

## Effet des instabilités cycle à cycle sur un tourbillon de type « tumble » lors de l'admission et de la compression

M. Mahdaoui <sup>1</sup>, A. Ait Msaad <sup>1</sup>, M. Mouqallid <sup>1</sup> et E. Affad <sup>2</sup>

*1 Laboratoire de Mécanique, Energétique et Procédés, École Nationale d'Arts et Métiers de Meknès, Marjane II, BP 4024 Béni M'hamed, Meknès*

*2 Laboratoire de transfert de chaleur et de masse, FST Mohammedia, B.P. 146 Yasmina, Mohammedia  
Mustapha\_mahdaoui@yahoo.fr*

**Résumé :** La compréhension physique des écoulements internes est une étape cruciale pour la réduction des émissions polluantes. Elle intéresse les constructeurs automobiles soumis aux normes environnementales. En pratique, un des facteurs limitant la plage d'opérabilité d'améliorer les performances du moteur à essence est leur propension à générer des variations cycle à cycle qui correspondent à une fluctuation de la combustion d'un cycle à l'autre. En effet plusieurs auteurs ont démontré que les variations cycliques peuvent être inhérentes à la nature chaotique de la combustion dans les moteurs. Ce comportement trouve ses origines dans la dépendance non linéaire du processus de combustion des conditions initiales au début du cycle. Ainsi les petites fluctuations dans les caractéristiques de l'écoulement sont amplifiées durant la phase de combustion.

Cette étude se propose d'avoir une meilleure compréhension des écoulements interne moteur à l'aide de la simulation numérique en utilisant une approche DES SST (Detached Eddy Simulation Shear-Stress Transport), qui est une approche hybride entre URANS/LES (Unsteady Reynolds-Averaged Navier–Stokes/Large Eddy Simulations). Ces simulations ont été réalisées avec le code FLUENT couplé avec notre propre programme basé sur UDF donnée par FLUENT. Et plus précisément est d'étudier l'effet des conditions initiales aléatoires et les conditions d'entrées aléatoires sur l'instabilité d'un écoulement tourbillonnaire de type tumble dans une chambre de combustion lors de l'admission et de la compression

**Mots clés :** conditions initiales aléatoires ; DES ; tumble ; variations cycle à cycle

### 1. Introduction

L'un des facteurs responsable des phénomènes des variations cycle à cycle est l'instabilité des caractéristiques de l'écoulement tourbillonnaire tumble. Cette instabilité peut être due aux fluctuations des conditions initiales. Plusieurs auteurs ont démontré que les variations cycliques peuvent être inhérentes à la nature chaotique de la combustion dans les moteurs. Ce comportement trouve ses origines dans la dépendance non linéaire du processus de combustion des conditions initiales au début du cycle. Ainsi les petites fluctuations dans les caractéristiques de l'écoulement sont amplifiées durant la phase de combustion, ce qui induit des modifications significatives au niveau de la pression dans le cylindre. Ces auteurs pensent que la simulation numérique est la seule voie qui permet de contrôler l'effet de chaque facteur et proposent un modèle quasi-dimensionnel pour prédire les variations cycliques, Daily [1], Shen et al. [2], Hu [3] et Reynolds [4]. Thobois et al. [5], Toledo et al. [6], Hasse et al. [7], Richard et Vermorel [8, 9], Mahdaoui et al. [10-11]

La simulation des écoulements fluides utilisant l'approche URANS (Unsteady Reynolds-Averaged Navier–Stokes) fondé sur la modélisation est un outil important dans le développement de moteur à combustion interne et des procédés d'optimisations. Toutefois, ces modèles ne peuvent pas résoudre les variations cycliques, qui sont un aspect important dans la conception des nouveaux systèmes de combustion.

La simulation des grandes échelles (Large Eddy Simulation) est une approche prometteuse pour pallier les inconvénients de l'approche RANS. Elle consiste à simuler les grandes structures instationnaires de la turbulence et à modéliser les effets des petites structures. Cependant, pour des nombres de Reynolds élevé pour calculer les flux tels que ceux de l'écoulement interne moteur et turbomachines, pour calculer la couche limite aux parois, LES a besoin des ressources CPU comparable à ceux de la simulation numérique directe (DNS).

