

Analyse spectrale d'une turbulence isotrope et homogène en PIV résolue en temps par FTEE

Bertrand Lecordier¹, Thomas Earl², Young Jin Jeon², Corine Lacour¹ et Laurent David²

1 : CORIA, UMR CNRS, Université et INSA de Rouen, France

2 : Institut PPRIME, CNRS, Université de Poitiers, ENSMA, France

Email auteur correspondant bertrand.lecorder@coria.fr"

L'utilisation de plus en plus fréquente des systèmes d'acquisition haute cadence pour la vélocimétrie par images de particules (PIV) permet l'application d'algorithmes de traitement multi-images. Ces méthodes récentes ouvrent de nouveaux potentiels par rapport aux approches plus classiques basées uniquement sur un couple d'image de particules. Dans ce travail, à partir d'images de particules synthétiques simulant une turbulence homogène et isotrope et une expérience de turbulence en régime de décroissance, nous analysons les potentiels d'un algorithme de traitement PIV multi-images (FTEE) en le comparant à une approche plus conventionnelle de PIV double images avec déformation. Ces méthodes sont comparées en terme de caractéristiques statistiques de turbulence (échelle, énergie cinétique et dissipation) ainsi que dans leur capacité à résoudre le spectre de turbulence.

1 Introduction

Le but de ce travail est de comparer les limitations et les avantages des méthodes de PIV double et multi-images à partir de la mesure dans une turbulence homogène et isotrope (THI). Ce type d'écoulement reste un véritable challenge pour les mesures par PIV car il contient une large gamme d'échelle spatiale et temporelle. En particulier, pour les approches 2D, les pertes de particules hors plan entre les deux instants imposent de réduire l'intervalle de temps Δt entre les deux images de particules et ainsi conduit à une diminution de la dynamique des mesures de vitesse. Récemment, les développements des méthodes résolues en temps multi-images (FTEE, Jeon et al, 2014; Jeon et al, 2014a) ont montré aussi bien en 2D qu'en 3D une augmentation significative de la précision de la mesure, en donnant accès en plus à une estimation de l'accélération et au champ de pression. Ce travail prolonge les études précédentes de Lecordier et al (2001), Foucaut et al (2004) et Worth et al (2010) en considérant la réponse spectrale des mesures PIV à partir d'une THI simulée. Nous analyserons en PIV 2D les performances des approches temporelles les plus récentes de type FTEE en les comparant aux méthodes optimisées basées sur des doubles images de particules et en montrant leurs limites d'applicabilité. L'approche spectrale est adaptée pour déterminer la gamme d'échelle de l'écoulement résolue car par nature, l'utilisation d'une fenêtre d'analyse en PIV introduit un filtrage de type moyenne glissante qui empêche la résolution des plus petites échelles spatiales de l'écoulement. En PIV 2D, Foucaut et al, 2004 ont montré que la fréquence de coupure théorique était donnée par la relation

$$\kappa_{\text{cut}} = \frac{2.8}{IW_x} \quad (1)$$

où IW_x est la dimension physique de la fenêtre d'interrogation. Lecordier et al. (2001) ont montré qu'en appliquant une méthode itérative de décalage sub-pixel des fenêtres d'analyse, que le phénomène de blocage de pic et le bruit de mesure haute fréquence pouvaient être diminué néanmoins sans une réelle amélioration de la fréquence de coupure. C'est par l'introduction des méthodes de déformation d'image de type WIDIM (Scarano, 2002) et de pondération des fenêtres (Astarita, 2008) que cette limite sur la fréquence de coupure a pu véritablement être repoussée en permettant une diminution progressive des tailles des mailles d'analyse. L'amélioration de la mesure des plus petites échelles permet une plus grande précision pour estimer la pression et les efforts, grandeurs essentielles dans de nombreuses situations académiques et appliquées. Dans ces écoulements, fortement tridimensionnels (sillage, THI), les approches temporelles par corrélation sont souvent plus robustes que les méthodes de suivi de particule (PTV) car plus sensible aux effets 3D lorsque les longueurs des trajectoires des particules dans le plan de la nappe diminuent. Dans

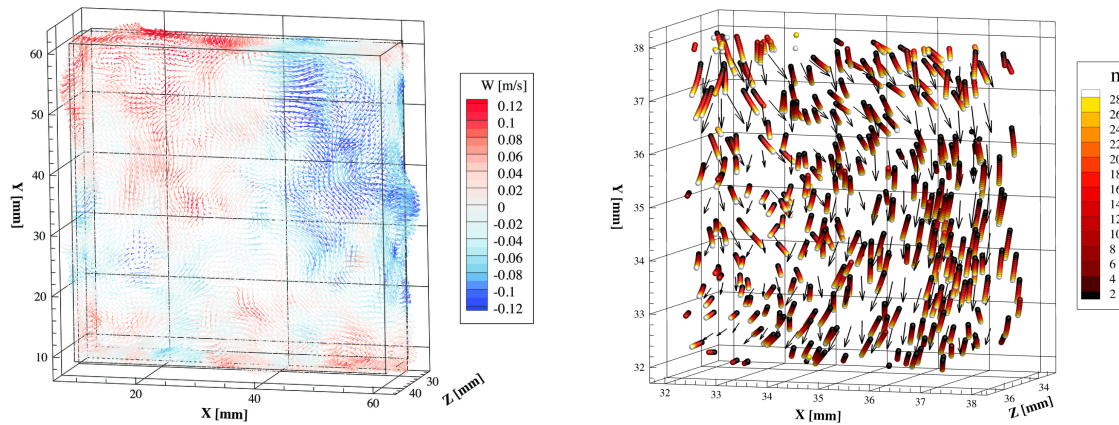


Figure 1 – Exemple de simulation de THI - (gauche) Champ de vitesse pleine résolution utilisé pour déplacer les particules. Trajectoires des particules colorisées par l'indice d'incrément temporel d'intégration du mouvement des particules (droite)

