

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES**



**Faculté des sciences de l'ingénieur**

**Mémoire de Magister**

Présenté par :

**ABDEDOU Amar**

En vue de l'obtention du diplôme de **MAGISTER** en :

**Filière : Énergétique et développement durable**

**Option : Management de projets énergétiques**

**TITRE DU MEMOIRE**

**Contribution à l'étude de l'écoulement autour du corps d'Ahmed  
en utilisant un modèle DES.**

**Devant le jury composé de :**

Mr LIAZID	Abdelkrim	Professeur	Enset/Oran	Président
Mr MANSOURI	Kacem	Professeur	UMBB	Examineur
Mr HACHEMI	Madjid	Maitre .Conférences A	UMBB	Examineur
Mr BALISTROU	Mourad	Maitre .Conférences A	UMBB	Examineur
Mr HANCHI	Samir	Professeur	EMP	Directeur de mémoire

Année Universitaire 2011/2012

# Remerciement

---

Je tiens à remercier le conseil scientifique de l'école doctorale en énergétique et développement durable (EDED) de m'avoir accordé le sujet. J'exprime toute ma gratitude à mon directeur de mémoire Monsieur Samir HANCHI, Professeur de l'école militaire polytechnique, pour m'avoir proposé ce thème de recherche, et je remercie vivement monsieur Nabil TOUNSI de laboratoire mécanique des fluides de l'école militaire polytechnique pour son soutien permanent et de m'avoir guidé et conseillé tout au long de la préparation de ce mémoire.

Je remercie monsieur le professeur Abdelkrim Liazid de L'ENSET d'Oran, monsieur le professeur Kacem MANSOURI de l'université M'Hamed Bougara de Boumerdès, monsieur Mourad BALISTROU maître de conférence de l'UMBB, et monsieur Madjid HACHEMI maître de conférences de l'UMBB, pour avoir accepté de participer au jury.

Je remercie également mes collègues et amis de l'EDED, pour les trois années passées ensemble et à qui je souhaite beaucoup de réussite dans leurs études et un bon avenir.

Je ne saurais remercier suffisamment ma famille pour leur soutien inestimable.

## Résumé :

Ce projet concerne l'étude de l'écoulement autour d'un modèle réduit d'un véhicule automobile, appelé corps d'Ahmed. Pour une géométrie de type culot incliné à  $25^\circ$ , des développements expérimentaux et numériques ont permis l'identification de la topologie de l'écoulement et du coefficient de traînée associé.

Le présent travail se base sur une étude numérique, dont l'objet est le contrôle actif de l'écoulement par un jet synthétique de trois fréquences réduites 6.12, 6.48 et 9.00, et un faible coefficient de quantité de mouvement  $8.68 \times 10^{-6}$ ,  $1.1 \times 10^{-5}$ . L'analyse des résultats obtenus a permis de conclure que la réduction de traînée associée dépend de la position du jet synthétique, la fréquence réduite et le coefficient de quantité de mouvement.

**Mot clés :** Corps d'Ahmed, contrôle des écoulements, jet synthétique, fleunt, traînée aérodynamique.

### Abstract:

This project concerns the study of the flow around a small-scale vehicle model, which is called Ahmed body. For a geometry corresponding to a base slant angle of  $25^\circ$ , experimental and numerical developments have allowed the identification of the topology of the flow and the associated drag coefficient.

The present work is based on a numerical study, dealing with the flow active control through a synthetic jet with three reduced frequencies 6.12, 6.48 and 9.00, and a low quantity movement factor  $8.68 \times 10^{-6}$ ,  $1.1 \times 10^{-5}$ . The analysis of the results obtained made it possible to conclude that the drag reduction associated depends on the position with the synthetic jet, the reduced frequency and the quantity movement factor.

**Key words:** Ahmed body, flow control, synthetic jet, aerodynamic drag. fleunt.

ملخص

هذا المشروع يتعلق بدراسة تدفق نحو نموذج لسيارة الجسم أحمد لنوع قاعدة زاوية الهندسة درجة والتطورات التجريبية والعديدية مكنت من تحديد دط بول وجيات دفع ومعامل السحب المرتبطة بها  
25

ويستند العمل على رقمية، دراسة والذي يهدف التحكم في النشاط تدفق بواسطة طائرة الاضطرابية لمدة ثلاثية ترددات اندخ فاض وانخ فاض معامل الزخم ولصت دليل النتائج أن تدخ فاض السحب يمتد على الموقف المشد ترك لطائرة الاضطرابية وانخ فاض، وتيرة ومعامل الزخم.

# Table des matières

---

## Introduction générale

<b>1. Etat de l'art.....</b>	<b>4</b>
1.1. Etat de l'art au sein de l'environnement aérodynamique automobile .....	4
1.2. Aérodynamique automobile .....	4
1.2.1. Coefficients de trainée .....	4
1.3. Ecoulements caractéristiques .....	6
1.4. Ecoulement autour du corps d'Ahmed .....	9
1.4.1. Structure de l'écoulement.....	9
1.4.2. Structure à l'avant du corps de Ahmed.....	11
1.4.3. Structure à l'arrière du corps de Ahmed. ....	11
1.5. Identification des structures tourbillonnaires .....	12
1.5.1. Résultats de simulation des grandes échelles de corps de ahmed.....	13
1.5.2. Confrontation des modèles testés avec l'expérience de Lienhardt et al .....	15
1.5.3. Résultats obtenus sur le cas test à 25° d'angle de lunette .....	15
<b>2. Contrôle des écoulements .....</b>	<b>17</b>
2.1. Introduction .....	17
2.2. Classification des contrôles .....	17
2.2.1. Contrôle passif .....	17
2.2.2. Contrôle actif.....	18
2.3. Contrôle des écoulements par jets synthétique.....	20
2.4. Jet synthétique en interaction avec un écoulement .....	21
2.5. Principe du jet synthétique .....	22
2.6. Définition d'une vitesse caractéristique .....	22
2.6.1. Nombre de Reynolds :.....	23
2.6.2. Nombre de Stokes :.....	23
2.6.3. Longueur de pénétration : .....	23
2.6.4. Fréquence adimensionnée :.....	24
2.6.5. Coefficient de quantité de mouvement : .....	24
2.6.6. Critère de formation :.....	25
<b>3. Simulations numériques .....</b>	<b>27</b>
3.1. Introduction .....	27
3.1.1. Présentation des logiciels .....	27

# Table des matières

---

3.1.2.	Maillage sous Gambit .....	28
3.1.3.	Menu géométrie .....	28
3.1.4.	Menu mesh (maillage) .....	28
3.1.5.	Choix du type de maillage .....	29
3.1.6.	Maillage d'une surface.....	30
3.1.7.	Maillage multi-domaine.....	31
3.1.8.	Maillage par interfaces.....	32
3.2.	Couche limite et Emplacement du premier point de la grille.....	32
3.3.	Géométrie et conditions aux limites(CL) .....	34
3.3.1.	Schémas de discrétisations.....	36
3.3.2.	Méthodes d'interpolation de la pression sur les faces.....	36
3.3.3.	Algorithme de couplage vitesse-pression .....	37
3.3.4.	Approches numériques et modèles de turbulence.....	37
3.3.5.	Coefficients de relaxations.....	38
3.3.6.	Mise en œuvre du calcul .....	39
3.3.7.	Choix de la configuration et de la résolution de la grille .....	39
3.4.	Méthodes de volumes finis.....	41
3.4.1.	Procédure de résolution.....	41
3.5.	Formulation mathématique.....	42
<b>4.</b>	<b>Résultats et discussions .....</b>	<b>45</b>
4.1.1.	Étude de la stabilité du maillage .....	45
4.2.	Structure de l'écoulement sans contrôle.....	46
4.3.	Écoulement moyen instantané sans contrôle.....	48
4.3.1.	Structure de l'écoulement .....	48
4.4.	Evolution temporelle du Coefficient de traînée .....	50
4.5.	Champ instantané de vortacité .....	51
4.6.	Evolution des pressions statiques :.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
4.7.	Caractérisation fréquentielle du sillage .....	53
4.8.	Écoulement avec contrôle .....	55
4.8.1.	Contrôle sur la lunette arrière : .....	56
4.8.2.	contrôle sur le culot :.....	58
4.8.3.	Contrôle sur la lunette arrière et le culot.....	59

# Table des matières

---

4.9. L'impact de la fréquence réduite sur l'écoulement :.....	60
4.9.1. Contrôle sur la lunette arrière.....	61
.....	61
4.9.2. Contrôle sur le culot.....	61
4.9.3. Contrôle sur la lunette arrière et le culot.....	62
4.10. Distribution de coefficient de pression CP .....	63
4.10.1. Contrôle sur la lunette arrière.....	63
4.10.2. Contrôle sur le culot .....	64
4.10.3. Contrôle sur la lunette et le culot.....	65
4.11. Caractérisation fréquentielle du sillage .....	66
.....	66

## Conclusion générale

## Bibliographies

# Liste des figures

---

Figure 1. 1: Représentation schématique simplifiée des efforts aérodynamiques .....	4
Figure 1. 2: Structures tourbillonnaires longitudinales sur une Logan mettant en évidence les sources de traînée [4] .....	5
Figure 1. 3: Bilan intégral de quantité de mouvement d'après Gilliéron [5] .....	6
Figure 1. 4: Les trois types de géométries automobiles (Ahmed et Baumert [7]) .....	7
Figure 1. 5: Lignes de courant de l'écoulement dans le plan médian d'un véhicule de type bicorps en fonction de l'angle d'inclinaison $\alpha$ (Ahmed [3]) .....	8
Figure 1. 6: formation des tourbillons de bords sur le bord (a) de la lunette arrière et (b) du pare-brise pour un véhicule de type bi-corps (Scibor-Rylski [10]) .....	8
Figure 1. 7: Modélisation du corps d'Ahmed. (a) Dimensions en mm. (b) Topologie de l'écoulement pour un angle sous-critique $25^\circ$ (gauche) et sur-critique $35^\circ$ (droite) (Menter & Kuntz (2004)). [11] .....	10
Figure 1. 8: (a) Visualisation du décollement avant en canal hydraulique avec un plan laser situé sur le plan de symétrie longitudinal, (b) Tomographie laser relevée dans un plan horizontal situé à 3.10-3 m au dessus du pavillon. Vue du dessus de la maquette (c) Vi .....	11
Figure 1. 9: Influence de l'angle de lunette arrière sur la traînée, d'après Ahmed [3]. .....	12
Figure 1. 10: a) Visualisation de la zone décollée dans le plan longitudinal médian .....	13
Figure 1. 11: b) Visualisation des structures tourbillonnaires transversales au culot du corps de Ahmed, dans le plan longitudinal médian (plan laser) [1] .....	13
Figure 1. 12: c) Visualisation de la structure tourbillonnaire longitudinale sur l'arête latérale gauche de la lunette arrière (vue de $\frac{3}{4}$ arrière) [1] .....	13
Figure 1. 13: a) Lignes de courant colorées par la vitesse longitudinale. b) Champs de vitesse dans les plans (y,z) colorés par la pression [13] .....	14
Figure 1. 14: Visualisation des champs de vitesse mesurés (à gauche) et calculés (à droite). .....	14
Figure 1. 15: a) Isosurfaces de critère Q à 20 et lignes de courant[14] .....	15
Figure 1. 16: b) Lignes de courant [14] .....	15
Figure 1. 17: c) Isocontours de pression et lignes de courant sur les plans longitudinaux pour différentes valeurs de Y. Le plan médian est à $Y=0$ [14] .....	16
Figure 2. 1: Classification basée sur l'énergie utilisée .....	17
Figure 2. 2: Générateur de vortex passif type tabs, installés sur Stewart Headwind [15] .....	18
Figure 2. 3: Contrôle aérodynamique de la couche limite par aspiration [15] .....	20
Figure 2. 4: Contrôle de la couche limite par soufflage tangentiel [15] .....	20
Figure 2. 5: Coupe d'un jet synthétique dans un fluide au repos (image tirée de Glezer & Amitay [16]) .....	22

# Liste des figures

---

Figure 2. 6: Les positions de jet synthétique : (a) sur la lunette arrière, (b) sur le culot et (c) sur la lunette arrière et le culot.....	26
Figure 3. 1: Étapes à suivre pour construire un modèle numérique.....	27
Figure 3. 2: Menu de géométrie .....	28
Figure 3. 3: Menu de Maillage [20] .....	28
Figure 3. 4: Type de maillage .....	29
Figure 3. 5: Grille obtenue par un schéma Pave. Figure III.5.b : Grille obtenue par un schéma Map. ....	31
Figure 3. 6: Grille obtenue par un maillage multi-domaines. ....	31
Figure 3. 7: Grille obtenue par un maillage multi-domaines en utilisant une interface (sur la droite). ....	32
Figure 3. 8: Représentation de la couche limite turbulente en proche paroi turbulente.....	33
Figure 3. 9: Profil de vitesse pour un écoulement turbulent [22] .....	33
Figure 3. 10: Traitements près des parois .....	34
Figure 3. 11: La géométrie considérée et les conditions aux limites .....	35
Figure 3. 12: Modèles de turbulence sous Fluent. ....	38
Figure 3. 13: Technique des interfaces .....	40
Figure 3. 14: Champ de vorticité au niveau des interfaces. ....	40
Figure 3. 15: Qualité du maillage près des parois.....	41
Figure 4. 1: Stabilité du maillage et l'évolution de coefficient de trainée .....	46
Figure 4. 2: Champs de vitesse et les lignes de courant.....	46
Figure 4. 3: Structure de l'écoulement simulation numérique (DES).....	47
Figure 4. 4: Résultat expérimentale Structure obtenue en PIV [27] .....	47
Figure 4. 5: Structure obtenue par Guilmineau [28] .....	48
Figure 4. 6: La vitesse moyenne et lignes de courant dans le sillage sans contrôle au cours du temps a=0.27s, b=0.5s, c=0.8s, d=1s, e=1.5, f=2s.....	49
Figure 4. 7: Convergence du champ moyen .....	50
Figure 4. 8: Evolution temporelle du coefficient de traîné lors de la simulation.....	50
Figure 4. 9: Champ de vorticité instantané .....	51
Figure 4. 10: Distributions de CP sur la lunette arrière .....	53
Figure 4. 11: Distributions de CP sur la lunette arrière .....	53

