



HAL
open science

PIV à grande échelle appliquée sur la dispersion par explosif

Charline Fouchier, Delphine Laboureur, Emmanuel Lapebie, Miguel Mendez, Jeroen van Beeck, Pierre Ginsburger, Sébastien Courtiaud, Jean-Marie Buchlin

► **To cite this version:**

Charline Fouchier, Delphine Laboureur, Emmanuel Lapebie, Miguel Mendez, Jeroen van Beeck, et al.. PIV à grande échelle appliquée sur la dispersion par explosif. 16ème Congrès Francophone de Techniques Laser pour la mécanique des fluides, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris Saclay, IRSN, Sep 2018, Dourdan, France. hal-02097812

HAL Id: hal-02097812

<https://hal.science/hal-02097812>

Submitted on 12 Apr 2019

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

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

PIV à grande échelle appliquée sur la dispersion par explosif.

Charline Fouchier¹, Delphine Laboureur¹, Emmanuel Lapébie², Miguel Mendez¹, Jeroen van Beeck¹, Pierre Ginsburger², Sébastien Courtaud², Jean-Marie Buchlin¹

¹institut von Karman, 1640 Rhode Saint Génèse, Belgique

²CEA, DAM, GRAMAT, F-46500, Gramat, France

Email auteur correspondant : charline.fouchier@vki.ac.be

Bien que la dispersion atmosphérique soit largement étudiée dans la littérature, peu d'études s'intéressent à la dispersion par explosif, qui représente une source dynamique à haute vitesse et de courte durée. Ce savoir est essentiel pour développer et valider des outils permettant de prédire la dispersion après une explosion dans un milieu complexe. Le principal objectif de cette recherche est donc d'étudier la dispersion d'un polluant causée par une charge explosive. Une explosion en phase condensée générant la dispersion de particules solides est expérimentalement simulée par l'utilisation d'un détonateur RP80-EBW et d'une poudre de talc dont la granulométrie moyenne est de 7.8 μm de diamètre. La dispersion se fait en champ libre dans une soufflerie subsonique où une couche atmosphérique urbaine contrôlée est reproduite. La dispersion est étudiée à l'aide d'une caméra rapide travaillant à une fréquence allant de 2000 Hz à 10869 Hz. L'évolution temporelle des champs de vitesse lors de la dispersion est obtenue par vélocimétrie par imagerie de particules à grande échelle (LS-PIV). Deux types d'éclairage sont utilisés : le premier éclairage est obtenu à l'aide d'une lampe placée au-dessus de la caméra rapide, donnant une vision globale de la dispersion, le second est effectué à l'aide d'une tranche laser en régime continu, générant une vision 2D.

Les deux types de visualisation sont comparés ; leurs similitudes et différences sont présentés. Deux méthodes sont utilisées pour l'analyse LS-PIV. Les points forts et les points faibles de ces deux méthodes sont soulignés. Enfin, les propriétés nécessaires qu'une image doit posséder pour obtenir une analyse par corrélation croisée de qualité sont comparées entre l'analyse PIV classique et l'analyse LS-PIV. La dispersion en champ libre est étudiée pour différentes vitesses de vent (de 0 m/s à 5 m/s). L'évolution temporelle des champs de vitesse permet d'étudier l'effet du vent sur la dispersion.

1 Introduction

La dispersion par explosif, qu'elle soit accidentelle ou non, est une préoccupation majeure dans la sécurité industrielle. Ce type de dispersion, issue d'une source dynamique à haute vitesse et de courte durée, est encore peu étudié dans la littérature. Pourtant, c'est un savoir essentiel pour le développement et la validation d'outils de prédiction performants de la dispersion d'un nuage suite à une explosion, en champ libre aussi bien qu'en milieu urbain.

L'objectif de cette recherche est donc l'étude expérimentale de la dispersion d'un polluant causée par une charge explosive. Pour ce faire, la dispersion est simulée à l'échelle réduite 1:200 en laboratoire dans une soufflerie qui reproduit une couche atmosphérique typique d'un environnement urbain. Les champs de vitesse dans le nuage de dispersion sont étudiés en fonction de la vitesse du vent.

