

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

NOTE TECHNIQUE

Titre	<i>Titre</i>					
Rédacteur(s) /Contributeur(s) technique	SOMMACAL Mathis					
Validation direction Validation scientifique	<i>NOM prénom</i>	Validation projet Conformité aux besoins	<i>NOM Prénom</i>			
Partenaires	N° contrat					
Destinataire(s)	<i>Direction1 : NOM Prénom, ... Direction2 : NOM Prénom, ... Organisation : NOM Prénom ...</i>					
Copie(s)						
Pièce(s) jointe(s)						

Mots-clés	
------------------	--

Résumé

Résumé GAEL (uniquement texte)

Texte enrichi

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes



Année Universitaire 2024/2025

Rapport de stage :

Ingénieur recherche en Intelligence artificielle
Application de l'apprentissage profond et de l'intelligence artificielle pour la caractérisation des écoulements dans le cadre du projet européen ERC Karst



Par : Mathis SOMMACAL
Stage réalisé du 03/02/2025 au 18/07/2025

Encadrant universitaire : Dr Julien EYNARD
Encadrants de stage : Dr Eric KOHLER et Dr Matthieu CORDIER

Etablissement d'accueil : IFP Energies nouvelles (IFPEN), 1-4 Av. du Bois Préau, 92852 Rueil-Malmaison

Etablissement universitaire : Université de Perpignan Via Domitia (UPVD), 52 Av. Paul Alduy, 66100 Perpignan

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui m'ont accompagné et soutenu tout au long de ce stage.

Je remercie tout particulièrement le Dr Eric Kohler et le Dr Matthieu Cordier, mes encadrants de stage, pour leur disponibilité, leurs conseils avisés et la confiance qu'ils m'ont accordée. Leur accompagnement tout au long de ce travail a été essentiel, tant sur le plan scientifique qu'humain, et m'a permis de progresser dans un environnement stimulant et bienveillant.

Je souhaite également remercier le Dr Julien Eynard, mon encadrant universitaire.

Mes remerciements s'adressent aussi à l'ensemble du corps enseignant du Master EEA parcours (I3A), de l'Université de Perpignan. Grâce à la qualité des enseignements reçus et à l'exigence pédagogique de cette formation, j'ai pu aborder ce stage dans les meilleures conditions possibles, avec les outils nécessaires pour m'investir pleinement.

J'espère que ce rapport, tout comme le travail accompli durant ce stage, saura témoigner de ma sincérité, de ma reconnaissance et du profond respect que je porte à chacune des personnes mentionnées ici.

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

Table des matières

INTRODUCTION	8
CHEAPITRE 1 : PRESENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEIL	9
CHEAPITRE 2 : PRESENTATION DU PROJET ERC KARST	12
CHEAPITRE 3 CARACTERISER LES ECOULEMENTS KARSTIQUES A IFPEN.....	15
 1.1 DISPOSITIF EXPERIMENTAL :	15
 1.2 LE TRAITEMENT D'IMAGE :	16
 1.3 INTERPRETER UN CHAMP DE VITESSE	17
CHEAPITRE 4 : RENFORCER LES CAPACITES D'ANALYSE DE PIV.....	19
 2.1 COMPARAISON D'OUTILS D'ANALYSE SUR IMAGES EXPERIMENTALES	20
2.1.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS	20
2.1.2 OUTILS UTILISES	20
2.1.3 METHODES	23
2.1.4 RESULTATS.....	24
2.1.5 CONCLUSION ET DISCUSSION SUR LES TESTS DE COMPARAISON SUR LES JEUX DE DONNEES DN50	29
 2.2 DEVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'ANALYSE PIV.....	30
2.2.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS	30
2.2.2 OUTILS UTILISES ET DEVELOPPEMENT	30
2.2.3 CONCLUSION SUR OPENPIVGUI R108.....	33
 2.3 INTEGRATION DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DANS LA CARACTERISATION DES ECOULEMENTS	35
2.3.1 CONTEXTE ET OBJECTIF.....	35
2.3.2 OUTILS UTILISES	35
2.3.3 COMPARAISON VISUELLE RESOLUTION SPATIALE DE LA CORRELATION CROISEE ET DE L'IA.....	38
2.3.4 COMPARAISON SUR IMAGE SYNTHETIQUE TEST 1 ECOULEMENT LAMINAIRE	40
2.3.5 COMPARAISON SUR IMAGE SYNTHETIQUE TEST 2 ECOULEMENT VORTEX RANKINE AVEC VARIATION DE PARAMETRES.....	43
2.3.6 CONCLUSION SUR L'INTEGRATION DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE	47
 2.4 DEVELOPPEMENT DE L'ANALYSEUR D'ENSEMENCEMENT	48
5 CONCLUSION GENERALE	50
6 BIBLIOGRAPHIE.....	51
 6.1 DEVELOPPEMENT DE SOLUTIONS LOGICIELLES.....	51
6.1.1 ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET OUTILS DE PIV.....	51
6.1.2 DEVELOPPEMENT OPENPIVGUI.....	52
6.1.3 SEEDING ANALYZER	52
6.1.4 COMPARAISON D'OUTILS SUR IMAGES SIMULEES	53
6.1.5 AUTRES	54

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

7 ANNEXES	55
7.1 RESULTATS DE LA DEUXIEME PHASE DE COMPARAISON TABLEAUX	55
7.2 CAPTURES D'ECRAN DES FONCTIONNALITES DE L'ANALYSEUR D'ENSEMENCEMENT	63
8 RESUME	67

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

Figure 1 Domaines d'activités IFPEN	9
Figure 2 Sites IFPEN	10
Figure 3 Organigramme du département R10	11
Figure 4 Intérieur d'un aquifère Karstique	12
Figure 5 Légende de la Figure 6, les roches les plus sensibles à la dissolution sont colorées en fonction de leur nature (en bleu les calcaires, en rose et jaune des formations salines)	12
Figure 6 Localisation potentielle de karst en Europe	13
Figure 7 Etapes du projet Karst	14
Figure 8 Photo d'une expérience de PIV sur le banc Karst	15
Figure 9 Paire d'image PIV et fenêtres d'interrogation	16
Figure 10 Tracé en 3D du résultat de la corrélation croisée entre la fenêtre 1 et chaque position de l'image 2	17
Figure 11 Tracé des vecteurs du champs de vitesse estimé et de la carte de vitesse en arrière-plan	18
Figure 12 Modèle 3D de Karst	19
Figure 13 Image code OpenPIV	20
Figure 14 Image PIVLAB	21
Figure 15 Image Davis	22
Figure 16 Logos PIVLAB, OpenPIV et LaVision	22
Figure 17 Image du jeu de donnée DN50	23
Figure 18 Distribution des vitesses test 1	24
Figure 19 Distribution des vitesses test 2	25
Figure 20 Cartes de vitesse test 2	26
Figure 21 Cross plot u et v PIVLAB et OPENPIV test 2	26
Figure 22 Distribution des vitesses test 3	27
Figure 23 Cartes de vitesse test 3	27
Figure 24 Distribution des vitesses test 4	28
Figure 25 Carte de vitesse Davis test 1 et test 4	29
Figure 26 OpenPIVGUI avec un tracé du profil de vitesse moyen	31
Figure 27 Fenêtre velocity validation de openpivgui	31
Figure 28 Fenêtre carte spatio-temporelle des gradients	32
Figure 29 Fenêtre d'analyse avancée des écoulements, tracé de la vorticité sur un écoulement laminaire	32
Figure 30 Analyse DMD sur un jeu d'image PIV avec l'outil d'analyse développé	33
Figure 31 Workflow PIV après déploiement de OpenPIVGUI R108	34
Figure 32 Résultat SSIM et MAE sur différentes images, source skimage.metrics	38
Figure 33 Schéma des allées de Von Karman	38
Figure 34 Paire d'images analysée pour la comparaison visuelle Davis (corrélation croisée) vs RAFTPIV (IA)	39
Figure 35 Comparaison champs de vitesse Davis 16x16 (Corrélation croisée) et RAFT32-PIV (IA)	39
Figure 36 Différence images 1 et 2, test 1 simulation	40
Figure 37 Tableau de métriques 1 test 1 simulation	41
Figure 38 Tableau de métriques 2 test 1 simulation	42
Figure 39 Tableau de métrique 3 test 1 simulation	42
Figure 40 Quiver plot de l'analyse d'une paire d'images sur un écoulement de vortex de Rankine	43
Figure 41 Evolution de la moyenne des corrélations des normes de vitesse entre outil et ground-truth en fonction de la densité test 2 simulation	44
Figure 42 Evolution de l'erreur angulaire moyenne en fonction de la densité test 2 simulation	44
Figure 43 Evolution de la moyenne des corrélations des normes de vitesse entre outils et ground-truth en fonction du déplacement test 2 simulation	45
Figure 44 Evolution de l'erreur angulaire moyenne en fonction du déplacement test 2 simulation	45
Figure 45 Evolution de la moyenne des corrélations des normes de vitesse entre outil et ground-truth en fonction du bruit test 2 simulation	46
Figure 46 Evolution de l'erreur angulaire moyenne en fonction du bruit test 2 simulation	46
Figure 47 Evolution du RMSE en fonction de la densité test 2 simulation	56

Diffusion	Étude	N° chrono direction	Date	Page
	XXX00-000		jj/mm/aaaa	7/67

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

Figure 48 Evolution du MAE en fonction de la densité test 2 simulation	56
Figure 49 Evolution du EPE moyen en fonction de la densité test 2 simulation.....	57
Figure 50 Evolution du SSIM en fonction de la densité test 2 simulation.....	57
Figure 51 Evolution du RMSE en fonction du bruit test 2 simulation	59
Figure 52 Evolution du MAE en fonction du bruit test 2 simulation.....	59
Figure 53 Evolution du EPE moyen en fonction du bruit test 2 simulation.....	59
Figure 54 Evolution du SSIM en fonction du bruit test 2 simulation.....	60
Figure 55 Evolution du RMSE en fonction du déplacement test 2 simulation.....	61
Figure 56 Evolution du MAE en fonction du déplacement test 2 simulation.....	61
Figure 57 Evolution du EPE moyen en fonction du déplacement test 2 simulation	61
Figure 58 Evolution du SSIM en fonction du déplacement test 2 simulation	62
Figure 59 Binarisation des images : manuelle ou via algorithme OTSU	63
Figure 60 Détection à partir de l'image binarisé et de cv2.connectedComponentsWithStats des particules et tracé des boîtes englobantes.....	63
Figure 61 Tracé de 4 formes représentatives des classes, contours des particules obtenus via application de cv2.findContours dans les boîtes englobantes.....	64
Figure 62 Visualisations 2D et 3D du nombre de particules par fenêtre	64
Figure 63 Visualisation spatiale des agglomérats.....	65
Figure 64 Histogrammes de distribution des formes	65
Figure 65 Hauteur en fonction de la largeur des particules et agglomérats détectés	66

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

Introduction

Cette étude a été menée au sein d'IFP Energies nouvelles (IFPEN), un institut de recherche de référence dans le domaine de l'énergie, classé troisième déposant de brevets en France en 2024. J'ai été accueilli sur le site de Rueil-Malmaison, au sein du Département "Simulation et analyses expérimentales des systèmes" (R108), et plus précisément dans l'équipe DIOP, spécialisée dans les diagnostics optiques. Ce département fait partie de la direction "Mobilité et Systèmes", qui développe des méthodologies expérimentales avancées pour analyser les phénomènes physiques complexes liés aux écoulements, à la thermique et à la mécanique. L'objectif est de concevoir des solutions innovantes en faveur d'une mobilité plus durable, moins polluante, et d'accompagner la transition énergétique.

Le stage s'inscrit dans le cadre du projet européen ERC karst (European Research Council) qui vise à améliorer la compréhension et la prédiction des écoulements dans les milieux karstiques. Ces milieux sont des réseaux de grottes formés par la dissolution lente de roches carbonatées par les eaux de ruissèlement, qui ont la capacité de rapidement transporter de l'eau et potentiellement des polluants. Ces aquifères représentent une ressource précieuse du fait qu'ils approvisionnent en eau potable une large partie de la population mais ils représentent également un point de vigilance car ils peuvent prendre part aux inondations ainsi qu'au transfert de contaminants et de polluants.

C'est dans ce contexte à fort enjeu environnemental que s'inscrit le projet Karst, dont l'objectif ambitieux est de mieux comprendre et prédire les dynamiques d'écoulement dans ces milieux. Le projet envisage de modéliser plus finement les écoulements de l'eau dans ces milieux lors d'événements météorologiques extrêmes.

Dans ce projet, IFPEN intervient à deux niveaux. Le stage s'intègre au niveau de l'étude fine des écoulements dans des modèles imprimés en 3D réalisés à partir de données réelles obtenus au scan LIDAR de réseaux karstiques [23]. Les résultats des expériences apportent ensuite des informations à une autre équipe d'IFPEN qui étudie les modélisations avancées des écoulements aux grandes échelles.

Les parois rugueuses et les structures géométriques désordonnées des karsts génèrent une richesse d'écoulements multi-échelles, qui défient les méthodes traditionnelles. Face à ces défis, de nouvelles approches basées sur le flot optique et l'intelligence artificielle promettent de repousser les limites actuelles. L'objectif du stage est d'améliorer les capacités du laboratoire et d'apporter des informations plus fines sur le mouvement des fluides.

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

Chapitre 1 : Présentation de l'organisme d'accueil

IFP Energies nouvelles (IFPEN) est un acteur majeur de la recherche, de l'innovation et de la formation dans les domaines de l'énergie, du transport et de l'environnement.

C'est un organisme public à caractère industriel et commercial (EPIC), il intervient tout au long de la chaîne de valeur, de la recherche fondamentale à l'innovation technologique appliquée, avec pour mission principale de répondre aux grands défis sociétaux liés à la transition énergétique et à la lutte contre le changement climatique. Les activités d'IFPEN s'articulent autour de quatre grands axes stratégiques (Figure 1) :

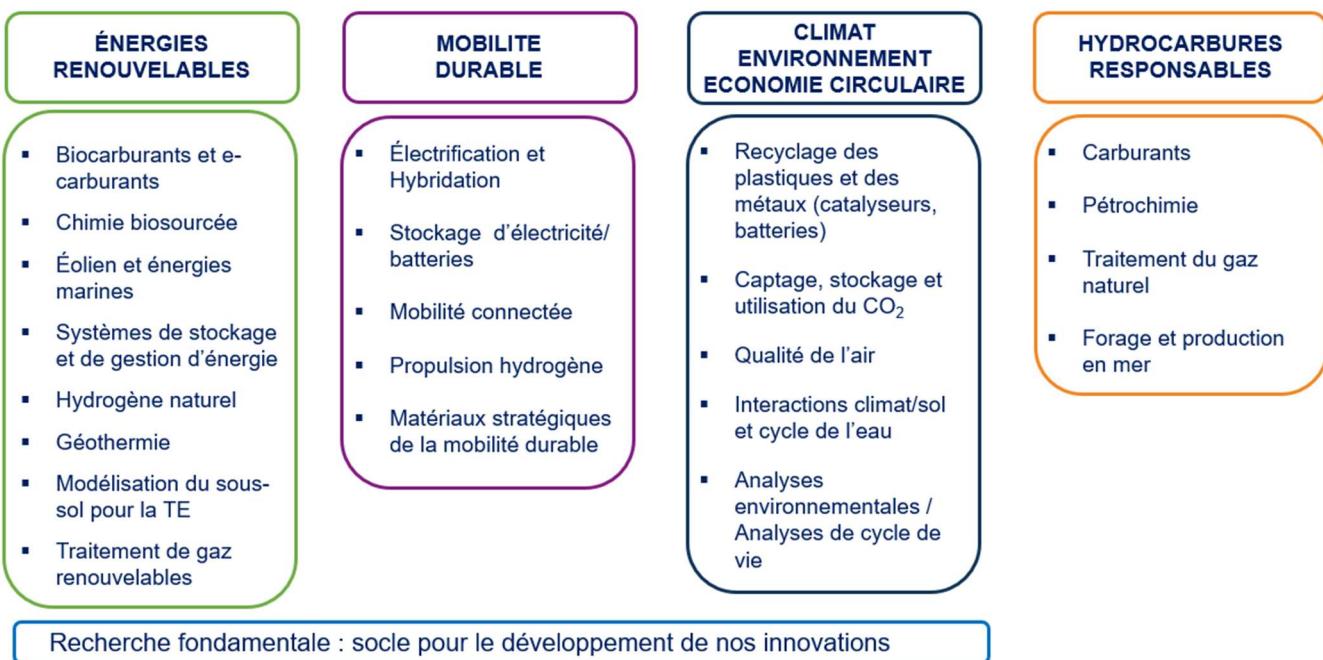


Figure 1 Domaines d'activités IFPEN

Dans le cadre de la mission d'intérêt général confiée par les pouvoirs publics, IFPEN vise à :

- Accompagner la transition vers une mobilité plus propre et un mix énergétique plus diversifié,
- Contribuer à la création de richesse et d'emplois, en renforçant la compétitivité des filières industrielles françaises et européennes.

Cette ambition s'inscrit dans la stratégie Gouvernementale **Horizon 2035**, qui définit les orientations de l'institut à moyen et long terme en matière de recherche, de développement technologique et d'organisation.

IFPEN adopte une vision à 15 ans pour anticiper les évolutions des marchés et des besoins industriels.

IFPEN dispose d'un **modèle de financement mixte public/privé**, reposant à plus de 50 % sur des ressources propres issues de collaborations industrielles.

Ce modèle unique en France permet à l'institut de valoriser concrètement ses résultats de recherche via des partenariats, des transferts de technologie, ou la création de startups innovantes (plus de 30 créées depuis 1944). L'activité de R&D s'appuie sur une forte expertise scientifique, reconnue à l'échelle internationale, et vise à lever des verrous technologiques majeurs pour développer des solutions concrètes, innovantes et industrialisables. La recherche fondamentale y occupe une place importante, en tant que socle de connaissance indispensable aux innovations de demain.

Acteur engagé à l'échelle mondiale, IFPEN participe activement à de nombreux projets collaboratifs européens et internationaux (programmes Horizon Europe, consortiums bilatéraux, partenariats publics/privés), avec plus de 100 partenaires dans le monde.

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

La **formation** constitue également un pilier essentiel de l'institut. À travers son école d'ingénieurs, **IFP School**, et sa filiale **IFP Training**, IFPEN accompagne le développement de compétences dans les secteurs de l'énergie, de l'automobile et de l'environnement.

Chaque année, IFP School forme plus de 500 étudiants, issus de plus de 50 nationalités, tandis qu'IFP Training assure la formation continue de près de 15 500 professionnels de l'industrie.

L'IFPEN possède deux sites en France, un à Solaize à côté de Lyon et un à Rueil-Malmaison à côté de Paris, Figure 2.



Figure 2 Sites IFPEN

- **IFPEN en quelques chiffres (2024)**

- 1 530 salariés, dont 1 078 ingénieurs et techniciens en R&D
- 283,1 millions d'euros de budget annuel, dont 241,1 M€ pour la R&I
- Plus de 50 métiers représentés
- 76 % du budget consacré aux nouvelles technologies de l'énergie
- Plus de 600 publications scientifiques par an
- 154 premiers dépôts de brevets, dont 125 dans les NTE
- Environ 175 doctorants, post-doctorants et stagiaires encadrés
- Plus de 120 projets collaboratifs de recherche en cours, dont près de 40 avec des partenaires étrangers
- Plus de 500 diplômés par an à IFP School
- 3-ème centre de recherche au palmarès INPI des déposants de brevets avec 127 brevets déposés en 2024

Le stage s'est déroulé sur le site de Rueil-Malmaison, dans la direction R10 et plus précisément le département R108, équipe de diagnostic optique.

Mission de la Direction « Mobilité et Systèmes » (R10)

La Direction « Mobilité et Systèmes » a pour rôle de fournir aux projets des compétences techniques et des moyens expérimentaux pour développer des solutions innovantes dans les domaines du transport et de l'énergie. Elle se concentre particulièrement sur la conception de systèmes permettant une mobilité plus propre, et sur le développement d'outils et de méthodologies en lien avec la transition énergétique.

Ses activités couvrent la conception de systèmes mécatroniques complexes, la simulation multi-physique (2D/3D, systèmes), la mise en œuvre de techniques de mesure avancées, ainsi que l'analyse des phénomènes liés aux écoulements, à la thermique, à la mécanique et à l'électromagnétisme. Elle contribue aussi à la qualification des émissions polluantes pour mieux comprendre leur impact sur la qualité de l'air.

La direction conçoit également les bancs d'essais et plateformes nécessaires à ses propres expérimentations, mais aussi pour d'autres entités.

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

Organisation

La direction R10 regroupe 171 collaborateurs répartis sur les sites de Rueil-Malmaison et de Solaize.

Elle est structurée en quatre départements :

- R105 – Conversion d'énergie et émissions
- R107 – Systèmes électriques et électroniques
- R108 – Simulation et analyses expérimentales des systèmes
- R109 – Conception de moyens expérimentaux et de systèmes

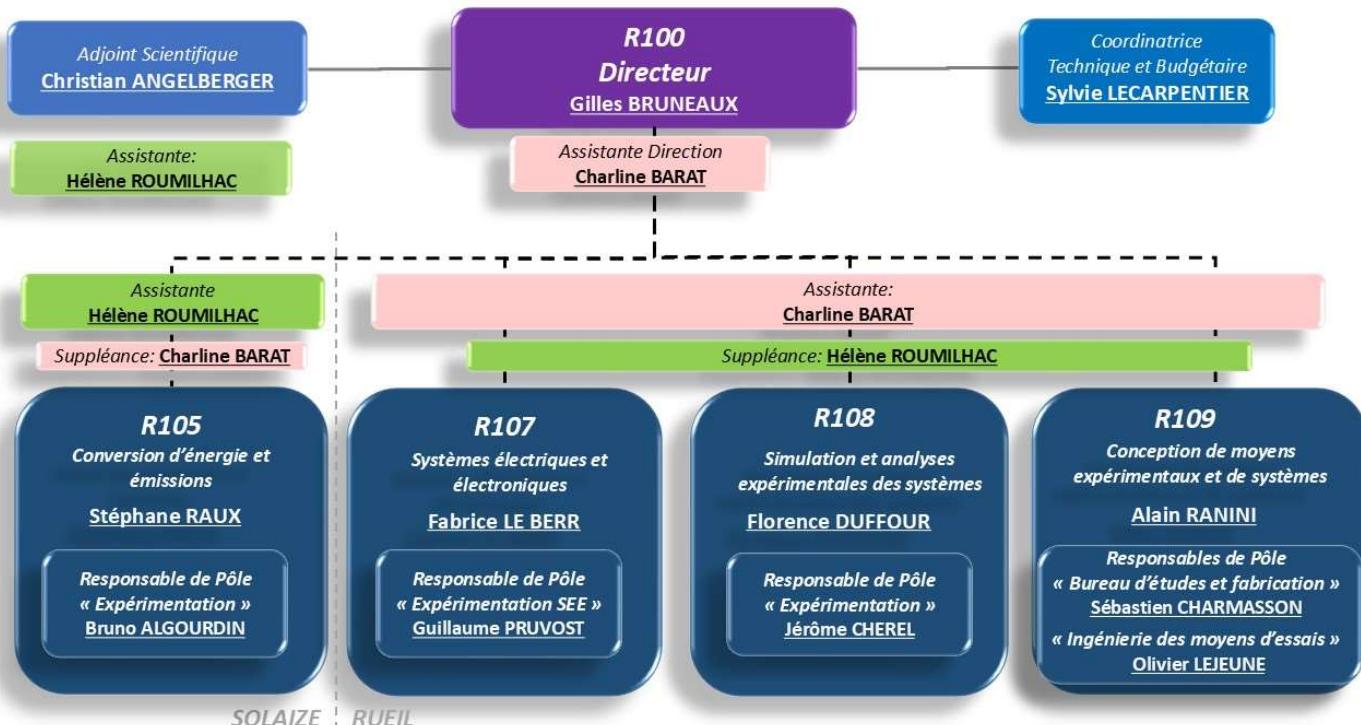


Figure 3 Organigramme du département R10

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

Chapitre 2 : Présentation du projet ERC KARST

Les systèmes karstiques sont des environnements géologiques constitués de grottes et de conduites complexes qui ont été formées par la dissolution lente du calcaire composant les roches par les eaux de ruissèlement. Ce phénomène, appelé karstification, donne naissance à un réseau complexe de cavités, de galeries et de rivières souterraines. En surface, les indicateurs de présence de milieu karstiques sont les dolines (dépressions circulaires) et les gouffres.



Figure 4 Intérieur d'un aquifère Karstique

Les systèmes Karstiques sont connectés sur de très grandes distances, contiennent et contrôlent des ressources en eau très importantes, et sont réparties uniformément à travers l'Europe Figure 6.

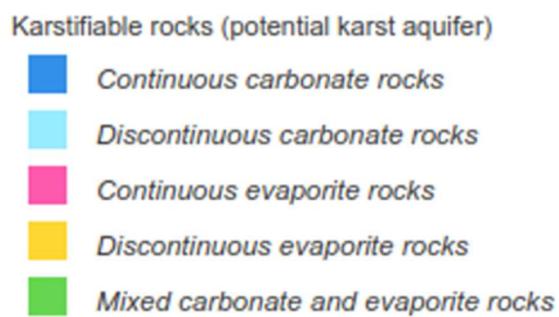


Figure 5 Légende de la Figure 6, les roches les plus sensibles à la dissolution sont colorées en fonction de leur nature (en bleu les calcaires, en rose et jaune des formations salines)

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

Figure 6 Localisation potentielle de karst en Europe



Figure 6 Localisation potentielle de karst en Europe

Les aquifères karstiques représentent une ressource précieuse car ils fournissent de l'eau potable à environ 25% de la population mondiale.

Mais ils sont aussi une menace du fait que l'eau y circule très rapidement, ce qui peut causer de graves inondations et, si elle est contaminée, propager rapidement des maladies.

Il est donc crucial de comprendre comment ils se comportent.

Plusieurs incidents impliquant le comportement de karsts ont eu lieu :

- L'incident à Walker Town au Canada, où 7 personnes sont décédées et plus de 2000 sont tombées malade
- L'inondation de Nîmes en 1988 qui a causé 9 morts et plus de 600 millions d'euros de dommages

Malgré leur importance et les recherches approfondies, comprendre et prédire les écoulements dans les structures karstiques reste un défi.

Face aux impacts croissants du changement climatique (sécheresses, pluies extrêmes, pollution), le projet ambitionne de développer une modélisation multi-échelle, allant de l'étude fine des écoulements dans des conduits individuels (via expériences et données réelles) jusqu'à des simulations globales du comportement de l'ensemble des systèmes karstiques.

La partie expérimentale du projet se focalise sur la caractérisation des écoulements dans les conduits souterrains des aquifères karstiques, utilisant des technologies de pointe comme le LIDAR et l'impression 3D pour créer des modèles réduits des cavités, et réaliser des diagnostics optiques pour analyser ces écoulements.

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

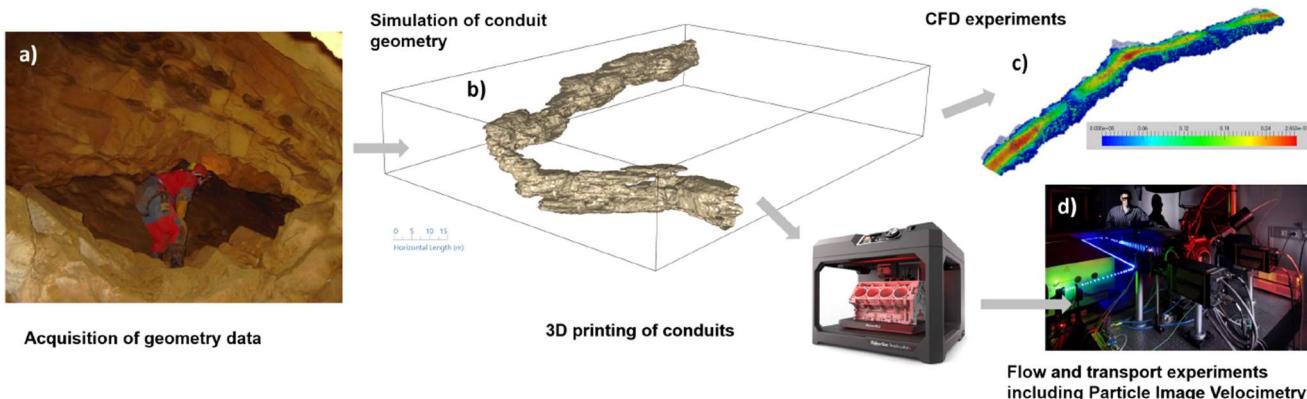


Figure 7 Etapes du projet Karst

L'organisation dans laquelle s'est déroulé le stage, IFPEN, participe au projet sur l'élaboration d'un banc d'essai expérimental pour l'implémentations de diagnostics optiques pour caractériser les écoulements, ainsi que sur l'élaboration de lois mathématiques et physiques des écoulements en milieu karstique.

Les lois de la physique des fluides actuelles s'appliquent mal dans le cadre d'écoulement dans des systèmes avec une géométrie complexe telle que les grottes, qui sont tortueuses, possèdent des parois rugueuses, irrégulières et fissurées [22].

L'objectif de mon stage intitulé application de l'apprentissage profond et de l'intelligence artificielle pour la caractérisation des écoulements a pour objectif de renforcer les techniques d'analyse existantes au sein d'IFPEN dans le cadre du projet Karst.

Les karsts possédant une géométrie complexe, ils présentent un comportement hydrodynamique difficilement prévisible et générant des grandes et des petites échelles de structures d'écoulement.

Les structures d'écoulement sont des motifs organisés que l'on observe dans les écoulements, cela peut être des tourbillons (zone où le fluide tourne autour d'un axe), du cisaillement (où la vitesse du fluide change rapidement), des jets (colonnes dans lesquelles le fluide se déplace avec une vitesse plus élevée).

Les techniques classiques d'analyse étant soumises à des limitations temporelles ou spatiales [16], l'utilisation de solutions d'analyse avancée d'intelligence artificielle et de flot optique pourrait permettre d'améliorer les résultats de mesure et ainsi d'établir les lois physiques qui régissent le mouvement des fluides dans les grottes.

