



## Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/>  
Eprints ID: 9877

**To cite this document:** Prothin, Sebastien and Djeridi, Henda and Billard, Jean-Yves *Mesure de champs de vitesse en PIV Diphasique. Application aux écoulements cavitants.* (2008) In: Congrès Francophone de Techniques Laser, CFTL 2008, 16 September 2008 - 19 September 2008 (Poitiers, France).

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: [staff-oatao@inp-toulouse.fr](mailto:staff-oatao@inp-toulouse.fr)

# Mesure de champs de vitesse en PIV Diphasique. Application aux écoulements cavitants.

**Sebastien Prothin\*, Henda Djeridi\*\* et Jean-Yves Billard\***

*\* Institut de Recherche de l'Ecole Navale  
Groupe Hydrodynamique et Systèmes Propulsifs  
Ecole Navale, BP 600, 29240 BREST ARMEES*

*\*\* Laboratoire de Physique des Océans UMR 6523  
UBO / UFR Sciences  
6, avenue Le Gorgeu B.P. 809 29285 Brest Cedex*

## Résumé

*Ce travail s'insère dans le cadre d'une étude du comportement hydrodynamique et cavitant de profils épais de type NACA bidimensionnel. Ces profils sont largement utilisés en hydrodynamique navale pour les systèmes de propulsion électrique en nacelle, pour les gouvernails et sont sujet à des décollements à faible incidence ainsi qu'à des cavitations instationnaires voisines de poches se développant sur l'extrados. Le but de ce travail expérimental est de caractériser la topologie de l'écoulement diphasique pour mieux appréhender les mécanismes d'interaction entre une phase vapeur et une phase liquide et ainsi comprendre les effets de la cavitation sur les performances hydrodynamiques des corps épais. Cependant, la présence de bulles et de cavités de vapeur ne permet pas d'obtenir le champ de vitesse par les techniques classiques de vélocimétrie laser sans traitement préalable. C'est pourquoi, dans le but de discriminer la phase liquide (objets de type traceur ou particules) de la phase vapeur (objets de type : microbulles, bulles ou poches) on propose une méthode de traitement d'images et de reconstitution de champ de vitesse des différentes phases et objets identifiés. Cette technique consiste à détecter sur une image des classes d'objets de différente taille et d'isoler chaque classe afin de procéder à une moyenne pondérée pour recalculer les champ de vitesse liquide ainsi que la vitesse de bulles et la vitesse de glissement.*

## 1. Introduction

Les techniques de mesure en PIV diphasique sont nombreuses, mais souvent appliqués à des écoulements de type gouttes/gaz [1][2][3], ou particules solides/gaz [4].

En écoulement de type gaz/liquide ou vapeur/liquide, la détermination du champ de vitesse liquide par les méthodes classiques de PIV ou LDV est très délicate compte tenu de la dynamique des inclusions gazeuses et de leur interaction avec la phase liquide. En effet, les travaux de Sarraf [5] et Arndt [6], ont montré que la présence d'une cavité de vapeur attaché au profil ou encore la présence de structure tourbillonnaire cavitante dans le sillage d'un obstacle, engendrait des modifications notables de l'écoulement en terme de turbulence induite dans la couche limite se développant sur le profil, d'élargissement du sillage de l'obstacle ou encore de modification de la dynamique du lâcher tourbillonnaire derrière un corps épais. Les interactions entre la phase vapeur et liquide ont été démontrées et quantifiées mais pour bien comprendre ces mécanismes, il faut savoir que la discrimination des phases reste encore un problème ouvert. Dans la technique standard de PIV on considère que les vitesses des traceurs sont identiques à celles du fluide environnant compte tenu de la taille et de la densité des particules d'ensemencement utilisées. Dans le cas de la mesure en diphasique cette approche traditionnelle ne peut pas être utilisée directement pour déterminer les propriétés des écoulements puisque les poches, les bulles et les traceurs seront simultanément présents dans les images acquises et ont des vitesses différentes de celles du fluide environnant (vitesse de glissement). Comme les structures, autres que traceurs, ont a priori un déplacement différent du mouvement de la phase liquide, la corrélation peut être affectée par le déplacement de ces dernières et les champ de vitesse liquide obtenus sont erronés. Par conséquent, la discrimination des structures et des traceurs s'avère nécessaire.

