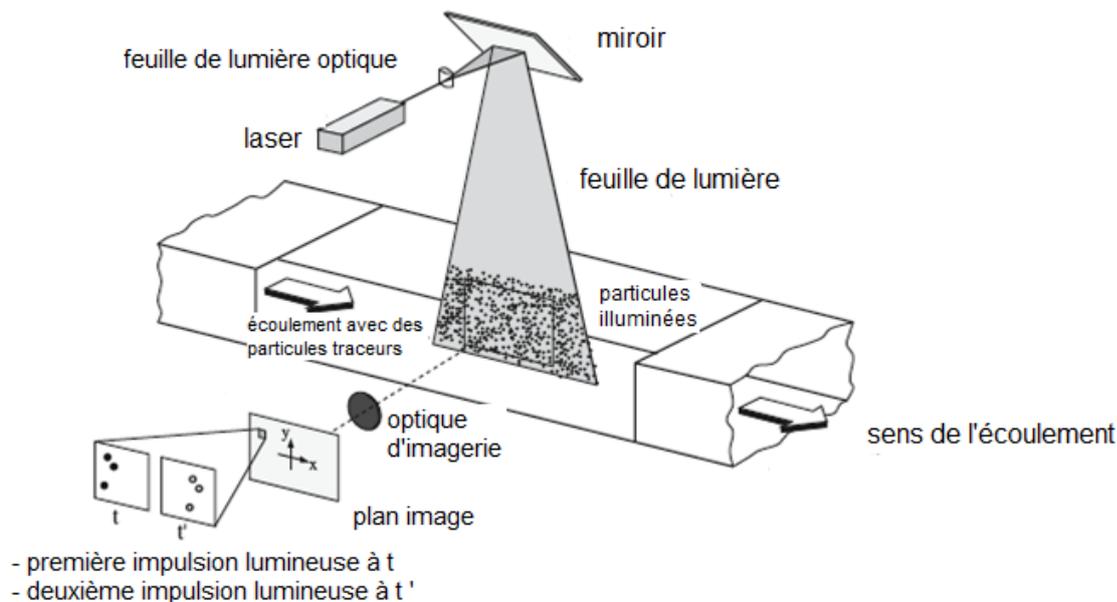
# **Chapitre 2 :**

# **Théorie et aspect**

# **materiel de PIV**

### 2.1 Principe de la vélocimétrie par images de particules (PIV) :

La vélocimétrie des particules par images (PIV) [6-8] est la méthode la plus avancée qui permet une mesure précise et instantanée d'un vecteur de vitesse dans un milieu fluide. Le principe de base de cette technique est de capturer deux images haute résolution d'un fluide rempli de particules à deux moments distincts. Le déplacement d'une particule pendant un temps connu est calculé et son vecteur de vitesse correspondant est ensuite déduit. Ci-après, les caractéristiques de base de cette technique de mesure, principalement appelée "vélocimétrie par image de particules" ou "PIV", sera expliquée brièvement



**Fig..2.1** :Dispositif expérimental pour la vélocimétrie d'images de particules dans une soufflerie.

Le dispositif expérimental d'un système de PIV se compose généralement de plusieurs sous-systèmes. Dans la plupart des applications, des particules de traceur doivent être ajoutées au flux. Ces particules doivent être éclairées

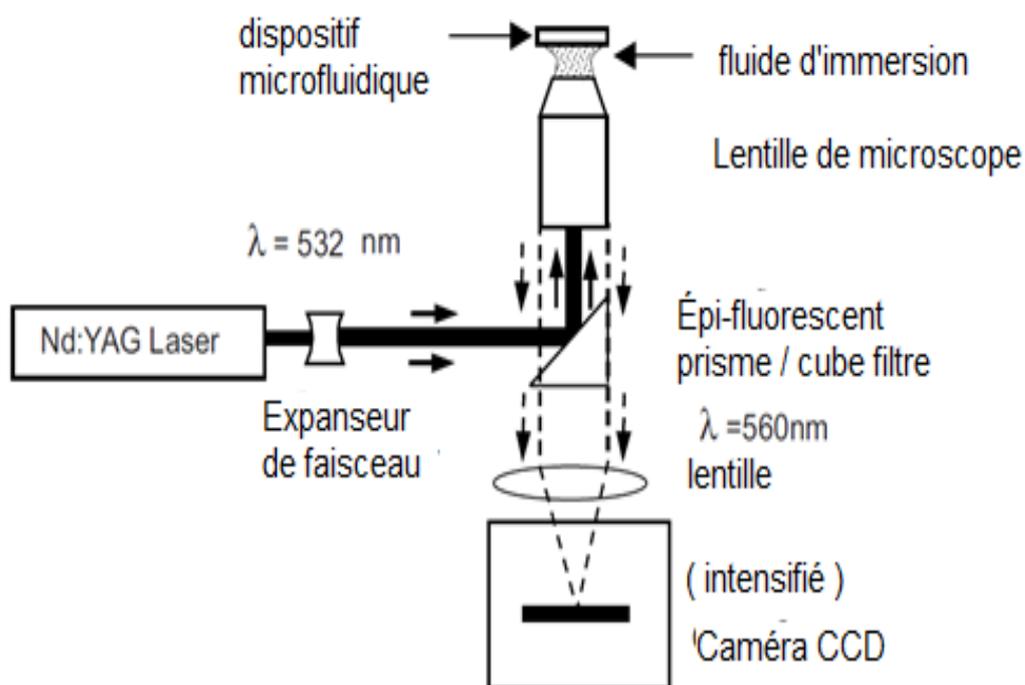
dans un plan de l'écoulement au moins deux fois dans un court intervalle de temps. La lumière diffusée par les particules doit être enregistrée soit sur une seule image, soit sur une séquence d'images. Le déplacement des images de particules entre les impulsions lumineuses doit être déterminé par l'évaluation des enregistrements de la PIV. Afin de pouvoir traiter un grand nombre de données qui peuvent être collectées au moyen de la technique de la PIV, un post-traitement est nécessaire. La figure 2.1 décrit une configuration typique pour l'enregistrement de la PIV. Des petites particules de traceur sont ajoutées à l'écoulement. Une feuille légère à l'intérieur du flux est éclairée deux fois au moyen d'un laser. On suppose que les particules traceuses se déplacent avec une vitesse d'écoulement locale comprise entre les deux illuminations. La lumière diffusée par les particules du traceur est enregistrée via un objectif de haute qualité, soit sur une seule monture (par exemple sur un ou appareil photo numérique). Après le développement, l'enregistrement photographique PIV est numérisé au moyen d'un scanner. La sortie du capteur numérique est transférée à la mémoire d'un ordinateur directement.

## 2.2. Micro-PIV :

Dans des nombreux domaines des sciences et de l'ingénierie, il est important de déterminer le champ d'écoulement à l'échelle du micron. Les applications industrielles des dispositifs fluidiques microfabriqués sont présentes dans l'aérospatiale, l'informatique, les industries automobile et biomédicale. Dans l'industrie aérospatiale, par exemple, des tuyères supersoniques à l'échelle du micron mesurant environ  $35\ \mu\text{m}$  sont utilisées comme micropropulseurs sur des microsattelites [9]. Dans l'industrie informatique, les imprimantes à jet d'encre, qui consistent en un ensemble de buses dont les orifices de sortie sont de l'ordre de quelques dizaines de microns de diamètre, représentent 65 % du marché des imprimantes informatiques [10]. L'industrie biomédicale développe et utilise actuellement des dispositifs fluidiques micro fabriqués pour le diagnostic des patients, le suivi des patients et l'administration des médicaments. Le dispositif i-STAT (i-STAT, Inc.) est le premier dispositif fluidique micro fabriqué qui a été utilisé en routine dans la communauté médicale pour les analyses sanguines. Autres exemples de dispositifs microfluidiques de la recherche biomédicale comprennent des cytomètres de flux à micro-échelle pour la détection des cellules cancéreuses, des canaux électrophorétiques micro-usinés pour le fractionnement de l'ADN et des chambres de réaction en chaîne de la polymérase (PCR) pour l'amplification de l'ADN [11].

Le premier système  $\mu\text{PIV}$  a fait l'objet d'une démonstration mesurant les flux lents - les vitesses de l'ordre de centaines de microns par seconde - avec une résolution spatiale de  $6,9 \times 6,9 \times 1,5\ \mu\text{m}^3$  [12]. Le système utilisait un microscope à fluorescence et une caméra CCD intensifiée pour enregistrer le tracé de flux de polystyrène de 300 nm de diamètre particules. Les particules sont éclairées par une lampe à arc Hg continue (figure 1.6). Koutsiaris et al.

13] a présenté un système adapté aux flux lents qui utilisait 10  $\mu\text{m}$  glass sphères pour les particules traceuses et une vidéo à faible résolution spatiale et à grande vitesse pour enregistrer les images de particules, ce qui donne une résolution spatiale de 26,2  $\mu\text{m}$ . Ils ont mesuré le flux d'eau à l'intérieur de 236  $\mu\text{m}$  de verre ronds et a trouvé un accord entre les mesures et la solution analytique dans l'incertitude de mesure.



**Figure 2.2 :** Schéma d'un système  $\mu\text{PIV}$ .

Un laser Nd:YAG pulsé est utilisé pour éclairer des particules fluorescentes de 200 nm de traçage de flux, et une caméra CCD refroidie est utilisée pour enregistrer les images des particules.

Par la suite, les applications de la technique  $\mu$ PIV se sont progressivement orientées vers des flux plus rapides, plus typiques des applications aérospatiales. La lampe Hg-arc a été remplacée par un laser Nd:YAG à deux têtes New-wave qui permet l'analyse par corrélation croisée de paires d'images exposées individuellement, acquises avec des intervalles de temps inférieurs à la microseconde entre les images.

### **2.2.1 Différences par rapport à la PIV macroscopique :**

La micro-PIV diffère de la PIV standard à l'échelle macro à quelques égards importants. L'une des différences est l'effet du mouvement brownien des particules traceuses. Dans la micro-PIV, l'effet du mouvement brownien n'est pas négligeable car le diamètre des particules du traceur est inférieur à 1  $\mu$ m. Ces particules montrent des mouvements aléatoires relativement

importants dus au mouvement brownien sous un microscope. Le mouvement brownien des particules de traceur affecte de manière significative l'estimation de la vitesse en PIV puisque la méthode PIV elle-même est basée en supposant que les traceurs suivent rigoureusement le mouvement du fluide. Pour que pour réduire l'effet du mouvement brownien, la procédure d'étalement dans le temps comme la méthode de corrélation moyenne dans le temps [14] est souvent utilisée. Une autre différence majeure réside dans le mode d'éclairage. Dans la PIV macroscopique classique, les particules de traceur dans le flux sont généralement éclairés par une fine feuille lumineuse plane de manière à pour visualiser le plan de coupe transversale du volume de mesure. Sous un microscope, en revanche, l'éclairage des feuilles s'avère peu pratique car le canal d'écoulement et la zone d'observation sont certainement plus petits de 1 mm et il est difficile de produire la feuille légère avec l'épaisseur de moins

de 100  $\mu\text{m}$  et d'aligner la feuille avec précision sur le plan focal de microscope. Pour cette raison, presque tous les systèmes de micro-PIV utilisent le microscope fluorescent microscopie avec méthode d'illumination du volume.

