

Polytech Lille

Génie mécanique

Rapport de stage**Mise en place d'un dispositif de
vélocimétrie par image de particules,
conception d'un écoulement de jet plan
et mesures expérimentales****Jhonata do Nascimento Santos**

POLYTECH Lille
Boulevard Paul Langevin – Cité
Scientifique
59655 Villeneuve d'Ascq CEDEX
Phone : 03-28-76-73-60 Fax :
03-28-76-73-61

Tuteur académique B. Achard

**Université de Lille – UML labora-
toire**
Cité Scientifique, Bâtiment M3
59655 Villeneuve d'Ascq CEDEX,
France

**Tuteur en entreprise : Enrico Calza-
varini**

MECHANICAL ENGINEERING

POLYTECH-LILLE

Certificate

Ceci est pour certifier que le rapport de stage intitulé : « Mise en place d'un dispositif de vélocimétrie par image de particules, conception d'un écoulement de jet plan et mesures expérimentales » soumis par Jhonata do Nascimento Santos dans le cadre de la validation partielle du programme de Génie Mécanique à Polytech Lille, a été réalisé sous la supervision des personnes suivantes :

- Tuteur en entreprise : Enrico Calzavarini
- Tuteur académique : B. Achard

Date : 23 juin 2025

Résumé

Ce rapport de stage porte sur la mise en place d'un dispositif de vélocimétrie par corrélation d'image (PIV) pour l'étude d'écoulements bidimensionnels. Une buse a été conçue et imprimée en 3D afin de générer un jet plan, permettant des visualisations précises des champs de vitesse.

Les mesures ont été analysées à l'aide d'un logiciel commercial, puis traitées avec un code Python, incluant le calcul de la vorticité et la génération de streamlines. L'écoulement autour d'un obstacle cylindrique a été étudié, offrant une comparaison entre expériences et théorie.

Les résultats montrent la fiabilité du dispositif et du traitement avec des codes en python, constituant une base pour des analyses plus complexes, notamment la nage des copépodes et les mesures 3D par PIV stéréoscopique.

Remerciements

Je remercie tout d'abord Dieu, qui m'a choisi pour Le servir et L'honorer. Je suis profondément reconnaissant envers ma famille qui, malgré la distance, a été essentielle pour que je puisse arriver jusqu'ici.

J'exprime ma sincère gratitude à Enrico Calzavarini : son expertise technique, ses retours pertinents et son soutien constant ont été déterminants pour la réussite de ce projet. J'ai été honoré de mener ma recherche au sein de son équipe et de bénéficier de son leadership.

Je remercie également B. Achard pour ses conseils, son encouragement et pour avoir facilité cette opportunité de stage dans le cadre du programme académique.

Ce stage a été réalisé dans le cadre de la quatrième année du programme de Génie Mécanique à Polytech Lille, et je suis reconnaissant envers le département et son administration pour m'avoir permis de vivre cette expérience académique formatrice et enrichissante.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Objectives	3
3	Travail Réalisé	4
3.1	Matériaux et Méthodes	4
3.1.1	Matériel	4
3.1.2	Paramètres du système	5
3.2	Analyse PIV avec logiciel commercial	5
3.2.1	Adaptive PIV	5
3.2.2	Champ de vitesse	6
3.2.3	Champ de vortex	7
3.3	Analyse PIV en Python	7
3.3.1	Visualisation des particules en python	7
3.3.2	Champ de vitesse en python	8
3.3.3	Champ de vortex en python	9
3.4	Conceptions	9
3.4.1	Obstacle cylindrique	9
3.4.2	Champ de vitesse d'obstacle cylindrique	12
3.4.3	Conception de la buse	13
3.4.4	Conception de la buse équipée d'une grille irrégulière	14
3.5	Théorie de jet plan	15
3.5.1	Décroissance de la vitesse axiale au centre	15
3.5.2	Conservation du flux de quantité de mouvement	16
3.5.3	Champ de vitesse avec la nouvelle buse	16
4	Travaux Futurs	18
5	Conclusion	19
	References	20

Chapitre 1

Introduction

La Vélocimétrie par corrélation d'image (PIV) est une technique optique utilisée pour mesurer les champs de vitesse des écoulements en calculant la vitesse des particules entre deux images prises par une caméra à haute fréquence.

Avec cela, il est possible d'étudier le comportement d'un écoulement, y compris son champ de vitesse, la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent) et l'interaction avec un obstacle.

Dans cette étude, la PIV sera utile pour reconnaître les mouvements de nage des copépodes, crustacés présents dans le plancton marin. Ainsi, il sera possible de comprendre leur écologie et leur comportement d'évasion.

Afin de réaliser cette technique, les étapes suivantes doivent être suivies :

1. Préparation du fluide avec des particules traceuses ;
En utilisant des particules avec la bonne densité pour bien suivre l'écoulement.
2. Éclairage du plan de mesure ; Il faut utiliser une source de lumière plane et mince (soit une LED, soit un laser) pour éclairer un plan d'écoulement à analyser
3. Acquisition d'images ;
Des caméras d'acquisition à haute fréquence (à l'échelle de ms) permettent d'enregistrer des images de l'écoulement.
4. Division en fenêtres d'interrogation (*windows interrogation*) ;
Les images sont divisées en fenêtres, et un algorithme statistique, basé sur la corrélation croisée, est appliqué pour identifier les déplacements les plus probables des particules entre deux images.
5. Corrélation croisée (cross-correlation) ;
Il s'agit d'une méthode statistique permettant de mesurer la similarité entre deux images et d'estimer les déplacements les plus probables. Ainsi, cela permet de construire les vecteurs de vitesse.
6. Post-traitement et visualisation.

À cette étape, il est possible d'appliquer des filtres afin d'éliminer les vecteurs erronés.

Alors, sachant le déplacement de la particule et le temps entre les deux images, on peut calculer la vitesse à l'aide de la formule suivante :

$$v = \frac{dx}{dt} \approx \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1.1)$$

Il faut calibrer l'image afin d'obtenir la bonne relation entre la distance des particules dans l'image et dans l'expérience.

Dans la figure 1.1, on présente le schéma du PIV avec deux images successives (frames) et en appliquant la corrélation croisée, on obtient les vecteurs, puis le champ de vitesses.