La vélocimétrie par imagerie de particules (PIV) est devenue une méthode classique pour l'étude d'écoulements. C'est une technique non intrusive qui permet de mesurer des vitesses de particules dont la taille est de l'ordre du micromètre. Malheureusement, la dispersion par explosif est difficilement analysable par PIV due à la trop forte densité de particules. C'est pourquoi la PIV à grande échelle (LSPIV) a été introduite et testée pour différentes études de terrain et en laboratoire [1]. Contrairement à la PIV, la LSPIV s'intéresse aux structures de dispersion et non aux particules individuelles. Par contre, les deux méthodes reposent sur le même principe de corrélations croisées. Une comparaison est donnée en figure 1. La figure 1a illustre l'image d'un écoulement analysé par PIV alors que la figure 1b

s'adresse à une image traitée par LSPIV.

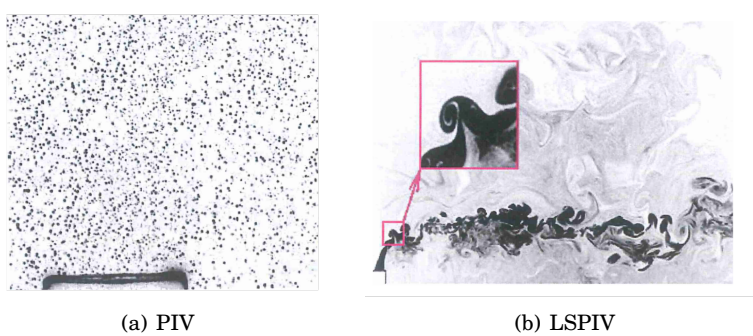


Figure 1: Exemple d'images analysées par PIV (a) et par LS-PIV (b) [2]

De nombreux travaux ont démontré l'applicabilité de la méthode LSPIV dans l'étude des écoulements. Horvath [2] a notamment appliqué la LSPIV dans l'étude de la dispersion de fumée dans un parking souterrain. Muste *et al.*[3] l'ont utilisée pour étudier la vitesse à la surface d'une rivière et Gopaldaswami *et al.* ont appliqué la méthode pour analyser l'ébullition de gaz naturel liquéfié lorsqu'il entre en contact avec de l'eau [4].

Dans cet article, la LSPIV sera tout d'abord étudiée sur un cas simple de translation d'images. Le code PIVlab [5] développé sous Matlab [6] est utilisé pour l'analyse. Deux méthodes pour résoudre la fonction de corrélation croisée sont comparées : la méthode directe, qui calcule la matrice de corrélation dans le domaine spatial et la méthode de la transformée de Fourier, qui calcule la matrice de corrélation dans le domaine fréquentiel. La méthode estimée la plus efficace est alors appliquée sur des images de dispersion par explosif pour deux types d'éclairage : un éclairage global du nuage par une lampe blanche puis un éclairage d'une section transversale à l'aide d'une tranche laser en régime continu.

2 Matériels et Méthodes

L'installation expérimentale est conçue pour conduire des tests non destructifs sous une couche atmosphérique urbaine. Les tests sont réalisés dans un tunnel subsonique de 20 m de long ayant une section rectangulaire de 2 x 3 m. Le sol de la section est recouvert d'éléments rugueux dont la dimension a été déterminée par B. Conan [7] afin reproduire une couche atmosphérique typique d'un environnement urbain. Les tests sont conduits sur une table en bois de 2.8 m de diamètre. La source explosive est reproduite par un détonateur RP80-EBW installé au centre de la table. Le détonateur est composé de 0.08 g de tétranitrate de pentaérythritol (PETN) et de 0.123 g de cyclotriméthylènetrinitramine (RDX) contenus dans un cylindre en aluminium de 7 mm de diamètre et 21 mm de long. L'explosif est installé dans un support en mousse de 5 cm de côté et ressort de 9 mm de telle sorte que seul l'explosif secondaire (RDX) soit à l'extérieur du support. L'équivalent TNT de l'explosion est estimé à 0.136 g [8]. L'explosion du détonateur est initiée par un module de mise à feu FM150 et un système de mise à feu FD201.