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

Chapitre 3 Caractériser les écoulements karstiques à IFPEN

L'objectif de IFPEN est l'étude fine des écoulements en milieu karstique. Un banc d'expérience attitré au projet karst est utilisé pour effectuer les mesures.

La technique utilisée pour caractériser les écoulements est la PIV (Particle Image Velocimetry), une technique permettant d'extraire les déplacements et les vitesses du fluide lors de l'écoulement afin d'en estimer les champs de vitesse.

Cette technique repose sur l'utilisation d'un laser synchronisé avec une caméra rapide. L'écoulement que l'on souhaite caractériser est ensemencé à l'aide de particules de très petites dimensions, pouvant parfaitement suivre les plus petites structures d'écoulement du fluide. Le faisceau laser est transformé en une nappe laser par l'intermédiaire de plusieurs lentilles, sphérique et cylindre. La nappe doit être assez fine (<1mm) pour considérer les déplacements de chaque particule comme bidimensionnels afin d'effectuer de la PIV en 2D. A chaque illumination de l'écoulement par le laser, la caméra capture une image de la diffusion de Mie des particules, c'est à dire comment les particules (de l'ordre du micromètre) éclairées par la nappe laser diffusent la lumière de façon directionnelle. Ces images sont ensuite post traitées par des algorithmes dédiés, présentés dans la suite de ce rapport, pour obtenir les champs de vitesse.

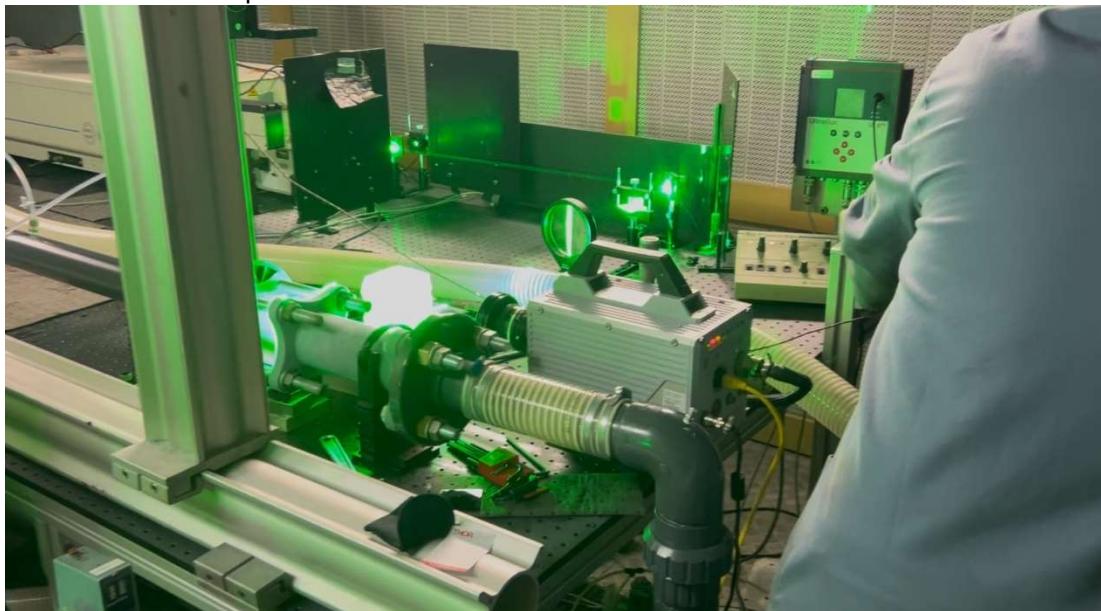


Figure 8 Photo d'une expérience de PIV sur le banc Karst

1.1 Dispositif expérimental :

Le banc possède les éléments permettant d'effectuer la première étape de la PIV, l'acquisition des images :

- Partie hydraulique du banc :
 - Un réservoir contenant le fluide auquel on a ajouté des particules traçantes qui suivent les écoulements,
 - Un système de circulation permettant de contrôler et de mesurer les paramètres physiques du fluide (pompe, capteurs de pression, débitmètre, ...).
- Partie montage PIV
 - Un modèle transparent (impression 3D) dans lequel on caractérise l'écoulement,
 - Un laser qui à chaque pulsation va éclairer les particules présentes dans le fluide,
 - Une caméra haute-vitesse permettant de capturer les images à chaque pulsation laser et montrant ainsi les déplacements successifs des particules dans l'écoulement,
 - Un système optique permettant de contrôler le faisceau du laser,
 - Un ordinateur et un synchroniseur permettant de déclencher l'enregistrement et les pulsations.

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

Les particules traçantes sont dimensionnées de manière à être suffisamment petites et légères pour suivre fidèlement l'écoulement et suffisamment grandes pour être capturées par la caméra.

Cette étape a pour objectif d'obtenir une suite d'images montrant le déplacement des particules et donc du fluide à travers le modèle étudié.

1.2 Le traitement d'image :

La seconde partie de l'analyse est le **traitement des images acquises depuis le banc**, qui vise à **mesurer le déplacement des particules** entre les images.

Pour cela, IFPEN utilise Davis, un logiciel propriétaire qui permet grâce à un algorithme de retrouver à partir d'une paire d'image le déplacement des particules (logiciel commercialisé par LaVision).

Cet algorithme est la **corrélation croisée** en deux dimensions, qui est l'algorithme classique utilisé en analyse PIV. Son principe est de prendre une paire d'image (image 1 et image 2), de découper la première image en plusieurs fenêtres de même taille, qui quadrillent l'ensemble de l'image. Exemple de taille 32x32 pixels, voir Figure 9.

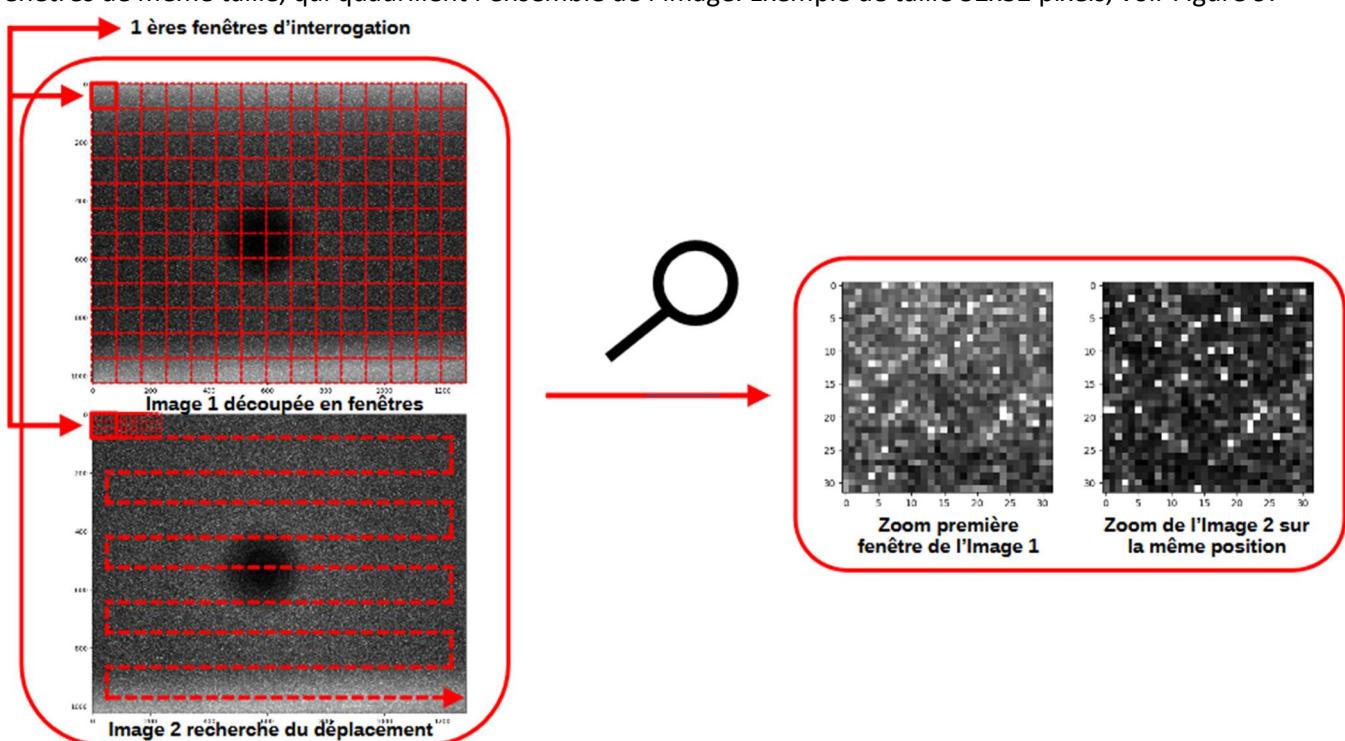


Figure 9 Paire d'image PIV et fenêtres d'interrogation

La Figure 9 représente une paire d'image. En effectuant un zoom sur la première fenêtre de l'image 1 et la même zone (32x32 à la même position x,y) sur l'image 2, on observe que, les particules s'étant déplacées lors de l'intervalle de temps entre l'acquisition de l'image 1 et celle de l'image 2, les motifs de particules sont différents.

L'objectif est donc de déterminer où se sont déplacées les particules, c'est-à-dire la zone de l'image 2 avec les mêmes motifs que la fenêtre de l'image 1.

L'algorithme de corrélation croisée va donc faire glisser chaque fenêtre de l'image 1 sur l'image 2 en renvoyant à chaque position une valeur de similarité entre la fenêtre et la zone testée de l'image 2.

Le résultat peut être visualisé sous forme d'un tracé en trois dimensions, comprenant le résultat de l'algorithme entre une fenêtre de l'image 1 et l'ensemble des coordonnées de l'image 2 Figure 10.

La zone de l'image 2 ayant la plus grande similarité avec la fenêtre de l'image 1 est donc considérée comme l'endroit où se sont déplacées les particules. On obtient ainsi le déplacement à partir de la distance en pixels des deux positions, que l'on peut transformer en vitesse en divisant par le temps d'intervalle de prise d'image.

Une fois le déplacement de toutes les fenêtres de l'image 1 sur l'image 2 mesuré, on obtient un champ de vitesse qui contient un vecteur par fenêtre.

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

Résultats de la corrélation croisée

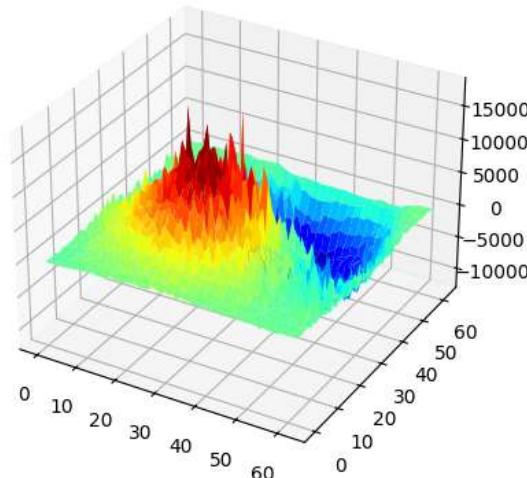


Figure 10 Tracé en 3D du résultat de la corrélation croisée entre la fenêtre 1 et chaque position de l'image 2

Avant d'effectuer la corrélation croisée, on peut prétraiter les images (rognier, égalisation des histogrammes, ...), c'est l'étape de pre-processing, qui permet de modifier les images afin d'augmenter la fiabilité des résultats. Après corrélation croisée, on effectue l'étape de post-processing, où l'on applique des algorithmes pour améliorer les champs de vitesse obtenus (détection et remplacement de vecteurs aberrant, lissage, ...).

La corrélation croisée donne une estimation des déplacements pour chaque fenêtre, la résolution d'estimation des vitesses en sortie dépend donc de leur taille. Si les fenêtres sont trop petites, l'algorithme ne va pas réussir à voir les similarités et donc les résultats ne seront pas fiables. Si les fenêtres sont trop grandes, les champs de vitesses seront lissés et ne permettront pas une analyse fine de l'écoulement. Il est donc essentiel de bien paramétriser l'algorithme avant de traiter les images. La corrélation croisée est généralement utilisée avec la technique du multi-pass, qui est une méthode dite « coarse to fine » (de粗到细), c'est-à-dire qui :

- Commence l'analyse avec de grandes fenêtres, permettant de détecter les grands déplacements présents dans l'écoulement
- Réduit progressivement la taille des fenêtres à chaque passe, jusqu'à atteindre une résolution fine, afin de capturer les petits déplacements

Cette méthode permet de pouvoir estimer les grands et les petits déplacements, mais repose sur une stratégie fixe des tailles des fenêtres, qui dépendent fortement des conditions expérimentales telles que la taille de la zone à analyser (modèle transparent) et la résolution de la caméra.

Pour ce type d'approche (coarse to fine), il y a propagation des erreurs, les estimations obtenues pour les grandes fenêtres sont utilisées pour estimer les petites de la passe suivante donc si la première passe donne un résultat faux, la prochaine le sera aussi.

1.3 Interpréter un champ de vitesses

À l'issue d'un traitement PIV, on obtient un **champ de vecteurs vitesses** représentant le mouvement du fluide entre deux images. Ce champ peut être exporté sous forme de fichier texte (.txt) contenant pour chaque vecteur les informations suivantes :

- **X** : position en abscisse du centre de la fenêtre d'interrogation (en pixels ou en unités physiques si un calibrage a été effectué)
- **Y** : position en ordonnée de la fenêtre d'interrogation
- **U** : composante horizontale de la vitesse (exprimée en pixels/frame ou m/s selon le calibrage temporel et spatial)
- **V** : composante verticale de la vitesse

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

Interprétation du champ de vitesse

Chaque ligne du fichier texte correspond à une fenêtre d'interrogation dans l'image, et les composantes U et V indiquent la direction et l'intensité du déplacement mesuré des particules dans cette fenêtre entre deux images consécutives.

- Le vecteur (U, V) indique le déplacement moyen des particules dans la fenêtre,
- La direction du vecteur donne le sens de l'écoulement local,
- La norme $\|\vec{u}\| = \sqrt{U^2 + V^2}$ donne la vitesse locale du fluide.

Une visualisation graphique du champ de vecteur de vitesse permet :

- Avec un quiver plot (tracé des flèches directionnelles) de visualiser les directions des déplacements des particules mesurés,
- Avec une carte de vitesse, permet de visualiser dans l'espace la norme de vitesse grâce à un code couleur en se référant à la barre de couleur à côté du tracé, Figure 11.

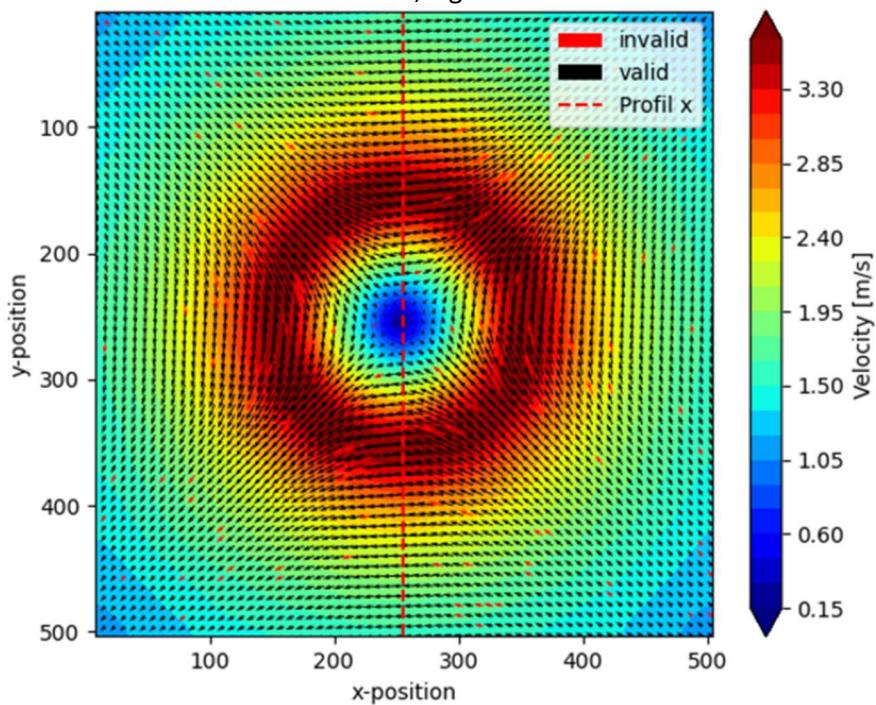


Figure 11 Tracé des vecteurs du champs de vitesse estimé et de la carte de vitesse en arrière-plan

Analyse et conclusion sur les méthodes actuelles :

Les méthodes d'analyse actuelles de IFPEN possèdent plusieurs limitations :

- Il n'est pas certain que l'on puisse caractériser finement les larges gammes d'échelles de structures d'écoulement en milieu karstique avec l'algorithme de corrélation croisée qui est limité en termes d'analyse multi-échelle dû à la stratégie fixe des fenêtres d'interrogation.
- Le logiciel Davis, permettant l'analyse des images, est un logiciel coûteux, propriétaire, donc non modifiable. Il est situé sur un poste fixe à un étage différent de celui du banc d'expérience, sans accès réseau, avec donc la nécessité de transférer les images à traiter grâce à une clé USB de l'établissement, ce qui ralentit et complexifie les expériences PIV.
- L'algorithme de corrélation croisée est sensible à certains paramètres dans les images tel que les déplacements de particules, leur densité dans les images, le bruit lumineux ou numérique, ect. Il n'existe aucune solution permettant de valider les images obtenues depuis le banc avant d'aller lancer les analyses, qui peuvent durer très longtemps et peuvent échouer si les paramètres ne sont pas dans un intervalle de validité.

La chaîne d'opérations à effectuer pour obtenir les résultats de mesure est loin d'être optimale, obtenir une analyse et une validation des images depuis le banc permettrait d'optimiser le temps d'obtention des résultats et simplifierai grandement le travail expérimental.

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

Chapitre 4 : Renforcer les capacités d'analyse de PIV

Les structures d'écoulement dans les milieux karstiques sont particulièrement complexes en raison de :

- **Parois rugueuses** influençant la dynamique des écoulements.
- **Formes irrégulières** des cavités et conduits, générant des zones de recirculation et de turbulences.
- **Large gamme d'échelle des structures hydrodynamiques** nécessitant un outil d'analyse multi-échelles pour les écoulements turbulents, capable de détecter et d'analyser des structures allant des grands tourbillons (énergie dominante injectée dans l'écoulement) jusqu'aux petites structures dissipatives, c'est-à-dire à l'échelle de Kolmogorov (plus petite échelle de l'écoulement turbulent où l'énergie est dissipée sous forme de chaleur par la viscosité)[66], ce qui est essentiel pour les bilans d'énergie et la compréhension fine du comportement turbulent

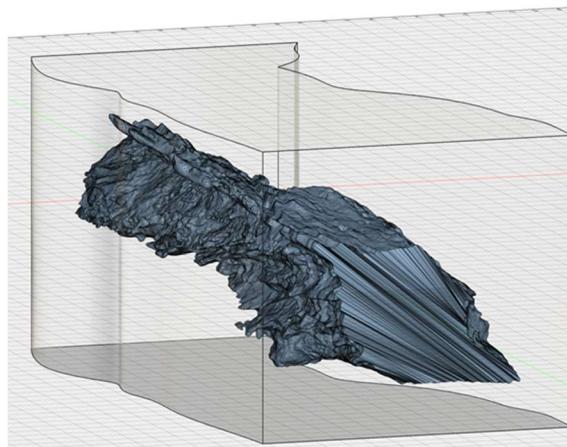


Figure 12 Modèle 3D de Karst

L'objectif du stage est le renforcement des capacités d'analyse de IFPEN via l'amélioration des techniques existantes notamment par l'intégration de l'intelligence artificielle afin de caractériser les écoulements.

Pour répondre à cet objectif et apporter des solutions aux limitations identifiées sur les méthodes d'analyse actuelles, 4 grands axes ont été développés :

- Une phase de **comparaison d'outils d'analyse sur images expérimentales** avec pour objectif de répondre à la question peut-on obtenir un outil égalant ou surpassant les analyses de Davis avec des outils open sources (ouvert au développement), qui pourrait nous permettre de traiter les images depuis le banc et d'y intégrer des outils d'analyse pour améliorer les conditions d'obtention des résultats.
- **Développement d'un outil d'analyse PIV** à partir des données issues de la première phase de comparaison, en réponse face aux limitations de Davis et adapté spécifiquement au matériel de IFPEN.
- **Intégration de l'IA pour la caractérisation des écoulements** avec pour objectif d'optimiser les temps de calculs et la résolution spatiale des estimations. Une évaluation approfondie des outils sélectionnés sur images simulées permettra de juger de leur performance et de leur utilité dans le cadre du projet.
- **Développement d'un outil permettant d'extraire les statistiques de l'ensemencement des images PIV** avec pour objectif de préqualifier les images avant lancement des traitements et d'assister à l'étalonnage du banc afin d'obtenir les images permettant un traitement optimal pour obtenir les résultats les plus fiables.

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

2.1 Comparaison d'outils d'analyse sur images expérimentales

2.1.1 Contexte et objectifs

La première comparaison a pour objectif d'identifier un outil ayant le potentiel d'égaler ou surpasser Davis en traitement des images de PIV et permettant de futurs développements pour obtenir un outil spécialement conçu pour le matériel et les analyse en milieu karstique à IFPEN.

2.1.2 Outils utilisés

Une recherche bibliographique a été effectuée afin de sélectionner les outils ayant le potentiel de répondre aux objectifs.

Deux outils open source ont été sélectionnés pour être comparés à Davis. On a volontairement choisi deux langages interprétés pour laisser la possibilité d'un développement en mode agile, même si un programme compilé serait vraisemblablement plus rapide. Au laboratoire, deux langages sont couramment utilisés : matlab et python.

a OpenPIV dans Python

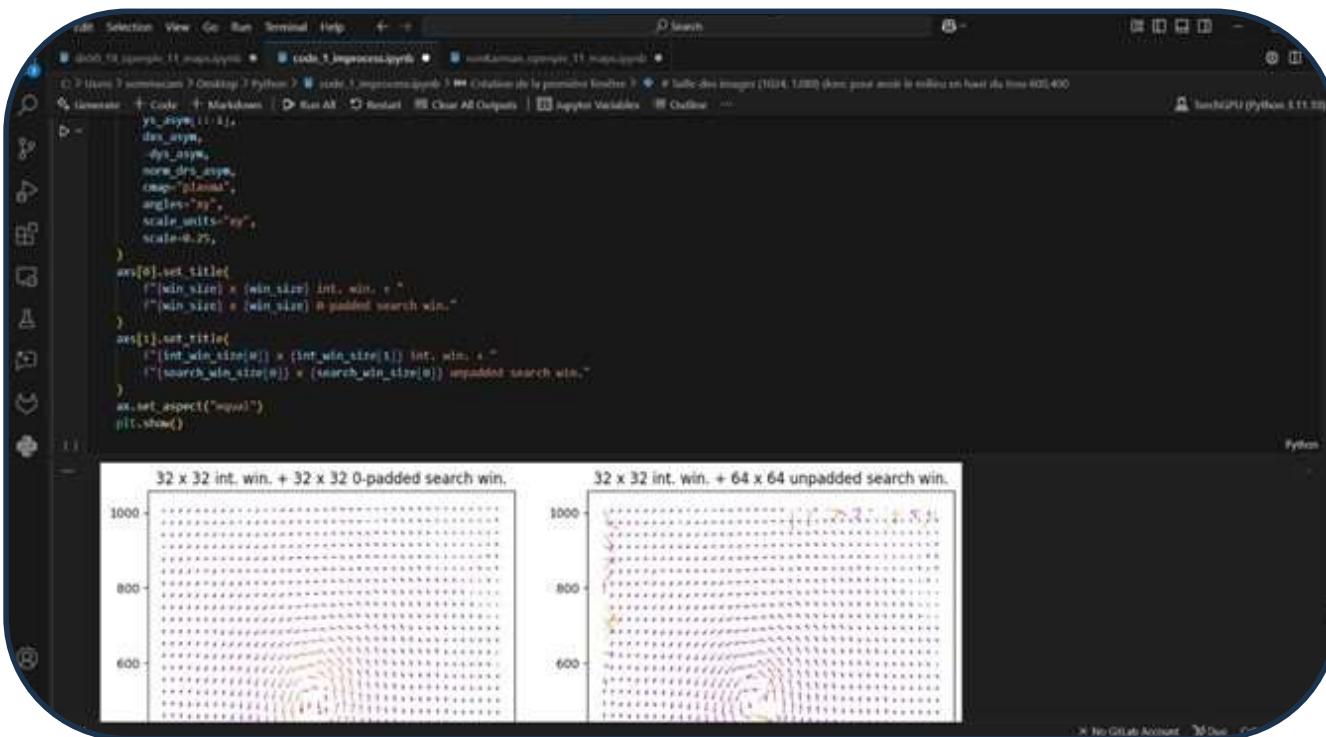


Figure 13 Image code OpenPIV

Le premier outil est Python avec la librairie OpenPIV permettant d'effectuer des analyses de corrélation croisée sur les images de PIV.

Cet outil a été sélectionné car il possède les avantages suivants :

- Python est open source et possède une grande communauté dont les membres partagent des conseils, s'entraident, résolvent les problèmes et enrichissent l'écosystème, stimulant ainsi l'innovation et l'amélioration continue. On trouve sur python des librairies créées par la communauté qui permettent d'obtenir des fonctions facilitant l'intégration des outils lors du développement.
- Possibilité de créer un GUI (Interface graphique utilisateur) pour faciliter l'utilisation aux non-développeurs.
- Il existe déjà une interface graphique afin d'utiliser OpenPIV pour lancer des analyses sur laquelle s'appuyer, mais qui n'est pas fonctionnel en l'état donc nécessite une mise à jour du code.

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

Les inconvénients pour python tant qu'il n'y a pas d'interface graphique sont :

- Impossibilité d'utilisation pour les non-développeurs et les non-initiés à la PIV car il faut tout paramétrier manuellement.
- Pas d'automatisation des choix de paramètres et d'algorithmes annexes à la corrélation croisée, c'est-à-dire pre-processing et post-processing,
- Créer un script pour l'analyse prend du temps et n'est pas intuitif.

b Pivlab dans Matlab



Figure 14 Image PIVLAB

Pivlab est un logiciel en Matlab qui fait partie des outils leader en analyse d'image PIV open source.

Cet outil possède les avantages suivants :

- GUI intuitif, basé sur Matlab
- Facile d'utilisation pour les débutants et analyse PIV de qualité en 3 cliques
- Sûrement possible d'automatiser les traitements avec scripts Matlab
- Open source
- Très bien documenté
- Algorithme d'analyse avancée WOFV (Wavelet Optical Flow Velocimetry) qui permet d'obtenir :
 - Une analyse avec meilleur résolution spatiale et donc estimation plus fine des structures d'écoulement.
 - Détection améliorée des vitesses faibles
 - Adaptabilité aux écoulements complexes
 - Moins de paramètres à ajuster et plus généralisable car plus robuste aux variations expérimentales.

Les inconvénients pour Pivlab sont les suivants :

- Nécessite une licence Matlab et un accès internet pour fonctionner, ce qui n'est pas le cas du PC du banc pour des questions de sécurité.
- Communauté moins importante que Python, développement plus complexe.

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

c Davis de LaVision

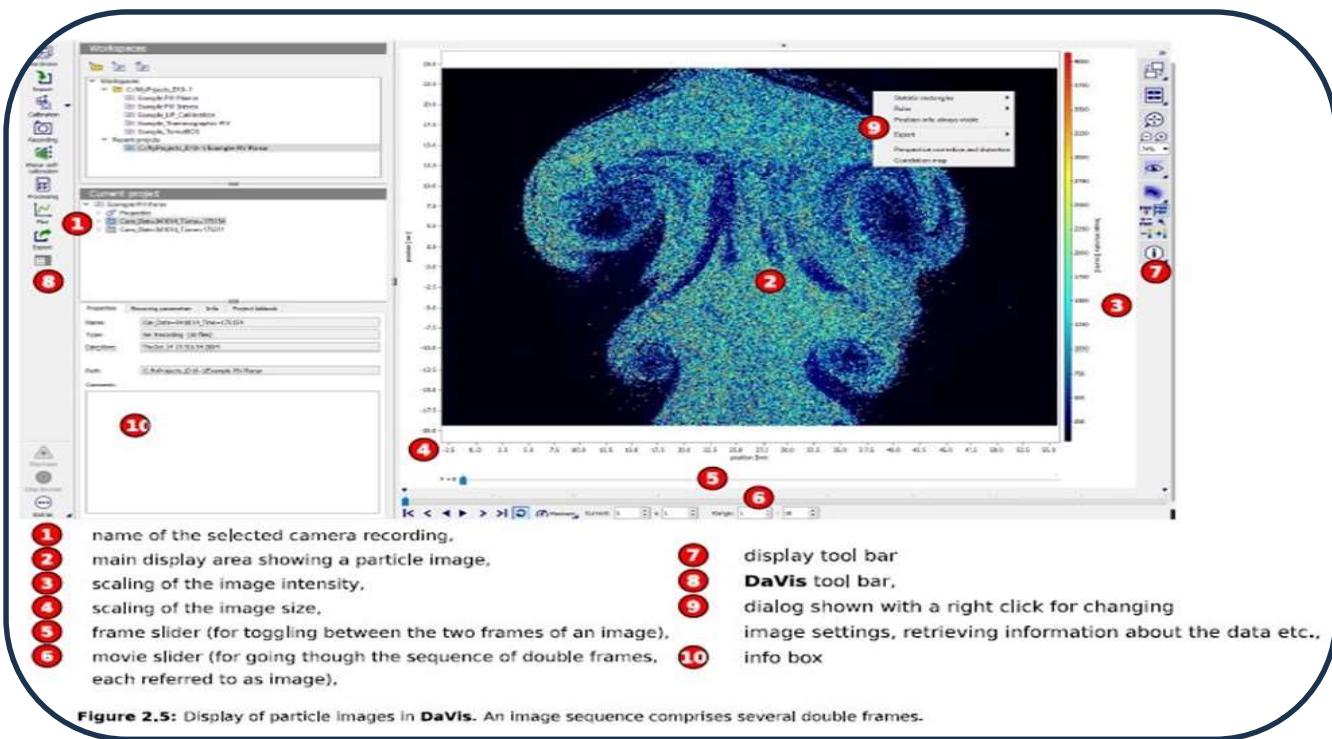


Figure 2.5: Display of particle images in **DaVis**. An image sequence comprises several double frames.