Afin de s'affranchir à des insuffisances de la LES pour les écoulements pariétaux à grand nombre de Reynolds, de surmonter le besoin aux ressources CPU pour LES, et d'associer la robustesse de RANS dans la région proche de parois, des approches hybrides ont été proposées, telles que l'approche DES, Detached Eddy Simulation, Spalart et al. [12], Travin et al. [13], qui combine l'approche LES et l'approche RANS par une sélection locale soit de l'échelle de longueur LES soit de l'échelle de longueur RANS.

Cette étude se propose d'avoir une meilleure compréhension des écoulements interne moteur à l'aide de la simulation numérique en utilisant une approche DES SST (Detached Eddy Simulation Shear-Stress Transport), qui est une approche hybride entre URANS/LES (Unsteady Reynolds-Averaged Navier–Stokes/Large Eddy Simulations). Ces simulations ont été réalisées avec le code FLUENT couplé avec notre propre programme basé sur UDF donnée par FLUENT. Plus précisément nous avons étudié l'effet des conditions initiales aléatoires sur l'instabilité d'un écoulement tourbillonnaire de type tumble dans une chambre de combustion lors de l'admission et de la compression. Le cas examiné est un moteur de géométrie simplifiée (voir figure 1), pour lequel des données détaillées d'expérimentation qui concernent le champ moyen et les champs instantanés de la vitesse (Borée et al. [14]).

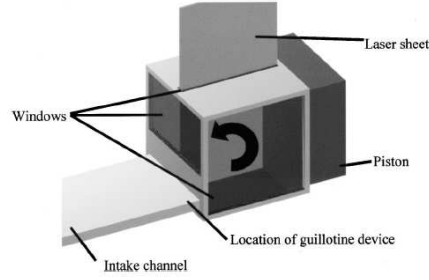


Figure 1 : Le domaine de calcul du moteur de géométrie simplifiée.

## 2. Les équations gouvernantes

La formulation des équations filtrées utilisées dans cette étude sont [15] :

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\text{Et} \quad \left( \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j) \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

Avec  $\bar{\sigma}_{ij}$  est le tenseur de la contrainte due à la viscosité moléculaire.

$$\bar{\sigma}_{ij} = \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (3)$$

Et  $\bar{\tau}_{ij}$  est la contrainte sous-maille.

$$\bar{\tau}_{ij} = \overline{\rho u_i u_j} - \bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (4)$$

Dans cette étude les modèles de turbulence utilisés sont décrits comme suit :

### 2.1 Le modèle (k- $\omega$ ) URANS SST

Les équations de transport pour k et  $\omega$  ont la forme suivante :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} + \mu \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + S_\omega \quad (6)$$

Avec

-  $\mu_t$  est la viscosité turbulente

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega}\right]} \quad (7)$$

- $F_1$  et  $F_2$  sont les fonctions de mélange.
- $\sigma_k$  et  $\sigma_\omega$  sont les nombres de Prandtl turbulent pour k et  $\omega$ .
- $S_k$  et  $S_\omega$  sont des termes source.
- $\tilde{G}_k$  représente la génération de l'énergie cinétique turbulente
- $G_\omega$  représente la génération de  $\omega$ .
- $Y_k$  représente la dissipation de k due à la turbulence ;
- $Y_\omega$  représente la dissipation de  $\omega$  due à la turbulence ;

## 2.2 Le modèle DES SST

Le terme de dissipation de l'énergie cinétique turbulente est modifié pour le modèle de turbulence DES.

$$Y_k = \rho \beta^* k \omega f_{\beta^*} \quad (8)$$

Avec  $f_{\beta^*}$  n'est pas une constante égale à 1 comme dans le cas du modèle SST URANS, mais calculé à l'aide de la formule :

$$f_{\beta^*} = \max\left(\frac{L_t}{C_{DES}\Delta}, 1\right) \quad (9)$$

où  $C_{DES}$  est une constante d'étalonnage utilisées dans le modèle DES  $\Delta = \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ .

$L_t$  est la longueur de mélange turbulente.

$$L_t = \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega} \quad (10)$$

## 3. Résultats et discussion

### 3.1 Modèle et validation

Borée et al. (2002) [14] ont étudié la production, la compression et la rupture de l'écoulement tourbillonnaire expérimentalement dans un moteur de configuration simplifiée. Les mesures en deux dimensions par PIV de 100 cycles consécutifs à différents positions d'angle de vilebrequin sont disponibles pour le plan symétrie de la chambre et sont utilisés pour la comparaison avec la simulation de cette étude. Le tumble est un vortex dont l'axe du mouvement de rotation est perpendiculaire à l'axe du cylindre. Ce type d'écoulement est d'une importance croissante pour les turbo-chargés moderne, pour les moteurs à essence à injection directe, où il a une influence majeure sur l'apport de conception multiples. Le tumble est généré lors de la phase d'admission. Le tourbillon à grande échelle devient instable lors de la compression quand le piston monte vers le point mort haut et se décompose sous la forme des petites structures.

Le domaine de calcul est une chambre de dimension (100×100×100 mm<sup>3</sup>). L'air entre dans la chambre de compression à travers un canal rectangulaire. Le rapport longueur/hauteur du canal d'amenée (L/h =30) garantit que la turbulence est pleinement établie lorsque l'écoulement atteint la chambre. Pendant la phase d'admission le nombre de Reynolds maximum basé sur le diamètre hydraulique est  $Re_{max}=12000$ . Le taux de compression est de 4 et la pression résultante de pointe est  $p_{max} = 5,5$  bar. Le piston est en aluminium à une température constante de  $T_{piston} = 22,5$  C. Cette valeur a été utilisée dans la simulation, pour les autres parois la température est égale à  $T_{parois}=18,8$ C. Le pas de temps est  $\Delta t = 2 \cdot 10^{-4}$ s = 0,2472 CA. Le maillage de calcul se compose de cellules

hexaédriques. Grâce à la géométrie simple de la chambre et afin de simuler les mouvements du piston de la chambre, un maillage dynamique a été appliqué.

Dans cette étude, nous avons utilisé les résultats de validation exposés dans [10-11] afin d'étudier la génération et la compression d'un écoulement tumble. En effet, nous avons simulé cet écoulement en utilisant l'approche DES 3D qui combine les avantages d'URANS et LES. Nous avons utilisé le schéma numérique upwind premier ordre (FOUS), et l'algorithme de couplage PISO. Une étude de maillage a été réalisée sur l'effet du maillage (raffinement et type d'élément). Nous avons adopté un maillage à base hexaédrique (731787 éléments en fin de l'admission).

### 3.2 Effet des conditions initiales aléatoires

Cette partie est dédiée à l'étude de l'influence des conditions initiales sur les variations cycliques. En effet, à la fin du cycle moteur, et après l'échappement des gaz brûlés, la distribution des vitesses est aléatoire dans la chambre et varie d'un cycle à un autre. Ces fluctuations de vitesse influencent directement sur cycle suivant. Cela est traduit par l'influence de la mémoire du cycle précédent sur le cycle suivant. Pour mettre en évidence l'influence des conditions initiales sur les variations cycle à cycle d'un tourbillon de type tumble, nous avons initié nos simulations par des champs de vitesses aléatoires. La figure 2 présente quelques champs de vitesse. L'ordre de la vitesse est de 0.5m/s. Nous avons effectué des simulations DES afin d'examiner ces conditions aléatoires sur le tumble.

Tout d'abord nous allons analyser cet effet sur le champ de vitesse globale. Nous avons analysé les champs de vitesse instantanés pour trois positions du piston : à  $CA=180^\circ$ ,  $CA=270^\circ$  et  $CA=360^\circ$ . Ces résultats correspondent aux simulations initiées par les différentes conditions initiales aléatoires. Une observation globale de ces champs montre une variation d'un champ à un autre.