## Liste des figures

---

Figure 4. 12: Densités Spectrales de Puissance (DSP) normé du signal de traînée sans contrôle. ....	54
Figure 4. 13: Position des fentes sur la géométrie .....	55
Figure 4. 14: Vitesse moyenne et lignes de courant dans le sillage avec et sans contrôle sur la lunette arrière .....	56
Figure 4. 15: Structure de l'écoulement contrôle sur le culot. ....	58
Figure 4. 16: Structure de l'écoulement contrôle sur la lunette et le culot .....	59
Figure 4. 17: Variation de coefficient de traînée en fonction de la fréquence réduite.....	61
Figure 4. 18: Variation de coefficient de traînée en fonction de la fréquence réduite.....	62
Figure 4. 19: Variation de coefficient de traînée en fonction de la fréquence réduite.....	62
Figure 4. 20: Distributions de $C_p$ en aval de la géométrie simplifiée sans et avec contrôle .....	63
Figure 4. 21: Distributions de $C_p$ en aval de la géométrie simplifiée sans et avec contrôle. ....	64
Figure 4. 22: Distributions de $C_p$ en aval de la géométrie simplifiée sans et avec contrôle .....	65
Figure 4. 23: Densités Spectrales de Puissance (DSP) normé du signal de traînée avec contrôle sur la fente a.....	66
Figure 4. 24: Densités Spectrales de Puissance (DSP) normé du signal de traînée avec contrôle sur la fente b.....	67
Figure 4. 25: Densités Spectrales de Puissance (DSP) normé du signal de traînée avec contrôle sur la fente c.....	68

## Liste des tableaux

---

Tableau 3. 1: Schémas de génération des cellules. ....	31
Tableau 3. 2: Dimensions de la veine numérique et conditions aux limites. ....	35
Tableau 3. 3: Approches numériques.....	37
Tableau 3. 4: Coefficients de sous-relaxation.....	39
Tableau 3. 5: Les schémas considérés. ....	39
Tableau 4. 1: Choix du maillage approprié.....	45
Tableau 4. 2: Caractéristique du sillage .....	57
Tableau 4. 3: Caractéristique du sillage .....	60

# Nomenclature

---

Symbole	Désignation	Unité en S.I
$\alpha$	Angle	rad
$\Delta t$	Pas temporel	s
$\delta$	Épaisseur de la couche limite	m
$\mu$	Viscosité dynamique du fluide	Kg/m.s
$\nu$	Viscosité cinématique du fluide	m <sup>2</sup> /s
$\rho$	Masse volumique du fluide	Kg/m <sup>3</sup>
$\tau$	Contrainte de cisaillement	Pa
$\omega$	Vorticité	1/s

## ABREVIATIONS

Abréviation	Signification
RANS	Reynolds Average Navier-Stocks equations
LES	Large Eddy Simulation
DNS	Direct Numecal Simulation
CCFA	Comité des Constructeurs Français d'Automobiles
DES	Detached Eddy Simulation

# Nomenclature

---

## Notations

Symbole	Désignation	Unité en SI
Cd	Coefficient de traînée moyen	
Cf	Coefficient de frottement	
Cd	Coefficient de traînée aérodynamique	
Cp	Coefficient de pression statique	
C $\mu$	Coefficient de quantité de mouvement du jet synthétique	
fj	Fréquence d'excitation du JS	[Hz]
fm	Fréquence de modulation d'amplitude du signal A(t)	[Hz]
Fa	Résultante des efforts aérodynamiques	[kg.m.s-2]
Ff	Résultante des efforts visqueux et turbulents	[kg.m.s-2] -2

## Introduction générale

---

Dans le contexte de limitation des consommations énergétiques et des émissions de particules de gaz à effet de serre des véhicules, la maîtrise de la résistance à l'avancement des véhicules constitue l'un des enjeux majeurs de la recherche appliquée à l'automobile.

Depuis quelques années, diverses études se sont intéressées à la réalisation de contrôles d'écoulement autour d'un modèle simplifié d'automobile, le corps de Ahmed, permettant ainsi de comparer les efficacités des différents dispositifs proposés. Cette géométrie, définie par Ahmed et al. [1], consiste en un corps épais.

Depuis les années 70, et les deux crises pétrolières de 1974 et 1979, Les différents constructeurs mondiaux ont ainsi cherché à optimiser la forme générale des voitures de façon à minimiser le coefficient de traînée aérodynamique. C'est le début de la « *course au Cx* ». Les transports restent les plus gros consommateurs de pétrole et une des cause majeurs de pollution, en effet, pendant que les émissions industrielles montrent une tendance décroissante, celles des transports augmentent, et ceci malgré les progrès obtenus par la recherche automobile et les réglementations très strictes imposées aux constructeurs. Nombre de décisions précédemment prises en matière de transport ont eu des répercussions sur la qualité de l'air. Peut être citée en exemple la diminution de la teneur en plomb de l'atmosphère urbaine depuis la réglementation de mars 1985. dans la continuité, la réglementation concernant les émissions de CO<sub>2</sub> devrait être fixée à 120 g/km pour 2015 et à 90g/km pour 2018 sur le cycle NEDC (New European driving Cycle : cycle supposé représenter l'utilisation type d'une automobile en Europe [2]).

Les performances aérodynamiques d'un véhicule en mouvement dans l'air sont essentiellement données par sa forme générale. Celle-ci conditionne l'écoulement de l'air et les répartitions de pression sur la paroi. La modification de la forme globale extérieure du véhicule avec notamment le profilage a dans un premier temps permis de réduire la traînée aérodynamique en se rapprochant d'une géométrie de profil d'aile : pare-brise avant moins incliné par rapport à l'horizontale, lunette arrière avec un angle faible ou culot de faible hauteur. Ces modifications ont permis de faire chuter le coefficient de traînée C<sub>x</sub> de 0.45 à 0.30, en moyenne, entre 1970 et 1990. Dans les années 70, les véhicules ont généralement une forme anguleuse.

Le coefficient de traînée résultant est de 0,40 à 0,45 en moyenne. Il gagne 5 points (C<sub>x</sub>=0,35) durant les années 80 avec des lignes beaucoup plus arrondie. La barre des 0,30 est dépassée à la fin des années 80, mais les C<sub>x</sub> se stabilisent autour de 0,32 à 0,35 dans les années 90. Depuis une décennie, la tendance s'est inversée et le coefficient moyen de traînée ne cesse de croître, sacrifié

## Introduction générale

---

aux nouveaux arguments de vente porteurs : le style et l'espace intérieur. La tendance actuelle qui fait la part belle aux véhicules spacieux type monospace, augmente le maître couple des automobiles et donc la traînée. Dans ce contexte, l'objectif des constructeurs automobiles consiste à développer des systèmes permettant de modifier l'écoulement de l'air et donc les performances aérodynamiques du véhicule sans être trop contraignant quant à sa géométrie globale.

Les interactions entre aérodynamique et style ont cependant un impact fort sur l'image que perçoit le client de la marque. Les systèmes de contrôle doivent donc être discret et performant, ce qui limite l'usage de systèmes type aileron ou spoiler, développés par l'aéronautique et déjà largement utilisés en automobile.

L'objectif du présent travail, concerne la réalisation de contrôles d'écoulement autour d'un modèle simplifié d'automobile, le corps de Ahmed et la recherche de solutions de contrôle à même de réduire la traînée aérodynamique du modèle, c'est-à-dire la consommation du fuel et la mise au point de solutions capables de réduire les émissions de gaz à effet de serre, conformément aux réglementations internationales.

D'un point de vue aérodynamique, il s'agit de réduire la traînée aérodynamique, c'est-à-dire la force appliquée par le fluide sur le véhicule en mouvement, dans la direction longitudinale. Cet effort est principalement associé au développement sur le véhicule de couches limites décollées et de structures tourbillonnaires. En particulier, les décollements qui se développent au niveau des ruptures de pente ou des cavités de la géométrie modifient les répartitions de pression à la paroi de façon significative et les structures tourbillonnaires qui se forment sont le siège de pertes d'énergie volumique importantes liées à la rotation du fluide. Le but du contrôle est donc de réduire, voire de supprimer le développement de ces structures et/ou de repousser les décollements.

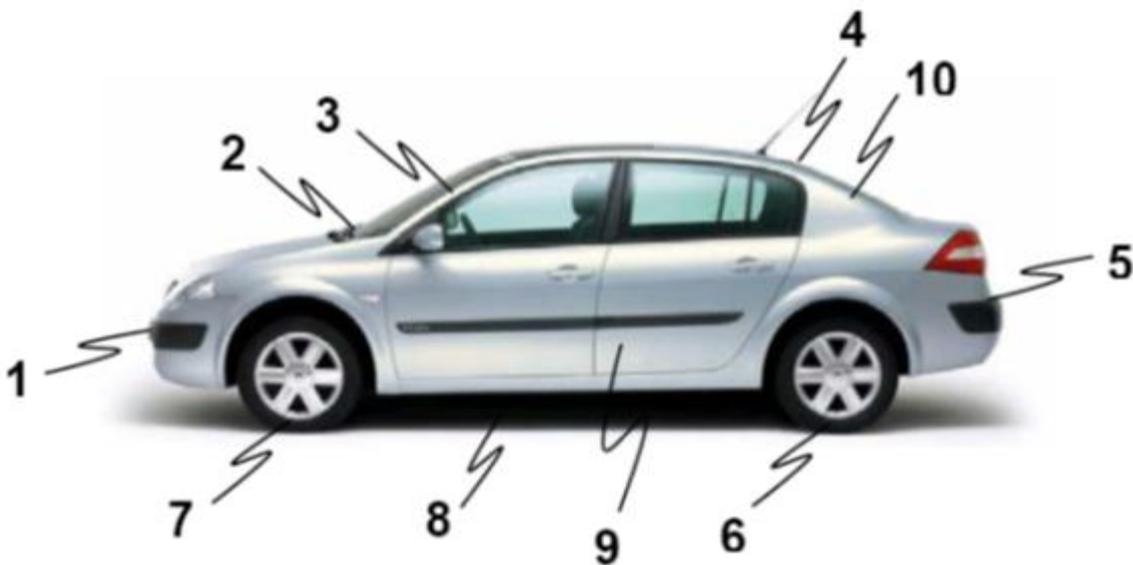
L'écoulement qui se développe autour d'un véhicule automobile est pleinement turbulent et tridimensionnel ; le faible allongement de la géométrie ne permet en effet pas de négliger les effets de bord. Le design du véhicule participe de façon significative à la traînée : les ruptures de pentes et les différents appendices sont autant de sources de décollement qui influent directement sur la valeur de celle-ci (Figure1). Les ruptures de pentes au niveau de la calandre (zone 1), sur le bas et les montants latéraux du pare-brise (zone 2 et 3), dans le soubassement (zone 8), au niveau des roues (zone 6 et 7) ou des parois latérales (zone 9) provoquent l'apparition de structures tourbillonnaires qui viennent alimenter la traînée. De même, sur la partie arrière du véhicule, l'écoulement décolle au niveau de la lunette arrière (zone 4) et du culot (zone 5), et des structures

## Introduction générale

---

tourbillonnaires longitudinales se développent au niveau des arêtes latérales de lunette arrière (zone 10). Des écoulements secondaires internes au niveau du compartiment moteur et du soubassement participent également la traînée aérodynamique. Enfin, la rotation des roues provoquent l'apparition de structures tourbillonnaires interagissent avec l'écoulement de culot et participent aux pertes énergétiques dans le sillage.

Les nombreuses sources de perturbation et la nature même de l'écoulement rendent complexe l'analyse de la traînée aérodynamique. Afin d'identifier puis d'analyser les principales structures tourbillonnaires qui contribuent à son développement, dans un objectif de contrôle, la topologie de l'écoulement est étudiée sur une géométrie simplifiée (corps de Ahmed [3]). Cette géométrie permet de conserver la dynamique générale de l'écoulement tout en isolant chacune des structures tourbillonnaires impliquées dans la traînée aérodynamique. De même, l'expression de la traînée est simplifiée afin de mettre en évidence les principales sources de pertes d'énergie.



**Figure 1:** Ecoulement autour de l'automobile : différentes zones de participation à la traînée [1]

## 1. Etat de l'art

### 1.1. Etat de l'art au sein de l'environnement aérodynamique automobile

Aristote suscita l'idée de résistance du milieu et de l'existence de force aérodynamique que l'air applique sur un corps, Mariotte (relation de proportionnalité entre résistance aérodynamique et le carré de la vitesse du corps \_1673), Newton (seconde Loi, base des équations d'Euler et Navier stockes\_1987), D'Alembert (un fluide non-visqueux impose une résistance nulle -1744), Navier stockes (équations éponymes\_1840) ont apporté leur pierre à la compréhension de ces forces et à l'avancée de l'aérodynamique [ande97].

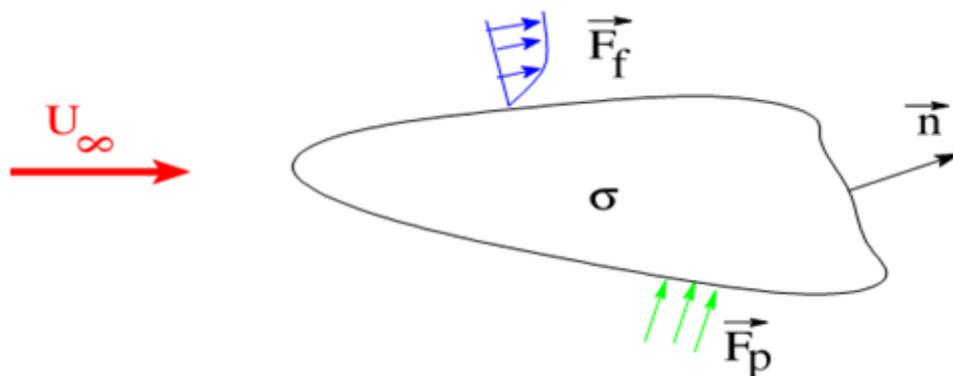
Depuis que les notions aérodynamiques ont bien été maîtrisées, parvenir à contrôler les écoulements afin de bénéficier de réduction de forces aérodynamiques est un enjeu important.

