

Année Universitaire : 2020-2021

Master Sciences et Techniques GMP

Génie des Matériaux et des Procédés

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

**ETUDE DE L'ÉCOULEMENT DE
PARTICULE SOLIDE DANS UN FLUIDE
A SEUIL**

Présenté par:

➤ **BOURAMTANE Mourad**

Encadré par:

➤ **Pr. OULMEKKI Abdallah (FSTF)**

➤ **Mme. EL KISSI Nadia (LRP)**

Soutenu Le 17 Juin devant le jury composé de:

-Pr. OULMEKKI Abdallah

-Pr. TOYIR Jamil

-Pr. BENMOUSSA Hayat

Stage effectué à : LABORATOIRE RHEOLOGIE ET PROCEDES A GRENOBLE

2020/2021

Master Sciences et Techniques : Génie des Matériaux et des Procédés

Nom et prénom: BOURAMTANE Mourad

Titre: « Etude de l'écoulement de particule solide dans un fluide à seuil ».

Résumé

Ce travail est consacré sur la visualisation de déplacement de particule solide (carbure de silice), injectés dans un fluide à seuil (carbopol de pourcentage massique égale 0,2%), le sujet appartient dans le domaine des batteries à flux redox.

Écoulement de notre fluide complexe se fait dans une cellule d'écoulement et de capturer les images au cours de l'écoulement et de l'étudier à l'aide de la technique PIV (vélocimétrie par images des particules), cette technique nous a permis d'obtenir les vecteurs, les champs et les profils de vitesse de ces particules, l'idée est de prendre deux images différentes de l'écoulement avec une différence de temps Δt connu. On va faire varier aussi le débit volumique d'entrée de fluide et voir leur effet sur la vitesse de déplacement des particules, généralement on utilise deux objectifs pour prendre les images : TOKKINA 100 mm et NIKKOR 50 mm, le premier objectif focalise sur les petites zones et le deuxième focalise sur les grandes zones, et on utilise aussi deux capteurs de pression avant et après la cellule d'écoulement pour voir sa variation avec le changement de débit volumique d'entrée du fluide.

Mots clés: Écoulement de fluide complexe, fluide à seuil, carbopol, carbure de silice, cellule d'écoulement, PIV.

2020/2021

Master Sciences et Techniques : Génie des Matériaux et des Procédés

Nom et prénom: BOURAMTANE Mourad

Titer: « Study of the flow of solid particles in a threshold fluid».

Abstract

This work is devoted to the visualization of movement of solid particles (silica carbide), injected into a threshold fluid (carbopol of mass percentage equal to 0.2%), the subject belongs in the field of redox flow batteries.

Flow of our complex fluid is done in a flow cell and capture the images during the flow and study it using the PIV technique (Particle Image Velocimetry), this technique has allowed us to obtain the vectors, fields and velocity profiles of these particles, the idea is to take two different images of the flow with a known time difference Δt . We will also vary the fluid inlet volume flow and see their effect on the speed of movement of the particles, generally we use two objectives to take the images: TOKKINA 100 mm and NIKKOR 50 mm, the first objective focuses on the small zones and the second focuses on large zones, and we also use two pressure sensors before and after the flow cell to see its variation with the change in volume flow rate of the fluid inlet.

Key words: Complex fluid flow, threshold fluid, carbopol, silica carbide, flow cell, PIV.

REMERCIEMENT

Je remercie Dieu le tout puissant qui m'a aidé à faire ce travail.

Mes remerciements vont tout d'abord à mes parents et à ma famille pour le soutien, l'amour et la présence sans faille qu'ils me réservent depuis toujours. Merci à tous mes amis qui m'ont permis de passer ces années de thèse dans la joie et la bonne humeur.

Je remercie Madame **Nadia EL KISSI** pour m'avoir proposé un stage de fin d'étude et accueilli au sein du laboratoire et pour m'avoir accompagné durant mon stage. Sa grande disponibilité et sa bonne humeur, malgré des plannings toujours chargés, sont sans doute ce que j'ai le plus appréciée chez lui. Merci pour votre encadrement et votre confiance et je remercie aussi **Diego MILIAN** en tant que le doctorat de ce projet dans laquelle je travail, pour les informations et les idées ainsi que pour leur aide pendant toute la période de stage.

Je remercie mon Professeur **Abdallah OULMEKKI**, Professeur de l'enseignement supérieur à la faculté des sciences et technique de Fès et le responsable de la filière Master GMP « génie des matériaux et procédés ». Je le remercie d'avoir accepté d'encadrer ce projet et de me faire part de son expérience. Qu'il reçoit ici l'expression de mes gratitude et de mes reconnaissances pour sa disponibilité, sa gentillesse et la qualité de ses précieux conseils qui m'ont permis de mener à bien ce projet de fin d'étude.

Je remercie Monsieur le Professeur **Jamil TOYIR**, Professeur de l'enseignement supérieur à la faculté des sciences et technique de Fès, d'avoir accepté de faire partie du jury de ce mémoire.

Je remercie Madame le Professeur **Hayat BENMOUSSA**, Professeur de l'enseignement supérieur à la faculté des sciences et technique de Fès, d'avoir accepté de faire partie du jury de ce mémoire.

Que le personnel technique du laboratoire Rhéologie et Procédés trouvent ici mes sincères remerciement : **Mohamed KARROUCH** pour son aide durant ces six mois de stage notamment au montage de ma manipulation, **Eric FAIVRE** pour sa disponibilité et pour toutes ces moments dans lesquels on a échangé sur des sujets de tout horizon, **Didier BLESES** pour son aide et sa performance dans son domaine, **Frédéric HUGENELL** pour son support technique et **Vincent VERDOOT** pour ses formations et ses conseils de personnes chevronnées. J'aimerais ajouter le personnel administratif **Louise INFUSO** qui s'est toujours montré très accueillant et avec le sourire.

Merci à tous le personnel du LRP pour leur accueil. Merci aux doctorants, à mes Co-bureaux **Younes SOUMANE, Mohamed BOUGTIB, Fatima Zohra HASSAD, Ana CHITANU, Olivier TRAMIS, Saïd ELMARHOUM, Maxime FACON, Fatou GUEY, Khadija TRIGUI** et **Faical AHMAD**, ainsi que mes amis au MAROC, **Outmane BOUZERDA, Ossama LAZRAK, Manal RAHMANI, Amal DALBOUHA, Zineb CHIKI**, mon cousin **Soufiane BOURAMTANE** (loufi), **Mouhsin BOURAIS** pour leurs soutien et leurs disponibilité à tous égards.

Merci à tous...

Tables des matières

Introduction.....	1
Chapitre 1 : Etat de connaissance.....	4
1 Présentation de laboratoire d'accueil :	4
1.1 Historique :.....	4
1.2 Structure scientifique :	4
1.3 Domaine de recherche :.....	4
1.3.1 Dynamique et Transferts dans les Fluides Complexes (DyFCo) :.....	5
1.3.2 <i>Rhéo-physique de la Matière Molle (RhyMM)</i> :.....	5
1.3.3 <i>Procédés, Mise en Forme et Intensification (ProMI)</i> :.....	5
2 Rhéologie des fluides complexes :.....	5
2.1 Rhéologie :	6
2.1.1 Grandeurs caractéristiques :	6
2.1.2 Cisaillement simple :.....	6
2.2 Les classes de matériaux :.....	7
2.2.1 Les solides élastiques :.....	7
2.2.2 Les fluides newtoniens :.....	8
2.2.3 Les fluides rhéoépaississants et rhéofluidifiants :	9
2.2.4 Les fluides à seuils :.....	9
2.2.5 Les fluides à seuils et le modèle de Herschel-Bulkley (HB) :	9
2.3 Rhéométrie :	10
Chapitre 2 : Matériaux et méthodes.....	12
1 Matériaux utilisés :.....	12
1.1 Solution de Carbopol :	12
1.2 Méthode de préparation :	12
1.3 Les particules solides :	13
2 Montage :	14
2.1 Cellule d'écoulement :.....	16
3 La vélocimétrie par images de particules PIV :.....	17
Chapitre 3 : Résultats et Discussions.	18
1 Les résultats obtenus par l'objectif TOKKINA 100 mm :.....	18
1.1 Essai 1 : 1 ^{er} zone : Entré de la cellule :.....	20

1.2	Essai 2 : 2 ^{ème} zone :	22
1.3	Essai 3 : 3 ^{ème} zone :	23
1.4	Essai 4 : 4 ^{ème} zone :	25
1.5	Essai 5 : 5 ^{ème} zone :	26
1.6	Essai 6 : 6 ^{ème} zone : Sortie de la cellule :	28
1.7	Discussions :	29
2	Les résultats obtenus par l'objectif NIKKOR 50 mm :	30
2.1	Essai 1 : 1 ^{er} zone :	32
2.2	Essai 2 : 2 ^{ème} partie :	33
2.3	Discussions :	34
	Conclusion	35

Liste des figures

Figure 1 : Exemples de fluides à seuil ; fluide géophysique, pétrole brut, ciment frais, confiture, crème cosmétique.	2
Figure 2 : Cisaillement simple entre deux plans parallèles.	7
Figure 3 : (à gauche) Courbe contrainte-déformation pour un solide élastique linéaire dont le module de cisaillement vaut 180 Pa. (à droite) Modules de cisaillement pour quelques solides (Sources : [1], [3], [9], [7])	8
Figure 4 : (à gauche) Courbe contrainte en fonction du taux de déformation pour un liquide newtonien de viscosité 180 Pas. (à droite) Viscosité de quelques liquides simples. (Sources : [6], [2], données fabricant pour les huiles silicone)	8
Figure 5 : Courbes d'écoulement d'un fluide newtonien (1), rhéofluidifiant (2), rhéoépaississant (3) et de Herschel-Bulkley (4).	10
Figure 6 : Trois géométries couramment utilisées en rhéologie : géométrie plan-plan, géométrie cône-plan, géométrie de Couette.	10
Figure 7 : Carbopol : (a) poudre de carbopol ; (b) gel de carbopol.	12
Figure 8 : Image de la VACURET.	13
Figure 9 : Image de SiC par un microscope électronique $\times 10$.	14
Figure 10 : Objectifs : (1) NIKKOR 50 mm, (2) TOKINA Macro 100 mm.	15
Figure 11 : Schéma simplifié du banc expérimental.	15
Figure 12 : Vue de l'ensemble de dispositif expérimental.	16
Figure 13 : (a) cellule d'écoulement, (b) zone active.	16
Figure 14 : Les différentes parties étudiées par TOKINA 100 mm.	18
Figure 15 : La variation de pression d'entrée, de sortie et de poids au cours de temps avec $DV = 0.35 \text{ cm}^3/\text{s}$.	19
Figure 16 : Courbes de pression en fonction du temps avec $DV = 0.35 \text{ cm}^3/\text{s}$.	20
Figure 17 : Les vecteurs de vitesse de la 1 ^{ère} zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.	20
Figure 18 : Le champ de vitesse de la 1 ^{ère} zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.	21
Figure 19 : Profil de vitesse de la 1 ^{ère} zone pour un débit de $0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.	21
Figure 20 : Les vecteurs de vitesse de la 2 ^{ème} zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.	22
Figure 21 : Le champ de vitesse de la 2 ^{ème} zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.	22
Figure 22 : Profil de vitesse de la 2 ^{ème} zone pour un débit de $0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.	23
Figure 23 : Les vecteurs de vitesse de la 3 ^{ème} zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.	23
Figure 24 : Le champ de vitesse de la 3 ^{ème} zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.	24
Figure 25 : Profil de vitesse de la 3 ^{ème} zone pour un débit de $0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.	24
Figure 26 : Les vecteurs de vitesse de la 4 ^{ème} zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.	25
Figure 27 : Le champ de vitesse de la 4 ^{ème} zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.	25
Figure 28 : Profil de vitesse de la 4 ^{ème} zone pour un débit de $0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.	26
Figure 29 : Les vecteurs de vitesse de la 5 ^{ème} zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.	26
Figure 30 : Le champ de vitesse de la 5 ^{ème} zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.	27
Figure 31 : Profil de vitesse de la 5 ^{ème} zone pour un débit de $0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.	27
Figure 32 : Les vecteurs de vitesse de la 6 ^{ème} zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.	28
Figure 33 : Le champ de vitesse de la 6 ^{ème} zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.	28
Figure 34 : Profil de vitesse de la 6 ^{ème} zone pour un débit de $0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.	29
Figure 35 : Les deux parties observées par l'objectif NIKKOR 50 mm.	30
Figure 36 : La variation de pression d'entrée, de sortie et de poids au cours de temps avec $Dv = 1.05 \text{ cm}^3/\text{s}$.	31
Figure 37 : Courbes de pression en fonction du temps avec $DV = 1.05 \text{ cm}^3/\text{s}$.	31
Figure 38 : Les vecteurs de vitesse de la 1 ^{ère} zone avec $Dv = 1,05 \text{ cm}^3/\text{s}$.	32
Figure 39 : Le champ de vitesse de la 1 ^{ère} zone avec $Dv = 1,05 \text{ cm}^3/\text{s}$.	32
Figure 40 : Les vecteurs de vitesse de la 2 ^{ème} zone avec $Dv = 1,05 \text{ cm}^3/\text{s}$.	33
Figure 41 : Le champ de vitesse de la 2 ^{ème} zone avec $Dv = 1,05 \text{ cm}^3/\text{s}$.	33

Introduction

Au quotidien, nous rencontrons et utilisons de nombreux matériaux qui ne sont ni simplement liquides, ni simplement solides mais qui peuvent se déformer à l'envi pour peu qu'ils soient suffisamment sollicités. Ils interviennent dans des domaines variés : cosmétique (crèmes, gels, mousses, dentifrice...), agroalimentaire (sauces, compotes, purées,...), génie civil (mortiers, bétons, peintures,...), nature (boue, magma, sable mouillé...),... Une partie de cette matière molle regroupe les fluides à seuil. Il s'agit des matériaux qui s'écoulent comme des liquides visqueux lorsqu'ils sont soumis à une contrainte suffisante, dite seuil de contrainte, et qui restent au repos sinon. Leurs propriétés physiques, physico-chimiques et mécaniques sont alors intermédiaires entre celles des liquides et des solides. Différentes microstructures peuvent être à l'origine de cet effet de seuil, comme par exemple certaines mousses, émulsions, polymères, suspensions, granulaires,...

La rhéologie, du grec *rhéo* qui signifie "couler", et *logos*, "étude", est l'étude de l'écoulement et de la déformation de cette matière complexe. Au cours des trente dernières années, le comportement rhéologique intrinsèque des fluides à seuil a été largement étudié. Pour les fluides à seuil simples, en particulier non thixotropes, c'est-à-dire dont le comportement ne dépend pas de l'histoire des déformations appliquées, il est possible de déterminer expérimentalement la relation qui lie la contrainte de cisaillement appliquée au taux de déformation du matériau qui en résulte. Cette relation, appelée loi de comportement, caractérise le matériau.

Les écoulements de fluides sont présents dans de nombreux domaines très variés comme l'aéronautique, le BTP, le génie chimique, la médecine ou encore l'hydrologie et, par conséquent, dans de nombreuses branches de l'industrie. Une priorité de la recherche et développement d'aujourd'hui est d'améliorer les procédés industriels, notamment pour diminuer les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre avec des objectifs européens ambitieux tel que le programme européen « Horizon 2020 ». En effet, « la forme d'énergie la moins chère et la plus propre est celle qui n'est pas consommée ». Sans aucun doute, la connaissance des comportements des fluides a une influence non négligeable sur ces procédés, ce qui rend ce domaine d'étude très prisé aujourd'hui. La maîtrise et le contrôle de la dynamique des écoulements sont fonctions non seulement des propriétés intrinsèques au matériau mais aussi de la géométrie des systèmes et des conditions opératoires telles que les vitesses et les débits misent en œuvres, la température utilisée, etc.

Dans l'industrie, la plupart des procédés repose sur l'interaction entre fluides à seuil et outils, que ce soit pour la fabrication de ces matériaux (malaxage), leur transport (écoulement en conduite) ou pour leur mise en œuvre (étalement). Il est alors utile de connaître cette réponse intrinsèque du matériau à une sollicitation extérieure pour comprendre et caractériser ces méthodes. Récemment, de nombreuses recherches expérimentales, numériques et théoriques se sont intéressées à l'écoulement généré par le déplacement de solides compacts et à symétrie de rotation, comme les sphères ou les cylindres. Les objets assimilables à des

plaques, plus utilisés en pratique, commencent eux à être étudiés. Parmi les techniques industrielles, on peut distinguer celles qui requièrent de déposer une épaisseur déterminée de fluide sur un solide. Celles-ci sont largement connues et théorisées lorsqu'elles utilisent des fluides newtoniens ou très visqueux mais leur transposition directe aux fluides à seuil est contrariée par la présence d'un état solide.

Cependant la majorité des fluides utilisés dans l'industrie mais aussi au quotidien sont de type non-newtoniens et peuvent avoir des comportements complexes rendant leurs études beaucoup plus difficiles à réaliser. Parmi ceux-ci, les fluides à seuil de contrainte constituent une catégorie de fluide très utilisée. De nombreux domaines sont concernés par ces fluides comme par exemple celui des cosmétiques, des fluides agro-alimentaires ou encore le domaine des matériaux de construction comme le béton frais (voir Figure 1). Les premières descriptions des fluides à seuil de contrainte ont été faites par Bingham en 1922. [1].



Figure 1 : Exemples de fluides à seuil ; fluide géophysique, pétrole brut, ciment frais, confiture, crème cosmétique.