ce travail nous avons simulé plusieurs cas avec différentes épaisseurs de nappe afin d'analyser l'effet des pertes de particule en configuration de nappe fine, mais également l'impact des gradients de vitesse perpendiculaires au plan laser en situation de nappe épaisse.

Ces situations sont rencontrées lors de l'application de la technique de PIV 2D dans les écoulements turbulents. Pour terminer ce travail, une expérience de PIV 2D a été réalisée dans un écoulement d'air présentant des caractéristiques proches d'une THI. Cette expérience nous permet d'évaluer l'efficacité de l'algorithme FTEE en situation réelle et également l'amélioration de la fréquence de coupure k

2 Analyse des champs synthétiques

2.1 Génération des images de particules synthétiques

Une simulation numérique reproduisant une turbulence homogène et isotrope (THI) en terme d'échelle et de spectre est utilisée pour déplacer des champs de particules distribuées aléatoirement dans un volume (Lecordier et al 2001) (Figure 1). Le volume simulé est de $70 \times 70 \times 70 \text{ cm}^3$, avec une échelle intégrale et de Kolmogorow respectivement de $l_0 = 8.3 \text{ mm}$ et $\eta = 270 \text{ mm}$. L'énergie cinétique injectée dans l'écoulement d'air est de $K_t = 0.11 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$. Dans ce travail, ce champ de vitesse sera référencé comme simulation pleine résolution. Les particules sont déplacées de façon lagrangienne dans le volume par une approche pas à pas permettant d'obtenir des trajectoires non-linéaires (Figure 1). A chaque pas de temps, les particules sont discrétisées sur le maillage $(X,Y,Z)=(52,52,13 \text{ mm})$ en modélisant la distribution d'intensité par une fonction Gaussienne. Afin de simuler une expérience de PIV 2D, des tranches d'épaisseur ΔZ variables sont extraites au centre du volume et les particules sont projetées orthogonalement sur une image 2D sans introduire de déformation optique. Une répartition d'intensité Gaussienne de l'illumination des particules est appliquée le long de l'axe optique de la caméra pour simuler la nappe laser (Westerweel, 2000).

Dans cette étude, la résolution des images a été fixée à environ $0,1 \text{ mm/px}$. Lors de leur création, le nombre de particules dans chaque tranche est conservé constant. Cela correspond à ce qui est fait expérimentalement lorsque l'on modifie la concentration en particule en fonction de l'épaisseur de la nappe laser pour conserver un nombre de particules par pixel (ppp) constant. Le diamètre des images de particule est proche de la situation idéale (2,5 pixel) avec une concentration de 0,15 ppp. Les images ont été générées avec des épaisseurs de nappe ΔZ de 1, 2, 4, and 6 mm. Sur la Figure 2 est présenté 4 exemples d'image avec des épaisseurs de nappe différentes où nous pouvons noter une densité en particule identique. Nous pouvons noter que dans ce travail qu'aucun bruit de fond n'est ajouté sur les images et son influence ne sera donc pas étudié.

L'objectif des mesures de vitesse par PIV est d'accéder à des statistiques, et dans notre cas d'obtenir les caractéristiques de l'écoulement simulé comprenant toutes les échelles. Néanmoins, il n'est pas facile de faire la comparaison directe de la simulation et des mesures PIV. Pour rendre possible la comparaison, la simulation pleine résolution est filtrée avec un noyau Gaussien dans la direction Z et une fenêtre de filtrage avec une pondération équivalente à celle appliquée par la PIV. Ce modèle

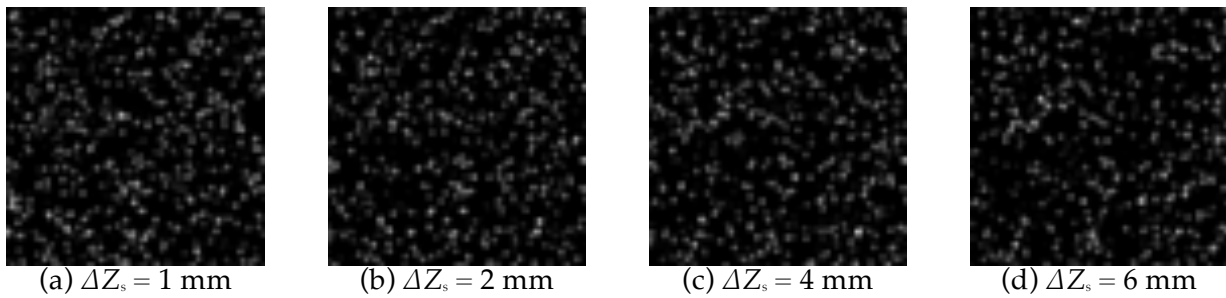


Figure 2 - Exemple d'image synthétique de 64x64 px pour différentes épaisseurs de volume

simple de filtrage est une bonne approximation de ce que nous pouvons attendre dans les calculs PIV et nous utiliserons donc ce modèle de filtrage pour la comparaison des résultats de PIV et de simulation, et qui correspond à la meilleure mesure accessible à la PIV. Dans ce papier, ce modèle sera identifié comme *simulation filtrée*.

