



HAL
open science

Evaluation du cisaillement et de l'élongation pour l'étude du mélange en écoulement de Dean laminaire pulsé

Mojtaba Jarrahi, Cathy Castelain, Hassan Peerhossaini

► To cite this version:

Mojtaba Jarrahi, Cathy Castelain, Hassan Peerhossaini. Evaluation du cisaillement et de l'élongation pour l'étude du mélange en écoulement de Dean laminaire pulsé. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-03422797

HAL Id: hal-03422797

<https://hal.science/hal-03422797>

Submitted on 9 Nov 2021

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.

Evaluation du cisaillement et de l'élongation pour l'étude du mélange en écoulement de Dean laminaire pulsé

M. JARRAHI*, C. CASTELAIN, H. PEERHOSSAINI

Laboratoire Thermocinétique de Nantes, UMR-CNRS 6607
École Polytechnique de l'Université de Nantes, BP50609, 44306 Nantes, France
mojtaba.jarrahi@univ-nantes.fr

Résumé :

L'objectif est l'étude de l'amélioration du mélange par superposition d'une dépendance temporelle sous la forme d'une pulsation à un écoulement de Dean en régime laminaire. La modification de l'écoulement secondaire due à la pulsation augmente les étirements et repliements et donc le mélange. Afin d'évaluer cette augmentation, les tenseurs de taux de déformation, les taux de cisaillement total et d'élongation totale à la sortie d'un coude dont l'angle d'ouverture est de 90° sont calculés pour différentes conditions de pulsations et ils sont comparés aux cas stationnaires. Le calcul numérique dans cette étude, est validé par les mesures PIV des champs de vitesse secondaire.

Abstract :

The purpose of this study is to investigate mixing enhancement by superposition of a temporal dependence, in the form of a pulsation, on a laminar Dean flow. The temporal dependence of the flow can make the secondary flow structure more complex. This modification enhances stretching and folding which are the main mechanisms of mixing. The assessment of mixing intensification has been done by comparing the tensors of strain rate, the global shear rates and elongation rates at the outlet of a 90° curved pipe in pulsatile and steady flows. The CFD results have been validated against PIV measurements of the secondary velocity fields.

Mots clefs: Mélange, Écoulement pulsé, Écoulement de Dean, Tenseur de taux de déformation

1 Introduction

L'intensification du mélange en régime laminaire a une grande importance pour certains secteurs de l'industrie (alimentaire, pharmacie, plastique, chimie et polymère) où la qualité des produits ne doit pas être altérée à cause de contraintes de cisaillement trop élevées. Ces produits sont souvent des fluides très visqueux constitués de longues chaînes moléculaires susceptibles d'être brisées dans un régime turbulent. L'amélioration de la performance des mélangeurs qui fonctionnent en régime laminaire a donc fait l'objet de nombreuses études [1-5]. Les mélangeurs de type hélicoïdal sont déjà utilisés dans l'industrie puisque le mélange s'effectue plus efficacement dans les canaux courbes que dans les canaux droits. Ceci est dû à l'écoulement secondaire généré par la force centrifuge. Grâce à cet écoulement secondaire, les déplacements transversaux des particules augmentent et la dispersion axiale diminue, et par conséquent le mélange s'intensifie. En plus, les cellules de Dean [6,7] formées dans l'écoulement secondaire jouent le rôle d'agitateurs internes qui homogénéisent le mélange.

L'écoulement pulsé dans les conduites courbes [8-14] et ses applications [3-5, 15-20], particulièrement en physiologie, ont été largement étudiés. L'idée de l'ajout d'une pulsation à l'écoulement stationnaire afin d'obtenir un écoulement plus complexe a été inspirée par la première étude qui existe sur le sujet, c'est-à-dire l'étude analytique de Lyne [8]. En 1970, Lyne [8] a démontré l'apparition d'une paire supplémentaire de cellules contrarotatives qui co-existent avec les cellules de Dean [6,7] dans un écoulement sinusoïdal au sein d'un coude. D'après l'étude de Timité et al. [3] et celle de Jarrahi et al. [5], cette structure complexe de l'écoulement secondaire obtenue en présence de la pulsation peut aboutir à un meilleur mélange comparé au cas stationnaire. Dans une configuration chaotique (Dean alterné) composée d'une série de six coudes