### 1.2. Aérodynamique automobile

#### 1.2.1. Coefficients de trainée

L'effort exercé par l'écoulement sur la géométrie peut être décomposé en un effort de trainée  $F_x$  dans la direction longitudinale, un effort de portance  $F_z$  selon la direction verticale et un effort latéral  $F_y$  dans la direction transversale :

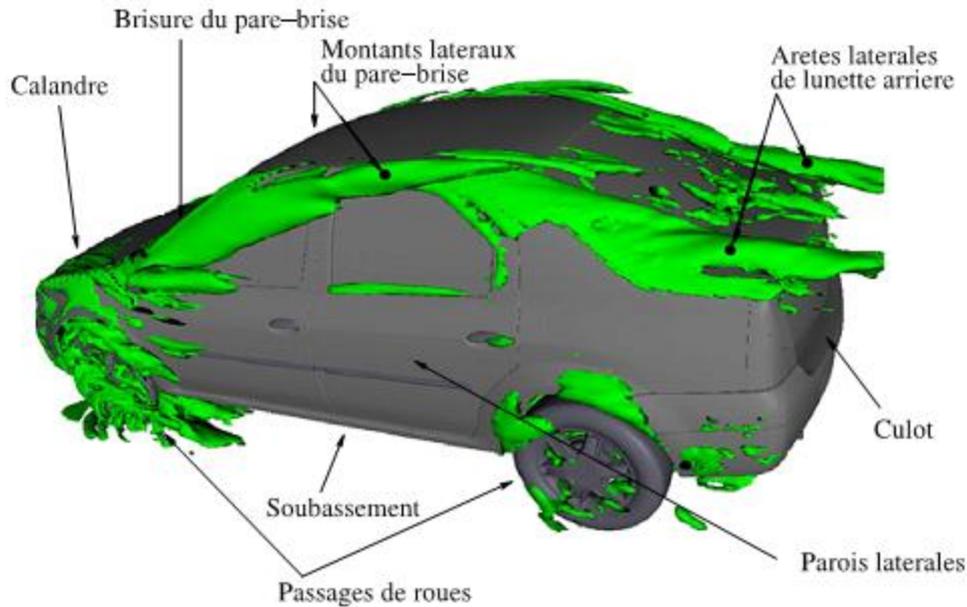
$$\vec{F}_{\text{fluide} \rightarrow \text{géométrie}} = F_x \vec{X} + F_y \vec{Y} + F_z \vec{Z} \quad 1.1$$



**Figure 1. 1:** Représentation schématique simplifiée des efforts aérodynamiques

L'écoulement autour d'une automobile est très complexe en raison de sa géométrie découpée, et du caractère chaotique des phénomènes de turbulence autour du véhicule, l'écoulement est ainsi formé de nombreuses structures décollées et nappes tourbillonnaires qui sont à l'origine de la force de trainée.

Dans l'exemple de Logan de la figure suivante, les différentes structures caractéristiques de l'écoulement autour d'une automobile et les sources de la trainée sont mises en évidence.



**Figure 1. 2:** Structures tourbillonnaires longitudinales sur une Logan mettant en évidence les sources de traînée [4]

La portance et les efforts latéraux interviennent dans la stabilité du véhicule, la traînée est directement liée à sa consommation et aux différentes émissions de gaz polluants et/ou de gaz à effet de serre. Dans la présente étude, l'objectif est de réduire la traînée et seule cette composante de l'effort est étudiée. L'expression de la traînée est alors donnée par l'intégrale des efforts de pression, du tenseur de viscosité et du tenseur des contraintes de Reynolds (tenseur des efforts de turbulence) sur la géométrie considérée selon la relation :

$$F_x = \left( \iint_{S_c} (P \cdot \vec{n} \cdot d\sigma) - \iint_{S_c} (\bar{\tau} + \bar{\tau}_t) \cdot \vec{n} \cdot d\sigma \right) \cdot \vec{X} \quad 1.2$$

Où  $S_c$  représente la surface de la géométrie,  $n$  la normale sortante à la surface  $S_c$ ,  $P$  la pression statique,  $\bar{\tau}$  le tenseur des contraintes de turbulence et  $\tau$  le tenseur des contraintes visqueuses. Le coefficient de traînée, obtenu en adimensionnant l'effort de traînée est alors donné par :

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho V_0^2 \Sigma} \quad 1.3$$

Où  $V_0$  représente la vitesse infinie amont de l'écoulement et  $\Sigma$  le maître couple, soit la section transversale de la géométrie dans le cas considéré ici.

L'expression de la traînée est obtenue par un bilan intégral de quantité de mouvement, effectué sur un tube de courant englobant le véhicule (Figure 2.8). Les effets de turbulence, de

viscosité et de pesanteur sont négligés devant les actions mécaniques de pression (la mise en place de l'équation) :

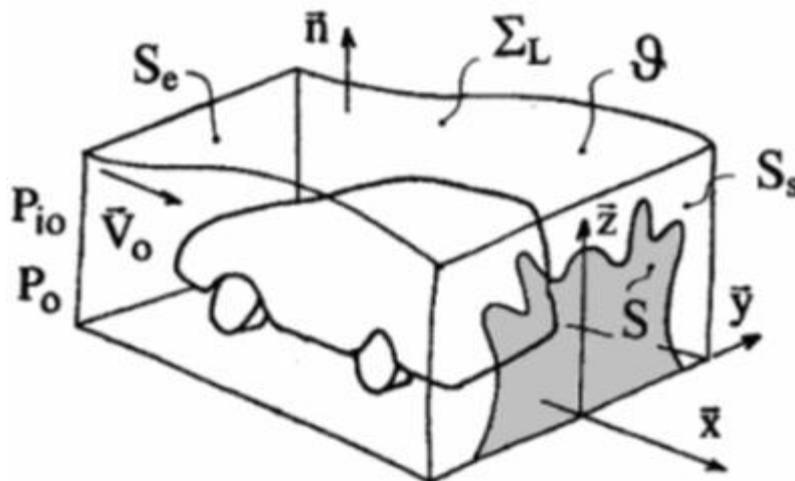
$$F_X = \underbrace{\int_S (P_{i0} - P_i) d\sigma}_a + \frac{\rho V_0^2}{2} \underbrace{\int_S \left( \frac{V_y^2}{V_0^2} + \frac{V_z^2}{V_0^2} \right) d\sigma}_b - \frac{\rho V_0^2}{2} \underbrace{\int_S \left( 1 - \frac{V_x}{V_0} \right)^2 d\sigma}_c \quad 1.4$$

Avec  $P_{i0}$  et  $V_0$  représentant respectivement la pression totale et la vitesse de l'écoulement amont,  $V_x$ ,  $V_y$  et  $V_z$  les composantes de la vitesse  $V$  relevée en un point  $M$  de la section  $S$  de sillage et  $P_i$  la pression totale en ce point.

Le terme (a) fait intervenir des pertes de pression totale amont/aval et traduit la traînée induite par la formation et l'entretien des structures tourbillonnaires dans le sillage. Sa contribution dans la traînée totale est principalement associée aux structures décollées, aux tourbillons longitudinaux (T1 et T2) et à la structure tourbillonnaire torique sur le culot.

Le terme (b) représente l'énergie cinétique du mouvement de rotation de fluide dans un plan transversal. Elle traduit ainsi les pertes énergétiques associées au mouvement de rotation dans les structures longitudinales (T1 et T2).

Enfin, le terme (c) représente la traînée associée à la perte de vitesse longitudinale dans le sillage proche. L'intégrale tend rapidement vers 0 au voisinage du culot:  $V_x=V_0$  pour  $x=1,5H$  où  $x$  représente la distance en aval du culot et  $H$  la hauteur de la géométrie.

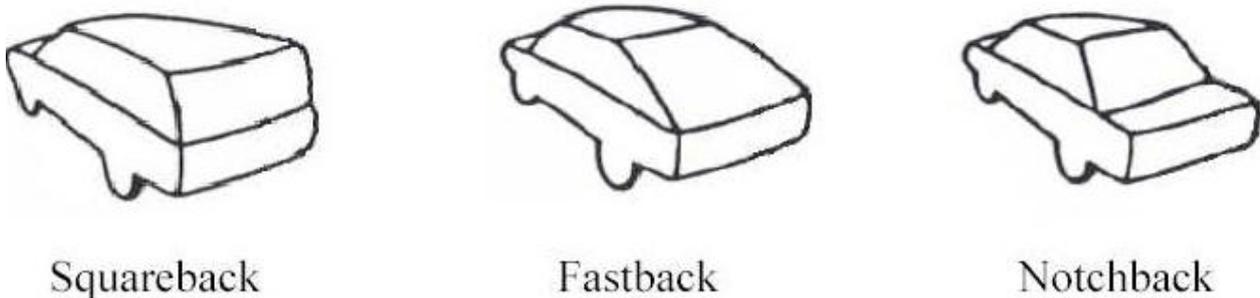


**Figure 1. 3:** Bilan intégral de quantité de mouvement d'après Gilliéron [5]

### 1.3. Écoulements caractéristiques

L'écoulement autour d'un véhicule automobile réel est très complexe, parfois décollé et souvent fortement tridimensionnel. Depuis les travaux de pionniers de Janssen et Hucho [6], de

nombreux travaux ont été consacrés aux sillages. Comme le montre la figure 1-1, on considère généralement trois types de géométrie: le véhicule uni-corps "squareback", le véhicule bi-corps "fastback" et véhicule tri-corps "notchback", Ahmed et Baumert [7].



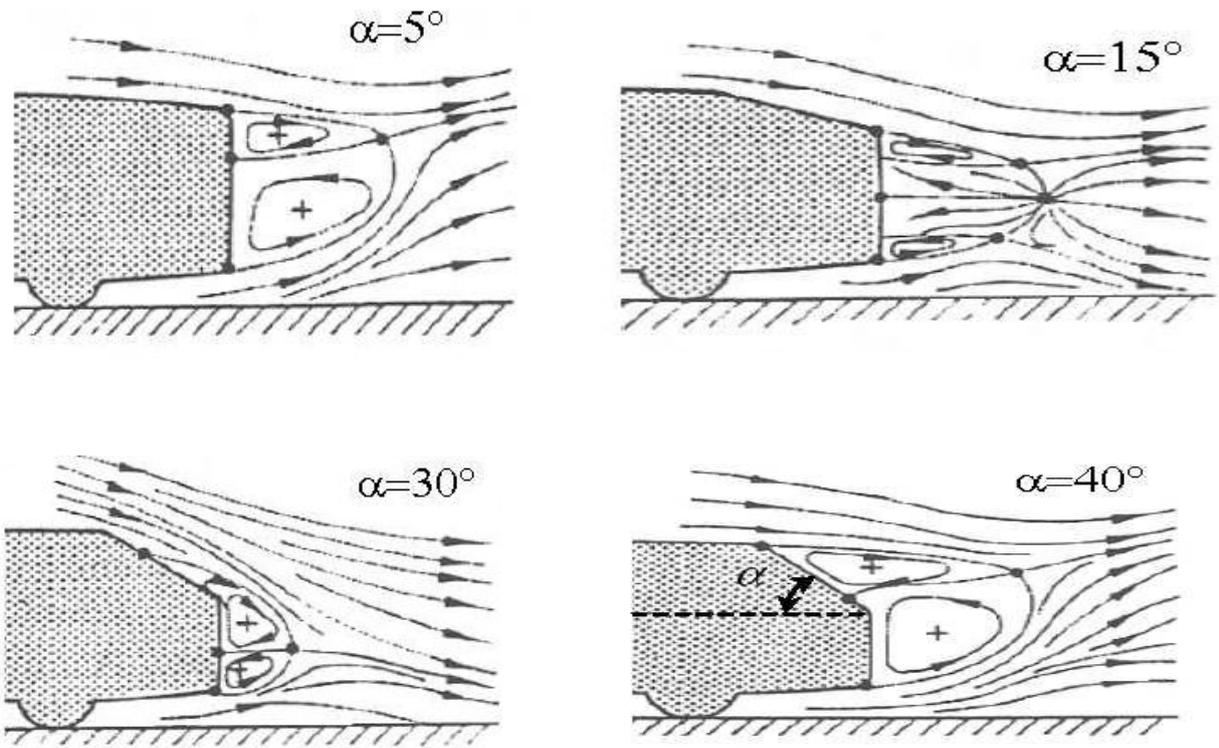
**Figure 1. 4:** Les trois types de géométries automobiles (Ahmed et Baumert [7])

présente les lignes de courant dans le plan médian de ce type de véhicule pour les quatre angles d'inclinaison suivants: (a)  $\alpha = 5^\circ$ , (b)  $\alpha = 15^\circ$ , (c)  $\alpha = 30^\circ$  et (d)  $\alpha = 40^\circ$ .

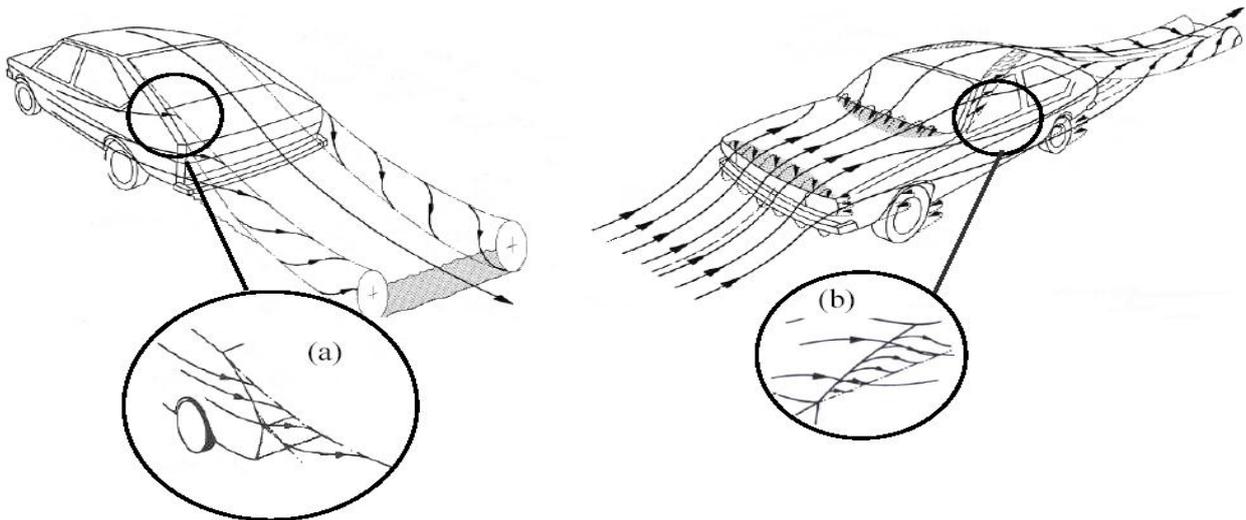
L'écoulement est caractérisé par une zone de recirculation de forme torique dans les quatre configurations. Pour les deux premiers angles d'inclinaison  $\alpha = 5^\circ$  et  $15^\circ$ , le fluide ne décolle pas de la lunette arrière et la structure tourbillonnaire s'appuie sur la périphérie du culot. Pour les angles  $\alpha = 30^\circ$  et  $40^\circ$ , on constate un décollement de l'écoulement sur la surface inclinée qui s'amplifie à mesure que l'angle  $\alpha$  augmente. A  $\alpha = 40^\circ$ , la zone de recirculation s'étend du culot jusqu'au bord supérieur de la surface inclinée.