Le produit dispersif est une poudre de talc dont la granulométrie moyenne est de 7.8 μm de diamètre et dont la masse volumique est de 0.42 g/cm^3 . La poudre est maintenue autour du détonateur par un cylindre en papier. Une rainure circulaire est créée sur le support en mousse pour maintenir le cylindre et assurer que le talc reste distribué de façon homogène autour du détonateur. Des photos de la table expérimentale installée dans le tunnel à vent, du détonateur installé dans le support en mousse ainsi que de la source de polluant sont proposées à la figure 2. La répétabilité des tests est vérifiée systématiquement grâce à des capteurs de pression installés autour de l'explosif.

L'évolution temporelle des champs de vitesse de la dispersion suite à l'explosion est obtenue par LSPIV. Pour ce faire, une caméra rapide Phantom V7.1 est utilisée pour effectuer les visualisations. L'éclairage à l'aide d'une lampe placée au-dessus de la caméra rapide donne une vision globale de la dispersion. L'éclairage venant d'un faisceau laser continu de 4W transformé en feuillet à l'aide d'un montage optique permet une visualisation transversale. Les deux types de visualisation seront respectivement appelés visualisation globale et visualisation transversale. La visualisation globale est

enregistrée à une fréquence de 10869 Hz. Étant donné que la lumière de la tranche laser est moins puissante que celle de la lampe, le temps d'exposition de la caméra doit être augmenté pour la visualisation transversale. Par conséquent, la fréquence d'acquisition de la vision transversale est diminuée à 2000 Hz. La dispersion est étudiée en atmosphère au repos puis avec un vent de 5 m/s.

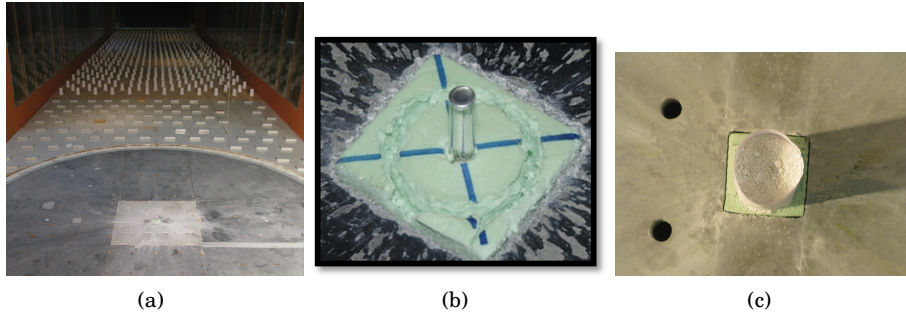


Figure 2: Installation expérimentale: table expérimentale installée dans le tunnel subsonique (a), détonateur installé dans son support en mousse (b), source de polluant: cylindre en papier rempli de poudre de talc (c)

3 Validation de la LSPIV

La validation de la technique LSPIV est illustrée à la figure 3. La figure 3a montre l'image originale en niveaux de gris utilisée pour l'étude. Cette image est décalée de 16 px vers la droite. La technique LSPIV est appliquée sur le couple d'images ainsi formé afin de retrouver le déplacement appliqué. Deux méthodes sont utilisées pour résoudre la fonction de corrélation croisée : la méthode directe DCC (direct cross correlation), qui calcule la matrice de corrélation dans le domaine spatial et la méthode de la transformée de Fourier DFT (discrete fourier transform), qui calcule la matrice de corrélation dans le domaine fréquentiel. Dans les deux méthodes, un chevauchement des fenêtres d'interrogation de 50 % est appliqué. Dans le cas de la DFT, deux étapes sont réalisées pour une taille de fenêtre d'interrogation donnée. La première étape consiste à obtenir le déplacement au centre de la fenêtre d'interrogation. Les informations obtenues grâce au chevauchement des fenêtres d'interrogation sont alors utilisées pour calculer le déplacement à plusieurs pixels de la zone d'interrogation par interpolation bilinéaire. La zone d'interrogation est par la suite déformée par interpolation bilinéaire selon le déplacement obtenu lors de la première étape. La seconde étape de corrélation consiste alors à corrélérer la fenêtre d'interrogation originale avec la zone déformée. Ces étapes permettent ainsi de réduire la perte d'information due aux déplacements des structures dans l'écoulement. Plus de détails concernant les méthodes DCC et DFT sont disponibles aux références [5] et [9].