2.2 Caractéristiques des images pour la simulation

Pour créer les images, des séries temporelles régulières sont extraites des volumes de particules au centre du domaine. Actuellement, seule une tranche du domaine a été utilisée, mais afin d'augmenter la statistique, dans nos travaux futurs, plusieurs tranches dans le même volume seront considérées.

Pour l'algorithme FTEE, le calcul des trajectoires est évalué sur des séquences de $N = 3, 5$ or 7 images (référencées $t_4(N-1)$, i.e. t_8, t_{16} , et t_{24} , où t est le temps). Les trajectoires $\Gamma(x,n)$ sont interpolées avec un polynôme de second degré où x est le vecteur coordonnée des volumes d'interrogation (IV) et n le nombre d'image. Le vecteur déplacement s est obtenu à partir de la dérivée de la trajectoire à la position $n=0$: $s = d(\Gamma(x;0))/dn$. Pour l'approche de PIV classique appliquée sur un couple d'image, nous utilisons un algorithme de corrélation-croisée intégrant une étape de déformation d'image. Pour les deux algorithmes, nous réalisons 5 itérations avec une réduction progressive de la taille des fenêtres (32x32 px initialement) pour atteindre la taille finale de la fenêtre d'interrogation (IW). Pour une meilleure résolution sans augmentation du bruit, un filtrage Gaussien est appliqué pour les deux algorithmes sur les champs de vitesse entre chaque itération.

2.3 Résultats sur les images synthétiques

Sur la Figure 3 nous présentons un exemple de l'extraction d'un champ de vitesse pour une tranche de $\Delta Z_s = 6$ mm ainsi que les résultats des calculs par PIV double images et FTEE. Dans le cadre (a) est reporté la simulation en pleine résolution sans filtrage. Cela permet une visualisation de toutes les structures de l'écoulement qui sont présentes dans le domaine de simulation. Figure 3b est présenté le filtrage de la simulation avec une maille de 32x32. On constate un lissage des plus petites échelles de la turbulence comme celui inhérent aux approches PIV de type double images (Figure 3c) ou FTEE (Figure 3d) calculées en 32x32 px avec un taux de

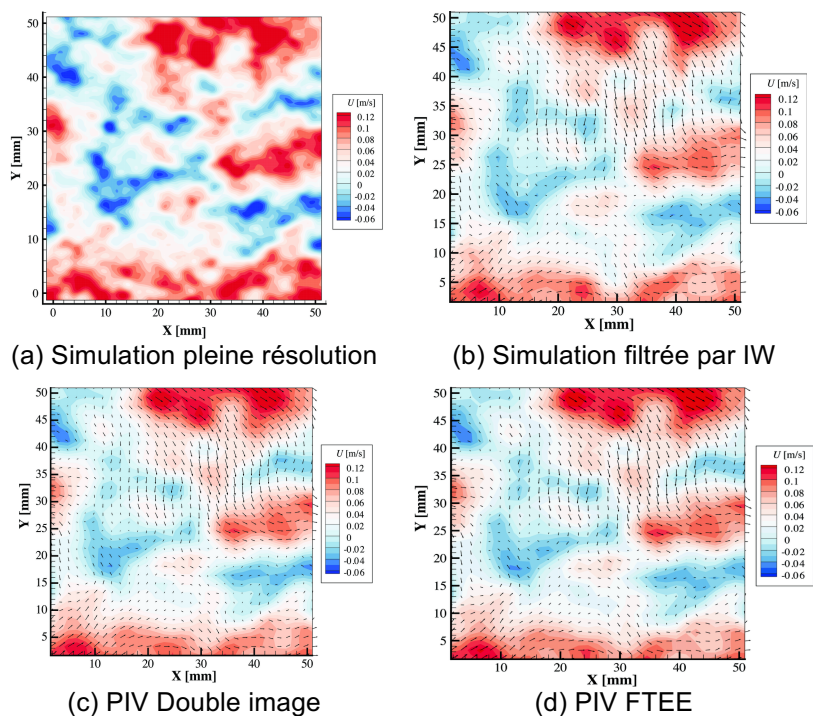


Figure 3 – Champ de vitesse 2D pour une tranche du volume de simulation et reconstruction par PIV.

