



HAL
open science

PTV-4D de l'écoulement de microparticules plastique modèles dans une bifurcation

Okba Mostefaoui, Diego Lopez, Emmanuel Mignot, Valérie Massardier-Nageotte

► **To cite this version:**

Okba Mostefaoui, Diego Lopez, Emmanuel Mignot, Valérie Massardier-Nageotte. PTV-4D de l'écoulement de microparticules plastique modèles dans une bifurcation. Congrès Francophone de Techniques Laser, Sep 2022, Louvain, Belgique. hal-04027794

HAL Id: hal-04027794

<https://hal.science/hal-04027794>

Submitted on 14 Mar 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

PTV-4D DE L'ÉCOULEMENT DE MICROPARTICULES PLASTIQUE DANS UNE BIFURCATION

Okba Mostefaoui^{a,b*}, Diego Lopez^a, Emmanuel Mignot^a, Valérie Massardier-Nageotte^b

(a) Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, Ecole Centrale de Lyon, Univ Claude Bernard Lyon 1, LMFA, UMR5509, 69621, Villeurbanne France.

(b) Univ Lyon, CNRS, Univ Claude Bernard Lyon 1, INSA Lyon, Univ Jean Monnet, UMR 5223, Ingénierie des Matériaux Polymères, F-69621 Villeurbanne, Cédex, France

*Correspondant : okba.mostefaoui@insa-lyon.fr

1 Introduction

Au sein du contexte mondial de production plastique toujours plus grandissante, la pollution engendrée par cette industrie génère un risque écologique élevé pour la faune, la flore et la chaîne trophique des milieux océaniques et des cours d'eau. Les zones urbaines sont la principale source de génération de ces particules [1] et [2]. En effet, elles sont issues de la fragmentation des macro-plastiques exposées aux conditions environnementales (UV, abrasion mécanique, etc.). [3] Mais aussi de conditions de dégradation anthropique telles que les dépôts de gommages des pneus sur la route, ou les microfibrilles issues du lavage de textile synthétique, etc.). Tous ces déchets microscopiques sont alors transportés par les eaux pluviales et usées et collectées dans les égouts et autres hydrosystèmes urbains. Une partie de ces microplastiques (MPs) n'est pas captée par les stations d'épuration et finit leurs courses directement dans les mers et les océans. Au cours des quinze dernières années, la présence de macro et microplastiques a ainsi été mise en évidence dans les écosystèmes continentaux [4] : eaux terrestres (ruisseaux, rivières, lacs, eaux souterraines), air et sols (agricoles, urbains et industriels).

Une étude en vue de caractériser le transport de ces microplastiques au sein des hydrosystèmes urbains doit être entreprise. Plus en détail, le comportement de ces particules par rapport à l'écoulement auquel elles sont confrontées, mais aussi en fonction leurs paramètres matériaux et géométriques (taille, densité, etc.). Dans cette étude, un protocole de fabrication de microparticules plastiques modèles dopées au fluorophore (Rhodamine B) par émulsion avec surfactants a été mis en place. Ces particules ont étéensemencées au sein d'un écoulement modèle de bifurcation (Figure 4) pour développer une méthode de caractérisation du transport de ces derniers en utilisant la métrologie de PTV-4D. Cette métrologie est capable de mesurer l'écoulement en trois dimensions et de suivre nos microparticules modèles.

2 Microparticules Modèles Fluorescentes

En vue de caractériser le transport des MPs au sein de notre écoulement modèle, le besoin de concevoir des particules modèles, représentatives des déchets que nous pouvons retrouver au sein des hydrosystèmes urbains est essentiel. De plus, le suivi de particules dans un environnement expérimental non contrôlé et la présence de poussières et de parasites posent plusieurs difficultés optiques (masquage, suivi de ces parasites, etc.). Une solution pour isoler nos particules optiquement et pour palier au problème de suivi non désiré est de doper nos microparticules modèles d'un colorant fluorescent réagissant à l'illumination choisie.