Le tableau 1 donne le déplacement moyen D_m obtenu, ainsi que le ratio signal/bruit (SN) pour des fenêtres d'interrogation de 32 px, 64 px, 128 px et 256 px. Le déplacement de l'image de 16 px représente respectivement 50%, 25%, 12.6% et 6.2 % de la taille de ces fenêtres. Le ratio SN est obtenu en divisant le premier pic de corrélation par le second. Une technique de raffinement de la méthode DFT est aussi testée. Elle consiste à réaliser l'étude sur une fenêtre de 256 px puis à raffiner l'analyse sur une fenêtre de 128 px puis 64 px.

Les figures 3b et 3c montrent respectivement l'erreur commise lors de l'application des méthodes DCC et DFT sur une fenêtre d'interrogation de 64 px. La figure 3d, quant à elle, donne l'erreur commise par la méthode DFT appliquée sur une fenêtre de 256 px puis raffinée à 64 px en trois étapes. Bien qu'il soit conseillé de réduire le déplacement à 1/4 de la taille de la fenêtre d'interrogation pour la PIV [9], dans le cas étudié ici, la fenêtre doit être au moins 16 fois plus grande que le déplacement pour obtenir des résultats de bonne qualité. Cette augmentation de taille de fenêtre est certainement liée à la taille des structures de l'écoulement (ici, les pétales). Plus les pétales sont grands, notamment en bas de l'image, et plus l'erreur commise par l'analyse est importante. Il est cependant possible d'améliorer la résolution de l'analyse en raffinant le maillage. Ceci a été fait avec un maillage de 256 px à 64 px dans le cas de l'analyse DFT.

Fenêtre	% Déplacement	DCC		DFT	
		Dm	SN	Dm	SN
32 px	50%	13.19 px	3.89	7.9 px	1.14
64 px	25 %	17.18 px	2.87	12.8 px	1.636
128 px	12.5%	18.36 px	2.48	14.3 px	2.04
256 px	6.2 %	18.97 px	2.39	15.38 px	2.42
Raffinement	-	-		15.9 px	9.1

Table 1: Déplacement moyen et ratio SN obtenus via la méthode DCC et DFT pour différentes tailles de fenêtre d'interrogation

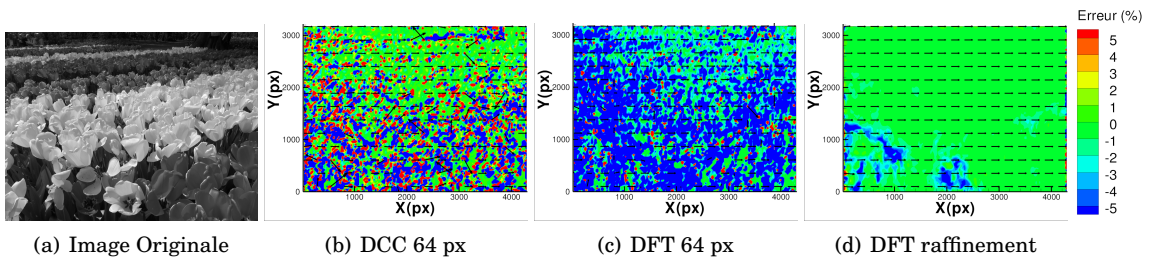


Figure 3: Résultats pour la méthode DCC (b) et DFT (c) appliquées à une fenêtre de 64 px et pour la méthode DFT appliquée à une fenêtre de 256 px raffinée à 64 px (d)

Dans le cas de l'étude de la dispersion par explosif, la méthode DFT est sélectionnée et un raffinement sera réalisé pour augmenter la résolution de l'analyse.