### **2.3 Aspects matériels :**

#### **2.3.1 Particules :**

La PIV requiert la participation de particules qui suivent le flux et propagent la lumière laser. Ces traceurs sont dits "naturels" s'ils sont présents dans le flux ou "artificiels" s'ils sont injectés parensemencement externe. Par contre, tous les types de particules ne sont pas compatibles avec la PIV. En effet, pour être observables, elles doivent posséder un grand pouvoir de diffusion de la lumière dans la bande de longueur d'onde du laser.

En outre, ils devront être suffisamment grands pour diffuser suffisamment de lumière pour être observés par la caméra. Il est nécessaire que ces particules suivent régulièrement le flux pour avoir la vraie vitesse. Par conséquent, leur inertie doit être faible et elles doivent avoir un temps de réponse court par rapport aux fluctuations de la vitesse. Ceci est assuré pour les particules de petite taille et, si possible, pour des densités de particules proches de celles du fluide.

Dans le cas d'unensemencement synthétique, le procédé d'injection et/ou un trop grand nombre de particules peut provoquer une altération du flux. Pour un traitement efficace, la densité des particules doit être suffisamment homogène et élevée [15]. La qualité de l'ensemencement est importante pour la précision des mesures et sa maîtrise est l'un des points

	Diamètre	Densité	Tps réponse	
<b>Particules pour l'eau</b>	Billes de verre creuses	10 $\mu\text{m}$	1.1 g/cm <sup>3</sup>	0,5 $\mu\text{s}$
	Poudre aluminium	3 $\mu\text{m}$	2.7 g/cm <sup>3</sup>	0,9 $\mu\text{s}$

<b>Particules pour l'air</b>	Gouttes d'huile	1 $\mu\text{m}$	0.92 g/cm <sup>3</sup>	0,3 $\mu\text{s}$
	Billes SiO <sub>2</sub>	0.8 $\mu\text{m}$	2.6 g/cm <sup>3</sup>	5 $\mu\text{s}$

les plus délicats de la réalisation d'un système de PIV. Les conditions à suivre sont les suivantes :

- Les particules devront obligatoirement suivre l'écoulement. Elles ne doivent pas avoir une taille trop grande et leur densité doit rester très proche de l'unité.

- Cependant, elles doivent être assez grandes pour que leur représentation soit possible à analyser.

- La concentration des particules dans la section de mesure doit être suffisamment homogène. Elle doit être suffisante pour donner des vecteurs dans les zones d'interrogation de chaque image, mais pas trop élevée pour ne pas nuire au contraste de l'image.

- Le procédé d'injection des particules ne doit pas troubler le flux .

Pour obtenir un ensemencement adéquat, il est donc important de trouver le bon compromis entre ces différents facteurs de choix [

### 2.3.2 Microscopie:

La microscopie est un ensemble de techniques permettant d'obtenir une image des structures à l'échelle microscopique. Le principe est dans tous les cas le même : une onde est envoyée sur la préparation ou émise par la préparation. Cette onde est captée par un objectif qui la concentre et passe par un oculaire qui crée une image observable. Cette image est soit observée à l'œil nu, soit photographiée, soit enregistrée par caméra CCD et stocké sur ordinateur pour retraitement.

L'image obtenue est beaucoup plus qu'un instantané de la préparation. Les techniques de révélation permettent aujourd'hui d'identifier de façon précise toutes sortes de molécules et les photographies (sur pellicules ou numériques) peuvent être analysées pour des études quantitatives (taille, nombre et emplacement des éléments observés).

Il n'y a pas une technique microscopie mais plusieurs dizaines aboutissant à des résultats différents. Il n'y a aucune comparaison entre les images plates et peu contrastées d'un microscope en contraste de phase, celles très fines d'un microscope électronique ou les reconstitutions multi chromes en 3D d'un microscope confocal., toutefois seule la première technique permet de travailler sur des tissus vivants.

Aujourd'hui la microscopie est divisée en deux grands groupes, différents par la nature de la particule élémentaire impliquée :

- le microscope optique, aussi appelé photonique, parce qu'il utilise des photons,
- le microscope électronique qui utilise des électrons pour étudier l'objet,
- le microscope à champ proche qui utilise la force atomique et l'effet tunnel.

### 2.3.2.1 Types de microscopie optique

La technique de microscopie optique est la plus ancienne utilisée. Elle est également celle dont il existe le plus de variantes. Le principe est le suivant, la préparation est éclairée par une lampe. Les molécules à observer vont interagir avec la lumière de plusieurs façons :

- soit en absorbant certaines longueurs d'onde de la lumière. C'est la microscopie en lumière directe.
- soit en provoquant un déphasage des différents rayons lumineux. C'est la microscopie en contraste de phase.
- soit en émettant de la lumière à une autre longueur d'onde que celle d'origine. C'est la microscopie à fluorescence.

La technique de miro-PIV se considère comme une PIV standard, avec pour différence que le plan de travail n'est plus déterminé par un plan laser mais plutôt par le plan de mesure d'un appareil de microscopie à épifluorescence. L'ensemencement choisi est constitué de particules de polyester fluorescentes sub-micrométriques avec un écart de Stokes de plus de 40 nm. Un schéma de configuration optique simplifié d'un système de micro-PIV est illustré sur la figure I.8

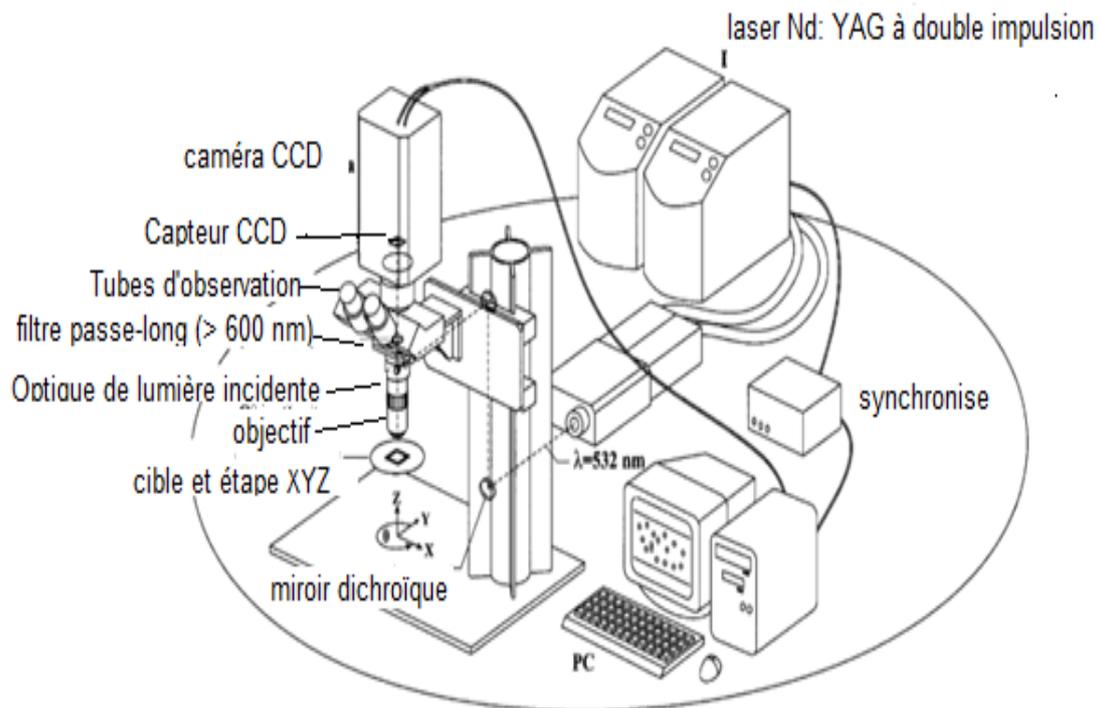


Figure 2.2 : Schéma d'un système de micro PIV avec Un laser Nd : YAG pulsé de haute puissance

Laser Nd : YAG pulsé de haute puissance est utilisé pour illuminer des particules fluorescentes de traceur à travers un microscope épi-fluorescent. Le faisceau d'un laser Nd-Yag pulsé d'une longueur d'onde  $\lambda$  de 532 nm est dilaté par un ensemble de lentilles et orienté à travers un objectif de microscope au niveau d'un prisme épi fluorescent. La lumière émise par l'objectif éclaire un espace bien défini du micro-canal dans lequel circule le fluideensemencé de particules fluorescentes. Les particules fluorescentes sont excitées par la lumière laser et sont réémises dans une zone spectrale différente. La lumière réémise est recueillie par l'objectif du microscope et après avoir franchi le prisme épi fluorescent, elle est dirigée vers une caméra PIV synchronisée qui permet de prendre des images des particules [16].

## 2.4 Aspects traitement d'image pour La PIV :

### 2.4.1 Principes de traitement :

La vélocimétrie par images de particules est une technique qui repose sur l'imagerie de particules traceuses noyées dans un écoulement à deux moments distincts,  $t_1$  et  $t_2$ , pour estimer la vitesse du fluide. Les images sont généralement enregistrées sur un film (photographique ou holographique). L'analyse de corrélation est utilisée pour extraire les déplacements des particules,  $\Delta X$ , et l'estimation de la vitesse

$$\mathbf{u} = \frac{\Delta \mathbf{X}}{\Delta t}, \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

où  $\Delta X$  est le déplacement moyen des particules dans le fluide sur l'intervalle de temps  $\Delta t = t_2 - t_1$  [16]. Les images  $t_1$  et  $t_2$  peuvent être visualisées soit sur la même image, soit sur des images séparées (appelées respectivement PIV à une image et à deux images). Généralement, le champ d'image est divisé en petits sous-domaines appelés "fenêtres" Chacun d'elles est ensuite analysé séparément pour obtenir le champ de vitesse sur l'ensemble de l'image. À proprement parler, la résolution spatiale de l'analyse PIV est définie par la taille de lafenêtre. Pour obtenir une mesure de vitesse valable, un spot doit contenir entre 7 et 10 paires de particules, une paire se référant à une particule imagée à la fois à  $t_1$  et  $t_2$  [17]. Un point important est que la vitesse d'un point d'interrogation particulier est fonction du déplacement moyen des particules dans le point.

Le déplacement moyen des particules dans un point d'interrogation particulier est déterminé par une analyse de corrélation. La composante continue de l'intensité dans chaque point est généralement éliminée avant la corrélation, ce qui donne une distribution d'intensité fluctuante. La corrélation s'écrit alors comme suit

$$R(\mathbf{s}) = \int I_1(\mathbf{X})I_2(\mathbf{X} + \mathbf{s})d\mathbf{X}, \quad \dots(2.2)$$

Où  $I_1$  et  $I_2$  représentent les distributions d'intensité fluctuantes des premier et deuxième spots d'interrogation, respectivement. Il existe deux types d'analyse de corrélation qui peuvent être utilisés pour déterminer le déplacement des particules. Il s'agit de

- Analyse d'autocorrélation : Corréler un point d'interrogation avec lui-même (c-à-d  $I_1 = I_2 = I$ ).
- Analyse de corrélation croisée : corrélation du premier point d'interrogation avec un deuxième point décalé dans la direction moyenne du flux.