2.1 Fabrication

Les microparticules modèles ont été fabriquées au laboratoire Ingénierie des Matériaux Polymères (IMP, UMR5223) sur le site de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, en adaptant des protocoles tels que ceux décrits par [5] et [6]. Ce protocole permet d'introduire dans la phase solide (ici un polymère) des marqueurs de différents types. Dans notre cas, il s'agit d'un colorant fluorescent adapté à la longueur d'onde de notre laser (532nm) : la Rhodamine B (RhB). Le polymère choisi est le Polyméthacrylate de méthyle (PMMA) de masse volumique $\rho_{PMMA} = 1.18 \text{ kg/m}^3$. La première solution, notée S1, est composée de 200mL d'eau (H₂O) à laquelle plusieurs surfactants sont ajoutés dans le but d'empêcher la coalescence : 1g de sodium dodecyl sulfate (SDS) et 0.5g d'alcool polyvinylique (PVA). Pour la seconde solution, S2, 5g de PMMA et 50mg de RhB sont dissous dans 50g de chloroforme (ClCH₃), un solvant chloré hautement non-miscible avec l'eau. La solution S1 est ensuite déposée en goutte-à-goutte sous agitation au sein d'un mélangeur à haute vitesse réglable Rayneri (type Turbotest) dans la solution S2. Le ClCH₃ étant très volatile, la simple agitation de ce mélange pendant 2 à 3 heures suffit à faire évacuer le solvant, laissant seulement des sphères de PMMA dopées en RhB au sein de la solution S1.

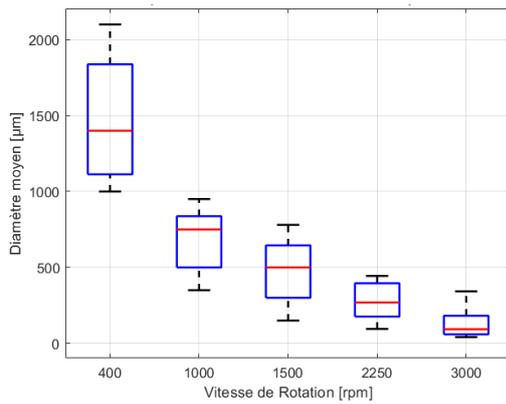


Figure 1 : Dispersion des diamètres des microparticules en fonction de la vitesse de rotation de l'agitateur.

2.2 Caractérisation

Le choix de la vitesse d'agitation de notre mélange permet d'ajuster la taille des microparticules de polymère dopé. Une granulométrie des particules fabriquées a donc été effectuée en utilisant une analyse comparative entre un granulomètre laser (Malvern Mastersizer 2000), et un microscope optique couplé à un logiciel de traitement d'image. Nous pouvons observer sur la Figure 1, la dispersion des diamètres des MPs sur l'axe des ordonnées pour des vitesses de rotation allant de 400 à 3000 tours/min sur l'axe des abscisses. Les particules ont aussi été photographiées au microscope à fluorescence comme montré sur la Figure 2.

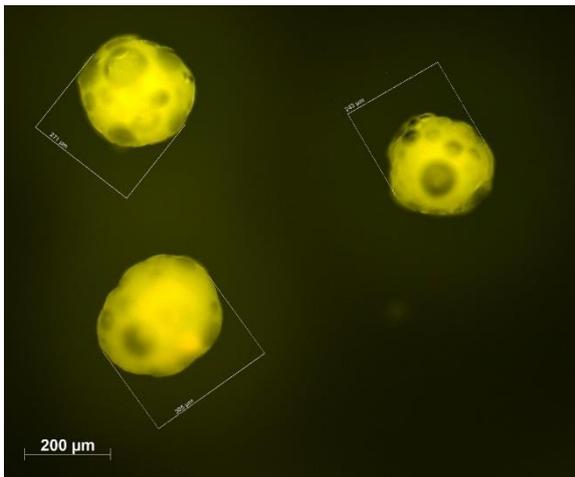


Figure 2 : Microparticules modèles dopées à la RhB observées au microscope à fluorescence