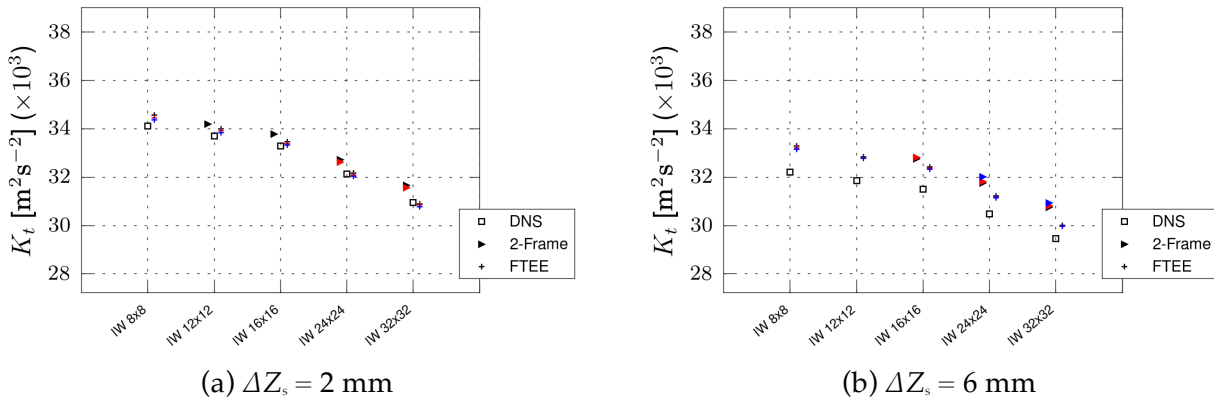


Figure 4 – Energie cinétique de turbulence K_t . Comparaison de la simulation filtrée et des méthodes PIV double images et FTEE. Les points noirs, rouges, bleus et verts correspondent respectivement au cas t_8 , t_{16} , t_{24} , t_{32} .

recouvrement de 75%. Une analyse fine des résultats de la méthode FTEE indique une très légère amélioration dans certaines régions de l'évaluation du champ de vitesse mais le principal filtrage reste lié à la dimension de la fenêtre d'analyse.

2.4 Comparaison statistique de la turbulence

Dans cette partie, nous nous intéressons à la capacité des algorithmes PIV à remonter aux caractéristiques des écoulements en fonction de la dimension de la fenêtre d'analyse, à l'intervalle de temps entre les images et à l'épaisseur de la nappe laser. Sur la Figure 4 est synthétisé ces différentes contributions sur l'énergie cinétique K_t calculée à partir des deux composantes de vitesse (2C) et pour deux épaisseurs de nappe $\Delta Z_s = 2$ and 6 mm. Comme attendu, pour les deux cas, l'augmentation de la taille de la fenêtre d'analyse réduit l'énergie cinétique suite à l'effet de filtrage de la méthode PIV. Cet effet est également noté sur la simulation filtrée.

Afin d'améliorer la résolution spatiale de la mesure, l'utilisation d'IW de taille plus petite est nécessaire. Nous notons que l'énergie cinétique K_t de la simulation complète est d'environ $0.05 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$. Nous pouvons voir que pour la FTEE, les résultats de K_t sont en bon accord avec les résultats de la simulation filtrée et cela pour les 3 temps présentés. Pour l'approche classique, K_t tend vers la simulation filtrée lorsque la taille des mailles diminue, mais nous remarquons une augmentation du bruit pour les plus petites valeurs (8x8 et 12x12 px) induit par un nombre trop faible de particule dans les fenêtres d'analyse. Cet aspect est un avantage de la méthode FTEE, qui grâce à l'effet de filtrage le long des trajectoires, permet de diminuer significativement la dimension des mailles d'analyse sans augmentation du bruit et par conséquent d'améliorer la résolution spatiale de la mesure.

Sur la Figure 5, nous présentons cette fois l'évaluation de l'échelle intégrale l_0 (Figure 5-a) et la dissipation turbulent ε en 2D. Ces paramètres sont calculés respectivement à partir de l'intégration du signal d'auto-corrélation du champ de vitesse et des gradients de vitesse¹. Notons que le calcul de l_0 est délicat, comme mentionné par (Soria et al 2005), en particulier lorsque le domaine d'étude est limité spatialement. Les résultats de la Figure 5 montrent que pour toutes les méthodes, l'échelle intégrale est assez bien évaluée avec une différence relative faible d'environ 2% par rapport à la simulation filtrée. En revanche, contrairement à l'échelle intégrale, la taille de la fenêtre d'analyse a une très forte influence sur l'évaluation de ε , qui augmente d'un facteur 2,5 lorsque la fenêtre d'analyse passe de 32x32 px à 8x8 px. L'évaluation de ε par la méthode FTEE est proche de la simulation filtrée pour une grande gamme de taille de maille, et son décrochement, contrairement à l'approche classique, ne survient que pour les plus petites mailles d'analyse. Ce phénomène semble confirmer, la présence d'un bruit de mesure plus faible sur la méthode FTEE que sur l'approche classique.

¹ Calcul de $\varepsilon = \nu \left\{ 2 \left(\left\langle \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right\rangle + \left\langle \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\rangle \right) + \left\langle \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right\rangle + \left\langle \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\rangle + 2 \left(\left(\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right) \right\}$ en 2D