### 2.4.2 L'acquisition :

la PIV est une technique optique qui permet de déterminer un champ de vecteurs vitesse dans un plan d'écoulement ensemencé. Un schéma de principe est présenté en figure 2.3. L'écoulement à visualiser est ensemencé avec des particules de petite taille censées le suivre parfaitement et donc être représentatives du déplacement du fluide. De cette manière, le déplacement des particules est assimilé à celui des particules fluides. Un laser impulsionnel double cavité couplé à divers composants optiques (lentilles sphériques, cylindriques, prismes...) crée deux nappes laser pulsées séparées par un écart de temps  $\Delta t$ . Ces impulsions très courtes

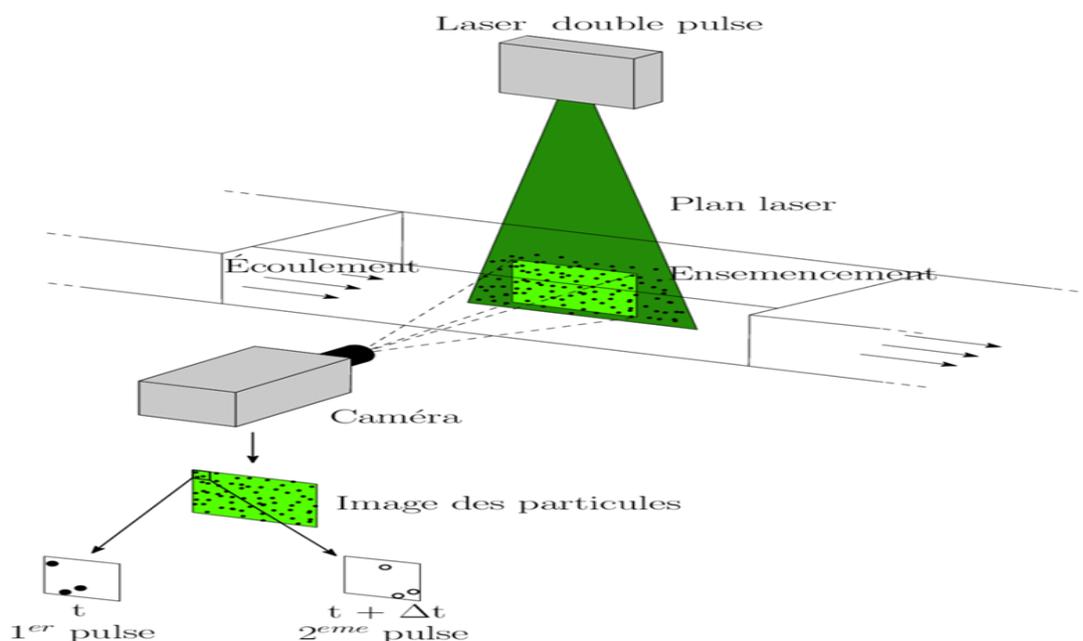


Figure 2.3 – Schéma type d'utilisation de la méthode PIV.

Viennent éclairer et “figer” un plan de l’écoulement. Une caméra CCD prend deux images (A et B) de l’écoulement correspondant à chacune des deux impulsions laser. Le principe Du traitement PIV consiste tout d’abord à découper suivant une grille chaque image en Petites zones, appelées fenêtres d’interrogation (FI). Les FI sont repérées sur la grille Par leurs coordonnées (i, j). Ensuite un procédé de corrélation entre les Images A et B donne un plan de corrélation. Sur celui-ci, le pic maximum correspond au déplacement moyen en pixels des particules contenues dans la FI. Enfin, un Vecteur vitesse associé à chaque fenêtre i, j d’interrogation de l’image A est obtenu en considérant une calibration spatiale et l’écart de temps  $\Delta t$  connu entre Les deux prises de vue. La calibration spatiale est calculée en affectant une longueur à Chaque pixel de l’image. La PIV est une technique non intrusive pour mesurer des champs de vitesse, mais c’est Une technique indirecte puisque la vitesse obtenue est avant tout celle des traceurs que Nous assimilons à celle du fluide.

**2.4.3 L'autocorrélation :**

Les particules sont illuminées à deux (ou plusieurs) instants successifs et enregistrées sur le même support. Ces dernières sont ensuite divisées en petites zones, dites fenêtres (voir figure 2.4), et analysées. Pour chacune de ces fenêtres, la vitesse moyenne des particules présentes sera évaluée. En principe, une fenêtre aura la forme suivante :

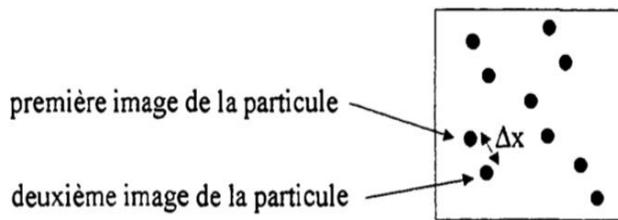


Figure 2.4 : Enregistrement double exposition de n=5 particules.

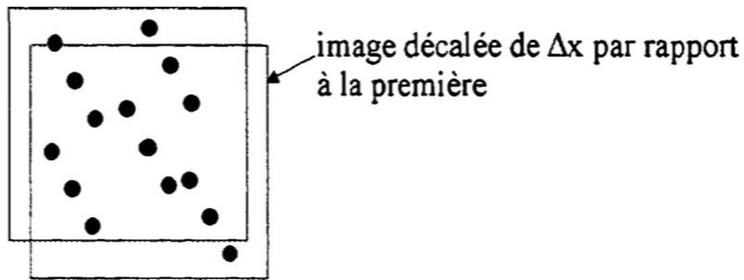
Le schéma de la figure 2.4 montre une double exposition de N=5 particules. A partir de cet enregistrement, nous pouvons analyser le déplacement Ax de la particule, mais nous ne pouvons pas en préciser la direction. En effet, l'analyse de l'image est caractérisée par une distribution d'intensité I(x,y) est obtenue par autocorrélation.

La fonction d'autocorrélation, AC(x,y) est définie par :

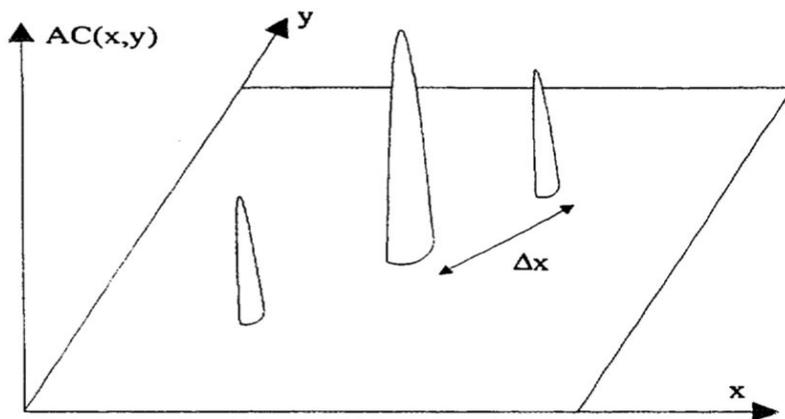
$$AC(x,y) = \iint I(u,v) I(u+x,v+y) du dv = I(-x,-y) * I(x,y) \dots\dots\dots(2.3)$$

où \* désigne le produit de la convolution. La fonction d'autocorrélation peut facilement être évaluée dans l'espace de Fourier. La formule est alors déterminée :

$$AC(x,y) = TF^{-1} \left[ |TF(I)|^2 \right] \dots\dots\dots(2.4)$$



Cette transformation de Fourier a d'abord été réalisée par voie optique en défractant un faisceau laser à travers la zone d'interrogation. Depuis le développement de processeurs de plus en plus rapides, cette tâche est



effectuée par ordinateur. Le schéma suivant montre l'aspect typique de la fonction d'autocorrélation:

Figure 2.5 : Schéma de la présentation des pics de la fonction

Le pic principal concerne la superposition de l'image avec elle-même. Ce pic est le plus important du fait que, dans ce cas, les images de  $2N$  particules sont superposées. La hauteur de ce pic est donc proportionnelle à  $2N$ . Les pics secondaires concernent les signaux produits par la superposition des images décalées respectivement de  $\Delta x$  et  $-\Delta x$ . Ils sont deux fois moins importants que le pic principal, car seules  $N$  images de particules sont alors superposées (figure 2).

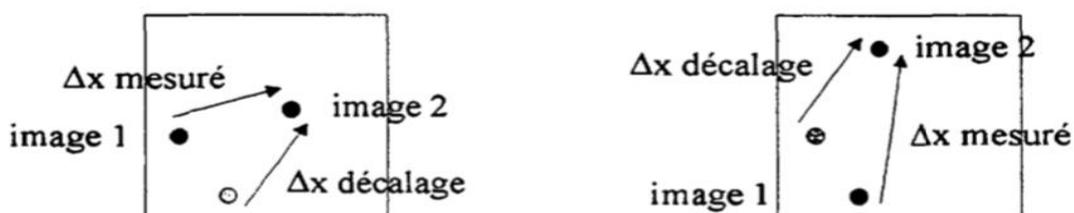
Il faut également représenter rigoureusement dans la figure 2.3 les petits pics nombreux qui correspondent à tous les appartements aléatoires envisageables des images de particules, et qui sont sources de bruit de fond. Ce bruit de fond est proportionnel au nombre de carrés des images de particules, ici  $4N^2$  (ce bruit est composé de  $N^2$  pics de hauteur 2 et de  $2N^2$  pics de hauteur 1).

La méthode d'autocorrélation présente l'inconvénient de ne pas permettre de remonter au sens du flux. De plus, les vitesses trop faibles ne peuvent pas non plus être étudiées car les pics secondaires seront alors noyés dans le pic central. Pour éviter ces deux inconvénients, la seconde image doit être artificiellement décalée d'une certaine distance. Ce nouveau déplacement sera alors assez important pour que le pic central et le pic de



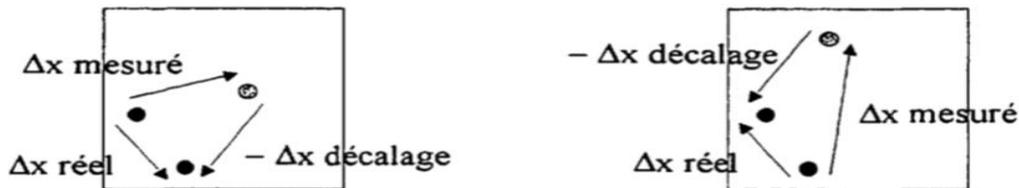
décalage soient séparés et, de plus, le vecteur vitesse correspondant sera toujours orienté vers une zone bien précise de l'image (voir principe sur la figure 2.6). Ce déplacement peut être réalisé mécaniquement à l'aide d'un miroir rotatif installé devant l'objectif de la caméra, ou électroniquement en décalant les pixels de l'image avant que le second flash ne se produise.

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



distinguée

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



En connaissant sans ambiguïté  $\Delta x$  mesuré, on peut remonter à  $\Delta x$  réel  
 Figure 2.6. Principe de décalage des images 1 et 2 pour la mesure  $\Delta x$

#### 2.4.4 La corrélation croisée (« cross-corrélation ») :

Par commodité, les images étudiées sont en négatif. Il faut tout d'abord préciser que ce type de corrélation (corrélation croisée) est celui qui est réalisé par le système PIV 2100 [17-19]. L'architecture du système PIV 2100 nous permet d'effectuer ces corrélations en temps réel et sans l'aide d'un logiciel. Lors d'une acquisition, les corrélations sont directement transmises dans la base de données et la sauvegarde des images n'est pas nécessaire (sauf si l'on veut faire d'autres types de corrélations). C'est ce type de corrélation qui sera appliqué pour les mesures de débit dans les turbines.