Figure 15 Image Davis

Davis le logiciel utilisé par l'IFPEN a été développé par LaVision.

L'entreprise LaVision fait partie des plus compétentes dans le domaine de la PIV. Une autre entreprise de la même importance est Dantec qui propose sa suite de logiciels.

Le logiciel Davis possède les avantages suivants :

- Sur un poste fixe avec une très grande capacité de calculs
- GUI simple et automatisé qui permet d'effectuer une analyse facilement et rapidement
- Très performant pour expériences complexes et analyses avancées
- Support technique

Les limitations sont celles citées plus tôt :

- Pas open source
- Coût
- Moins intuitif et rapide d'utilisation que PIVLAB
- Pas accès aux algorithmes de flot optique/IA



Figure 16 Logos PIVLAB, OpenPIV et LaVision

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

2.1.3 Méthodes

a Origine et caractéristiques des images expérimentales de PIV

Pour la comparaison, nous allons utiliser les images expérimentales du banc Karst qui sont issues des étapes de mise en œuvre et de réglage de l'expérience. Ces images sont donc assez bruitées et difficiles à traiter dans l'absolu.

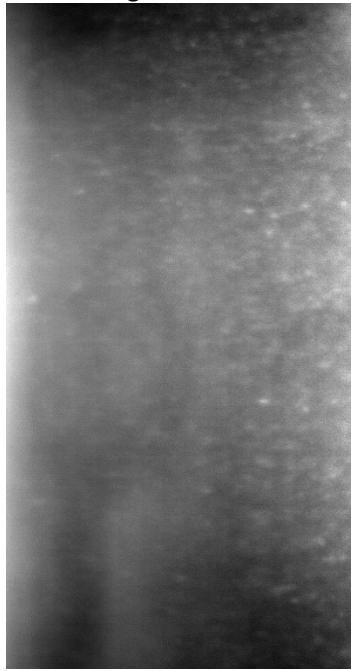


Figure 17 Image du jeu de donnée DN50

Ces images représentent un écoulement laminaire dans une conduite de diamètre intérieur 50 mm.

Plusieurs séries d'images ont été capturées et présentant des niveaux de bruit différents.

Le choix de ces images a été guidé par les éléments suivants :

- Amplifications des différences d'estimation entre les algorithmes. Du fait de la faible qualité des images.
- Obtention de résultats de comparaison qui prennent en compte les imperfections expérimentales du banc

Ce choix permet :

- D'identifier clairement les sensibilités spécifiques de chaque outil au bruit.
- D'établir une référence pour les tests et les phases ultérieurs

b Méthodologie de comparaison

Protocole expérimental

Pour assurer une comparaison égalitaire, nous avons mis en place un protocole standardisé afin de garantir l'équité entre les logiciels testés.

Le prétraitement des images lors de l'évaluation des algorithmes de corrélation croisée et de post-traitement est standardisé afin de minimiser les biais liés aux différences de pré-traitement entre les logiciels.

Chaque jeu de données est traité avec PIVLab, Davis et OpenPIV en utilisant des paramètres aussi similaires que possible :

- **Taille des fenêtres et overlap** (l'overlap permet de mieux détecter les déplacements des particules situées en bords des fenêtres de corrélation, en chevauchant un pourcentage des fenêtres entre elles lors du calcul.) standardisés pour obtenir les **mêmes résolutions** d'estimation.

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

- **Méthode de corrélation croisée et post-traitement** adaptés et optimisé en fonction de la documentation pour chaque outil.

L'objectif est d'évaluer dans quelles conditions chaque logiciel fournit des résultats optimaux et d'identifier leurs limites.

Etapes de la comparaison pour chaque jeu d'image DN50 :

- Comparaison en éliminant au maximum les traitement annexes (pre-processing et post-processing) afin d'isoler l'algorithme de corrélation croisée. L'objectif lors de cette étape et de déterminer si les algorithmes de corrélation croisée des trois outils permettent d'obtenir les mêmes résultats.
- Comparaison en ajoutant à chaque étape supplémentaire les algorithmes de post-processing afin d'identifier où se situe les différences ainsi que les algorithmes permettant d'obtenir les meilleurs résultats sur l'écoulement laminaire des images DN50.
- Comparaison finale avec les traitements optimaux.

Création de **notebook python** afin de réunir les résultats de comparaison de chaque outil et d'utiliser les métriques d'évaluation suivantes :

- Histogrammes de la distribution des vitesses en u et v (Permettant de voir si les estimations sont similaires et si les vitesses estimées ont une logique physique).
- Carte de la norme de vitesse
- Histogrammes de distribution des angles des vecteurs (Pour observer la précision angulaire)
- Carte de l'angle des vecteurs
- Tracé qui permet de visualiser fenêtre par fenêtre la similarité des résultats entre deux champs de vitesse.

Ces métriques vont permettre d'identifier au mieux les différences entre les outils et d'observer lequel donne les résultats qui correspondent le mieux à la logique de l'écoulement étudié.

2.1.4 Résultats

a Test 1 : Algorithme de corrélation croisée

Pour évaluer de manière objective les performances des différents logiciels (OpenPIV, Davis et PIVLAB), une analyse comparative a été réalisée en utilisant dans un premier temps uniquement l'algorithme de corrélation croisée, sans appliquer de pré-traitement aux images ou de post-traitement.

Les traitements annexes ont été désactivés dans la mesure du possible.

OpenPIV a été utilisé avec uniquement l'algorithme de corrélation croisé.

Davis dans sa configuration minimale, avec suppression de la majorité des traitements automatiques.

Quant à PIVLAB, il y a impossibilité de désactiver complètement la détection et le remplacement des outliers (vecteurs identifiés comme aberrant).

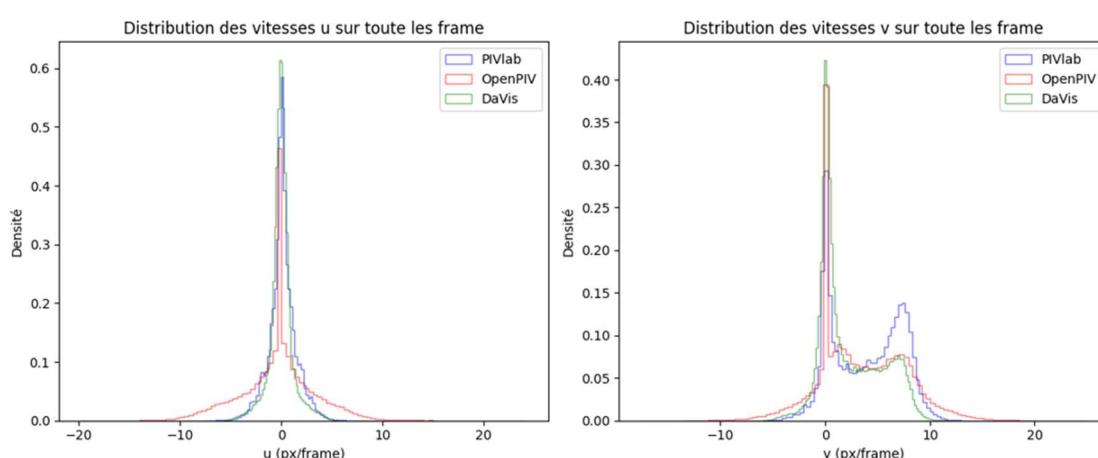


Figure 18 Distribution des vitesses test 1

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

La Figure 18 présente les distributions des composantes de vitesse (u et v) obtenues avec les trois logiciels. Les observations principales sont les suivantes :

- **Composante longitudinale (u) :**

Distribution similaire entre PIVLAB et Davis, suggérant soit une convergence des algorithmes de corrélation croisé, soit un traitement similaire à PIVLAB non désactivé dans Davis.

- **Composante transversale (v) :**

Distributions quasi-identiques pour OpenPIV et Davis, indiquant une cohérence algorithmique sur cette composante.

Cette analyse préliminaire met en évidence des comportements similaires selon les outils, tout en soulignant l'importance de pouvoir paramétriser rigoureusement les traitements pour des comparaisons équitables. Nous allons analyser ensuite en ajoutant le post-traitement qu'il n'a pas été possible d'enlever sur PIVLAB.

b Test 2 : Ajout des algorithmes de post-traitement disponibles dans les trois logiciels

Ce second test vise à comparer les résultats des trois logiciels (OpenPIV, Davis et PIVLAB) en activant les post-traitements communs.

L'objectif est d'évaluer dans quelle mesure les algorithmes convergent une fois des corrections communes appliquées (ici détection, suppression et remplacement des vecteurs faux)

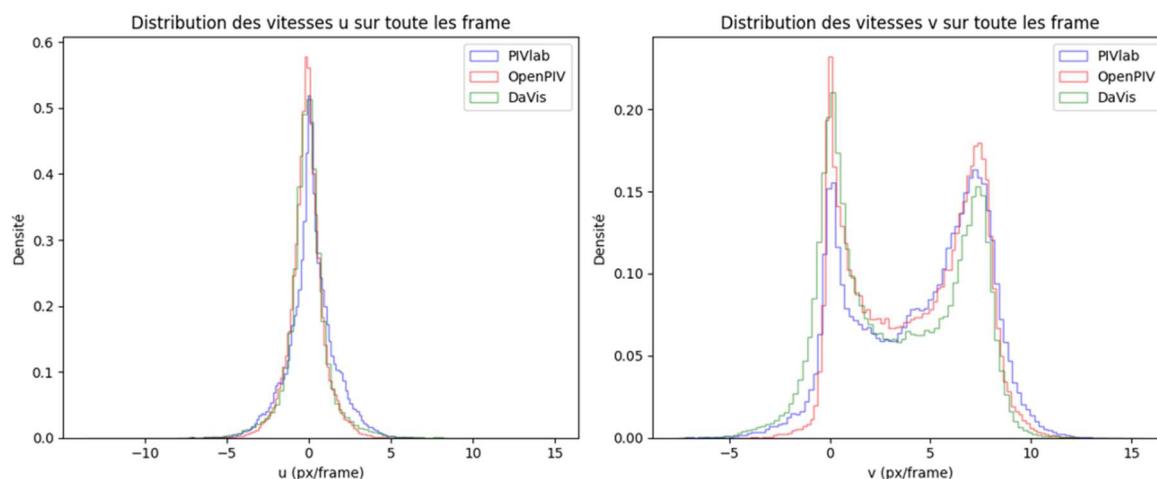


Figure 19 Distribution des vitesses test 2

La Figure 19 présente les distributions des composantes de vitesse (u et v) obtenues avec les trois logiciels. Les observations principales sont les suivantes :

Les distributions des composantes u et v montrent désormais une **forte similarité entre les trois outils**, contrairement au Test 1. Cette convergence suggère que :

- **Les différences observées dans le Test 1** provenaient bien des traitements résiduels non désactivés dans Davis.
- **Les algorithmes de base sont cohérents** une fois des post-traitements standard appliqués, renforçant la fiabilité des résultats

La Figure 20 présente les cartes de vitesse obtenues avec les trois logiciels, permettant une visualisation spatiale des vitesses estimées. Les observations principales sont les suivantes :

- **Il y a une similarité spatiale des structures**, les zones de vitesse élevée et faible apparaissent cohérentes entre les différents logiciels.
- **La présence marquée de bruit** dans les images implique :
 - Une forte densité de zones à vitesse nulle (valeur ~0).
 - Ce bruit affecte uniformément les résultats des trois outils.

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

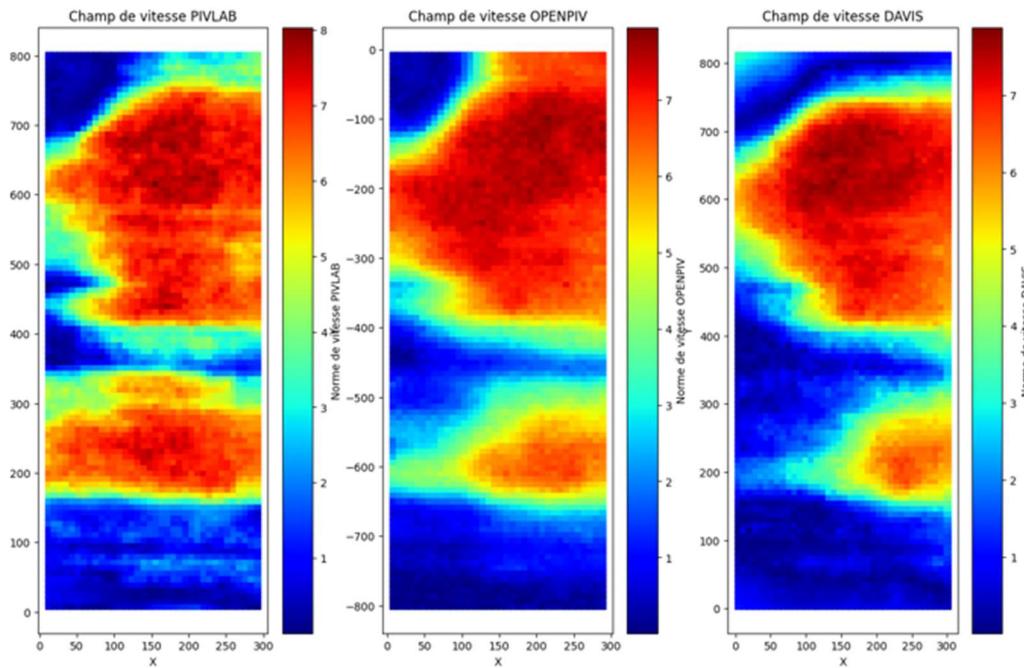


Figure 20 Cartes de vitesse test 2

La Figure 21 présente les cross plot des composantes de vitesse entre OpenPIV et PIVLAB, une comparaison rendue possible uniquement entre ces deux outils, car **DaVis** génère des champs de vitesses de tailles différentes.

La **droite en pointillé rouge**, représentant $x = y$, correspond à vitesse OpenPIV = vitesse PIVLab.

Les observations principales sont les suivantes :

- On observe une **grande similarité** dans la répartition des vitesses.
- **Pour la composante u (x)**, les distributions sont quasi identiques entre les deux outils.
- **Pour la composante v (y)**, des divergences apparaissent sur certaines vitesses intermédiaires.

Toutefois, pour des valeurs spécifiques de vitesse, notamment **7,5 et 0**, les deux outils présentent des **densités élevées avec des résultats très similaires**, indiquant une bonne robustesse sur ces plages de vitesse.

Cette analyse permet de montrer la cohérence globale des résultats entre les 2 outils tout en révélant là où se situe les différences de résultats (ici sur les vitesses intermédiaires).

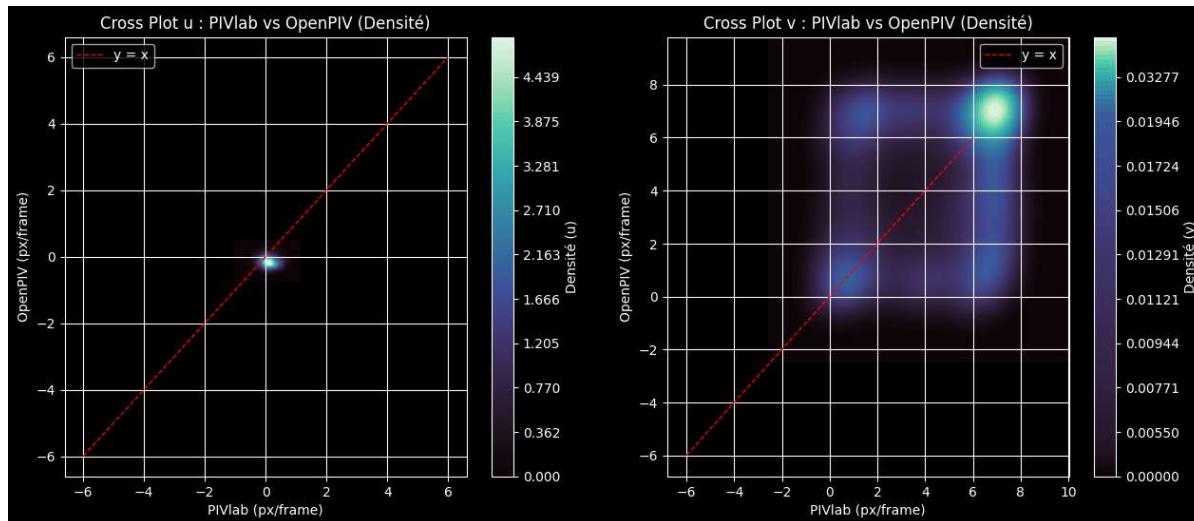


Figure 21 Cross plot u et v PIVLAB et OPENPIV test 2

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

c Test 3 : Ajout d'algorithme de débruitage

Ajout de l'algorithme de débruitage issu de Davis avec Utilisation du filtre intégré Anisotropic Denoising, sur OpenPIV avec Implémentation d'un débruitage par variation totale (*TV-Chambolle*) via skimage.restoration. Pour PIVLAB aucun traitement supplémentaire n'a appliqué du fait de l'absence de module de débruitage identifié.

La Figure 22 présente les distributions des composantes de vitesse (u et v) obtenues avec les trois logiciels et la Figure 23 les cartes de vitesse. Les observations principales sont les suivantes :

- **Il y a des effets visibles sur les cartes de vitesse :**
 - **Lissage significatif** des champs pour OpenPIV et Davis, réduisant les variations de vitesses tout en préservant les structures importantes.
 - **Artéfacts visuels** étranges sur les bords de la carte de vitesse de Davis.

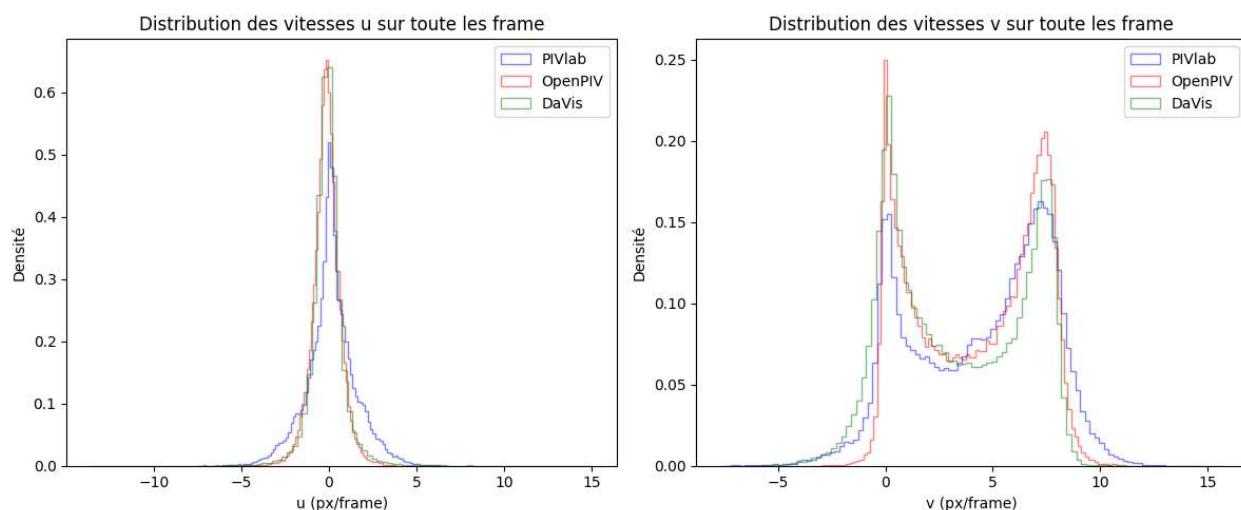


Figure 22 Distribution des vitesses test 3

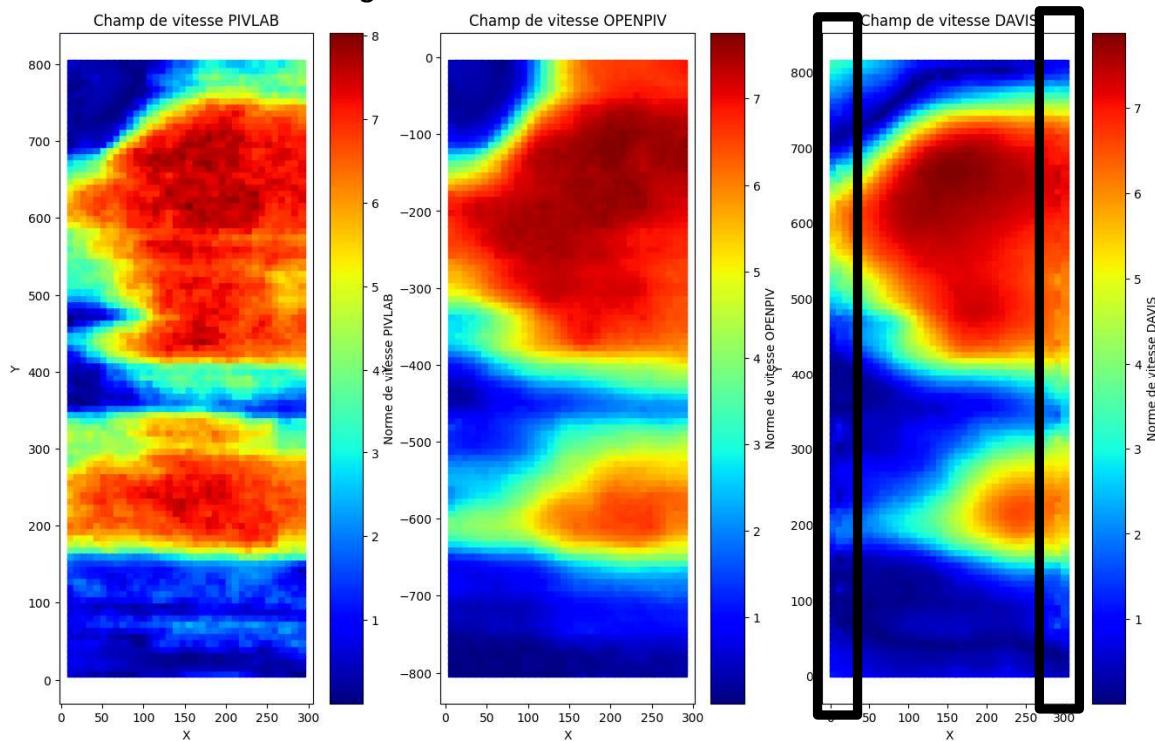


Figure 23 Cartes de vitesse test 3

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

On retrouve des artefacts visuels (entourés en noir) Figure 23 assez étranges sur la carte de vitesse de Davis apparues lors du débruitage qui n'ont aucune logique physique et que l'on ne retrouve pas dans les autres logiciels.

d Test 4 ajouts du pré-traitement optimal de Davis

Pour ce test final, nous avons appliqué la chaîne de pré-traitement et de post-traitement recommandée par la documentation Davis pour les images fortement bruitées et nous avons identifié et implémenté les algorithmes similaires sur Python.

PIVLAB est assez automatisé et possède le maximum de traitements possible :

Algorithmes ajoutés sur Davis :

- **Substract Sliding Background :**

Suppression du fond variable par moyenne glissante.

Permet d'éliminer les artefacts d'illumination non uniforme.

- **Amplification du Anisotropic Denoising** (algorithme de débruitage de Davis) :

La Figure 24 Distribution des vitesses test 4Figure 24 présente les distributions des composantes de vitesse (u et v) obtenues avec les trois logiciels et la Figure 25 les cartes de vitesse. Les observations principales sont les suivantes : **Amélioration notable de la qualité des champs** avec une réduction drastique des zones à vitesse nulle et un lissage plus homogène des vitesses.

Les résultats de PIVLAB ne changeant pas, il a été décidé de tracer les résultats de Davis du test 1 (avec le minimum de traitement) à la place pour le comparer à : Davis du test 4 avec le traitement optimal, et Python.

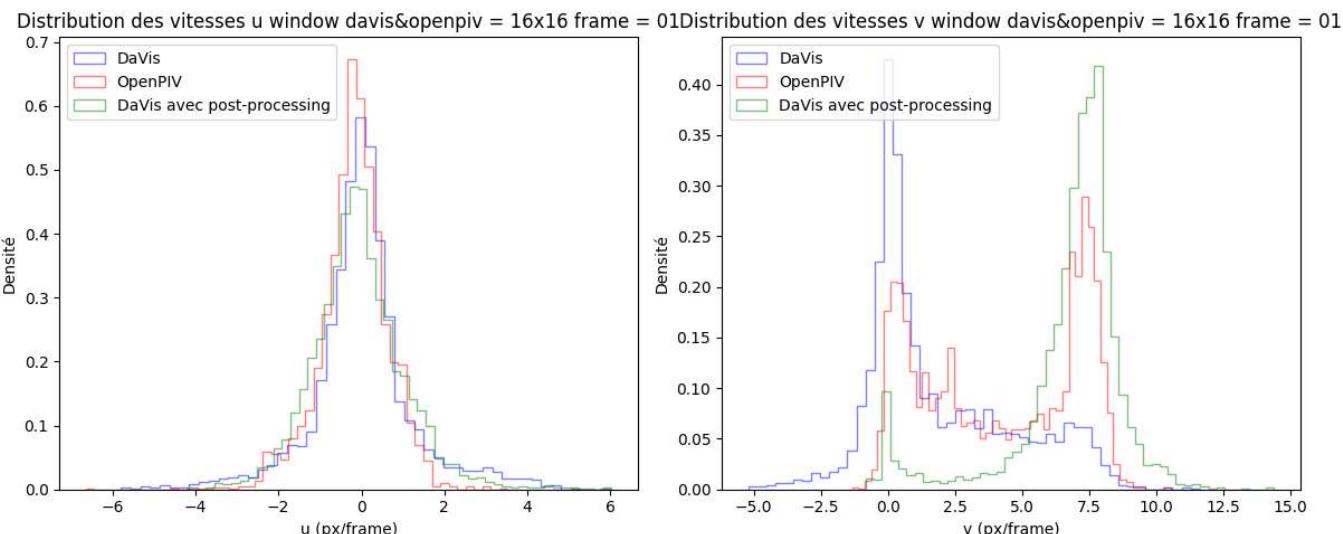


Figure 24 Distribution des vitesses test 4

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

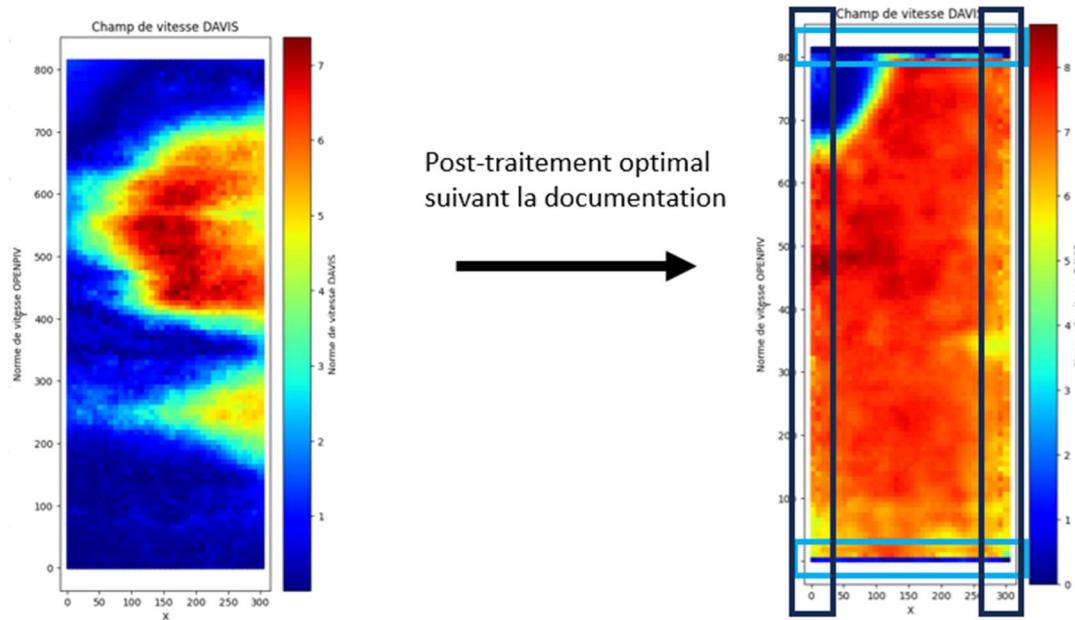


Figure 25 Carte de vitesse Davis test 1 et test 4

Les résultats semblent meilleurs au niveau du test 4, mais plusieurs questions se posent.

La distribution des vitesses entre le test 1 et le test 4 est complètement différente.

La carte de vitesse de DaVis avant et après pré-traitement supplémentaire montre un étalement de la vitesse sur l'ensemble de l'image, de plus il y a des motifs étranges sur la carte de vitesse.

2.1.5 Conclusion et discussion sur les tests de comparaison sur les jeux de données DN50

Cette première phase de comparaison avait pour objectif de déterminer si un outil open source permettait d'égaler voir de surpasser Davis.

A l'aide d'une comparaison fine avec ajout pas à pas des algorithmes de pré-traitement et de post-traitement, on a pu conclure que la différence des logiciels se faisait essentiellement sur ces traitements annexes. On a pu identifier les algorithmes permettant d'améliorer les résultats dans le cadre des images expérimentale DN50 et les implémenter en python du fait de la richesse de l'écosystème et des librairies disponibles.

Si le traitement optimal de Davis montre des résultats prometteurs sur DN50, son application à des écoulements complexes nécessite une évaluation plus approfondie.

Lors de cette première phase de test, des limitations ont été identifiées :

- Métriques d'évaluation approximatives sur images expérimentales,
- Impossibilité de contrôler complètement les paramètres de PIVlab et Davis dû à l'automatisation,
- Champs de vitesse générés par Davis de taille différentes que OpenPIV et PIVlab, sûrement dû à un traitement non identifié.

Les perspectives sont :

- Développement d'un outil sur la base de Python afin de pallier les limitations de Davis,
- Effectuer les prochaines phases de test sur images simulées avec écoulements plus complexes et métriques d'évaluation plus rigoureuses,
- Répondre aux questions :
 - Le post-traitement optimal de Davis est-il légitime ?
 - Les résultats sur DN50 s'améliorent car on est sur un écoulement laminaire mais qu'en est-il sur des écoulements plus complexes comme pour le projet Karst ?