Ici nous considérons exclusivement des écoulements en régime permanent à travers des géométries solides, sans glissement à la paroi. Pour les fluides newtoniens, sous ces conditions, la force est simplement proportionnelle au débit via un facteur qui dépend de la géométrie et qui peut être déterminé par une seule mesure avec un autre type de fluide newtonien à n'importe quel débit. Pour les fluides à seuil la forme de l'expression et la détermination pratique de ces paramètres sont toujours des problèmes ouverts. L'objectif de ce travail qui appartient dans le domaine des batteries à flux redox dont lesquelles on se focalise sur l'écoulement des fluides complexes, c'est de déterminer les champs et les profils de vitesse des particules solides injectées dans un fluide à seuil à l'aide de la technique de la Vélocimétrie par Images de Particules (PIV), le fluide utilisé est le gel de Carbopol ; fluide à seuil non-thixotrope. Ce fluide modèle a l'intérêt de se prêter favorablement aux expériences de mécanique des fluides et aussi d'être bien caractérisé des points de vue physico-chimique

et micro-structurel. Cette bonne caractérisation aide à une meilleure compréhension des phénomènes liés aux expériences.

Ce mémoire est constitué de trois chapitres :

- Le premier chapitre (**chapitre I**), introduit quelques notions fondamentales et une brève excursion dans le monde des fluides en général et plus particulièrement dans le monde des fluides à seuil. Il s'intéresse notamment à leurs comportements ainsi qu'aux différents moyens permettant de les caractériser.
- Le deuxième chapitre (**Chapitre II**) est intitulé « matériels et méthodes ». Il y est présenté les paramètres caractérisant nos écoulements, le rhéomètre et la méthode de caractérisation rhéométrique utilisée, les fluides étudiés, le banc expérimental réalisé pour l'étude, la méthode de visualisation utilisée et les méthodes numériques choisies.
- Le troisième chapitre (**chapitre III**) présenté les résultats de l'écoulement de fluide complexe obtenus par la technique PIV.

Ce rapport se terminera par une conclusion générale et des perspectives d'études proposées.

Chapitre 1 : Etat de connaissance.

1 Présentation de laboratoire d'accueil :

1.1 Historique :

Le Laboratoire Rhéologie et Procédés (UMR 5520), Laboratoire de Rhéologie précédemment, a été créé en 1992, lors de la restructuration de l'Institut de Mécanique de Grenoble (IMG). C'est une Unité Mixte de Recherche entre le **CNRS, Grenoble INP** et l'**Université Grenoble Alpes**.

Au CNRS ils sont rattachés à l'INSIS (70%) et à l'INC (30%). Nous sommes gérés par la

section 10 et nous émergeons également à la section 9 et à la section 11. Sur le plan local, ils émergent au pôle PEM (Physique, Ingénierie, Matériaux). Par ailleurs, ils sont partie prenante dans la fédération de recherches "Galileo Galilei Grenoble" (Fed3G) sur laquelle s'est construit le LabEx Tec 21. Enfin, ils sont l'une des cinq équipes fondatrices de l'Institut Carnot Polynat dont l'objectif est l'élaboration et la valorisation de matériaux fonctionnels biosourcés. L'intégration du laboratoire et son rôle majeur dans ces structures locales et nationales, accroît sa visibilité et optimise la qualité de ses échanges scientifiques, notamment aux interfaces rhéologie/génie des procédés, au cœur des activités et du projet du laboratoire.



1.2 Structure scientifique :

Au sein de l'équipe "Rhéologie, Procédés et leur Intensification" (RhéPI), le laboratoire mène des recherches autour des fluides complexes, des matériaux, des procédés et de leur intensification, par des méthodes multi-échelles et des couplages multi-physiques.

Matériaux modèles, matériaux formulés pour l'industrie ou fluides biologiques, les polymères, suspensions, colloïdes, gels ou systèmes auto-assemblables dont ils étudient les comportements sous déformation, sont présents dans tous les domaines de l'industrie, la santé ou encore l'énergie et l'environnement.

Les approches sont expérimentales et numériques et abordent les enjeux scientifiques et technologiques, qui tiennent à la caractérisation fine à une échelle donnée aussi bien qu'à la complexité de la caractérisation et de la modélisation du passage d'une échelle à l'autre.

1.3 Domaine de recherche :

Au sein de l'équipe « Rhéologie, Procédés et leur Intensification » (RhéPI), leurs activités de recherche concernent deux grandes disciplines : « la mécanique des fluides complexes » en privilégiant les fluides multiphasiques et les approches microfluidiques, et « le génie des procédés » avec une expertise reconnue dans l'intensification par ultrasons et une activité

riche autour des composites biosourcés, dynamisée par leurs partenariats au sein de l'Institut Carnot PolyNat. Ces disciplines sont actuellement déclinées en trois thématiques :

1.3.1 Dynamique et Transferts dans les Fluides Complexes (DyFCo) :

Les recherches privilégiées dans cette thématique concernent la stabilité des écoulements de fluides à rhéologie complexe : seuil, thixotropie, viscoélasticité... Ces recherches sont résolument tournées vers les enjeux industriels avec de nombreux problèmes fondamentaux à résoudre par des approches expérimentales mais également numériques. Dans les dernières années des résultats majeurs ont été obtenus, relatifs à la stabilité des suspensions d'une part, à la dynamique des jets, électrospinnés notamment, d'autre part.

1.3.2 Rhéo-physique de la Matière Molle (RhyMM) :

L'élaboration de matériaux avancés multifonctionnels est au cœur d'activités également très dynamiques au sein du laboratoire. Il s'agit notamment de comprendre les propriétés aux échelles nanométriques comme la transition vitreuse, de contrôler les cinétiques associées aux mécanismes d'auto-association, d'appréhender les structures qui en résultent en vue d'élaborer des assemblages architecturés aux fonctionnalités optimisées. Le contrôle des écoulements de ces systèmes organisés, avec des applications notamment dans le domaine de la santé est un des succès de ses recherches.

1.3.3 Procédés, Mise en Forme et Intensification (ProMI) :

Cette thématique s'intéresse aux procédés de traitement aux interfaces pour des applications dans le domaine de l'environnement. Procédés de séparation membranaire, procédés biologiques de dépollution, intensification des transferts et de la réactivité par des technologies ultrasons : des résultats probants ont été obtenus pour la dégradation de polluants ou la récupération de métaux lourds ou encore l'extraction continue de nano-cristaux de celluloses pour des applications en bioraffinerie. Le passage à l'échelle du pilote industriel (scale-up) est un objectif majeur de cet axe de recherche.

2 Rhéologie des fluides complexes :

Les **fluides complexes** sont des mélanges binaires présentant une coexistence entre deux phases : solide-liquide (suspension ou solutions contenant des macromolécules telles que des polymères ou des micelles géantes), solide-gaz (milieux granulaires), liquide-gaz (mousses) et liquide-liquide (émulsions).

Les **fluides complexes** sont généralement non-newtoniens et peuvent présenter une grande variété de comportements en écoulement. Leur viscosité peut ainsi varier avec le taux de cisaillement ou la contrainte.

Ce sont des systèmes moléculaires de taille mésoscopique qui sont construits à partir de véritables liaisons chimiques (polymères) ou à travers des interactions moléculaires fortes (micelles, cristaux liquides).

2.1 Rhéologie :

La rhéologie est la discipline qui traite de l'écoulement, des déformations des matériaux sous l'action de contraintes. Elle a été développée pour décrire les propriétés de matériaux au comportement mal défini et intermédiaire entre celui du solide élastique parfait et celui du fluide newtonien. Un matériau, soumis à un ensemble de forces, est susceptible de se déformer ; les mouvements des différents points du matériau dépendent bien entendu de la répartition et de l'intensité des forces appliquées.

2.1.1 Grandeurs caractéristiques :

Aux grandes déformations, les fluides a seuil s'écoulent. Sous l'action du cisaillement, les couches adjacentes du matériau se déplacent les unes par rapport aux autres. Il apparaît alors entre ces couches des forces de frottement tangentielles, appelées forces de cisaillement. Les grandeurs utilisées en rhéologie pour caractériser les propriétés d'écoulement des matériaux sont :

- La contrainte τ (en Pa), définie comme la force de cisaillement rapportée à l'unité de surface de la couche considérée.
- La déformation γ , sans dimension, définie comme la variation du déplacement lorsqu'on passe d'une couche à une autre.
- La vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ (en s^{-1}), dérivée de la déformation par rapport au temps.
- La viscosité η (en Pa.s) définie comme le rapport de la contrainte de cisaillement sur la vitesse de cisaillement correspondante : $\eta = \tau / \dot{\gamma}$

2.1.2 Cisaillement simple :

En cisaillement simple, par exemple quand le fluide est placé entre deux plateaux parallèles, il est sollicité par le déplacement en translation de l'un des deux plateaux (voir figure 2). Le plateau supérieur se déplace à une vitesse V et on relève la force qu'il faut pour le déplacer : F . Les différentes couches de fluide glissent les unes sur les autres et une contrainte tangentielle liée au frottement entre les couches apparaît : la contrainte de cisaillement $\tau = F/S$. Les deux tenseurs précédents ont une écriture simple dans ce cas car ils ne contiennent qu'un terme extra-diagonal: le terme de cisaillement. Le fluide est soumis à un gradient de vitesse $\dot{\gamma} = V/H$ et à une contrainte tangentielle $\tau = F/S$. La courbe d'écoulement est obtenue en imposant différentes vitesses au plateau supérieur et en mesurant la force associée à chaque vitesse, pour obtenir au final la relation :

$$\tau = f(\dot{\gamma}) \quad (1.1)$$



Figure 2 : Cisaillement simple entre deux plans parallèles.

2.2 Les classes de matériaux :

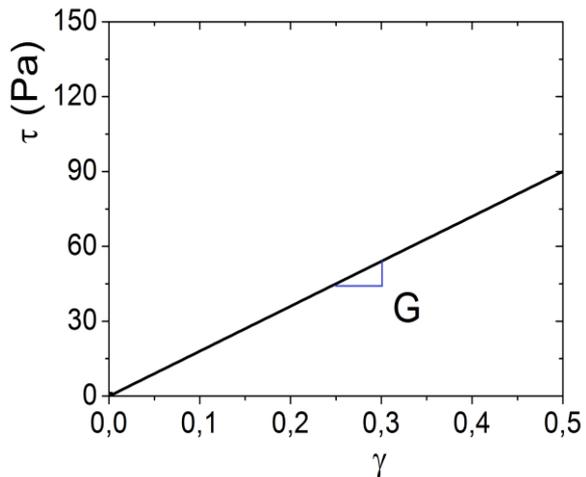
On s'intéresse au comportement de quelques cas particuliers de matériaux dans un écoulement de cisaillement simple.

2.2.1 Les solides élastiques :

Pour un solide élastique linéaire, la contrainte τ est proportionnelle à la déformation γ :

$$\tau = G \gamma \quad (1.2)$$

Où G est le module de cisaillement du solide. Cette relation est tracée sur la figure 3. Dans le régime d'élasticité linéaire, qui est généralement valable pour de petites déformations de la plupart des solides, le module de cisaillement est constant. Des exemples d'ordre de grandeur du module de cisaillement de divers solides sont donnés dans le tableau de la figure 3. Pour de plus grandes déformations, un régime d'élasticité non linéaire peut apparaître, dans lequel le module de cisaillement dépend de la déformation appliquée.



Solide	G (Pa)
Acier	10^{11}
Béton durci	10^{10}
Plâtre durci	10^{10}
Elastomère (PDMS)	10^5
Mayonnaise	10^3

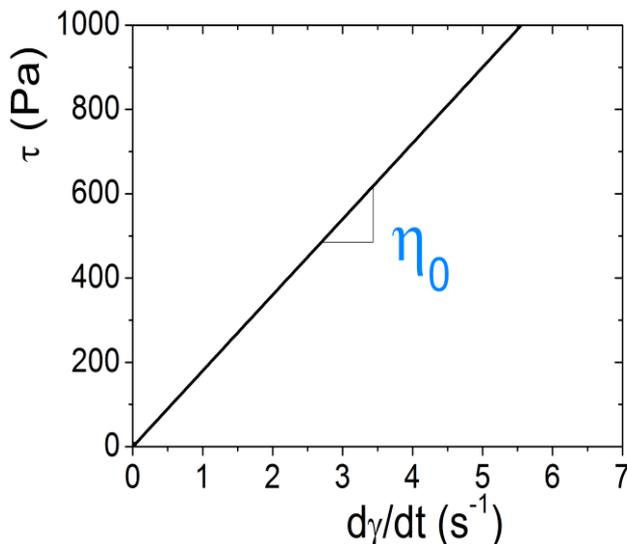
Figure 3 : (à gauche) Courbe contrainte-déformation pour un solide élastique linéaire dont le module de cisaillement vaut 180 Pa. (à droite) Modules de cisaillement pour quelques solides (Sources : [2], [3], [4], [5])

2.2.2 Les fluides newtoniens :

Les fluides newtoniens sont caractérisés par une relation linéaire entre la contrainte τ et le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (1.3)$$

Où η est la viscosité du fluide. Cette relation est tracée sur la figure 4. L'eau, le glycérol, la plupart des huiles, les solutions aqueuses faiblement concentrées, sont des liquides newtoniens de viscosités très diverses, dont certaines valeurs sont données à titre indicatif dans le tableau de la figure 4. D'un point de vue microscopique.



Liquide	η (Pa.s) (à 25°C)
Eau	$8,93 \cdot 10^{-4}$
Glycérol	0,934
Huile de silicone V20	$20 \cdot 10^{-3}$
Huile de silicone V350	$350 \cdot 10^{-3}$
Huile de ricin	$1 \pm 0,1$
Dodécane	$1,383 \cdot 10^{-3}$

Figure 4 : (à gauche) Courbe contrainte en fonction du taux de déformation pour un liquide newtonien de viscosité 180 Pas. (à droite) Viscosité de quelques liquides simples. (Sources : [6], [7], données fabricant pour les huiles silicone)

2.2.3 Les fluides rhéoépaississants et rhéofluidifiants :

Les fluides complexes les plus simples sont les fluides rhéo-fluidifiants ou rhéo-épaississants. Les premiers ont une viscosité apparente ($\tau/\dot{\gamma}$) qui diminue quand le gradient de vitesse augmente et l'inverse se produit pour les seconds. La courbe d'écoulement en cisaillement simple de ces fluides peut être modélisée par une loi puissance du type : puissance du type (voir figure 5) :

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad (1.4)$$

Avec k la consistance et n l'indice de comportement (ou exposant de rhéo-fluidification dans le cas des fluides rhéo-fluidifiants). Dans le cas où $n = 1$, $k = \eta$.

2.2.4 Les fluides à seuils :

Enfin, comme introduit précédemment, certains fluides ne s'écoulent pas si la contrainte qui leur est appliquée ne dépasse pas une certaine valeur "seuil". Ils se présentent généralement comme des matériaux pâteux, type gels, crèmes, émulsions, mousses ou boues.

Concernant leur microstructure, la plupart des fluides complexes est formée en mélangeant à un liquide une quantité importante d'éléments mésoscopiques (par exemple des particules, bulles, gouttes d'un autre liquide ou polymères intriqués) dont les interactions augmentent la résistance à l'écoulement de l'ensemble. Des phénomènes complexes peuvent alors apparaître comme la migration de phase, la thixotropie (lorsque la viscosité apparente dépend de l'histoire des déformations, (voir [8], [9]) ou l'apparition de bandes de cisaillement [10]–[11].

Le comportement des fluides à seuil combine celui des solides élastiques sous le seuil et des fluides visqueux (newtoniens ou rhéofluidifiants le plus fréquemment) au-dessus ; on le qualifie d'élasto-visco-plastique ou visco-plastique si l'élasticité en régime solide est négligeable.

2.2.5 Les fluides à seuils et le modèle de Herschel-Bulkley (HB) :

Les fluides à seuil dits simples possèdent une loi de comportement macroscopique indépendante de l'histoire de cisaillement du matériau. Parmi eux, ceux qui vont nous intéresser pour la suite de l'étude possèdent une loi de comportement qui peut être modélisée par une équation de Herschel-Bulkley :

$$\tau(\dot{\gamma}) = \tau_y + k\dot{\gamma}^n \quad (1.5)$$

Où τ_y est la contrainte seuil du matériau et k , appelée consistance, est une signature des effets visqueux en régime liquide. L'indice de rhéofluidification n caractérise le régime d'écoulement à l'état liquide : rhéofluidifiant si $n < 1$, rhéoépaississant si $n > 1$. Pour le cas particulier $n = 1$, on parle de fluide de Bingham. Les mousses, les émulsions concentrées, les suspensions concentrées de particules colloïdales sont des exemples de fluides à seuil dont le comportement en écoulement est bien décrit par la loi de Herschel-Bulkley. En dessous de leur contrainte seuil et pour de petites déformations, ces fluides se comportent comme des solides élastiques [12].