On peut mettre en évidence que les particules présentent des alvéoles issues de l'introduction d'air au cours de l'agitation, ce qui modifie la masse volumique des particules. Cette masse volumique est mesurée au sein d'un pycnomètre à hélium (Micromeritics AccuPyc II 1345), la masse volumique

trouvée pour des particules de diamètre $d_m = 300 \pm 100 \mu\text{m}$ est de $\rho_{MP} = 1.1 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$, soit plus faible que celle du PMMA utilisé ($\rho_{PMMA} = 1.18 \text{ kg/m}^3$). Les spectres d'émission (de fluorescence) de nos particules pour une excitation à 532nm, longueur d'onde d'émission du laser utilisé pour la vélocimétrie laser, ont été mesurés grâce à un Spectrofluorimètre (Jasco FP-8350). Ces spectres sont représentés sur la Figure 3, on peut lire sur l'axe des abscisses la longueur d'onde (en nm) et sur l'axe des ordonnées l'intensité relative d'émission (en %), avec en bleu la fluorescence de la Rhodamine B pur et en rouge celles de nos MPs. On peut observer un écart de 28 nm entre les maximums d'émission de la RhB et de nos particules. Ce résultat était attendu, il s'explique notamment par l'hydrophilie de surface de notre polymère [7].

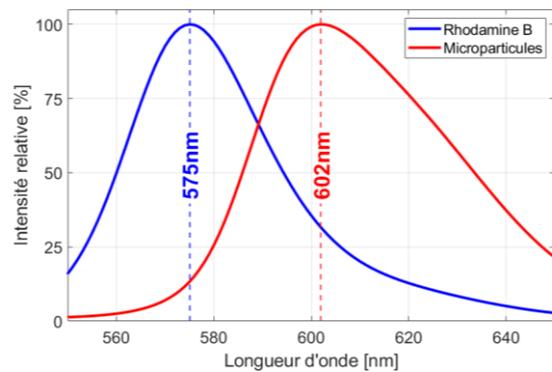


Figure 3 : Spectre d'émission de la Rhodamine B et des microparticules pour une excitation à 532nm

3 Métrologie de l'Écoulement

La dissémination de nos particules a été effectuée au sein d'un écoulement modèle, une bifurcation à surface libre à angle droit. Cet écoulement a pour avantage d'être facile à réaliser, connu, et comprend certains aspects clés des écoulements des hydrosystèmes urbains : décollements, surface libre, séparation de débits liquides et solides. De plus ce dernier présente également une zone de recirculation (ZdR) matérialisée en rouge sur la Figure 4. Cette ZdR possède deux formes distinctes décrites par [8], qui nous permettra de comparer les caractéristiques du transport des MPs clés telles que le piégeage, le temps de résidence, la remise en circulation dans la hauteur d'eau, ainsi que leurs éventuelles agrégations au sein de ces 2 formes d'écoulement. La méthode de Particle Tracking Velocimetry (PTV) 4D, comme son nom l'indique, permet un suivi individuel de particules ensemencées au sein d'un écoulement. Elle a été utilisée dans notre cas sur un banc expérimental présentant un écoulement en bifurcation. Cette métrologie a donc été utilisée avec les particules

introduit en Partie 2, présentant un diamètre moyen de $d = 100\mu\text{m}$ et une masse volumique de $\rho_{MP} = 1.1 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$. Nous pouvons donc considérer ces particules comme traceurs de notre écoulement dans un premier temps.