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

2.2 Développement d'un outil d'analyse PIV

2.2.1 Contexte et objectifs

La première phase ayant démontré que l'on peut obtenir des résultats équivalents à Davis avec python, la solution envisagée a donc été le développement d'un programme en python intitulé OpenPIVGUI R108.

Pourquoi développer un nouvel outil d'analyse PIV ?

Dans le cadre du projet Karst, et de l'analyse des structures d'écoulement dans les modèles en 3D, l'outil développé a pour objectif de traiter les données expérimentales issues de la caméra haute vitesse (PHOTRON FASTCAM SA1) et de faciliter l'étude spatio-temporelle des champs de vitesse issus de la PIV. Un outil a donc été développé à partir du programme de OpenPIVGUI [6].

Ce travail s'inscrit également dans une volonté de doter IFPEN d'un environnement logiciel plus souple, personnalisable, et permettant d'être adapté à ses cas d'étude spécifiques, avec une interface utilisateur simple et une automatisation partielle des traitements complexes.

L'outil permet actuellement :

- D'être utilisable depuis le banc
- De permettre la conversion des fichiers MRAW de la caméra PHOTRON
- D'intégrer des outils d'analyse avancé d'intelligence artificielle ou de flot optique
- D'être adapté en fonction des besoins d'analyse de l'équipe diagnostics optique
- Pouvoir permettre dans de futur développement, une analyse des images en temps réelle depuis le banc.

2.2.2 Outils utilisés et développement

Le développement de l'outil a été effectuer sur la base du code du programme OpenPIVGUI [6], qui a été corrigé pour être exploitable.

Des outils d'analyse spatio-temporel ont été implémenté pour permettre l'analyse conjointe espace-temps dans le cadre de l'analyse des structures d'écoulements turbulentes, qui évoluent dans le temps, afin de pouvoir étudier leur dynamique.

- Base logicielle : OpenPIVGUI (Python, tkinter, matplotlib)
- Libraries: NumPy, SciPy, OpenCV, PyDMD, tqdm, PyMRAW

Fonctionnalités ajoutées :

a Conversion des fichiers MRAW

Objectif : Intégrer une fonctionnalité permettant la conversion directe des fichiers MRAW issus de la caméra PHOTRON, afin de simplifier le prétraitement des images PIV.

Fonctionnalités :

- Lecture des fichiers cihx associés pour affichage des métadonnées.
- Sélection du nombre d'images à extraire.
- Affichage et calculs de statistiques (valeurs min, max, moyenne) pour chaque image afin de les normaliser.
- Conversion en .tif avec barre de progression.

b Analyse des profils de vitesse

Objectif : Permettre à l'utilisateur d'extraire et visualiser rapidement les profils de vitesse (u ou v) selon un axe (x ou y), pour chaque champ ou moyenné sur l'ensemble de la série temporelle.

Fonctionnalités :

- Sélection de la composante de vitesse (u ou v), de l'axe, et de la position.
- Affichage dynamique du profil avec statistiques associées (min, max, moyenne, écart-type).
- Utilisation d'un cache pour fluidifier la navigation entre les champs.

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

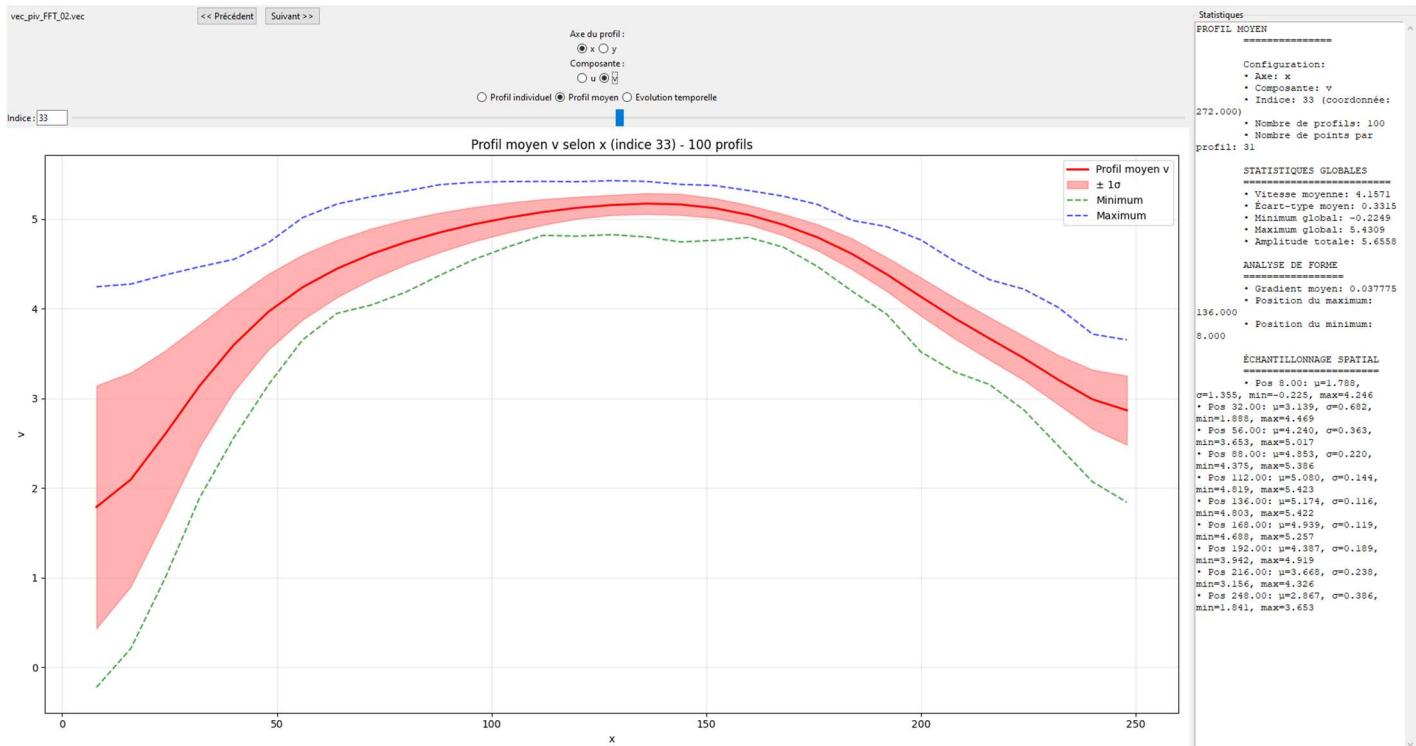


Figure 26 OpenPIVGUI avec un tracé du profil de vitesse moyen

c Validation manuelle des vitesses (inspirée de PIVLab)

Objectif : Fournir un outil de validation visuelle et de correction manuelle des champs de vitesse afin de supprimer les vecteurs aberrants.

Fonctionnalités :

- Visualisation complète des vecteurs de vitesse des fichiers chargés.
- Sélection par rectangle des zones à conserver ou supprimer.
- Sauvegarde des résultats avec interpolation automatique des zones masquées.

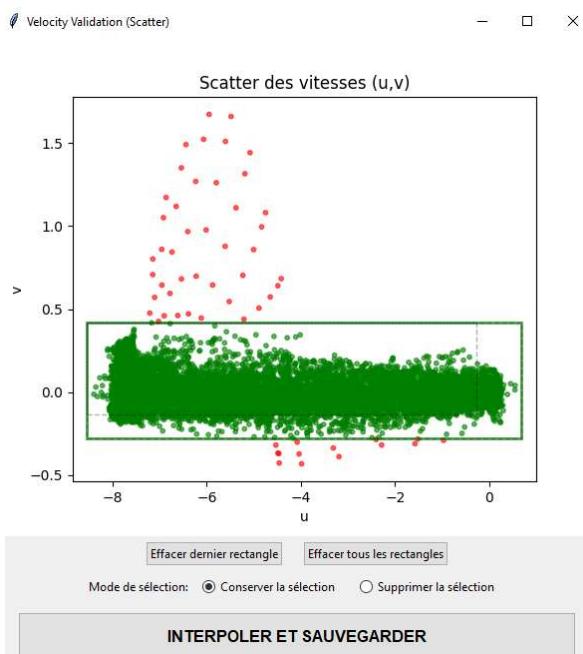


Figure 27 Fenêtre velocity validation de openpivgui

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

d Affichage de cartes spatio-temporelles des gradients de vitesse

Objectif : Identifier et analyser l'évolution de structures cohérentes en visualisant les gradients temporels des champs de vitesse.

Fonctionnalités :

- Lissage temporel par filtre de Savitzky-Golay.
- Calcul de $\partial u / \partial t$, $\partial v / \partial t$, ou $||\nabla u||$ à une position donnée.
- Affichage des cartes spatio-temporelles pour interprétation physique.

Interprétation :

- $\partial u / \partial t > 0$: accélération (zones rouges)
- $\partial u / \partial t < 0$: décélération (zones bleues)
- $||\nabla u||$ élevé : forte variation

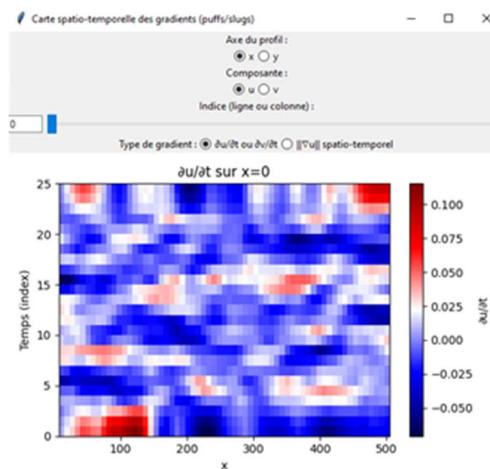


Figure 28 Fenêtre carte spatio-temporelle des gradients

e Outils d'analyse avancée des champs de vitesse

Objectif : proposer des visualisations avancées de champs dérivés, afin de mieux comprendre les phénomènes physiques présents dans l'écoulement.

Fonctionnalités :

- Vorticité ($\omega = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$) : met en évidence la rotation locale du fluide [23].
- Divergence ($\nabla \cdot v = \partial u / \partial x + \partial v / \partial y$) : permet de repérer les zones d'erreur dans le cas d'un fluide incompressible, sinon, permet de détecter les zones de dilatation ou de compression [24].
- Taux de cisaillement ($\dot{\gamma} = \sqrt{(\partial u / \partial y + \partial v / \partial x)^2}$) : mesure les déformations tangentielles et donc permet de détecter les frottements [25].
- Critère-Q ($Q = \frac{1}{2} (||\Omega||^2 - ||S||^2)$) : permet de détecter les structures tourbillonnaires [26].

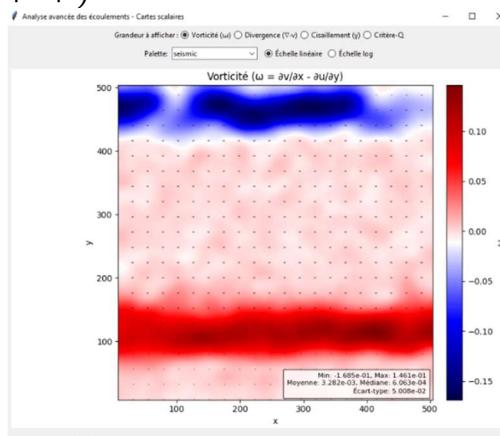


Figure 29 Fenêtre d'analyse avancée des écoulements, tracé de la vorticité sur un écoulement laminaire

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

f Outils d'analyse DMD

Objectif : Décomposer l'écoulement en modes dynamiques afin d'isoler des structures cohérentes dans le temps et l'espace, afin de les caractériser et d'analyser leur évolution.

Implémentation : Utilisation de la librairie **PyDMD** [33], basée sur la décomposition en valeurs singulières (SVD).

Résultats affichés :

- **Valeurs singulières** (énergie de chaque mode)
- **Valeurs propres discrètes** λ_k (stabilité)
- **Valeurs propres continues** ω_k (taux de croissance/décroissance, fréquence)
- **Modes spatiaux** : cartes des vecteurs propres
- **Dynamiques temporelles** : évolution de l'amplitude de chaque mode

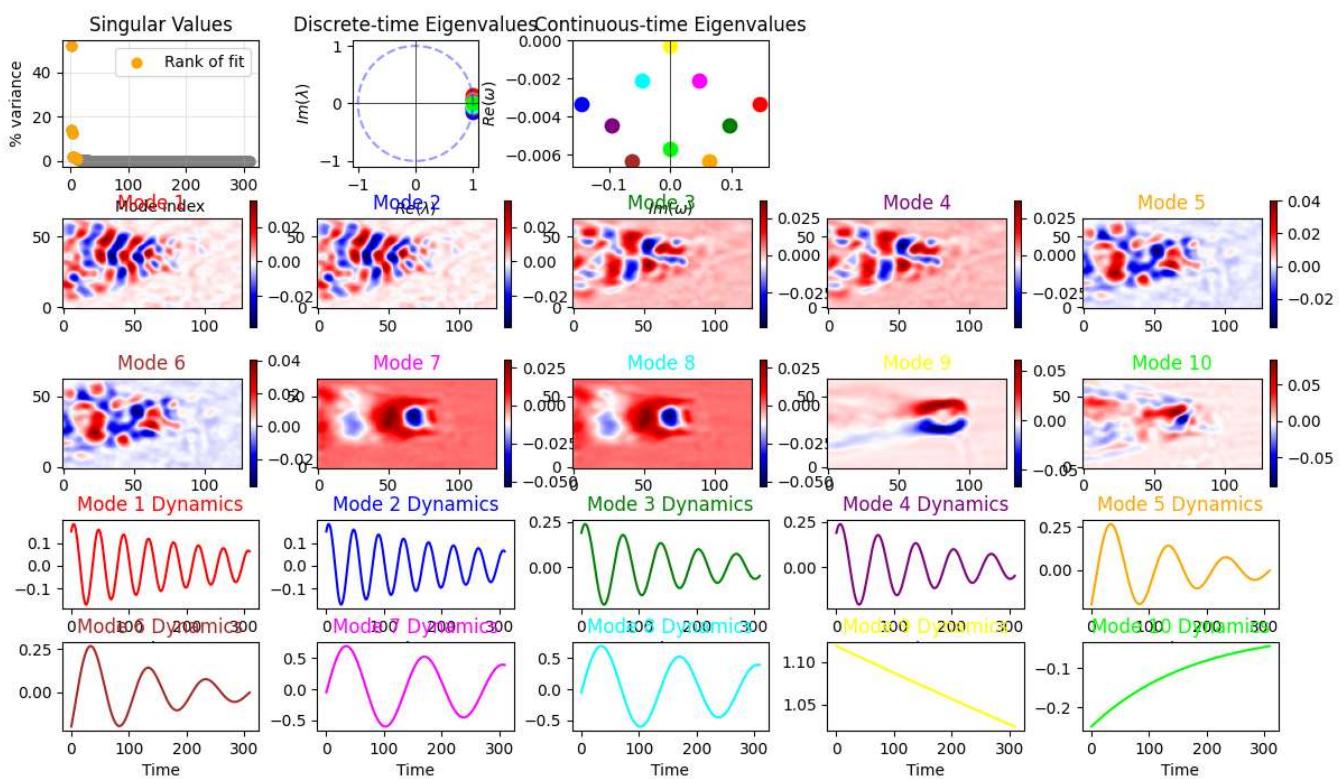


Figure 30 Analyse DMD sur un jeu d'image PIV avec l'outil d'analyse développé

g Outils de prétraitement

- Rognage automatique : sélection manuelle d'une zone à conserver, application identique sur toutes les images.
- Rognage contraint : rognage selon des dimensions multiples de 8 (pour compatibilité avec les modèles IA).
- CLAHE (Contrasted Limited Adaptive Histogram Equalization) : amélioration du contraste local par histogramme adaptatif.

2.2.3 Conclusion sur OpenPIVGUI R108

L'outil développé OpenPIVGUI R108 a été doté de plusieurs fonctionnalités d'analyse spatio-temporelle qui ont pour vocation l'étude de l'évolution des structures turbulentes jusqu'à l'échelle de Kolmogorov afin de permettre d'établir les bilans énergétiques. Cet outil a été dimensionné spécialement pour les cas d'étude de IFPEN et son matériel afin d'optimiser la chaîne de traitement (workflow) voir Figure 31.

L'outil développé a été déployé sur l'ordinateur du banc Karst. Il est désormais possible d'effectuer les analyses depuis le banc. Du fait de l'automatisation des traitements et du paramétrage optimisé, l'outil permet de lancer un

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

traitement facilement et rapidement et d'être utilisé par une personne non initiée à la PIV afin de mesurer les déplacements dans les images. L'optimisation des temps de calculs grâce au calcul en parallèle permet à l'outil d'obtenir en moins de 5 min, les champs de vitesses depuis la conversion jusqu'aux résultats de la corrélation croisée.

Opération	Conversion MRAW-TIFF	Rogner les images	CLAHE (~ égalisation des histogrammes)	Analyse PIV	Total
Temps en min:seconde	3:00	00:37	00:28	00:32	4:37

Tableau 1 Temps de traitement de OpenPIVGUI R108 sur 200 images

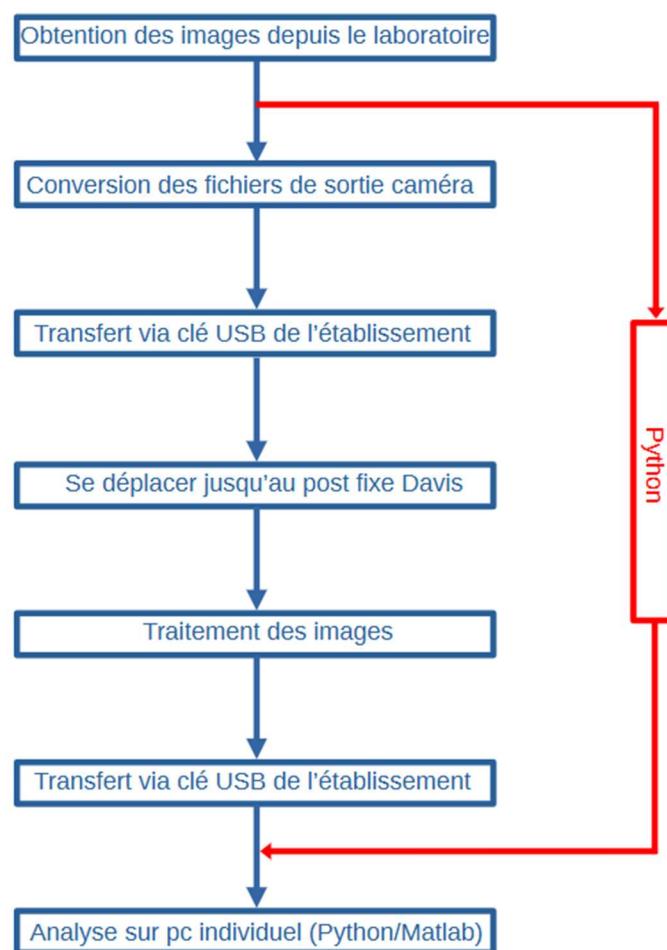


Figure 31 Workflow PIV après déploiement de OpenPIVGUI R108

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

2.3 Intégration de l'intelligence artificielle dans la caractérisation des écoulements

2.3.1 Contexte et objectif

Il existe des outils d'intelligence artificielle et de flot optique qui permettent un traitement multi-échelle et donc :

- Une bonne résolution spatiale : pour détecter les petites structures.
- Une grande fenêtre d'observation : pour capturer les grandes structures.

Ces outils de traitement multi-échelle pourraient ouvrir la voie à une mesure plus fine et plus précise des écoulements, permettant de pallier les limitations des méthodes coarse to fine et donc la mesure de structures turbulentes de grande taille évoluant jusqu'à l'échelle de Kolmogorov.

Par ailleurs, l'intégration de modèles d'intelligence artificielle permet de tirer parti de la puissance de calcul des cartes graphiques, rendant possibles des estimations rapides, voire en temps réel, des champs de vitesse.

2.3.2 Outils utilisés

a Modèles d'analyse avancé d'IA et de flot optiques

RAFT (Recurrent All-Pairs Field Transforms)

RAFT est un modèle d'apprentissage profond pour le flux optique dense. Contrairement aux méthodes coarse to fine, RAFT maintient le champ de flux à résolution constante, évitant la perte de structures fines ou de grands déplacements mal initialisés.

Forces de RAFT :

- Volume de corrélation "All-Pairs" entre tous les pixels des deux images, détection des grands déplacements et mouvements fins simultanément.
- GRU (Gated Recurrent Unit) convolutifs, un type de réseau de neurone récurrent, c'est-à-dire qui permet une mise en mémoire à court et long terme, pour un raffinement itératif (>100 étapes), avec poids partagés, rendant le modèle compact (~5M paramètres), le GRU est plus simple que le LSTM (un autre réseau récurrent), et permet un traitement rapide des images.
- Recherche multi-échelle dans le volume de corrélation.

Contribution

Implémenté dans un script python à partir du modèle pré-entraîné disponible sur pytorch.

RAFT-PIV : Un modèle dérivé de RAFT adapté pour l'analyse PIV

RAFT-PIV est une version modifiée de RAFT, entraînée sur des données PIV.

RAFT-PIV travaille directement sur les images d'origine et analyse les déplacements dans des zones (32x32 ou 256x256) autour de chaque point.

Deux variantes sont proposées :

- RAFT32-PIV : haute résolution spatiale (32x32 px), adaptée aux images avec ensemencement denses.
- RAFT256-PIV : résolution plus large (256x256 px), plus robuste en cas de bruit ou faible densité de particules.

Contribution

Code initialement prévu pour tourner sur un environnement Linux avec Nvidia DALI, il a donc été adapté pour permettre son utilisation sur les ordinateurs de IFPEN sous Windows.

Puis rendu exploitable pour l'analyse avec génération de fichiers texte des champs de vitesses estimé et analyse automatisé de l'ensemble des fichiers d'un dossier.

b Wavelet-based Optical Flow Velocimetry (WOFv)

WOFv est un modèle d'analyse avancé, présent dans PIVLAB, il repose sur les principes du flot optique (suivi du mouvement des pixels) combinés à une technique mathématique appelée transformée en ondelettes (wavelets), qui permet un traitement multi-échelles.

WOFv vise à surmonter les limitations de la PIV classique en exploitant les avantages des ondelettes et du flot optique variationnel, offrant une estimation du champ de vitesse plus précise et plus résolue, notamment dans des contextes complexes comme les écoulements turbulents près des parois [24].

Diffusion	Étude	N° chrono direction	Date	Page
	XXX00-000		jj/mm/aaaa	36/67

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

c Programme de génération d'images

Le programme piv-image-generator, développé sous MATLAB [56][57] a été choisi pour la création des jeux d'image synthétiques du deuxième test.

Ce programme permet de générer des paires d'images de PIV simulées se rapprochant des images expérimentales, en fournissant en plus le champ de vitesses exact (fichiers .m) servant de vérité terrain (ground truth).

Le programme permet de définir une large gamme de paramètres permettant d'explorer de nombreux cas expérimentaux réalistes.

Les principaux sont :

- FlowParameters.maxVelocity (vitesse max)
- PivParameters.lastwindow (taille des fenêtres d'interrogation)
- PivParameters.laserSheetThickness (épaisseur de la couche laser)
- ImageProperties.mmPerPixel (mm par pixel)
- Piv.Parameters.particuleIntensityPeak (max intensité lumière reflétée)
- Taille des images
- Densité de particules
- Taille des particules
- Déplacements
- Niveau de bruit
- Ecart-type hors plan (Ecart-type de distribution gaussienne permettant de simuler l'illumination des particules par une couche de laser)

Ce dernier paramètre associé à la distribution au hasard des particules dans un plan cartésien en 3D permet d'obtenir des particules illuminées en fonction de leurs coordonnées.

Cela permet donc d'avoir des variations de tailles des particules et du flou (dû au focus de la caméra) en fonction de la profondeur de ces dernières.

d Métriques d'évaluation

Les images à analyser sont accompagnées d'un champ de référence (ground-truth), que l'on va pouvoir comparer aux champs estimés par les différents outils.

Pour améliorer la comparaison, une recherche des métriques utilisées dans la littérature lors de « benchmark » de modèle d'IA et de flot optique ainsi que des outils de comparaison d'image a été effectuée.

Les métriques sélectionnées sont les suivantes :

- Erreur Angulaire

Pour l'erreur angulaire on calcule la différence entre l'angle du vecteur estimé et celui du ground-truth

$$\vec{u} \cdot \vec{v} = \|\vec{u}\| \cdot \|\vec{v}\| \cos \theta$$

Donc :

$$\theta = \arccos \left(\frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{\|\vec{u}\| \cdot \|\vec{v}\|} \right)$$

Objectif : Mesurer la différence de direction entre deux vecteurs (estimation vs ground-truth). Cela va nous permettre d'identifier les outils avec la meilleure précision angulaire.

- Corrélation de Pearson

On utilise `scipy.stats.pearson`, une fonction de la librairie `scipy` afin de calculer la corrélation de pearson.

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

$$r = \frac{\sum(x - m_x)(y - m_y)}{\sqrt{\sum(x - m_x)^2(y - m_y)^2}}$$

Objectif : Évaluer la similarité entre les champs estimés et le ground-truth. Une corrélation proche de 1 signifie que les variations de la vitesse sont fidèlement reproduites.

- Erreur Quadratique Moyenne (RMSE)

Objectif : Quantifier l'erreur globale (sensible aux grosses erreurs). Plus RMSE est faible, meilleure est l'estimation. Le RMSE est optimal pour les erreurs de type normales/gaussiennes.

- Erreur Absolue Moyenne (MAE)

Objectif : Fournir une mesure d'erreur plus robuste que RMSE. Moins sensible aux grandes valeurs aberrantes. Optimal pour les erreurs de type Laplaciennes

- Endpoint Error (EPE)

Distance euclidienne entre le vecteur estimé et le vecteur gound-truth.

Nous allons utiliser le average end point error :

$$\begin{aligned} AEE(F, F_{gt}) &= \frac{1}{H \times W} \sum_{i=0}^{W-1} \sum_{j=0}^{H-1} EE(f(i,j), f_{gt}(i,j)) \\ &= \frac{1}{H \times W} \sum_{i=0}^{W-1} \sum_{j=0}^{H-1} \sqrt{(u(i,j) - u_{gt}(i,j))^2 + (v(i,j) - v_{gt}(i,j))^2} \end{aligned}$$

Où :

- gt signifie ground-truth, le vecteur vrai
- H Height
- W Width
- U composante vitesse horizontale
- V composante vitesse verticale
- i localisation du pixel sur l'axe horizontal
- j localisation du pixel sur l'axe vertical

Objectif : Calculer la distance entre les vecteurs estimés et réels. Représente une erreur globale au niveau pixel. C'est une métrique utilisée pour comparer les modèles de flot optique.

- SSIM (structural similarity) :

Le SSIM (Structural Similarity Index Measure) est une métrique de qualité d'image conçue pour évaluer la similarité entre deux images, proposé par Wang et al. (2004).

L'indice SSIM est compris entre -1 et 1, avec une valeur de 1 indiquant une similarité parfaite entre les deux images. Sur la page internet de skimage ssim [61], nous avons un exemple d'utilisation avec l'image originale, une image bruitée et une image avec un contraste moins élevé.

Les 3 images donnent le même MSE alors que le SSIM donne une valeur plus représentative de la similarité :

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

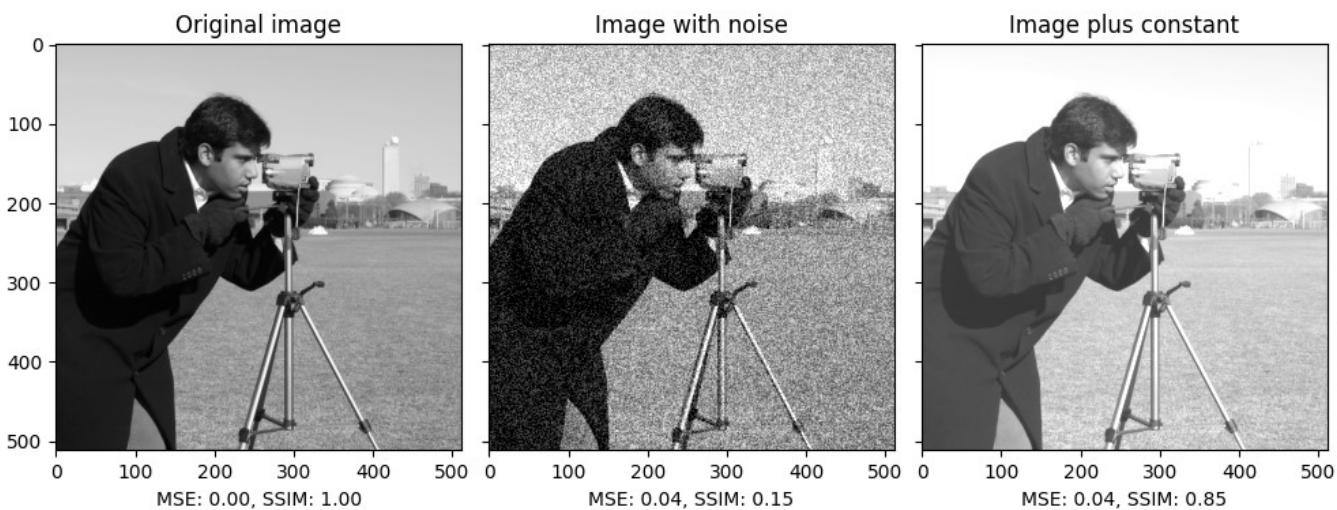


Figure 32 Résultat SSIM et MAE sur différentes images, source skimage.metrics

L'image bruité est l'image originale sur laquelle il a été aléatoirement fixé des pixels en noir. Cette image a donc perdu des informations locales et globale comme les variations d'intensité qui permette dans le cadre de l'application de filtre de détecter les structures de l'image (bords, contours, ...). En revanche image avec le contraste moins élevé possède encore l'intégralité des informations, qui sont juste atténuees.