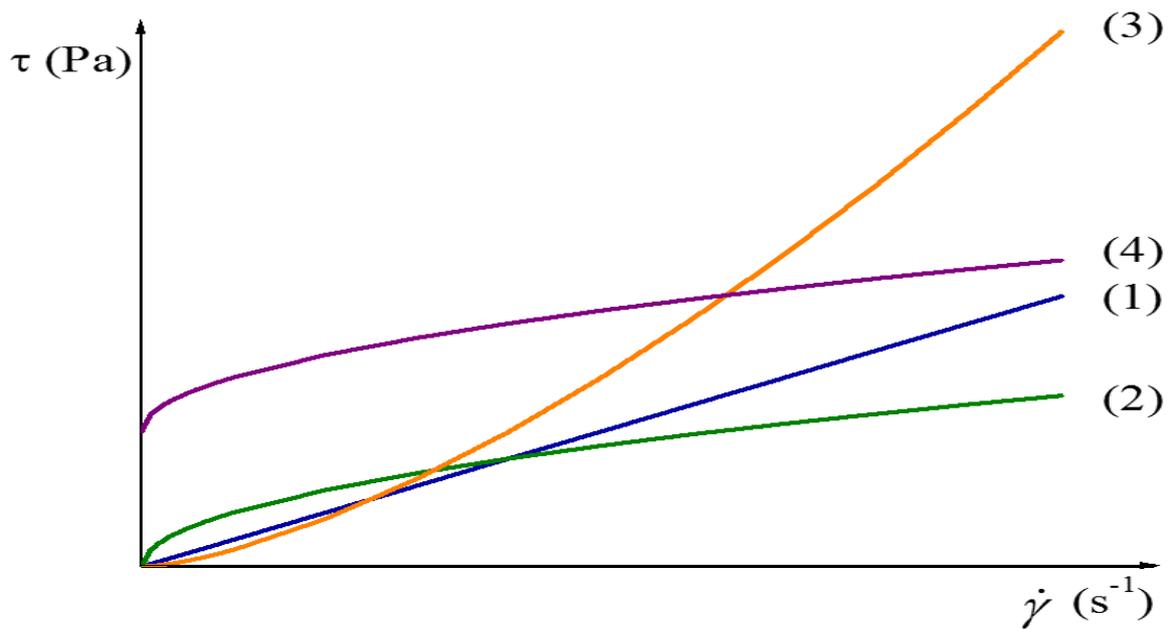


Figure 5 : Courbes d'écoulement d'un fluide newtonien (1), rhéofluidifiant (2), rhéoépaississant (3) et de Herschel-Bulkley (4).

2.3 Rhéométrie :

Afin de mesurer les lois d'écoulement de ces différents fluides, l'outil le plus communément utilisé en laboratoire comme dans le domaine industriel est le rhéomètre. L'appareil est composé d'un axe de rotation lié à un moteur et à une géométrie de mesure. La géométrie de mesure est composée d'une partie statique et d'une partie mobile, reliée à l'axe et entraînée par le moteur soit en imposant une vitesse de rotation Ω soit un couple $T = F \cdot r$.

Le fluide est placé entre les deux parties de la géométrie. Cette zone est nommée l'entrefer.

Les géométries couramment utilisées en laboratoire sont représentées sur la figure 6 : la géométrie plan-plan, consistant en deux plans parallèles, la géométrie cône-plan, et la géométrie de Couette, un cylindre tournant dans un second cylindre.

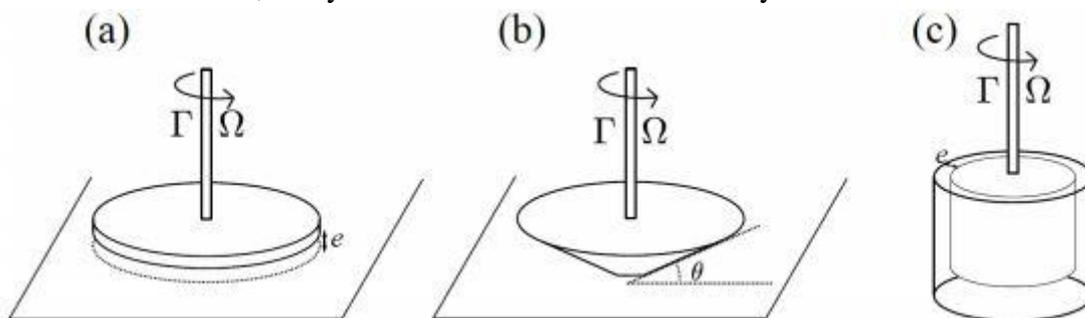


Figure 6 : Trois géométries couramment utilisées en rhéologie : géométrie plan-plan, géométrie cône-plan, géométrie de Couette.

Durant ces travaux, nous avons particulièrement utilisé la géométrie cône-plan. Cette géométrie a l'avantage d'avoir un taux de cisaillement homogène dans le matériau. Il s'agit d'un cône renversé tournant autour de son axe de symétrie sur un plan immobile. Le sommet du cône est coupé afin d'éviter tout frottement et contact avec le plan. L'angle θ entre le plan et l'arête du cône est très petit (seulement quelques degrés). On peut alors écrire que $\tan(\theta) \approx \theta$. La géométrie peut être rendue rugueuse par traitement chimique ou mécanique. En supposant alors le glissement faible voir nul et le cisaillement homogène partout dans le fluide, on obtient les relations entre la contrainte de cisaillement τ et le couple \mathbf{T} , ainsi qu'entre le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ et la vitesse de rotation Ω :

$$\tau = \frac{3T}{2\pi R^3} \quad \text{et} \quad \dot{\gamma} = \frac{\Omega}{\theta} \quad (1.6)$$

La courbe d'écoulement du fluide (σ : $\dot{\gamma}$) est obtenue en effectuant des rampes de contrainte ou de cisaillement. Vous pourrez trouver une description plus détaillée des autres géométries ici [13].

Chapitre 2 : Matériaux et méthodes.

1 Matériaux utilisés :

1.1 Solution de Carbopol :

Les fluides non-newtoniens utilisés dans notre étude sont préparés à base de Carbopol 940. Ce matériau est un polymère initialement sous forme de poudre (Figure 7-a). Les gels aqueux de Carbopol sont utilisés comme fluide modèle pour les expériences de fluides à seuil [14], [15]. Le Carbopol est un polymère polyacrylique, de formule générique $(CH_2 - CH - COOH)_n$, qui se présente sous forme d'une poudre dont les particules ont un diamètre variant de 2 à 20 μm . Afin d'obtenir un gel de Carbopol, il suffit de dissoudre le poudre de Carbopol dans de l'eau, puis de neutraliser la solution avec un volume approprié d'hydroxyde de sodium (NaOH). La solution de Carbopol forme un milieu de masse volumique très proche de celle de l'eau, estimée à 0,985 kg/L et transparent (Figure 7-b), ce qui est un grand avantage expérimental. De plus, conservé dans des conditions standards, le Carbopol est un fluide à seuil très stable dans le temps et très peu thixotrope [14].

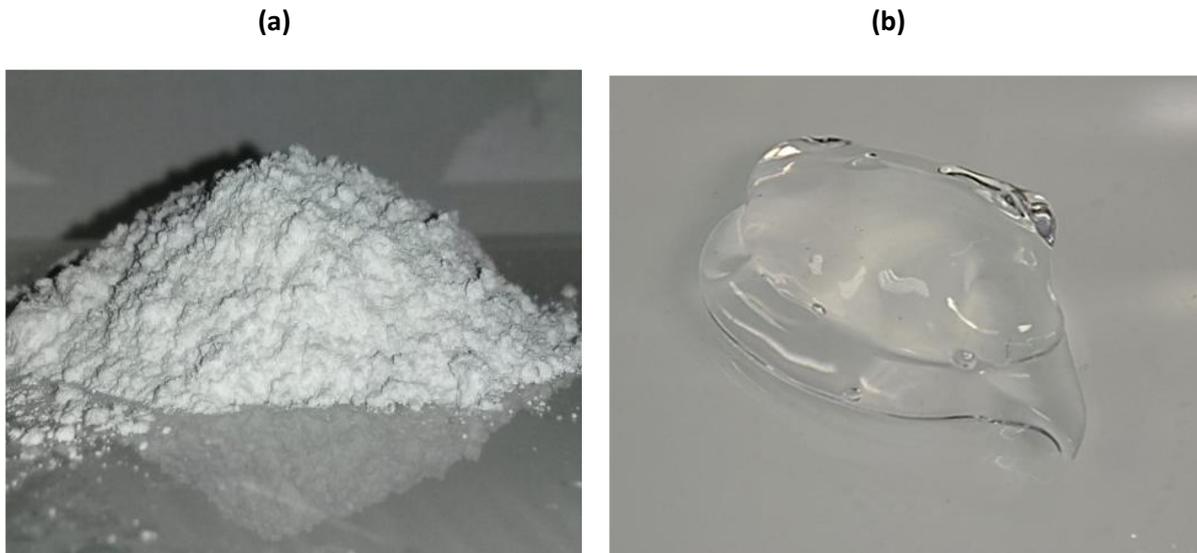


Figure 7 : Carbopol : (a) poudre de carbopol ; (b) gel de carbopol.

1.2 Méthode de préparation :

Nous avons préparés une solution avec une concentration massique de 0.2% de carbopol et il est préparé en deux étapes : La première c'est d'ajouter le polymère lentement à l'eau et mélangé avec une grande vitesse jusqu'à obtenir une dispersion sans grumeaux, avec certaines qualités de Carbopol, il n'y a pas d'augmentation significative de la viscosité à ce stade (généralement on utilise un agitateur magnétique pour assurer la dispersion). La solution obtenue est acide avec un pH entre 2 et 3 et de couleur blanchâtre. La deuxième étape consiste à neutraliser la solution à l'aide d'une base minérale (hydroxyde de sodium, NaOH). La

solution prend alors la forme de gel transparent et l'augmentation de la viscosité/ gélification est activée. En règle générale on diminue la vitesse à ce stade, et dans cette étape on utilise un autre mélangeur sous vide pour éliminer l'air entrainé ce qui trouble le gel ; qui s'appelle la VACURET (Figure 8).



Figure 8 : Image de la VACURET.

1.3 Les particules solides :

Le carbure de silicium (SiC) est un minéral essentiellement artificiel. Il a été découvert par Johan Berzélius en 1824 par une réaction parasite entre le carbone et la silice lors d'une synthèse de diamant à haute température. Il est aujourd'hui principalement formé par réaction à chaud ($> 2500^{\circ}\text{C}$) entre le silicium et le carbone ou par réduction à chaud de la silice par un excès de carbone.

Le SiC est un matériau avec une densité faible ($3,2 \text{ g/cm}^3$) principalement utilisé pour sa dureté comparable à celle du diamant (9-10 Mohs) et son inertie chimique à haute température. Il présente également de grandes conductivités thermique et électrique et une faible dilatation thermique, et avec une masse molaire de l'ordre de $40,11 \text{ g/mol}$ et une température de fusion égale 2730°C (4946°F).

Dans notre cas on utilise le carbure de silice sous forme de poudre avec un diamètre varie entre 0.05 et 0.15mm et qui ont une forme d'agglomérat sous qui est présentée par le figure 9 une image de carbure de silice prendre par un microscope électronique $\times 10$.

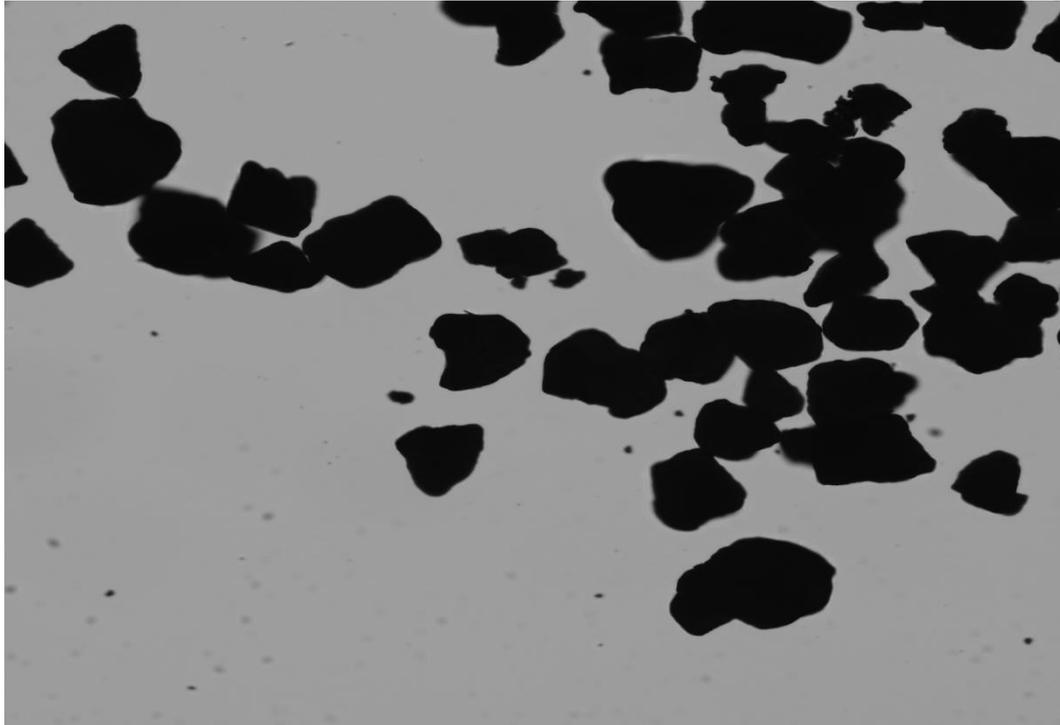


Figure 9 : Image de SiC par un microscope électronique $\times 10$.

2 Montage :

Le dispositif expérimental conçu pour cette étude, schématisé sur la Figure 11 et illustré sur la Figure 12, est une boucle d'écoulement permanent permettant d'obtenir un écoulement continu de notre fluide complexe dans une cellule d'écoulement (voir Figure 13).

Le fluide est mis en mouvement par une pousse seringue de type LAMBDA dont lesquelles on peut régler le débit d'entrée, deux capteurs de pression pour mesurer la pression en amont et en aval de la cellule, une caméra BASLER reliée avec un PC pour capturer et enregistrer les photos ; on utilise deux objectifs (Figure 10) ; TOKINA Macro 100 mm F 2,8 B, et NIKKOR 50 mm F 1,2 A ; le premier objectif permet de visualiser le mouvement des particules dans des petites zones de la cellule d'écoulement, et le deuxième objectif permet d'obtenir des photos de grandes zones de la cellules d'écoulement, un éclairage derrière la cellule pour prendre les photos de bonne qualité et dernièrement un b cher avec une balance pour mesurer la quantité du produit passé par la cellule.



Figure 10 : Objectifs : (1) NIKKOR 50 mm, (2) TOKINA Macro 100 mm.

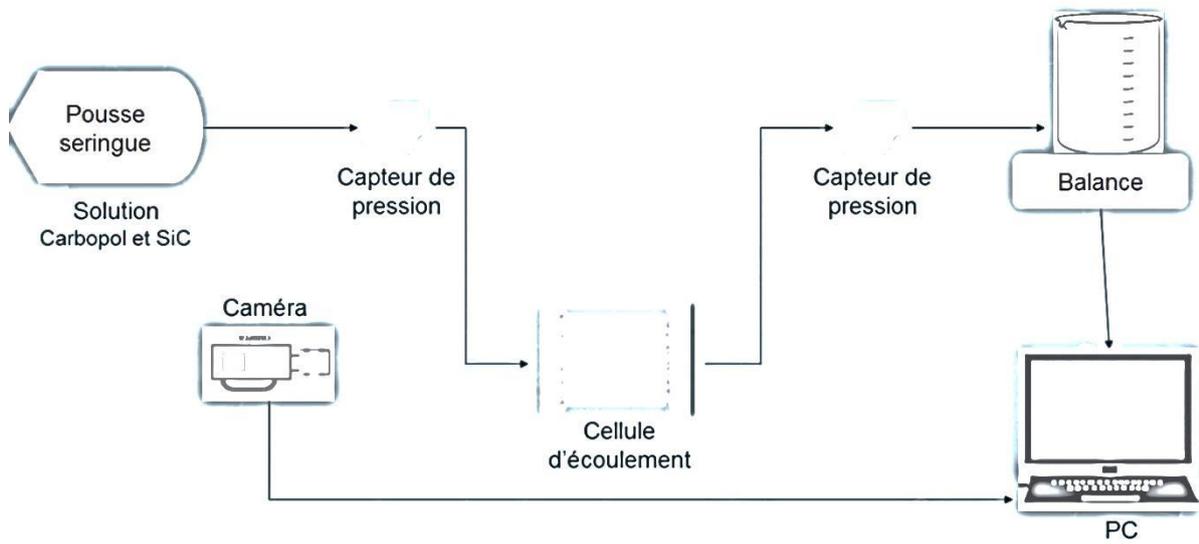


Figure 11 : Schéma simplifié du banc expérimental.



Figure 12 : Vue de l'ensemble de dispositif expérimental.

2.1 Cellule d'écoulement :

La cellule d'écoulement est constitué d'une géométrie carré de dimension 12×12 cm (Figure 12), tandis que la zone active est de 5.5×5 cm (Figure 13-a).

La zone active constitue de deux plaques de plastiques, la figure 13-b montre la géométrie des voies fluidiques à travers les domaines du canal avec le diamètre de chaque canal est de l'ordre de 5 mm.

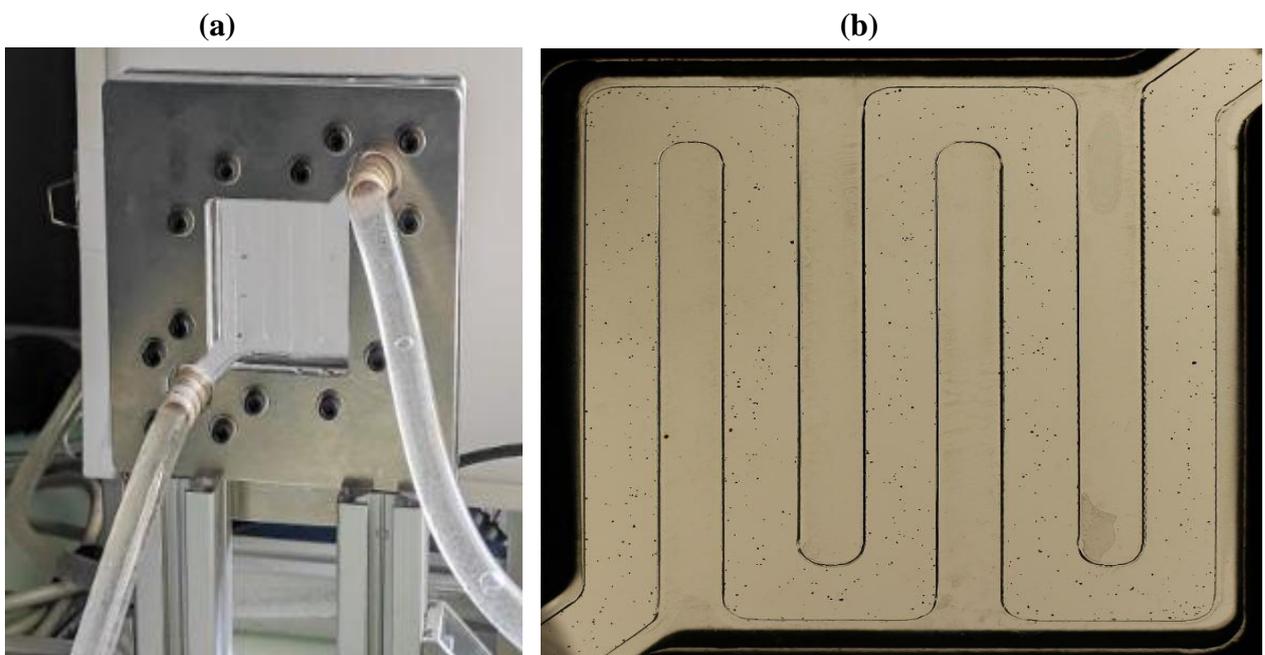


Figure 13 : (a) cellule d'écoulement, (b) zone active.