Afin de confirmer cette observation, nous avons fait une étude quantitative. En effet, nous avons relevé les profils de vitesse instantanée horizontaux et verticaux de l'axe qui passe par le centre de la chambre. Les figures 3,4 et 5 montrent l'évolution des profils de la vitesse horizontale et verticale pour différents cycle et à trois différents positions du piston : à  $CA=180^\circ$ ,  $CA=270^\circ$  et  $CA=360^\circ$ . En comparant ces profils avec les profils de l'expérience issus de Borée et al [14], nous pouvons constater la sensibilité de ces profils aux conditions initiales. A partir de ces résultats, nous observons qu'il y a des variations d'un cycle à l'autre, ces variations de vitesse influencent directement l'aérodynamique dans le moteur. On connaît le rôle très important de l'aérodynamique dans la combustion ces petites fluctuations sur l'aérodynamique vont engendrer des variations cycliques.

Pour mieux comprendre l'effet des conditions initiales sur les instabilités cycle à cycle d'un tumble, nous avons analysé les variations cycle à cycle dues aux fluctuations aléatoires des conditions initiales. Cette analyse inclut la vorticité instantanée. Nous montrons sur la figure 6, l'évolution de la vorticité instantanée pour différentes conditions initiales. Cette évolution est présentée afin de quantifier les variations cycliques de vorticité et de montrer la dépendance des différentes grandeurs qui caractérisent l'écoulement tumble aux conditions initiales du cycle, c'est-à-dire aux conditions dans la chambre après l'échappement.

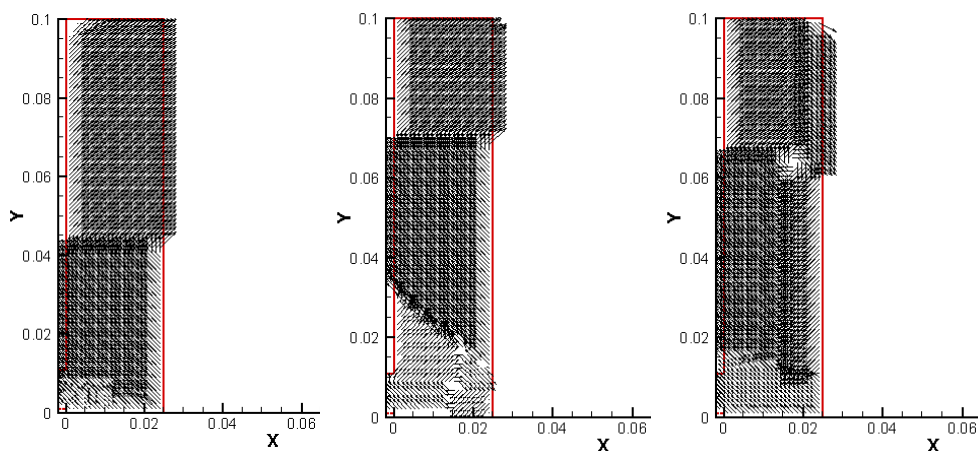


Figure 2 : Champs de vitesse initiale aléatoire

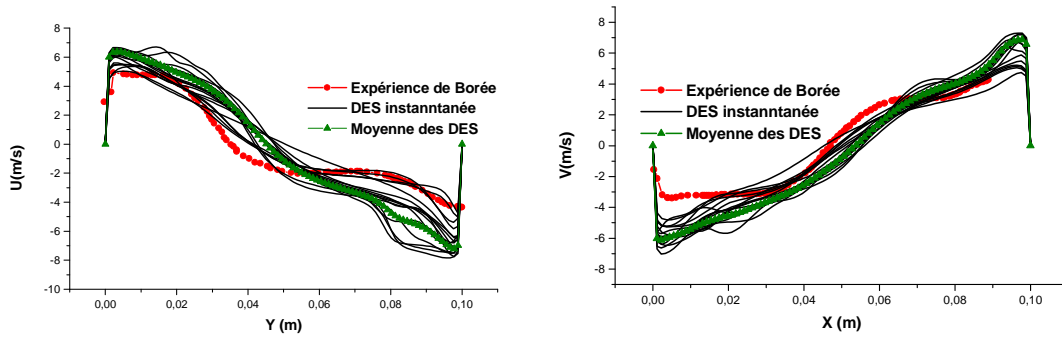


Figure 3 : Profils de vitesse verticaux et horizontaux à CA=180°, pour différentes conditions initiales aléatoires