La métrique du SSIM permet donc d'obtenir un indice de similarité plus représentatif de la similarité des informations présentes dans les images.

Cette métrique semble intéressante dans le cadre de la comparaison des cartes de vitesses.

2.3.3 Comparaison visuelle résolution spatiale de la corrélation croisée et de l'IA

Pour comprendre la différence entre les résolutions d'estimation de la corrélation croisée et de l'intelligence artificielle, une comparaison visuelle a été effectuée sur une même paire d'image d'un écoulement, qui génère des structures appelées allées de Von Karman Figure 33, entre Davis, avec des fenêtres de taille 16x16 pixels, et RAFTPIV un modèle d'IA.

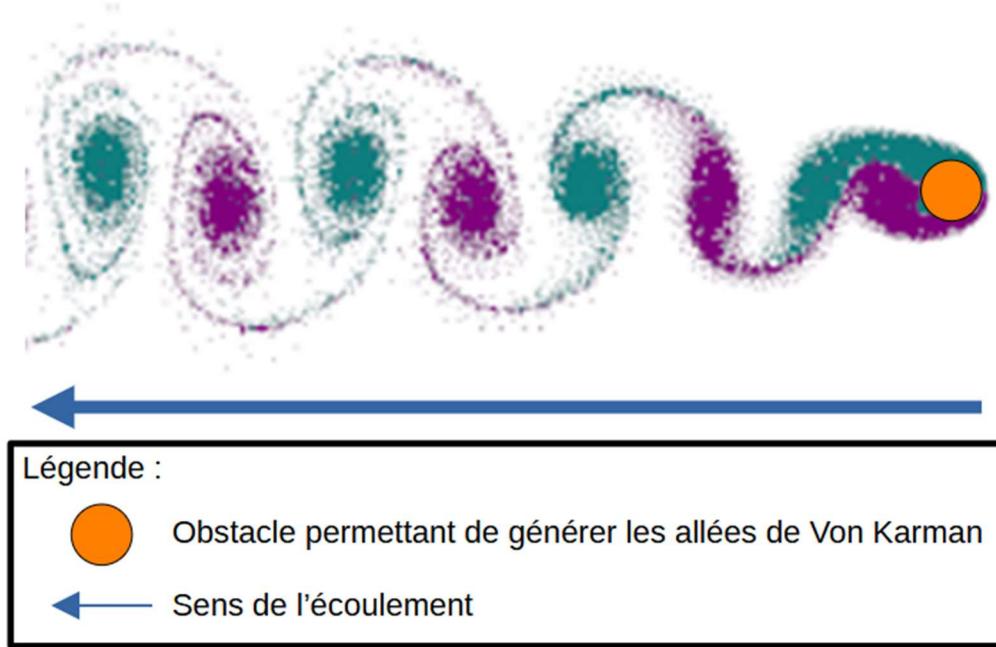


Figure 33 Schéma des allées de Von Karman

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

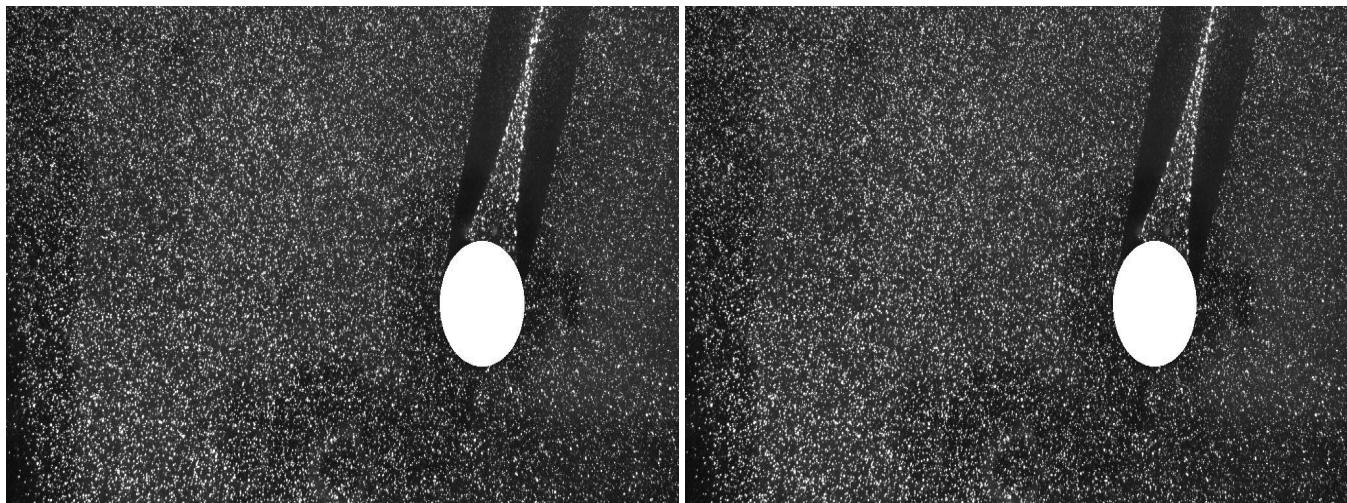


Figure 34 Paire d'images analysée pour la comparaison visuelle Davis (corrélation croisée) vs RAFTPIV (IA)

Les images correspondent à l'écoulement de la Figure 33, le sens d'écoulement est de la droite des images à la gauche, une pince permet de tenir un obstacle (rond blanc Figure 34) qui permet de générer les allées.

Tracé des cartes de vitesses estimées :

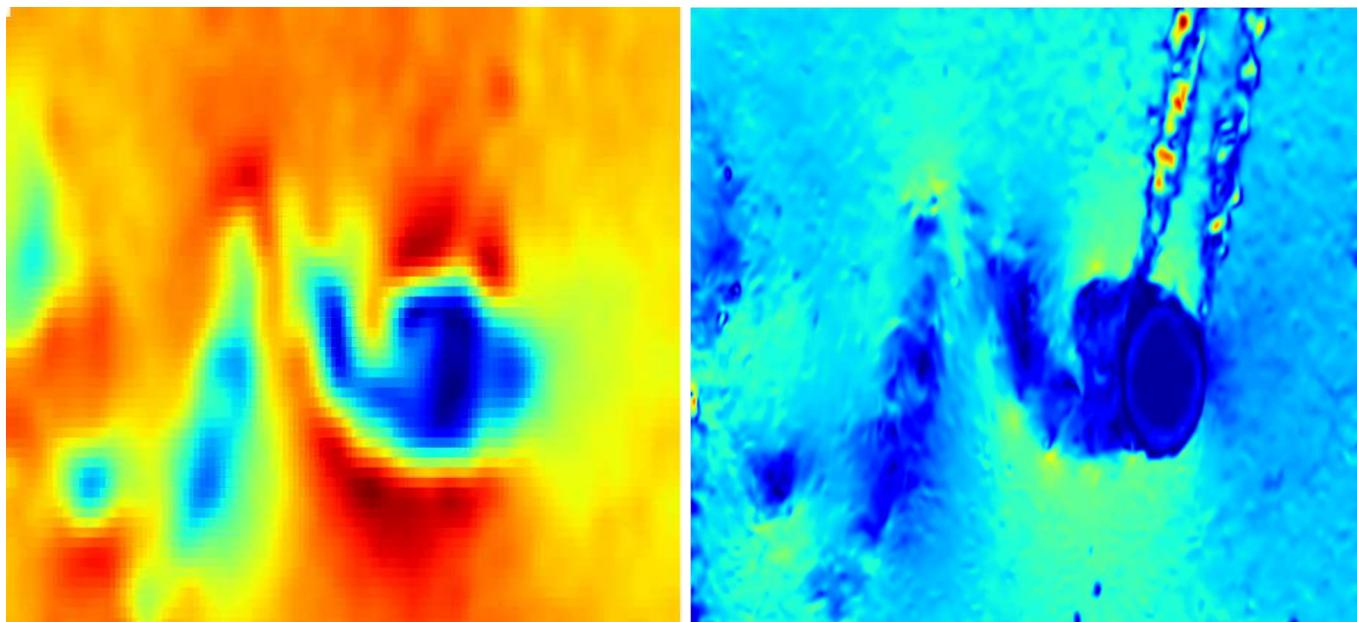


Figure 35 Comparaison champs de vitesse Davis 16x16 (Corrélation croisée) et RAFT32-PIV (IA)

La Figure 35 présente les vitesses estimées de Davis et du modèle d'IA sur une même paire d'image, les observations principales sont les suivantes :

- Les pinces de la paire d'image Figure 34 ont disparues sur la carte des vitesses de Davis
- Les deux outils détectent globalement les mêmes structures de vitesses
- On perd moins d'information sur l'écoulement grâce au modèle d'IA et son traitement multi-échelle

Cette analyse visuelle met en évidence l'importance de la résolution de mesure des vitesses dans le cadre d'écoulements complexes. Le modèle d'IA ouvre la voie à une analyse plus résolue spatialement des écoulements.

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

2.3.4 Comparaison sur image synthétique test 1 écoulement laminaire

a Objectifs

Le premier test sur écoulement laminaire a pour objectif de valider la précision et la robustesse de *OpenPIVGUI* l'outil développé, sur des images synthétiques parfaites (sans bruit ni artefacts) car lors de la première phase, les algorithmes implémentés étaient ceux améliorant les résultats dans le cadre d'un écoulement laminaire très bruité, et de comparer les performances entre les méthodes classiques (coarse to fine) OpenPIV, PIVLab, Davis et les méthodes avancées (traitement multi-échelle) de flot optique (WOFv) et d'apprentissage profond (RAFT, RAFT-PIV).

b Notebook pour l'évaluation

Les performances des méthodes ont été évaluées à l'aide d'un notebook Python dédié, permettant le calcul de plusieurs métriques globales de qualité.

Tout d'abord, la **corrélation** a été mesurée pour les composantes **u** et **v** ainsi que pour la **norme** du champ de vitesse, afin d'évaluer la fidélité globale des estimations par rapport au champ de référence.

L'**erreur angulaire moyenne** a permis d'évaluer la précision directionnelle des vecteurs, tandis que le pourcentage de vecteurs présentant une erreur angulaire inférieure à 5° a quantifié la part de vecteurs « bien orientés ».

Des métriques d'amplitude telles que la Root Mean Square Error (**RMSE**) et la Mean Absolute Error (**MAE**) ont été utilisées pour évaluer la précision globale sur la magnitude des vecteurs.

La Mean End-Point Error (**EPE**) a fourni une mesure synthétique de l'erreur sur les deux composantes du vecteur, et le pourcentage d'EPE inférieur à 1 pixel a permis d'identifier le taux de très bonnes estimations.

Enfin, l'indice de similarité structurale (**SSIM**) a été calculé sur les cartes de norme des champs, afin d'obtenir un indicateur scalaire de la similarité entre les estimations et les données de référence.

c Création des images du premier test

Les images ont une résolution de 1000×1000 pixels, et contiennent 5000 particules uniformément réparties dans le champ. Le déplacement imposé est purement vertical, suivant une distribution gaussienne centrée à 500 pixels, avec un déplacement maximal de 5 pixels.

Le champ de déplacement de référence (ground truth) est connu avec précision et fourni sous forme de fichier texte, permettant une évaluation quantitative rigoureuse des algorithmes de mesure.

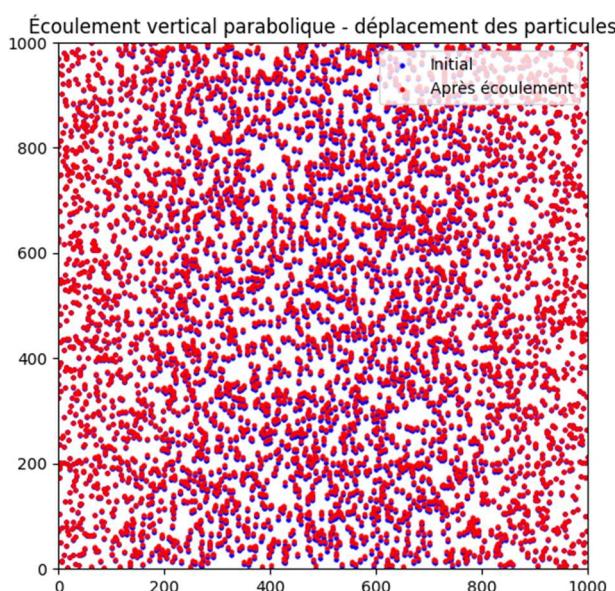


Figure 36 Différence images 1 et 2, test 1 simulation

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

3. Résultats de l'évaluation (métriques)

La Figure 37 présente le premier tableau des résultats des métriques d'évaluation pour chaque outil, les observations sont les suivantes :

- OpenPIV (fenêtre 32×32) affiche la meilleure corrélation, notamment sur la composante v (corrélation de Pearson), ce qui démontre une bonne fidélité du champ de vitesse estimé.
- RAFT-PIV32 échoue à produire des résultats exploitables, ce qui est cohérent avec les limites rapportées dans l'article associé concernant sa sensibilité à une faible densité de particules.
- PIVLab (fenêtre 32×32) atteint la plus faible erreur angulaire moyenne, indiquant une excellente précision directionnelle dans l'estimation du champ de vitesses.

Remarques :

Le fait que les tailles de fenêtres optimales soient de 32×32 pixels suggère une densité d'ensemencement relativement faible dans les images testées.

Cette sensibilité des outils avancés comme RAFT-PIV face aux faibles ensemencements renforce l'intérêt d'avoir un outil d'analyse a priori des images, afin de guider l'étalonnage des images expérimentales et le choix des paramètres de traitement afin optimiser les performances des algorithmes.

Outils	Corr_u	Corr_v	Corr_norm	Erreur angulaire moyenne (°)	% vecteurs valides (erreur angle < 5°)
0 Davis16	NaN	0.993	0.993	7.191	80.454
1 Davis32	NaN	0.988	0.987	12.137	78.096
2 OpenPIV16	NaN	0.996	0.996	3.265	97.945
3 OpenPIV32	NaN	0.997	0.997	3.759	83.668
4 PIVlab16	NaN	0.993	0.993	1.498	98.851
5 PIVlab32	NaN	0.991	0.991	0.851	98.278
6 wOFV	NaN	0.979	0.979	7.175	92.585
7 RAFT-PIV256	NaN	0.985	0.985	7.932	86.280
8 RAFT-PIV32	NaN	0.943	0.950	16.383	84.080
9 RAFT	NaN	0.975	0.974	6.456	81.520

Figure 37 Tableau de métriques 1 test 1 simulation

La Figure 38 présente le deuxième tableau de résultats des métriques d'évaluation pour chaque outil testé. Les principales observations sont les suivantes :

- OpenPIV (fenêtre 16×16) obtient les meilleurs scores en RMSE et en EPE moyen, indiquant une erreur euclidienne minimale sur l'ensemble du champ de vitesses estimé.
- Davis (fenêtre 16×16) présente la meilleure erreur absolue moyenne (MAE), traduisant une bonne précision globale sur les vecteurs de déplacement.

Interprétation :

OpenPIV montre une meilleure robustesse face aux erreurs localisées : le RMSE étant particulièrement sensible aux outliers, un bon score signifie que l'outil limite efficacement les erreurs importantes sur certaines régions de l'image.

Davis, quant à lui, offre une meilleure précision moyenne avec un MAE plus faible, ce qui peut indiquer une estimation plus homogène sur l'ensemble du champ de vitesses.

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

	Outils	RMSE_u	RMSE_v	RMSE_norm	MAE_u	MAE_v	MAE_norm	Mean_EPE	% EPE < 1px
0	Davis16	0.1175	0.5965	0.5902	0.1049	0.5677	0.5590	0.5822	97.8327
1	Davis32	0.1296	0.6712	0.6541	0.1212	0.6404	0.6155	0.6547	95.8790
2	OpenPIV16	0.0028	0.5903	0.5889	0.0015	0.5712	0.5684	0.5712	99.6506
3	OpenPIV32	0.1082	0.6096	0.6058	0.0849	0.5907	0.5854	0.6016	99.7411
4	PIVlab16	0.0068	0.6296	0.6290	0.0038	0.5964	0.5950	0.5964	98.8506
5	PIVlab32	0.0109	0.6821	0.6819	0.0064	0.6432	0.6428	0.6433	90.2906
6	wOFV	0.0058	0.6561	0.6553	0.0034	0.5889	0.5880	0.5889	97.9158
7	RAFT-PIV256	0.0759	0.6948	0.6921	0.0529	0.6386	0.6346	0.6430	86.4600
8	RAFT-PIV32	0.1265	0.9860	0.9649	0.0614	0.8525	0.8431	0.8578	67.4000
9	RAFT	0.1377	0.7688	0.7668	0.0880	0.7054	0.7027	0.7215	84.7200

Figure 38 Tableau de métriques 2 test 1 simulation

La Figure 39 présente le tableau des scores SSIM (Structural Similarity Index) obtenus pour chaque outil évalué. On observe que OpenPIV avec une fenêtre de 32×32 affiche le meilleur score SSIM, ce qui traduit une meilleure similarité structurelle entre les cartes de vitesses estimées et le champ de vitesses de référence (ground truth). Cela suggère que, visuellement, les champs de vitesse générés par OpenPIV sont les plus fidèles à la structure du champ réel, en termes de répartition spatiale des vecteurs et de cohérence locale.

Outils	SSIM_heatmap_norm
0 Davis16	0.8850
1 Davis32	0.9004
2 OpenPIV16	0.9226
3 OpenPIV32	0.8946
4 PIVlab16	0.8870
5 PIVlab32	0.8651
6 wOFV	0.7682
7 RAFT-PIV256	0.8276
8 RAFT-PIV32	0.0642
9 RAFT	0.5884

Figure 39 Tableau de métrique 3 test 1 simulation

Résumé du premier test sur images simulées

Méthode	Avantages	Limitations
OpenPIV	Meilleure corrélation, SSIM, RMSE	Erreur angulaire légèrement plus élevée que PIVLAB
PIVLab	Précision angulaire optimale	Moins performant en RMSE/EPE
Davis	MAE le plus faible	Performances moyennes sur autres métriques
RAFT-PIV	Non adapté aux faibles densités	Requiert des données denses
WOFV	Non adapté aux faibles densités	Requiert des données denses
RAFT	Non adapté aux faibles densités	Requiert des données denses

Tableau 2 Résumé des résultats du premier test sur image simulées

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

Cette analyse confirme la supériorité des méthodes classiques (OpenPIV, PIVLab) pour les écoulements laminaires synthétiques avec de faibles ensemencements, tandis que les approches deep learning (RAFT-PIV, RAFT) et de flot optique (WOFV), montrent des limites dans des conditions sous-optimales. Ce premier test montre l'importance des paramètres des images PIV comme la densité de particules qui est un paramètre critique pour la précision des outils et donc renforce notre avis sur l'utilité d'un outil permettant d'extraire les statistiques des images expérimentales.

Prochaine étape : Evaluation sur des écoulements non linéaires (vortex) pour évaluer la robustesse aux gradients de vitesses.

2.3.5 Comparaison sur image synthétique test 2 écoulement vortex Rankine avec variation de paramètres

a Contexte et objectifs

D'après la littérature, les méthodes basées sur la corrélation croisée sont sensibles au déplacement des particules dans la fenêtre. Au-delà de 25–50 % de déplacement relatif, les performances chutent [16]. Il en est de même pour les paramètres de densité des particules, de leur taille et du niveau de bruit.

L'objectif de cette deuxième phase de comparaison est d'évaluer les différents outils sur des images simulées et contrôlées permettant de faire varier les paramètres et d'évaluer la robustesse des estimations.

b Génération des image PIV

Pour faciliter la phase d'évaluation et permettre de générer des écoulements plus complexes, nous utiliserons le programme piv-image-generator [56] afin de générer des images d'un écoulement de type vortex de Rankine[57], Figure 40.

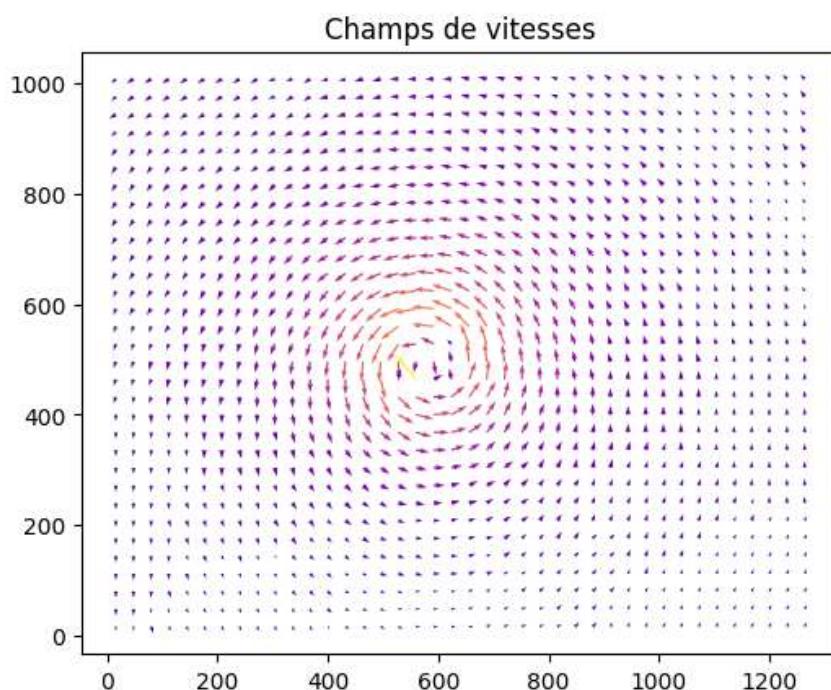


Figure 40 Quiver plot de l'analyse d'une paire d'images sur un écoulement de vortex de Rankine

Paramètres explorés :

- Type d'écoulement simulé : Vortex de Rankine
- Déplacements : 0.05, 0.1, 0.25 × 16 px (soit 0.8 à 4 px)
- Densité de particules par fenêtre 16x16 : 2, 4, 6, 8, 10, 12
- Niveaux de bruit : 0 à 10

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

L'objectif est de faire varier un paramètre à la fois, tout en gardant les autres constants, pour observer l'évolution des performances des outils.

Pour chaque variation, les résultats seront tracés et comparés sous forme de courbes de performance, permettant :

- D'identifier les plages optimales d'utilisation de chaque outil,
- De classer les outils selon leur robustesse vis-à-vis de chaque type de perturbation,
- Et d'associer les meilleurs résultats aux paramètres spécifiques de génération.

c Outils PIV comparés

Les outils comparés sont : OpenPIV, PIVLab, Davis, OpenPIV_denoised (OpenPIV avec débruitage), WOFV, RAFT32-PIV, RAFT256-PIV.

Les outils ont été utilisés en configuration standard (OpenPIV, Davis, PIVLAB, RAFT et RAFT-PIV) et avec l'ajout de débruitage en post-traitement pour OpenPIV (OpenPIV_denoised) afin d'obtenir des informations permettant de savoir quand utiliser le débruitage afin d'obtenir les meilleures estimations.

d Résultats

Impact de la densité sur les performances

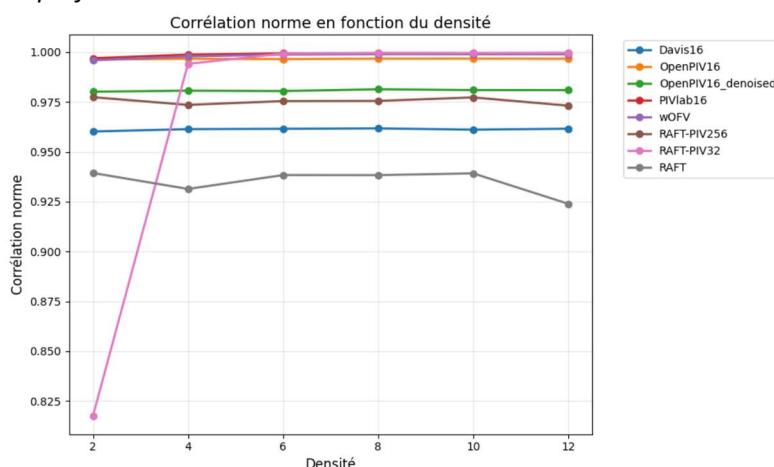


Figure 41 Evolution de la moyenne des corrélations des normes de vitesses entre outil et ground-truth en fonction de la densité test 2 simulation

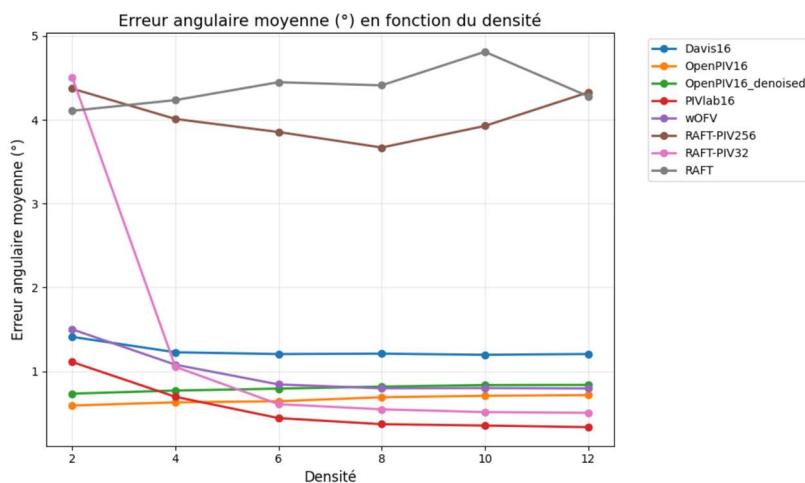


Figure 42 Evolution de l'erreur angulaire moyenne en fonction de la densité test 2 simulation

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

Conclusions sur l'impact de la densité sur les performances

PIVLAB montre une chute de performance sous 6 particules/fenêtre sur les métriques de précision angulaire Figure 42. OpenPIV reste le plus stable. Les résultats de RAFT32-PIV confirme sa faible robustesse aux faibles densités de particules, mais se classe parmi les meilleurs outils lorsque la densité est supérieure ou égale à 6.

Les résultats de Davis sont moyens mais restent stables.

Impact du déplacement

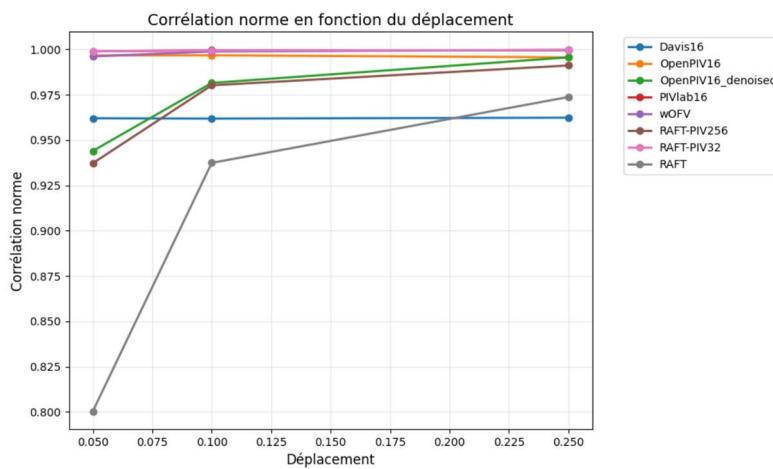


Figure 43 Evolution de la moyenne des corrélations des normes de vitesse entre outils et ground-truth en fonction du déplacement test 2 simulation

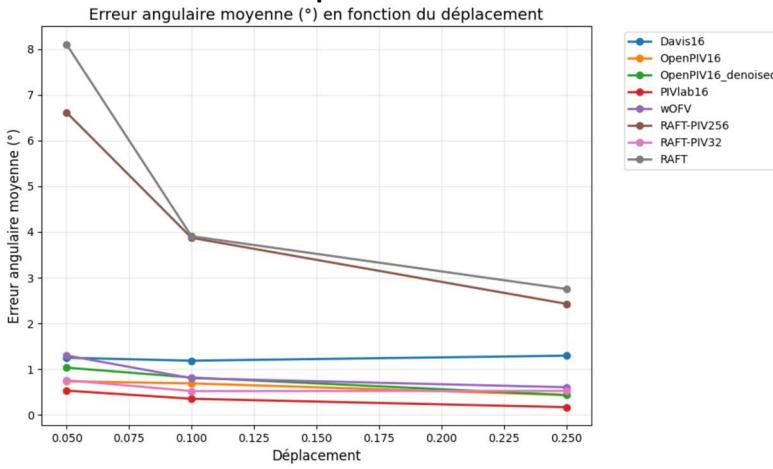


Figure 44 Evolution de l'erreur angulaire moyenne en fonction du déplacement test 2 simulation

Conclusion sur l'impact du déplacement

Dans l'ensemble, la majorité des outils testés présentent une stabilité raisonnable face à l'augmentation du déplacement dans la plage évaluée. Les performances de RAFT et RAFT-PIV256 s'améliorent progressivement avec l'augmentation du déplacement, suggérant une bonne capacité à capter les structures de mouvement plus marquées.

En revanche, les métriques RMSE et MAE indiquent une dégradation des performances pour Davis à mesure que le déplacement augmente. Cette baisse est particulièrement marquée pour le RMSE, dont l'erreur croît de manière quasi linéaire, plaçant l'outil parmi les moins performants à un déplacement de 25 % (soit 4 pixels).

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

De son côté, OpenPIV voit également ses performances diminuer lorsque le déplacement augmente. À l'inverse, la version OpenPIV_denoised montre une amélioration des résultats dans ces mêmes conditions. À 4 px de déplacement, l'ajout d'un débruitage préalable permet ainsi d'obtenir de meilleures estimations, mettant en évidence l'intérêt de cette étape de post-traitement pour les grands déplacements.