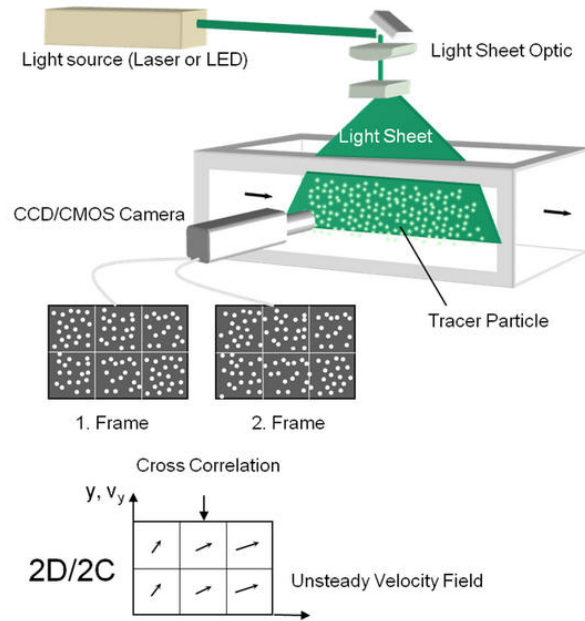


FIGURE 1.1 – Configuration d'un PVI

Le laser est plus puissant, focalisé et plus précis qu'une LED ; pour cette raison, il est utilisé avec des écoulements rapides. Toutefois, il est coûteux et dangereux pour les yeux.

D'autre part, la LED est moins chère et plus sûre. Malgré sa puissance moindre et sa lumière plus diffuse, elle est idéale pour des applications éducatives et des écoulements lents.

En ce qui concerne la corrélation croisée, celle-ci génère une matrice de corrélation, où le pic indique le déplacement le plus probable des particules dans cette fenêtre (Figure 1.2).

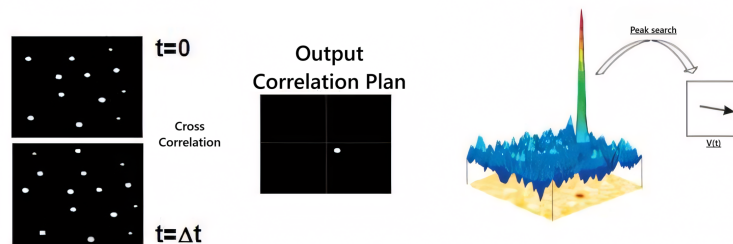


FIGURE 1.2 – Schéma du corrélation croisée

De plus, on peut utiliser deux caméras pour réaliser une analyse stéréoscopique PIV (3C-PIV), afin d'analyser l'écoulement en trois dimensions et d'améliorer la précision des résultats.

Chapitre 2

Objectives

1. Réussir à analyser l'écoulement bidimensionnel (2D) en utilisant le PIV avec un logiciel commercial ;
Le but est de comprendre les principes base du PVI du PVI à l'aide du logiciel, et aussi de réussir à obtenir les premiers analyses de champs de vitesse et vortex.
2. Réaliser l'analyse 2D avec le code python ;
Il s'agit de réaliser un analyse 2D plus avancée à l'aide d'un code Python, ce qui offre davantage de possibilités d analyse et de traitement des données.
3. Étudier l'écoulement avec un obstacle cylindrique ;
On peut comparer les résultat expérimentale avec les prédictions théoriques.
4. Conception d'une nouvelle buse de la pompe ; l'objectif est obtenir un écoulement essentiellement bidimensionnel.
5. Étudier l'écoulement tridimensionnel (3D) en utilisant deux caméras.
C'est le cas plus complète grâce à la technique de PIV stéréoscopique.
6. Analyser le nage des Copépodes Les outils et connaissances développés au cours de ces étapes seront appliqués à l'analyse de la nage des copépodes.

Chapitre 3

Travail Réalisé

3.1 Matériaux et Méthodes

3.1.1 Matériel

Cette section décrit les équipements utilisés et la procédure expérimentale mise en œuvre dans le cadre de l'étude.

Le réservoir d'eau est constitué d'un profilé d'aluminium, sur lequel sont fixés la caméra et la source lumineuse LED. La pompe est maintenue en place par une base magnétique, tandis que la buse est solidement attachée au réservoir à l'aide de fixations, assurant une connexion stable pour générer un écoulement contrôlé. Un fond noir est utilisé pour améliorer le contraste lors de la capture des images.

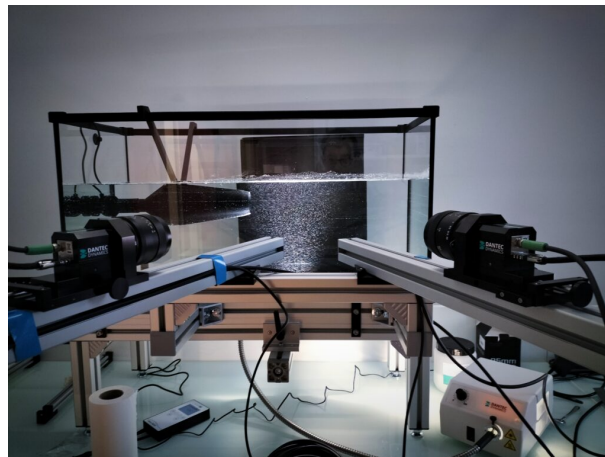


FIGURE 3.1 – Système PIV

TABLE 3.1 – Composants du système d’acquisition PIV

Composant	Modèle	Détails
Logiciel	DynamicStudio	Logiciel de traitement d’images PIV
Caméra	Flowsense USB 2M-165	160 images par seconde, résolution 1920 × 1200 pixels
Source lumineuse	LED EduPIV	Éclairage LED, Puissance de 120 W
Pompe	–	Débit réglable entre 0,2 et 0,5 L/s, Alimentation : 12 V CC
Buse	–	Diamètre de sortie : 5 cm, Plage de vitesses d’écoulement : 2–5 cm/s
Réservoir	–	Dimensions : 80 × 35 × 40 cm, Volume total : 112 L
Sphères de polyamide	PSP-50	Diametre : 50 μm , Masse : 250g

3.1.2 Paramètres du système

Le trigger rate (ou taux de déclenchement) correspond au nombre d’images capturées par seconde. Ce paramètre dépend de la vitesse de l’écoulement observé et des capacités techniques de la caméra utilisée. Dans le cadre de notre étude PIV, nous avons choisi une fréquence de 160 Hz, correspondant à la fréquence maximale disponible, afin d’assurer une résolution temporelle suffisante pour capturer précisément des particules dans l’écoulement.