alternés, les visualisations qualitatives de Timité et al. [3] par Fluorescence Induite par Laser (LIF) ont permis d'analyser l'évolution des structures tourbillonnaires de l'écoulement secondaire qui se développent durant la pulsation au sein des coudes. Il a expérimentalement mis en évidence l'aspect chaotique de cet écoulement par le suivi de la déformation des taches de traceur. L'augmentation du chaos et l'obtention d'un meilleur mélange par la pulsation ont été confirmées par analyse de l'étirement de ces taches. En 2010, Jarrahi et al. [5] ont étudié plus en détail le rôle des structures complexes de l'écoulement secondaire, formées grâce à la pulsation, sur l'amélioration du mélange au sein d'un coude. Dans ce but, les deux composantes de vitesse associées à l'écoulement secondaire en sortie d'un coude ont été mesurées en utilisant la vélocimétrie par images de particules (PIV). Ces deux composantes de vitesse ont été utilisées pour décrire la topologie des différentes structures qui se développent au sein d'un écoulement laminaire pulsé (en établissement) dans un coude. Ensuite, certains critères pour quantifier l'état du mélange, basés sur les calculs des champs bidimensionnels de vorticité et de taux de déformation, ont été définis et ainsi les conditions favorables de la pulsation qui aboutissent à l'amélioration du mélange transversal ont été déterminées. De par les difficultés de mesures expérimentales, ce travail a été basé sur les informations obtenues sur seulement deux dimensions de l'écoulement tridimensionnel étudié. L'objectif de cette étude est l'obtention de la cartographie simultanée des trois composantes de vitesse par une approche numérique qui permettra d'analyser les effets de la pulsation sur les champs tridimensionnels de déformation et de les comparer avec le cas stationnaire.

2 Géométrie d'étude et conditions de calcul

Géométrie: La géométrie d'étude, représentée sur la figure 1-a, est principalement constituée d'un coude (angle d'ouverture $\varphi=90^\circ$) de rayon $r_0=0,02$ et de rayon de courbure $r_c=0,22$ m. Ce coude est précédé d'une conduite cylindrique droite de longueur 1,5m et de même rayon que le coude afin d'obtenir un écoulement établi à l'entrée du coude. Une autre conduite cylindrique droite de longueur 1m et de même rayon est connectée à la sortie du coude.