Le rôle des corrélations est de déterminer le déplacement effectué par les particules d'une image à une autre. En connaissant le temps  $\Delta t$  qui sépare la prise des deux images, on peut évaluer la vitesse.

Pour permettre une corrélation croisée, les deux images qui constituent le couple sont d'abord subdivisées en zones d'interrogation (voir figure 2.7) [21-24]. La taille de la fenêtre est à la discrétion de l'utilisateur. La taille des zones d'interrogation proposées dans le logiciel utilisé varie entre  $16 \times 16$  et

256×256 pixels. Le site  $\Delta t$  est choisi de manière à ce que le déplacement maximum dans une zone de requête soit d'environ 10 pixels.

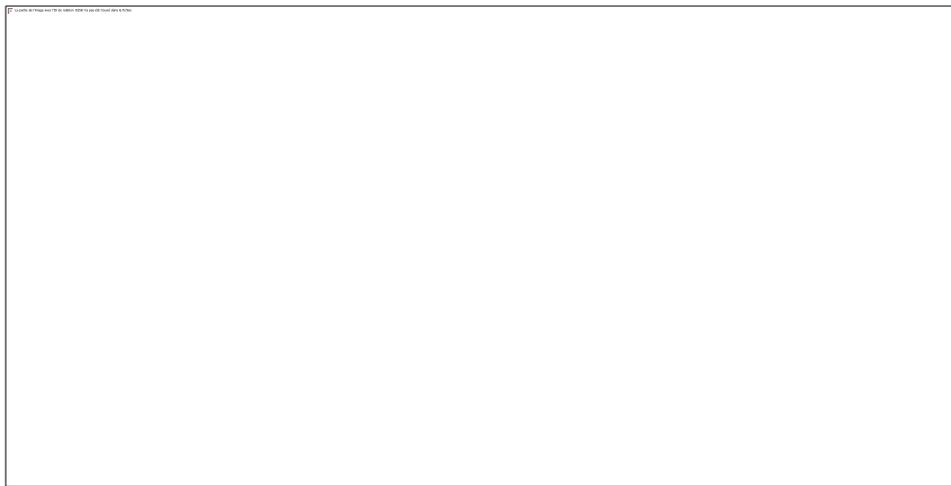


Figure 2.7 : Division de l'image en zones d'interrogation. Les traits pointillés délimitent les zones d'interrogation

Pour chaque zone d'interrogation, une corrélation croisée est établie entre l'image 1 et l'image 2. Cette corrélation croisée permet de calculer un déplacement pour chacune des zones d'interrogation. Ainsi, si une image possède 1200 zones d'interrogation, nous obtenons alors un champ de 1200 déplacements qui, une fois divisé par  $\Delta t$ , donne 1200 vecteurs de vitesse. (Voir figure 2.7) [26-28]. Il y a un champ de vitesse par paire d'images.

En gros, et afin de fournir une vue d'ensemble du traitement, cette corrélation croisée est maintenant examinée plus en détail.

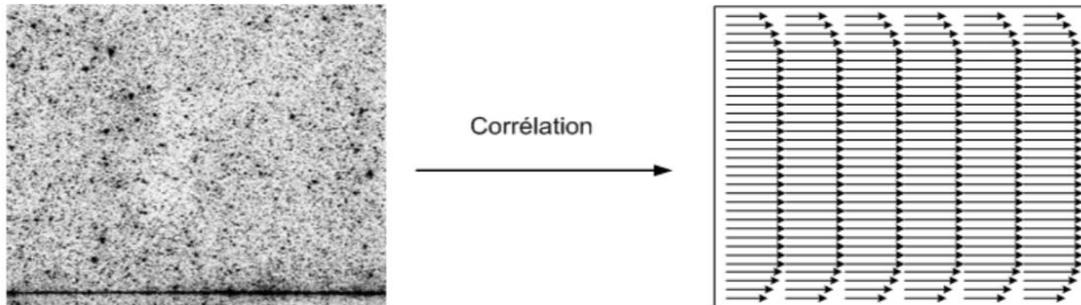


Figure 2.7. Exemple de corrélation d'une paire d'images

En simplifiant (d'après une idée originale de Huang (1994)), on prend en compte une fenêtre de  $3 \times 3$ , qui comporte donc 9 pixels. La figure II. 6.3 illustre cette fenêtre pour l'image 1 et l'image 2. Les pixels noirs sont les images des particules

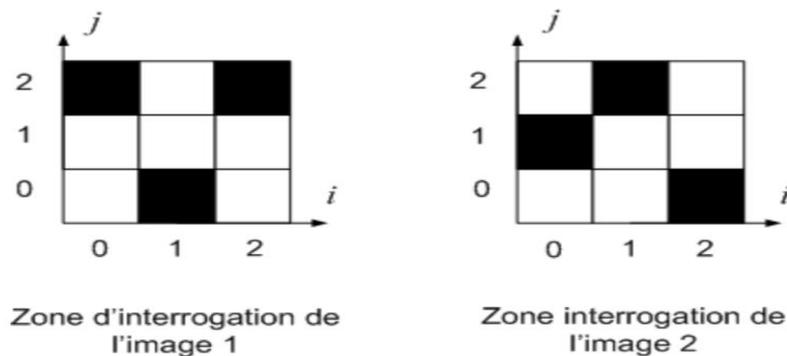


Figure II.6.3 : Zones d'interrogations  $3 \times 3$

Ces zones d'interrogation ne possèdent aucune nuance de gris, uniquement du noir et du blanc. En outre, comme indiqué ci-dessus, les zones d'interrogation sont indiquées en négatif.

Tout d'abord, un système d'axes  $(i, j)$  est établi qui permet de localiser un pixel dans la fenêtre (par exemple, le pixel en bas à gauche a des coordonnées  $(0;0)$ ). On se concentre ensuite sur l'illumination des pixels. Dans ce cas, les particules ne permettent de mesurer qu'un seul pixel. On notera l'illumination d'un pixel de l'image 1,  $I$ , et l'illumination d'un pixel de l'image 2,  $J$ . La valeur de  $I$  ou  $J$ , est 1 si le pixel est noir (présence d'une particule), 0 sinon.

La corrélation croisée est alors effectuée en appliquant la formule suivante [29-32]:

$$\Phi(m, n) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 I(i, j) J(i + m, j + n) \quad (m, n) \in \{0,1,2\}^2 \dots\dots\dots(2.5)$$

où  $\Phi(m, n)$  est le coefficient de corrélation qui correspond au déplacement  $(m, n)$ , c'est-à-dire  $m$  pixels dans la direction  $i$  et  $n$  pixels dans la direction  $j$ . Cette équation est applicable à toutes les valeurs de  $(m, n)$ . En fait, nous testons tous les déplacements possibles des images de particules. Chaque valeur de déplacement  $(m, n)$  correspond à une valeur de  $\Phi$ . Par exemple, pour  $m=0$  et  $n=2$  (déplacement de deux pixels dans la direction  $j$ ), en éliminant les termes nuls, nous avons :  $\Phi(0, 2) = I(1, 0)J(1, 2) = 1$ .

# **Chapitr 3 :**

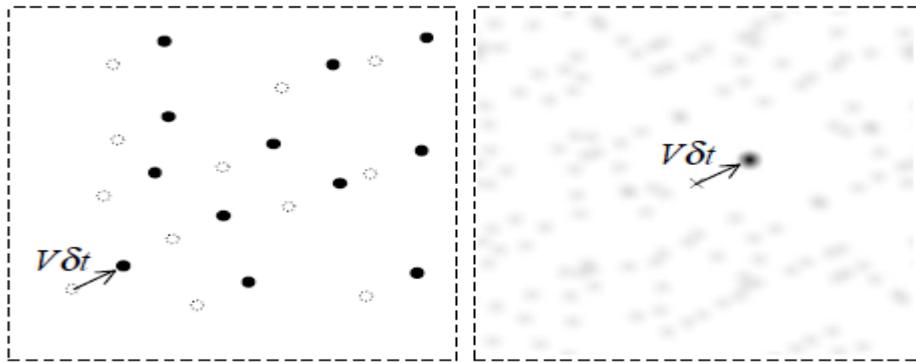
## **Résultats de la Simulation de la PIV**

**3.1 PIVLab :**

PIVlab fait donc partie des quelques logiciels open-source disponibles gratuitement sur internet et permettant d'effectuer une analyse PIV d'un écoulement. Il a été écrit en 2010 par William Thielicke, un biologiste qui a réalisé un doctorat sur la dynamique des fluides. Celui-ci continue cependant à mettre à jour régulièrement son application afin d'en améliorer ses performances. PIVlab qui propose de nombreuses fonctionnalités, est réputé pour sa capacité à fournir des résultats de qualité et est utilisé par un bon nombre de chercheurs ou autres. Il compte d'ailleurs plus de 450 téléchargements par mois et dispose d'un forum de questions réponses bien alimenté. Ce dernier a d'ailleurs été bien utile pour répondre aux différentes questions que nous avons dû résoudre durant nos analyses. PIVlab est une application qui fonctionne sur Matlab et qui nécessite une toolbox supplémentaire : « Image processing toolbox »

**3.2 Résultat de La simulation :**

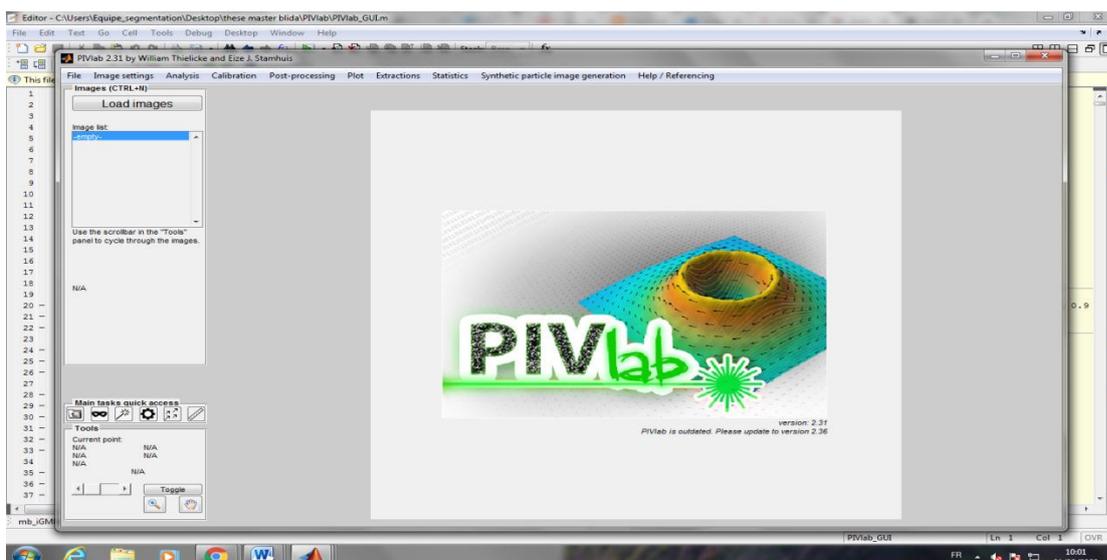
Cette partie a pour objectif d'illustrer, à l'aide de PIVlab, l'influence de différents paramètres sur le résultat de la simulation, Le principe est le suivant: deux images générées successives en utilisant le PIVlab, la fonction de corrélation entre deux portions successives est déterminée. Le décalage du pic de corrélation par rapport au centre indique le déplacement des particules (Figure 3.1).