4 Résultats et Discussions

4.1 Paramètres de l'analyse

Des exemples de visualisation globale et transversale sont proposés à la figure 4. Ces images ont été prises 20 ms après l'explosion d'un détonateur RP80 entouré de 10 g de talc sous un vent de 5 m/s provenant de la gauche. Dans le cas de la visualisation transversale, la tranche laser arrive par la gauche du nuage.

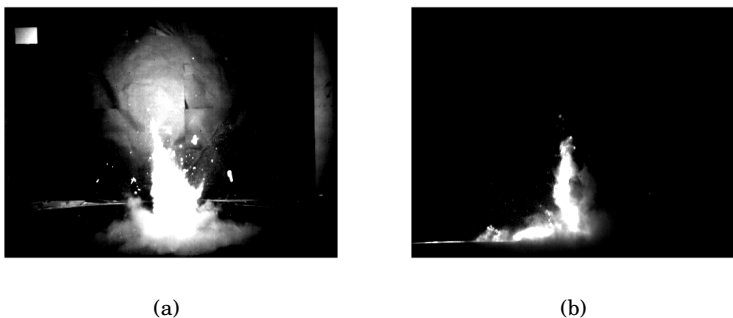


Figure 4: Exemples d'image en visualisation globale (a) et transversale (b), 20 ms après l'explosion sous un vent de 5 m/s provenant de la gauche

La visualisation transversale a l'avantage de fournir une bonne vision de l'intérieur de la dispersion

et de réduire l'effet de l'arrière-plan. Cela rend la détection du nuage plus précise. Cependant, la lumière du laser est absorbée par le talc et seulement la moitié gauche du nuage reste détectable par la caméra. De plus, la lumière est telle que la fréquence d'acquisition doit être diminuée afin d'avoir un temps d'exposition suffisant pour détecter le nuage. La visualisation globale quant à elle permet une acquisition à plus haute fréquence grâce à la puissance de l'éclairage. Cependant, cette puissance d'éclairage a l'inconvénient de saturer l'image au centre du nuage, là où la concentration de talc est la plus importante. Ceci rend l'analyse LSPIV difficile à réaliser dans cette zone. Par conséquent, la complémentarité des deux visualisations va permettre de mener une analyse en parallèle afin d'en extraire un maximum d'information concernant la dispersion.

Une étude de sensibilité a été réalisée pour les deux types de visualisation et permet ainsi de sélectionner les paramètres LSPIV adéquats. Dans cette étude, l'effet de la taille de la fenêtre d'interrogation, du temps de séparation entre deux images et du filtre utilisé sont concernés. La figure 5 donne la variation de la vitesse moyenne de dispersion produite par le RP80 sous un vent de 5 m/s en fonction des paramètres sélectionnés. Les résultats obtenus via la visualisation globale, repris à la figure 5a, semblent indiquer que la fréquence d'acquisition est trop élevée pour la résolution de l'image et la vitesse de dispersion. Il a donc été décidé de multiplier le temps de séparation par 5, diminuant la fréquence à 2174 Hz. Quant à la dispersion transversale, dont les résultats sont montrés à la figure 5b, il apparaît que la réduction du bruit obtenue via l'utilisation du filtre CLAHE résulte en un effet très positif. D'une manière générale, on observe une rapide chute de la vitesse moyenne, plusieurs dizaines de mètres par seconde sur des temps de l'ordre de 20ms. La résolution spatiale ne semble pas être suffisante pour pouvoir analyser correctement un tel mouvement transitoire et une investigation plus poussée devrait être conduite. Finalement, une fenêtre d'interrogation de 8 pixels est choisie, avec un raffinement en 3 étapes (64 px, 32 px, 16 px puis 8 px), un filtre CLAHE de 20 pixels est appliqué pour réduire le bruit et des fréquences de séparation de 2174 Hz pour la visualisation globale et 2000 Hz pour la visualisation transversale sont sélectionnées.