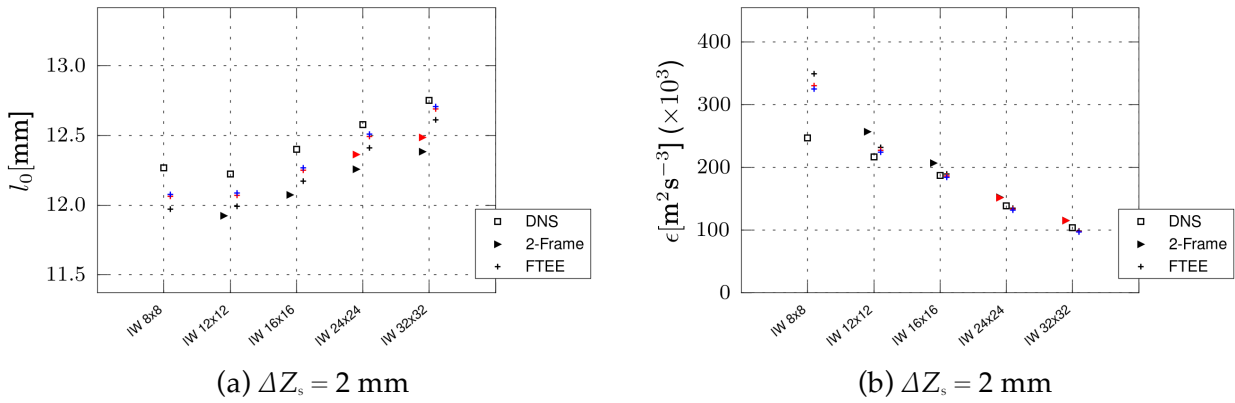


Figure 5 – (a) Echelle Intégrale l_0 et (b) dissipation turbulente $2C \epsilon$. Comparaison des résultats de la simulation filtrée et des méthodes PIV double images et FTEE. Les points noirs, rouges, bleus et verts correspondent respectivement aux cas t_8 , t_{16} , t_{24} , t_{32} .

2.5 Comparaison des spectres de turbulence

Le meilleur indicateur pour évaluer la gamme d'échelle de turbulence résolue par PIV et le niveau de bruit de mesure est de calculer le spectre de turbulence. Sur la Figure 6 nous présentons l'influence de la dimension de la taille d'analyse sur la mesure du spectre de turbulence dans le cas d'une nappe laser d'une épaisseur $\Delta Z_s = 4$ mm. Sur ces courbes, la ligne pointillée correspond à la simulation numérique et les lignes continues à la simulation filtrée. Les traits verticaux indiquent la fréquence de coupure κ_{cut} des différentes tailles de maille reportées dans la légende. Pour la partie basse fréquence, les différentes méthodes résolvent correctement le spectre même si nous pouvons noter des oscillations liées à un trop faible nombre d'échantillon dans l'analyse, phénomène qui sera corrigé dans l'avenir par une augmentation du nombre de champ de vitesse dans l'analyse. Si maintenant nous regardons la partie haute fréquence du spectre, le comportement des algorithmes est très différent. Le bruit que nous avons mentionné précédemment sur les calculs en 8×8 px en PIV classique s'observe clairement par une remontée progressive du spectre. Pour des mailles de taille plus importante, ce phénomène s'estompe, mais en comparant avec la simulation filtrée, un bruit toujours plus important en PIV classique est observé par rapport à l'approche FTEE, et cela quelle que soit la dimension de la maille d'analyse. Cette première analyse spectrale comparant une PIV classique avec déformation à une approche multi-images de type FTEE illustre bien les potentiels de ces nouvelles méthodes d'évaluation pour les mesures en turbulence.

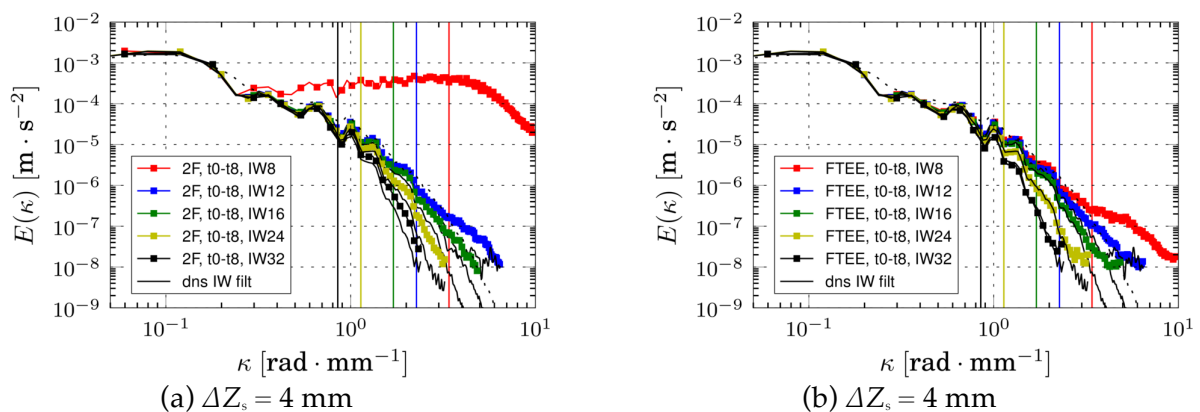


Figure 6 – Spectre d'énergie pour les méthodes PIV double images (a) et FTEE (b) avec 75% de recouvrement dans le cas d'une nappe laser d'épaisseur $\Delta Z_s = 4$ mm. La simulation filtrée est représentée par les lignes noires et la simulation pleine résolution par les traits pointillés

3 Application à des mesures expérimentales

Dans cette section nous allons analyser les données expérimentales d'un écoulement turbulent ayant des propriétés proches d'une THI. Cet écoulement est généré dans une chambre à volume