3 La vélocimétrie par images de particules PIV :

La vélocimétrie par images de particules PIV est une technique de mesure de vitesse basée sur le suivi de particules et de mesurer les champs de vitesse dans un écoulement, l'idée est de prendre deux photos de l'écoulement séparées d'un temps Δt connus, en calculant par des méthodes statistiques le déplacement des particules pendant ce temps Δt , on accède à la vitesse = distance / temps.

Une image de PIV est une description en niveaux de gris de la zone observée, il est donc important d'utiliser des particules très réfléchissantes par rapport au fluide pour bien les distinguer.

Chapitre 3 : Résultats et Discussions.

1 Les résultats obtenus par l'objectif TOKKINA 100 mm :

L'objectif TOKKINA 100 mm donne des images de l'écoulement sur des petites zones, et pour cela il faut divisée notre cellule d'écoulement en différentes parties (Figure 14).

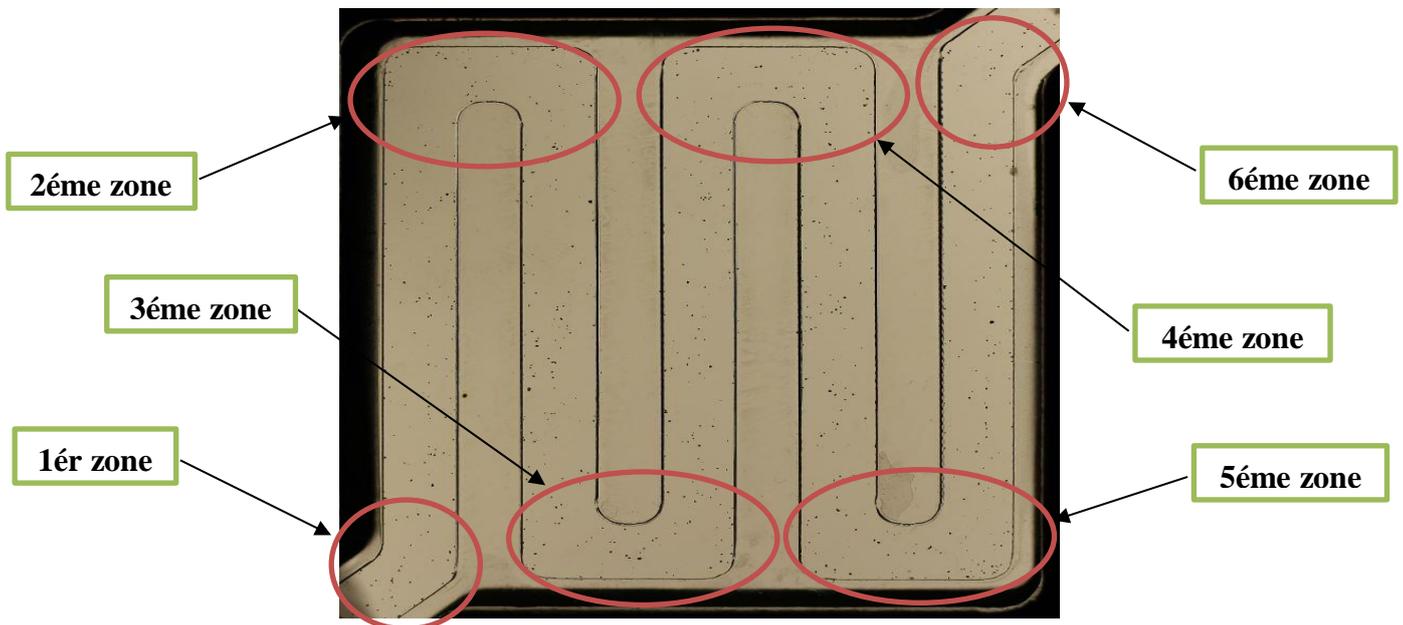


Figure 14 : Les différentes parties étudier par TOKKINA 100 mm.

Dans les essais suivants on travaille avec un débit constant de l'ordre de **0,35 cm³/s**, qui indique le débit volumique de l'entrée du fluide à la cellule d'écoulement.

Puisqu'on travaille avec un débit constant, donc la perte de charge ΔP (la variante de pression entre l'entrée et la sortie), reste constante dans tous les essais suivants selon la relation de suivant :

$$D = \frac{\Delta P}{R} \quad (1.7)$$

Avec : D = débit en m³.s⁻¹

ΔP = perte en charge en Pa

R = résistance hydraulique en Pa.s.m⁻³

Le tableau suivant (Figure 15) représente la variation de la pression d'entrée, de sortie et de poids au cours du temps.

Temps (s)	Entrée (bars)	Sortie (bars)	Poids (g)
0	0.734	0.154	0
1	0.782	0.173	0
2	0.78	0.191	0
3	0.888	0.211	0
4	0.902	0.23	0.1
5	0.962	0.237	0.22
6	0.998	0.249	0.48
7	1.018	0.253	0.7
8	1.037	0.259	0.99
9	1.05	0.265	1.43
10	1.061	0.259	1.7
11	1.071	0.27	2.05
12	1.075	0.266	2.57
13	1.087	0.269	2.95
14	1.096	0.249	3.34
15	1.099	0.27	3.91
16	1.1	0.271	4.33
17	1.1	0.274	4.75
18	1.104	0.271	5.47
19	1.107	0.273	5.79
20	1.102	0.272	6.18
21	1.112	0.272	6.84
22	1.058	0.274	7.29
23	1.11	0.269	7.73
24	1.115	0.271	8.33
25	1.12	0.28	8.76
26	1.115	0.275	9.41
27	1.112	0.274	9.88
28	1.099	0.275	10.28
29	1.087	0.269	10.87
30	0.962	0.237	11.35

Figure 15 : La variation de pression d'entrée, de sortie et de poids au cours de temps avec DV = 0.35 cm³/s.

Lorsqu'un fluide s'écoule dans un tuyau, il existe en deux points distincts du fluide une variation de pression, L'écoulement se fait dans le sens des pressions décroissantes (de la plus forte vers la plus faible) et la figure 16 représente les courbes de pression en fonction du temps.

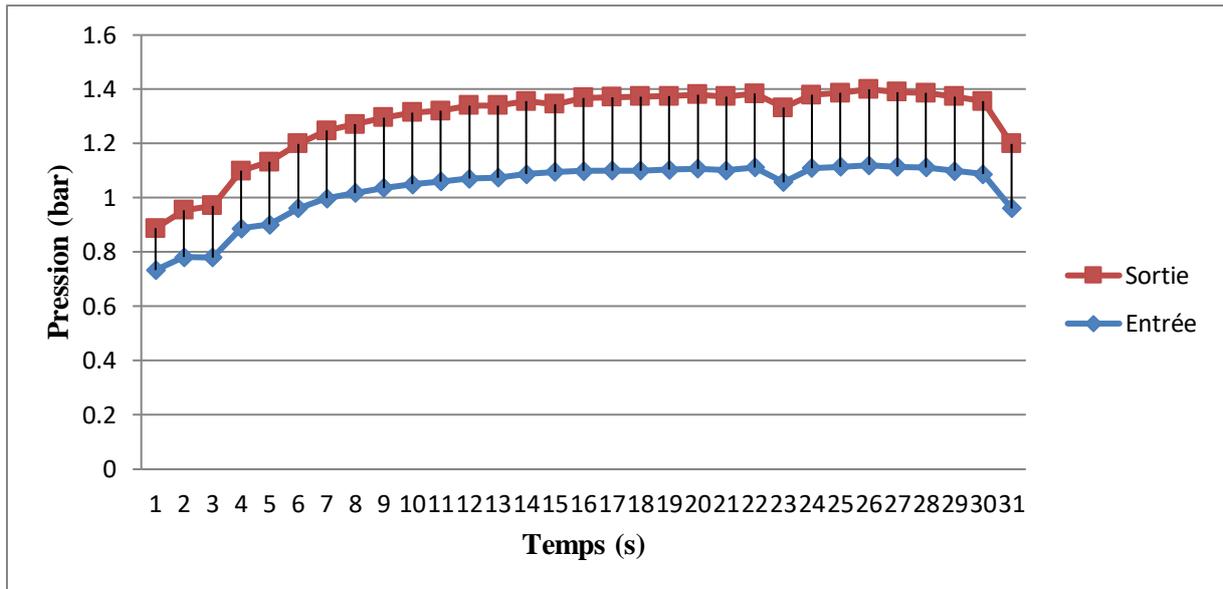


Figure 16 : Courbes de pression en fonction du temps avec $DV = 0.35 \text{ cm}^3/\text{s}$.

1.1 Essai 1 : 1^{er} zone : Entrée de la cellule :

Les figures 17 et 18 représentent les vecteurs et les champs de vitesse de cette zone obtenue par la PIV.

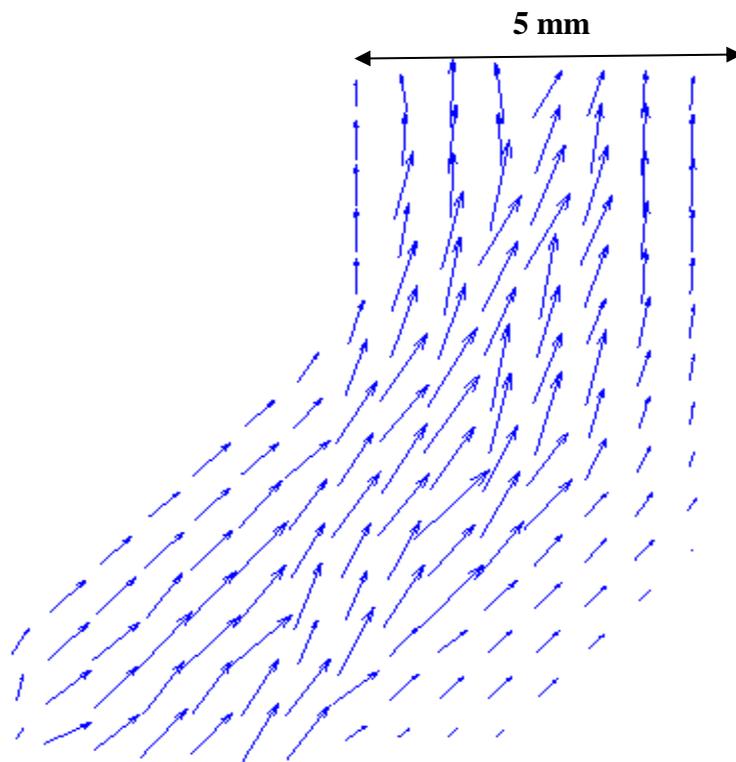


Figure 17 : Les vecteurs de vitesse de la 1^{er} zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.

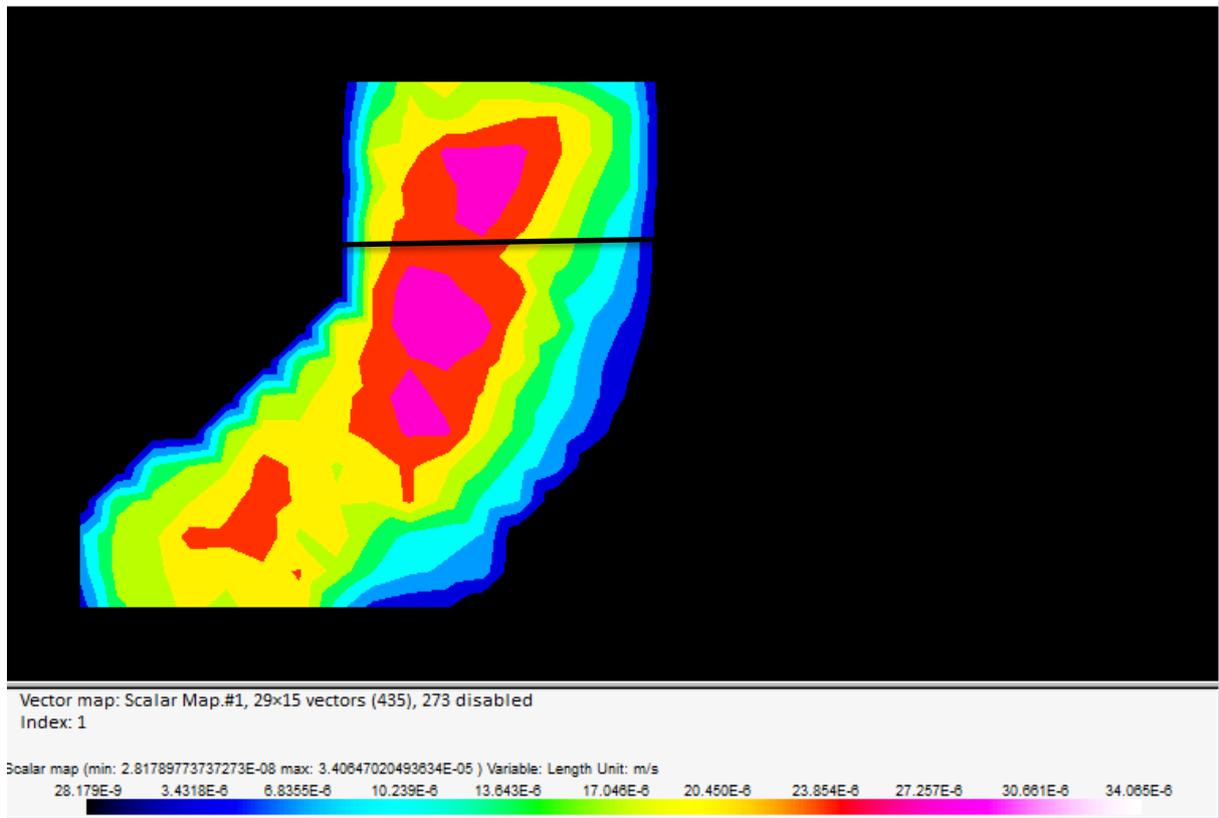


Figure 18 : Le champ de vitesse de la 1^{er} zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.

Pour visualiser bien le profil de vitesse à l'intérieur du canal, on fait une coupe transversale (voir figure 18), et la figure 19 montre le profil de vitesse des particules au cours de cette coupe.

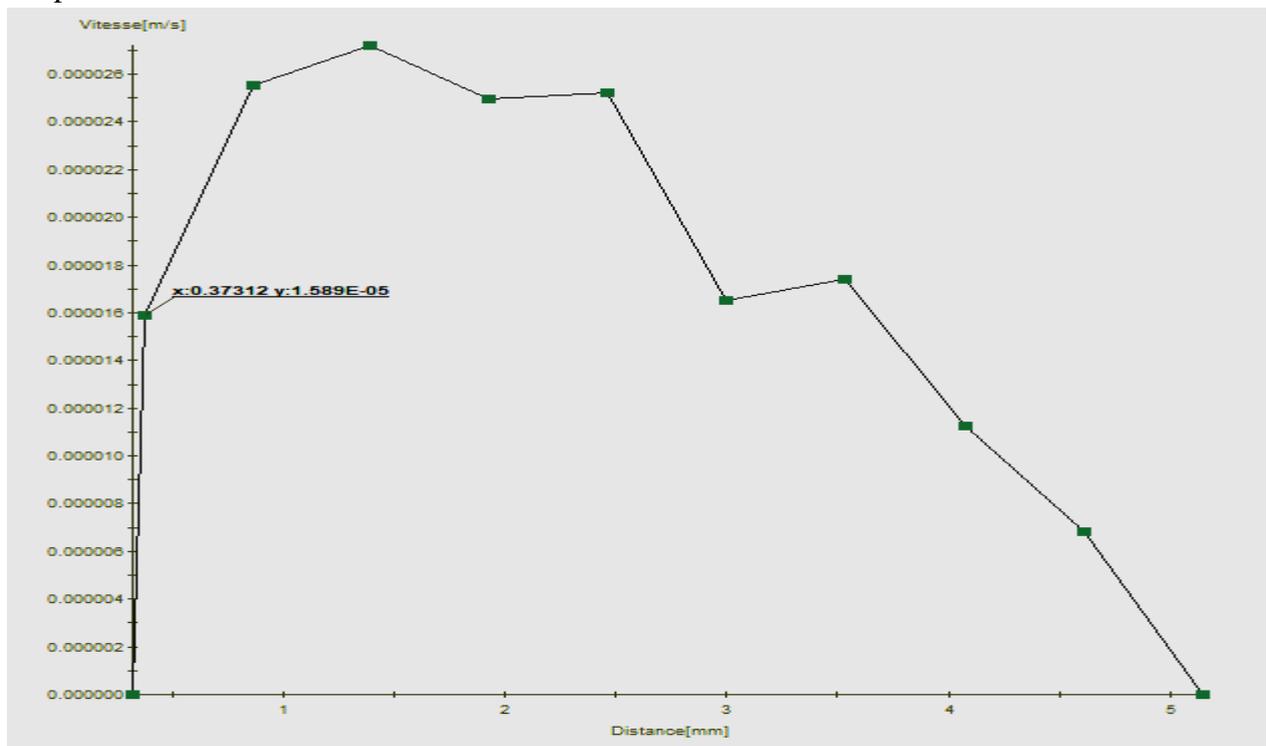


Figure 19 : Profil de vitesse de la 1^{er} zone pour un débit de $0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.