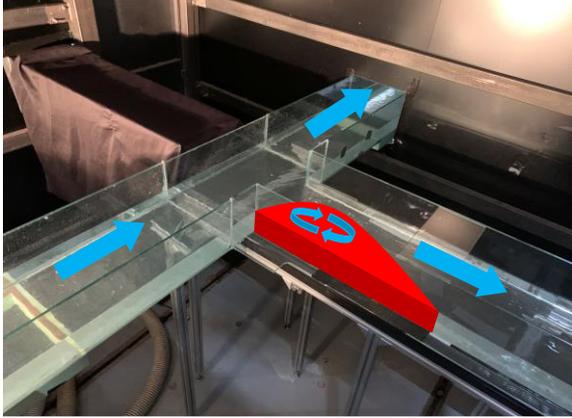


Figure 4 : Banc expérimental de l'écoulement en bifurcation avec la zone de recirculation matérialisée en rouge.

3.1 Dispositif Expérimental

Le banc expérimental de la Figure 4, se situe au Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA, UMR 5509) sur le site de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Il est composé d'un carrefour de quatre canaux en verre maintenu à l'horizontale de longueur $L = 2\text{m}$ de section rectangulaire de $B = 0.3\text{m}$ de large. Ce dispositif est très modulable et a été placé en configuration bifurcation pour cette étude. L'expérimentation est réalisée en circuit fermé, chaque canal étant relié à un bac de rétention. Le débit entrant est réglable grâce à une vanne et un débitmètre (Promag 50 de Endress Hauser, $\Delta Q_v = \pm 0.05 \text{ L/s}$), pour cette étude nous avons sélectionné un débit $Q_v = 11.5 \text{ L/s}$, permettant d'atteindre des vitesses allant jusqu'à $V_{ma} = 0.5 \text{ m/s}$ au sein des zones les plus rapides de l'écoulement. La hauteur d'eau de toutes les branches est contrôlée par deux seuils situés à l'aval des deux branches (hauteur de seuil C_a et C_l respectivement pour les branches aval et latérale). La hauteur d'eau a été établie dans l'intersection à $h = 10\text{cm}$, mesurée grâce à un limnimètre numérique. Une description plus détaillée de ce banc expérimental est donnée dans [9] ou [10].

3.2 Illumination et Acquisition

L'illumination sera effectuée grâce à un laser pulse Nd:Yag à double cavité de longueur, S/N : LM 2025, de longueur d'onde 532nm et de puissance $2 * 200\text{mJ}$, dont le faisceau, provenant par le côté de la branche aval, est éclaté en volume en plaçant en série deux lentilles cylindriques de longueur focale différente.

L'acquisition et le traitement des images sont effectués grâce à Davis10®. Le champ est visualisé par le dessous du canal, par un bloc de 4 caméras 10bits conçu par LaVision®, le MiniShaker TR®, de résolutions maximum $1984 * 1264$ pixels et de fréquence d'acquisition maximum 1000fps (accessible pour les plus faibles résolutions spatiales). Des objectifs de distance focale égale à 8mm ont été montés sur le MiniShaker TR, ils permettent alors la visualisation d'un champ total de dimensions $50 * 31 * 20\text{cm}^3$. Des filtres passe-bandes de coupe : $605 \pm 15\text{nm}$, adaptées à la longueur d'onde d'émission maximum des MPs, comme montré Figure 3, ont été ajoutés au montage sur les objectifs. Ces filtres nous permettront de suivre uniquement les MPs et d'éviter la diffusion du laser au sein de notre champ de vision.

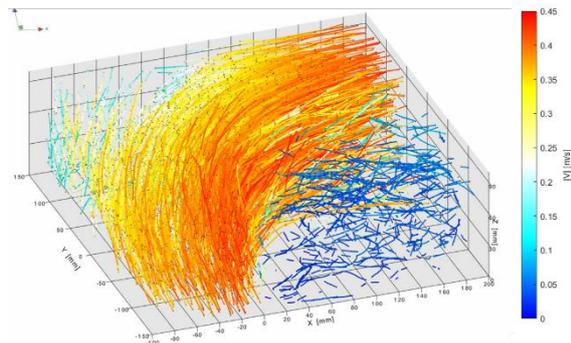


Figure 5 : Représentation des trajectoires des particules et de leurs normes de vitesse, proche du coin amont situé en $(x ; y) = (0 ; -150) \text{ cm}^2$ à un instant donné.