Impact du bruit

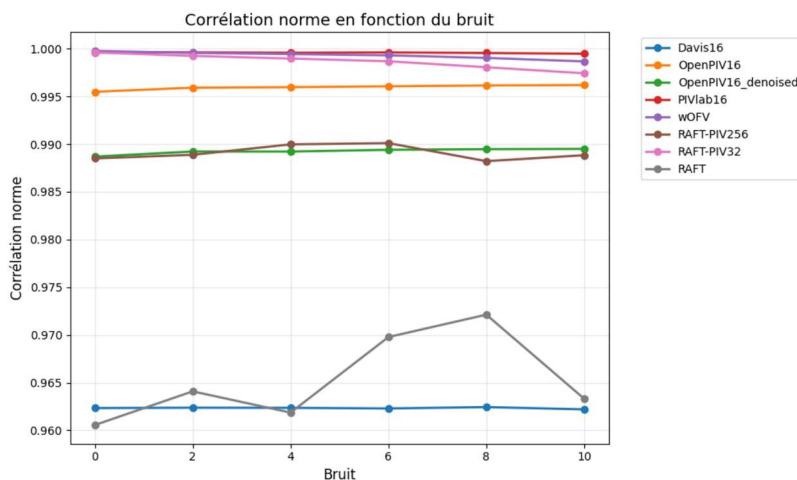


Figure 45 Evolution de la moyenne des corrélations des normes de vitesse entre outil et ground-truth en fonction du bruit test 2 simulation

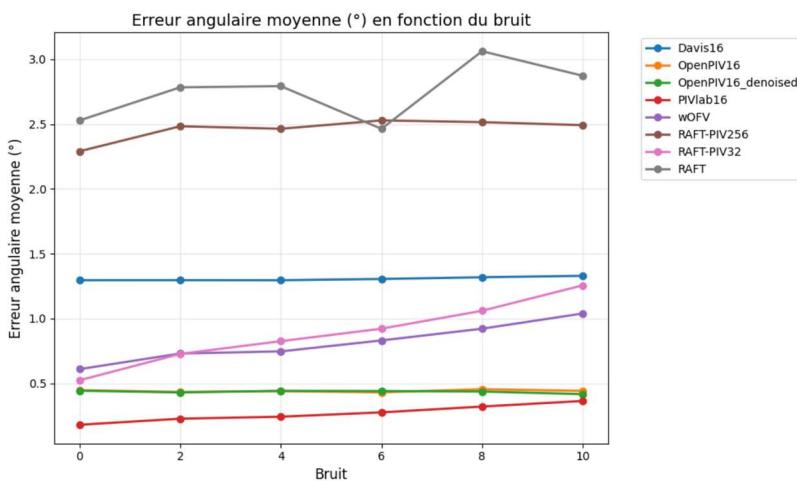


Figure 46 Evolution de l'erreur angulaire moyenne en fonction du bruit test 2 simulation

Conclusion sur l'impact du bruit

Le bruit affecte fortement WOFV et RAFT-PIV32. Les algorithmes classiques PIVlab, OpenPIV et Davis sont peu sensibles au bruit. On note que le débruitage sur OpenPIV n'est pas utile dans cette plage d'évolution du bruit car il ne permet pas de surpasser les résultats de openpiv sans débruitage.

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

2.3.6 Conclusion sur l'intégration de l'intelligence artificielle

Les résultats de l'évaluation montrent que :

- Les outils classiques (corrélation croisée) sont plus robustes aux variations de conditions contrairement aux outils avancés (IA et flot optique),
- RAFT32-PIV est l'outil obtenant les meilleurs résultats en SSIM lorsque la densité est suffisante, mais est sensible au bruit comme indiqué dans l'article de l'auteur [59],
- PIVLab est un très bon compromis, rapide et robuste, il se classe 1^{er} sur l'ensemble de l'étude sur le vortex Rankine,
- OpenPIV démontre une très bonne stabilité des métriques en fonction des variations et obtient de très bons classements,
Le débruitage permet d'obtenir de meilleurs résultats lors de déplacements > 4 px
- WOFv permet d'obtenir une très bonne précision, mais est sensible au bruit,
- RAFT permet d'obtenir une estimation correcte rapidement, ce qui en fait un outil idéal pour de l'analyse en temps réel, on observe que plus le déplacement augmente, plus RAFT performe,
- RAFTPIV-256 Permet de paliers aux sensibilités de RAFTPIV-32, mais n'est pas plus performant que les algorithmes classiques dans le cadre des variations explorées sur l'écoulement simulé du vortex de Rankine,
- Davis ne performe pas dans ce test, on suspecte un problème sur l'analyse effectuée du fait de la taille différente des champs de vitesse estimé ou des artefacts visuels identifiés lors de la première comparaison.

Limites de l'étude :

- Un seul type d'écoulement (vortex)
Limité en temps lors du stage pour couvrir l'ensemble des paramètres et des variations possibles.
- Taille des champs de vitesse différentes selon l'outil, utilisation d'une interpolation linéaire pour pouvoir effectuer les comparaisons avec le ground truth, ce qui peut avoir un impact sur les résultats :
 - Si champs plus haute résolution : Interpolation par sous-échantillonnage (moyenne locale), assez avantageux car permet de lisser
 - Si champs plus basse résolution : Interpolation par suréchantillonnage, donc création artificielle de nouveaux vecteurs
 - De même résolution, pas de biais lié à l'interpolation, donc résultats plus fiables
- Les outils d'IA n'ont pas de post-traitement, mais il est possible d'en ajouter.
- Le champ ground-truth généré par le programme est similaire aux résultats de corrélation croisée avec les vitesses par fenêtre et donc ne nécessite pas la précision des outils avancés. La différence sur un autre type de simulation nécessitant une précision au pixel prêt (comme les images expérimentales Karst) pour l'évaluation pourrait donner un avantage considérable aux outils avancés

Recommandations :

- Pour flux complexes ou bruités : PIVLAB,
- Pour débit laminaire : OpenPIV, Davis,
- Pour conditions mixtes ou en ligne : PIVLab,
- Pour ensemencement important : RAFT-PIV32,
- Pour analyse rapide ou en temps réel : RAFT.

Perspectives :

- Développer un outil de pré-évaluation des images et ajout d'un affichage du nom de l'outil optimal en fonction des paramètres trouvés,
- Benchmark sur une plus grande plage de d'écoulement simulé et de paramètres,
- Benchmark sur images expérimentales avec connaissance des statistiques (densité, taille de particule,...) afin de valider les résultats en simulation,
- Obtention d'un classement des outils en fonction des conditions d'image et du type d'écoulement afin d'effectuer l'analyse avec l'outil qui donne les meilleurs résultats dans ces conditions,
- Evaluer l'utilisation de post-traitement sur les outils d'IA,
- Réaliser des simulations plus poussées pour évaluer la différence outils classiques et avancés.

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

Classement provisoire selon conditions :

Condition	Outil recommandé
Faible densité (< 4)	PIVLAB
Bruit fort (niveau ≥ 6)	PIVLAB
Déplacement > 0.25 fenêtre	PIVLAB
Temps réel ou embarqué	RAFT
Forte densité (≥ 6)	RAFT32-PIV

2.4 Développement de l'analyseur d'ensemencement

a Contexte

Après une étude approfondie de plusieurs logiciels d'analyse PIV ainsi qu'une étude bibliographique, une conclusion importante a émergé : la performance des algorithmes de corrélation croisée, d'IA et de flot optique dépendent fortement des caractéristiques des images PIV analysées. Cependant, il n'existe pas d'outil simple et efficace permettant d'extraire automatiquement les statistiques d'ensemencement (taille, densité, forme des particules) à partir des images expérimentales. Cette lacune limitait la capacité à préqualifier les images pour le traitement ou de choisir l'outil le plus adapté aux conditions expérimentales.

b Objectif

Le développement d'un analyseur d'ensemencement, Seeding Analyzer, a pour objectif de combler ce manque d'information. L'outil a pour objectifs principaux :

- Extraire automatiquement des statistiques sur les images PIV :
 - Taille et densité des particules (par fenêtre d'interrogation de taille modifiable).
 - Identification des agglomérats, susceptibles d'introduire des biais de mesure car les particules individuelles sont dimensionnées pour suivre le fluide, si plusieurs particules s'agglomèrent, leur poids augmente ainsi que leur traînée et ne permet plus de suivre fidèlement l'écoulement.
 - Caractéristiques géométriques des particules : circularité, solidité, convexité, aspect ratio.
- Fournir un score de qualité d'image en fonction de ces statistiques pour permettre l'étalonnage et la préqualification des images sur une valeur.

c Outils utilisés

- Python
- OpenCV (traitement d'images : seuillage, contours, etc.)
- Tkinter (interface graphique)
- NumPy / SciPy / Matplotlib (traitement de données et visualisation)
- Pandas (export des résultats)
- Skimage (segmentation et analyse géométrique complémentaire)
- Export en Excel / CSV / JSON / PDF pour analyse externe

d Développement réalisé

Le workflow a été structuré autour des étapes suivantes :

1. Prétraitement des images (soustraction de fond, seuillage manuel/automatique)
2. Détection des particules via composantes connexes et contours
3. Filtrage par taille pour exclure le bruit et détecter les agglomérats
4. Extraction de caractéristiques géométriques (forme, taille)
5. Découpage en fenêtres d'interrogation pour obtenir des statistiques locales

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

6. Calcul de scores de qualité globaux (uniformité, couverture, taux de fenêtres optimales)
7. Analyse globale des formes avec visualisations 2D/3D
8. Analyse des contours pour accentuer le déplacement des particules sur une image moyenne
9. Cartes de vitesse pour visualisation spatiale de la densité et de la présence d'agglomérats
10. Export des résultats

Les calculs sont réalisés en parallèle sur le processeur afin d'accélérer le traitement, grâce à la librairie concurrent.futures, avec gestion des ressources pour garder la barre de progression active.

Plus d'information en annexes avec captures d'écran et explications approfondie des fonctionnalités.

e Conclusion

Le Seeding Analyzer permet d'établir un lien entre les caractéristiques des images PIV et les performances attendues des algorithmes de traitement.

Cet outil permet :

- Pré-analyse expérimentale pour optimiser l'ensemencement (taille, densité, forme) et garantir la qualité des résultats des traitements d'image.
- Sélection de l'outil d'analyse en fonction de la qualité des images et des métriques recherchées (vitesse, erreur angulaire, précision, etc.).

Ce développement comble un vide méthodologique dans l'analyse PIV, en fournissant des métriques claires, exploitables et visualisables, directement intégrables dans une chaîne de traitement.

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

5 Conclusion générale

L'objectif de ce stage était de renforcer les capacités d'analyse de IFP Energie nouvelles (IFPEN), dans le cadre du projet européen ERC Karst visant à mieux caractériser les écoulements en milieu karstique à l'aide de la PIV (Particle Image Velocimetry). Pour répondre à cet objectif, un plan de travail structuré a été mis en place.

Tout d'abord, une analyse de l'état de l'art de la PIV et des méthodes employées à IFPEN. Cette première analyse a permis d'identifier les limitations suivantes :

- Utilisation d'un logiciel propriétaire (Davis), peu flexible, non accessible depuis le banc d'essai
- Aucun outil de validation des images avant traitement, ce qui constitue un vide méthodologique car on traite des images sans pouvoir contrôler ni connaître les paramètres qui sont pourtant critiques pour la fiabilité des estimations.
- L'algorithme de corrélation croisée qui est limité pour l'analyse fine de structures d'écoulement d'une large gamme de taille et donc pas optimal dans le cadre des ambitions du projet Karst.

Pour pallier ces limitations et renforcer les capacités d'analyse de IFPEN, plusieurs axes ont été développés.

Deux phases de comparaison ayant permis d'évaluer les outils, de sélectionner ceux répondant aux critères de sélection et de permettre l'avancée du projet.

Deux phases de développement ayant permis la création de deux programmes d'analyse d'image en python, un premier programme OpenPIVGUI R108, pour la mesure des déplacements dans les images PIV, permettant une utilisation plus flexible et adaptée aux cas d'études spécifiques de IFPEN. Cet outil permet une analyse simple et rapide depuis le banc expérimentale.

Un deuxième programme, l'analyseur d'ensemencement qui comble le vide méthodologique identifié plus tôt, en fournissant des métriques claires, exploitables et visualisables, directement intégrables dans une chaîne de traitement permettant l'étaffonnage et la préqualification des images.

Cette création d'outil d'analyses ouvert à la programmation pourrait permettre de poser les bases d'une analyse plus spécifique et plus adaptée pour le domaine de la recherche, où, il est essentiel de pouvoir maîtriser l'ensemble des éléments, ce qui n'a pas été possible de faire comme on a pu le constater avec la première étape de comparaison où :

- Nous avons été limités sur l'isolement algorithmique et la paramétrisation de certains outils.
- L'utilisation d'outils propriétaire tel que Davis ne permet pas de connaître les automatisations ainsi que les traitements en arrière-plan que l'on a pu observer avec les différences de taille des champs de vitesse de Davis ainsi que les artefacts visuels identifiés lors de la première comparaison, du fait que le code ne soit pas accessible.

Les outils développés lors de ce stage étant ouverts à la programmation, ils seront donc ouverts à l'amélioration et l'innovation des utilisateurs pouvant adapter le programme et ajouter à volonté les outils nécessaires à leur cas d'usage.

L'utilisation de l'intelligence artificielle pour caractériser les écoulements dans les milieux karstiques est prometteur, car il va permettre de pouvoir pallier les limitations de la corrélation croisée, et d'accélérer l'obtention des résultats ouvrant ainsi la voie à un traitement des images en temps réel.

Ce stage a donc consisté en le développement et le déploiement de solutions avancées d'analyse d'images PIV innovantes dans le cadre d'un projet de recherche de grande envergure.

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

6 Bibliographie

6.1 Développement de solutions logicielles

6.1.1 Étude bibliographique et outils de PIV

1. Adrian RJ, Westerweel J. *Particle Image Velocimetry*. Cambridge University Press; 2011.
2. LaVision GmbH. *Davis Software Documentation*. Göttingen, Allemagne ; 2020.
3. OpenPIV Community. *OpenPIV documentation* [Internet]. OpenPIV; [cité 2025 juin 6]. Disponible sur : https://openpiv.readthedocs.io/en/latest/src/piv_basics.html
4. OpenPIV Community. *openpiv-python-gpu* [Internet]. GitHub ; [cité 2025 juin 6]. Disponible sur : <https://github.com/OpenPIV/openpiv-python-gpu>
5. AlexLib. *Von Karman OpenPIV Data* [Internet]. GitHub ; [cité 2025 juin 6]. Disponible sur : https://github.com/alexlib/openpiv_pivlab_von_Karman_data
6. *OpenPIV GUI avec code modifiable* [Internet]. 2023. Disponible sur : <https://youtu.be/wmtyb8EL8wI>, https://github.com/OpenPIV/openpiv_tk_gui/tree/master
7. YouTube. *PIV OpenPIV Tutoriels* [Internet]. Disponible sur : <https://youtu.be/OZ6AKMA7zFY>
8. YouTube. *PIV Tutorial* [Internet]. Disponible sur : <https://youtu.be/sz5YCi6Cz20>
9. Heyman J. *TracTrac: a fast and robust particle tracking algorithm* [Internet]. Rennes 1 University; [cité 2025 juin 6]. Disponible sur : https://perso.univ-rennes1.fr/joris.heyman/PDF/tractrac_final.pdf
10. Heyman J. *tractrac* [Internet]. GitHub ; [cité 2025 juin 6]. Disponible sur : <https://github.com/jorishey1234/tractrac>
11. TrackPy Developers. *TrackPy Tutorial* [Internet]. Version 0.6.4; [cité 2025 juin 6]. Disponible sur : <http://soft-matter.github.io/trackpy/v0.6.4/tutorial/walkthrough.html>
12. Hu JC. *PyPostPIV* [Internet]. GitHub; [cité 2025 juin 6]. Disponible sur : <https://github.com/hujc91/PyPostPiv>
13. YouTube. *PyPostPIV Presentation – PyCon Canada* [Internet]. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=JQr8OpcTMUc>
14. Thielicke W, Stamhuis EJ. *PIVlab – Particle Image Velocimetry Tool with GUI* [Internet]. MATLAB Central ; [cité 2025 juin 6]. Disponible sur: <https://fr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27659-pivlab>
15. PIVLab Blogspot. *Documentation et Tutoriels* [Internet]. Disponible sur : <https://pivlab.blogspot.com/>
16. Thielicke W. *PIVLab Chapter – PhD Thesis* [Internet]. Groningen University; Disponible sur : https://pure.rug.nl/ws/portalfiles/portal/14094707/Chapter_2.pdf
17. Dano A, et al. *OpenOpticalFlow-PIV : A hybrid cross-correlation and optical flow approach* [Internet]. J Open Res Softw. 2020 ; 8(1) :12. Disponible sur : <https://openresearchsoftware.metajnl.com/articles/10.5334/jors.326>
18. Teed Z, Deng J. *RAFT: Recurrent All Pairs Field Transforms for Optical Flow* [Internet]. arXiv preprint arXiv :2003.12039; 2020. Disponible sur : <https://arxiv.org/pdf/2003.12039>
19. *RAFT-PIV Capsule* [Internet]. CodeOcean; [cité 2025 juin 6]. Disponible sur : <https://codeocean.com/capsule/7226151/tree/v1>
20. Lagemann C, Lagemann K, Mukherjee S, Helm C, Huhn F, Noack BR, et al. Deep recurrent optical flow learning for particle image velocimetry data. *Nat Mach Intell.* 2021 ;3(7) : 641–51. <https://doi.org/10.1038/s42256-021-00369-0>
21. AlexLib. *Comparaison PIVLab vs OpenPIV* [Internet]. GitHub ; Disponible sur : https://github.com/alexlib/openpiv_pivlab_von_Karman_data
22. Aquifères karstiques : coup d'envoi à IFPEN d'un projet de recherche en hydrogéologie [Internet]. Disponible sur :<https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/aquiferes-karstiques-coup-denvoi-ifpen-dun-projet-recherche-en-hydrogeologie>

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

23. Racine, T., Trunz, C., Straubhaar, J., Jaillet, S., and Renard, P.: KarstConduitCatalogue: a dataset of LiDAR derived point clouds for the analysis of karstic conduit geometry and morphology, *Earth Syst. Sci. Data Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/essd-2025-194>, in review, 2025.
24. Nicolas A, Zentgraf F, Linne M, Dreizler A, Peterson B. Assessment and application of wavelet-based optical flow velocimetry (WOFv) to wall-bounded turbulent flows. *Experiments in Fluids*. 2023;64(10):211. doi:10.1007/s00348-023-03594-y.

6.1.2 Développement OpenPIVGUI

a Analyse avancée :

25. DigguScience. *Vorticité en mécanique des fluides* [Internet]. YouTube ; Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=Xu5IT4bL-v8>
26. University of Waterloo. *Vorticity - Fluid Mechanics* [Internet]. Disponible sur : <https://uwaterloo.ca/.../vorticity>
27. ScienceDirect. *Vorticity* [Internet]. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/vorticity>
28. FasterCapital. *Understanding Divergence in Fluid Dynamics* [Internet]. Disponible sur : <https://fastercapital.com/topics/understanding-divergence-in-fluid-dynamics.html>
29. StudySmarter. *Tension de cisaillement dans les fluides* [Internet]. Disponible sur : <https://www.studysmarter.fr/.../tension-de-cisaillement-dans-les-fluides/>
30. M4 Engineering. *Q-Criterion for vortex visualization* [Internet]. Disponible sur : <https://www.m4-engineering.com/q-criterion-for-vortex-visualization/>
31. Lindner G. *Vortex Fitting – Methodology* [Internet]. Disponible sur : <https://guilindner.github.io/VortexFitting/methodology.html>

b Carte spatio-temporelle :

28. SciPy. *Savitzky-Golay Filter* [Internet]. Disponible sur : https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.savgol_filter.html
29. Ismail B. *Identification des structures cohérentes dans un écoulement 2D* [Internet]. CANUM 2006 ; Disponible sur : <https://canum2006.univ-rennes1.fr/papersPDF/ismail.pdf>
30. *Velocity gradient partitioning in turbulent flows* [Internet]. J Fluid Mech. Disponible sur : [https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-fluid-mechanics/article/...](https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-fluid-mechanics/article/)
31. *Capturing Velocity Gradients and Particle Rotation Rates in Turbulence* [Internet]. Phys Rev Lett. 2020;125:224501. Disponible sur : <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.125.224501>

c Dynamic Mode Decomposition (DMD) :

32. YouTube. *DMD Explained Simply* [Internet]. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=sQvrK8AGCAo>
33. PyDMD Developers. *PyDMD Library* [Internet]. GitHub ; Disponible sur : <https://github.com/PyDMD/PyDMD>
34. PyDMD Documentation [Internet]. Disponible sur : <https://pydmd.github.io/PyDMD/code.html>

6.1.3 Seeding Analyzer

a Motivation :

35. ParticleShape. *Why particle shape is important* [Internet]. Disponible sur : <https://particleshape.com/why-particle-shape-is-important/>

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

36. Zhao et al. *Rotation of Fiber and Vortices* [Internet]. ScienceDirect; 2024. Disponible sur :
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301932224002982>

b Développement :

37. StackOverflow. *tkinter notebook tabs OOP* [Internet]. Disponible sur :
[https://stackoverflow.com/questions/71443344/...](https://stackoverflow.com/questions/71443344/)
38. StackOverflow. *Matplotlib colormap* [Internet]. Disponible sur :
[https://stackoverflow.com/questions/77348073/...](https://stackoverflow.com/questions/77348073/)
39. StackOverflow. *Matplotlib navigation toolbar for tkinter* [Internet]. Disponible sur :
[https://stackoverflow.com/questions/66992052/...](https://stackoverflow.com/questions/66992052/)
40. OpenCVSharp. *Contours and statistics* [Internet]. Disponible sur :
[https://shimat.github.io/opencvsharp_docs/...](https://shimat.github.io/opencvsharp_docs/)
41. StackOverflow. *mpatches.Patch for legends* [Internet]. Disponible sur :
[https://stackoverflow.com/questions/44098362/...](https://stackoverflow.com/questions/44098362/)
42. Katiyar S. *Introduction to concurrent.futures in Python* [Internet]. Medium; Disponible sur :
[https://medium.com/@smrati.katiyar/...](https://medium.com/@smrati.katiyar/)
43. Invivoo. *Threading en Python* [Internet]. Disponible sur : <https://invivoo.com/blog/python-module-threading>
44. YouTube. *Python Threading Explained* [Internet]. Disponible sur : [https://www.youtube.com/...](https://www.youtube.com/)
45. SciPy. *scipy.spatial.ConvexHull* [Internet]. Disponible sur :
<https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.spatial.ConvexHull.html>
46. PyImageSearch. *Advanced Contour Properties* [Internet]. Disponible sur :
<https://customers.pyimagesearch.com/lesson-sample-advanced-contour-properties/>
47. MathWeb. *Formule de Ramanujan pour ellipse* [Internet]. Disponible sur :
[https://www.mathweb.fr/euclide/2022/04/15/...](https://www.mathweb.fr/euclide/2022/04/15/)
48. Corey Research. *Shape Metrics in Image Analysis* [Internet]. Disponible sur :
<https://core.ac.uk/download/pdf/14946814.pdf>
49. ParticleTechLabs. *Shape factors in image analysis* [Internet]. Disponible sur :
[https://particletechlabs.com/...](https://particletechlabs.com/)

c Calculs et métriques :

50. OpenCV. *Contour Properties Tutorial* [Internet]. Disponible sur :
https://docs.opencv.org/4.x/d1/d32/tutorial_py_contour_properties.html
51. Scikit-learn. *PCA Documentation* [Internet]. Disponible sur : <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.decomposition.PCA.html>
52. Medium. *Math Behind PCA* [Internet]. Disponible sur : [https://medium.com/@RobuRishabh/...](https://medium.com/@RobuRishabh/)
53. DataCamp. *PCA in Python* [Internet]. Disponible sur : <https://www.datacamp.com/tutorial/principal-component-analysis-in-python>
54. PyImageSearch. *OpenCV Contour Approximation* [Internet]. Disponible sur :
<https://pyimagesearch.com/2021/10/06/opencv-contour-approximation/>
55. OpenCV. *arcLength function* [Internet]. Disponible sur :
https://docs.opencv.org/4.x/dd/d49/tutorial_py_contour_features.html

6.1.4 Comparaison d'outils sur images simulées

56. Elsevier. *SOFTX_2020_33 : Générateur d'images PIV* [Internet]. GitHub ; Disponible sur :
https://github.com/ElsevierSoftwareX/SOFTX_2020_33
57. Garcia-Suarez T, et al. *Synthetic PIV Benchmark Dataset* [Internet]. Sci Direct. 2020. Disponible sur :
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352711020300339>
58. SciPy. *scipy.interpolate.griddata* [Internet]. Disponible sur :
<https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.interpolate.griddata.html>

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

59. NVIDIA. *EPE for Optical Flow* [Internet]. Developer Blog; Disponible sur : <https://developer.nvidia.com/blog/opencv-optical-flow-algorithms-with-nvidia-turing-gpus>
60. Stuttgart University. *Benchmark Optical Flow* [Internet]. Disponible sur : [https://elib.uni-stuttgart.de/...](https://elib.uni-stuttgart.de/)
61. Scikit-Image. *SSIM Metric* [Internet]. Disponible sur : https://scikit-image.org/docs/0.25.x/auto_examples/transform/plot_ssim.html
62. Wang Z, Bovik AC, Sheikh HR, Simoncelli EP. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. *IEEE Trans Image Process.* 2004 ;13(4) :600-12.
63. OpenCV. *Quality metrics: SSIM* [Internet]. Disponible sur : https://docs.opencv.org/4.x/d5/dc4/tutorial_video_input_psnr_ssim.html
64. DataTab. *Pearson Correlation* [Internet]. Disponible sur : <https://datatab.fr/tutorial/pearson-correlation>
65. SciPy. *scipy.stats.pearsonr* [Internet]. Disponible sur : <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.pearsonr.html>

6.1.5 Autres

66. Cadot O. Introduction à la turbulence. Polycopié de cours MF-205, 2e année cycle ingénieur. École Nationale Supérieure de Techniques Avancées (ENSTA ParisTech), Unité de Mécanique, Dynamique des Fluides et Acoustique (DFA); 2015. Disponible sur : <https://ensta-paris.hal.science/cel-01228137/file/coursdeturbulence.pdf>

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

7 Annexes

7.1 Résultats de la deuxième phase de comparaison tableaux

Variation de la densité de particule par fenêtre de 16x16 :

Paramètres constants :

- Déplacement = 10 % => 1.6 px
- Bruit = 0
- Rayon des particules = 1.5 px

Densité = 2

	Outil	Corr_u	Corr_v	Corr_norm	Erreurs_angulaires_moy	Pct_valides_angle<5°	RMSE_u	RMSE_v	RMSE_norm	MAE_u	MAE_v	MAE_norm	Mean_EPE	Pct_EPE<1.0px	SSIM_heatmap
0	Davis16	0.9947	0.9946	0.9602	1.4104	98.5609	0.0653	0.0662	0.0922	0.0210	0.0213	0.0286	0.0329	100.0000	0.9087
1	OpenPIV16	0.9995	0.9995	0.9963	0.5916	99.7206	0.0209	0.0211	0.0279	0.0113	0.0111	0.0132	0.0174	100.0000	0.9024
2	OpenPIV16_denoised	0.9958	0.9958	0.9801	0.7330	99.7794	0.0689	0.0691	0.0969	0.0341	0.0340	0.0509	0.0537	100.0000	0.8263
3	PIVlab16	0.9995	0.9995	0.9969	1.1107	98.8887	0.0213	0.0210	0.0225	0.0159	0.0158	0.0167	0.0250	100.0000	0.8806
4	wOFV	0.9992	0.9991	0.9959	1.5005	96.6020	0.0263	0.0270	0.0269	0.0194	0.0204	0.0203	0.0314	100.0000	0.9087
5	RAFT-PIV256	0.9960	0.9946	0.9773	4.3713	66.1186	0.0734	0.0664	0.0704	0.0590	0.0532	0.0547	0.0871	100.0000	0.8646
6	RAFT-PIV32	0.9710	0.9739	0.8175	4.5084	77.2495	0.1580	0.1554	0.2077	0.0834	0.0803	0.1098	0.1284	99.3416	0.3992
7	RAFT	0.9892	0.9934	0.9394	4.1068	69.5568	0.1038	0.0949	0.1236	0.0802	0.0698	0.0946	0.1174	100.0000	0.8060

Densité = 4

	Outil	Corr_u	Corr_v	Corr_norm	Erreurs_angulaires_moy	Pct_valides_angle<5°	RMSE_u	RMSE_v	RMSE_norm	MAE_u	MAE_v	MAE_norm	Mean_EPE	Pct_EPE<1.0px	SSIM_heatmap
0	Davis16	0.9949	0.9949	0.9613	1.2268	98.9260	0.0640	0.0641	0.0901	0.0195	0.0195	0.0271	0.0305	100.	0.9193
1	OpenPIV16	0.9996	0.9995	0.9966	0.6297	99.7935	0.0204	0.0209	0.0270	0.0115	0.0112	0.0130	0.0177	100.	0.9027
2	OpenPIV16_denoised	0.9959	0.9958	0.9806	0.7701	99.8324	0.0690	0.0693	0.0970	0.0345	0.0343	0.0513	0.0543	100.	0.8266
3	PIVlab16	0.9998	0.9998	0.9987	0.6957	99.8607	0.0136	0.0132	0.0146	0.0099	0.0097	0.0102	0.0154	100.	0.9111
4	wOFV	0.9995	0.9995	0.9978	1.0785	98.7324	0.0200	0.0198	0.0206	0.0148	0.0148	0.0154	0.0232	100.	0.9423
5	RAFT-PIV256	0.9953	0.9949	0.9735	4.0094	70.4853	0.0732	0.0639	0.0727	0.0569	0.0499	0.0525	0.0832	100.	0.8532
6	RAFT-PIV32	0.9988	0.9993	0.9941	1.0536	97.8687	0.0321	0.0238	0.0320	0.0157	0.0137	0.0154	0.0230	100.	0.9363
7	RAFT	0.9914	0.9914	0.9314	4.2341	66.5699	0.0983	0.1047	0.1248	0.0767	0.0781	0.0950	0.1194	100.	0.8074