La quantité de particules est essentielle en PIV, car elle influence la qualité des images et la précision du calcul du champ de vitesse. Un nombre trop faible réduit la résolution, tandis qu’un excès complique le traitement. Pour cela, nous avons choisi d’avoir au moins 5 particules par fenêtre d’interrogation, conformément à la recommandation du fabricant.

3.2 Analyse PIV avec logiciel commercial

3.2.1 Adaptive PIV

Adaptative PIV ajustera de manière itérative la taille, la forme et l’emplacement des fenêtres d’interrogation en fonction de la densité des particules et de la vitesse d’écoulement.

La base de l’algorithme de corrélation croisée repose sur l’équation suivante :

$$\phi(\delta x, \delta y) = \sum_{x,y} I_1(x, y) \times I_2(x + \delta x, y + \delta y) \quad (3.1)$$

où :

- I_1 et I_2 sont les intensités des images lors de la première et de la deuxième capture,
- $\delta x, \delta y$ sont les déplacements (en pixels) selon l’horizontale et la verticale,

Ce calcul est fait dans chaque fenêtre d’interrogation. Ainsi, le pic de la fonction φ indique le déplacement le plus probable du groupe de particules dans cette région.

Le fonctionnement de l’algorithme peut ainsi être résumé de la manière suivante :

1. Pour chaque région de l’image, on évalue s’il y a suffisamment de particules et des variations rapides de vitesse.

2. En fonction de cela, on ajuste la taille, la forme ou l'orientation de la fenêtre d'analyse.
3. On calcule la corrélation croisée pour obtenir le déplacement.
4. L'opération est répétée sur toute l'image, produisant une carte de vitesse plus précise.

Dans la Figure 3.2, nous avons défini la distance entre les centres des *windows interrogation* dans le champ d'analyse, le maximum et le minimum de taille de la fenêtre d'interrogation.

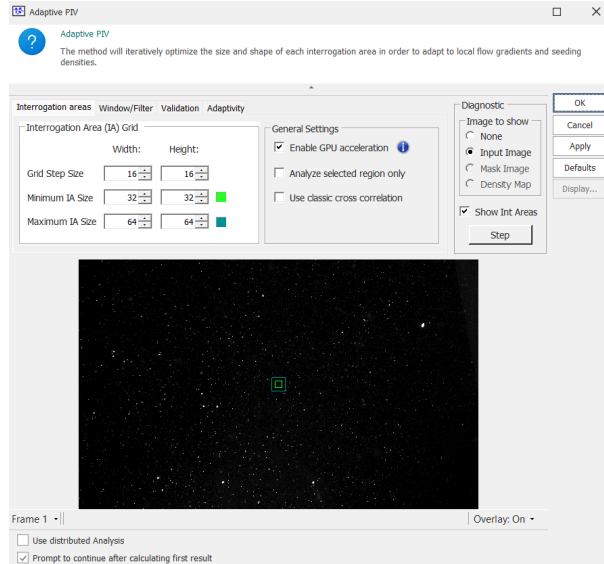


FIGURE 3.2 – Paramètre adaptative PIV

3.2.2 Champ de vitesse

La magnitude de la vitesse a été calculée à partir des composantes horizontales (U_x) et verticales (U_y) à partir de la corrélation croisée :

$$\|U\| = \sqrt{U_x^2 + U_y^2} \quad (3.2)$$

Ainsi, nous avons obtenu les graphiques de champ de vitesse pour chaque image originale avec le logiciel Dantec Dynamics :

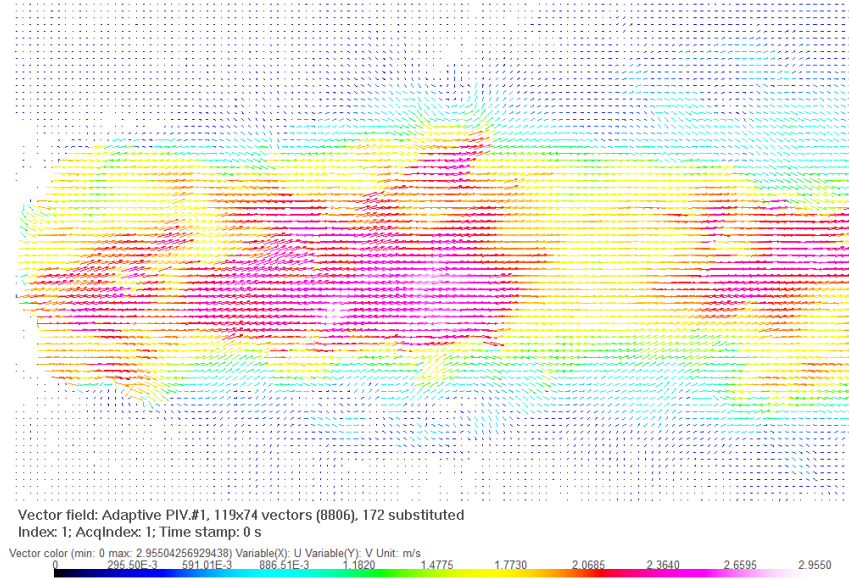


FIGURE 3.3 – Champ de vitesse logiciel

3.2.3 Champ de vortex

Le vortex quantifie la rotation locale du fluide. Il peut être calculé à partir des dérivées partielles des composantes de la vitesse.

$$w_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3.3)$$

Les régions en bleu et en rouge correspondent aux vortex, la différence entre elles réside dans le sens de rotation.