3.3 Obtention des Champs de Vitesse

La métrologie de vélocimétrie PTV permet donc contrairement à la PIV, une approche lagrangienne d'analyse d'écoulement. Pour obtenir ce champ Lagrangien, nous utiliserons l'algorithme prédictif Shake-the-box® (STB) présent au sein du logiciel Davis10® développé par LaVision®, on peut observer une représentation des trajectoires à un instant donné, du volume entier proche du coin amont, coloré par la norme de vitesse des particules sur la Figure 5.

L'application de cette métrologie a été effectuée le long de la branche latérale de notre bifurcation. La longueur de notre zone d'étude étant supérieure à 52cm (dimension maximale du champ de vision de nos caméras), il a été nécessaire de découper la zone en plusieurs champs adjacents se recouvrant sur quelques centimètres, en prenant bien soin de repositionner la mire de calibration 3D ainsi que le bloc de caméras correctement le long du canal. Une calibration séparée a donc été effectuée pour chaque tronçon de canal. Une fois la totalité des champs lagrangiens obtenus après application de l'algorithme STB sur des milliers d'images, permettant alors de

couvrir tout le volume d'eau occupé. Une concaténation de toutes ces trajectoires a été réalisée, comme montré dans la Figure 6. Le passage du champ Lagrangien total à l'Eulérien est permis en appliquant un algorithme dit de "binning" (présent sur Davis10[®]), permettant de moyenniser à travers une grille rectangulaire régulière, les composantes de vitesse à partir des trajectoires instantanées des particules suivies. Nous obtenons donc un champ Eulérien de vitesse 3D-3C moyenné au cours du temps, comme illustré sur la Figure 7. Il est représenté des vues de coupes de l'écoulement eulérien montrant le champ de vitesse vectoriel ainsi que la vitesse longitudinale V_x couplés à l'isosurface 3D de vitesse $V_x = 0$ représenté en vert.

3.4 Validation des écoulements par PIV

Les écoulements Eulérien obtenus par PTV-4D de nos écoulements avec nos microparticules fluorescentes ont besoin d'être vérifié pour s'assurer de la véracité des champs obtenus avec cette dernière. Nous avons donc décidé d'appliquer la métrologie de *Particle Image Velocimetry* (PIV) au sein de notre banc expérimental. Les particules utilisées pour l'ensemencement, sont des particules de Polyamid (PSP de Dantec[®]) de 50 μ m de diamètre, classiquement utilisé au sein de notre laboratoire. Les mêmes équipements ont été utilisé pour l'acquisition et l'illumination. Le champ de vitesse a été mesuré pour 4 altitudes différentes au sein de la hauteur d'eau $z/h = [0.05, 0.25, 0.50, 0.75]$. On peut observer sur la Figure 8, représentant le même écoulement décrit depuis le début, une comparaison entre les lignes de courant ainsi que le champ de vitesse projetés sur le plan situé à $z/h=0.75$ pour la métrologie PIV (Fig 8.a) et PTV (Fig 8.b). Les lignes de courants rouges représentant les lignes issues du coin amont. On observe une forte similitude entre ces deux représentations du même écoulement. Des traitements supplémentaires seront nécessaires pour faire correspondre les champs à toutes les hauteurs d'eau., néanmoins, ces résultats permettent de valider la métrologie PTV mise en place.

4 Conclusion

Le protocole de création de microparticules modèles fluorescentes établi Partie 2.1 est fonctionnel, il permet de doper des particules avec un fluorophore ainsi que de contrôler leur taille. Dans le but de modéliser des microplastiques présent au sein des réseaux d'assainissement, de densités significativement plus petites et plus grandes que celle de l'eau, ainsi que de formes très variées (fibres, plaques, fragments quelconques, ...) [11], une amélioration du protocole établi reste à être mise en place.