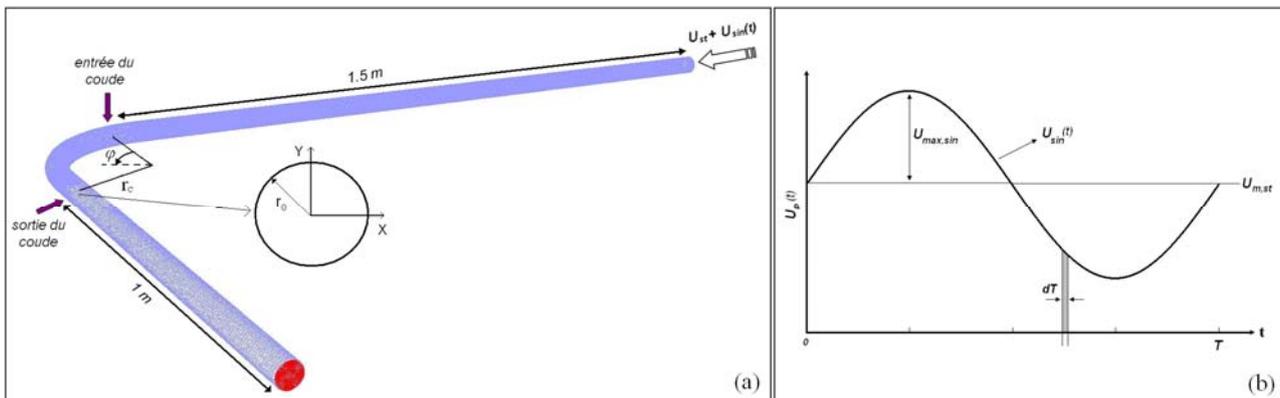


FIG. 1 – (a) Géométrie d'étude, (b) Une période de l'écoulement pulsé

Écoulement: L'écoulement à l'entrée de cette géométrie est un écoulement pulsé (U_p), défini comme la superposition d'un écoulement stationnaire (U_{st}) et d'un écoulement sinusoïdal (U_{sin}), d'où $U_p(t) = U_{m, st} + U_{sin}(t)$. Cet écoulement, représenté sur la figure 1-b, est exprimé sous la forme $U_p(t) = U_{m, st}(1 + \beta \cdot \sin(\omega \cdot t))$, où β est le rapport entre l'amplitude maximale de la composante sinusoïdale de la vitesse, $U_{max, sin}$, et la valeur moyenne de composante stationnaire de la vitesse, $U_{m, st}$. La vitesse angulaire de la composante sinusoïdale, représentée par ω , est déterminée à partir du nombre de Womersley $\alpha = r_0 \cdot (\omega/\nu)^{1/2}$ qui indique le rapport des forces d'inerties liées à l'accélération locale, et des forces visqueuses qui déterminent le mouvement pour une échelle de temps égale à la période d'oscillation.

Maillage: La construction du maillage initial est faite dans le logiciel Gambit en utilisant un maillage volumique hexaédrique non structuré. Pour ceci, la discrétisation de la section transversale d'entrée est faite avec une structure de mailles quadrilatères et la méthode de propagation (Cooper) à des intervalles réguliers, a permis la discrétisation totale du domaine de calcul. Ce maillage initial a été utilisé afin de lancer les premiers calculs (état stationnaire) dans le code de calcul Fluent. Chaque calcul convergé permet d'affiner le

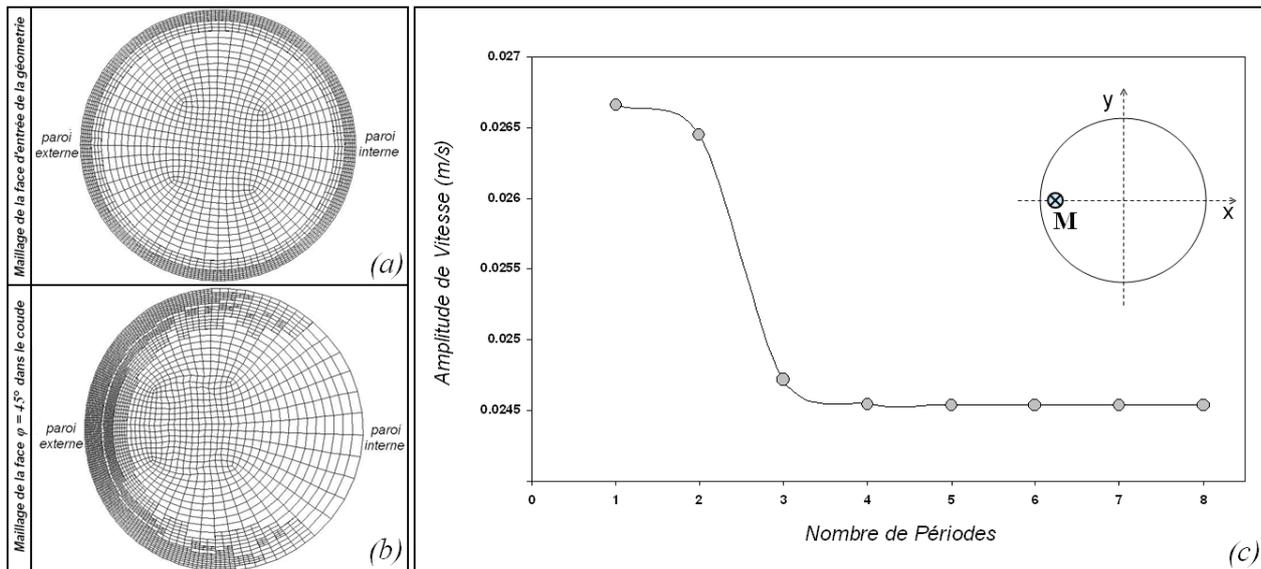


FIG. 2 – a) Maillage final dans la section transversale à l’entrée de la géométrie, b) Maillage final dans la section transversale $\varphi=45^\circ$ du coude, c) Second critère de convergence des calculs.