**Figure 3.1** : Principe de la mesure. (a) mouvement des traceurs entre deux images, (b) corrélation entre deux images successives

### 3.2.1 Creation deux images à $t$ et $t+\Delta t$ :

L'objectif du développement de ce générateur Synthetic Image Generator était de disposer d'un outil standardisé, permettant de générer des images de PIV synthétiques et de simplifier l'évaluation des performances des algorithmes de traitement de PIV. Un deuxième objectif était de disposer d'un outil flexible qui puisse être utilisé pour préparer une expérience de PIV en optimisant les paramètres d'enregistrement sur des images synthétiques réalistes



**Figure 3.2** : l'interface principale de PIVlab.

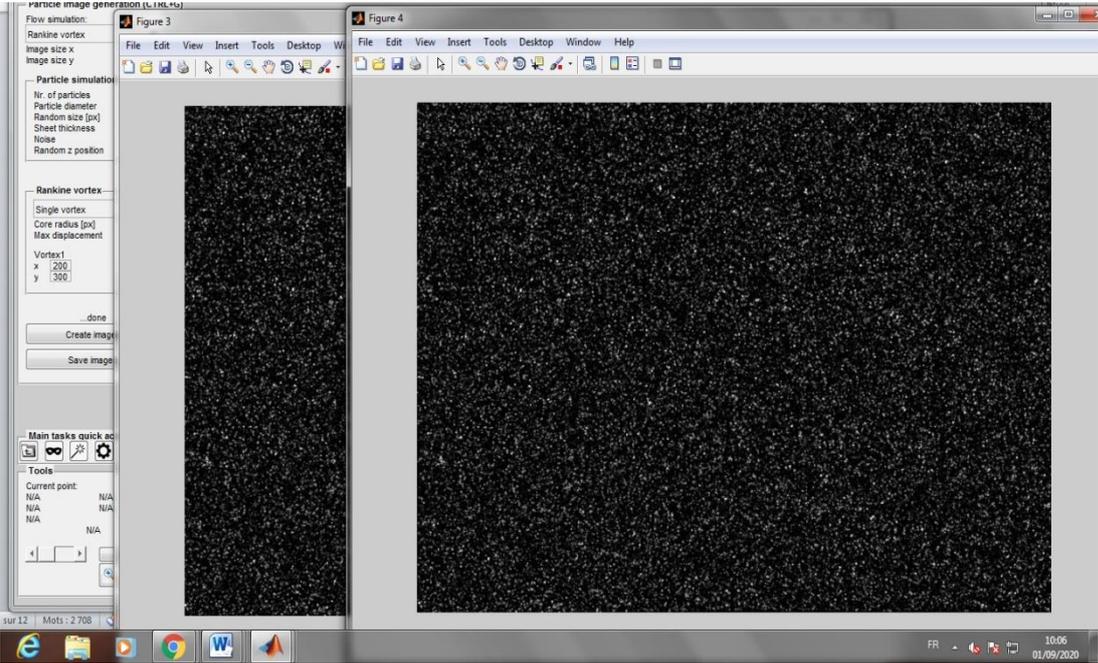
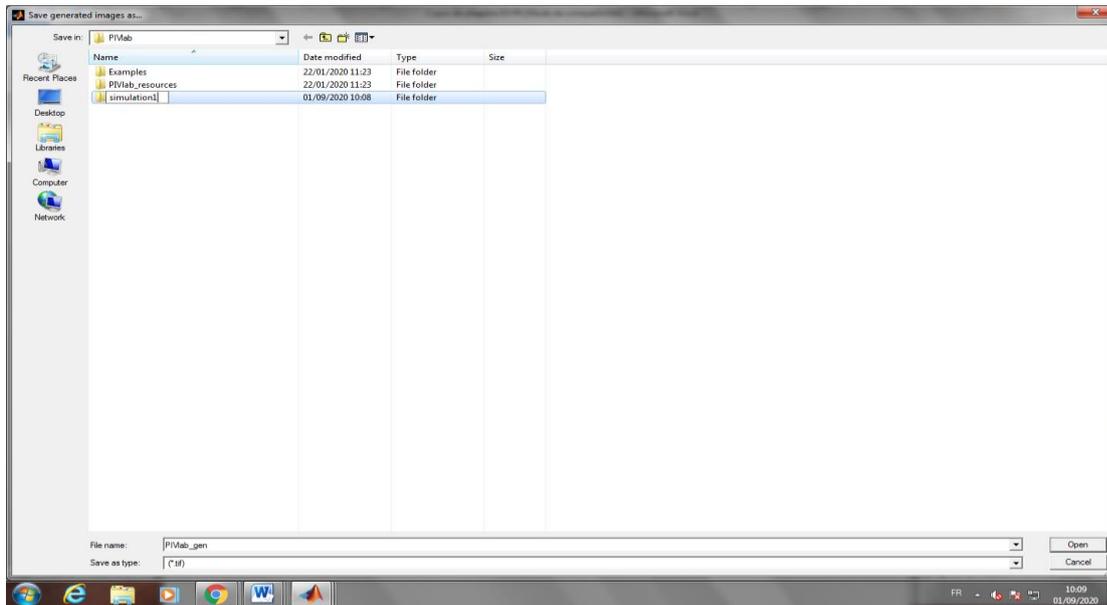


Figure3.3 : Génération des images synthétiques

- Enregistrer les images dans un dossier simulation1



**Figure 3.4** : sauvegarde des images sur un dossier

### 3.2.2 Chargement des images depuis le dossier simulation1 :

Charger les images (bouton Load Images). Sélectionner les Chiers importés. Cliquer sur bouton Add. Puis dans la fenêtre sélectionnée, sélectionner les Chiers qui seront activement utilisés pour le calcul (typiquement une dizaine de Chiers pour une mesure localisée dans le temps) et cliquer sur le bouton Import.