Pour discriminer les traceurs des structures cavitantes (bulles ou nuages de vapeur), on utilise une approche basée sur la détermination de leur taille et leur classification en objet (traceur passif, bulles et nuages). Le traitement comporte plusieurs étapes :

La première étape consiste à détecter les objets dans une image permettant ainsi d'isoler les différentes inclusions sur l'image enregistrée. Ces populations ont chacune des caractéristiques très différentes en termes de niveaux de gris sur l'image et taille en nombre de pixels et la discrimination se fait par seuillage. Cette étape d'isolement permet de créer trois images distinctes contenant chacune un ensemble d'objets différent. On peut affiner ce traitement de seuillage par une méthode morphologique qui consiste à diminuer l'influence du choix du seuillage.

Concernant la deuxième étape, on applique un traitement particulier à chaque type d'image contenant une classe d'objet spécifique. Pour les images comprenant uniquement les traceurs (objet de type particules d'ensemencement), un traitement de type corrélation d'image est appliqué permettant d'accéder à des mesures instantanées de vitesse eulérienne du fluide. Ces images, faisant partie du groupe auquel on a retranché par seuillage, les classes d'objet de taille supérieure, présentent des champs de vitesse « troués », modifiant ainsi le calcul du champ moyen, qui se déduit par une reconstruction de la moyenne prenant en compte le taux d'absence d'information lié aux zones de l'image où se trouvent les bulles ou les poches. Les images comprenant les structures cavitantes sont de deux types, l'un comprenant des bulles de tailles moyennes (quelques dizaines de pixels) et l'autre représentant les poches de tailles importantes (taille supérieure à 5000 pixels environ).

Le but de cette méthode est de permettre la mise en évidence d'une éventuelle vitesse de glissement entre les différentes phases, mais aussi de déterminer le biais engendré par l'application directe d'algorithmes PIV aux images initiales comprenant des phases dispersées.

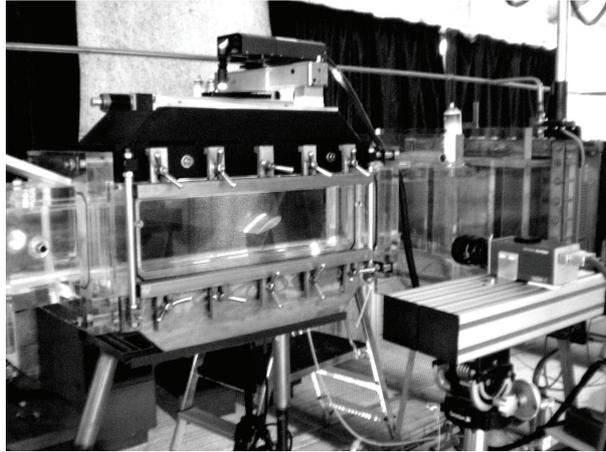
## 2. Dispositif Expérimental

Les essais ont été réalisés dans la veine du tunnel hydrodynamique de l'Ecole navale (THEN), de section carrée de 192 mm de côté, et d'une longueur de 1 m. Les mesures sont réalisées sur un hydrofoil symétrique NACA0025 (Abbott, 1959) d'épaisseur relative de 25% par rapport à la longueur de corde  $c = 100$  mm et de 192 mm d'envergure. Les conditions d'utilisation du profil correspondent à une vitesse à l'entrée de veine de 5 m/s correspondant à un nombre de Reynolds de  $0.5 \cdot 10^6$  et un angle d'incidence de  $10^\circ$ . La pression dans la veine d'essai pouvant varier de 30 mbar à 3 bar, on peut obtenir des conditions de fonctionnement en régime sub-cavitant et cavitant. Pour le développement de la poche de cavitation attachée le paramètre de Thomas  $\sigma$  défini par :  $\sigma = (p - p_v) / (0.5 U_{ref}^2)$  est égal à 1.4 correspondant à une poche dont la zone de fermeture est instable engendrant simultanément un nuage de bulles et une éjection de poche de vapeur. La visualisation de la cavité de vapeur est présentée en figure 1.