La métrologie de caractérisation d'un écoulement Eulérien 3D-3C grand champs utilisant la de petits champs Lagrangien 4D-3C obtenus par PTV-4D de nos microparticules fluorescentes, décrite Partie 3, est fonctionnelle. Nous avons pu valider les champs obtenus par cette méthode avec ceux obtenus par PIV-2D classique couplé à des particules d'ensemencement classique. Cette métrologie nous permettra d'étudier le transport des microplastiques ainsi que toutes les caractéristiques clés de ces dernières au sein de plusieurs écoulements de typologie différentes.

5 Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce au soutien financier du LabEx iMUST de l'Université de Lyon (ANR-10-LABX-0064), créé dans le cadre du Programme d'Investissements d'Avenir mis en place par l'État et géré par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), du financement d'une bourse de stage par l'EUR H2O/Lyon (ANR-17-EURE-0018), ainsi que de l'accompagnement de l'INSA Lyon dans le cadre de la bourse de thèse MESR de l'« enjeu Environnement INSA Lyon » d'Okba Mostefaoui.

6 Références

- [1] R. Dris, J. Gasperi, V. Rocher, M. Saad, N. Renault, et B. Tassin, Microplastic contamination in an urban area: a case study in Greater Paris, *Environ. Chem.* 12(5) 592-599, 2015.
- [2] J.N. Hitchcock, Storm events as key moments of microplastic contamination in aquatic ecosystems, *Sci. Total. Environ.* 734-139436, 2020.
- [3] Y.K. Song, S.H. Hong, M. Jang, G.M Han, S.W. Jung, and W.J. Shim, Combined Effects of UV Exposure Duration and Mechanical Abrasion on Microplastic Fragmentation by Polymer Type Young, *Environ. Sci. Technol.* 2017, 51, 8, 4368-4376
- [4] J.L. Conkle, C.D. Báez Del Valle, et J.W. Turner, Are We Underestimating Microplastic Contamination in Aquatic Environments?, *Environ. Manage.* 61, 1-8, 2018.
- [5] D. Cassano, R. La Spina, J. Ponti, I. Bianchi, et D. Gilliland, Inorganic Species-Doped Polypropylene Nanoparticles for Multifunctional Detection, *ACS Appl. Nano Mater.*, vol. 4, no 2, p. 1551-1557, 2021.
- [6] F. Bezati, D. Froelich, V. Massardier, E. Maris, Addition of tracers into the polypropylene in view of automatic sorting of plastic wastes using X-ray fluorescence spectrometry. *Waste. Manage.* 30, 591-596, 2010.
- [7] G. Emi-Cassola, M. I. Gibson, R. C. Thompson, et J. A. Christie-Oleza, Lost, but Found with Nile Red: A Novel Method for Detecting and Quantifying Small Microplastics (1 mm to 20 μ m) in Environmental Samples, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 51, no 23, p. 13641-13648, 2017.
- [8] A. Momplot, G. Lipeme Kouyi, E. Mignot, N. Rivière, J.-L. Bertrand-Krajewski, Typology of the flow structures in dividing open channel flows, *J. Hydraul. Res.*, vol. 55, no 1, p. 63-71, 2017.

[9] N. Rivière, R. J. Perkins, B. Chocat, et A. Lecus, Flooding flows in city crossroads: experiments and 1-D modelling, *Water. Sci. Technol.*, vol. 54, no 6-7, p. 75-82, 2006.

[10] E. Mignot, N. Rivière, R. Perkins, et A. Paquier, Flow Patterns in a Four-Branch Junction with Supercritical Flow, *J. Hydraul. Eng.*, vol. 134, no 6, p. 701-713, 2008.