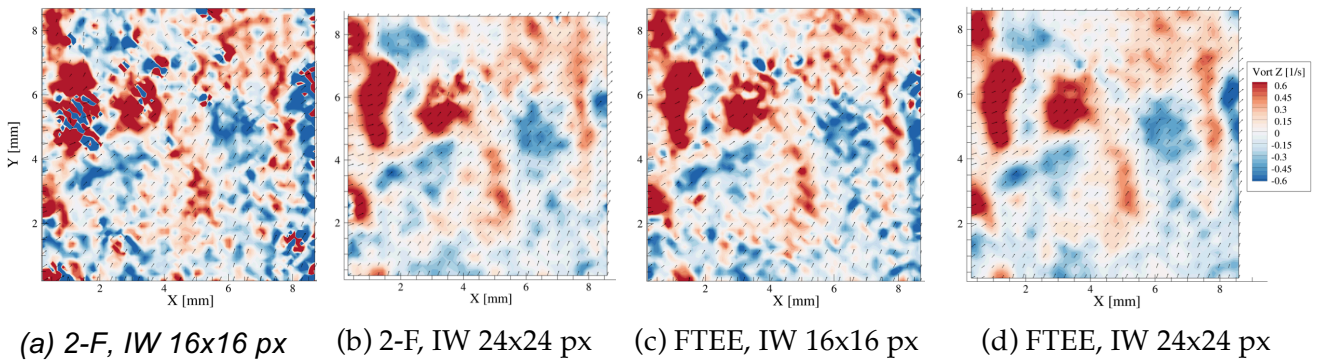


Figure 7 – Influence de la taille de la maille d'analyse sur l'évaluation de la vorticité pour les méthodes PIV double images (a-b) et FTEE (c-d).

constante entièrement transparente ($100 \times 60 \times 60 \text{ mm}^3$) à l'aide d'un piston mobile poussant un volume de gaz à travers un générateur de turbulence composé de 25 canaux de 2,5 mm de diamètre uniformément répartis sur une des faces de la chambre (Lacour et al, 2013). Le cycle commence par l'introduction dans la chambre et dans la cavité du piston d'air ensemené. Ensuite le piston pneumatique démarre sa course à t_0 puis se déplace rapidement pour générer en fin de compression ($t_0 + 85 \text{ ms}$) un écoulement turbulent en régime de décroissance, présentant une vitesse moyenne nulle et une large gamme d'échelle.

Le dispositif TR-PIV se compose d'une caméra Phantom V10 et d'un laser Quantronix Darwin Duo laser avec une énergie de 2x30 mJ par impulsion. La nappe laser d'environ 1 mm d'épaisseur est formée dans le plan médian de la chambre à l'aide d'une lentille sphérique ($f = 1 \text{ m}$) et d'une lentille cylindrique ($f = -50 \text{ mm}$). Le grandissement a été ajusté pour avoir un domaine d'étude de $8,9 \times 8,9 \text{ mm}^2$ avec une région d'intérêt de $336 \times 336 \text{ px}$ afin de conserver une fréquence d'acquisition de 10 kHz avec ce modèle de caméra. Les deux cavités laser sont synchronisées par le signal image interne à 10 kHz de la caméra. L'acquisition débute dès la mise en mouvement du piston à l'instant t_0 , et enregistre 1s de l'écoulement jusqu'à la dissipation complète de la turbulence dans la chambre.

La Figure 7 montre quatre exemples de champs de vitesse enregistrés 0,2 s après le début de la compression et calcul par la méthode double image et FTEE pour deux dimensions des mailles d'analyse (IW 16x16 px et 24x24 px). Dans cette représentation de la composante de vorticité suivant la direction z, nous avons superposé le champ de vitesse en traçant 1 vecteurs sur 4. Comme nous l'avons montré à partir de la simulation sur la Figure 3 nous remarquons pour les deux approches un effet important de l'augmentation de la taille de maille sur la diminution du bruit de mesure. Nous pouvons remarquer cependant une légèrement amélioration de l'approche multi-images FTEE vis-à-vis du bruit qui semble en produire moins à taille de maille identique. Afin d'aller plus loin dans cette analyse, nous allons maintenant nous intéresser à la mesure des propriétés statistiques de la turbulence.

3.1 Comparaison des propriétés statistiques de la turbulence de l'écoulement.

De la même manière que pour l'analyse réalisée sur le cas synthétique, la dimension de la maille d'analyse est réduite au maximum afin d'essayer de résoudre les plus petites échelles de l'écoulement. Sur la Figure 8 nous représentons l'énergie cinétique K_t et la dissipation ε calculées à partir de champs expérimentaux instantanés. Chaque symbole de couleur représente un champ de vitesse dans une des 10 séquences. Sur ces graphiques, nous ne représentons que deux temps 0,2 s et 0,3 s dans la décroissance de la turbulence correspondant à un cas de faible (0,3 s) et de forte (0,2 s) énergies de turbulence.