*Fig. 1 Exemples d'images prises par la caméra*

Les mesures du champ de vitesse sont réalisées par un système PIV 2C-2D constitué d'un laser Nd :YAG pulsé d'une puissance de  $2 \cdot 20$  mJ d'une longueur d'onde 514 nm, de caméra PCO sensicam d'une résolution de 1280x1024 pixels équipée d'un objectif de focale 60 mm et d'un filtre. Le diaphragme à une ouverture de 1.2. Le dispositif est montré en figure 2.



*Fig. 2 Dispositif Expérimental*

L'écoulement estensemencé de particules de verre argentées sphériques dont la taille est de  $10\ \mu\text{m}$ , cette taille de particules correspond à une taille de 2 pixels en moyenne sur une image PIV. L'algorithme de corrélation d'images est celui développé par Dantec (FlowManager V4.71). La taille des fenêtres de corrélation est de  $32 \times 32$  pixels avec un recouvrement de 50%, avec ces paramètres, le nombre de vecteurs par champ est de  $79 \times 63$  pour une taille d'image de  $97.6 \times 80.1\ \text{mm}$  ( $-0.468 < x/c < 0.508$  et  $-0.268 < y/c < 0.533$ ).

Le temps entre deux doublets d'images est de 500ms, le temps entre deux images d'un même doublet est de  $20\ \mu\text{s}$ , et le nombre d'images acquis est de 1000 doublets.

### **3. Méthode de discrimination d'objet**

L'acquisition des images brutes se fait par l'intermédiaire du logiciel PIV, ces images étant ensuite exportées pour effectuer les traitements. Les images ainsi modifiées sont réimportées dans le logiciel pour effectuer une cross-corrélation. La première étape consiste à détecter les objets dans une image composée à la fois de traceurs et de structures.

#### **a) Méthode de seuillage**

Les images acquises par la camera sont codées en niveau de gris (0 : noir, 255 : blanc), or la détection d'objet dans les images étant une opération s'effectuant sur des images binaires, une étape de binarisation est nécessaire avant cette détection.

L'opération de binarisation est en fait un seuillage haut des niveaux de l'image. Ce seuil de binarisation est délicat à choisir, dans la mesure où, il dépend de l'ensemencement, de l'éclairage, et du réglage de la camera. Une étude de population a été faite sur les différents ensembles de doublets. Pour un seuillage donné (compris entre 1 et 254), le nombre d'entités de taille identique. Les courbes obtenues sont tracées sur un même graphique (figure 3). On peut voir sur ces courbes que pour deux seuils distincts, 100 et 150, on obtient le même nombre d'objets sur les deux images du doublet. Après une comparaison qualitative de ces images correspondant à deux seuils différents, le choix s'est porté sur le seuillage au niveau 150.

Population d'objet de taille comprise entre 10 et 400 pixels pour différentes valeurs de seuillage

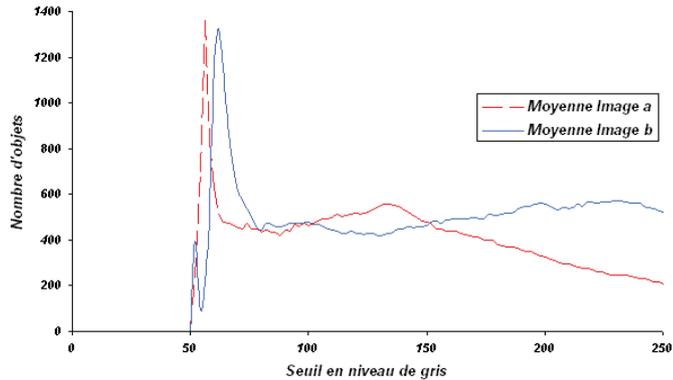


Fig. 3 Population moyenne pour les doublets

Le problème de cette technique de seuillage directe des images brutes est la forte variance du seuil optimal déterminé. En effet, la frontière d'une structure cavitante est une zone marquée par une forte variation de niveaux de gris, par conséquent, la détection de ces contours est très sensible au seuil, cette sensibilité est illustrée en figure 4 où deux seuillages très proches l'un de l'autre sont réalisés sur une même image de poche avec une variation importante de la surface de poche matérialisée par le contour vert sur les deux images.