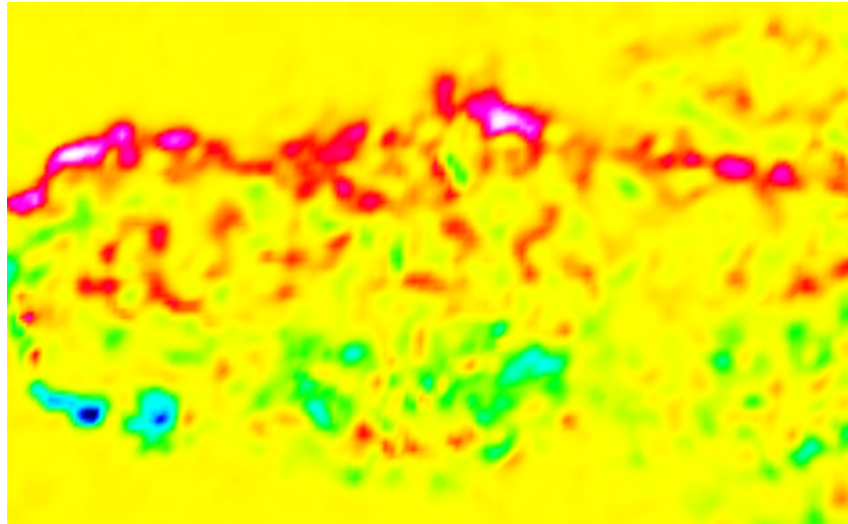


FIGURE 3.4 – Les vortex

3.3 Analyse PIV en Python

3.3.1 Visualisation des particules en python

Nous avons exporté les données au format raw, puis la première étape a été de manipuler ces fichiers pour bien visualiser les particules. Nous avons éliminé le bruit (les

valeurs inférieures à 6) et appliqué une échelle logarithmique afin de mieux visualiser les valeurs faibles.

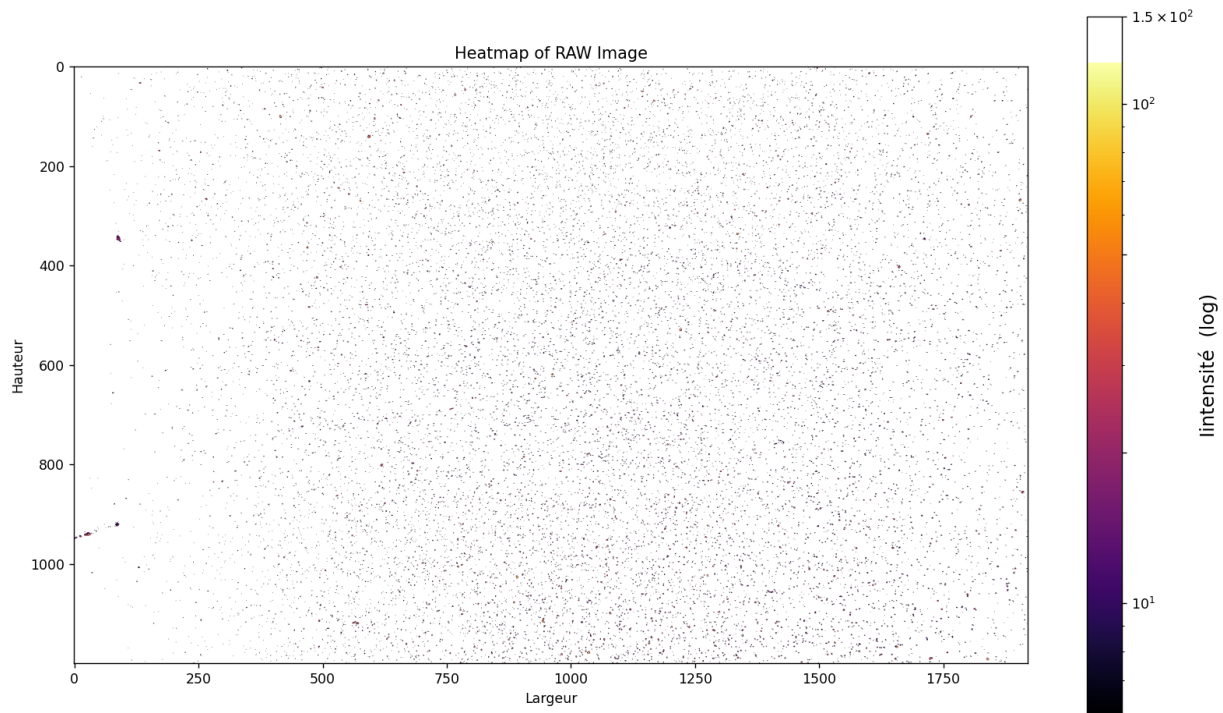


FIGURE 3.5 – Visualisation des particules

3.3.2 Champ de vitesse en python

Dans cette étape, nous avons opté pour l'exportation des composantes de vitesse (U_x et U_y) directement depuis le logiciel, où la corrélation croisée a été préalablement effectuée avec rigueur. Le champ de vitesse ainsi obtenu a ensuite été traité et visualisé à l'aide de scripts Python :

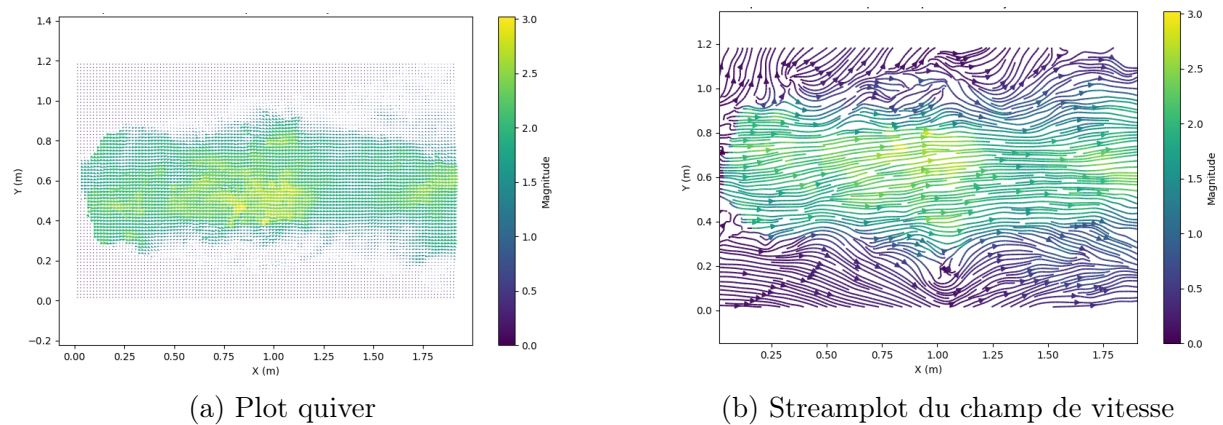


FIGURE 3.6 – Le champ de vitesse

Ainsi, il est possible de visualiser la direction de l'écoulement ainsi que son intensité dans différentes régions du domaine.