[11] Y. Cao, Q. Wang, Y. Ruan, R. Wu, L. Chen, K. Zhang, P.K.S. Lam, Intra-day microplastic variations in wastewater: A case study of a sewage treatment plant in Hong Kong, *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 160, p. 111535, 2020.

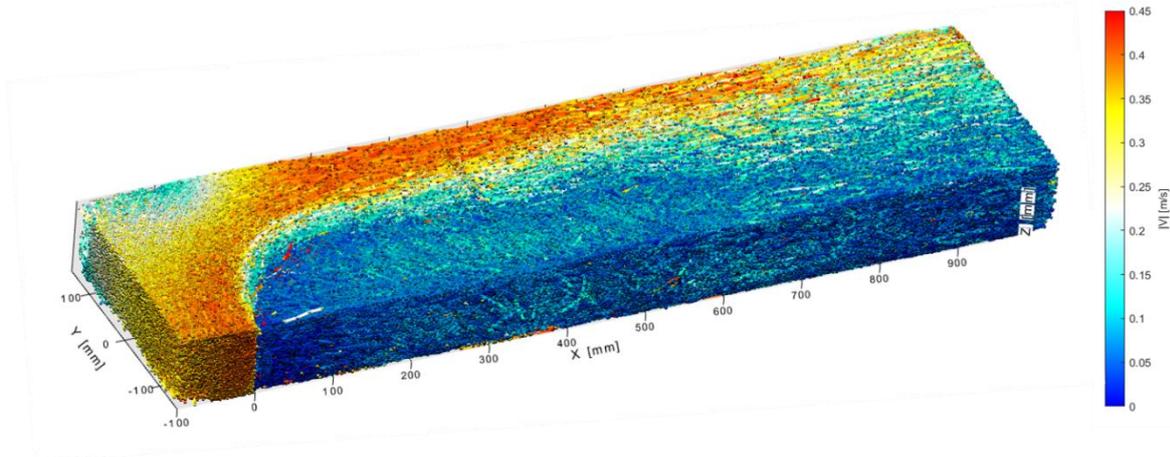


Figure 6 : Représentation de l'ensembles des trajectoires des particules et de leurs normes de vitesse, sur toute la longueur du canal mesuré pour toute la durée d'acquisition