maillage, particulièrement dans les zones susceptibles d’être le siège de variations importantes du gradient. Cette procédure d’affinage de maillage a été arrêtée lorsque les valeurs de la vitesse sur le diamètre de la section de sortie du coude (sur le plan de courbure) varie de moins de 0,7% en comparaison avec le maillage précédent. Les figures 2-a et 2-b représentent respectivement l’état du maillage final dans les sections transversales à l’entrée de la géométrie et à $\varphi=45^\circ$ dans le coude. Ce réseau de mailles volumiques est constitué de 733068 mailles, ce qui nous conduit à 782226 nœuds.

Critères de convergence: Puisque l’écoulement est dépendant du temps, chaque période d’oscillation est discrétisée en temps (figure 1-b) afin de résoudre les équations de conservation de masse et de la quantité de mouvement. Pour chaque condition de pulsation caractérisée par trois nombres adimensionnels $\{Re_{st} = U_{m,st} \cdot (2r_0)/\nu, \beta, \alpha\}$, le pas de temps, dT , est évalué de tel sorte que le nombre de courant, $N_c = dT / (\Delta x_{min} / U_{max})$, reste inférieur à 1, où Δx_{min} est la taille minimale des mailles et $U_{max} = (1 + \beta)U_{m,st}$ est la vitesse maximale dans une période d’oscillation. Le critère de convergence à chaque pas de temps, dT , est régi par le critère des résidus lorsque ceux-ci sont inférieurs à 10^{-6} pour toutes les équations. Cette condition à elle seule n’est pas suffisante pour la convergence totale des calculs. Elle n’est valable que pour les itérations à chaque pas de temps. Cependant, pour la convergence totale du calcul un second critère a été vérifié. Le calcul final est considéré convergé lorsque l’amplitude de la vitesse instantanée reste invariante en un point du domaine et à un même moment de la période. La figure 2-c montre l’évolution de l’amplitude de la vitesse pour un même moment dans la période ($\omega \cdot t = 90^\circ$) sur un point (M) de la section de sortie du coude en fonction du nombre de périodes. Le point M qui est choisi pour la vérification de ce critère est situé proche de la paroi externe de coude ($x_M/r_0 = -0,9, y_M/r_0 = 0$) car les gradients sont plus élevés dans cette région.

3 Résultats et discussions

Marble (1985) a démontré dans un problème bidimensionnel de diffusion laminaire d’un fluide dans un autre en présence d’une déformation unidimensionnelle et d’une vorticité bidimensionnelle (pour la simplicité) le lien entre vorticité, taux de déformation et mélange. Il a mis en évidence qu’à la fois le taux de déformation et la vorticité augmentent le mélange. Par conséquent, l’évolution des deux grandeurs (taux de déformation et vorticité) peut être employée comme critère pour évaluer l’intensification du mélange dans un écoulement.

Le tenseur de taux de déformation à la sortie du coude ($\varphi=90^\circ$) a été employée comme indicateur de l’intensification du mélange due à la pulsation de l’écoulement. Chaque élément de ce tenseur, $|D_{ij}|$ où $1 \leq i \leq 3$ et $1 \leq j \leq 3$, a été calculé en faisant la moyenne des valeurs absolues dans la section. Dans le cas stationnaire, un seul tenseur peut être calculé alors que dans le cas d’un écoulement pulsé, pour chaque instant de la période d’oscillation un tenseur peut être déterminé.

Pour un nombre de Reynolds stationnaire (Re_{st}), si un ensemble de paramètres de contrôle $\{\alpha$ et $\beta\}$ conduit à un écoulement pulsé dont les valeurs instantanées de tous les éléments du tenseur sont plus grandes que celles du cas stationnaire ($\alpha = \beta = 0$), on peut conclure que la dépendance temporelle imposée à l'écoulement stationnaire induit une déformation plus forte, et donc un meilleur mélange. En d'autres termes, si $|D_{ij}|_p/|D_{ij}|_s > 1$, la pulsation est favorable pour augmenter la déformation associée à $|D_{ij}|$ par rapport au cas stationnaire.