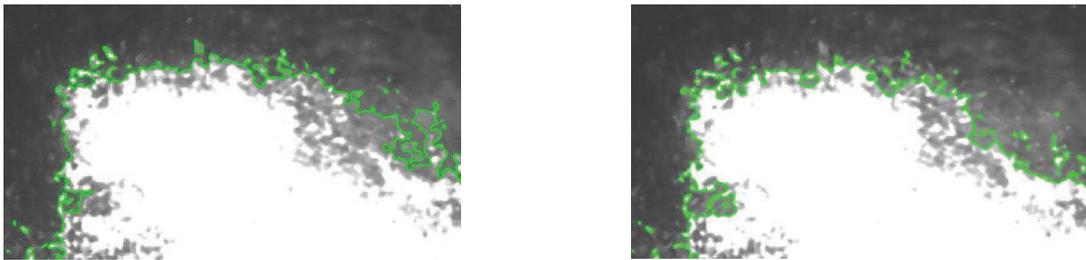


Fig. 4 Différence de détection pour deux valeurs de seuillage proche (gauche :140, droite :150)

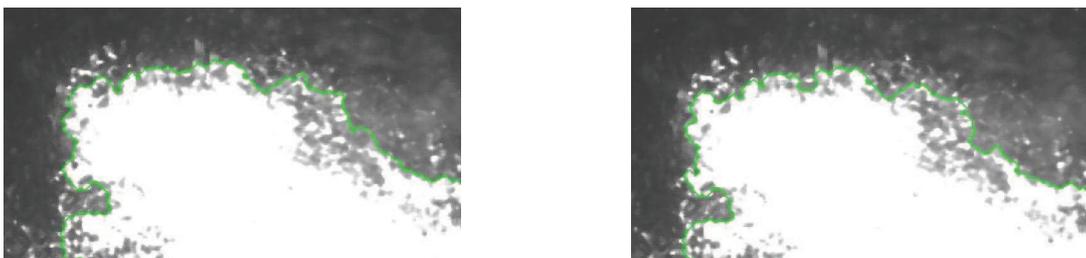


Fig. 5 Différence de détection pour deux valeurs de seuillage proche avec Traitement Morphologique (gauche :140, droite :150)

Une solution à ce problème consiste en une uniformisation des images par un filtrage adéquat, c'est un filtrage réalisé à l'aide d'opération de traitement d'image de type morphologique.

#### b) Méthode d'opération morphologique

La morphologie mathématique est un outil d'analyse et de filtrage des images. Le principe de base de la morphologie mathématique ensembliste est de comparer l'image à analyser à un ensemble de géométrie connue appelé élément structurant ou noyau. On déplace cet élément structurant de façon à ce que son origine passe par toutes les positions de l'image, afin d'en mettre en évidence certaines caractéristiques.

Les opérations de base de la morphologie mathématique sont deux opérations duales appelées respectivement érosion et dilatation. Ce nom provient de l'effet produit sur une forme binaire par chacun de ces opérateurs (figure 6).

Des combinaisons de ces opérateurs permettent de filtrer les images du point de vue morphologique, c'est à dire supprimer (ou mettre en valeur) des formes sur l'image comparables aux éléments structurants utilisés. C'est le cas de l'ouverture (succession d'une dilatation et d'une érosion utilisant le même élément structurant) et de la fermeture (succession d'une érosion et d'une dilatation utilisant le même élément structurant).

Enfin la comparaison (ou la différence) d'une image érodée à une image dilatée (avec le même élément structurant) fait apparaître les contours subjectifs des objets présents sur l'image. Cette opération porte le nom de gradient morphologique. Nous nous limiterons, dans cette étude, à ces outils morphologiques de base.

Les premières approches de morphologie mathématique ont concerné les images binaires, c'est à dire des images issues d'une classification. Dans ces approches, chaque pixel d'une image numérique binaire est classifié comme appartenant à une des formes à analyser ou au fond de l'image (qui est la classe duale). Une opération morphologique peut être vue comme une modification de cette classification en utilisant le voisinage défini par l'élément structurant. Plusieurs extensions ont été proposées pour adapter, généraliser ou simplement mimer les opérations morphologiques sur des images à niveaux de gris d'une part et avec des éléments structurants fonctionnels d'autre part.