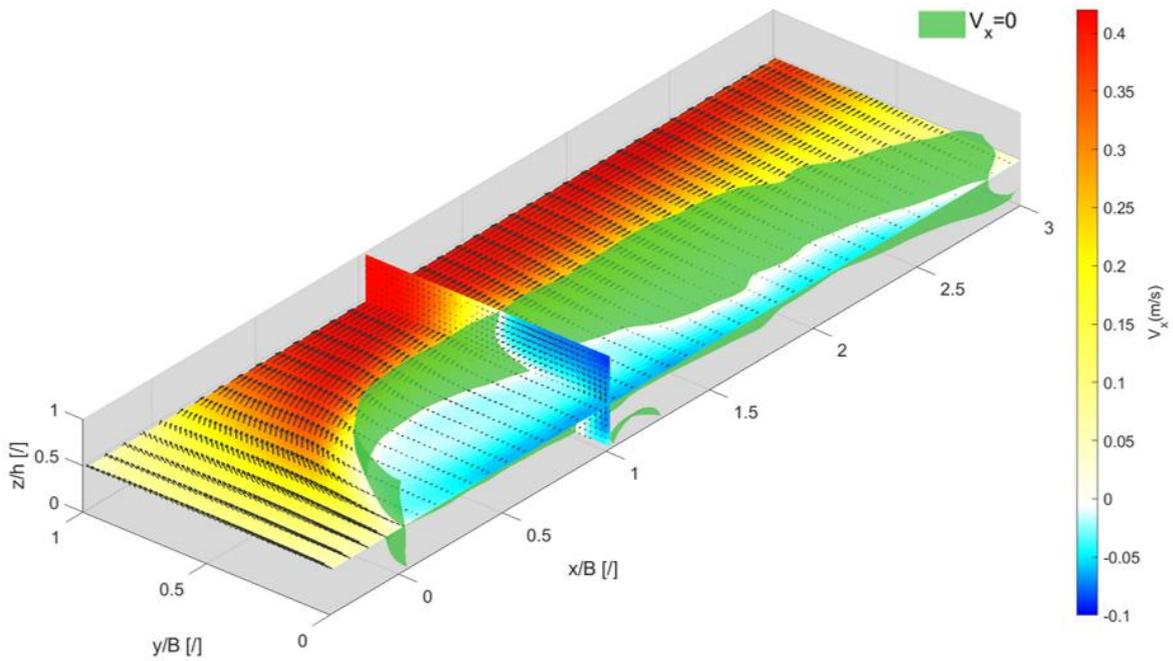


Figure 7 : Représentation de la vitesse longitudinale V_x , sur toute la longueur du canal mesuré

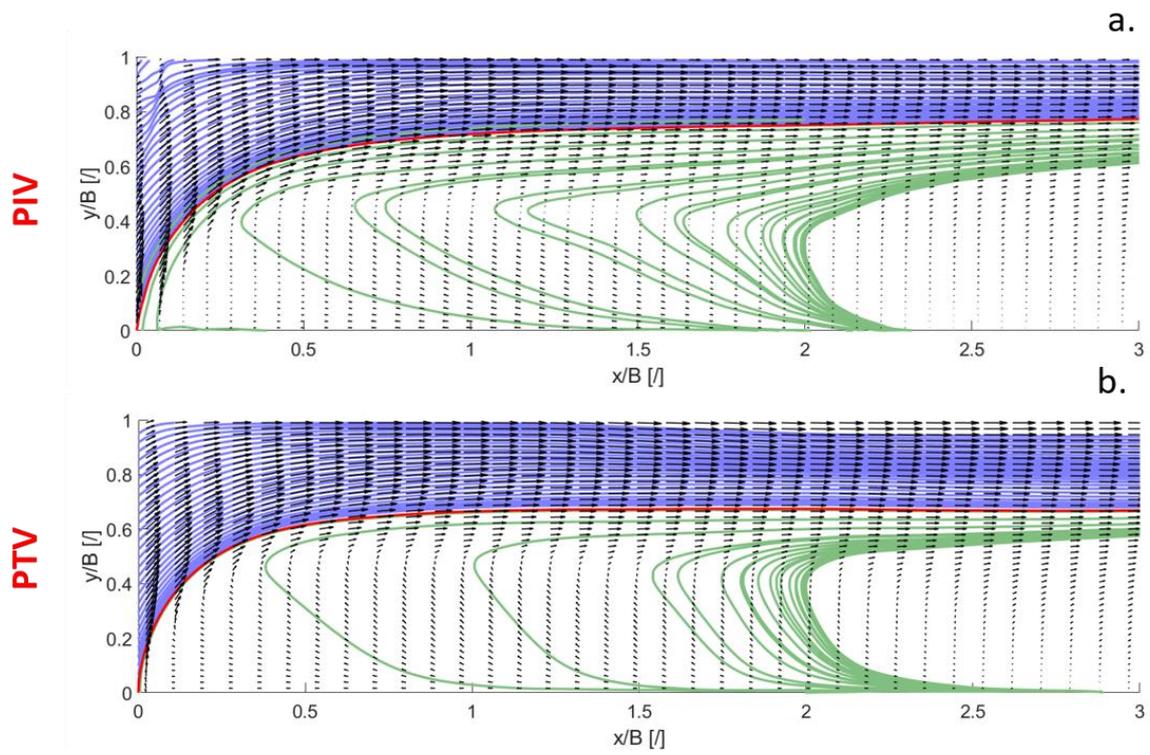


Figure 8 : Comparaison des champs de vitesse et des lignes de courant 2D-2C projetés sur le plan XY à $z/h=0.75$.