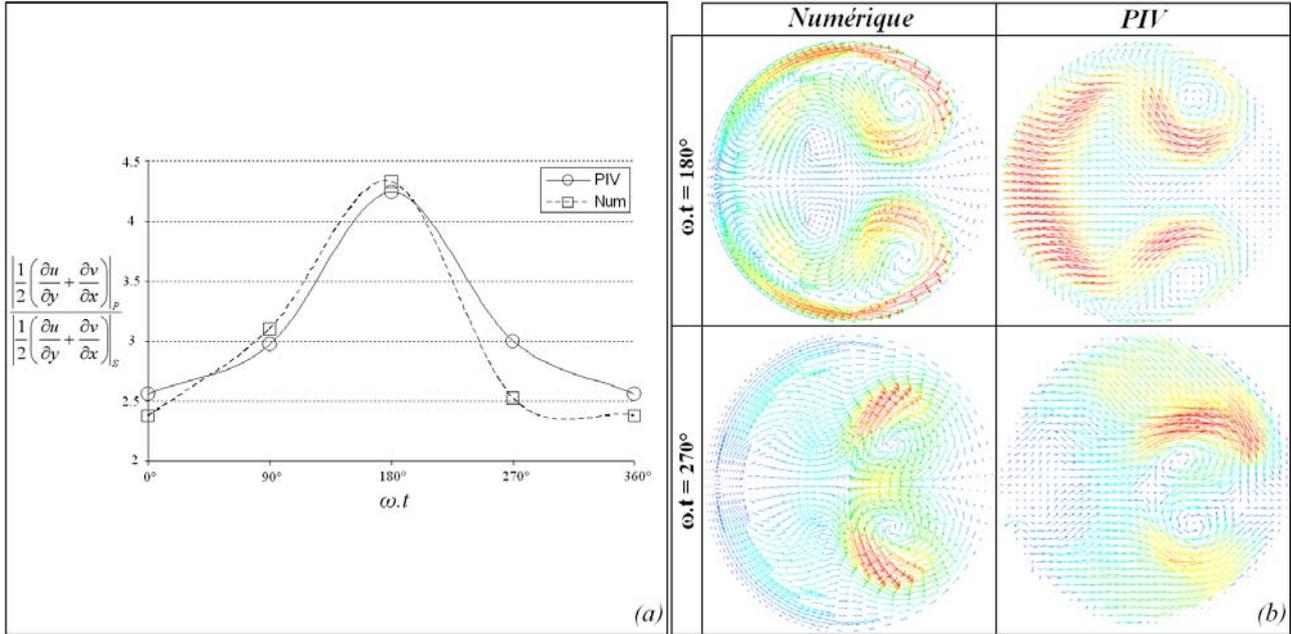


FIG. 3 – Comparaison des résultats numériques et expérimentaux : a) Variations de $|D_{12}|_p/|D_{12}|_s$ avec la phase au cours d'une période d'oscillation b) Structures de l'écoulement secondaire à $\omega.t=180^\circ$ et $\omega.t=270^\circ$ lorsque $\{Re_{st}=600, \beta=2, \alpha=10,26\}$.

Jarrahi et al. [5], ont calculé l'élément $|D_{12}|=|D_{21}|$ pour les différentes conditions de pulsation avec les champs de vitesse secondaire obtenus par mesures PIV. Ces résultats expérimentaux sont utilisés ici afin de valider les calculs numériques. La figure 3-a représente les résultats numériques et expérimentaux concernant les variations de $|D_{12}|_p/|D_{12}|_s$ avec la phase de pulsation lorsque $\{Re_{st}=600, \beta=2, \alpha=14,51\}$. Un écart moyen de 7,7% est observé entre les résultats numériques et expérimentaux. En plus, les différentes structures de l'écoulement secondaires obtenues numériquement sont en accord avec celles observées dans les mesures PIV [5]. Comme un exemple représentatif, la figure 3-b montre les structures de l'écoulement pulsé à $\omega.t=180^\circ$ et $\omega.t=270^\circ$ quand $\{Re_{st}=600, \beta=2, \alpha=10,26\}$.