Toute la difficulté de cette méthode est de déterminer, d'une part, la forme de l'élément structurant, et d'autre part, la dimension de celui-ci. Les différents types d'éléments structurant étudiés sont résumés dans la figure 7.

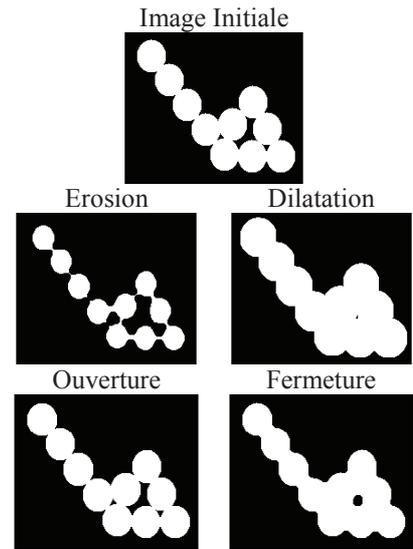


Fig. 6 Opérations Morphologiques

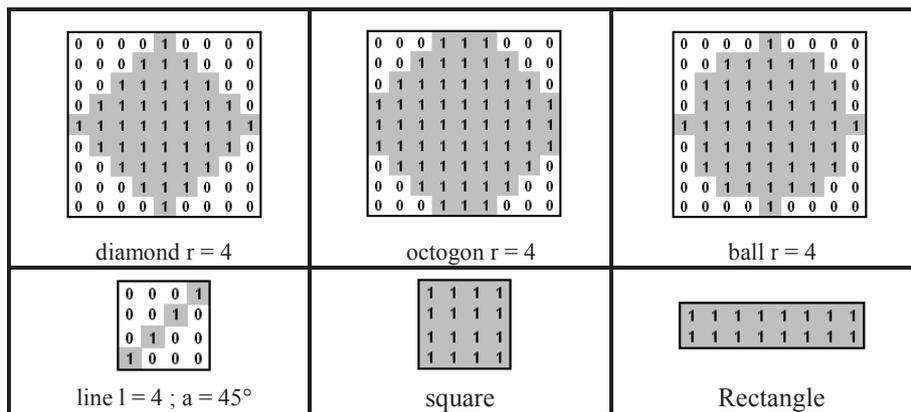


Fig. 7 Forme des divers éléments structurants

Après une comparaison des ces différents éléments structurant, et de l'influence de leurs tailles sur le traitement, il est apparu que l'élément permettant une détection optimal semblé être le *diamond de taille 5*. Le résultat sur la sensibilité de la détection est illustré par les images de la figure 5.

### c) Discrimination d'objets

Avec les images binaires obtenues, nous pouvons maintenant rechercher les différents objets contenus dans celles-ci. L'algorithme de détection utilisé est celui utilisé dans le logiciel Matlab, correspondant à une procédure décrite dans *Computer and Robot Vision* [7].

Suite à cette détection, il nous est possible d'étudier les populations selon divers critères, comme le nombre d'objet ou la taille de ceux-ci. La figure 8 montre l'exemple de population dans 3 doublets d'image pris au hasard, les échelles étant définies pour pouvoir apprécier toutes l'étendu de la gamme de taille (de 1 à plusieurs milliers de pixels). On voit nettement que, quelle que soit l'image étudiée, la tendance de population à la même répartition. Avec, pour des tailles allant de 1 à environ 10 pixels, les traceurs, pour des tailles supérieures à 200 pixels, les grosses structures, de type poche, et en intermédiaire des structures plus petites correspondant aux inclusions de type bulle.