Densité = 6

	Outil	Corr_u	Corr_v	Corr_norm	Erreurs_angulaires_moy	Pct_valides_angle<5°	RMSE_u	RMSE_v	RMSE_norm	MAE_u	MAE_v	MAE_norm	Mean_EPE	Pct_EPE<1.0px	SSIM_heatmap
0	Davis16	0.9950	0.9949	0.9615	1.2052	99.0358	0.0640	0.0640	0.0900	0.0194	0.0197	0.0271	0.0304	100.	0.9199
1	OpenPIV16	0.9995	0.9995	0.9965	0.6427	99.8603	0.0214	0.0210	0.0279	0.0121	0.0118	0.0138	0.0186	100.	0.9020
2	OpenPIV16_denoised	0.9958	0.9958	0.9804	0.7928	99.8502	0.0698	0.0694	0.0976	0.0350	0.0347	0.0518	0.0550	100.	0.8256
3	PIVlab16	0.9999	0.9999	0.9993	0.4417	99.9745	0.0092	0.0094	0.0106	0.0063	0.0068	0.0070	0.0103	100.	0.9210
4	wOFV	0.9997	0.9997	0.9987	0.8432	99.4328	0.0158	0.0161	0.0165	0.0120	0.0120	0.0125	0.0188	100.	0.9567
5	RAFT-PIV256	0.9955	0.9949	0.9754	3.8535	71.0800	0.0697	0.0637	0.0696	0.0550	0.0487	0.0523	0.0819	100.	0.8564
6	RAFT-PIV32	0.9998	0.9998	0.9992	0.6072	99.7684	0.0122	0.0114	0.0113	0.0087	0.0084	0.0082	0.0134	100.	0.9916
7	RAFT	0.9907	0.9918	0.9383	4.4477	63.9175	0.0992	0.0972	0.1165	0.0764	0.0720	0.0891	0.1165	100.	0.7933

Densité = 8

	Outil	Corr_u	Corr_v	Corr_norm	Erreurs_angulaires_moy	Pct_valides_angle<5°	RMSE_u	RMSE_v	RMSE_norm	MAE_u	MAE_v	MAE_norm	Mean_EPE	Pct_EPE<1.0px	SSIM_heatmap
0	Davis16	0.9950	0.9950	0.9617	1.2101	98.9617	0.0639	0.0639	0.0899	0.0191	0.0194	0.0265	0.0300	100.	0.9206
1	OpenPIV16	0.9995	0.9996	0.9967	0.6906	99.8077	0.0206	0.0204	0.0267	0.0122	0.0121	0.0138	0.0188	100.	0.9028
2	OpenPIV16_denoised	0.9960	0.9960	0.9813	0.8172	99.8288	0.0683	0.0682	0.0957	0.0345	0.0343	0.0508	0.0542	100.	0.8280
3	PIVlab16	0.9999	0.9999	0.9995	0.3690	99.9919	0.0080	0.0083	0.0096	0.0054	0.0055	0.0058	0.0086	100.	0.9229
4	wOFV	0.9997	0.9998	0.9989	0.7968	99.2651	0.0163	0.0147	0.0159	0.0112	0.0110	0.0118	0.0176	100.	0.9616
5	RAFT-PIV256	0.9957	0.9947	0.9755	3.6686	74.8989	0.0668	0.0656	0.0697	0.0520	0.0496	0.0525	0.0795	100.	0.8514
6	RAFT-PIV32	0.9999	0.9999	0.9994	0.5463	99.7795	0.0106	0.0103	0.0097	0.0076	0.0076	0.0071	0.0118	100.	0.9947
7	RAFT	0.9921	0.9907	0.9383	4.4103	66.0965	0.0949	0.1063	0.1214	0.0750	0.0779	0.0927	0.1192	100.	0.7937

Densité = 10

	Outil	Corr_u	Corr_v	Corr_norm	Erreurs_angulaires_moy	Pct_valides_angle<5°	RMSE_u	RMSE_v	RMSE_norm	MAE_u	MAE_v	MAE_norm	Mean_EPE	Pct_EPE<1.0px	SSIM_heatmap
0	Davis16	0.9949	0.9950	0.9611	1.1968	99.0299	0.0640	0.0639	0.0900	0.0197	0.0195	0.0273	0.0305	100.	0.9199
1	OpenPIV16	0.9995	0.9995	0.9967	0.7073	99.8401	0.0208	0.0208	0.0271	0.0124	0.0125	0.0138	0.0192	100.	0.9039
2	OpenPIV16_denoised	0.9958	0.9958	0.9809	0.8355	99.8389	0.0697	0.0691	0.0972	0.0354	0.0350	0.0520	0.0557	100.	0.8269
3	PIVlab16	0.9999	0.9999	0.9994	0.3528	99.9907	0.0084	0.0083	0.0101	0.0054	0.0055	0.0060	0.0086	100.	0.9222
4	wOFV	0.9997	0.9997	0.9989	0.7998	99.3516	0.0157	0.0158	0.0165	0.0117	0.0117	0.0126	0.0184	100.	0.9598
5	RAFT-PIV256	0.9958	0.9951	0.9772	3.9260	71.5073	0.0667	0.0639	0.0683	0.0540	0.0502	0.0522	0.0808	100.	0.8462
6	RAFT-PIV32	0.9999	0.9999	0.9995	0.5134	99.8386	0.0102	0.0098	0.0093	0.0074	0.0071	0.0068	0.0112	100.	0.9961
7	RAFT	0.9910	0.9929	0.9392	4.8104	58.8951	0.1036	0.0891	0.1141	0.0833	0.0704	0.0890	0.1198	100.	0.7930

Densité = 12

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

	Outil	Corr_u	Corr_v	Corr_norm	Erreur_angulaire_moy	Pct_valides_angle<5°	RMSE_u	RMSE_v	RMSE_norm	MAE_u	MAE_v	MAE_norm	Mean_EPE	Pct_EPE<1.0px	SSIM_heatmap
0	Davis16	0.9950	0.9950	0.9616	1.2058	98.9436	0.0639	0.0639	0.0899	0.0193	0.0196	0.0270	0.0303	100.0	0.9204
1	OpenPIV16	0.9995	0.9995	0.9966	0.7160	99.8595	0.0216	0.0209	0.0275	0.0131	0.0122	0.0142	0.0196	100.0	0.9030
2	OpenPIV16_denoised	0.9958	0.9958	0.9809	0.8377	99.8482	0.0697	0.0697	0.0976	0.0355	0.0352	0.0523	0.0559	100.0	0.8260
3	PIVlab16	0.9999	0.9999	0.9995	0.3336	99.9874	0.0080	0.0076	0.0093	0.0053	0.0051	0.0057	0.0081	100.0	0.9232
4	wOFV	0.9997	0.9997	0.9989	0.7951	99.2410	0.0154	0.0159	0.0165	0.0115	0.0118	0.0125	0.0183	100.0	0.9592
5	RAFT-PIV256	0.9945	0.9946	0.9731	4.3257	64.7602	0.0769	0.0671	0.0715	0.0608	0.0532	0.0532	0.0886	100.0	0.8418
6	RAFT-PIV32	0.9999	0.9999	0.9995	0.5040	99.7971	0.0100	0.0098	0.0093	0.0072	0.0072	0.0068	0.0112	100.0	0.9960
7	RAFT	0.9919	0.9928	0.9239	4.2809	65.7963	0.1051	0.0962	0.1246	0.0797	0.0736	0.0926	0.1186	100.0	0.7934

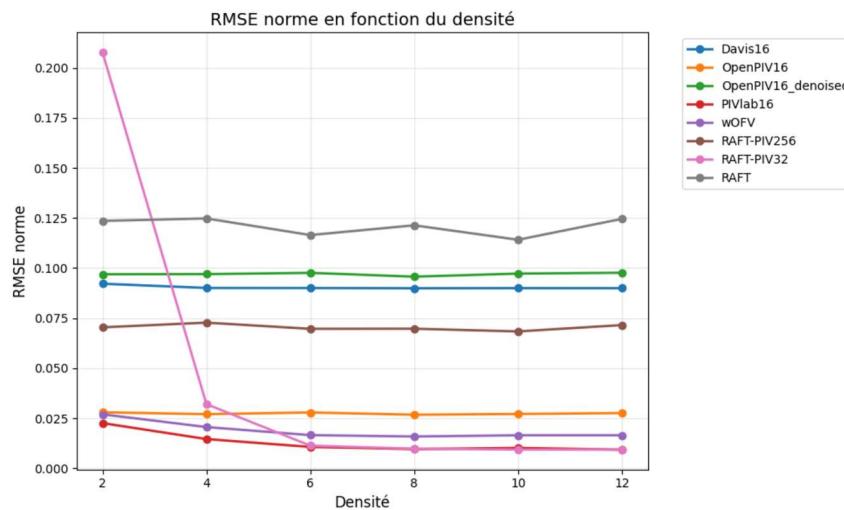


Figure 47 Evolution du RMSE en fonction de la densité test 2 simulation

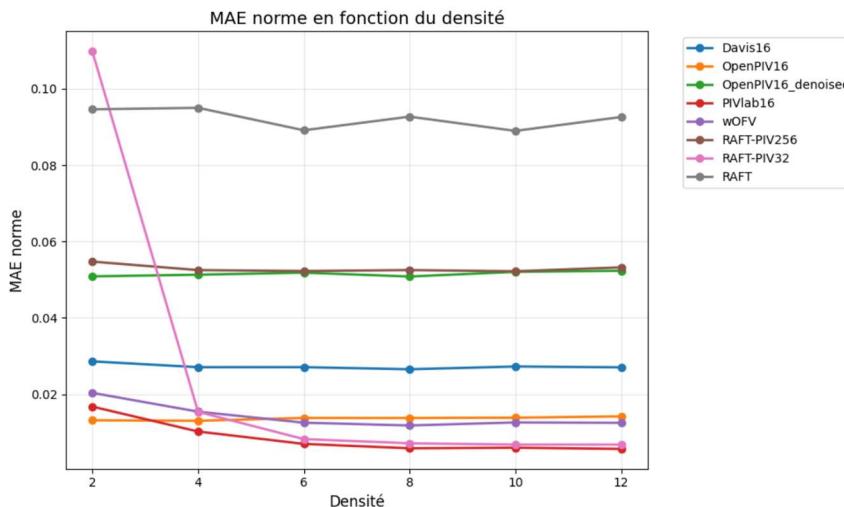


Figure 48 Evolution du MAE en fonction de la densité test 2 simulation

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

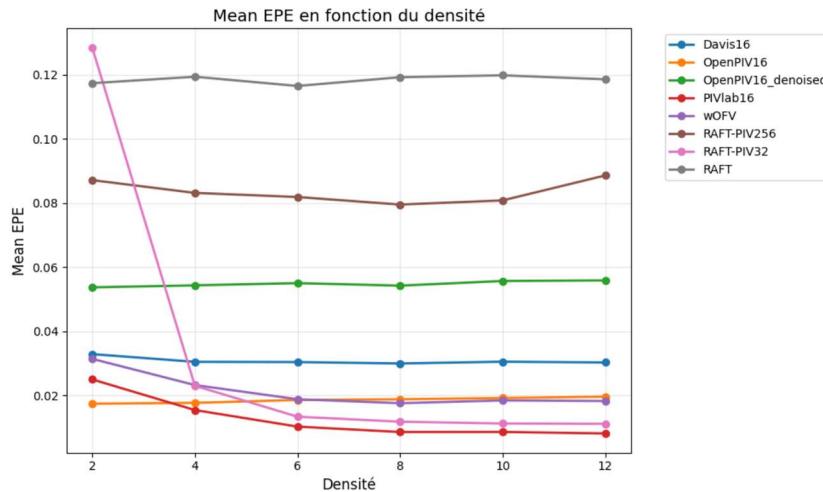


Figure 49 Evolution du EPE moyen en fonction de la densité test 2 simulation

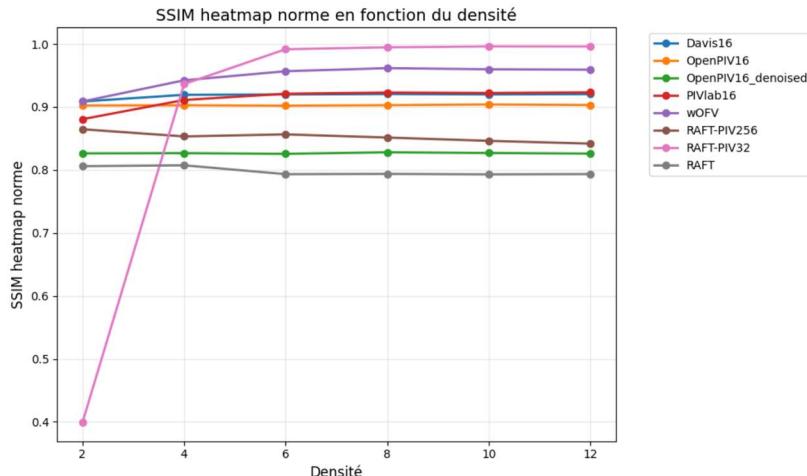


Figure 50 Evolution du SSIM en fonction de la densité test 2 simulation

Variation de la densité de particule par fenêtre de 16x16 :

Paramètres constants :

- Déplacement = 25 % => 4 px
- Densité = 10
- Rayon des particules = 1.5 px

Bruit = 0

	Outil	Corr_u	Corr_v	Corr_norm	Erreurs angulaires moy	Pct.valides angle<5°	RMSE_u	RMSE_v	RMSE_norm	MAE_u	MAE_v	MAE_norm	Mean EPE	Pct EPE<1.0px	SSIM heatmap
0	Davis16	0.9949	0.9949	0.9623	1.2961	98.9370	0.1610	0.1611	0.2251	0.0502	0.0500	0.0654	0.0782	97.8963	0.9209
1	OpenPIV16	0.9994	0.9994	0.9955	0.4481	99.8251	0.0569	0.0567	0.0772	0.0258	0.0256	0.0322	0.0403	100.0000	0.8964
2	OpenPIV16_denoised	0.9982	0.9982	0.9887	0.4441	99.8336	0.1098	0.1092	0.1532	0.0465	0.0457	0.0667	0.0725	100.0000	0.8607
3	PIVlab16	1.0000	0.9999	0.9996	0.1814	99.9960	0.0160	0.0163	0.0206	0.0077	0.0081	0.0092	0.0125	100.0000	0.9253
4	wOFV	0.9999	0.9999	0.9998	0.6103	99.8089	0.0258	0.0259	0.0158	0.0180	0.0182	0.0112	0.0286	100.0000	0.9780
5	RAFT-PIV256	0.9978	0.9976	0.9885	2.2902	91.4253	0.1063	0.1105	0.1121	0.0800	0.0832	0.0835	0.1274	100.0000	0.9188
6	RAFT-PIV32	0.9999	0.9998	0.9996	0.5246	99.8104	0.0279	0.0286	0.0202	0.0175	0.0181	0.0142	0.0279	100.0000	0.9983
7	RAFT	0.9954	0.9949	0.9606	2.5280	90.2832	0.1802	0.2197	0.2633	0.1242	0.1537	0.1812	0.2165	99.2210	0.8736

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

Bruit = 2 :

	Outil	Corr_u	Corr_v	Corr_norm	Erreurs_angulaires_moy	Pct_valides_angle<5°	RMSE_u	RMSE_v	RMSE_norm	MAE_u	MAE_v	MAE_norm	Mean_EPE	Pct_EPE<1.0px	SSIM_heatmap
0	Davis16	0.9949	0.9949	0.9624	1.2965	98.9542	0.1610	0.1610	0.2250	0.0501	0.0502	0.0657	0.0784	97.8924	0.9205
1	OpenPIV16	0.9995	0.9995	0.9959	0.4344	99.8372	0.0540	0.0533	0.0728	0.0252	0.0248	0.0316	0.0391	100.0000	0.8990
2	OpenPIV16_denoised	0.9983	0.9983	0.9892	0.4309	99.8336	0.1073	0.1063	0.1496	0.0456	0.0449	0.0655	0.0711	100.0000	0.8628
3	PIVlab16	0.9999	0.9999	0.9996	0.2283	99.9676	0.0164	0.0163	0.0204	0.0091	0.0089	0.0102	0.0142	100.0000	0.9250
4	wOFV	0.9998	0.9998	0.9996	0.7309	99.6036	0.0298	0.0298	0.0213	0.0221	0.0217	0.0160	0.0345	100.0000	0.9740
5	RAFT-PIV256	0.9975	0.9979	0.9889	2.4830	90.9157	0.1164	0.1052	0.1145	0.0896	0.0783	0.0872	0.1344	100.0000	0.9235
6	RAFT-PIV32	0.9998	0.9998	0.9992	0.7278	99.7089	0.0341	0.0348	0.0279	0.0238	0.0240	0.0204	0.0376	100.0000	0.9902
7	RAFT	0.9939	0.9957	0.9641	2.7831	86.8477	0.2043	0.1993	0.2586	0.1485	0.1447	0.1888	0.2267	99.6693	0.8686

Bruit = 4 :

	Outil	Corr_u	Corr_v	Corr_norm	Erreurs_angulaires_moy	Pct_valides_angle<5°	RMSE_u	RMSE_v	RMSE_norm	MAE_u	MAE_v	MAE_norm	Mean_EPE	Pct_EPE<1.0px	SSIM_heatmap
0	Davis16	0.9949	0.9949	0.9624	1.2958	98.9068	0.1610	0.1609	0.2251	0.0501	0.0501	0.0656	0.0783	97.8935	0.9204
1	OpenPIV16	0.9995	0.9995	0.9960	0.4409	99.8089	0.0525	0.0560	0.0736	0.0242	0.0257	0.0308	0.0388	100.0000	0.8994
2	OpenPIV16_denoised	0.9983	0.9982	0.9892	0.4429	99.8130	0.1065	0.1095	0.1512	0.0453	0.0464	0.0662	0.0719	100.0000	0.8625
3	PIVlab16	0.9999	0.9999	0.9996	0.2435	99.9879	0.0173	0.0172	0.0214	0.0101	0.0098	0.0113	0.0157	100.0000	0.9242
4	wOFV	0.9998	0.9998	0.9994	0.7472	99.8131	0.0307	0.0305	0.0242	0.0233	0.0232	0.0184	0.0366	100.0000	0.9709
5	RAFT-PIV256	0.9977	0.9976	0.9900	2.4635	88.9675	0.1088	0.1164	0.1098	0.0806	0.0890	0.0822	0.1332	100.0000	0.9228
6	RAFT-PIV32	0.9997	0.9997	0.9990	0.8260	99.5476	0.0379	0.0388	0.0328	0.0270	0.0273	0.0239	0.0427	100.0000	0.9853
7	RAFT	0.9952	0.9944	0.9619	2.7921	86.8843	0.1933	0.2210	0.2688	0.1338	0.1516	0.1858	0.2245	99.1199	0.8658

Bruit = 6 :

	Outil	Corr_u	Corr_v	Corr_norm	Erreurs_angulaires_moy	Pct_valides_angle<5°	RMSE_u	RMSE_v	RMSE_norm	MAE_u	MAE_v	MAE_norm	Mean_EPE	Pct_EPE<1.0px	SSIM_heatmap
0	Davis16	0.9949	0.9949	0.9623	1.3056	98.9915	0.1611	0.1609	0.2251	0.0504	0.0504	0.0658	0.0788	97.9014	0.9206
1	OpenPIV16	0.9995	0.9995	0.9961	0.4316	99.8559	0.0530	0.0537	0.0723	0.0249	0.0248	0.0312	0.0388	100.0000	0.8990
2	OpenPIV16_denoised	0.9983	0.9982	0.9894	0.4415	99.8579	0.1063	0.1077	0.1498	0.0452	0.0457	0.0658	0.0714	100.0000	0.8622
3	PIVlab16	0.9999	0.9999	0.9996	0.2771	99.9814	0.0169	0.0170	0.0204	0.0107	0.0105	0.0116	0.0167	100.0000	0.9244
4	wOFV	0.9998	0.9998	0.9993	0.8315	99.6316	0.0337	0.0338	0.0268	0.0258	0.0258	0.0207	0.0405	100.0000	0.9678
5	RAFT-PIV256	0.9977	0.9976	0.9901	2.5281	88.6448	0.1093	0.1114	0.1082	0.0817	0.0832	0.0764	0.1285	100.0000	0.9281
6	RAFT-PIV32	0.9997	0.9997	0.9987	0.9221	99.4919	0.0416	0.0420	0.0369	0.0307	0.0306	0.0275	0.0481	100.0000	0.9767
7	RAFT	0.9957	0.9952	0.9698	2.4631	87.9688	0.1932	0.2166	0.2675	0.1410	0.1506	0.1959	0.2267	99.5434	0.8733

Bruit = 8 :

	Outil	Corr_u	Corr_v	Corr_norm	Erreurs_angulaires_moy	Pct_valides_angle<5°	RMSE_u	RMSE_v	RMSE_norm	MAE_u	MAE_v	MAE_norm	Mean_EPE	Pct_EPE<1.0px	SSIM_heatmap
0	Davis16	0.9949	0.9949	0.9624	1.3188	98.9209	0.1609	0.1612	0.2252	0.0499	0.0512	0.0658	0.0790	97.8939	0.9208
1	OpenPIV16	0.9995	0.9995	0.9961	0.4556	99.8401	0.0528	0.0530	0.0715	0.0245	0.0249	0.0301	0.0385	100.0000	0.8993
2	OpenPIV16_denoised	0.9983	0.9983	0.9895	0.4378	99.8356	0.1065	0.1069	0.1494	0.0449	0.0456	0.0652	0.0712	100.0000	0.8631
3	PIVlab16	0.9999	0.9999	0.9995	0.3218	99.9449	0.0185	0.0181	0.0218	0.0124	0.0117	0.0132	0.0189	100.0000	0.9239
4	wOFV	0.9997	0.9997	0.9990	0.9221	99.5133	0.0371	0.0377	0.0316	0.0288	0.0287	0.0246	0.0454	100.0000	0.9623
5	RAFT-PIV256	0.9973	0.9976	0.9882	2.5146	89.2124	0.1181	0.1143	0.1175	0.0888	0.0838	0.0876	0.1367	100.0000	0.9167
6	RAFT-PIV32	0.9996	0.9995	0.9981	1.0605	99.1718	0.0478	0.0485	0.0448	0.0350	0.0352	0.0325	0.0552	100.0000	0.9660
7	RAFT	0.9960	0.9952	0.9721	3.0613	82.3841	0.1828	0.2058	0.2457	0.1332	0.1475	0.1768	0.2215	99.9001	0.8891

Bruit = 10 :

	Outil	Corr_u	Corr_v	Corr_norm	Erreurs_angulaires_moy	Pct_valides_angle<5°	RMSE_u	RMSE_v	RMSE_norm	MAE_u	MAE_v	MAE_norm	Mean_EPE	Pct_EPE<1.0px	SSIM_heatmap
0	Davis16	0.9949	0.9949	0.9622	1.3298	98.9334	0.1613	0.1613	0.2255	0.0516	0.0506	0.0669	0.0797	97.8873	0.9201
1	OpenPIV16	0.9995	0.9995	0.9962	0.4427	99.7971	0.0519	0.0516	0.0701	0.0246	0.0247	0.0308	0.0384	100.0000	0.9003
2	OpenPIV16_denoised	0.9983	0.9983	0.9895	0.4177	99.8037	0.1052	0.1056	0.1476	0.0445	0.0450	0.0646	0.0701	100.0000	0.8642
3	PIVlab16	0.9999	0.9999	0.9995	0.3650	99.9794	0.0197	0.0204	0.0235	0.0135	0.0140	0.0151	0.0218	100.0000	0.9224
4	wOFV	0.9996	0.9996	0.9987	1.0393	99.5588	0.0433	0.0420	0.0371	0.0338	0.0325	0.0292	0.0520	100.0000	0.9545
5	RAFT-PIV256	0.9975	0.9976	0.9888	2.4915	87.9570	0.1185	0.1172	0.1207	0.0872	0.0882	0.0899	0.1379	100.0000	0.9179
6	RAFT-PIV32	0.9994	0.9994	0.9974	1.2562	98.4646	0.0558	0.0552	0.0515	0.0414	0.0405	0.0383	0.0645	100.0000	0.9530
7	RAFT	0.9945	0.9950	0.9633	2.8723	83.7994	0.2057	0.2098	0.2662	0.1468	0.1506	0.1935	0.2320	99.7078	0.8739

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

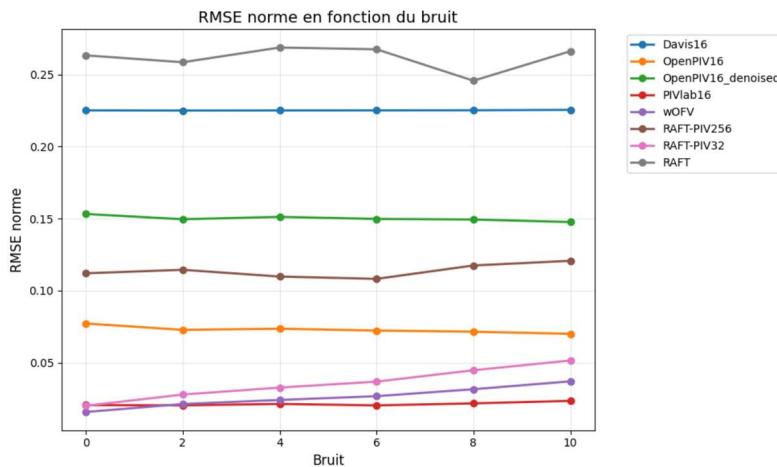


Figure 51 Evolution du RMSE en fonction du bruit test 2 simulation

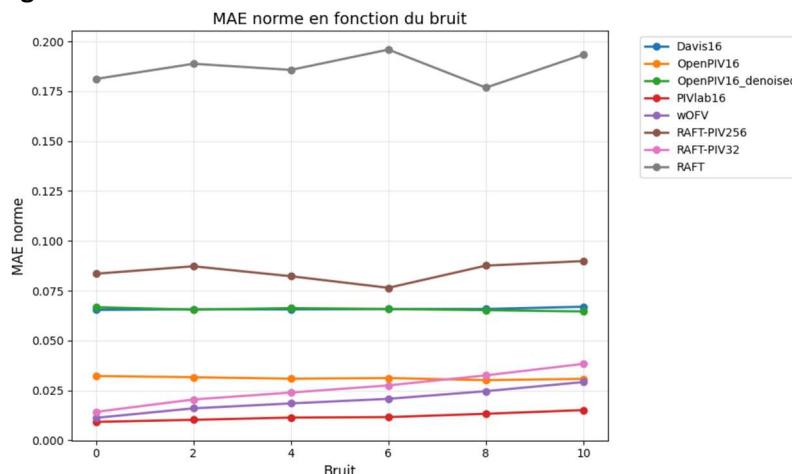


Figure 52 Evolution du MAE en fonction du bruit test 2 simulation

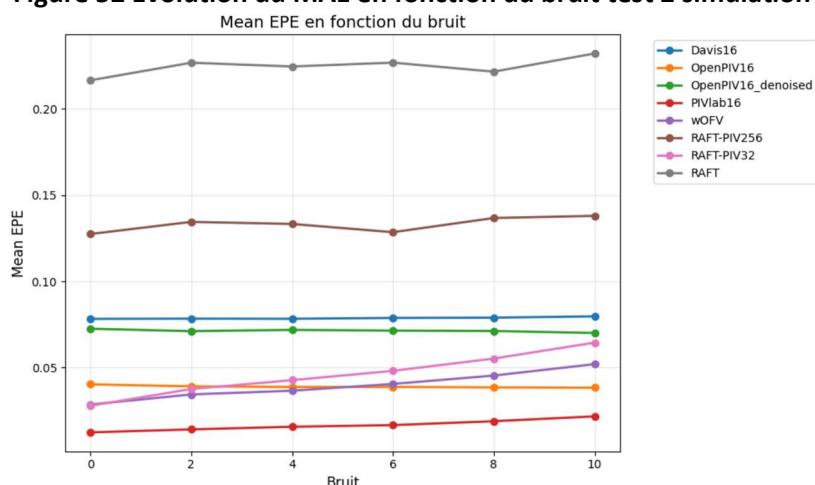


Figure 53 Evolution du EPE moyen en fonction du bruit test 2 simulation

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

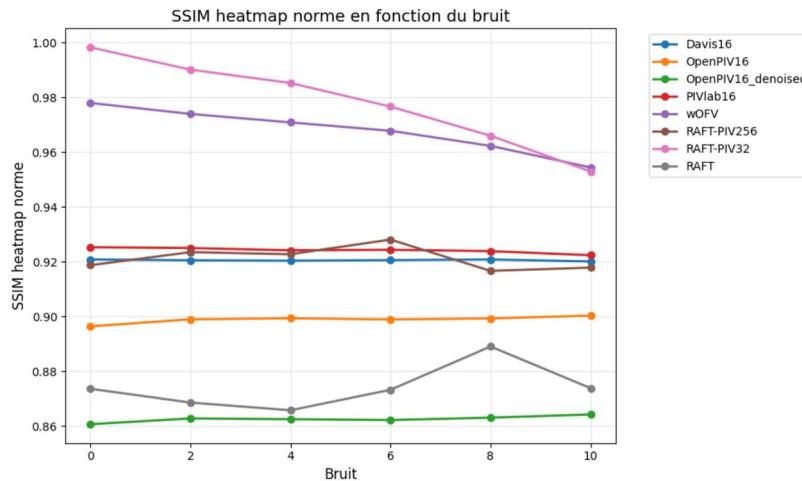


Figure 54 Evolution du SSIM en fonction du bruit test 2 simulation

Résultats obtenus :

Variation du déplacement :

Paramètres constants :

- Densité de particule = 10
- Bruit = 0
- Rayon des particules = 1.5 px

Ajout de openPIV16 avec débruitage pour voir effet sur écoulement non laminaire.