Pour réussir à étudier l'effet d'oscillation sur le mélange, l'idée est de proposer un seul tenseur de taux de déformation qui peut décrire (et remplacer) les tenseurs instantanés dans l'écoulement pulsé. Ce tenseur doit également fournir les informations sur l'augmentation du mélange par rapport au cas stationnaire. Ayant cet objectif, le tenseur appelé $D_{p/s}$ est défini de telle sorte que ses éléments sont calculés en utilisant la relation suivante :

$$(D_{p/s})_{ij} = \frac{\left(D_{ij} \right)_{m,p}}{\left(D_{ij} \right)_{m,s}} = \frac{\int_0^{360} |D_{ij}|_p . d(\omega t)}{\int_0^{360} |D_{ij}|_s . d(\omega t)} \quad (1)$$

Dans la figure 4, les valeurs des éléments de $D_{p/s}$ sont présentées sous forme d'histogrammes pour différentes valeurs de β lorsque $\{Re_{st}=420, \alpha=14,51\}$. En rappelant que la valeur 1 représente le cas stationnaire, les résultats montrent que tous les éléments de tenseur ont une valeur supérieure à 1, c'est-à-dire que la pulsation pour $\beta \geq 1$ améliore le mélange par rapport au régime stationnaire. D'après cette figure, l'augmentation de β aboutit aux déformations plus importantes, donc à un meilleur mélange. L'effet de cette augmentation est moins considérable pour les éléments $(D_{p/s})_{13}$ et $(D_{p/s})_{23}$ par rapport aux autres éléments du tenseur. Ces comportements ont été également observés dans les autres conditions de pulsation étudiées

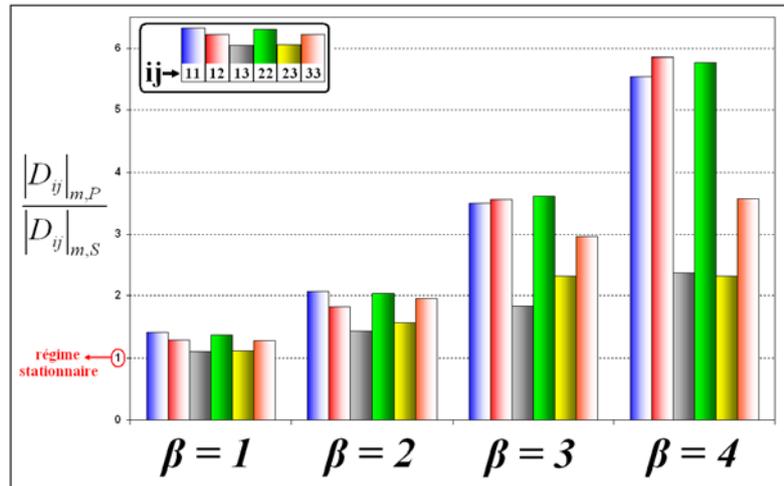


FIG. 4 – Effets de β sur les valeurs des éléments du tenseur $D_{P/S}$ lorsque $\{Re_{st}=420, \alpha=14,51\}$

($\{Re_{st}=600, \beta=1 \text{ et } 2, \alpha= 10,26 \text{ et } 14,51 \text{ et } 24,5\}$). L'augmentation minimale constatée est de 4% et il s'agit d'élément $(D_{P/S})_{13}$ quand $\{Re_{st}=600, \beta=1, \alpha= 14,51\}$. L'augmentation maximale est de 486% et pour l'élément $(D_{P/S})_{12}$ lorsque $\{Re_{st}=420, \beta=4, \alpha= 14,51\}$.