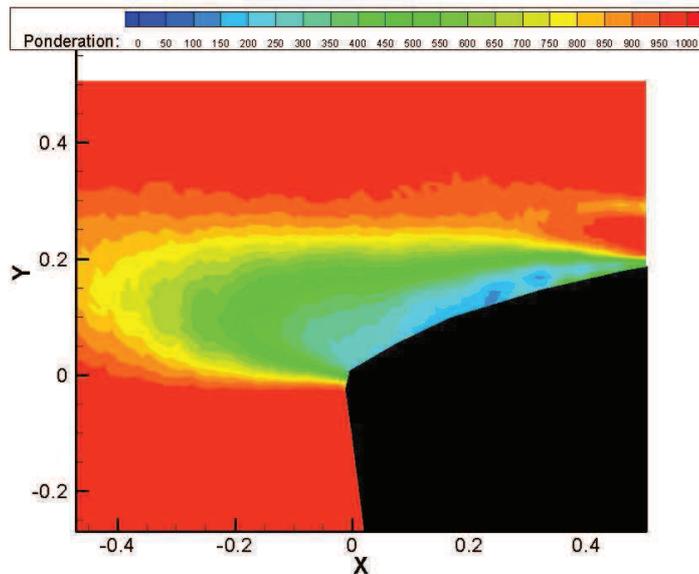
Fig. 8 Etude de la population de 3 doublets pris au hasard

d) Algorithme de reconstitution du champ de vitesse

Dans un traitement classique de champs de vecteurs issus de la PIV, le champ peut être masqué partiellement, c'est-à-dire qu'une partie des images est forcée à une vitesse nulle, qui peut être un obstacle ou tout simplement une zone dans laquelle on ne veut pas effectuer de corrélation. En général, il existe un masque pour un ensemble d'images, dans notre cas, le masque (trous dus aux traitements préliminaires) est différent d'une image à l'autre.

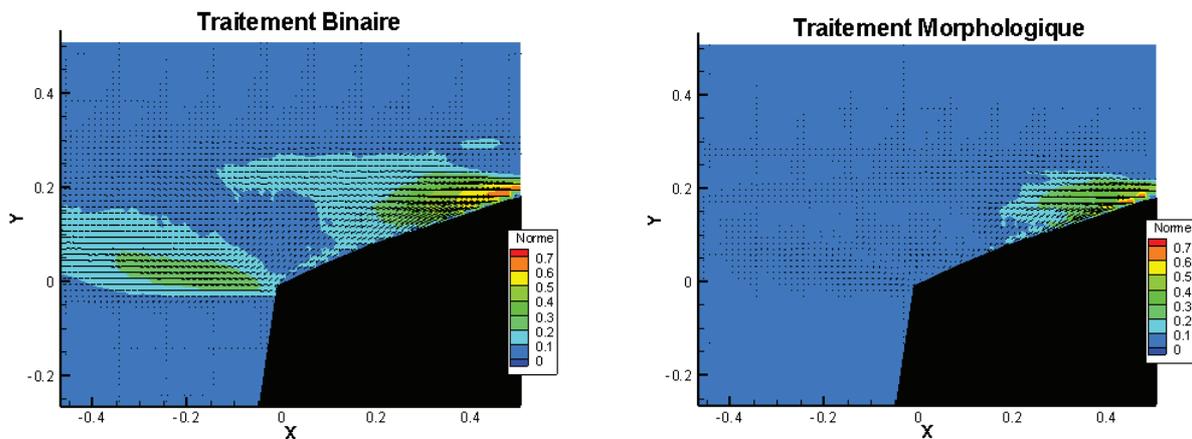
Pour palier à ce problème, nous effectuons la cross-corrélation sans aucun masque, ceci nous générant donc des champs de vecteur localement erronés, et nous traitons nos champs à l'extérieur du logiciel de PIV. La reconstruction des champs consiste à vérifier pour chaque vecteur s'il est localisé dans une zone exclue par le traitement. Si c'est le cas, celui-ci est forcé à zéro, sinon, il n'est pas modifié. Ainsi grâce à cette reconstruction, nous obtenons un champ « propre » c'est-à-dire exempt de tous vecteurs aberrants.

Une autre particularité de notre traitement concerne les champs moyens, en effet, par définition le logiciel effectue une moyenne en sommant chaque champ puis en divisant cette somme par le nombre de champs. Cette moyenne ne tient pas compte des vecteurs aberrants qui sont obtenus dans les zones trouées. Pour éviter cette erreur, nous avons déterminé le champ moyen à l'extérieur, en effectuant une moyenne « pondérée ». Cette procédure consiste à sommer nos champs de vecteurs reconstruits et à diviser cette somme, non plus par le nombre de champs, mais par une matrice de coefficients correspondant au nombre de vecteurs validés par point de grille. Cette matrice de coefficients (représentée en niveaux de couleur sur la figure 9) correspond en fait au taux de « trou », ou au taux de présence de vapeur.