Résultats pour un déplacement de 5 % de la fenêtre => 0.8 px :

Outil	Corr_u	Corr_v	Corr_norm	Erreur_angulaire_moy	Pct_valides_angle<5°	RMSE_u	RMSE_v	RMSE_norm	MAE_u	MAE_v	MAE_norm	Mean_EPE	Pct_EPE<1.0px	SSIM_heatmap	
0	Davis16	0.9950	0.9950	0.9620	1.2501	99.0021	0.0319	0.0320	0.0449	0.0102	0.0099	0.0140	0.0157	100.0	0.9201
1	OpenPIV16	0.9992	0.9993	0.9967	0.7339	99.8814	0.0136	0.0129	0.0173	0.0107	0.0102	0.0138	0.0159	100.0	0.9004
2	OpenPIV16_denoised	0.9879	0.9882	0.9440	1.0344	99.8632	0.0547	0.0541	0.0765	0.0322	0.0316	0.0492	0.0503	100.0	0.7561
3	PIVlab16	0.9998	0.9998	0.9989	0.5317	99.9174	0.0065	0.0063	0.0077	0.0049	0.0048	0.0059	0.0076	100.0	0.9144
4	wOFV	0.9993	0.9992	0.9962	1.2999	98.1499	0.0138	0.0142	0.0159	0.0107	0.0108	0.0126	0.0169	100.0	0.9135
5	RAFT-PIV256	0.9872	0.9837	0.9372	6.6139	51.4065	0.0595	0.0592	0.0663	0.0464	0.0466	0.0508	0.0724	100.0	0.7190
6	RAFT-PIV32	0.9998	0.9998	0.9990	0.7596	99.7284	0.0072	0.0064	0.0066	0.0054	0.0049	0.0050	0.0081	100.0	0.9854
7	RAFT	0.9757	0.9837	0.8004	8.0998	37.6678	0.0873	0.0790	0.1005	0.0684	0.0609	0.0755	0.1007	100.0	0.6163

Résultats pour un déplacement de 10% de la fenêtre => 1.6 px :

Outil	Corr_u	Corr_v	Corr_norm	Erreur_angulaire_moy	Pct_valides_angle<5°	RMSE_u	RMSE_v	RMSE_norm	MAE_u	MAE_v	MAE_norm	Mean_EPE	Pct_EPE<1.0px	SSIM_heatmap	
0	Davis16	0.9950	0.9950	0.9618	1.1862	98.9844	0.0639	0.0638	0.0898	0.0191	0.0191	0.0264	0.0298	100.0	0.9206
1	OpenPIV16	0.9996	0.9996	0.9968	0.6897	99.8741	0.0201	0.0203	0.0262	0.0122	0.0123	0.0136	0.0188	100.0	0.9042
2	OpenPIV16_denoised	0.9960	0.9960	0.9815	0.8183	99.8624	0.0679	0.0681	0.0953	0.0343	0.0344	0.0506	0.0542	100.0	0.8284
3	PIVlab16	0.9999	0.9999	0.9995	0.3536	99.9696	0.0079	0.0076	0.0091	0.0054	0.0052	0.0057	0.0083	100.0	0.9234
4	wOFV	0.9997	0.9997	0.9988	0.8026	99.2586	0.0157	0.0158	0.0163	0.0114	0.0115	0.0122	0.0180	100.0	0.9599
5	RAFT-PIV256	0.9959	0.9948	0.9802	3.8732	71.3734	0.0627	0.0650	0.0616	0.0490	0.0499	0.0460	0.0779	100.0	0.8643
6	RAFT-PIV32	0.9999	0.9999	0.9994	0.5215	99.8211	0.0102	0.0100	0.0096	0.0074	0.0073	0.0070	0.0114	100.0	0.9955
7	RAFT	0.9921	0.9930	0.9374	3.9075	70.3686	0.0977	0.0879	0.1157	0.0733	0.0653	0.0849	0.1079	100.0	0.8122

Résultats pour un déplacement de 25% de la fenêtre => 4 px :

Outil	Corr_u	Corr_v	Corr_norm	Erreur_angulaire_moy	Pct_valides_angle<5°	RMSE_u	RMSE_v	RMSE_norm	MAE_u	MAE_v	MAE_norm	Mean_EPE	Pct_EPE<1.0px	SSIM_heatmap	
0	Davis16	0.9949	0.9949	0.9623	1.2954	98.9891	0.1610	0.1611	0.2251	0.0501	0.0500	0.0654	0.0783	97.8955	0.9208
1	OpenPIV16	0.9994	0.9995	0.9956	0.4352	99.8105	0.0577	0.0533	0.0758	0.0258	0.0247	0.0321	0.0396	100.0000	0.8971
2	OpenPIV16_denoised	0.9994	0.9995	0.9956	0.4350	99.8109	0.0577	0.0533	0.0758	0.0258	0.0247	0.0321	0.0396	100.0000	0.8972
3	PIVlab16	0.9999	1.0000	0.9996	0.1699	99.9935	0.0166	0.0158	0.0210	0.0078	0.0077	0.0092	0.0123	100.0000	0.9249
4	wOFV	0.9999	0.9999	0.9997	0.6051	99.8238	0.0259	0.0256	0.0163	0.0183	0.0180	0.0117	0.0287	100.0000	0.9779
5	RAFT-PIV256	0.9981	0.9979	0.9911	2.4299	90.1192	0.1012	0.1085	0.1045	0.0794	0.0823	0.0812	0.1275	100.0000	0.9320
6	RAFT-PIV32	0.9999	0.9998	0.9996	0.5264	99.7906	0.0277	0.0286	0.0200	0.0172	0.0182	0.0141	0.0279	100.0000	0.9984
7	RAFT	0.9955	0.9960	0.9738	2.7544	87.3428	0.1898	0.2025	0.2552	0.1351	0.1461	0.1827	0.2196	99.7810	0.8829

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

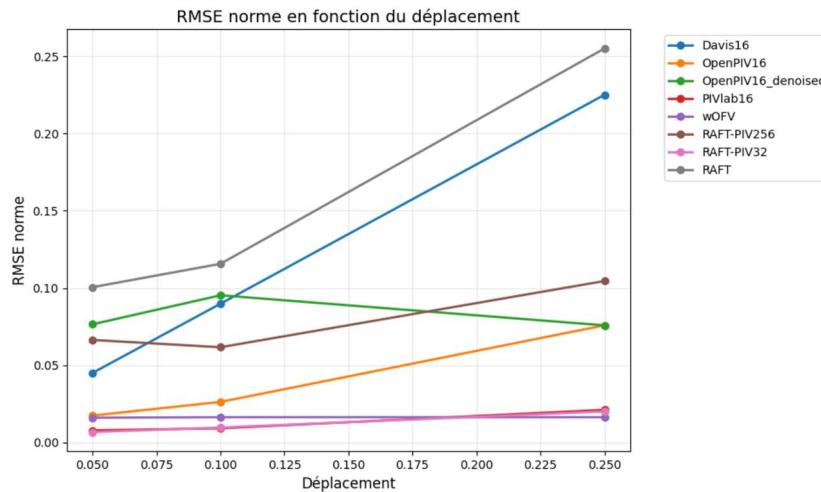


Figure 55 Evolution du RMSE en fonction du déplacement test 2 simulation
MAE norme en fonction du déplacement

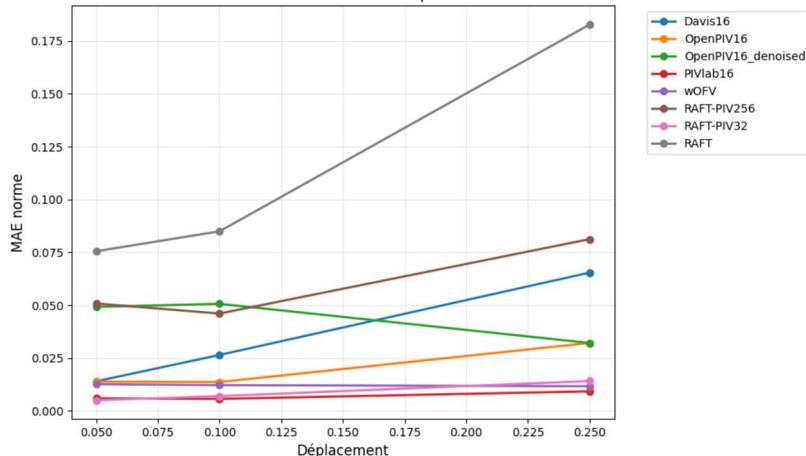


Figure 56 Evolution du MAE en fonction du déplacement test 2 simulation
Mean EPE en fonction du déplacement

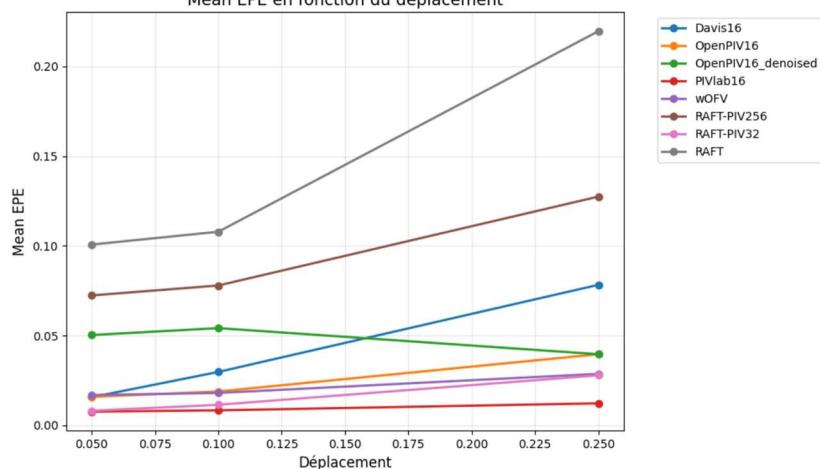


Figure 57 Evolution du EPE moyen en fonction du déplacement test 2 simulation

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

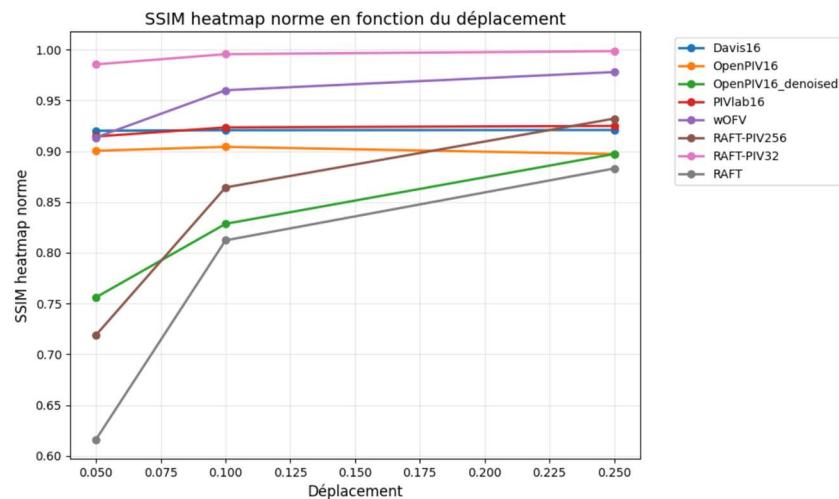


Figure 58 Evolution du SSIM en fonction du déplacement test 2 simulation

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

7.2 Captures d'écran des fonctionnalités de l'analyseur d'ensemencement

Image binaire (Seuil: 50)

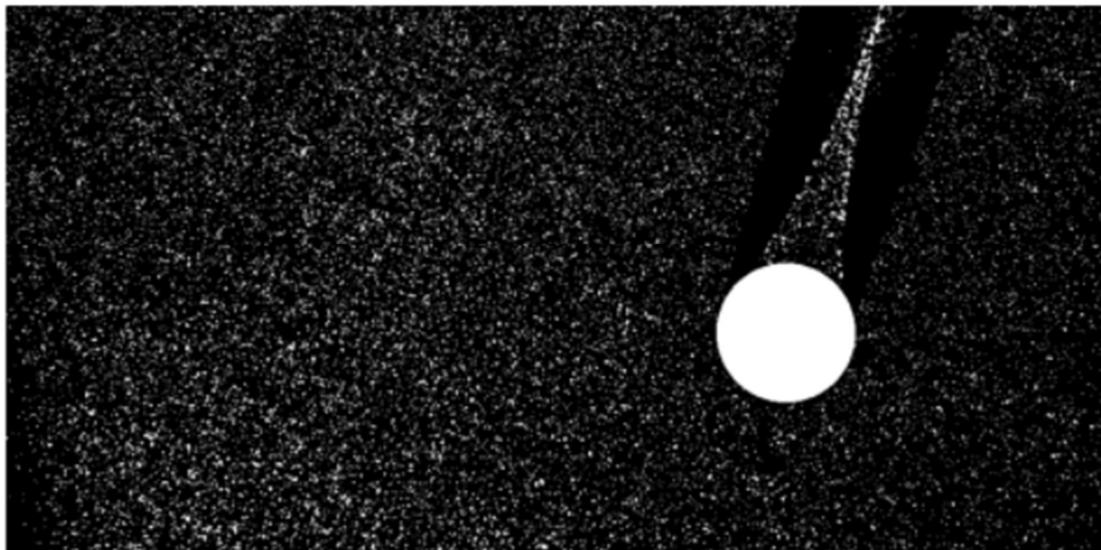


Figure 59 Binarisation des images : manuelle ou via algorithme OTSU

Particules détectées

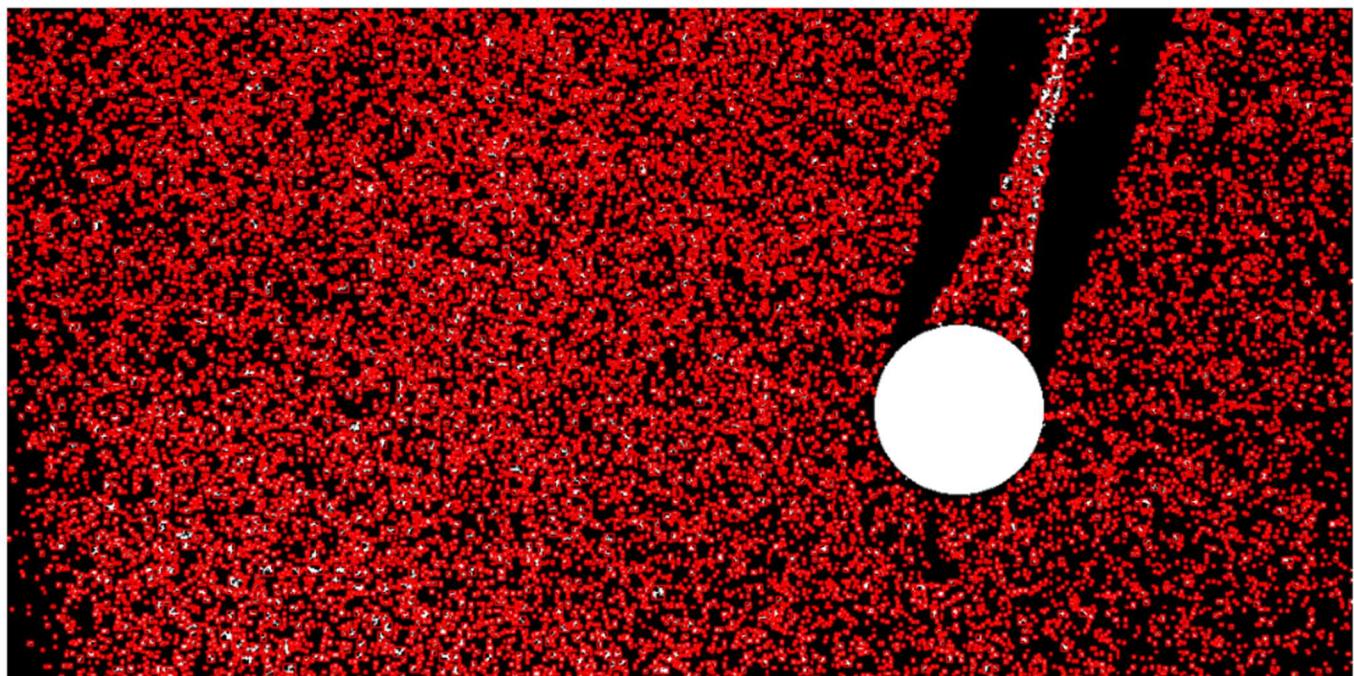


Figure 60 Détection à partir de l'image binarisé et de cv2.connectedComponentsWithStats des particules et tracé des boîtes englobantes

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

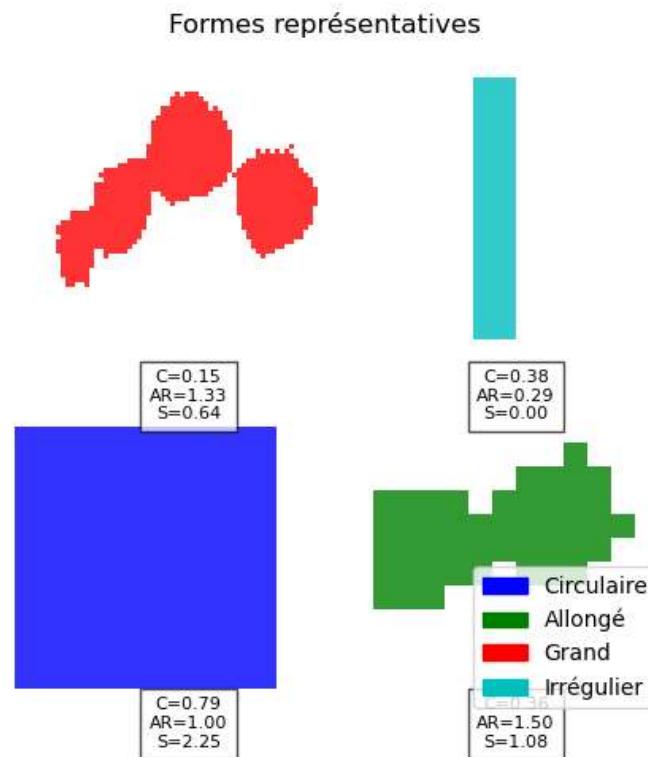


Figure 61 Tracé de 4 formes représentatives des classes, contours des particules obtenus via application de cv2.findContours dans les boîtes englobantes

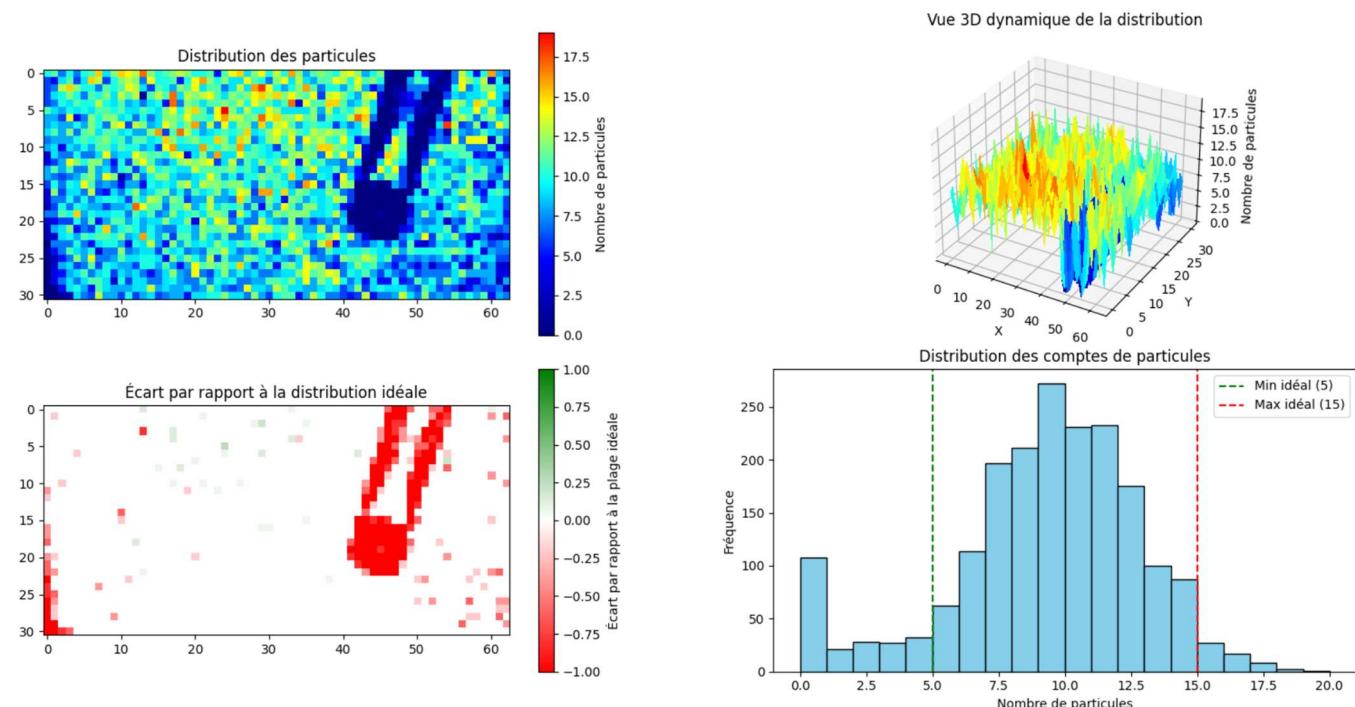


Figure 62 Visualisations 2D et 3D du nombre de particules par fenêtre

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

Carte de chaleur moyenne des agglomérats (Fenêtre 32×32 px)

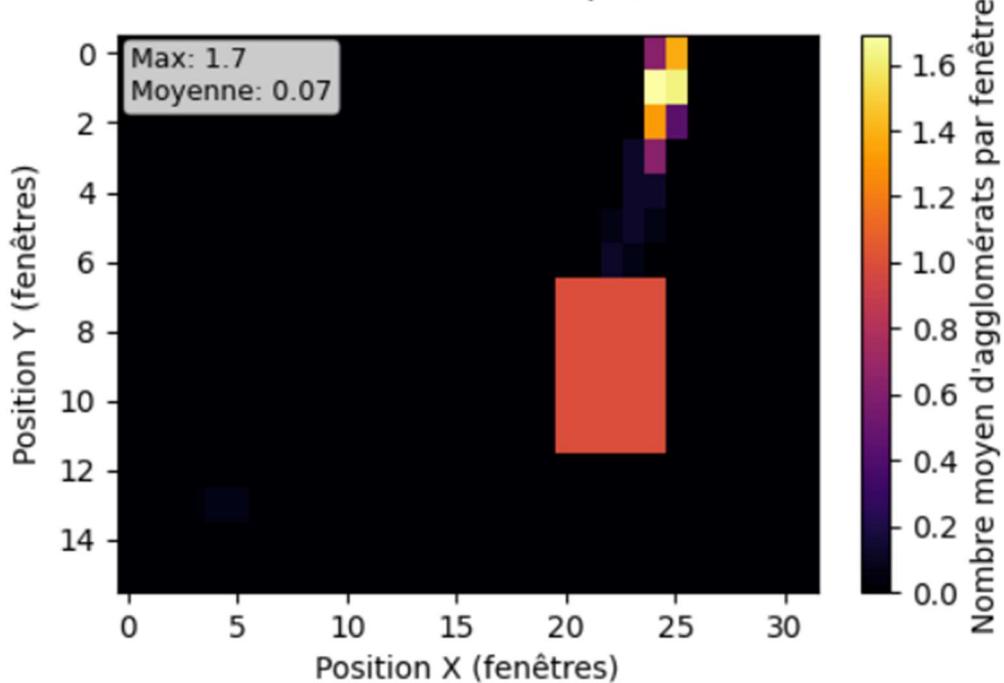


Figure 63 Visualisation spatiale des agglomérats

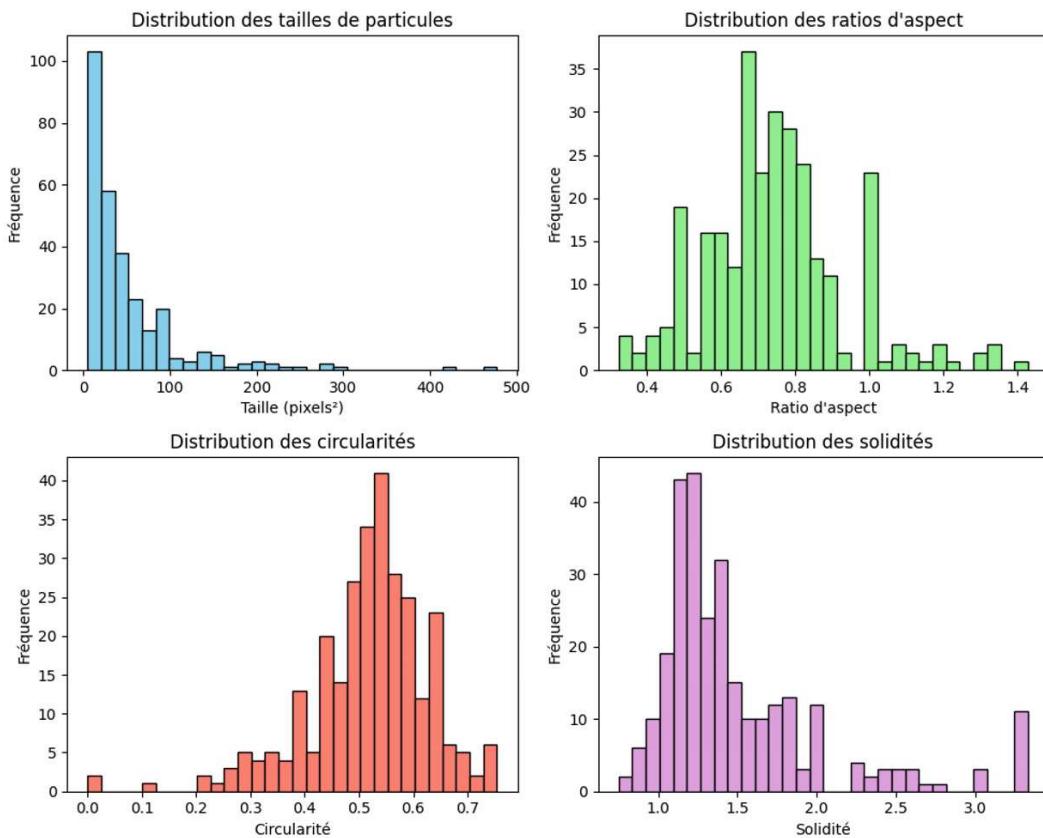


Figure 64 Histogrammes de distribution des formes

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

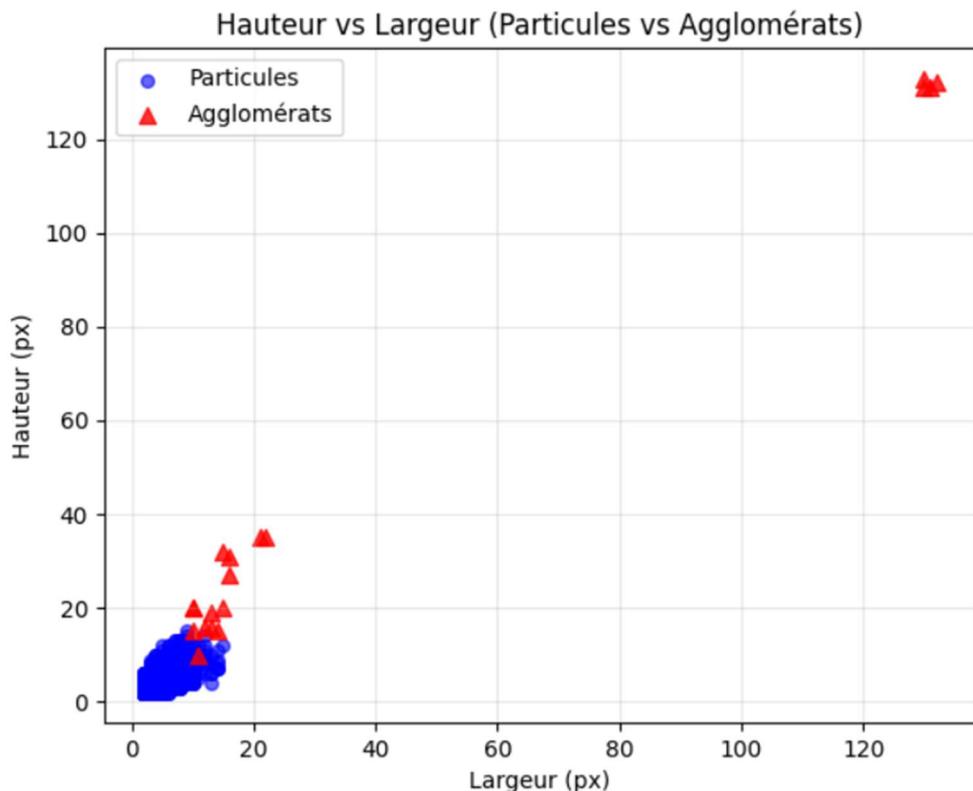


Figure 65 Hauteur en fonction de la largeur des particules et agglomérats détectés

Direction Mobilité et Systèmes

Département Simulation et analyses expérimentales des systèmes

8 Résumé

Application de l'apprentissage profond et de l'intelligence artificielle pour la caractérisation des écoulements

Mots clés : Analyse d'images, écoulements souterrains, traitement numérique, intelligence artificielle, développement logiciel, recherche appliquée.

Résumé :

Ce stage, réalisé au sein d'IFP Energies nouvelles dans le cadre d'un projet européen, avait pour objectif d'améliorer les outils d'analyse d'images utilisés pour étudier les mouvements de fluides dans des milieux souterrains complexes.

Au début du stage, plusieurs limites ont été identifiées dans les outils existants : un manque de flexibilité, l'impossibilité de vérifier la qualité des images avant leur traitement, et des méthodes d'analyse peu adaptées aux objectifs du projet.

Pour répondre à ces problématiques, l'intelligence artificielle a été exploitée, afin d'accélérer les analyses et d'améliorer leur précision, puis deux nouveaux programmes informatiques ont été développés. Le premier permet d'analyser plus facilement les images issues des expériences en laboratoire. Le second évalue la qualité des images avant leur traitement, afin d'en garantir la fiabilité.

Ces outils, conçus pour être facilement modifiables, offrent plus de liberté aux chercheurs et peuvent évoluer selon les besoins.

Ce stage a ainsi contribué au développement de solutions innovantes pour la recherche sur les écoulements souterrains.

Application of Deep Learning and Artificial Intelligence for Flow Characterization

Key words: Image analysis, underground flows, digital processing, artificial intelligence, software development, applied research.

Abstract:

This internship, carried out at IFP Energies nouvelles as part of a European project, aimed to improve image analysis tools used to study fluid movements in complex underground environments.

At the beginning of the internship, several limitations were identified in the existing tools: a lack of flexibility, no way to check the quality of images before processing, and analysis methods not well suited to the project's goals.

To address these issues, artificial intelligence was used to speed up the analysis and improve its accuracy. In addition, two new software tools were developed. The first one makes it easier to analyze images from laboratory experiments. The second checks the quality of the images before analysis to ensure reliable results.

These tools were designed to be easily adaptable, giving researchers more freedom and allowing future improvements based on their needs.

This internship thus contributed to the development of innovative solutions for research on underground fluid flows.