La seconde particularité de l'écoulement autour d'un véhicule automobile est la formation dans certains cas d'une paire de vortex longitudinaux contrarotatifs prenant naissance sur les bords de la lunette arrière. La figure 1-4(a) présente à titre d'exemple la formation d'un tourbillon de bord au niveau de l'arête du hayon pour un véhicule de type bi-corps. On constate également dans certaines circonstances la formation de vortex longitudinaux contrarotatifs issus des bords latéraux du pare-brise, comme le montre la figure 1-4(b).

Toutefois, ces seconds tourbillons de bords sont beaucoup moins énergétiques et plus petits que ceux issus des bords de la lunette arrière. La formation de ces deux types de vortex longitudinaux dépendent principalement des valeurs de l'angle d'inclinaison de la lunette arrière et du pare-brise.



**Figure 1. 5:** Lignes de courant de l'écoulement dans le plan médian d'un véhicule de type bicorps en fonction de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  (Ahmed [3])



**Figure 1. 6:** formation des tourbillons de bords sur le bord (a) de la lunette arrière et (b) du pare-brise pour un véhicule de type bi-corps (Scibor-Rylski [10])

### 1.4. Ecoulement autour du corps d'Ahmed

#### 1.4.1. Structure de l'écoulement

L'écoulement autour du corps d'Ahmed (FIG.1.5a) présente un intérêt pour l'industrie automobile et constitue un test délicat pour la qualification des méthodes numériques dans leur capacité à décrire des écoulements complexes. Au-dessus de l'angle critique, l'écoulement sur la lunette arrière devient tridimensionnel. Ahmed et al ont observé que l'écoulement décolle puis recolle sur la partie centrale de la paroi inclinée.

Ahmed & al (1984) ont notamment déterminé pour leur modèle un angle critique d'inclinaison ( $30^\circ$ ) de la lunette arrière au voisinage duquel le sillage turbulent présente une topologie complexe entraînant de fortes instationnarités liées à l'interaction de zones de recirculation et de zones tourbillonnaires (FIG.1.5b).

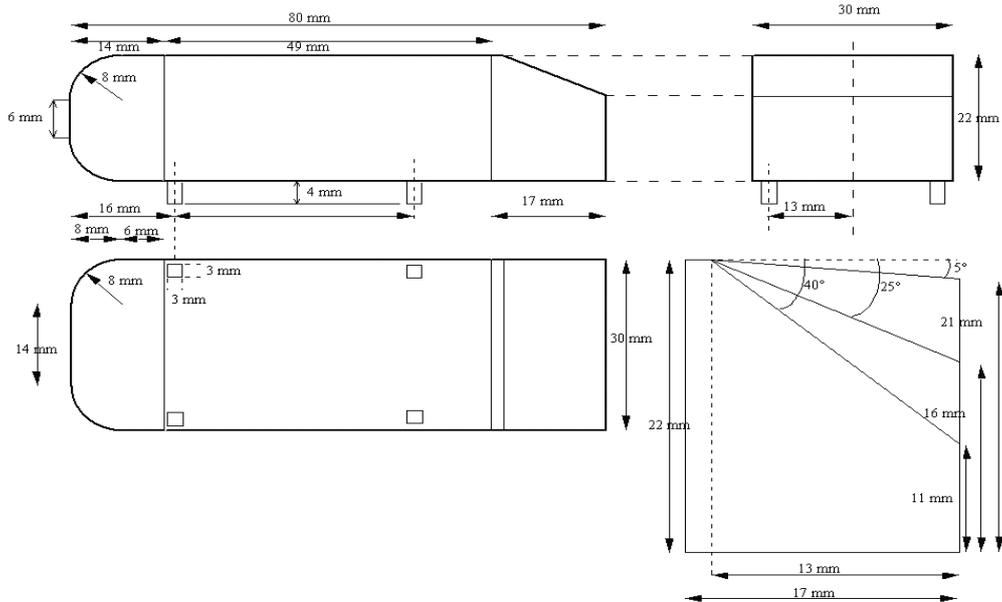
Il est connu depuis longtemps que la forme d'un obstacle placé près du sol détermine son comportement aérodynamique. Une amélioration des propriétés aérodynamiques par modification de la forme de cet obstacle requiert alors une compréhension poussée des phénomènes turbulents mis en jeu dans l'écoulement. Dans le cadre de l'aérodynamique automobile, les méthodes expérimentales ont par le passé principalement été mises en place compte tenu de l'incapacité des méthodes CFD à produire des résultats fiables sur des écoulements décollés et instationnaires. Au lieu d'utiliser des maquettes de véhicules réels, les études se focalisent sur des géométries simplifiées de manière à décorrélérer les phénomènes physiques intervenant dans l'écoulement.

La principale de ces géométries simplifiées est le corps d'AHMED issue de l'étude pionnière dont l'objectif était de montrer l'influence de l'angle de la lunette arrière du véhicule sur la topologie de l'écoulement. Le corps d'Ahmed est une géométrie quasi rectangulaire dont la partie frontale est légèrement arrondie et dont l'arrière possède un angle de manière à simuler la lunette arrière d'un véhicule.

Un aspect important concernant le corps d'Ahmed est que la topologie de l'écoulement est principalement gouvernée par l'angle que réalise la lunette arrière avec l'horizontale. Par ailleurs, il convient d'ajouter que les topologies observées sont identiques pour un angle de  $0^\circ$  et pour un angle de  $90^\circ$ . Des désaccords significatifs entre approches statistiques (RANS) (Gilliérion & Chometon (1999), Durand & al (2002)), Simulations des Grandes Echelles (LES) (Hinterberger & al (2004), Krajnovic & al (2004)) ou encore par approche Lagrangienne (Fares (2006)) pour un angle de  $25^\circ$  et pour  $Re = 768000$  (Benchmark ERCOFTAC/IAHR/COST Workshop on Refined Turbulence

## Etat de l'art

Modeling Cas 9.4 et benchmark DFG/CNRS), notamment pour les profils d'énergie cinétique turbulente en proche paroi et dans la prédiction d'un détachement partiel sur la lunette arrière.

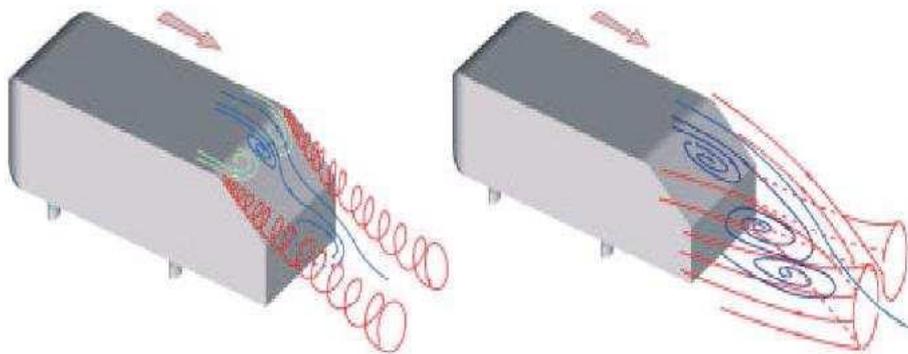
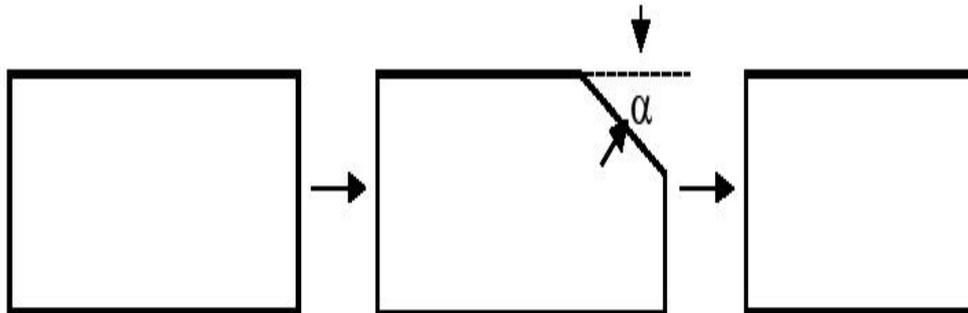


a)

$\alpha = 0^\circ$

$\alpha = 45^\circ$

$\alpha = 90^\circ$



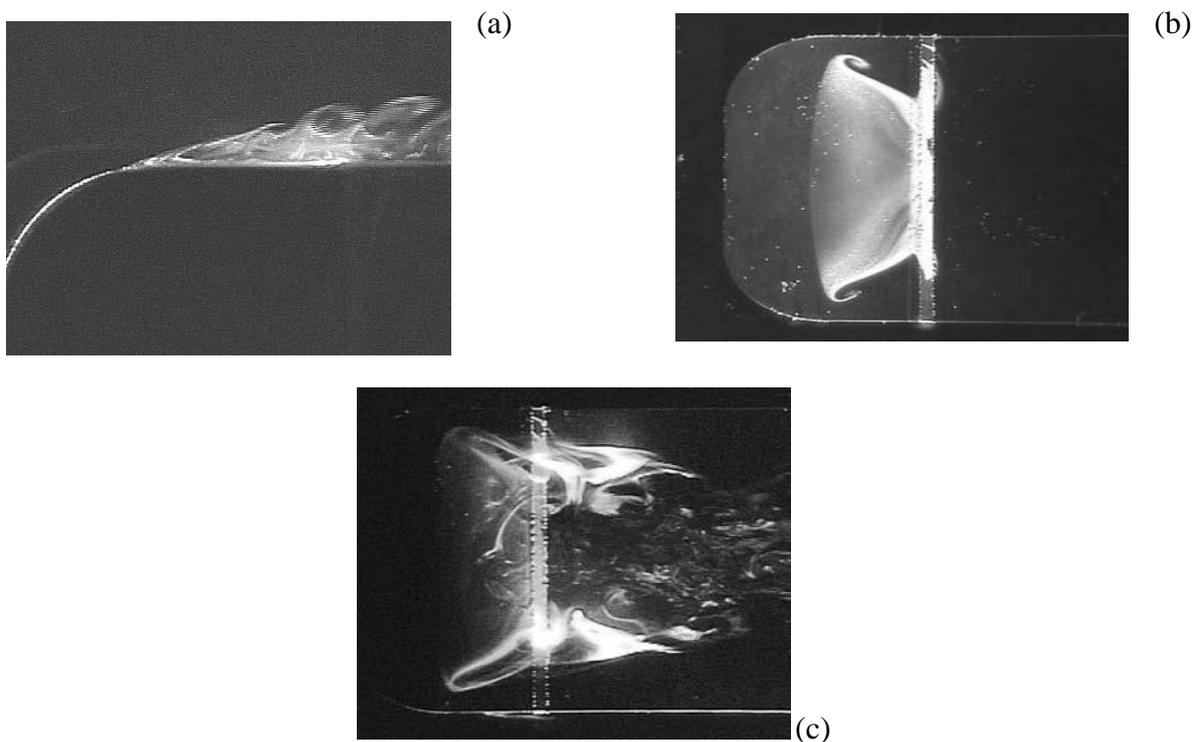
b)

**Figure 1. 7:** Modélisation du corps d'Ahmed. (a) Dimensions en mm. (b) Topologie de l'écoulement pour un angle sous-critique  $25^\circ$  (gauche) et sur-critique  $35^\circ$  (droite) (Menter & Kuntz (2004)). [11]

### 1.4.2. Structure à l'avant du corps de Ahmed

L'écoulement sur la partie avant du corps de Ahmed à partir de tomographies et de visualisations pariétales. Un décollement apparaît à 8% de la longueur  $L$  de la géométrie (Figure 1.6.a). Le fluide situé sous la nappe décollée est animé d'un mouvement de rotation et du fluide remonte en direction de la ligne de séparation, ce qui entraîne un accroissement de la zone décollée dans les directions transversales et normales à la paroi. Le surplus de fluide est alors expulsé vers l'aval de façon périodique et le volume de la zone décollée oscille ainsi avec une fréquence de l'ordre de 15 Hz.

Ces oscillations donnent naissance à des structures tourbillonnaires de Kelvin-Helmoltz émises avec une fréquence haute de l'ordre de 200 Hz (Figure 1.6.a).