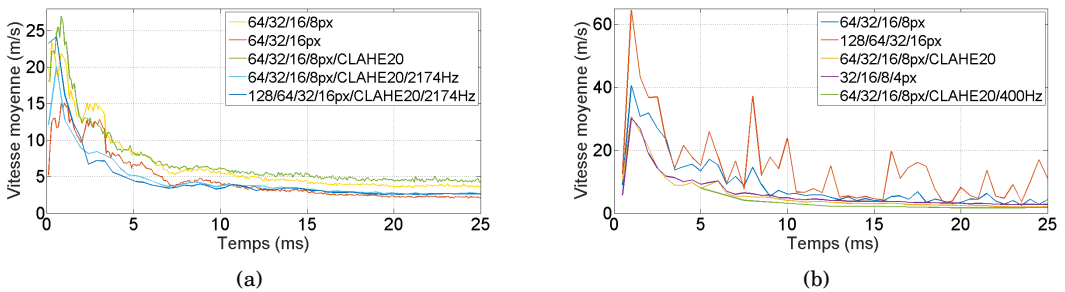


Figure 5: Variation de la vitesse moyenne de dispersion selon les paramètres LSPIV sélectionnés (dispersion d'un RP80 sous un vent de 5 m/s) pour la visualisation globale (a) et transversale (b)

4.2 Application de la LSPIV

La figure 6 donne la variation de la vitesse moyenne de la dispersion suite à l'explosion du RP80 en atmosphère calme et en présence d'un vent de 5 m/s. Les résultats sont portés en graphique pour les temps courts (0 à 30 ms) à la figure 6a et pour les temps plus longs (20ms à 150 ms) à la figure 6b. Un masque dynamique est appliqué sur les résultats pour enlever l'arrière-plan et ainsi mettre en évidence la dispersion du nuage. On note qu'entre 0 et 15ms, les résultats déduits des deux types de visualisation sont en désaccord. Ce point mérite une étude complémentaire. Malgré tout, il est possible d'observer que juste après l'explosion, le vent n'affecte pas la dispersion dont la vitesse décroît exponentiellement avec le temps. Après 15 ms, les deux visualisations fournissent des résultats similaires en termes de vitesse. Alors que la vitesse tend progressivement vers une valeur nulle dans le cas d'une dispersion sans vent, la dispersion sous une couche atmosphérique de 5 m/s tend vers une vitesse moyenne asymptotique de 2 m/s.

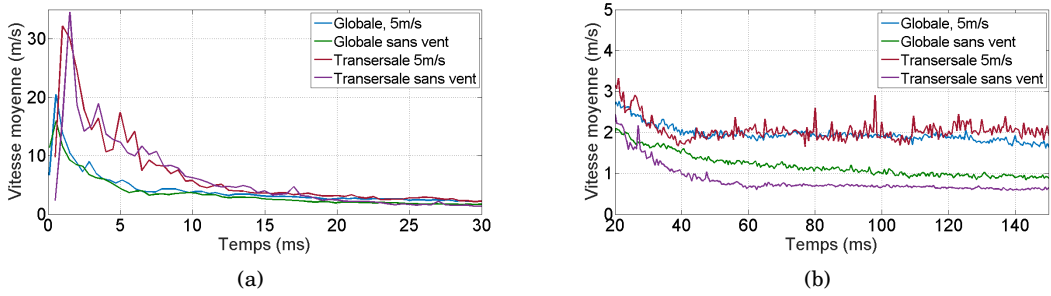


Figure 6: Variation de la vitesse moyenne de dispersion d'un RP80 sous un vent de 5 m/s provenant de la gauche et sans vent pour les deux types de visualisation

Les figures 7 et 8 donnent les champs de vitesse obtenus par LSPIV pour les deux types de visualisations à 2 ms, 11 ms et 67 ms après l'explosion.