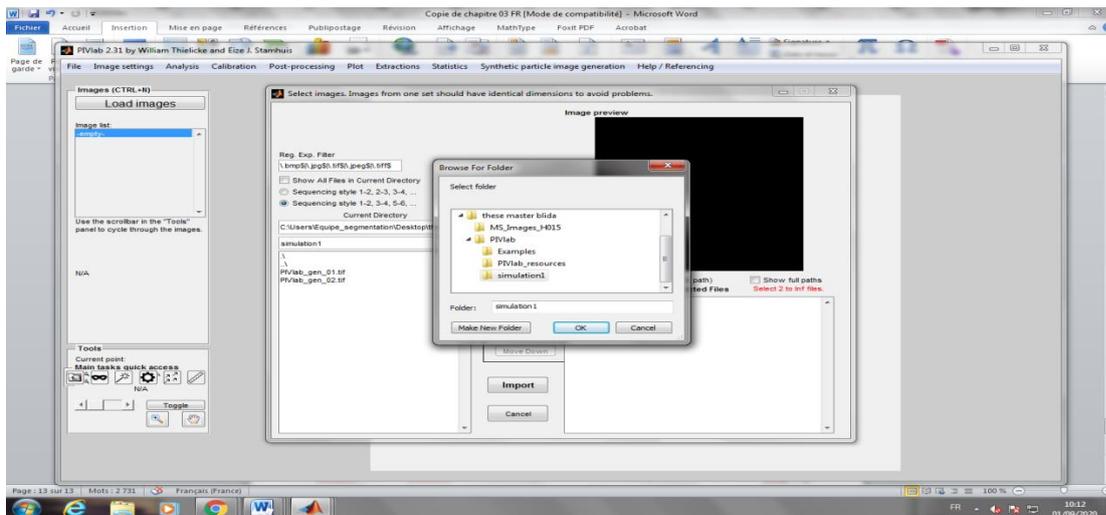


Figure 3.5 : Import les images de dossier simulation1

3.2.3 Analyser les deux images :

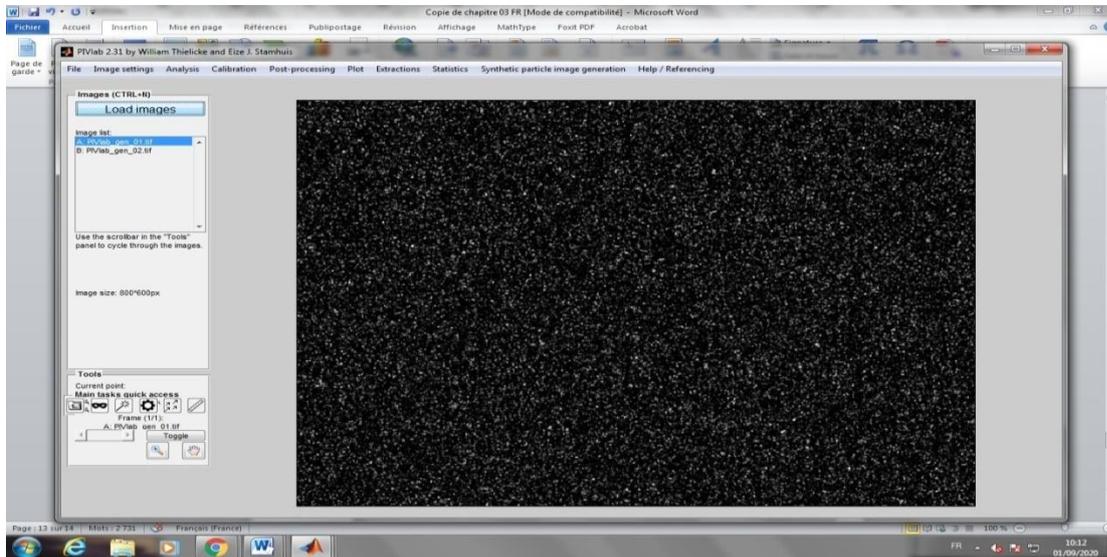


Figure3.6 : Analyse d'image 1

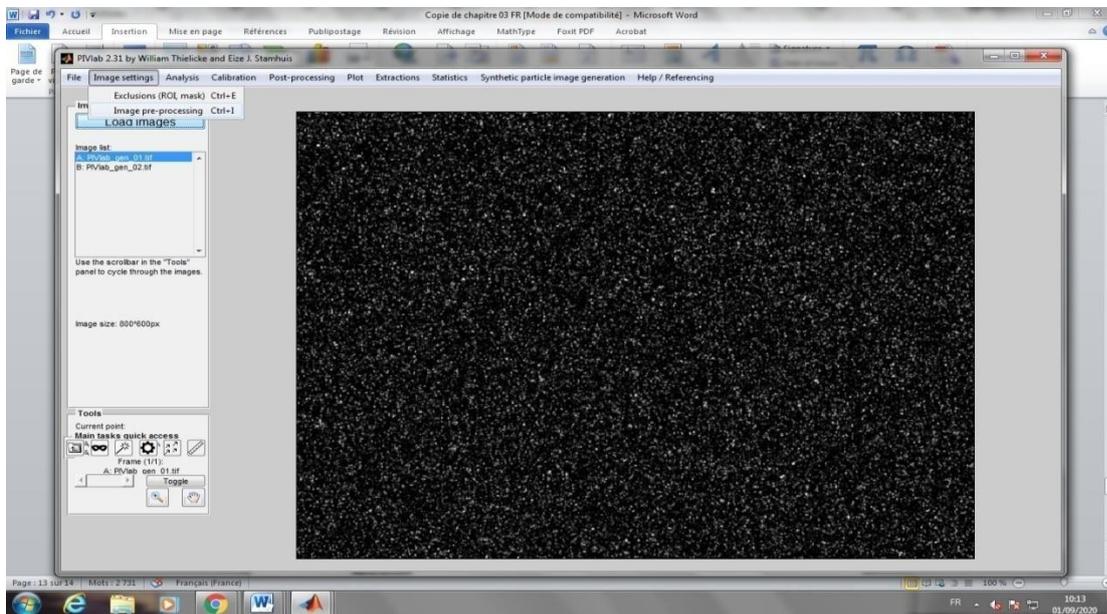


Figure3.7 :Analysed'image 2

### 3.2.4 Résultat :

Donne les paramètres de calcul de la PIV : nombre d'étapes de calcul et taille des fenêtres de calcul (des puissances de 2 en nb de pixels). Cette taille de fenêtre dépend d'une part des échelles caractéristiques de l'écoulement et d'autre part du déplacement des particules d'une image à l'autre. La taille \_nale de fenêtre de calcul  $X_e$  la résolution spatiale du champ de vitesse mesure. La taille de la fenêtre de calcul doit être au moins deux fois plus grande que le déplacement des particules.

Lancer l'analyse, cliquée sur l'onglet "Analysis" puis sur le bouton Analyze all frames.

Dans cette section on a appliqués la PIV sur un écoulement vortex qui est une région d'un fluide dans laquelle l'écoulement est principalement un mouvement de rotation autour d'un axe.

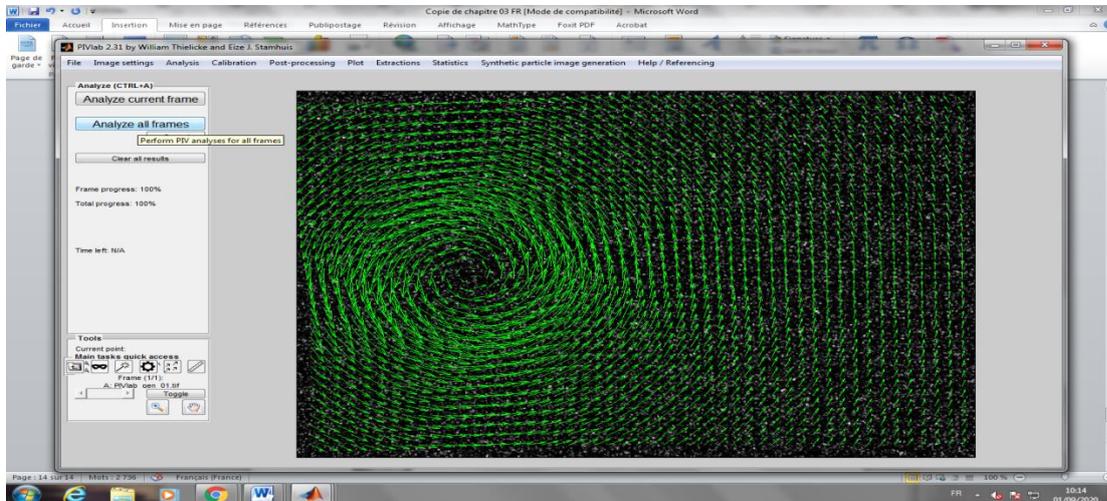
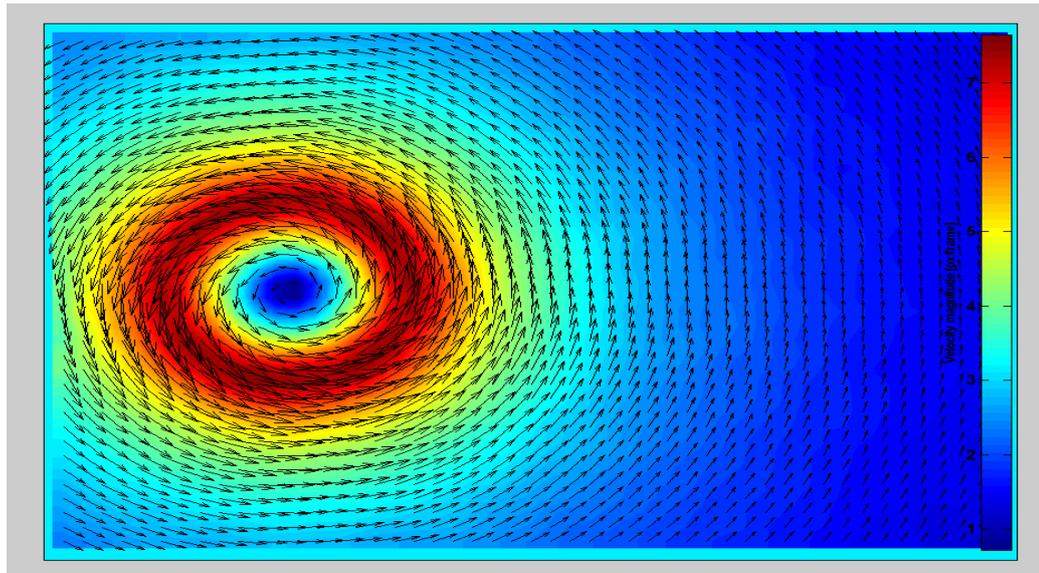


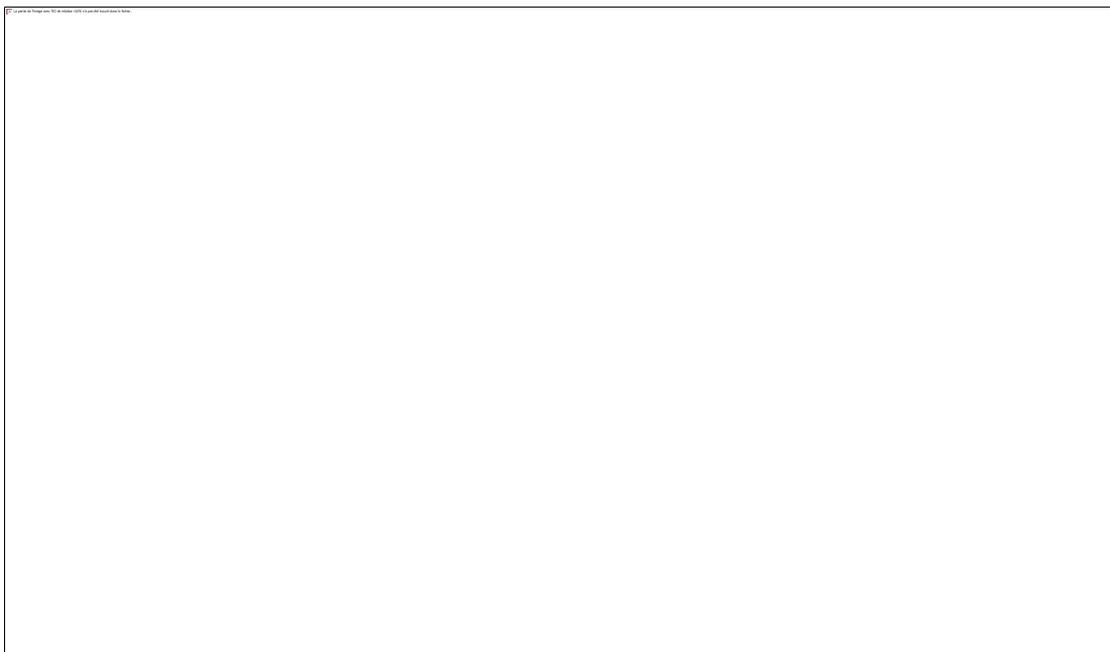
Figure 3.8 : champ de vecteurs vitesse de vortex1



**Figure 3.9 :** les valeurs de champ de vitesse de fluide on cas de vortex1

### 3.2.5 Cas linéaire :

C'est le mode d'écoulement d'un fluide s'écoule plus ou moins dans la même direction, sans que les différences locales se contrarient. C'est généralement celui qui est recherché lorsqu'on veut faire circuler un fluide dans un microcanal (car il crée moins de pertes de charge)



**Figure 3.10:** *champ de vecteurs vitesse (cas linéaire)*

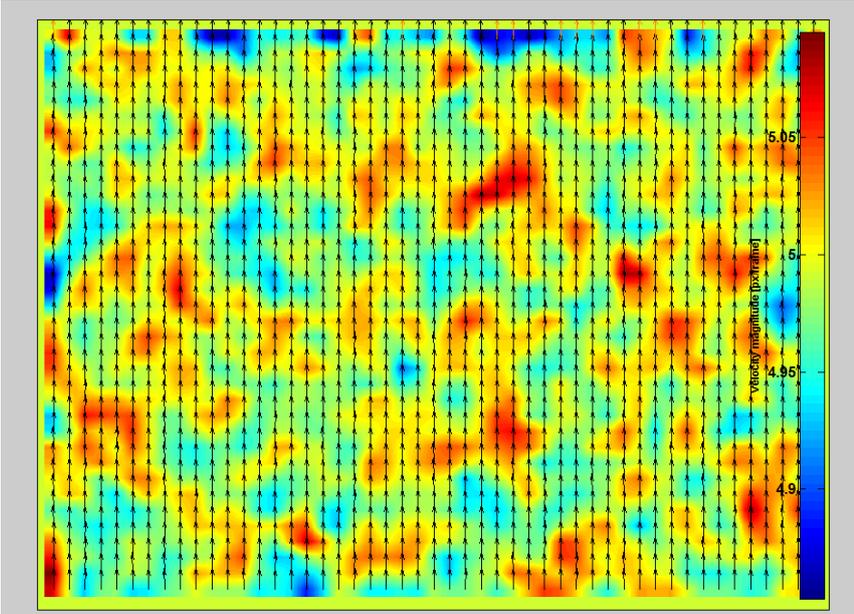


Figure 3.11: vitesse du fluide dans le cas linéaire

### 3.2.6 Cas d'un écoulement dans une membrane:

Une membrane est une barrière semi-perméable, utilisée dans les systèmes microfluidiques pour contrôler le transport des molécules et des espèces dans le système.