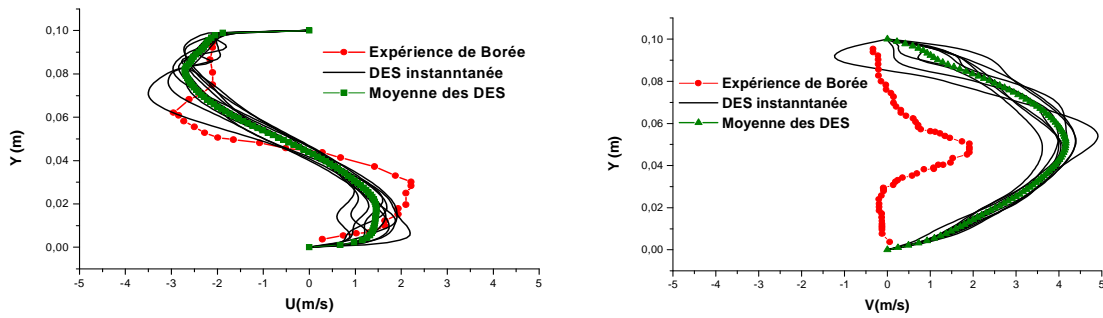


Figure 4 : Profils de vitesse verticaux et horizontaux à CA=270°, pour différentes conditions initiales aléatoires

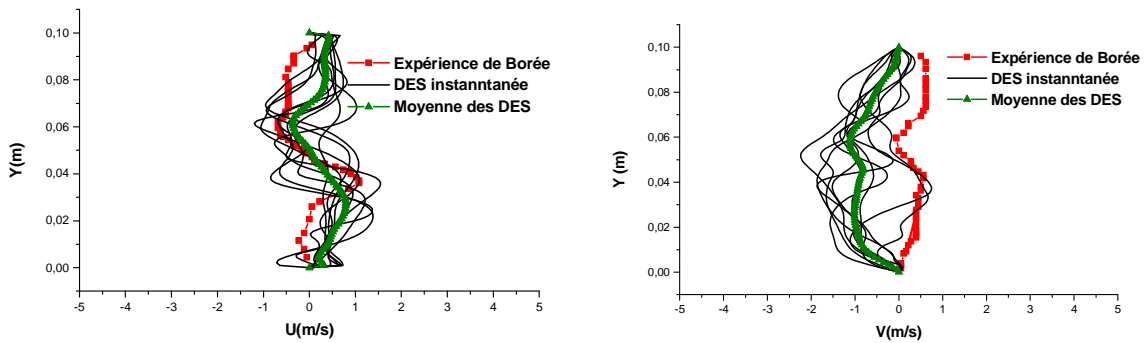


Figure 5 : Profils de vitesse verticaux et horizontaux à CA=360°, pour différentes conditions initiales aléatoires

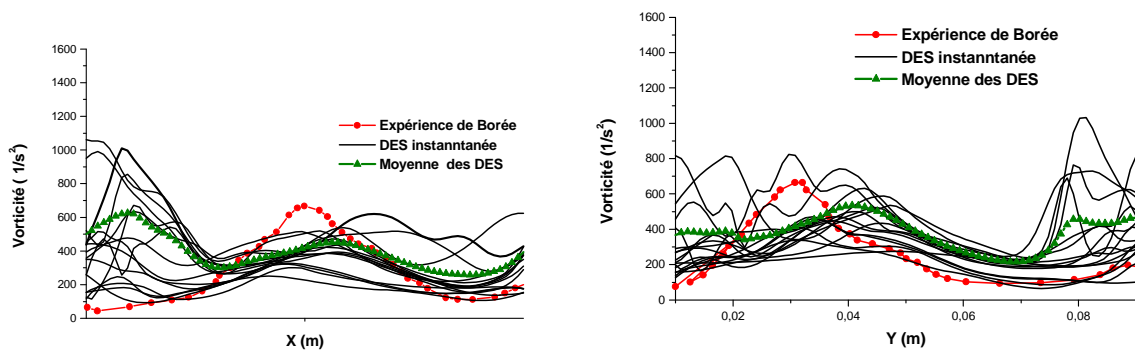


Figure 6 : Influence des conditions initiales aléatoires sur la vorticité suivant X et Y à CA=180°

## Conclusion

L'étude et la compréhension du comportement des écoulements internes moteurs est devenu un impératif incontournable afin d'améliorer les performances des moteurs, réduire la consommation et diminuer les émissions polluantes.