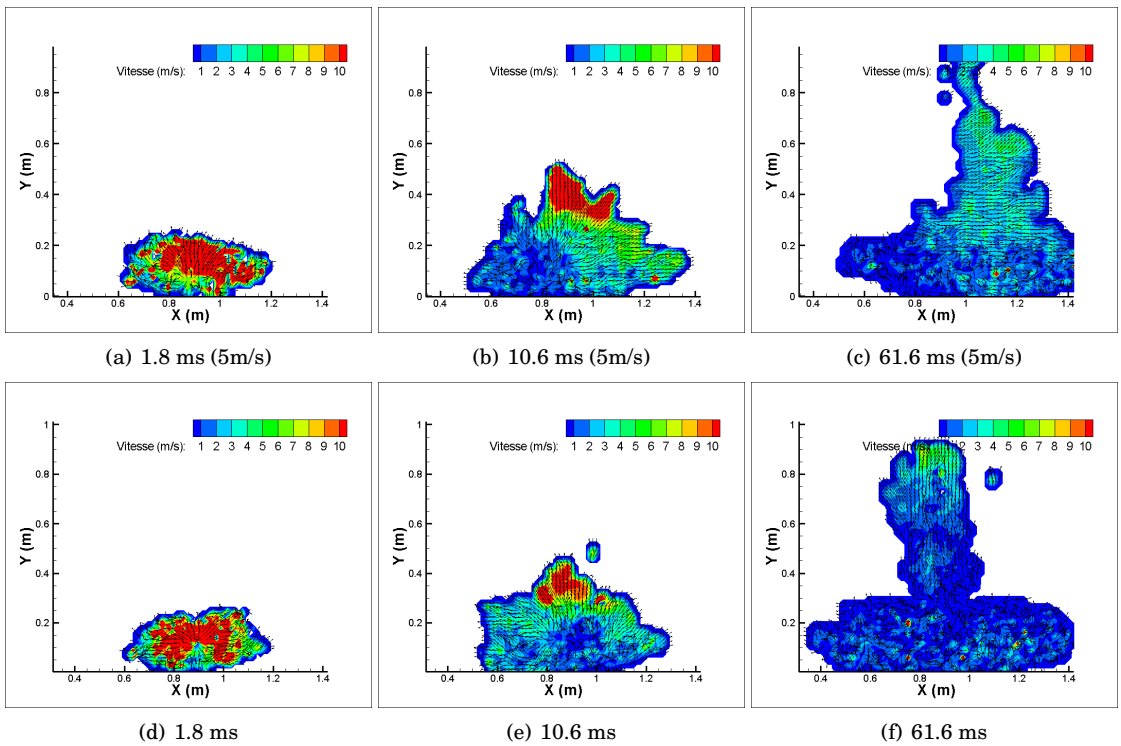


Figure 7: Analyse LSPIV pour la visualisation globale avec et sans vent

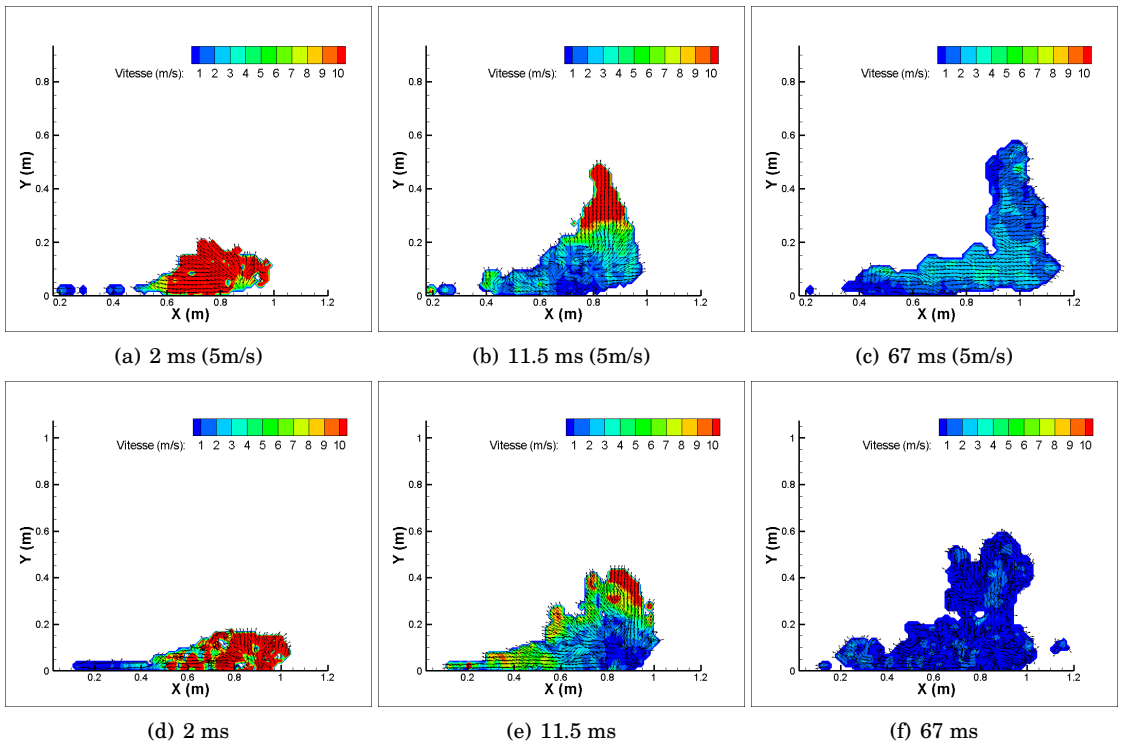


Figure 8: Analyse LSPIV pour la visualisation transversale avec et sans vent

5 Conclusions

La méthode LSPIV est tout d'abord étudiée dans un cas simple de translation d'images, pour lequel des résultats satisfaisants sont obtenus. La méthode est ensuite appliquée au cas de la dispersion par explosif. Deux types de visualisation sont testés : la visualisation globale et la visualisation transversale. À partir de 15 ms, les deux visualisations donnent des résultats similaires en termes de vitesse de dispersion. En atmosphère calme, la vitesse moyenne de la dispersion tend progressivement vers 0. Dans une couche atmosphérique de type urbain de 5 m/s, la vitesse moyenne tend vers 2 m/s. Bien que l'analyse de la dispersion pour des temps inférieurs à 10 ms doive être améliorée, il est déjà possible d'observer que le vent n'affecte pas la dispersion dans les premiers temps de l'explosion.

References

- [1] I. Fujita, M. Muste, and A. Kruger. Large-scale image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 36, 1998, NO. 3, p 397-414.
- [2] I. A. Horvath. *Extreme PIV application, Simultaneous and Instantaneous velocity and concentration measurements on model and real scale car park fire scenarios*. PhD thesis, Université Libre de Bruxelles, 2012.
- [3] M. Muste, A. Hauet, I. Fujita, C. Legout, and H.C. Ho. Capabilities of large-scale particle image velocimetry to characterize shallow free-surface flows. *Advances in water resources*, 70 (2014) 160-171.
- [4] N. Gopaldaswami, D. Laboureur, R. Mentzer, and S. Mannan. Quantification of turbulence in cryogenic liquid using high speed flow visualization. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 42, July 2016, p 70-81.

- [5] W. Thielicke and E. Stamhuis. Pivlab – towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in matlab. *Journal of Open Research Software*, 2: e30, DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/jors.bl>.
- [6] C.M. Thompson and L. Shure. *Image Processing Toolbox: For Use with MATLAB;[user's Guide]*. MathWorks, 1995.
- [7] B. Conan. *Wind resource assessment in complex terrain by wind tunnel modelling*. PhD thesis, Université d'Orléans, 2012.
- [8] C. Fouchier, D. Laboureur, L. Youinou, E. Lapebie, and J.M Buchlin. Experimental investigation of blast wave propagation in an urban environment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 49, Part B, September 2017, p 248-265.
- [9] M. Raffel, C. Willert, S. Wereley, and J. Kompenhans. *Particle Image Velocimetry*. Springer, second edition, 2007.