On peut trouver différents termes à la place de membrane dans la littérature comme le terme de "filtre", "passoire". Le terme "filtre" est utilisé car la membrane permet la séparation de particules de différentes tailles,, en agissant comme un filtre et en étant capable d'interconnecter deux canaux microfluidiques au-dessus et au-dessous de la membrane. La figure 3.12 montre une simulation d'un écoulement dans une membrane à l'aide de logiciel PIVLAB

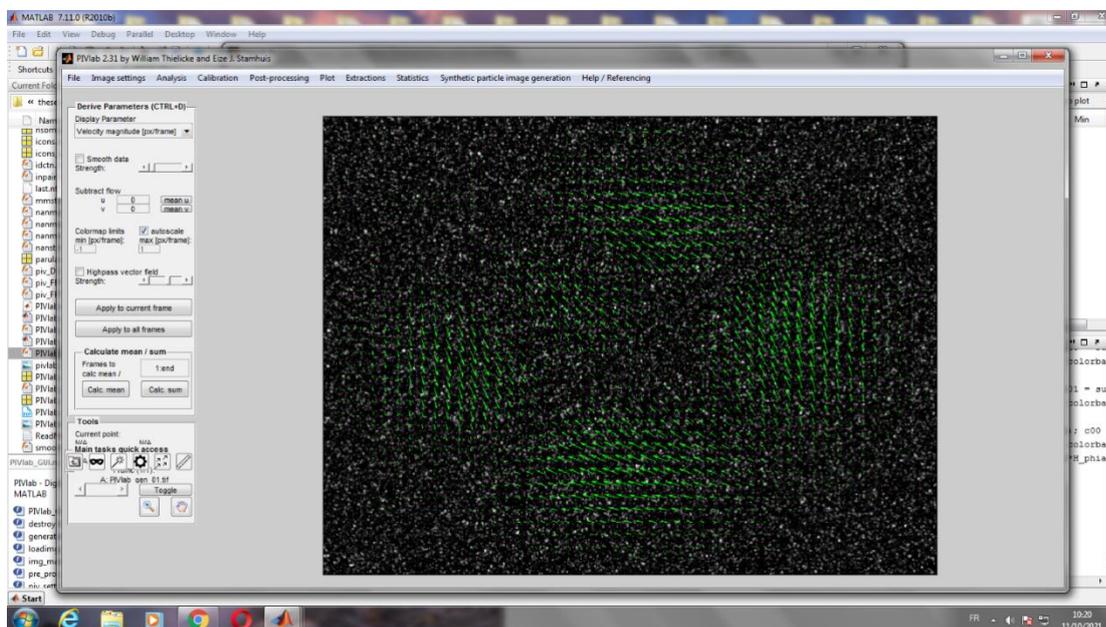


Figure 3.12: *champ de vecteurs vitesse (casmembrane)*

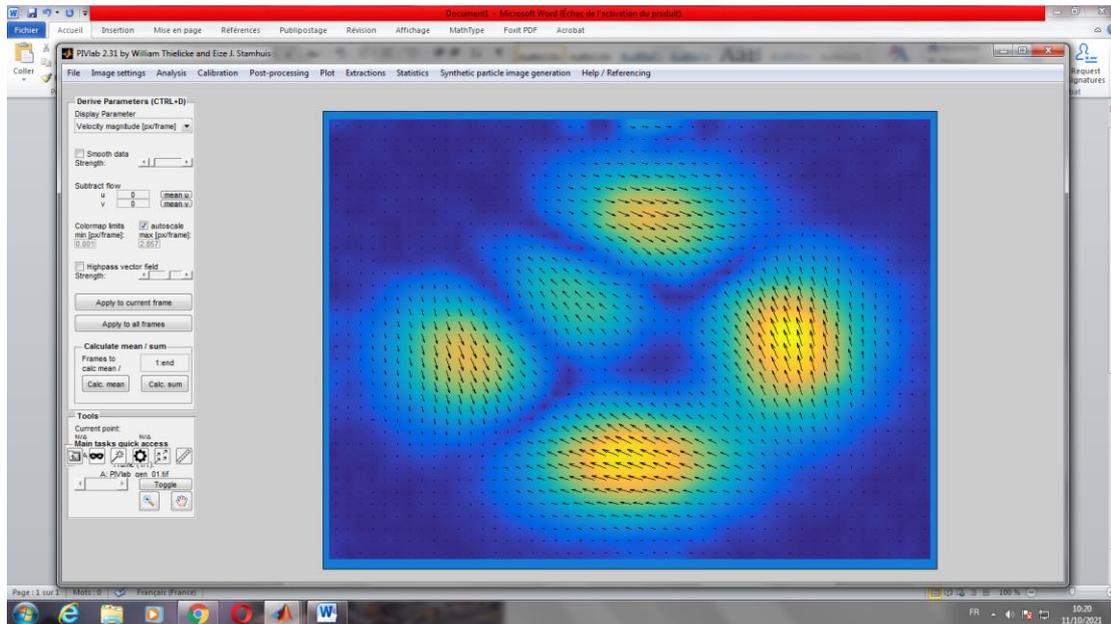


Figure 3.13: vitesse du fluide dans le cas membrane

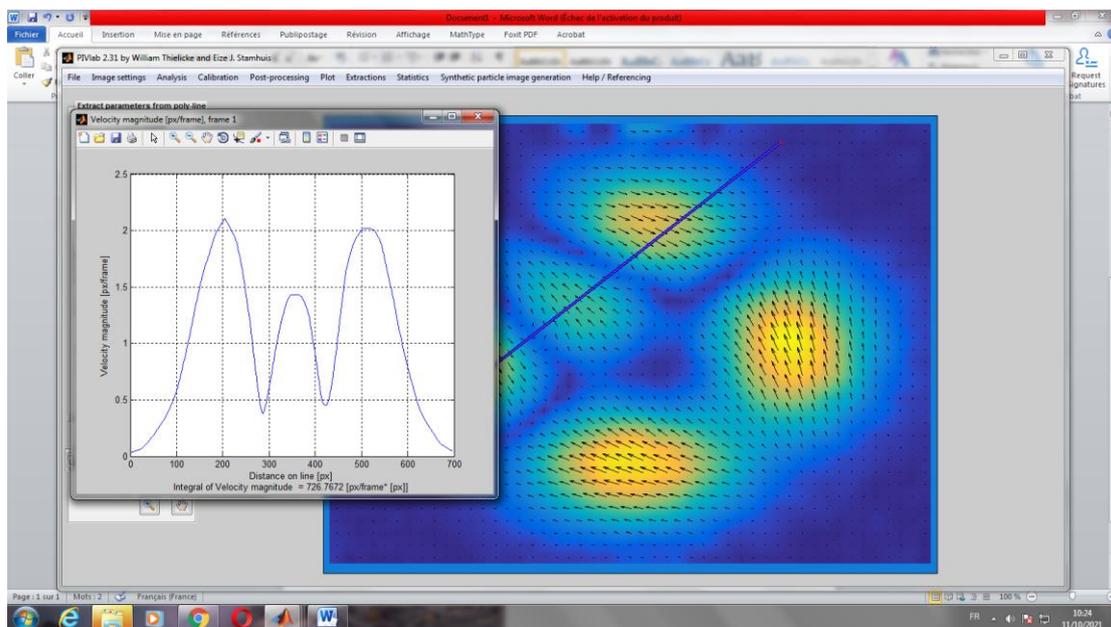


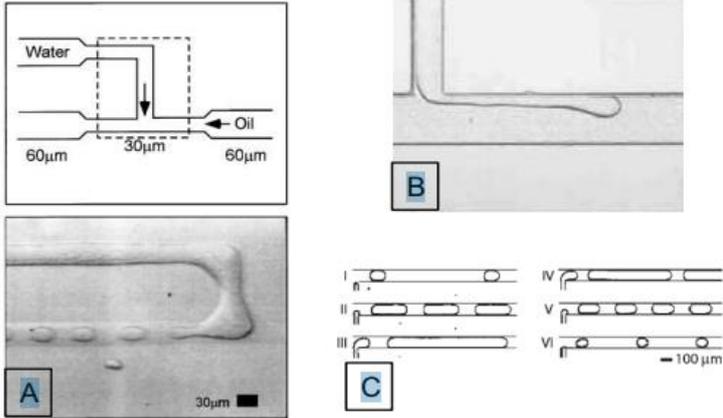
Figure 3.14: Profile vitesse du fluide dans le cas membrane

### 3.2.7 Cas réel de génération de gouttes

Il s'agit de la première technique pour générer des gouttes de façon périodique et contrôlée au sein de micro canaux, proposée par Thor sen et al.[36]. La phase continue circule dans un canal principal. La phase dispersée est amenée dans le canal principal par un canal secondaire perpendiculaire à celui-ci. Elle envahit le canal principal et une goutte finit par se détacher (voir figure 1.7A).

Dans leur étude fondatrice, Thor sen et al. avancent que le détachement de la goutte est lié à une compétition entre tension de surface (tendant à retenir la goutte dans le canal secondaire) et forces visqueuses (tendant à détacher la goutte par cisaillement). Cette théorie est par la suite corroborée par le groupe de R.F. Ismagilov, un des pionniers de la microfluidique de gouttes appliquées à la chimie, qui décrit une dépendance de la taille du « plot » formé avec le nombre capillaire du système lorsque les liquides utilisés ont une viscosité comparable (par plots –ou plugs en anglais– on entend une goutte confinée par les parois du canal et allongée (Voir figure 1.7C).

Cette vision sera par la suite contredite par une étude du groupe de G.M. Whitesides, qui propose à la place une approche (à faible nombre capillaire,  $Ca < 0,01$ ) liée à la chute de pression due à la présence de la phase dispersée dans le canal principal. Celle-ci tend à le « boucher ». Lorsque la chute de pression à travers la phase dispersée devient trop importante, une goutte se détache .