1.2 Essai 2 : 2ème zone :

Les figures 20 et 21 représentent les vecteurs et les champs de vitesse de cette zone obtenue par la PIV.

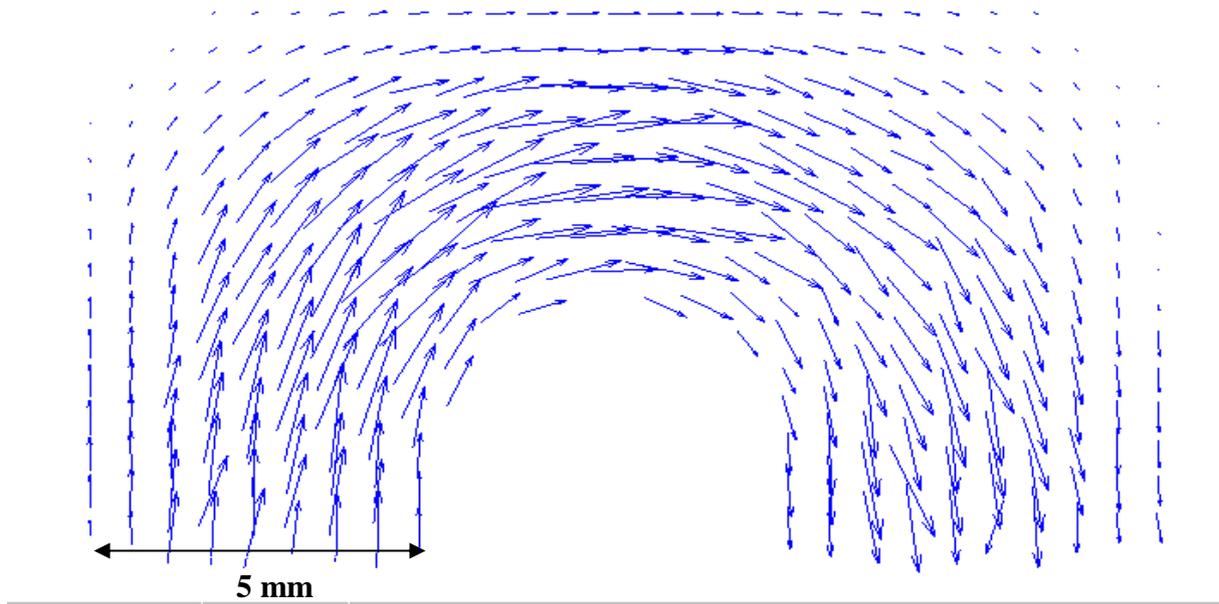


Figure 20 : Les vecteurs de vitesse de la 2ème zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.

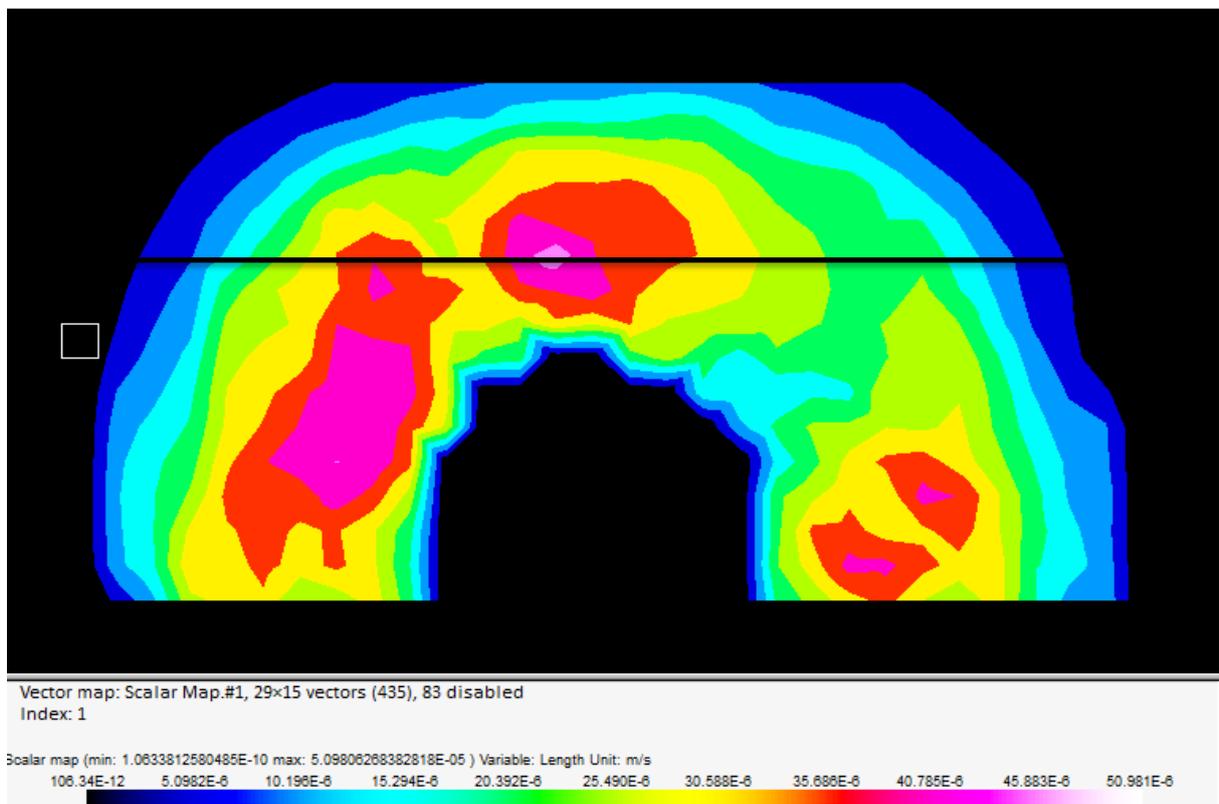


Figure 21 : Le champ de vitesse de la 2ème zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.

Pour visualiser bien le profil de vitesse à l'intérieur du canal, on fait une coupe transversale (voir figure 21), et la figure 22 montre le profil de vitesse des particules au cours de cette coupe.

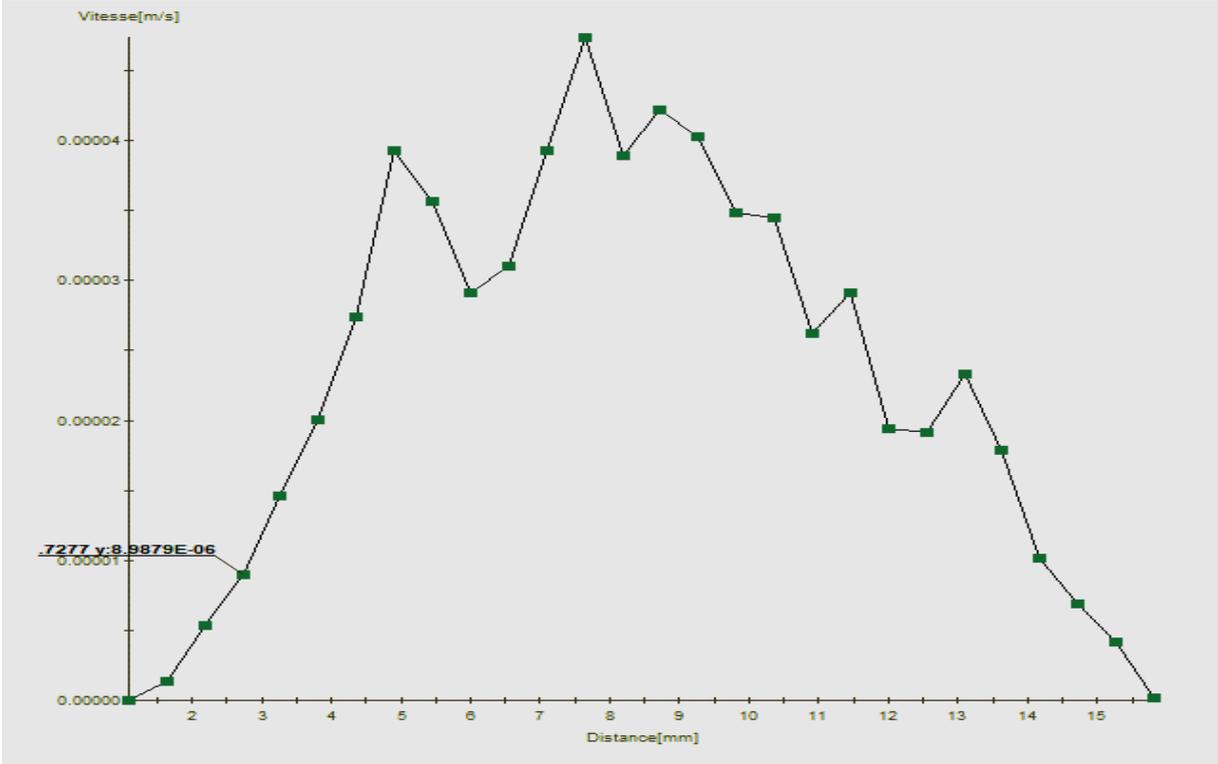


Figure 22 : Profil de vitesse de la 2ème zone pour un débit de 0,35 cm³/s.

1.3 Essai 3 : 3ème zone :

Les figures 23 et 24 représentent les vecteurs et les champs de vitesse de cette zone obtenue par la PIV.

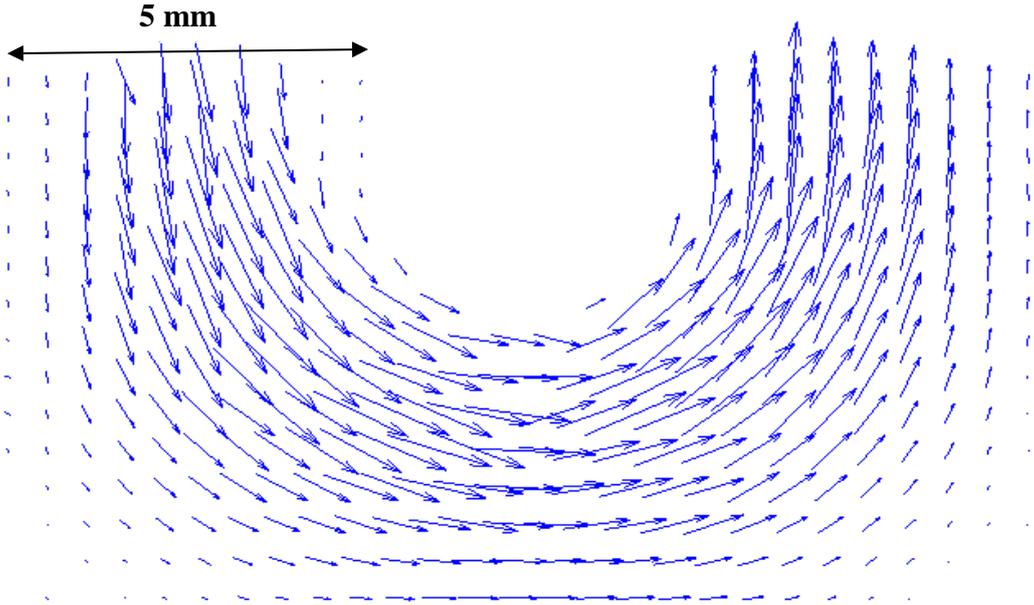


Figure 23 : Les vecteurs de vitesse de la 3ème zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.

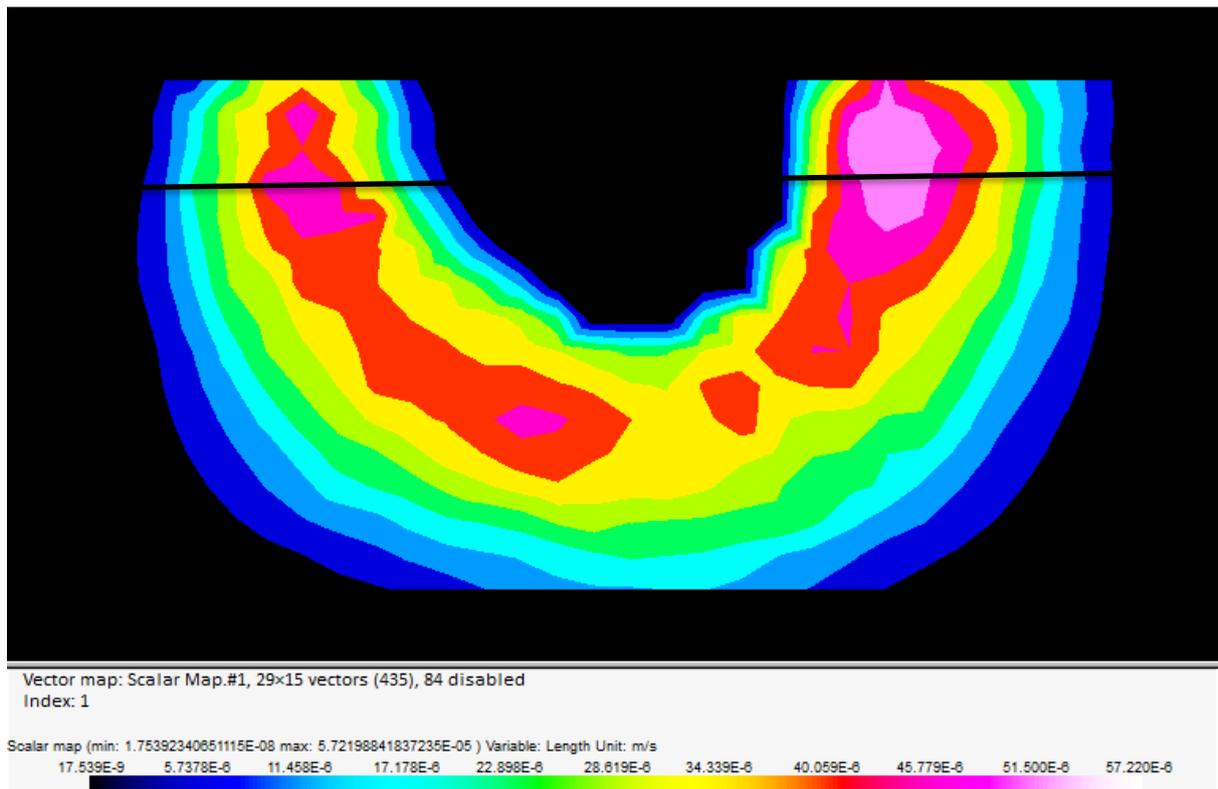


Figure 24 : Le champ de vitesse de la 3^{ème} zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.

Pour visualiser bien le profil de vitesse à l'intérieur du canal, on fait une coupe transversale (voir figure 24), et la figure 25 montre le profil de vitesse des particules au cours de cette coupe.

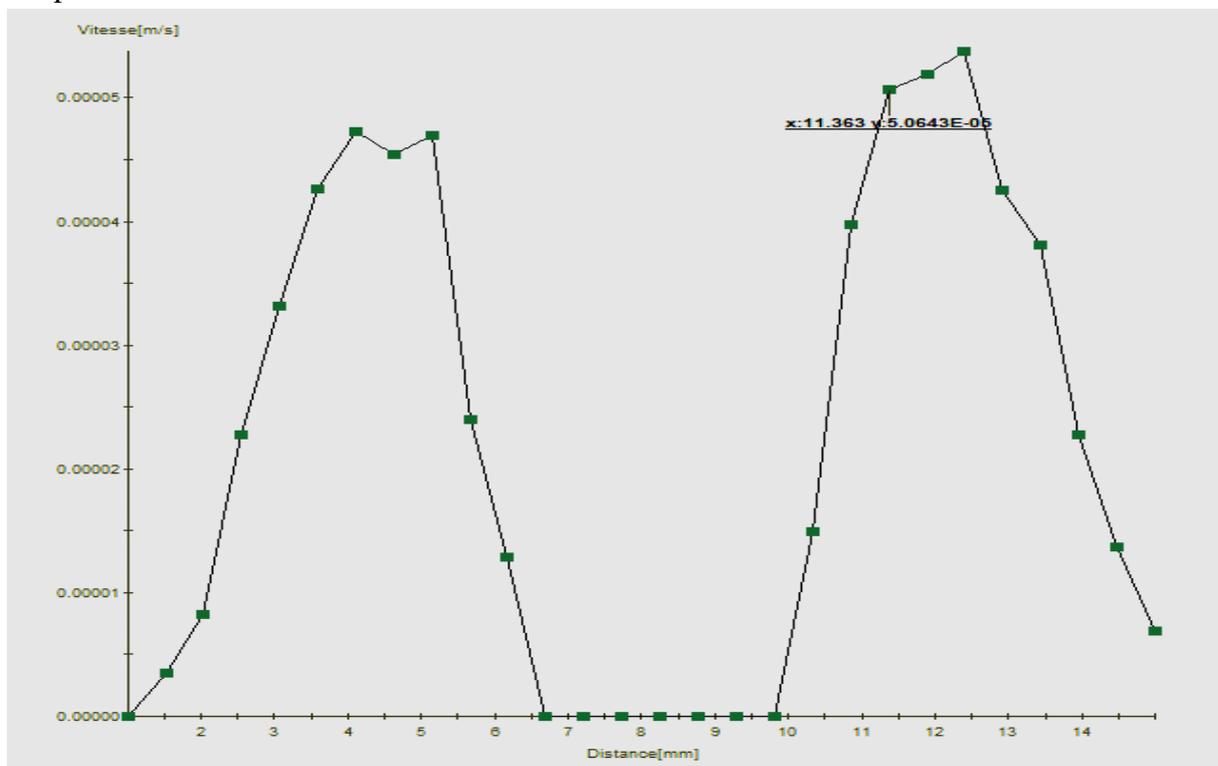


Figure 25 : Profil de vitesse de la 3^{ème} zone pour un débit de $0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.