*Fig. 9 Taux de présence moyen du masque*

On réalise une comparaison entre les champs bruts (champs de vecteurs obtenus par corrélation des images originales n'ayant subi aucun traitement), et les champs traités par les deux méthodes (seuillage et traitement morphologique). Les champs de différence obtenus sont présentés en figure 10. Les vecteurs correspondent aux différences, et la couleur quantifie la norme adimensionnelle de l'écart des vitesses.



*Fig. 10 Différences entre Vecteurs bruts et Vecteurs traités (gauche : Traitement 1 (binaire), droite : Traitement 2 (Morphologique))*

Les deux traitements conduisent à des évaluations de biais différentes. En effet, on voit que pour le traitement morphologique les maxima de la différence sont localisés dans la zone où le taux de vapeur local moyen est le plus important, alors que pour le traitement binaire, ces maxima sont d'une part plus intenses et d'autre part plus dispersés dans une zone en aval du bord de fuite où le taux de vide n'est pas significatif. Ce dernier point laisse penser que l'écart est alors lié à un biais du traitement et non pas à la cavitation.

#### 4. Conclusion et Perspectives

Le travail présenté s'intéresse à la discrimination d'objet dans des images PIV destinées à déterminer les champs de vitesse du liquide dans des écoulements diphasiques gaz-liquide. La phase gazeuse pouvant prendre la forme de bulle ou de poches de grandes dimensions l'inter corrélation classique sans traitement préalable des images engendre un biais sur les champs de vitesse instantanés et moyen. Une méthode préalable de traitement d'image mettant en œuvre des outils morphologiques a été mise en place pour soustraire les structures cavitantes (bulles et poches) en s'affranchissant d'un choix arbitraire du seuillage en niveau de gris.

Il a été montré que, dans la zone de forte présence de vapeur, à l'aval d'une poche, la différence entre la vitesse fluide biaisée (inter corrélation sans traitement préalable) et non biaisée (inter corrélation avec traitement préalable) peut atteindre 70 % de la vitesse moyenne à l'infini dans le cas présenté.

L'objectif suivant de ce travail consiste d'une part à exploiter les images de bulles pour déterminer leurs vitesses par développement d'un algorithme de PTV adapté et, d'autre part, un traitement de type « reconnaissance de forme active » sera adapté à l'exploitation des images des poches, traitement permettant, en plus d'une étude de leurs vitesses, une étude de la déformation relative des structures et du taux de vide.

## Références

- [1] B. Tôth, J. Anthoine et M. L. Riethmuller. Mesures PIV diphasiques dans un modèle de propulseur. Dans *Congrès Francophone de Techniques Laser*, septembre 2006.
- [2] B. Tôth, A. De Lauretis et J. Anthoine. Développement d'une technique PIV pour les écoulements diphasiques gaz-gouttes. Dans *9<sup>ème</sup> Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser*, septembre 2004.
- [3] A. Tchiftchibachian et M. Amielh. Etude des effets du dégazage dans la région de proche sortie d'un jet liquide par PIV discriminante. Dans *9<sup>ème</sup> Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser*, septembre 2004.
- [4] L. Vignal, L. Ben et S. Cazin. Validation de mesure couplées PIV-PTV en écoulement turbulent diphasique gaz-particules. Dans *9<sup>ème</sup> Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser*, septembre 2004.
- [5] C. Sarraf, Etude expérimentale du comportement hydrodynamique de profils portants épais. Etude de la couche limite. *Thèse de l'École Centrale de Nantes et l'Université de Nantes*. 2007.
- [6] R.E.A. Arndt, M. Kjeldsen, C.C.S. Song, and A. Keller, Analysis of cavitating wake flow. *Proceedings of the XXI<sup>ème</sup> IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, Lausanne 2002.
- [7] Haralick, Robert M., and Linda G. Shapiro, *Computer and Robot Vision*, Volume I, Addison-Wesley, 1992, pp. 28-48.