**Fig. 3.15:** Géométrie typique utilisée pour la formation de gouttes à une jonction

3.2.8 Résultat PIVLAB pour génération de gouttes



Figure 3.16 Chargement des images pour le générateur de gouttes

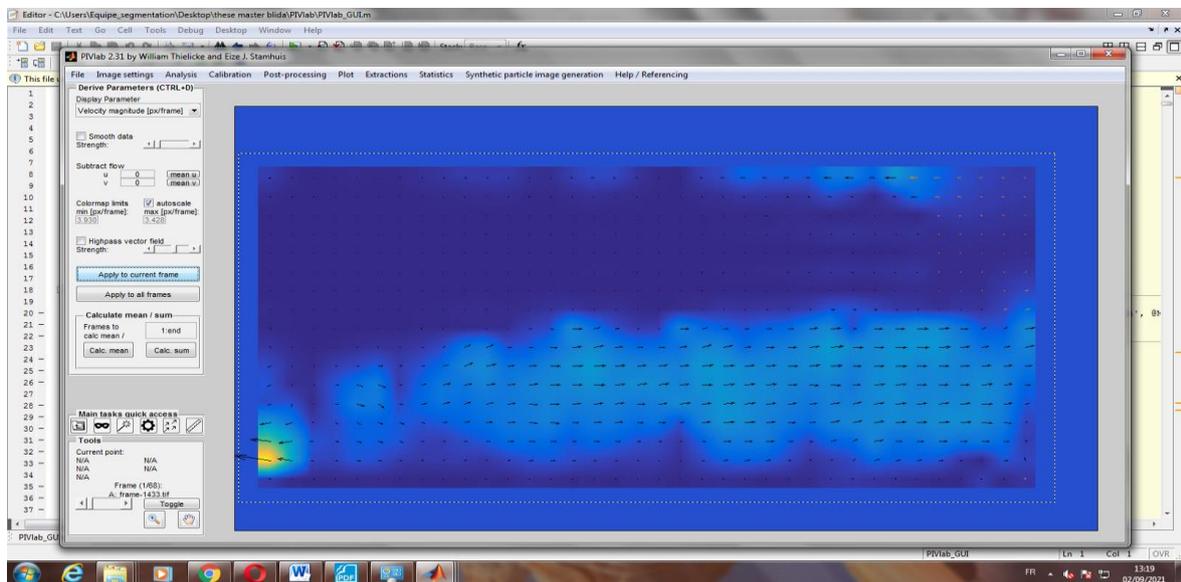
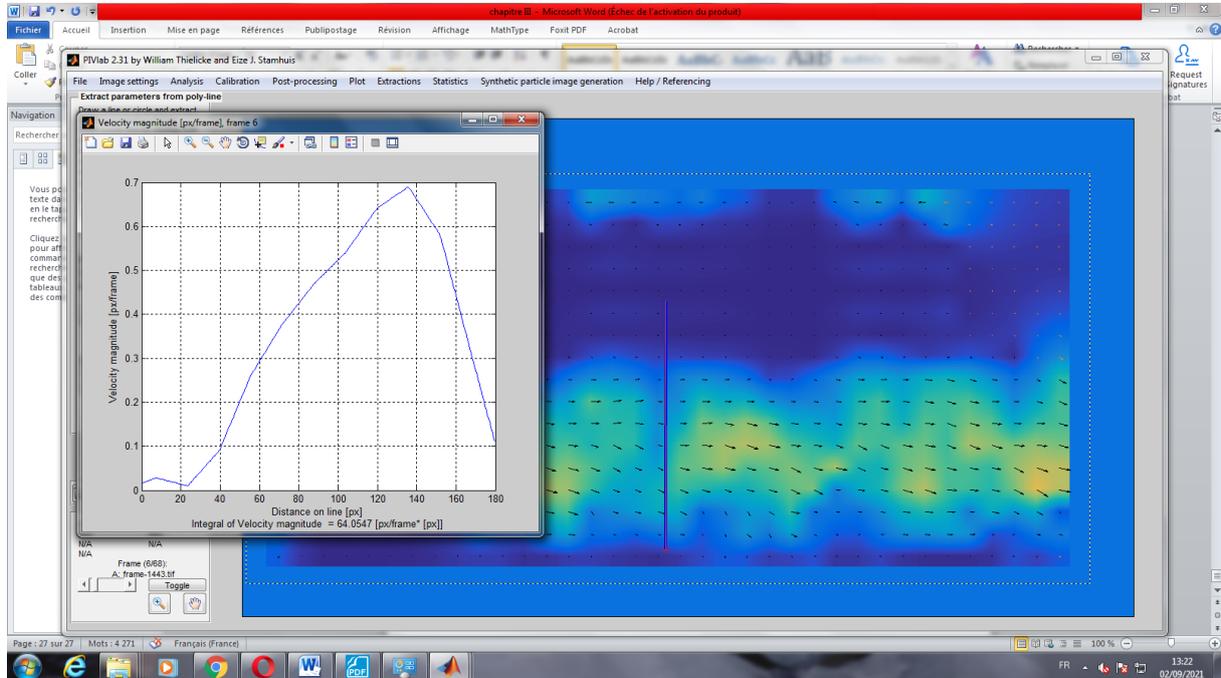


Figure 3.17 champ de vitesse

Figure 3.18 Profil de vitesse



### **Conclusion**

La microfluidique offre désormais des outils fonctionnels et efficaces pour toutes sortes d'applications pratiques dans de nombreux secteurs économiques. Les principes de fonctionnement des dispositifs de la microfluidique peuvent s'expliquer par les concepts habituels de la mécanique des fluides aux faibles nombre de Reynolds, dans les hypothèses requises pour l'application de la loi de Poiseuille

### References

- [01]: **S. Colin**, Microsystèmes utilisant des fluides, tome microfluidique du traité « Electronique, génie Electrique et Microsystèmes », Edition Hermes, Chapitre 8, 2004.
- [02]: **Bayt R.L., Breuer K.S. (2001)**:Fabrication and testing of micron-sized cold-gas thrusters in micropropulsion of small spacecraft, Advances in Aeronautics and Astronautics, Eds. Micci M. & Ketsdever A., AIAA Press., Washington, D.C. (USA), 187, pp. 381–398.
- [03]: Characterization of Polydimethylsiloxane (PDMS) Properties for Biomedical Micro/Nanosystems, Biomedical Microdevices 7:4, 281–293, 2005
- [04]: **Hua, F.;** Sun, Y.; Gaur, A.; Meitl, M. A.; Bilhaut, L.; Rotkina, L.; Wang, J.; Geil, P.; Shim, M.; Rogers, J. A. Nano letters (2004), 4, 2467-2472. Fabricating Semiconductor Nano/Microwires and Transfer Printing Ordered Arrays of Them onto Plastic Substrates
- [05]: **From James M. Spotts** 2008 Microfluidics Course Institute for Systems Biology November 17, 2008
- [06]: **ADRIAN, R.J. (1986)**. "Image shifting technique to resolve directional ambiguity in double-pulsed velocimetry". Dans : Applied Optics 25.21, p. 3855–3858.

- [07]: **GOSS, LP, ME P OST, DD T RUMP, B. S ARKA et CD MACARTHUR (1989).**“A novel technique for blade-to-blade velocity measurements in a turbine cascade”.Dans : AIAA,ASME, SAE, and ASEE, 25th Joint Propulsion Conference. T. 1.
- [08]: **WILLERT, CE et M. G HARIB (1991).**“Digital particle image velocimetry”. Dans : Experiments in fluids 10.4, p. 181–193.
- [09]: **Bayt R.L., Breuer K.S. (2001):**Fabrication and testing of micron-sized cold-gas thrusters in micropropulsion of small spacecraft, Advances in Aeronautics and Astronautics, Eds. Micci M. & Ketsdever A., AIAA Press., Washington, D.C. (USA), 187, pp. 381–398.
- [10]: **Northrup M.A., et al. (1995):** A MEMS-based DNA analysis system, *Proc. Proceedings of Transducers '95, 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, 16–19 June, Stockholm (Sweden)*, pp. 764–767.
- [11]: **Koutsiaris A.G., Mathioulakis D.S., Tsangaris, S. (1999):** *Microscope PIV for velocity-field measurement of particle suspensions flowing inside glass capillaries, Meas. Sci. Tech., 10, pp. 1037–1046.*
- [12]: **Delnoij E., Westerweel J., Deen N. G., Kuipers J. A. M., van Swaaij W. P. M. (1999):** *Ensemble correlation PIV applied to bubble plumes rising in a bubble column, Chemical Engineering Science, 54, pp. 5159–5171.*

- [13]: **Meinhart C.D., Wereley S.T., Santiago J. G. (2000):** *A PIV algorithm for estimating time-averaged velocity fields, Journal of Fluids Engineering, 122, pp. 285–289.*
- [14]: **Kinoshita H., Oshima M., Kaneda S., Fujii T., Saga T., Kobayashi T. (2003):** *Application of micro PIV to measurement of flow in various designs of microchip, Proc. 7th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, Sorrento (Italy).*
- [15]: **GOSS, LP, ME P OST, DD T RUMP, B. S ARKA et CD MACARTHUR (1989).** “A novel technique for blade-to-blade velocity measurements in a turbine cascade”. Dans : AIAA, ASME, SAE, and ASEE, 25th Joint Propulsion Conference. T. 1.
- [16]: **Adrian, R.J. (1991):** Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 23, pp. 261–304.
- [17]: **R. D. Keane and R. J. Adrian.** Theory of cross-correlation analysis of piv images. *Appl. Sci. Res.*, 49:191–215, 1992.
- [18]: **ADRIAN R.J., 1988,** Double exposure, multiple-field Particle Image Velocimetry for turbulent probability density, *Optics and Lasers in Engineering* 9, pp.211-228
- [19]: **ADRIAN R.J., 1988,** Statistical properties of particle image velocimetry measurements in turbulent flow, *Laser anemometry in*

## Référence

---

fluid mechanics, Vol. III (LADOAN Institute Superior Tecnico, Lisbon, Portugal)

- [20]: **Raffel M, Willert C E and Komenhans J 1998** Particle Image Velocimetry. A practical guide (Springer)
- [21]: **Gindele J and Spicher U 1998** Investigation of in-cylinder flow inside IC engines using PIV with endoscopic optics Proc. of the 9th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics (Lisbon, Portugal)
- [22]: **Dierksheide U, Meyer P, Hovestadt T, W. Hentschel W 2002** Endoscopic 2D particle image velocimetry (PIV) flow field measurements in IC engines Exp. Fluids 33 794-800.
- [23]: **Pérenne N., Foucault J.M., Savatier J. 2004** Study of the accuracy of different stereoscopic reconstruction algorithms in Particle Image Velocimetry: Recent Improvements Ed. Stanislas M., Westerweel J., Kompenhans J. Springer-Verlag
- [24]: **Russ J C 1999** The Image Processing Handbook - 3rd Edition (CRC Press & Springer Verlag GmbH),1999.
- [25]: Yoneyama S, Kikuta H, Kitagawa A and Kitamura K 2006 Lens distortion correction for digital image correlation by measuring rigid body displacement Optical Engineering 45(2) 023602 1- 0230602 9
- [26]: **ADRIAN R.J., 1991** Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. Annual Rev. Fluid Mech. 23, pp. 261-304

## Référence

---

- [27]: **HUANG H. T., 1994** Limitations of and improvements to PIV and its application to a backward-facing step flow. PhD Thesis, Technischen Universität Berlin
- [28]: **RAFFEL M., WILLERT C., KOMPENHANS, 1998** Particle Image Velocimetry, a practical guide. Springer, Berlin
- [29]: **SCARANO F., RIETHMULLER M. L., 1999** Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete window offset. Experiments in Fluids 26, pp. 513-523
- [30]: **WESTERWEEL J., DABIRI D., GHARIB M., 1997b** The effect of discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of digital PIV recordings. Experiments in Fluids 23, pp. 20-28
- [31]: **ROSSIGNOL, K.-S., 2006** Etude PIV d'une couche limite turbulente en condition de décrochage aérodynamique. Mémoire de maîtrise, Faculté des Etudes Supérieures de l'Université Laval, Québec
- [32]: **Bouchenafa, W., Boucher, O., Mouhous-Voyneau, N., & Sergent, P. (2016).** Mesure des champs de vitesse et débit d'écoulement par la méthode LSPIV : application sur un modèle réduit d'une bouche de métro. XIV èmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, 14, 325-332.
- [33]: **Caltrans Division** of Research, Innovation and System Information. (2017). Flood Flow Estimation using Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV).

## Référence

---

- [34] : **Hauet, A. (2006)**. Estimation de débit et mesure de vitesse en rivière par Large-Scale Particle Image Velocimetry. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble
- [35] : **Hauet, A., Jodeau, M., Le Coz, J., Marchand, B., die Moran, A., Le Boursicaud, R., & Dramais, G. (2014)**. Application de la méthode LSPIV pour la mesure de champs de vitesse et de débits de crue sur modèle réduit et en rivière. *La Houille Blanche*, (3), 16-22.
- [36]: **T Thorsen 1, R W Roberts, F H Arnold, S R Quake**, Dynamic pattern formation in a vesicle-generating microfluidic device, *Phys Rev Lett.* 2001 Apr 30; 86(18):4163-6. doi: 10.1103/PhysRevLett.86.4163.