1.4 Essai 4 : 4^{ème} zone :

Les figures 26 et 27 représentent les vecteurs et les champs de vitesse de cette zone obtenue par la PIV.

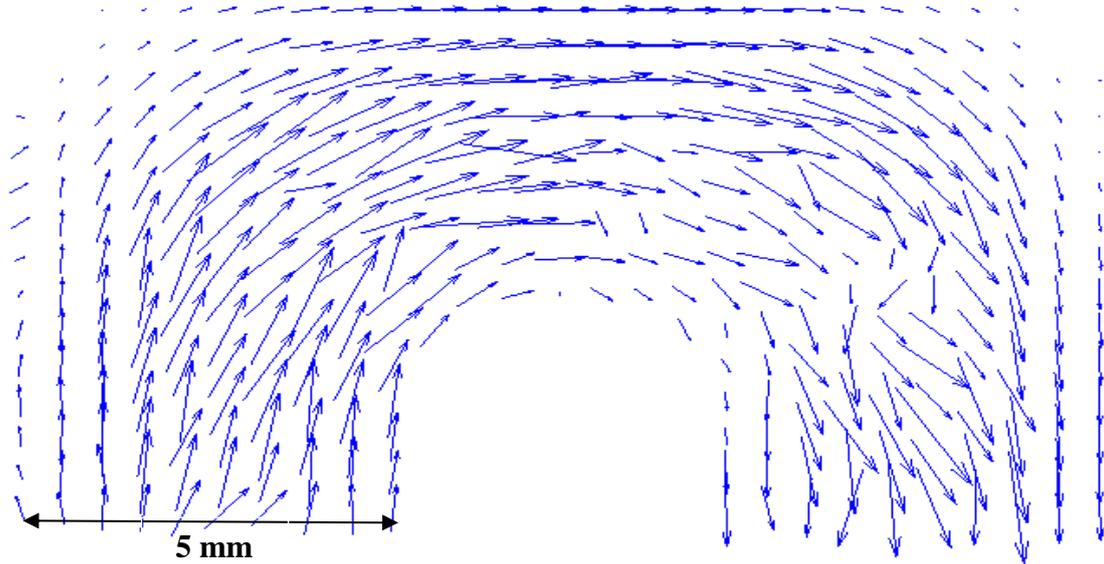


Figure 26 : Les vecteurs de vitesse de la 4^{ème} zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.

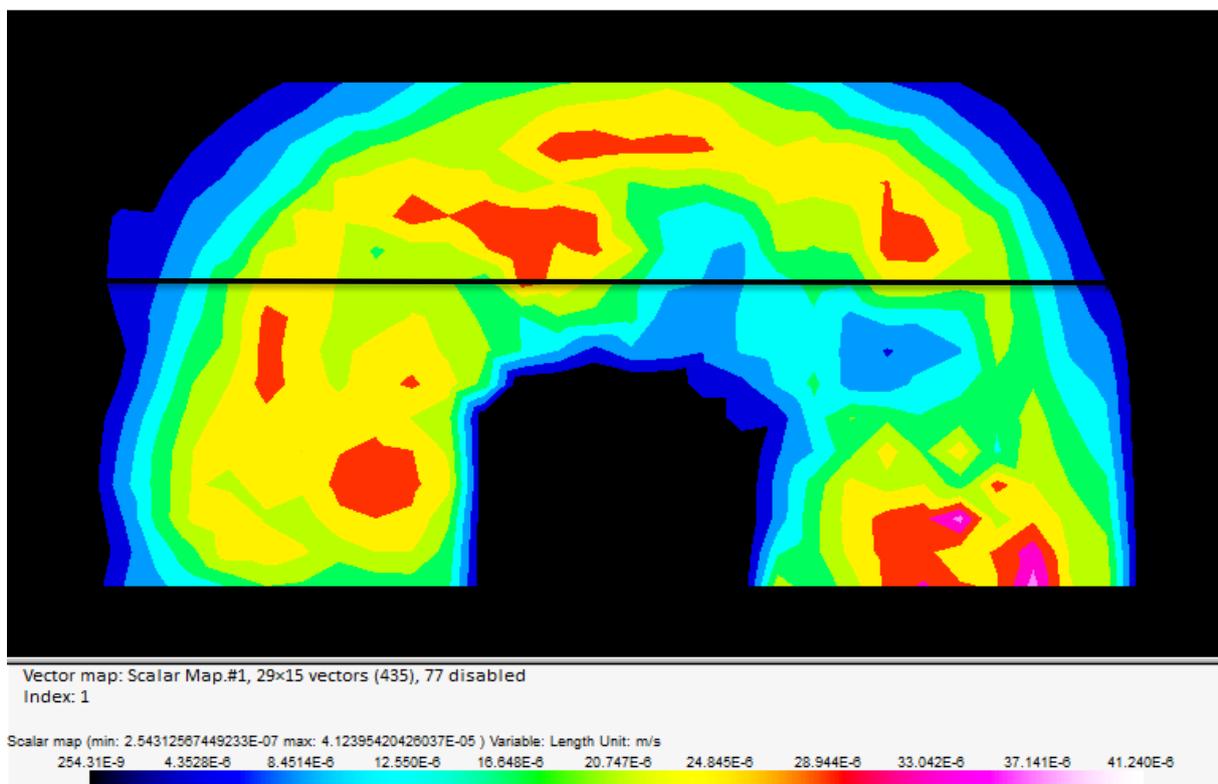


Figure 27 : Le champ de vitesse de la 4^{ème} zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.

Pour visualiser bien le profil de vitesse à l'intérieur du canal, on fait une coupe transversale (voir figure 27), et la figure 28 montre le profil de vitesse des particules au cours de cette coupe.

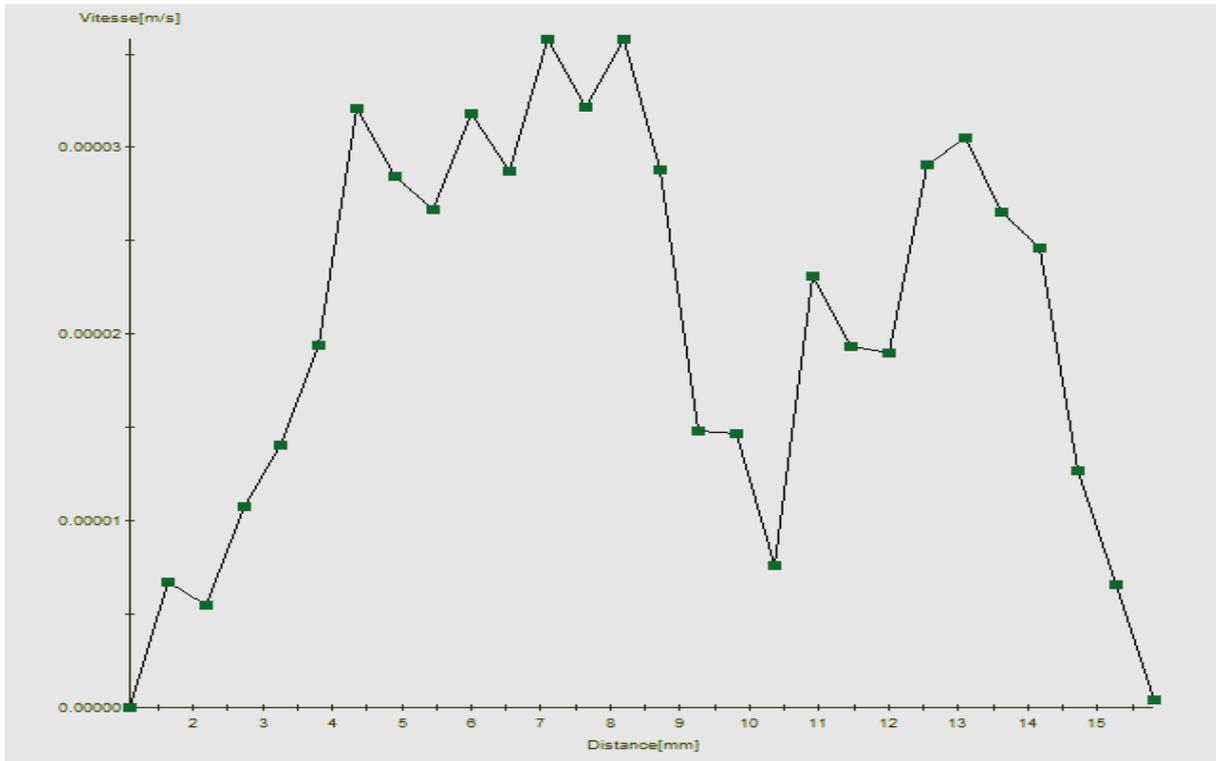


Figure 28 : Profil de vitesse de la 4ème zone pour un débit de 0,35 cm³/s.

1.5 Essai 5 : 5ème zone :

Les figures 29 et 30 représentent les vecteurs et les champs de vitesse de cette zone obtenue par la PIV.

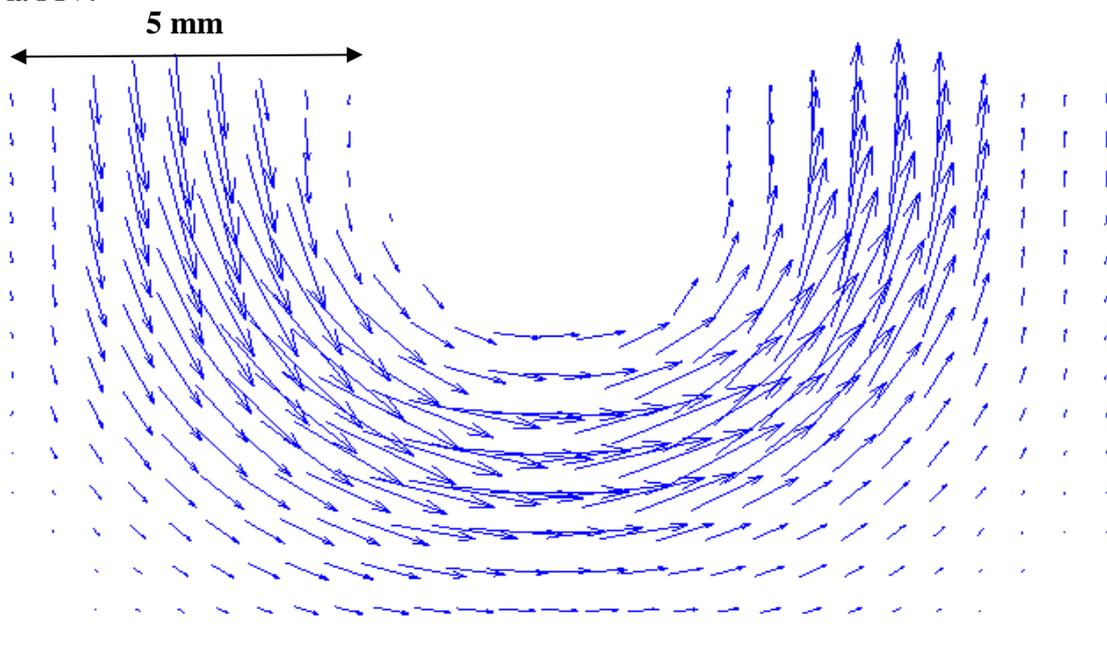


Figure 29 : Les vecteurs de vitesse de la 5ème zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.

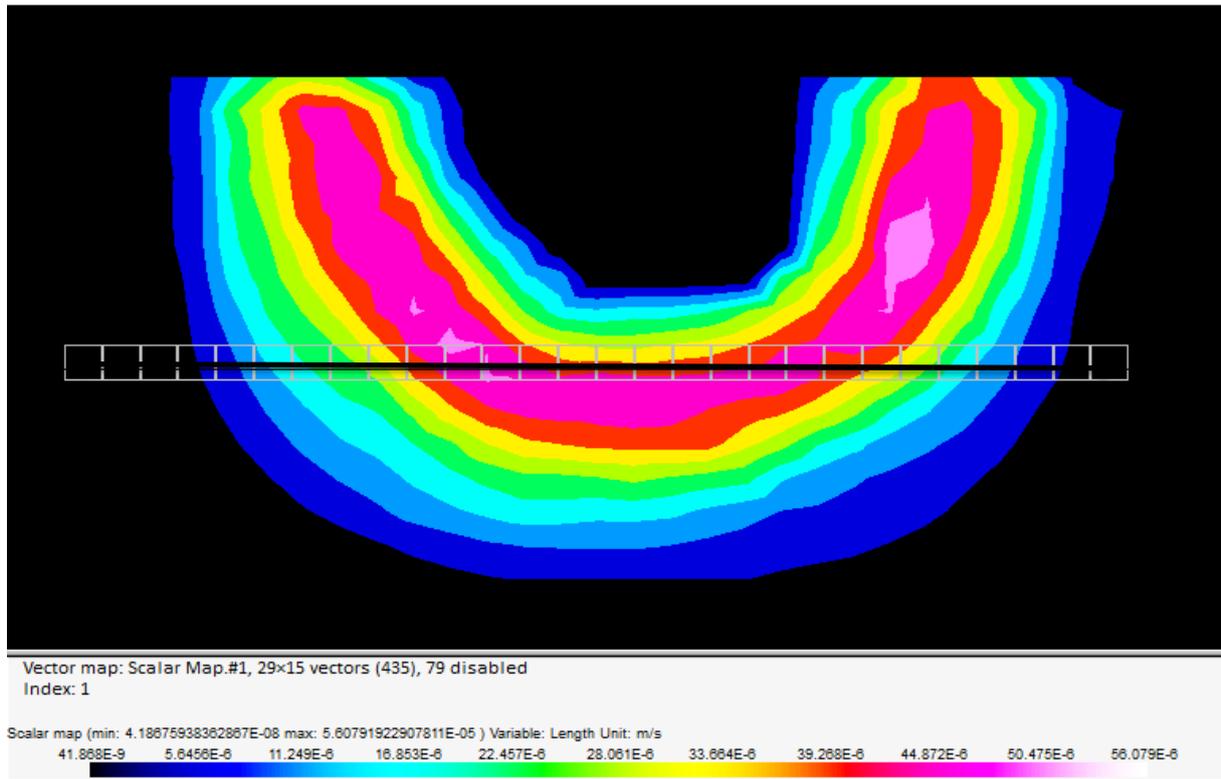


Figure 30 : Le champ de vitesse de la 5^{ème} zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.

Pour visualiser bien le profil de vitesse à l'intérieur du canal, on fait une coupe transversale (voir figure 30), et la figure 31 montre le profil de vitesse des particules au cours de cette coupe.

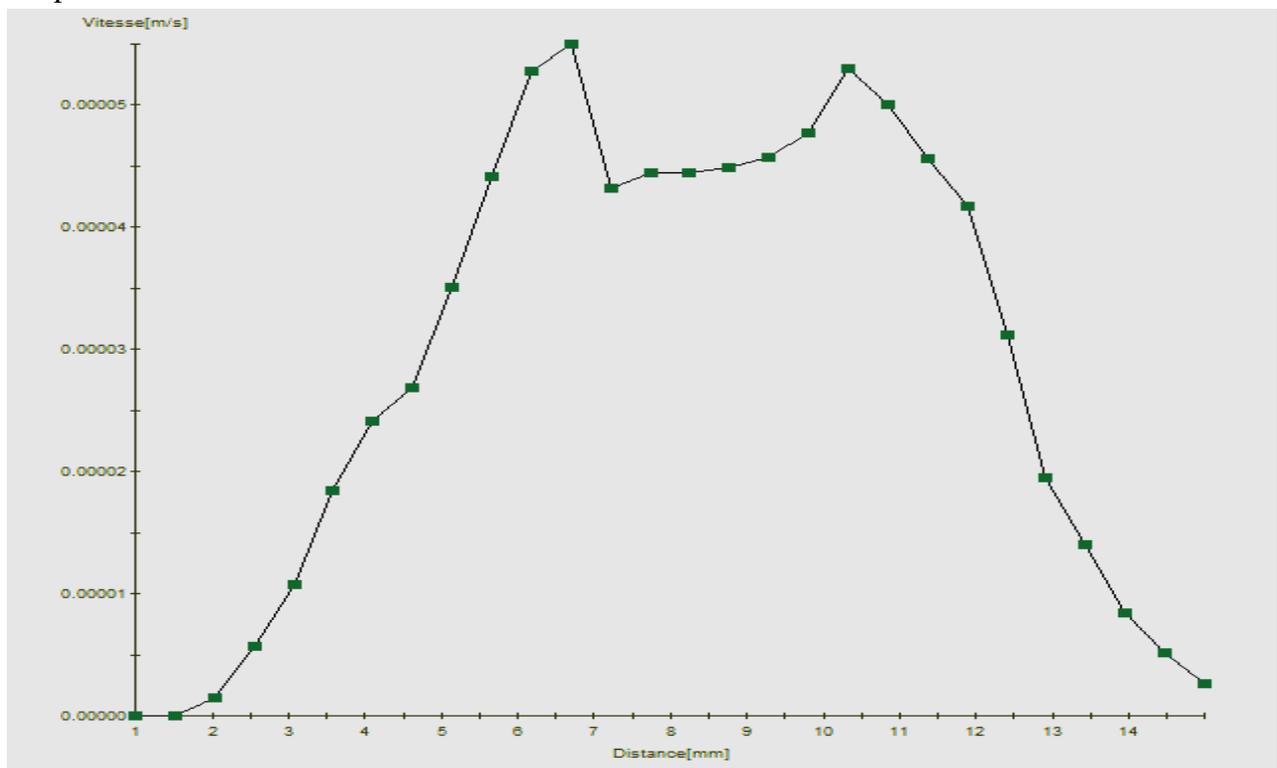


Figure 31 : Profil de vitesse de la 5^{ème} zone pour un débit de $0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.