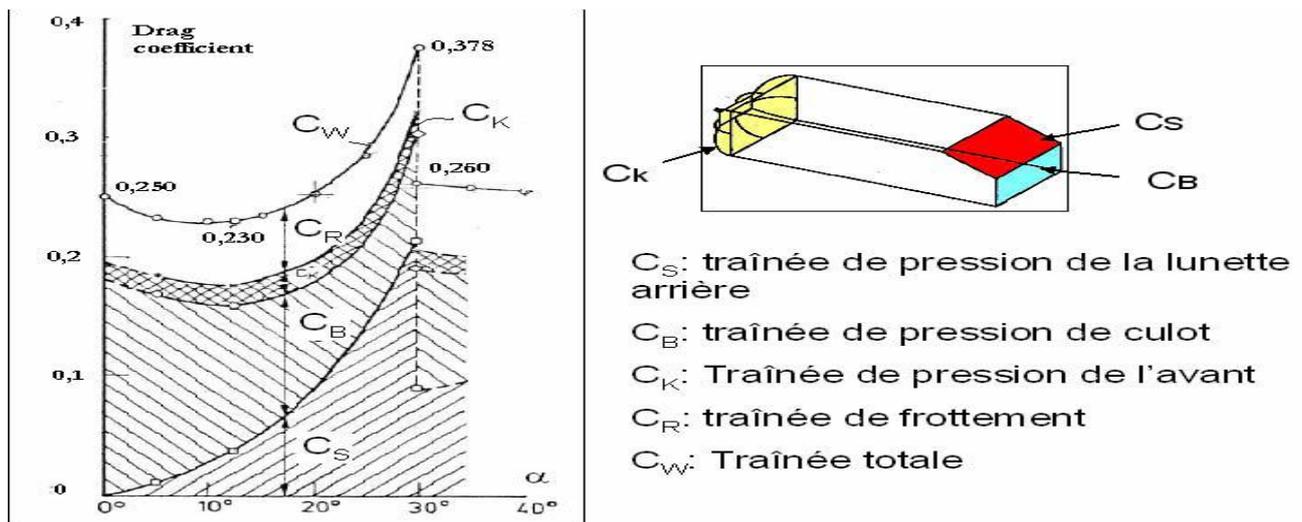


**Figure 1. 8:** (a) Visualisation du décollement avant en canal hydraulique avec un plan laser situé sur le plan de symétrie longitudinal, (b) Tomographie laser relevée dans un plan horizontal situé à 3.10-3 m au dessus du pavillon. Vue du dessus de la maquette (c) Vi

### 1.4.3. Structure à l'arrière du corps de Ahmed.

Ahmed *et al.* [Ahm84] étudie l'influence de l'inclinaison  $\alpha$  de la lunette arrière sur la topologie de l'écoulement et la traînée associée. L'évolution de la traînée de frottement et de la traînée de pression donnée Figure 1.7 indique que les effets de pression sont prépondérants devant les effets de frottement pour les applications automobiles [3]. La traînée de pression représente ainsi

70% de la traînée totale pour une inclinaison de la lunette arrière de  $10^\circ$  par rapport à l'horizontal (Figure 1.7). De même, la traînée de pression associée à la partie arrière de la géométrie est majoritaire. Les effets de pression sur la partie avant de la géométrie ne participent à la traînée de pression qu'à hauteur de 5% (relevée Figure 1.7 pour  $\alpha=10^\circ$  [Ahm84]). L'évolution de la traînée en fonction de l'inclinaison  $\alpha$  fait également apparaître deux inclinaisons singulières Figure 2.4 : la courbe de traînée présente un minimum pour une inclinaison de  $12^\circ$  puis une phase de croissance jusqu'à  $30^\circ$  où elle décroît brusquement. Cette variation dans la traînée est associée à une modification de la topologie de l'écoulement.



**Figure 1. 9:** Influence de l'angle de lunette arrière sur la traînée, d'après Ahmed [3].

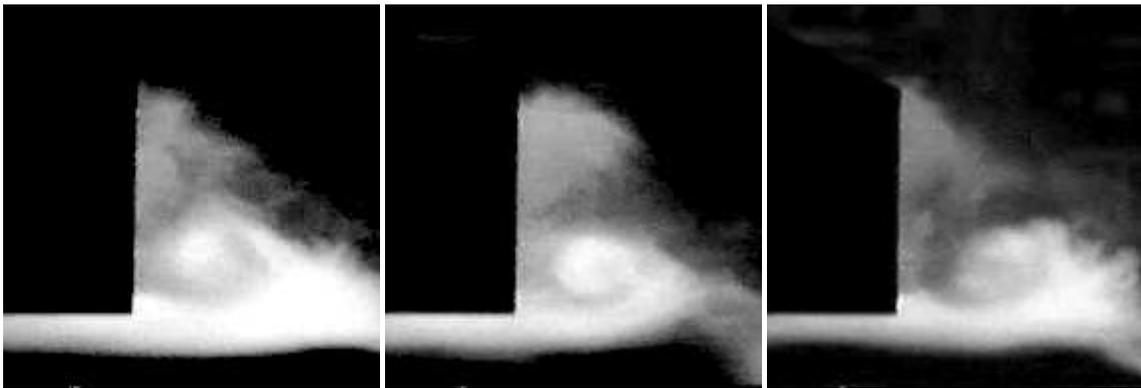
Les coefficients globaux de traînée et de portance étant essentiellement dépendant de la topologie de l'écoulement sur la partie arrière du corps, ces coefficients doivent alors être quasiment identiques pour des angles de lunette de  $0^\circ$  et  $90^\circ$ . La figure 1.6 montre la variation du coefficient de traînée en fonction de l'angle de la lunette.

### 1.5. Identification des structures tourbillonnaires

Les visualisations par fumée permettent de mettre en évidence les principales structures tourbillonnaires qui se développent sur la lunette arrière et le culot du corps de Ahmed. Un plan laser situé dans le plan longitudinal médian de la géométrie éclaire les particules provenant d'une canne à fumée située en amont de la géométrie. Pour des raisons pratiques, ces visualisations sont réalisées pour un écoulement incident de  $V_0=15$  m.s<sup>-1</sup>, associé à un nombre de Reynolds  $Re=730.000$  (calculé à partir de la longueur de la géométrie). Une caméra disposée perpendiculairement au plan laser permet d'enregistrer les images.



**Figure 1. 10: a)** Visualisation de la zone décollée dans le plan longitudinal médian



**Figure 1. 11: b)** Visualisation des structures tourbillonnaires transversales au culot du corps de Ahmed, dans le plan longitudinal médian (plan laser) [1]



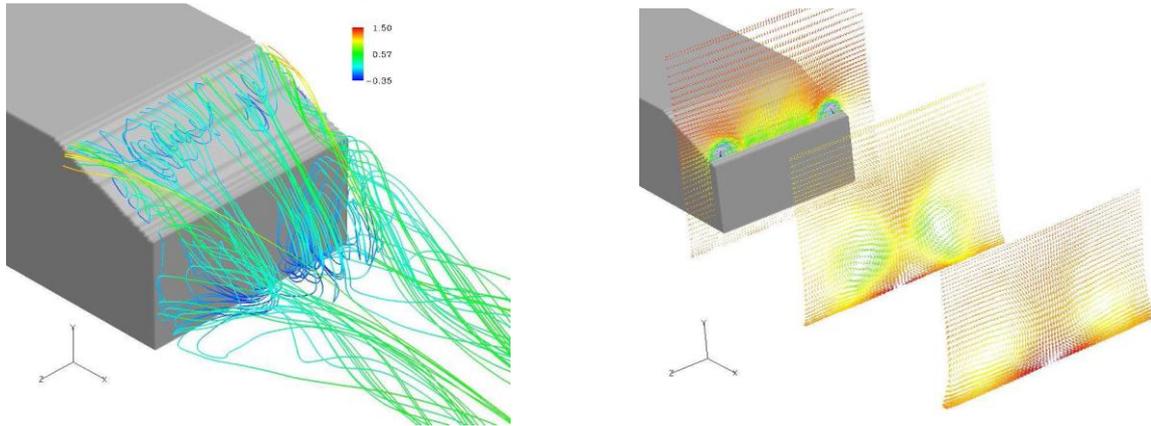
**Figure 1. 12: c)** Visualisation de la structure tourbillonnaire longitudinale sur l'arête latérale gauche de la lunette arrière (vue de  $\frac{3}{4}$  arrière) [1]

### 1.5.1. Résultats de simulation des grandes échelles de corps de ahmed

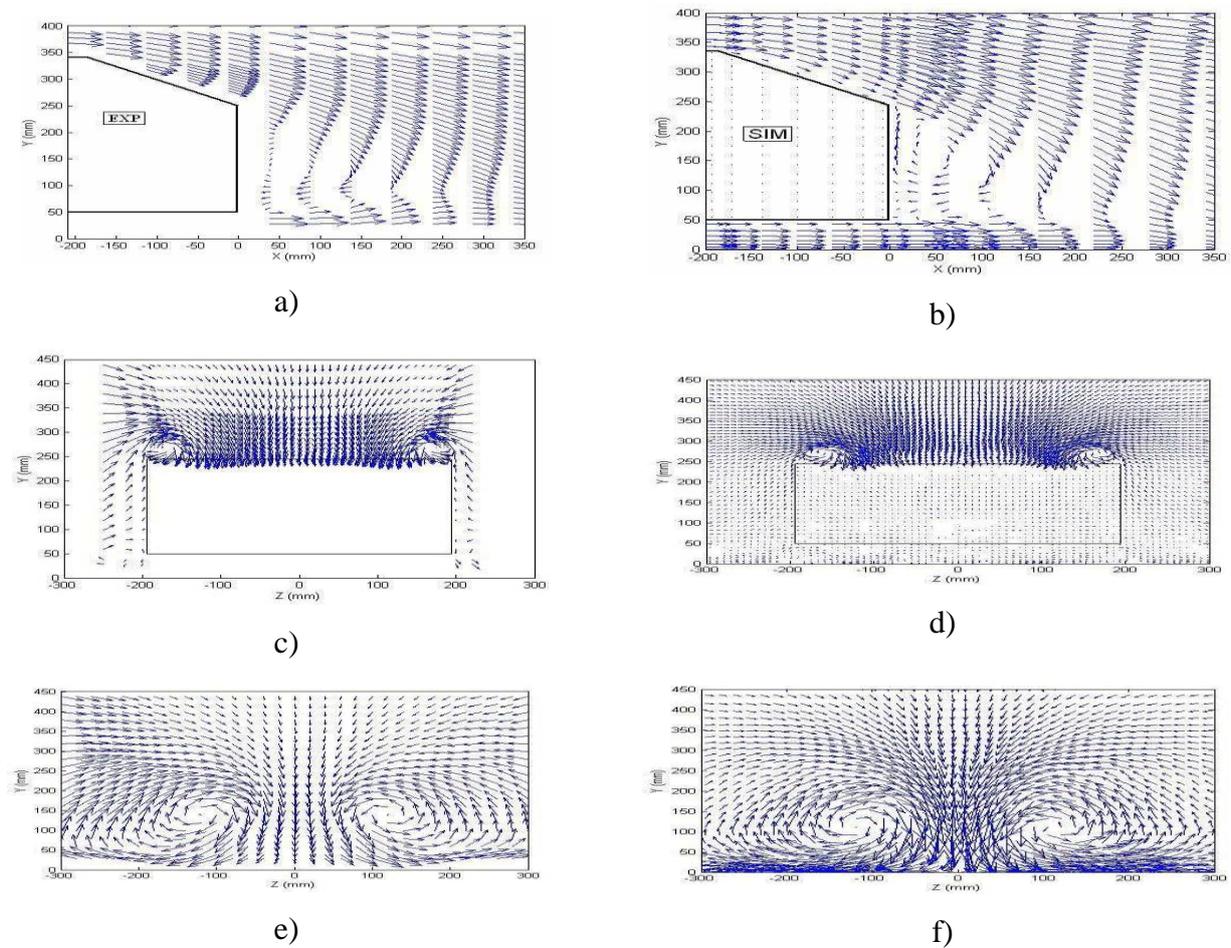
Méthodologie LES (Large-Eddy Simulation) et DES (Detached Eddy Simulation) est fondée sur une méthode dite SVV (Spectral Vanishing Viscosity) caractérisée par l'introduction d'un terme de dissipation hautes fréquences dans les équations de Navier-Stokes.

## Etat de l'art

**Structure de l'écoulement dans le sillage :** Les résultats obtenus décrivent de manière satisfaisante les observations expérimentales de Lienhart & al (2000).



**Figure 1. 13:** a) Lignes de courant colorées par la vitesse longitudinale. b) Champs de vitesse dans les plans (y,z) colorés par la pression [13].



**Figure 1. 14:** Visualisation des champs de vitesse mesurés (à gauche) et calculés (à droite).

- a) & b) Champ de vitesse dans le plan de symétrie (x,y),
- c) & d) Champ de vitesse dans le plan (y,z) pour  $x = 0 \text{ mm}$ ,
- e) & f) Champ de vitesse dans le plan (y,z) pour  $x = 500 \text{ mm}$ . [13]

### 1.5.2. Confrontation des modèles testés avec l'expérience de Lienhardt et al

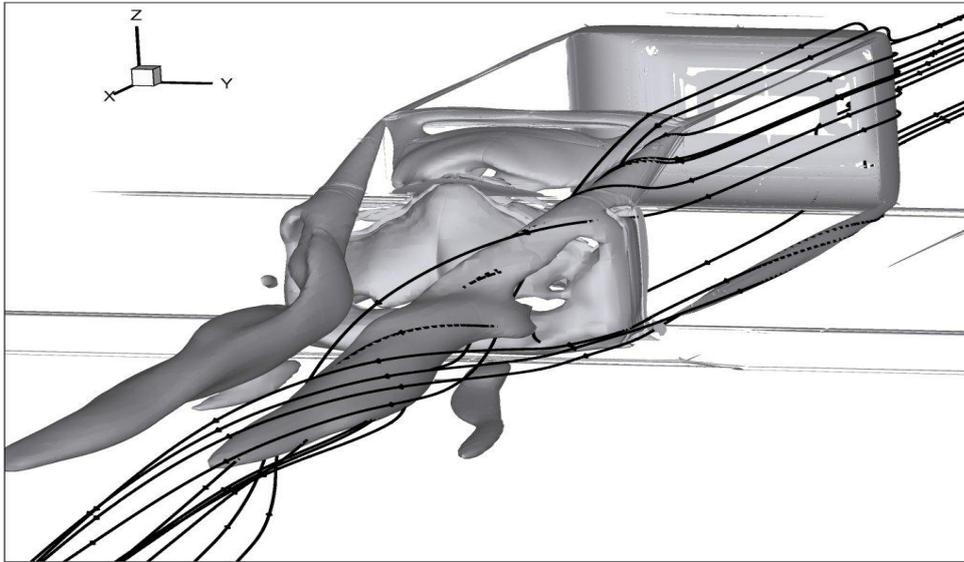


Figure 1. 15: a) Isosurfaces de critère Q à 20 et lignes de courant [14]