Pour les dimensions de maille d'analyse supérieures à 24x24 px, nous constatons que les mesures de l'énergie cinétique de turbulence sont pratiquement identiques pour les deux cas. En revanche, dès que la dimension de la fenêtre d'interrogation diminue, nous observons une augmentation anormale de K_t qui indique clairement l'apparition d'un bruit parasite important car affectant la mesure, même sur les plus grandes échelles, c'est-à-dire celles contribuant fortement au niveau de K_t . En revanche pour l'approche FTEE (croix) nous n'observons qu'une très faible augmentation K_t pour les mailles de 16x16 px. L'analyse de la mesure de la dissipation ε conduit aux mêmes

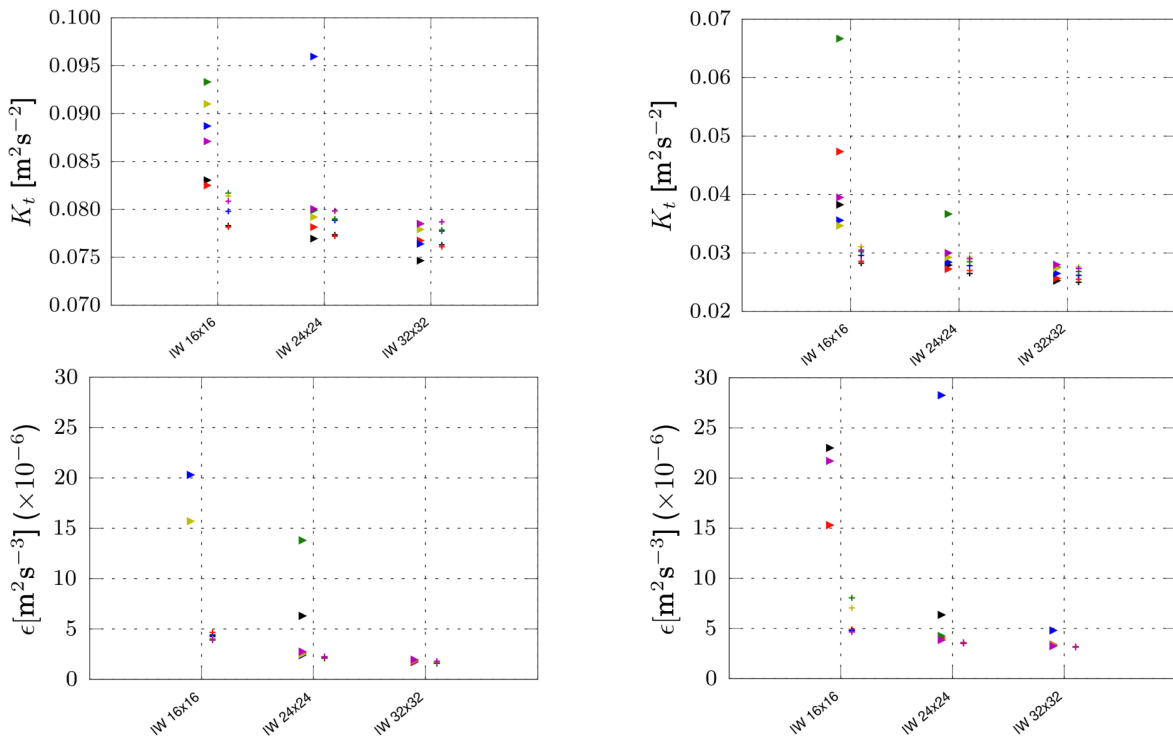


Figure 8 – Influence de la taille de la maille d’analyse sur l’énergie cinétique de la turbulence K_t et de la dissipation ϵ pour deux instants dans la décroissance de la turbulence : 0,2 s (gauche) et 0,3 s (droite) . Chaque symbole représente une valeur pour un champ de vitesse d’une séquence différenciée par la couleur (triangle : PIV double images, croix, FTEE).

conclusions sur l’augmentation du bruit, mais il semble que pour la méthode de PIV double images, cette augmentation survient dès 24x24 px, ce qui conduit à penser qu’à partir de cette dimension de maille il apparaît un bruit haute fréquence qui affecte fortement le calcul des dérivées spatiales et donc la mesure de la dissipation ϵ . A contrario, l’augmentation du bruit haute fréquence pour la méthode FTEE semble mieux contrôlée pour toutes les tailles de mailles étudiées.

3.2 Comparaison des spectres de turbulence

Sur la Figure 9 nous représentons pour deux dimensions des mailles d’analyse (16x16 px et 24x24 px), les spectres de turbulence mesurés par les approches de PIV double images et FTEE pour deux instants dans la décroissance de la turbulence : 0,2 s (a) et 0,3 s (b). Pour les deux dimensions de tailles de maille et tous les algorithmes, la partie basse fréquence du spectre semble correctement évaluée et nous pouvons noter la diminution du maximum d’énergie avec le temps lié à la décroissance de la turbulence. Pour la dimension de 24x24 px, pour toutes les méthodes, nous atteignons du côté hautes fréquences la valeur théorique (ligne continue) avec néanmoins une