Le présent travail a porté essentiellement sur la simulation numérique d'un écoulement tourbillonnaire de type tumble en utilisant une approche hybride LES /URANS qui combine l'approche LES et l'approche RANS par une sélection locale soit de l'échelle de longueur LES soit de l'échelle de longueur RANS.

L'étude a pour objectif d'étudier l'effet des conditions initiales aléatoires sur les instabilités qui accompagnent cette structure tourbillonnaire lors de l'admission et de la compression.

Les variations des conditions initiales ont une influence importante sur l'instabilité des grandeurs qui caractérisent l'écoulement au sein de la chambre.

## Références

- [1] J.W. Daily Cycle-to-cycle variations: a chaotic process? *Combustion science and technology*, vol. 57, pp149-162, 1988.
- [2] X., Shen P.H., Hinze J.B. A Heywood study of cycle-to-cycle variations in SI engines using a modified quasi-dimensional model. SAE paper n°961187, 1996.
- [3] Z., Hu "Non-linear Instabilities of combustion Processes and Cycle-to-cycle variations in spark-ignition engines" International spring fuels & lubricants meeting SAE Paper n° 961197, 1996.
- [4] W. C. Reynolds, Modeling of fluids motion in engines – An introductory overview. *Combustion modeling in reciprocating engines*, eds. Mattavi, J.M. and Ammann, C.A., Plenum Press, pp 99 – 124, 1980.
- [5] L. Thobois, R. Lauvergne, and T. Poinso. Using LES to investigate reacting flow physics in engine design process. *SAE Paper*, (2007-01-0166), 2007.
- [6] M. S. Toledo, L. L. Penven, M. Buffat, A. Cadiou, and J. Padilla. Large eddy simulation of the generation and breakdown of a tumbling flow. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 28 :113–126, 2007.
- [7] C. Hasse, V. Sohm, and B. Durst. Detached eddy simulation of cyclic large scale fluctuations in a simplified engine setup. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 30 :32–43, 2009.
- [8] S. Richard, O. Vermorel, and D. Veynante. Development of LES models based on the flame surface density approach for ignition and combustion in SI engines. In *ECCOMAS Thematic Conference on computational combustion*, pages 1–20, 2005.
- [9] O. Vermorel, S. Richard, O. Colin, C. Angelberger, A. Benkenida, and D. Veynante. Towards the understanding of cyclic variability in a spark ignited engine using multi-cycle LES. *Combust. Flame*, 156 :1525–1541, 2009.
- [10] M., Mahdaoui, A., Ait msaad, M., Mouqallid, & E Affad, "The Influence of Inflow Condition on the Generation of Tumbling Flow Using Detached Eddy Simulation." *Energy and Power Engineering* 34-40 2012
- [11] M., Mahdaoui, A., Ait Msaad, M., Mouqallid, and E., Affad, "The Effect of the Random Inflow Conditions and Initial Conditions to Cycle-to-Cycle Variations Using Detached Eddy Simulation," *SAE Technical Paper* 2012-01-1758, 2012.
- [12] P.R. Spalart, W.H. Jou, M. Strelets, and S.R. Allmaras. Comments on the feasibility of LES for wings and on a hybrid RANS/LES approach. In *Advances in DNS/LES*, Greyden, pages 137.148, 1997.
- [13] A., Travin, M., Shur, M., Strelets, P., Spalart, Detached-eddy simulation past a circular cylinder. *Flow Turbulence Combustion* 63, 292–313, 2000
- [14] J., Borée, , S. Maurel& R., Bazile,"Disruption of a compressed vortex", *Physics of Fluids*, 14 2543-2556, 2002.
- [15] ANSYS FLUENT 12.0 Documentation. User's Guide ANSYS, Inc. 2009-01-29.