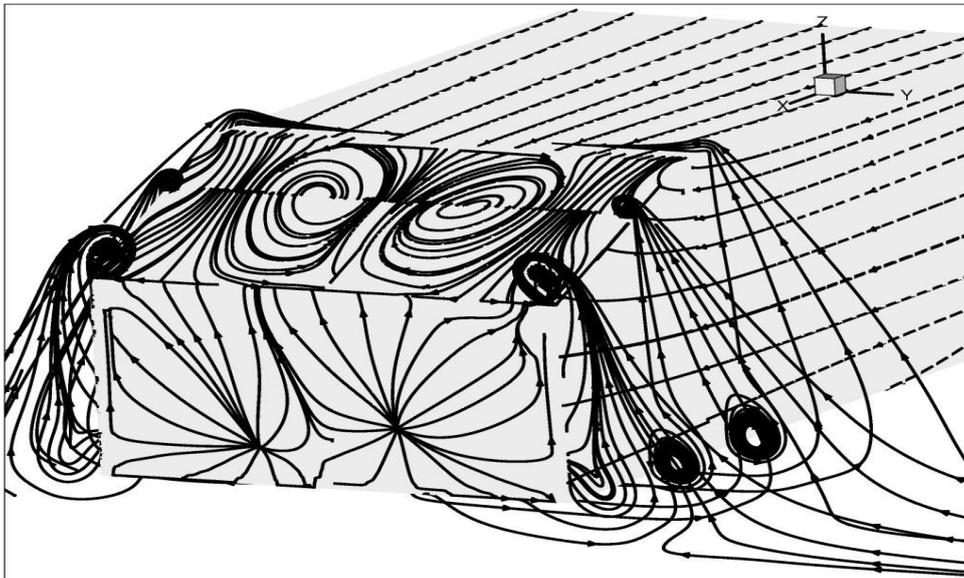
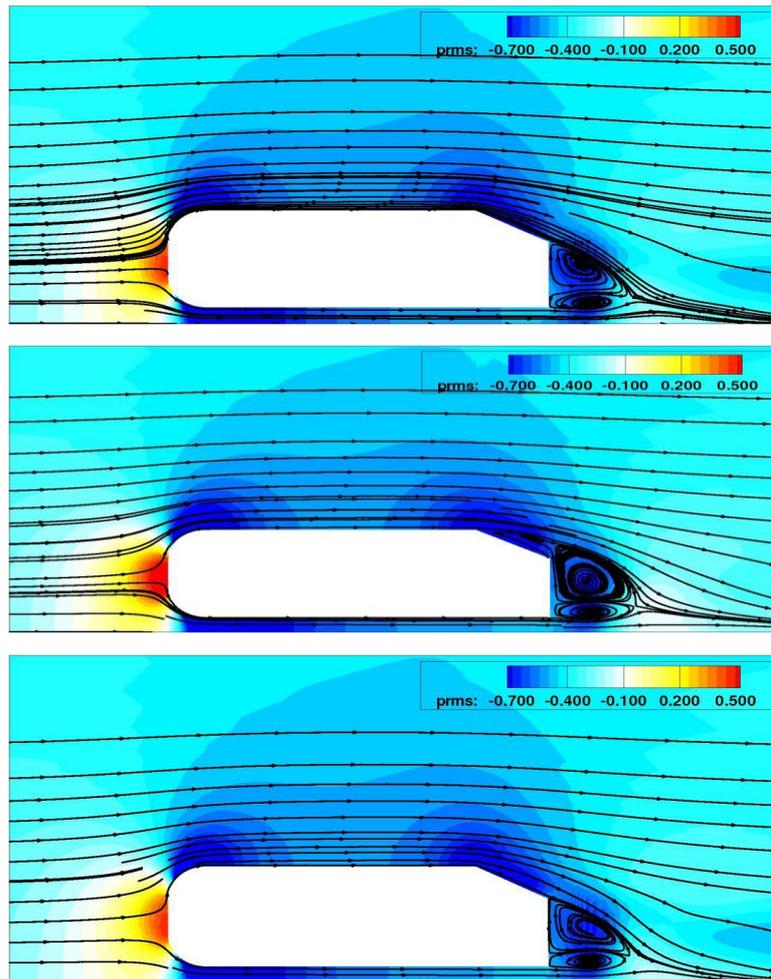


Figure 1. 16: b) Lignes de courant [14]

### 1.5.3. Résultats obtenus sur le cas test à 25° d'angle de lunette

Les résultats des Isocontours de pression et lignes de courant sur les plans longitudinaux pour différentes valeurs de Y obtenus par M Martinat Guillaume [14] montrent l'existence de deux vortex derrière le culot (un supérieur et l'autre inférieur) la présence d'une zone de recirculation derrière le corps, et une petite zone de recirculation sur la lunette arrière.



**Figure 1. 17:** c) Isocontours de pression et lignes de courant sur les plans longitudinaux pour différentes valeurs de Y. Le plan médian est à  $Y=0$  [14]

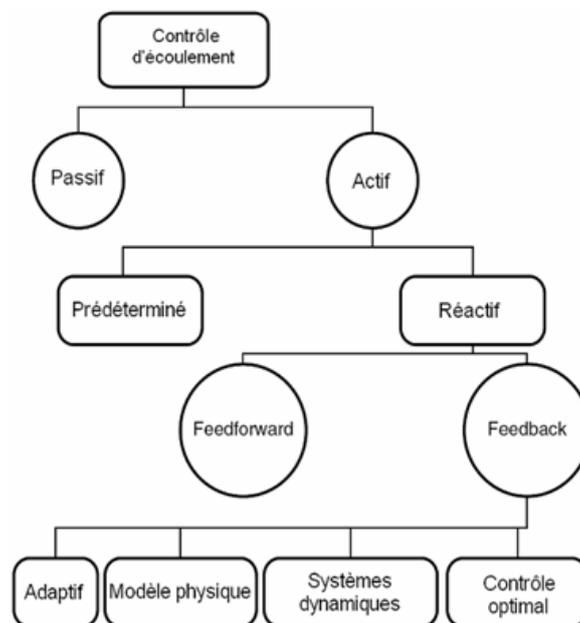
**2. Contrôle des écoulements**

**2.1. Introduction**

Le contrôle d'écoulements consiste à manipuler l'écoulement afin de l'amener dans un état souhaité. C'est un défi important en aérodynamique, car les enjeux techniques et économiques du contrôle d'écoulement sont multiples et interviennent dans de nombreux domaines, notamment dans l'industrie automobile et l'industrie aéronautique. Diverses méthodes de contrôle ont été envisagées afin de contrôler le décollement, et qui peuvent être classées en deux classes : les méthodes passives (le changement de l'état de surface, l'utilisation de corps profilé) et les méthodes actives (le soufflage, l'aspiration, les MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), les jets synthétiques).

**2.2. Classification des contrôles**

Il y a plusieurs façons différentes de classer les stratégies de contrôle pour arriver à l'effet désiré. La Figure II.1 illustre une classification basée sur l'énergie utilisée et le type de boucle de contrôle.



**Figure 2. 1:** Classification basée sur l'énergie utilisée

**2.2.1. Contrôle passif**

Les moyens de contrôle passifs sont généralement des générateurs de tourbillons. Ils consistent en des ailettes fixées à la paroi avec un angle de dérapage par rapport à l'écoulement incident. Ces ailettes ont une taille de l'ordre de l'épaisseur de la couche limite. Elles créent des tourbillons longitudinaux qui favorisent le mélange de quantité de mouvement avec

l'extérieur de la couche limite. Ces générateurs de tourbillons permettent de supprimer les décollements si celui-ci est décollé. Cependant, ils augmentent la traînée si l'écoulement n'est pas décollé.

Les techniques passives incluent

- les modifications de géométrie pour modifier le gradient de la pression,
- l'utilisation de générateurs mécaniques fixes de vortex pour contrôler la séparation,
- et le positionnement de rainures ou de riblets sur une surface pour réduire la traînée.



**Figure 2. 2:**Générateur de vortex passif type tabs, installés sur Stewart Headwind [15]

### 2.2.2. Contrôle actif

Dans la dernière décennie, des techniques de contrôle actif ont été développées, dans lesquelles une énergie ou une puissance auxiliaire est introduite dans l'écoulement. Le contrôle actif peut être de deux types : Prédéterminé ou Réactif. En contrôle prédéterminé l'énergie est appliquée au niveau des actionneurs sans information sur l'état particulier de l'écoulement. La boucle de contrôle dans le contrôle prédéterminé est ouverte et il n'y a pas besoin de capteurs. Ce type de contrôle actif peut cependant être très efficace pour modifier l'écoulement, si ses caractéristiques sont relativement constantes et proches de celles pour lesquelles la loi de contrôle a été élaborée.

Le contrôle réactif est une catégorie particulière de contrôle actif. La boucle de contrôle peut être de deux types :

- chaîne directe (Feedforward) ; dans ce cas les capteurs sont placés à l'amont de l'actionneur.

- chaîne de retour (Feed-back) ; dans ce cas, les capteurs sont placés à l'aval de l'actionneur pour mesurer son influence sur les paramètres de l'écoulement.

Les différents types de capteurs et d'actionneurs utilisés dans le domaine de contrôle actif d'écoulement sont :

**a) Les capteurs**

- ✓ Les capteurs de vitesse
- ✓ Les capteurs de contrainte de cisaillement
- ✓ Les capteurs de pression

**b) Les actionneurs**

- ✓ Actionneur magnétique à volets actif
- ✓ Actionneur micro-ballon
- ✓ Actionneur électrostatique
- ✓ Actionneurs thermiques
- ✓ Actionneurs fluidiques

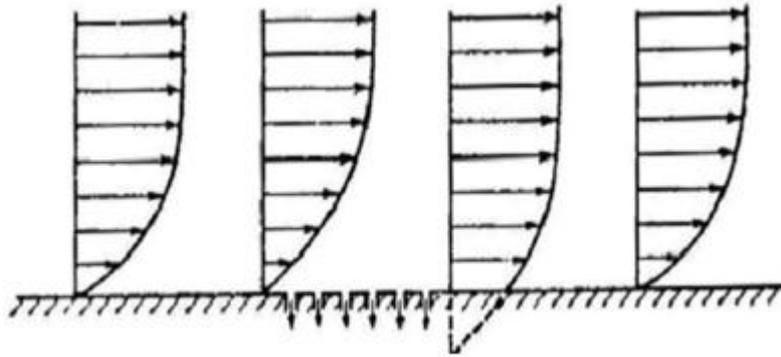
Les solutions fluidiques ont l'avantage, important pour la fiabilité, de ne pas avoir de partie mobile en contact direct avec l'écoulement extérieur et permettent un contrôle simple de la forme temporelle de l'excitation imposée. Ci-après quelques exemples d'actionneurs fluidiques.

- **Le générateur de vortex (actif)**

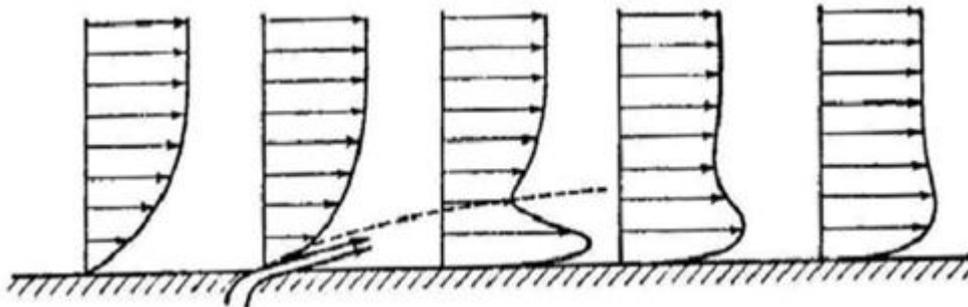
Le principe est de créer des tourbillons longitudinaux de la taille des structures existantes dans la couche limite qui vont "redynamiser" le fluide dans la partie basse de la couche limite et ainsi en réduire la tendance au décollement.

- **L'aspiration et le soufflage de la couche limite**

Le principe de l'aspiration de la couche limite est basé sur un changement de la distribution de vitesse  $U_{\infty}(x)$  de l'écoulement externe par l'aspiration de l'écoulement, au niveau d'une fente par exemple. Cela accélère l'écoulement en aval du point d'aspiration.



**Figure 2. 3:** Contrôle aérodynamique de la couche limite par aspiration [15]



**Figure 2. 4:** Contrôle de la couche limite par soufflage tangentiel [15]

- **Jet synthétique**

Les jets synthétiques consistent en une surface oscillante au fond d'une cavité dont la paroi supérieure est percée. Actuellement, au vu des différents travaux expérimentaux portant sur le contrôle ou la manipulation du décollement de couche limite, ce type de contrôle actif introduisant une fréquence dans l'écoulement s'avère particulièrement efficace. Les jets synthétiques apparaissent comme les plus efficaces, notamment grâce au fait qu'ils produisent plusieurs actions cumulées dans le sens d'une réduction du décollement.

La technique des jets synthétiques a consisté, à ses débuts, à combiner les effets complémentaires du soufflage et de l'aspiration de façon à améliorer les rendements énergétiques en réduisant les débits d'injection. Les soufflages, dans ce cas pulsés au lieu d'être continus se révèlent être efficaces dans le contrôle du décollement de la couche limite.

### 2.3. Contrôle des écoulements par jets synthétique

Le principal axe de recherche actuel en matière d'aérodynamique externe automobile est le contrôle d'écoulement. Il va s'agir de maîtriser le comportement de l'écoulement autour du véhicule. Diverses études se sont intéressées à la réalisation de contrôles d'écoulement autour d'un modèle simplifié d'automobile, le corps de Ahmed, permettant ainsi de comparer les efficacités des différents dispositifs proposés. Cette géométrie, définie par Ahmed et al. (Ahmed et al. [1984],

consiste en un corps épais, à l'avant profilé, placé à proximité du sol et dont la partie arrière présente un hayon incliné.