On constate également une bonne concordance avec la Figure 3.3, ce qui nous permet de poursuivre les analyses.

3.3.3 Champ de vortex en python

Les données issues de la PIV ont été traitées sous Python à l'aide d'une grille régulière de 800×800 points. Une interpolation cubique a été appliquée afin de lisser les champs vectoriels et d'en améliorer la représentation.

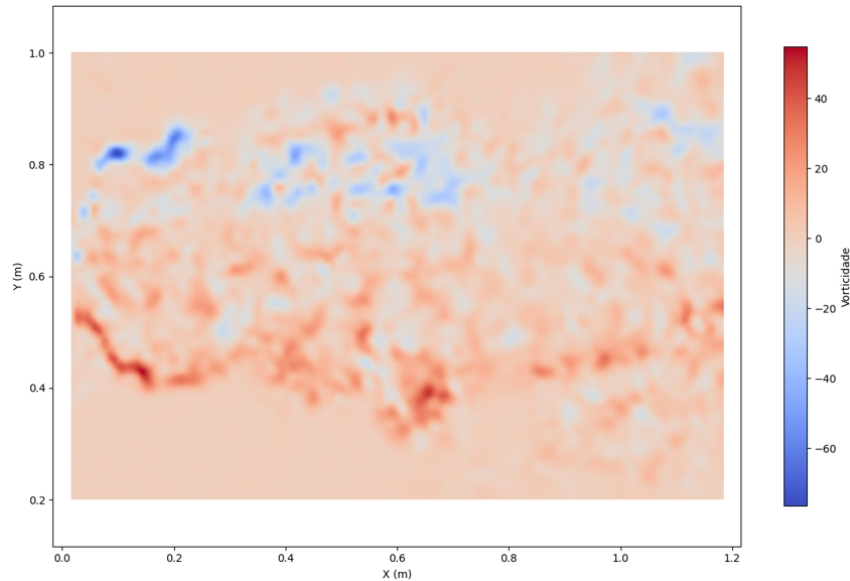


FIGURE 3.7 – Champ de vortex interpolé

Comme prévu, le résultat est analogue à celui présenté par le logiciel. Cependant, cela permet de modifier la visualisation du graphique de vorticité selon les besoins et d'utiliser les résultats pour d'autres analyses.

3.4 Conceptions

3.4.1 Obstacle cylindrique

Nous avons introduit un obstacle cylindrique afin de visualiser le phénomène du K rm n vortex street, c'est-à-dire une alternance périodique de tourbillons qui se forment en aval du cylindre dans un écoulement.

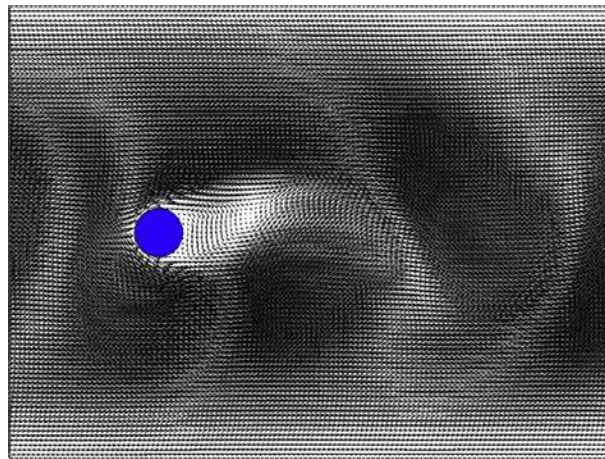


FIGURE 3.8 – Le K rm n vortex street

Des études montrent que de nombreux animaux marins profitent de l'instabilité naturelle de l'écoulement pour améliorer leur propulsion et leurs mouvements.

Le nombre de Strouhal (St) est un nombre sans dimension qui décrit les écoulements avec des vortex oscillants :

$$S_t = \frac{f \cdot D}{V} \quad (3.4)$$

où

- f est la fréquence de création des vortex,
- D est la taille de l'objet qui crée les vortex,
- V est la vitesse de l'écoulement.

Pour un cylindre dans un écoulement, le nombre de Strouhal est souvent proche de 0,2 lorsque le nombre de Reynolds varie entre 40 et 100 000. Cela signifie que les vortex se détachent régulièrement, formant la célèbre Le Kármán vortex street.

Le nombre de Reynolds (Re) est défini par :

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (3.5)$$

où

- V est la vitesse du fluide,
- D est la dimension caractéristique (diamètre du cylindre),
- ν la viscosité cinématique du fluide.

L'étude du Kármán vortex street aide à comprendre comment le copépode interagit avec le fluide pendant la nage, notamment comment il génère sa propulsion, son efficacité, et le type d'écoulement autour de lui.

Les copépodes peuvent ainsi utiliser l'énergie des vortex pour améliorer leur nage.

La force de traînée est donnée par :

$$F_D = C_D \rho \frac{U^2 A}{2} \quad (3.6)$$

où

- F_D est la force de traînée totale,
- ρ est la masse volumique du fluide,
- U est la vitesse du fluide avant le cylindre,
- A est la surface de référence,
- C_D est le coefficient de traînée.

Enfin, la contrainte de cisaillement près de la surface est donnée par :

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3.7)$$

où μ est la viscosité dynamique, u la vitesse du fluide et y la direction perpendiculaire à la surface.

Pour cela, nous avons modélisé le cylindre ainsi que sa fixation :

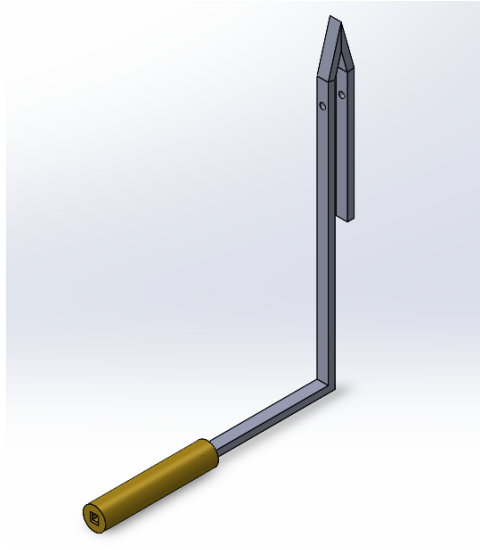


FIGURE 3.9 – Modèle de l'obstacle cylindrique

Ensuite, on peut voir la configuration avec le réservoir, où le cylindre doit être centré par rapport à la buse et permettre un réglage en hauteur.