1.6 Essai 6 : 6^{ème} zone : Sortie de la cellule :

Les figures 32 et 33 représentent les vecteurs et les champs de vitesse de cette zone obtenue par la PIV.

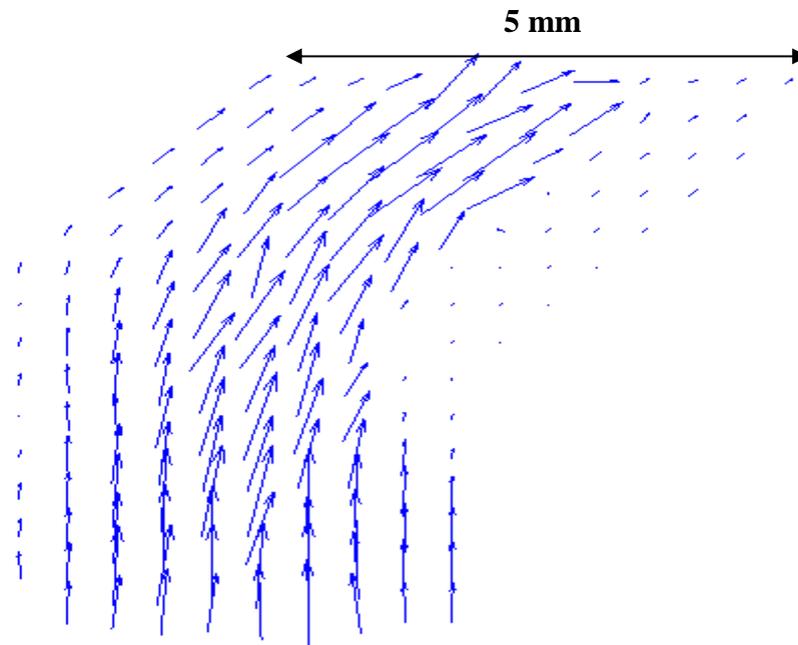


Figure 32 : Les vecteurs de vitesse de la 6^{ème} zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.

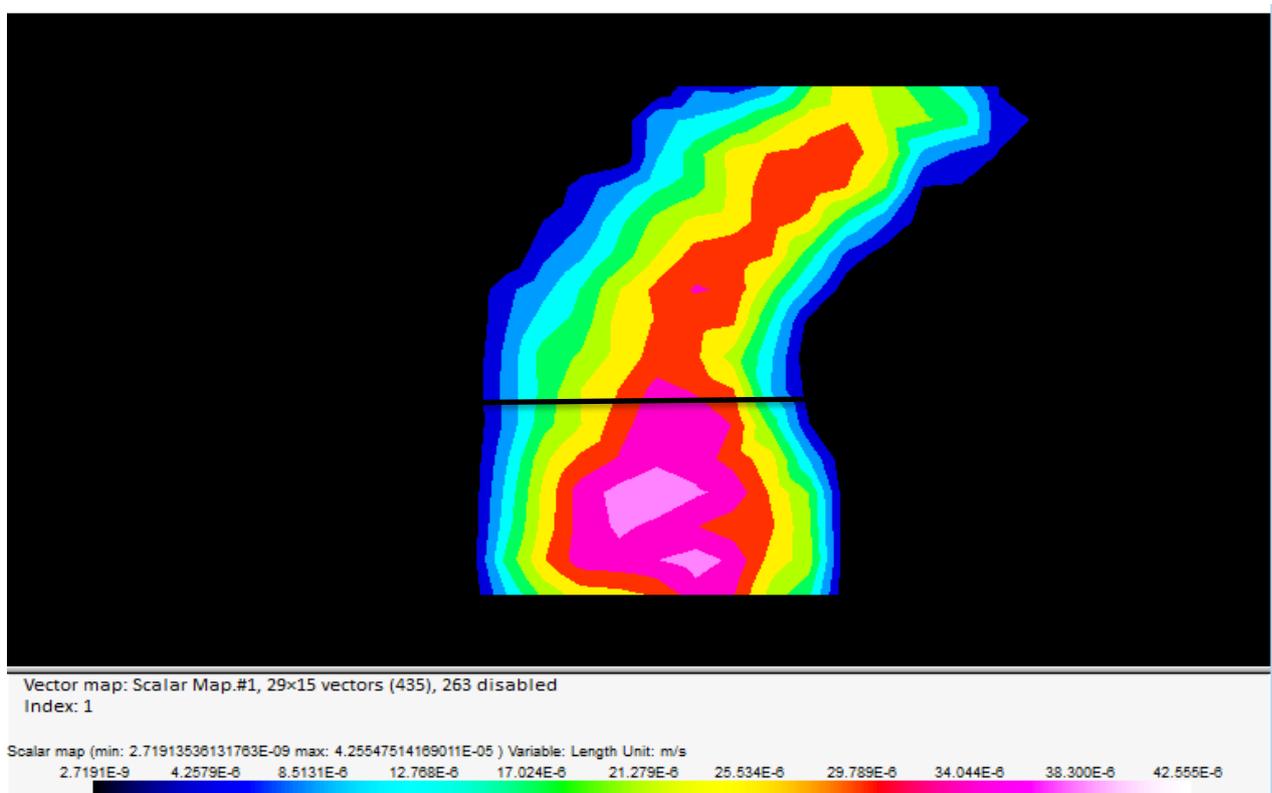


Figure 33 : Le champ de vitesse de la 6^{ème} zone avec $Dv = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$.

Pour visualiser bien le profil de vitesse à l'intérieur du canal, on fait une coupe transversale (voir figure 33), et la figure 34 montre le profil de vitesse des particules au cours de cette coupe.

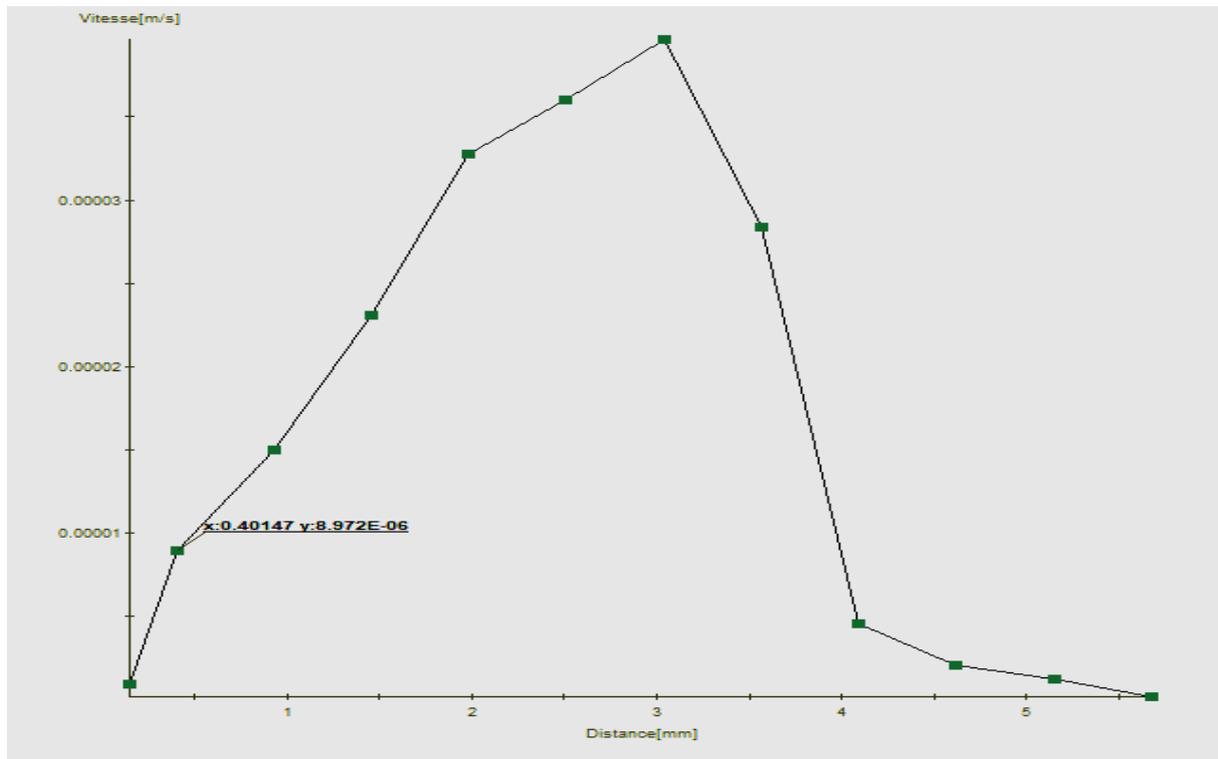


Figure 34 : Profil de vitesse de la 6ème zone pour un débit de 0,35 cm³/s.

1.7 Discussions :

- Les vitesses élevées sont observées au milieu des canaux d'écoulement.
- La diminution de vitesse près de l'entrée et de la sortie de la zone active, c'est-à-dire une faible diminution de vitesse dans la 1^{er} partie et la 6^{ème} partie par rapport aux autres parties, par exemple la vitesse maximale des particules à l'entrée est $34,06 \cdot 10^{-6}$ m/s et la vitesse maximale des particules à la sortie est $42,55 \cdot 10^{-6}$ m/s, par contre la vitesse maximale dans : la 2^{ème} partie est $50,98 \cdot 10^{-6}$ m/s, la 3^{ème} partie est $57,22 \cdot 10^{-6}$ m/s, la 5^{ème} partie est $56,07 \cdot 10^{-6}$ m/s.
- Des zones de stagnations indésirables observées au voisinage de la paroi de chaque canal (zones de recirculations) dans la 2^{ème}, 3^{ème}, 4^{ème} et la 5^{ème} parties dont lesquelles la vitesse est presque nulle dans ces zones là, ce qui indique une accumulation des particules.
- Les coupes transversales démontrent que la vitesse à côté des parois est faible par rapport au milieu du canal, ce qui est présenté par les profils de vitesse.
- Les faibles vitesses à côtés des parois d'écoulement à cause du contact entre les particules et les parois, c'est-à-dire un frottement entre les deux, ce qui influence sur la vitesse des particules.

2 Les résultats obtenus par l'objectif NIKKOR 50 mm :

Pour confirmer les résultats précédents, on refait les mêmes essais mais cette fois-ci avec l'objectif NIKKOR 50 mm qui nous donne des images plus larges que le premier objectifs, et pour cela on divise notre cellule d'écoulement en deux parties (Figure 35).

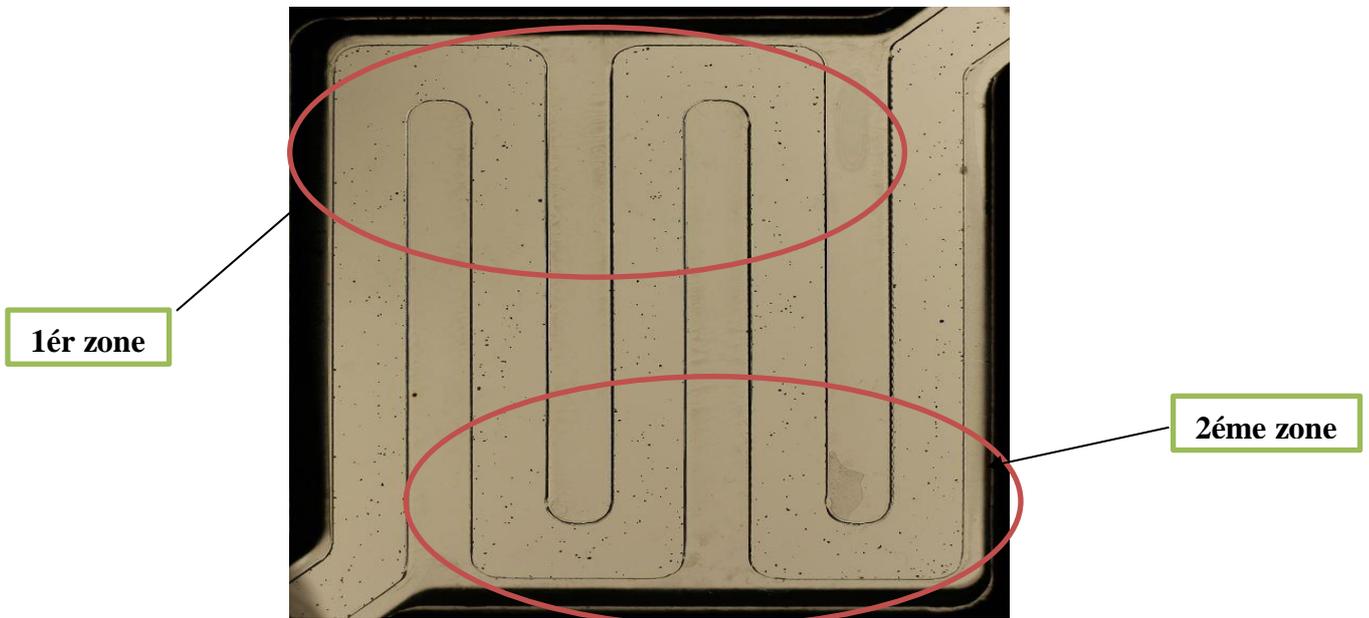


Figure 35 : Les deux parties observées par l'objectif NIKKOR 50 mm.

Dans les essais suivants on travaille avec un débit constant de l'ordre de **1,05 cm³/s**, qui indique le débit volumique de l'entrée du fluide à la cellule d'écoulement.

Lorsqu'on augmente le débit, la pression à l'entrée et à la sortie augmente, donc le tableau suivant (Figure 36), représente la variation de la pression d'entrée, de sortie et de poids au cours du temps pendant les essais suivants.

Temps (s)	Entrée (bars)	Sortie (bars)	Poids (g)
0	0.602	0.137	0
1	0.784	0.139	0
2	0.925	0.169	0
3	1.036	0.213	0
4	1.126	0.254	0.09
5	1.167	0.273	0.38
6	1.257	0.287	0.8
7	1.282	0.295	1.64
8	1.324	0.301	2.38
9	1.335	0.306	3.12
10	1.382	0.306	3.24
11	1.388	0.318	3.61
12	1.384	0.311	3.82
13	1.385	0.32	4.03
14	1.374	0.319	4.47
15	1.369	0.32	9.27
16	1.4	0.321	9.52
17	1.372	0.324	9.94
18	1.402	0.324	12.3
19	1.409	0.324	12.56
20	1.415	0.325	14.87
21	1.424	0.325	15.27
22	1.399	0.326	15.63
23	1.384	0.324	16.03
24	1.288	0.295	17.25
25	1.254	0.288	17.67
26	1.178	0.276	18.95
27	1.068	0.231	20.02
28	1.035	0.213	20.58
29	0.974	0.159	21.6
30	0.816	0.146	22.34

Figure 36 : La variation de pression d'entrée, de sortie et de poids au cours de temps avec $Dv = 1.05 \text{ cm}^3/\text{s}$.

Et la figure 37 représente les courbes de pression en fonction du temps.

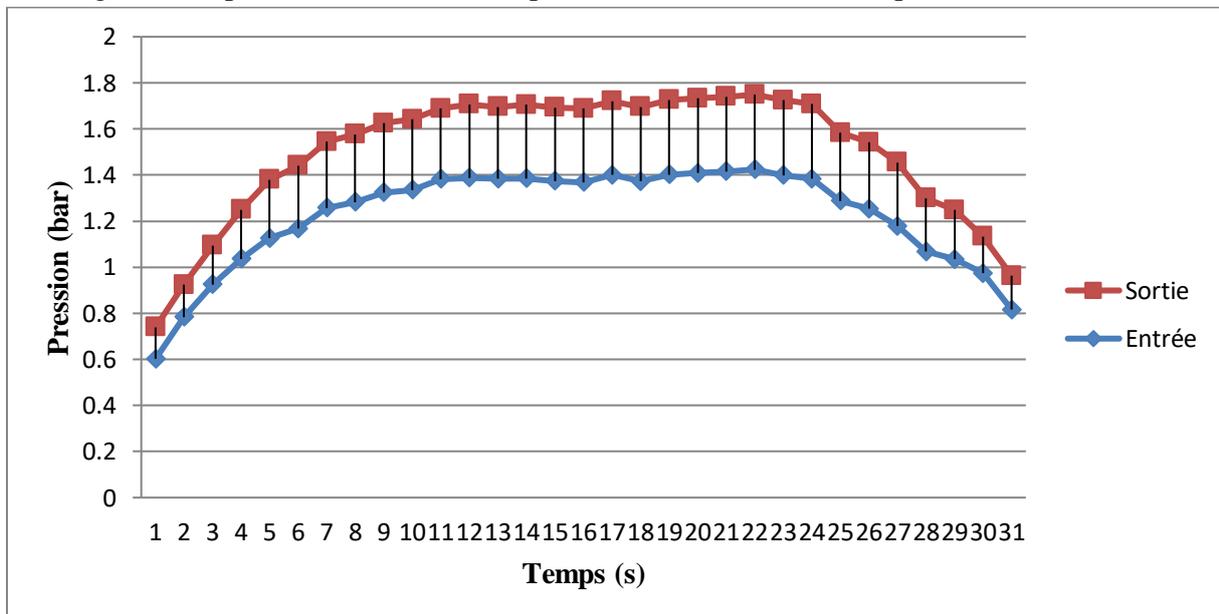


Figure 37 : Courbes de pression en fonction du temps avec $DV = 1.05 \text{ cm}^3/\text{s}$.