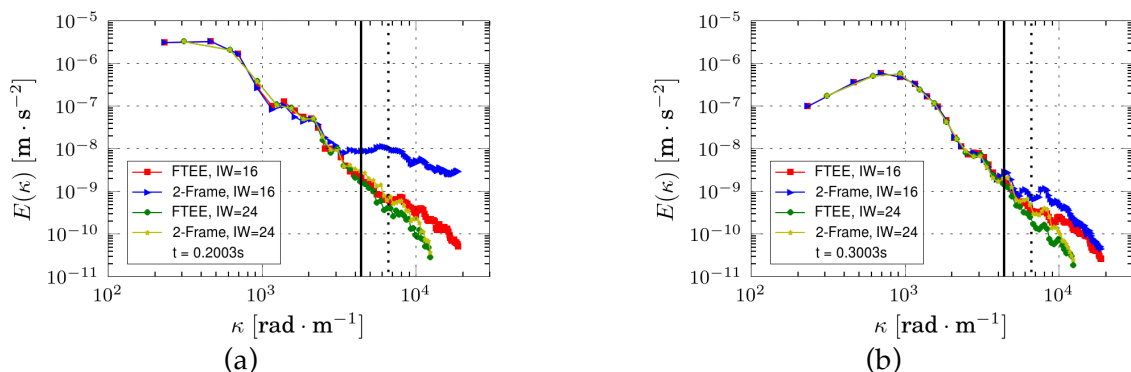


Figure 9 – Spectre d’énergie à deux temps : 0,2 s (a) et 0,3 s (b) dans la décroissance de la turbulence pour les méthodes PIV double images et FTEE avec 75% de recouvrement. Les fréquences de coupure théoriques pour les mailles de 24x24 px and 16x16 px sont indiquées respectivement par une ligne continue et une ligne pointillée.

augmentation du bruit plus important au-delà de cette limite pour la méthode double images que pour l'approche FTEE. Pour le cas d'analyse en 16x16 px, l'approche de PIV classique ne permet pas d'atteindre la valeur théorique car le bruit augmente d'une façon très significative aux hautes fréquences. En revanche, l'approche FTEE permet d'atteindre cette limite ce qui indique une robustesse plus grande au bruit et donc une résolution spatiale de mesure meilleure que l'approche de PIV classique. En effet, cette moindre sensibilité au bruit permet au final l'utilisation de maille d'analyse de dimension inférieure tout en maintenant le bruit de mesure à un niveau raisonnable.

4 Conclusions

La turbulence homogène et isotrope (THI) est une situation idéale et complexe pour déterminer les limites des algorithmes de PIV car cet écoulement contient une large gamme d'échelle spatiale et temporelle. Dans ce travail nous avons utilisé une simulation 3D de THI permettant de déplacer un champ de particule afin de pouvoir générer des images de synthétiques avec des caractéristiques d'écoulement et d'imagerie contrôlées. A partir de ces images nous avons comparé deux approches PIV ; une approche classique double images avec déformation et une approche multi-images (FTEE) faisant intervenir une séquence d'image dans l'évaluation du champ de vitesse.

Les deux algorithmes sont comparés en terme de caractéristiques de turbulence (spectre, échelle dissipation...) dans la simulation pleine résolution, mais également à un modèle de filtrage de la simulation permettant de représenter les fréquences de coupure introduites par l'épaisseur de la nappe laser et la dimension des mailles d'analyse de PIV. A partir de tous les résultats de simulation la méthode multi-images FTEE semble toujours conduire à une amélioration de la mesure des caractéristiques de l'écoulement par rapport à l'approche double images. Une plus faible sensibilité au bruit de l'approche FTEE permet d'accéder lors de la passe finale des dimensions de maille d'analyse plus faibles qu'à partir d'un seul couple d'image, ce qui conduit à améliorer la résolution spatiale de la mesure.

Dans la dernière partie, les deux méthodes PIV sont évaluées dans une situation expérimentale de turbulence en régime de décroissance. Les mesures d'énergie cinétique, de la dissipation et du spectre de turbulence ont été comparées pour deux niveaux de turbulence. L'enregistrement des images de particules a été réalisé avec une chaîne de TR-PIV à 10 kHz permettant l'application des approches d'analyse d'image multi-images. Comme pour le cas de la simulation, il a été montré que l'approche multi-image FTEE introduit moins de bruit que les techniques PIV basées sur un couple d'image. En plus de permettre d'accéder à une mesure directe de l'accélération, la méthode FTEE permet de considérer des mailles d'analyse plus petite qu'en PIV classique et ainsi conduire à une meilleure résolution spatiale.

References

- Astarita T (2008) Analysis of velocity interpolation schemes for image deformation methods in PIV. *Experiments in Fluids* 45(2):257–266
- Foucaut JM, Carlier J, Stanislas M (2004) PIV optimization for the study of turbulent flow using spectral analysis. *Measurement Science and Technology* 15(6):1046–1058
- Jeon YJ, Chatellier L, David L (2014) Fluid trajectory evaluation based on an ensemble-averaged cross-correlation in time-resolved PIV. *Experiments in Fluids*. *Experiments in Fluids* 55(7):1766
- Jeon YJ, Tronchin T, Chatellier L, David L, (2014b): 3D extension of the fluid trajectory evaluation based on an ensemble averaged cross-correlation (FTEE) for acceleration and pressure evaluation of the flow around a flapping wing. 17th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon,
- Lacour C, Cessou A, Lecordier B (2013) Turbulent Flame Speed for Ethanol- iso Octane Mixtures. In: European Combustion Meeting 2013, 26-28 June 2013 – Lund University
- Lecordier B, Demare D, Vervisch LMJ, Reveillon J, Trinite M (2001) Estimation of the accuracy of PIV treatments for turbulent flow studies by direct numerical simulation of multi-phase flow. *Measurement Science and Technology* 12:1382–1391
- Scarano F (2002) Iterative image deformation methods in PIV. *Meas. Science and Technology* 13(-1):pp1–19
- Westerweel J (2000) Theoretical analysis of the measurement precision in particle image velocimetry. *Experiments in Fluids* 29(7):S003–S012
- Worth NA, Nickels TB, Swaminathan N (2010) A tomographic PIV resolution study based on homogeneous isotropic turbulence DNS data. *Experiments in Fluids* 49(3):637–656