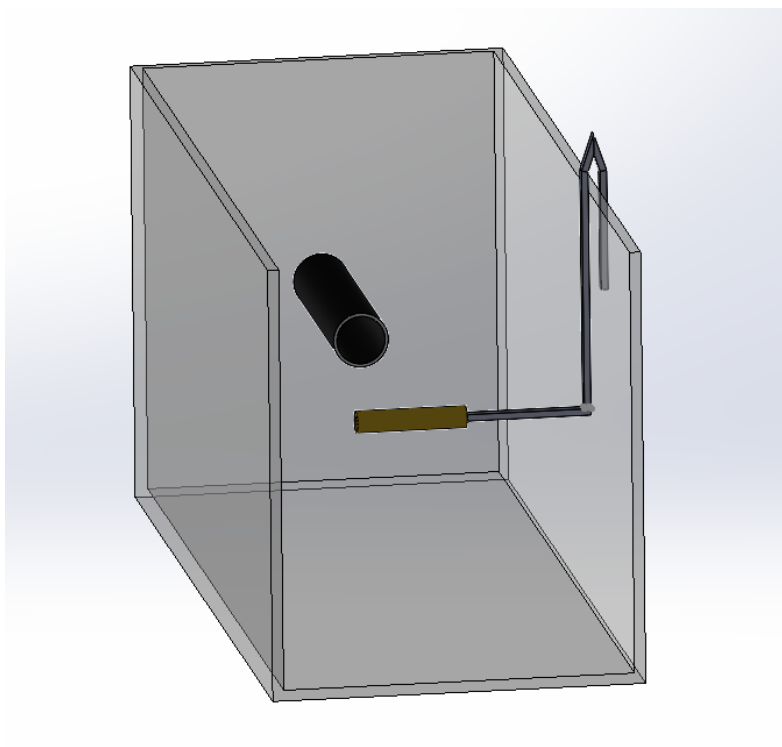
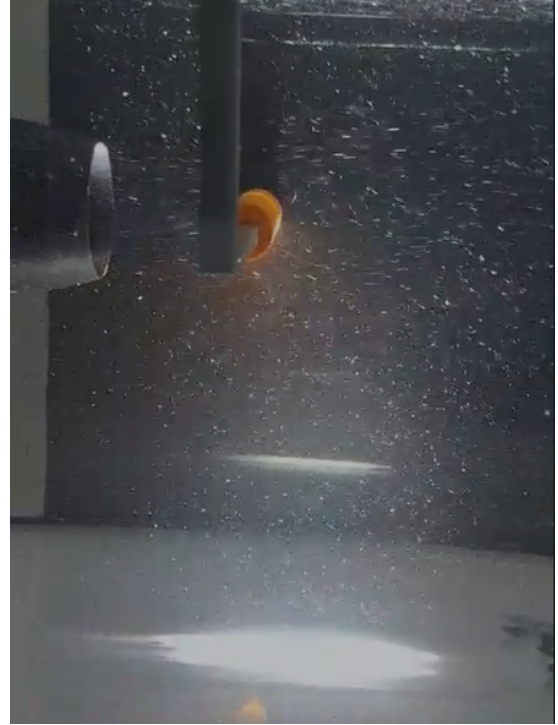


FIGURE 3.10 – l'obstacle cylindrique dans le réservoir

Enfin, après avoir réalisé la fabrication 3D des pièces, nous procédons au montage réel :



On observe également sur le modèle réel la perturbation de l'écoulement en aval du cylindre, ce qui constitue ainsi un indicateur du succès du modèle réalisé.

3.4.2 Champ de vitesse d'obstacle cylindrique

Le champ de vitesse autour de l'obstacle cylindrique, présenté à la figure 3.12, a été analysé. De manière générale, les résultats sont cohérents avec la théorie relative au phénomène.

Cependant, une perturbation est observée dans la région supérieure du cylindre, principalement due à la réflexion de la lumière sur l'objet. De plus, en aval du cylindre, la taille des vecteurs masque certaines informations importantes, ce qui compromet une visualisation claire de le Kármán vortex street.

Par conséquent, il serait pertinent, dans les analyses futures, de réduire la taille de la fenêtre d'interrogation ainsi que le recouvrement (overlap) afin d'obtenir des résultats plus précis et une meilleure résolution du champ de vitesses.

En complément, la peinture de l'objet cylindrique et l'utilisation d'un filtre sur les résultats pourraient atténuer les problèmes liés aux réflexions lumineuses.

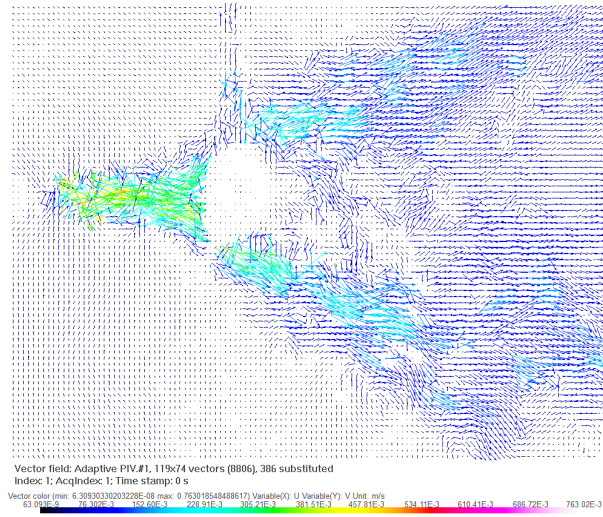


FIGURE 3.12 – Champ de vitesse autour de l'obstacle cylindrique

3.4.3 Conception de la buse

L'objectif est de réaliser un modèle produisant un écoulement plan (2D). Ainsi, une buse rectangulaire a été choisie au lieu d'une buse circulaire comme dans le modèle original. Par souci de simplicité et d'économie de ressources, le même système de fixation qu'auparavant a été utilisé.