2.1 Essai 1 : 1^{er} zone :

Les figures 38 et 39 représentent les vecteurs et les champs de vitesse de cette zone obtenue par la PIV.

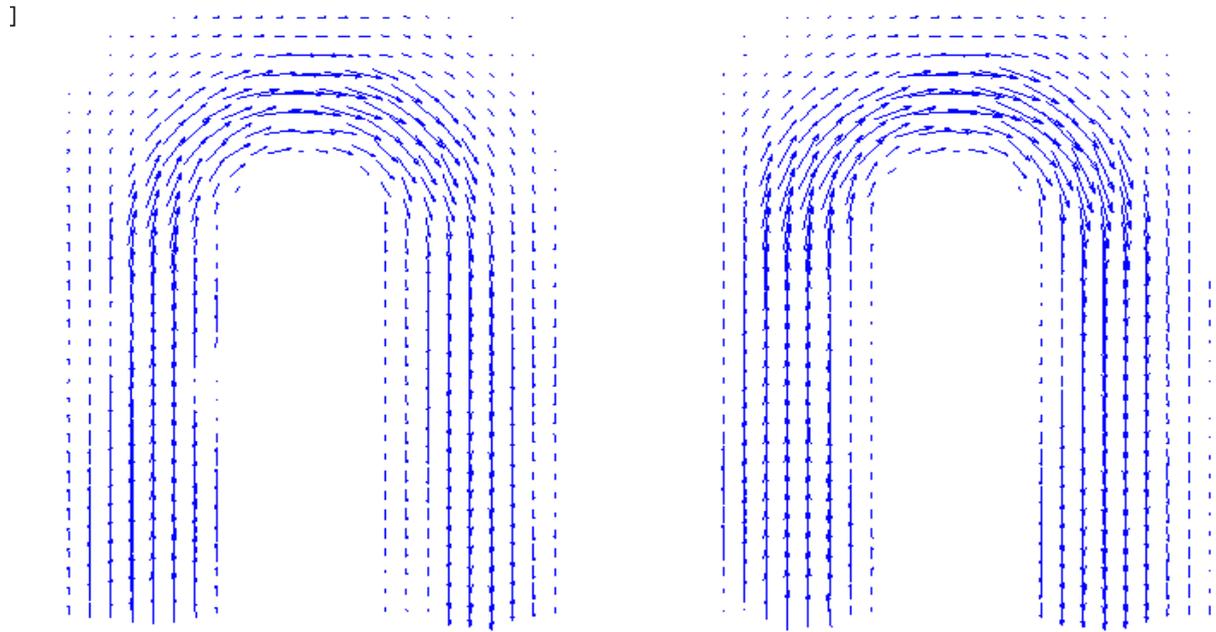


Figure 38 : Les vecteurs de vitesse de la 1^{er} zone avec $Dv = 1,05 \text{ cm}^3/\text{s}$.

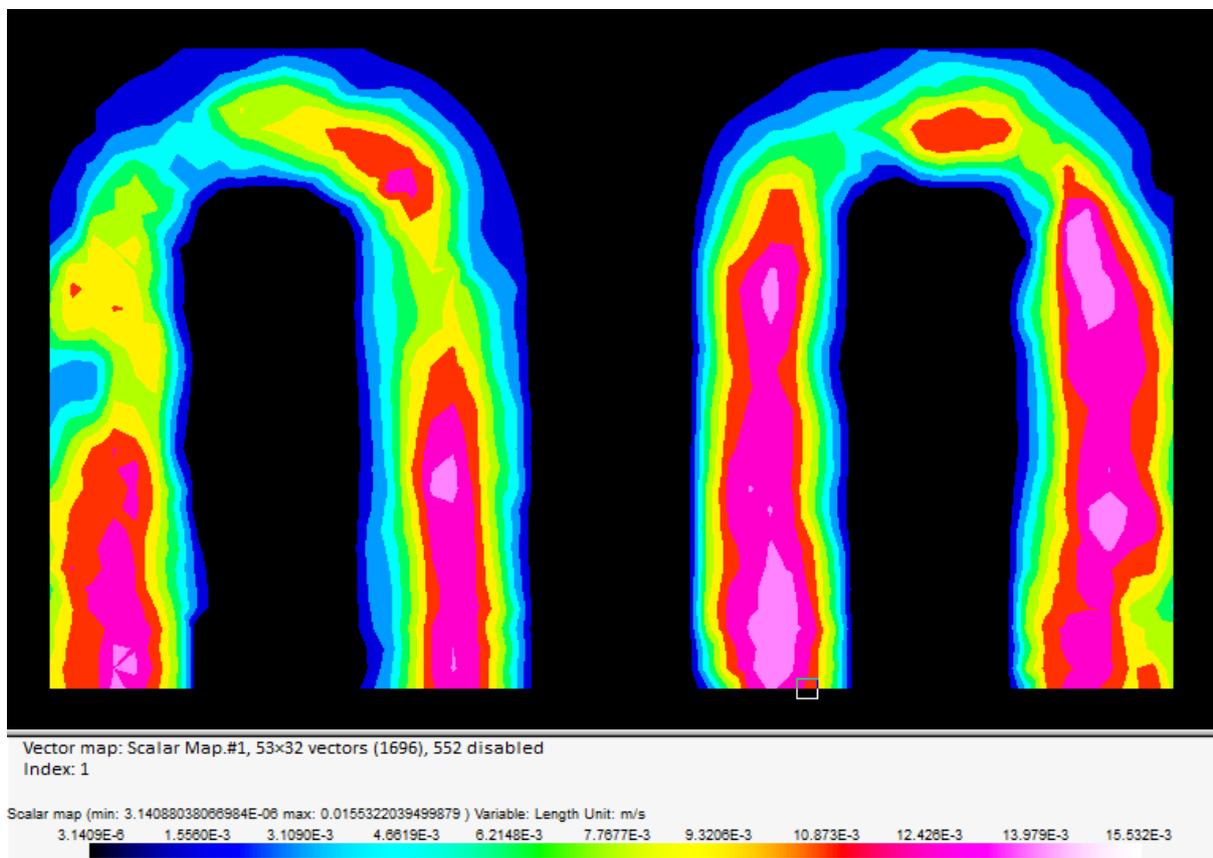


Figure 39 : Le champ de vitesse de la 1^{er} zone avec $Dv = 1,05 \text{ cm}^3/\text{s}$.

2.2 Essai 2 : 2^{ème} partie :

Les figures 40 et 41 représentent les vecteurs et les champs de vitesse de cette zone obtenue par la PIV.

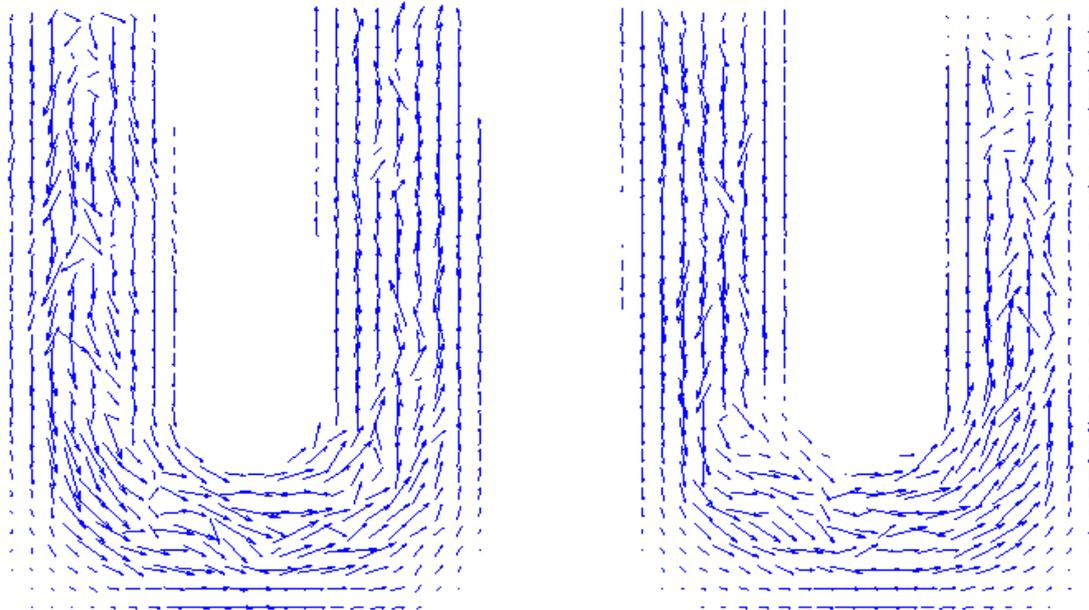


Figure 40 : Les vecteurs de vitesse de la 2^{ème} zone avec $Dv = 1,05 \text{ cm}^3/\text{s}$.

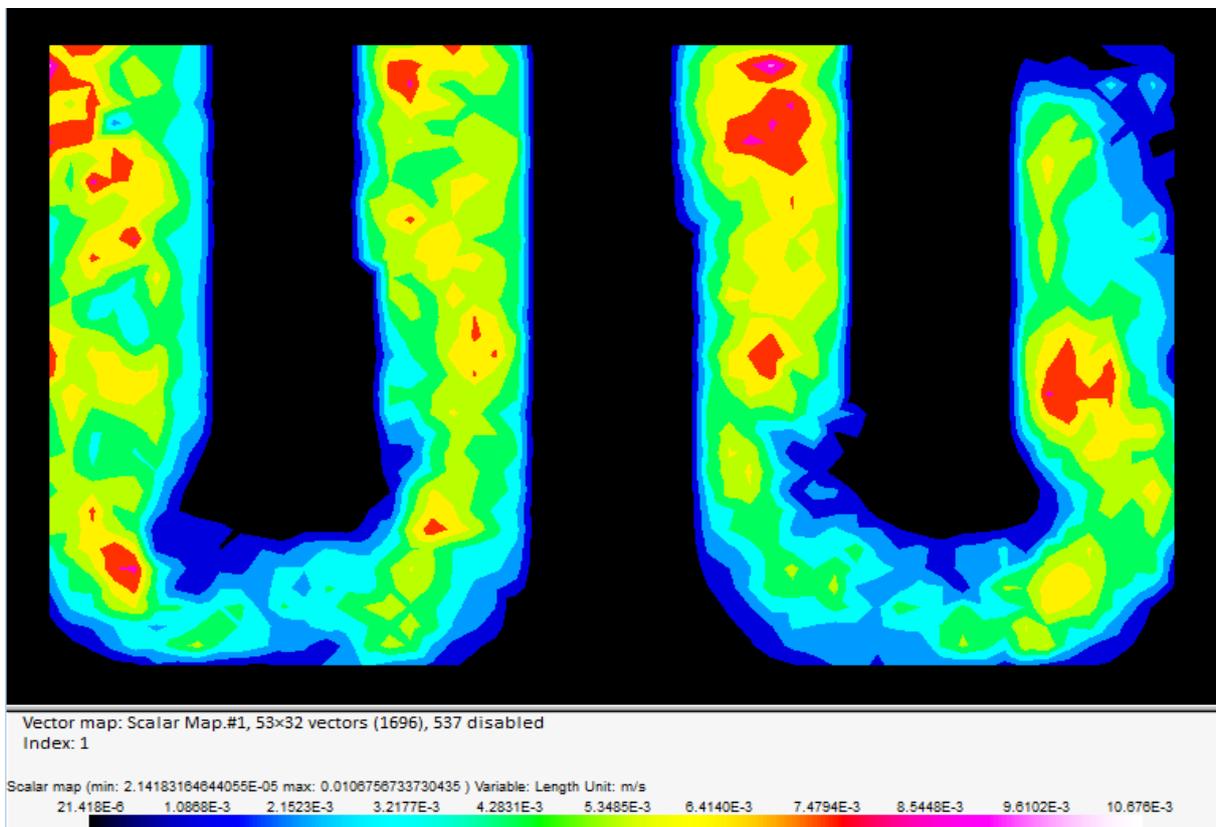


Figure 41 : Le champ de vitesse de la 2^{ème} zone avec $Dv = 1,05 \text{ cm}^3/\text{s}$.

2.3 Discussions :

- Lorsque le débit augmente, la vitesse augmente ; la vitesse maximale dans la 1^{er} zone est de l'ordre de $15,53 \cdot 10^{-3}$ m/s et la vitesse maximale des particules dans la 2^{ème} zone est de l'ordre de $10,67 \cdot 10^{-3}$ m/s.
- Ces résultats confirment la présence des zones de stagnations qu'on a déjà mentionnées, à cause de l'accumulation des particules et aussi ces résultats confirment la diminution de la vitesse au voisinage des parois, à cause de frottement entre les particules et les parois.
- Lorsque le débit augmente, la pression augmente et aussi la quantité du fluide passé par la cellule d'écoulement augmente, ce qui est montré que l'expérience se déroule en état stationnaire.

Conclusion

Ce stage a été consacré à l'étude de l'écoulement d'une particule solide (carbure de silice) dans un fluide à seuil (gel de carbopol) dans le cadre d'une approche expérimentale.

Pour le travail expérimental, nous avons formulé un fluide à seuil modèle et fabriqué un dispositif pour l'étude de l'écoulement d'une particule solide dans un fluide à seuil. Nous avons effectué les premiers essais et obtenu les premiers résultats sur l'écoulement de carbure de silice dans un gel de Carbopol avec une pression précise, puis nous avons changé la pression dans les deuxièmes essais et obtenu les deuxièmes résultats pour confirmer les premiers résultats.

Pour étudier l'écoulement de ces particules dans le fluide à seuil dans une cellule d'écoulement, nous avons utilisé la pousse seringue pour faire injecté notre fluide, deux capteurs de pression pour montrer l'état stationnaire de l'expérience, deux objectifs pour capturer les images de l'écoulement dans la cellule et pour les traités par Vélocimétrie par Image de Particules (PIV).

Nous avons dans un premier temps fabriqué notre fluide à seuil à partir du poudre de carbopol avec une concentration massique de 0,2% et neutralisé avec la soude jusqu'à $\text{pH} = 7$, puis on ajoute le carbure de silice. Pour les premiers essais on utilise l'objectif TOKKINA 100 mm et on règle la pousse seringue avec un débit volumique d'entrée $D_v = 0,35 \text{ cm}^3/\text{s}$, les résultats obtenus à l'aide de PIV montre bien que les vitesses élevées sont observées au milieu des canaux d'écoulement, des zones de stagnations dans lesquelles les vitesses sont faibles à cause d'agglomération des particules, les profils de vitesse montre que les vitesses élevés sont observés aux milieux des canaux.

Dans les deuxièmes essais on utilise l'objectif NIKKOR 50 mm avec un débit volumique d'entrée $D_v = 1,05 \text{ cm}^3/\text{s}$, les résultats obtenus confirme les premiers résultats, et on a montrés que la pression augmente avec l'augmentation de débit.

Enfin, ce stage m'a permis de découvrir en profondeur le domaine de la rhéologie que j'ai trouvé fascinants, et d'étudier les fluides à seuil et leurs propriétés rhéologique et savoir les fabriqués ainsi que leurs écoulement. A travers ce stage j'ai pu assister au bon fonctionnement du laboratoire rhéologie et procédés.

Bibliographie

- [1] *Fluidity and plasticity.*, 1922.
- [2] F. K. a. G. T. Gregor Trtnik, «Prediction of concrete strength using,» *Ultrasonics*, pp. 53-60, 2009.
- [3] I. S. a. P. J. Sereda, «Interrelation of hardness, modulus of elasticity,» *Journal of The American Ceramic Society*, vol. 51, n° 16, pp. 337-340, 1968.
- [4] W. O. P. V. a. P. B. JC Lötters, «The mechanical properties of the rubber elastic polymer polydimethylsiloxane for sensor applications,» *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 7, n° 13, p. 145, 1997.
- [5] L. M. a. G. Barbosa-Cánovas., «Rheological characterization of mayonnaise. part ii : Flow and viscoelastic properties at different oil and xanthan gum concentrations.,» *Journal of Food Engineering*, vol. 25, n° 13, pp. 409-425, 1995.
- [6] *crc handbook of chemistry and physics*, 2000-2001.
- [7] L. Bécu., «Fluides complexes sous cisaillement.,» PhD thesis,, 2005.
- [8] A. M. a. J. P. F. Pignon, «Thixotropic colloidal suspensions and flow curves with minimum : Identification of flow regimes and rheometric consequences,» *Journal of Rheology (1978-present)*, vol. 40, n° 14, p. 573–587, 1996..
- [9] *Yield stress materials in soft condensed matter.*, 2015.
- [10] P. C. a. G. Ovarlez, «Physical origin of shear-banding in jammed systems,» *The European Physical Journal E : Soft Matter and Biological Physics*, vol. 33, n° 13, p. 183–188, 2010.
- [11] S. Manneville, «Recent experimental probes of shear banding,» *Rheologica Acta*, vol. 47, n° 13, pp. 301-318, 2008.
- [12] *Rhéophysique.*, 2012.
- [13] *la rhéologie des fluides complexes*, 2001.
- [14] S. P. Roquet N, «An adaptive finite element method for Bingham fluid flows around a cylinder,» *Comput Methods Appl Mech Eng*, vol. 32, n° 132, p. 192, 2003.
- [15] J. P. M. A. Mossaz S, «Experimental study of stationary inertial flows of a yield-stress fluid around a cylinder,» *J Non-Newton Fluid Mech*, pp. 189–190:40-52, 2012.
- [16] P. C. e. C. ANCEY, «Rhéophysique des pâtes et des suspension,» *EDP Sciences*, 1999.