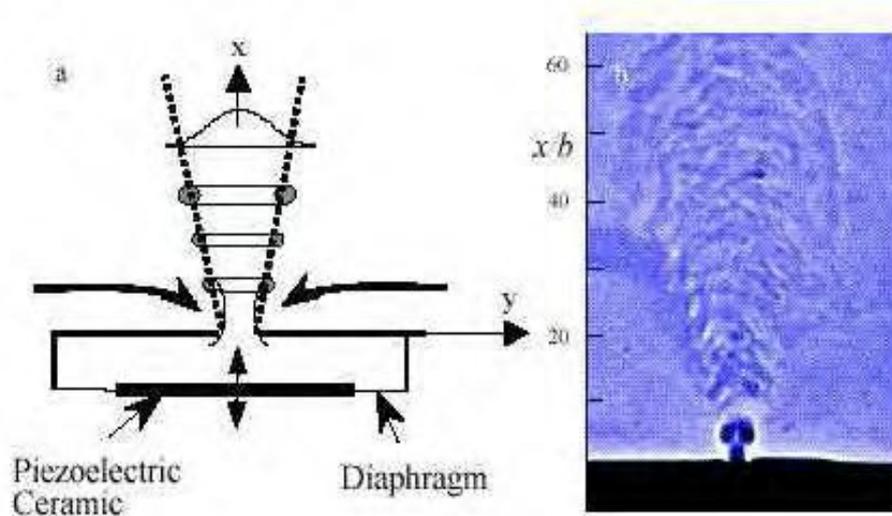
Les forces aérodynamiques subies par un véhicule automobile sont majoritairement dues aux écoulements décollés qui apparaissent tout autour du véhicule et plus particulièrement le sillage 3D généré sur son culot. D'une manière générale, deux stratégies sont envisageables pour améliorer les performances aérodynamiques d'un véhicule automobile : l'optimisation de forme ou le contrôle d'écoulement.

Si l'on ne veut pas modifier la forme du véhicule, ou si l'on veut améliorer davantage les performances aérodynamiques d'un véhicule déjà optimisé, il faut alors contrôler les écoulements décollés à l'aide d'actionneurs. Si on veut contrôler la bulle de recirculation générée sur l'arrière d'un véhicule, on peut envisager quatre approches très différentes. On peut ainsi :

- contrôler la couche limite en amont du décollement,
- contrôler l'écoulement au point de décollement,
- contrôler l'écoulement en paroi en aval du point de décollement,
- contrôler l'écoulement dans le volume en aval du point de décollement.

### 2.4. Jet synthétique en interaction avec un écoulement

Le jet synthétique représente une source pariétale de quantité de mouvement pour laquelle les échelles caractéristiques de longueur et de temps sont contrôlées. Cette particularité est remarquable dans la perspective de réaliser le contrôle d'écoulement puisqu'il devient possible de combiner l'influence de deux grandeurs physiques pour modifier l'écoulement à contrôler : le coefficient de quantité de mouvement  $C_\mu$  et la fréquence réduite  $F^+$ .



**Figure 2. 5:** Coupe d'un jet synthétique dans un fluide au repos (image tirée de Glezer & Amitay [16]).

Une grande partie des études publiées sur les jets synthétiques est de nature expérimentale. Les applications visées étant dans le domaine de l'aérodynamique externe, la plupart des expériences ont consisté à contrôler des décollements sur des profils. Par conséquent, peu d'études se sont intéressées à des applications pour l'aérodynamique interne, en particulier le contrôle des décollements dans les prises d'air. De plus, ces études se sont focalisées sur l'amélioration des performances aérodynamiques avec en général peu d'explications sur le choix des paramètres de contrôle comme la fréquence et la vitesse du jet synthétique.

## 2.5. Principe du jet synthétique

Les bases du jet synthétique sont décrites par Ingard [17], mais ne sont développées et appliquées au problème de contrôle d'écoulement qu'au milieu des années 1990 avec les travaux de Smith et de Glezer sur un cylindre circulaire [18]. D'une manière générale, l'écoulement de jet synthétique est généré par la variation périodique du volume d'une cavité ouverte sur un écoulement extérieur. La Figure II.5 représente schématiquement le principe de génération d'un écoulement de jet synthétique à travers un orifice derrière lequel le mouvement périodique d'un piston fait varier le volume d'une cavité.

## 2.6. Définition d'une vitesse caractéristique

Il existe au moins six vitesses caractéristiques possibles :

$U_{max}$ : la vitesse maximale au centre du jet ;

$U_{rms}$ : la vitesse RMS au centre du jet ;

$\bar{U}_{max}$  : la vitesse maximale de soufflage moyennée sur la surface de l'orifice ;

$\bar{U}$  : la vitesse du jet moyennée sur l'orifice et la durée du soufflage ;

$U_0$  : la vitesse du jet moyennée sur l'orifice, intégrée sur la durée du soufflage mais divisée par la durée d'une période ;

$U_{rms}$  : la vitesse RMS moyennée sur la surface de l'orifice ;

Ces quatre dernières vitesses sont liées par la relation :

$$U_0 = \frac{\bar{U}_{max}}{\pi} = \frac{\bar{U}}{2} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{rms} \quad 2.1$$

Le problème est donc de choisir une vitesse représentative pour une comparaison de l'écoulement avec un jet continu. En effet, cette vitesse caractéristique est utilisée dans la définition du nombre de Reynolds, du nombre de Strouhal, dans le rapport de vitesse R et dans le coefficient de quantité de mouvement. Par la suite, la vitesse  $U_0$  sera utilisée lorsque ce sera possible.

**2.6.1. Nombre de Reynolds :**

A partir de la vitesse caractéristique  $U_0$  et de la dimension caractéristique de l'orifice  $d$ , un nombre de Reynolds peut être construit :

$$Re_{U_0} = \frac{U_0 \cdot d}{\nu} \quad 2.1$$

**2.6.2. Nombre de Stokes :**

Le nombre de Stokes est défini par :  $S = \sqrt{\frac{f \cdot d^2}{\nu}}$  2.3

Le nombre de Stokes compare l'épaisseur de la couche limite instationnaire dans l'orifice :

$\delta_v = \sqrt{\frac{\nu}{f}}$  à la dimension de l'orifice  $d$ . Une valeur du nombre de Stokes supérieure à 10 permet d'éviter que les effets visqueux n'influencent trop l'écoulement dans l'orifice.

**2.6.3. Longueur de pénétration :**

Un des paramètres importants pour la formation d'anneaux de vorticité ou de paires de tourbillons est la longueur de pénétration ( $L/d$ ) où  $L_0$  est défini par :

$$L_0 = \int_0^\tau \tilde{u}(t) dt \quad 2.4$$

Avec  $\tau$  la durée de l'expulsion ( $T/2$  pour un jet synthétique). A partir de cette longueur caractéristique, on peut définir une vitesse :

$$U_0 = f \cdot L_0 = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} \tilde{u}(t) dt \quad 2.5$$

**2.6.4. Fréquence adimensionnée :**

Pour les jets synthétiques dans un écoulement au repos ou dans une couche limite, on utilise le nombre de Strouhal défini précédemment par :

$$St = \frac{f \cdot d}{U_0} \quad 2.6$$

On peut remarquer que  $L0/d = U0/(f \cdot d)$  ressemble à l'inverse du nombre de Strouhal qui s'écrit :

$$\frac{1}{St} = \frac{U_0}{f \cdot d} = \frac{U_0 \cdot d / \nu}{f d^2 / \nu} = \frac{Re_0}{S^2} \quad 2.7$$

En ce qui concerne les articles sur le contrôle du décollement par excitation périodique, les différents auteurs s'accordent sur :

$$F^+ = \frac{f \cdot x_{ref}}{U_\infty} \quad 2.8$$

Où  $x_{ref}$  est égal à la corde dans le cas d'un profil ou la distance de l'actionneur au bord de fuite ou encore la longueur de décollement.  $U_\infty$  est la vitesse de l'écoulement transverse en amont de l'actionneur.

Pour donner un ordre de grandeur des fréquences réduites utilisées, les valeurs de  $F^+$  varient entre 0,5 et 2 avec généralement une valeur  $F^+ = 1$  efficace pour supprimer le décollement. Cependant, Amitay et Glezer utilisent une fréquence  $F^+ = O(10)$ . Ces deux fréquences réduites conduisent à un recollement mais avec une physique différente. Pour  $F^+ = 10$ , l'actionneur opère à un temps caractéristique qui est très inférieur à celui des instabilités à grande échelle de l'écoulement.

Par contre, à  $F^+ = 1$ , l'effet de l'actionneur est couplé aux instabilités de l'écoulement et celui-ci peut affecter des échelles qui sont un à deux ordres de grandeur plus grandes que la dimension caractéristique du jet.

**2.6.5. Coefficient de quantité de mouvement :**

Le coefficient de quantité de mouvement est défini comme le rapport entre la quantité de mouvement du jet synthétique et celle de l'écoulement amont :

$$C_\mu = \frac{\rho_j \cdot d \langle U_j^2 \rangle}{\frac{1}{2} \rho_\infty L U_\infty^2} = 2 \frac{\rho_j \cdot d U_{rms}^2}{\rho_\infty L U_\infty^2} = \frac{\rho_j \cdot d U_{max}}{\rho_\infty L U_\infty^2} \quad 2.9$$

Avec L la longueur de décollement.

2.6.6. Critère de formation :

Un des paramètres important pour la formation d'anneaux de vorticité ou de paires de tourbillons est le rapport entre la longueur de pénétration  $L_0$  et la dimension caractéristique du jet  $d$ . Il faut une longueur de pénétration suffisante pour que la vorticité générée pendant le souage ne soit pas aspirée. De plus, observent que pour une longueur de pénétration adimensionnée  $L_0/d$  supérieure à 4, la circulation de l'anneau tourbillonnaire n'augmente plus et l'exc  dent de circulation se retrouve dans le sillage de l'anneau principal sous forme d'anneaux plus petits.

Tout d'abord, on rappelle que :  $L_0/d = U_0/(f \cdot d)$  est égal à l'inverse du nombre de Strouhal qui s'écrit :

$$\frac{1}{St} = \frac{U_0}{f \cdot d} = \frac{U_0 \cdot d / \nu}{f d^2 / \nu} = \frac{Re_0}{S^2} \tag{2.10}$$

La force d'un tourbillon est proportionnelle au flux de vorticité à l'orifice pendant la phase de soufflage :

$$\Omega_v = \int_0^{T/2} \int_0^{d/2} \xi_z u dy dt \tag{2.11}$$

Où  $\xi_z$  est la composante du rotationnel induite par l'enroulement de la couche de mélange et  $u$  la vitesse du jet. L'ordre de grandeur de la vitesse du dipôle  $V_i$  est  $\Omega_v/d$ . Une analyse dimensionnelle de l'équation précédente conduit à :

$$\Omega_v \sim \frac{U_0}{\delta_s} U_0 \delta_s \frac{1}{f} \tag{2.12}$$

Où  $\delta_s$  est l'échelle de grandeur de la région caractérisée par une vorticité non nulle. Si on suppose qu'un jet va se former si la vitesse du dipôle  $V_i$  est plus grande que la vitesse d'aspiration moyenne du jet  $V_s \cong U_0$  :

$$\frac{V_i}{V_s} \sim \frac{\Omega_v/d}{U_0} \sim \frac{U_0}{f \cdot d} \sim \frac{Re_{U_0}}{S^2} > K \tag{2.13}$$

Où  $K$  est une constante inconnue. La valeur de cette constante dépend de la géométrie de l'orifice.

Le logiciel Fluent offre la possibilité d'implémenter un programme écrit en langage « C », appelé UDF (User Defined Fonction). Cela permis d'imposer un profil de vitesse sinusoïdal sur des fentes réalisées en haut de la lunette, selon l'équation :

$$U_{JET}(t) = U_{JET \max} \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \tag{2.14}$$

- $f$  : La fréquence d'injection.
- $U_{JET \max}$  : La vitesse maximale d'injection.
- $t$  : Le temps courant.

Les paramètres de contrôle sont :

- L'épaisseur de la fente  $e$ ,
- L'amplitude du jet ,
- La fréquence du jet ,
- Les Positions des fentes de contrôle.

Le Choix des paramètres de contrôle est basé sur les études de Roumeas [1], et celle de Chester [19].

L'épaisseur des fentes  $e$ (mm),

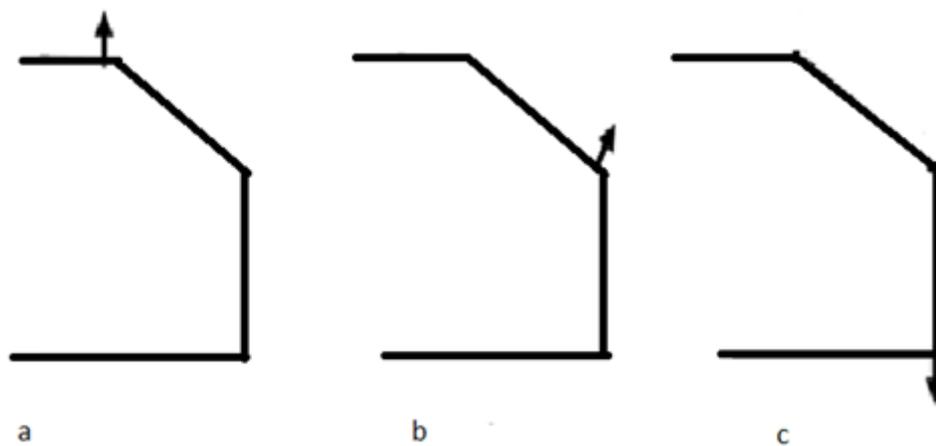
L'amplitude du jet  $U_{JET\ max}$

La direction du jet est normale à la paroi.

Donc, on définit alors un nombre de Reynolds local :

$$Re_{Local} = \frac{\rho_{air} U_{JET\ max} e}{\mu} \quad 2.15$$

Les positions des fentes sont fixées (Figure II.6), le nombre de fentes est limité à trois fentes (« f1 », « f2 » et « f3 », dont la première est située à  $d/JN=0,01$  en amont du point de décollement « I ». Elles sont espacées de la même distance ( $d/JN$ ) (Figure II.2).



**Figure 2. 6:** Les positions de jet synthétique : (a) sur la lunette arrière, (b) sur le culot et (c) sur la lunette arrière et le culot.

3. Simulations numériques

3.1. Introduction

Dans ce chapitre deux études sont faites, une étude instationnaire de l'écoulement sans contrôle, et une seconde étude traite le contrôle de l'écoulement par un jet synthétique. Les résultats obtenus seront comparés pour déterminer l'influence du contrôle.