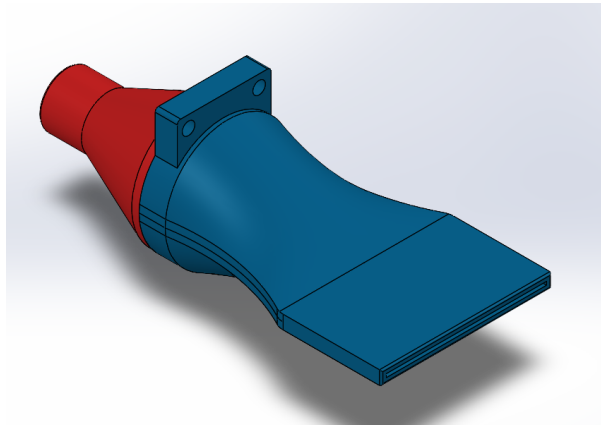


FIGURE 3.13 – Pompe

De plus, une grille a été utilisée afin de perturber l'écoulement, créant ainsi des conditions d'instabilité favorables à la formation de structures de vortex :

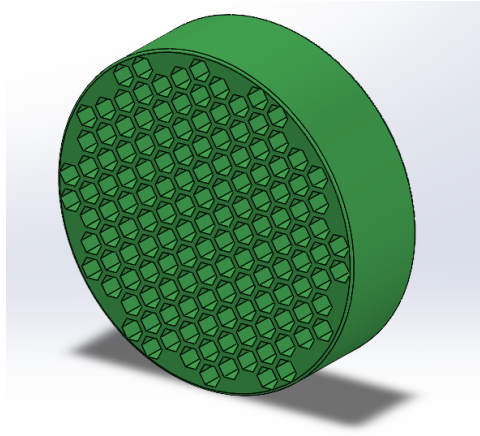


FIGURE 3.14 – Grille

Ensuite, on peut observer le montage de la grille avec les autres composants :

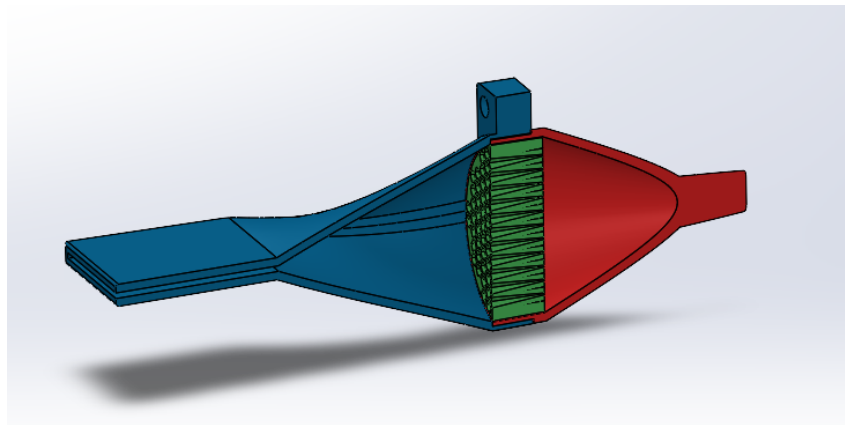


FIGURE 3.15 – Grille

3.4.4 Conception de la buse équipée d'une grille irrégulière

Afin d'intensifier la perturbation de l'écoulement et d'analyser par la suite le comportement de nage des copépodes, ce nouveau modèle a été conçu.

Cependant, de nouvelles analyses du champ de vitesse seront nécessaires pour valider le modèle ou envisager d'éventuelles améliorations futures.

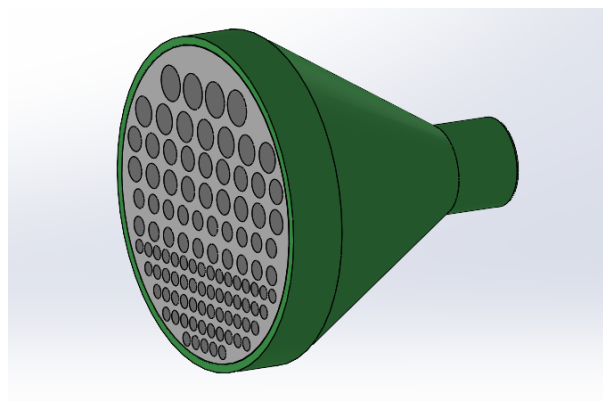


FIGURE 3.16 – La buse équipée d'une grille irrégulière

3.5 Théorie de jet plan

Selon la théorie, le plan de jet représente un jet qui émerge d'un orifice étroit et qui s'élargit progressivement avec la distance, adoptant une forme conique. Au cours de ce processus, il génère un mélange et de la turbulence en interagissant avec l'eau au repos dans le réservoir.

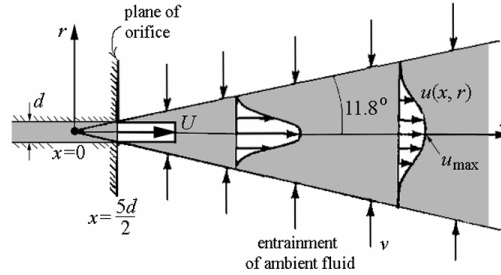


FIGURE 3.17 – Configuration d'un jet plan

La propagation du jet, la décroissance de la vitesse maximale sur l'axe, ainsi que le taux d'entraînement du fluide environnant obéissent à des lois bien établies et universelles. Le profil de vitesse transversal présente une distribution de type gaussien.

1. Profil de vitesse (distribution selon y) Dans un jet turbulent, la vitesse moyenne sur une section perpendiculaire à l'axe du jet suit une courbe gaussienne centrée sur l'axe, caractérisée par une décroissance symétrique de l'amplitude selon la distance radiale.

$$U(y, x) = U_{\max}(x) \cdot e^{-\left(\frac{y}{b(x)}\right)^2} \quad (3.8)$$

Où :

- $U(y, x)$ est la vitesse en un point y de la section en x ,
- $U_{\max}(x)$ est la vitesse maximale au centre du jet,
- $b(x)$ est la largeur caractéristique du jet (augmente avec x).

Le jet s'étend latéralement de manière linéaire avec la distance :

$$b(x) = k \cdot (x - x_0)$$

où :

- k est la constante d'expansion (typiquement autour de 0,1 pour les jets axisymétriques),
- x_0 est la source virtuelle, un point imaginaire d'où le jet "semble" avoir commencé.