Étant donné la complexité d'analyse des influences de la pulsation sur chaque élément du tenseur, le taux de cisaillement total, $\dot{\gamma}$, et le taux d'élongation totale, $\dot{\varepsilon}$, semblent les paramètres pertinents afin d'évaluer les effets globaux de la pulsation sur les déformations. Les relations utilisées pour le calcul de ces paramètres sont les suivantes :

$$\dot{\gamma} = \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{u^2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + v^2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + w^2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) + uv \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + uw \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + vw \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)}{u^2 + v^2 + w^2} \quad (3)$$

À quatre phases principales ($\omega.t = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ et 270°), les valeurs absolues de ces paramètres sont moyennées dans la section de sortie du coude et puis adimensionnées par les valeurs obtenues de la même façon dans le cas stationnaire. Pour quatre conditions de pulsation $\{Re_{st}=600, \beta=1 \text{ et } 2, \alpha= 10,26 \text{ et } 14,51\}$, les variations de ces paramètres adimensionnels au cours d'une période d'oscillation sont présentées sur la figure 5. Pour toutes les conditions de pulsation, les courbes associées au taux de cisaillement ont quasiment

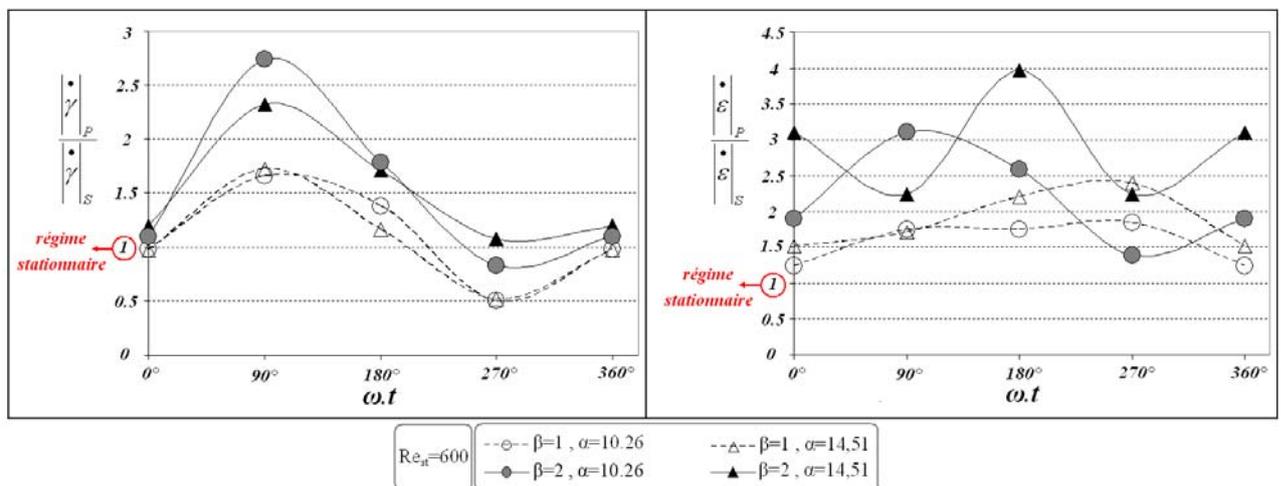


FIG. 5 – Variations de $\left| \frac{\dot{\gamma}_P}{\dot{\gamma}_S} \right|$ et $\left| \frac{\dot{\varepsilon}_P}{\dot{\varepsilon}_S} \right|$ avec la phase lorsque $\{Re_{st}=600, \beta=1 \text{ et } 2, \alpha= 10,26 \text{ et } 14,51\}$

la même forme avec un maximum à $\omega.t = 90^\circ$ et un minimum à $\omega.t = 270^\circ$. L'augmentation du taux de cisaillement jusqu'à $\omega.t = 90^\circ$ peut être attribuée à l'accélération de l'écoulement dans cette partie de période. Contrairement à la première moitié de la période ($0^\circ \leq \omega.t \leq 180^\circ$) où pour toutes les conditions de pulsation le taux de cisaillement total est intensifié par rapport au cas stationnaire, la deuxième moitié ($180^\circ \leq \omega.t \leq 360^\circ$) n'est favorable que lorsque $\beta \geq 2$. Pour ce qui concerne les courbes associées au taux d'élongation, un comportement plus complexe est observé particulièrement quand $\beta \geq 2$. Toutefois, pour toutes les conditions étudiées, la pulsation intensifie les élongations car les valeurs sont toujours supérieures à 1.