3.5.1 Décroissance de la vitesse axiale au centre

La vitesse au centre du jet diminue avec la distance par rapport à la sortie :

$$U_{\max}(x) \propto \frac{1}{x - x_0}$$

Autrement dit, plus on s'éloigne de l'origine, plus le jet est lent en son centre — conséquence de la dilution avec le fluide environnant.

3.5.2 Conservation du flux de quantité de mouvement

Bien que la vitesse diminue, le flux de quantité de mouvement linéaire se conserve dans un jet libre :

$$\int_{-\infty}^{\infty} \rho U^2(y, x) dy = \text{constant}$$

Ceci est l'un des principes fondamentaux régissant le comportement des jets turbulents.

3.5.3 Champ de vitesse avec la nouvelle buse

On observe, dans la figure 3.18, un profil de vitesse mieux défini et de plus grande magnitude par rapport au projet initial, en raison de la réduction de la section de sortie.

De plus, le profil observé correspond à celui décrit précédemment, confirmant la validité du modèle gaussien appliqué aux jets turbulents.

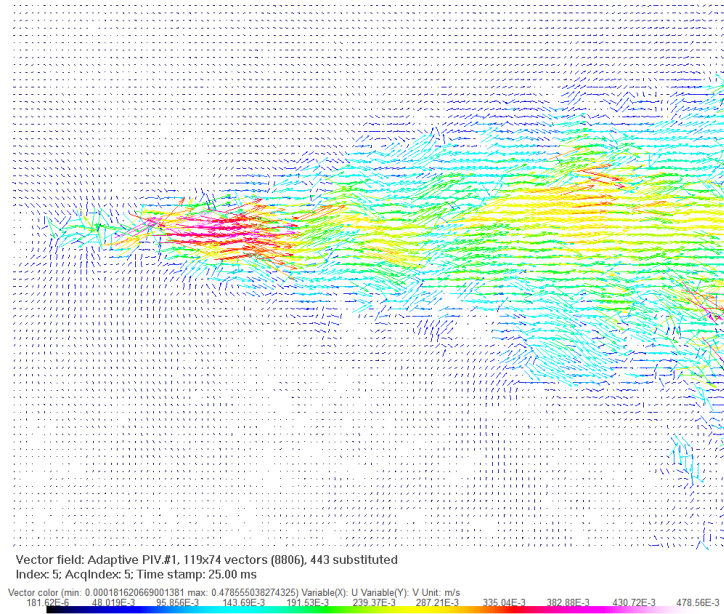


FIGURE 3.18 – Champ de vitesse avec la nouvelle buse

Enfin, l'angle d'ouverture du jet est également cohérent avec celui observé sur la figure 3.17, ce qui indique que la conception de la nouvelle buse a atteint son objectif.

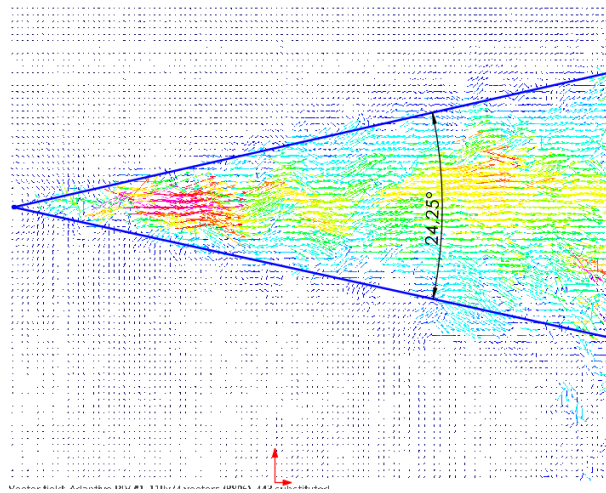


FIGURE 3.19 – Angle d'ouverture du jet plan réel

Chapitre 4

Travaux Futurs

Pour étudier la nage du copépode, une analyse des trois composantes de vitesse est nécessaire. Par conséquent, une seconde caméra pourrait être ajoutée pour capter la composante hors plan et réaliser une analyse stéréoscopique. Cette méthode utilise deux caméras placées sous différents angles pour mesurer les trois composantes du champ de vitesse dans un même plan, offrant ainsi une vision plus complète et précise de l'écoulement.

En complément, une stratégie simple et efficace a été adoptée avec l'utilisation du langage Python afin d'élargir les possibilités d'analyse. Toutefois, la majorité des données a été exportée depuis le logiciel et était, dans l'ensemble, déjà traitée. À l'avenir, il serait possible de programmer l'ensemble des étapes du traitement PIV, en incluant : le pré-traitement (traitement des images obtenues par les caméras), le traitement (application de la corrélation croisée) et le post-traitement (analyse des champs de vitesses et des vortex).

Enfin, des analyses CFD pourraient également être intégrées afin de compléter l'étude expérimentale et de mieux comprendre le comportement de l'écoulement dans différentes conditions.

Chapitre 5

Conclusion

Grâce aux ressources et aux outils disponibles, plusieurs analyses ont pu être menées avec succès, comme présenté tout au long de ce travail. De plus, la conception d'une buse spécialement pensée pour générer un jet plan a été réalisée avec succès.

Au cours de ce projet, des connaissances solides ont été acquises et approfondies, en particulier sur la technique de PIV, le comportement des écoulements ainsi que sur le procédé de fabrication additive (impression 3D).

Bien que certaines étapes nécessitent encore des améliorations et un approfondissement, les résultats obtenus jusqu'à présent sont très encourageants et témoignent d'un fort potentiel pour les travaux futurs.

Bibliographie

- [1] Raffel, M., Willert, C. E., Scarano, F., Kähler, C. J., Wereley, S. T., & Kompenhans, J. *Particle Image Velocimetry : A Practical Guide*. Third Edition, Springer, 2018.
- [2] Rajaratnam, N. *Turbulent Jets*. Elsevier Scientific Publishing Company, Developments in Water Science, Vol. 5, Amsterdam, 1976.
- [3] Souza, Tiago da Silva. *Génération de tourbillons de von Kármán par modélisation en CFD*. Mémoire de Master en Génie Hydraulique, École Polytechnique de l'Université de São Paulo, dirigé par le Prof. Dr. Podalyro Amaral de Souza, São Paulo, 2016.