4 Conclusions

L'augmentation des valeurs de tous les éléments du tenseur de déformation dans l'écoulement pulsé a montré l'intérêt de la pulsation superposée à l'écoulement de Dean afin d'intensifier les déformations dans toutes les directions. L'étude du taux de cisaillement total et du taux d'élongation totale indique également l'intensification globale de la déformation particulièrement lorsque $\beta \geq 2$. Tous ces arguments, confirment et quantifient l'amélioration du mélange en régime laminaire par la pulsation. L'étape suivante pourra être de relier ces grandeurs aux outils classiques de quantification du chaos.

References

- [1] Castelain C., Mokrani A., Legentilhomme P., Peerhossaini H., Residence time distribution in twisted pipe flows: helically coiled system and chaotic system, *Experiments in Fluids*, 22, 359-368, 1997.
- [2] Castelain C., Mokrani A., Le Guer Y., Peerhossaini H., Experimental study of chaotic advection regime in a twisted duct flow, *European Journal of Fluid Mechanics*, 20, 205-232, 2001.
- [3] Timité B., Jarrahi M., Castelain C., Peerhossaini H., Pulsating flow for mixing intensification in a twisted curved pipe, *Journal of Fluids Engineering*, 131, 21104_1-121104_10, 2009.
- [4] Jarrahi M., Castelain C., Peerhossaini H., Secondary flow patterns and mixing in laminar pulsating flow through a curved pipe, *Experiments in Fluids*, Published online, Nov. 2010.
- [5] Jarrahi M., Castelain C., Peerhossaini H., Laminar sinusoidal and pulsatile flows in a curved pipe, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, In Press, 2011.
- [6] Dean W.R., Note on the motion of fluid in a curved pipe, *Phil. Mag.*, 4, 208-223, 1927.
- [7] Dean W.R., The streamline motion of fluid in a curved pipe, *Phil. Mag.*, 5, 673-695, 1928.
- [8] Lyne W.H., Unsteady viscous flow in a curved pipe, *J. Fluid Mech.*, 45, 13-31, 1970.
- [9] Zalosh R.G., Nelson W.G., Pulsating flow in a curved tube, *J. Fluid Mech.*, 59, 693-705, 1973.
- [10] Bertelsen A.F., An experimental investigation of low Reynolds number secondary streaming effects associated with an oscillating viscous flow in a curved pipe, *J. Fluid Mech.*, 70, 519-527, 1975.
- [11] Talbot L., Gong K.O., Pulsatile entrance flow in a curved pipe, *J. Fluid Mech.*, 127, 1-25, 1983.
- [12] Hamakiotes C.C., Berger S.A., Periodic flows through curved tubes: the effect of the frequency parameter, *J. Fluid Mech.*, 210, 353-370, 1990.
- [13] Boiron O., Deplano V., Pelissier R., Experimental and numerical studies on the starting effect on the secondary flow in a bend, *J. Fluid Mech.*, 574, 519-527, 2007.
- [14] Siggers J.H., Waters S.L., Unsteady flows in pipes with finite curvature, *J. Fluid Mech.*, 600, 133-165, 2008.
- [15] Pedley T.J., *The fluid mechanics of large blood vessels*, Cambridge Monographs on Mechanics and Applied Mathematics, 160-224, 1980.
- [16] Chang L.J., Tarbell J.M., Numerical simulation of fully developed sinusoidal and pulsatile (physiological) flow in curved tubes, *J. Fluid Mech.*, 161, 175-198, 1985.
- [17] Zabielski L., Mestel A.J., Unsteady blood flow in a helically symmetric pipe, *J. Fluid Mech.*, 370, 321-345, 1998.
- [18] Deplano V., Siouffi M., Experimental and numerical study of pulsatile flows through stenosis: Wall shear stress analysis, *J. Biomechanics*, 32, 1081-1090, 1999.
- [19] Siouffi M., Deplano V., Pelissier R., Experimental analysis of unsteady flows in stenosis, *J. Biomechanics*, 31, 11-19, 1998.
- [20] Simon H.A., Chang M.H., Chow J.C.F., Heat transfer in curved tubes with pulsatile fully developed laminar flows, *ASME J. Heat Transfer*, 99, 590-595, 1977.
- [21] Marble F. E., *Growth of a diffusion flame in the field of a vortex*, Recent advances in the aerospace sciences, Plenum Publishing, New York, 1985.