Une modélisation numérique est faite à l'aide de deux logiciels de calcul et de maillage (Gambit et Fluent). Une brève présentation de ces deux logiciels est abordée pour comprendre leurs fonctionnements. Puis, une simulation stationnaire est faite à l'aide de Fluent.

3.1.1. Présentation des logiciels

Gambit et Fluent sont des logiciels, sous licence commerciale, permettant de réaliser des simulations 2D ou 3D en mécanique des fluides allant de la construction du maillage avec Gambit à la résolution des équations de Navier Stokes et au post-traitement avec Fluent. Les deux logiciels sont largement répandus dans l'industrie (automobile, aéronautique, espace, etc...) en raison de leur interface graphique puissante et de l'abondance de leurs options. Ils permettent de réaliser des simulations sur tous types de géométries complexes (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs.

Pour résoudre des problèmes en mécanique de fluides par les logiciels Fluent et Gambit, on doit, d'une manière générale, suivre les étapes montrées dans la figure 3.1.

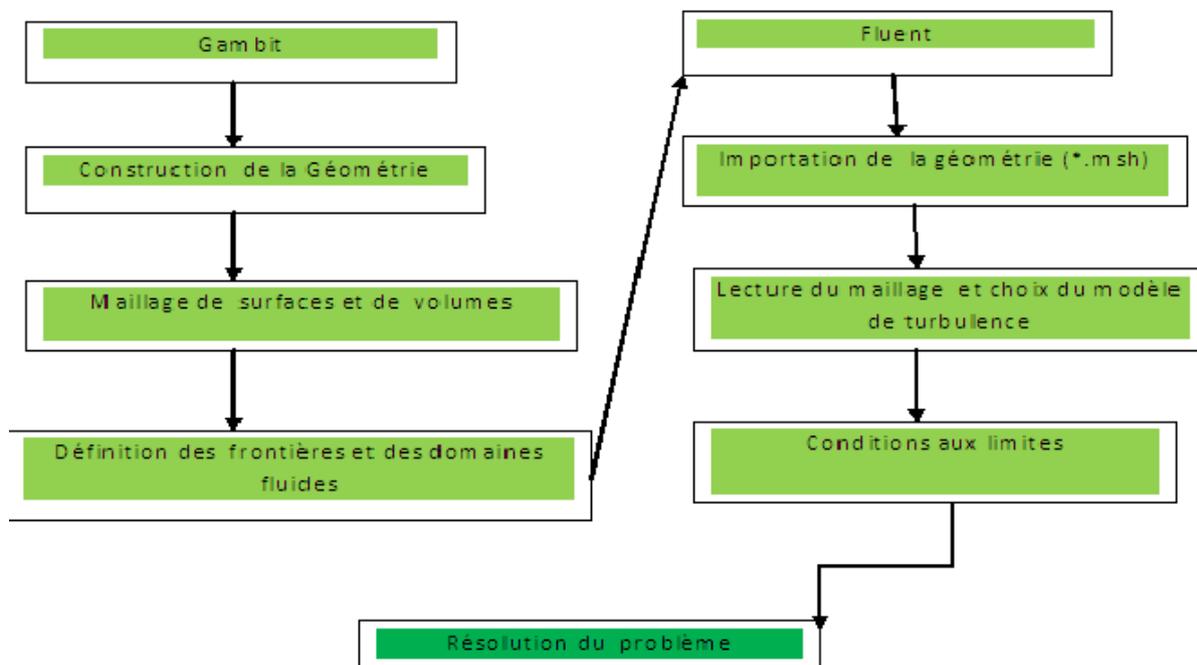


Figure 3. 1: Étapes à suivre pour construire un modèle numérique.

3.1.2. Maillage sous Gambit

Le code Fluent utilise une grille pour la résolution des équations du système considéré. Cette grille est conçue à l'aide du mailleur Gambit. Celui-ci permet de générer deux types de maillages de calcul, structurée ou non structurée et de proposer des solutions étendues pour la création des géométries les plus compliquées.

3.1.3. Menu géométrie

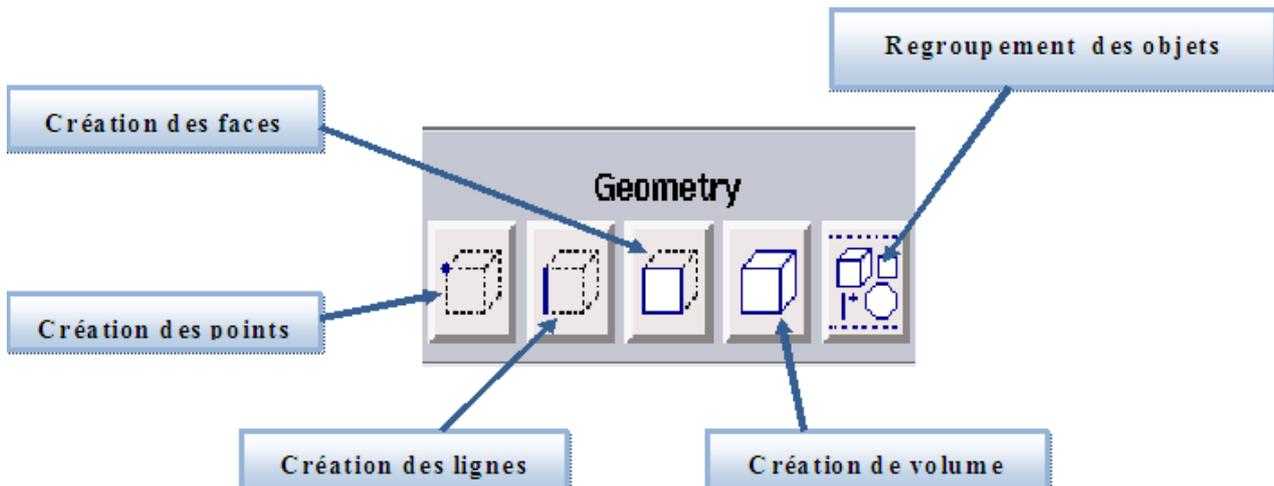


Figure 3. 2: Menu de géométrie

3.1.4. Menu mesh (maillage)

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée.

- **GAMBIT** permet de mailler automatiquement suivant plusieurs types de maillage, et suivant différents algorithmes. La géométrie doit être préparée au préalable

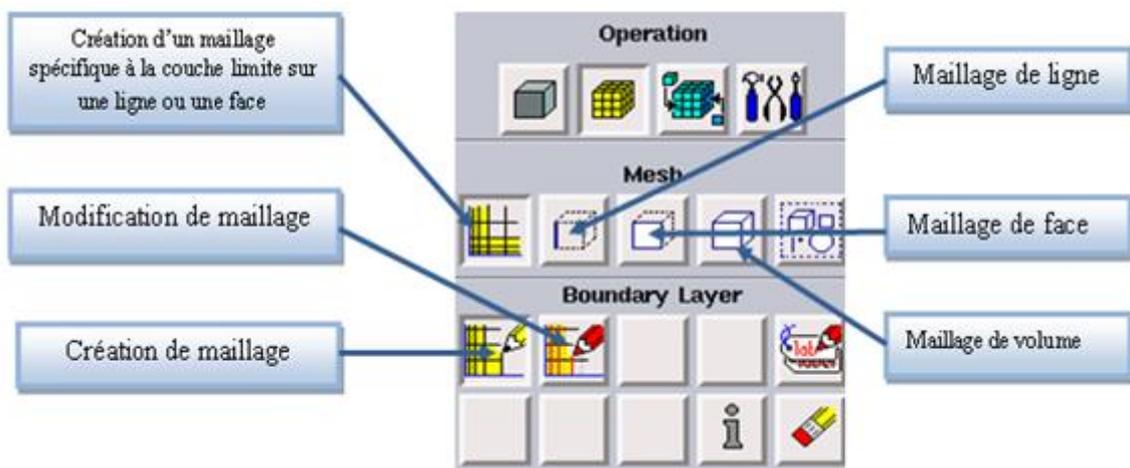


Figure 3. 3: Menu de Maillage [20]

**3.1.5. Choix du type de maillage**

- **Maillage structuré (quadra/hexa)**

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie à multi bloc, il présente les avantages suivants :

- ✓ Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de maille par rapport à un maillage non structuré équivalent.
- ✓ Réduit les risques d'erreurs numériques car l'écoulement est aligné avec le maillage.

Et ses inconvénients sont :

- ✓ Difficile à le générer dans le cas d'une géométrie complexe
- ✓ Difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes.

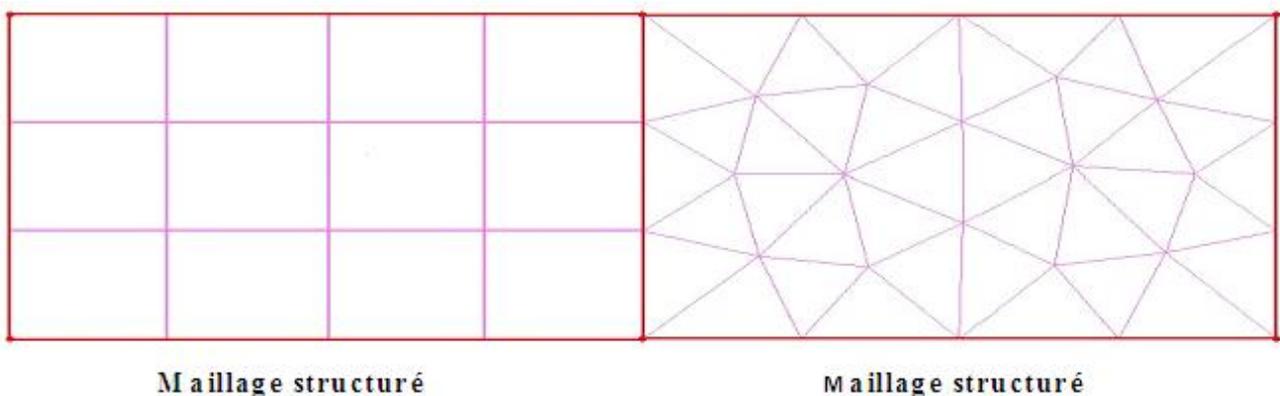
- **Maillage non structuré (tri/tétra)**

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition. Ses avantages :

- ✓ Peut être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments
- ✓ Les algorithmes de génération de ce type de maillage (tri/tétra) sont très automatisés

Ses inconvénients :

- ✓ Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré
- ✓ Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importante si l'on compare avec le maillage structuré.



**Figure 3. 4:** Type de maillage

### ➤ Maillage hybride

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D. Ses avantages sont combinés entre les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non structuré.

### ➤ Techniques générales de génération du maillage

Pratiquement, il n'existe pas de règle précise pour la création d'un maillage valable, cependant il existe différentes approches qui permettent d'obtenir une grille acceptable.

- Nous pouvons résumer ces règles dans :
  - ✓ Maintenir une bonne **Qualité** des éléments.
  - ✓ Assurer une bonne **Résolution** dans les régions à fort gradient
  - ✓ Assurer un bon **Lissage** dans les zones de transition entre les parties à maillage fin et les parties à maillage grossier.
- Minimiser le nombre **Total** des éléments (temps de calcul raisonnable).

### ➤ Qualité d'un maillage

La génération d'une très bonne qualité de maillage est essentielle pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et significatif. Et pour la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul.

### ➤ Lissage

Le changement dans la taille des éléments de maillage d'une zone maillée à une autre doit être graduel, la variation de la taille des éléments de deux zones adjacentes ne doit pas dépasser 20%.

### ➤ Nombre total d'éléments

Un nombre important d'éléments de maillage permet sans doute d'améliorer la précision des calculs, mais pénalise les ressources informatiques en terme de mémoire et alourdit le système.

### 3.1.6. Maillage d'une surface

Gambit offre diverses possibilités pour mailler une surface. Un maillage soit à base de cellules quadrilatères, soit à base de cellules triangulaires. Ce logiciel de conception permet aussi de choisir les types de maillages des faces suivants :

Tableau 3. 1: Schémas de génération des cellules.

Option	Description
Map	Crée une grille régulière et structurée des éléments du maillage
Submap	Divise une face en régions de façon à leur appliquer Map
Pave	Crée une grille non structurée des éléments du maillage
Triprimitive	Divise une face en trois régions quadrilatérales et crée un maillage tracé dans chaque région de la face

Dans la présente étude, le schéma Map pour générer un maillage structuré régulier est retenu. Ce schéma exige que le nombre des intervalles (ou des nœuds) dans les arêtes opposées soit identique (Figures III.1.2.a et III.1.2.b).

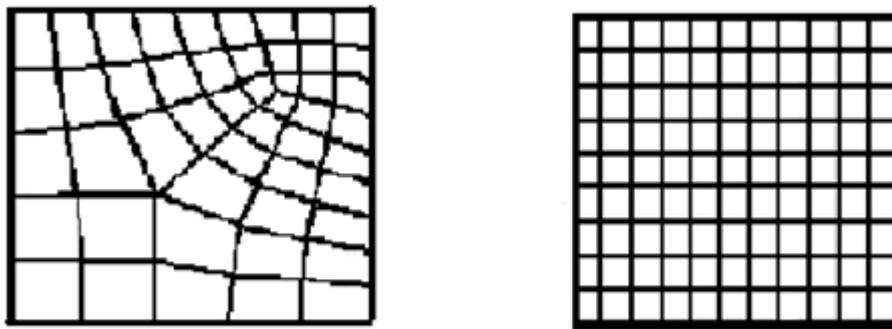


Figure 3. 5: Grille obtenue par un schéma Pave. Figure III.5.b : Grille obtenue par un schéma Map.

### 3.1.7. Maillage multi-domaine

Le maillage multi-domaine consiste à diviser la surface à mailler en plusieurs domaines (Figure III.6). Cette technique permet de raffiner le maillage dans les zones où des phénomènes physiques se développent loin ou près de l'obstacle. Elle permet aussi de bien redresser la grille afin d'éviter la déformation des mailles dans les zones courbées (arrondie, pente, etc...) qui conduit à la création de la vorticité qui pénalise la validité des résultats. Elle permet également de changer le type des cellules (de quadrilatères aux triangulaires et vis vers  a).

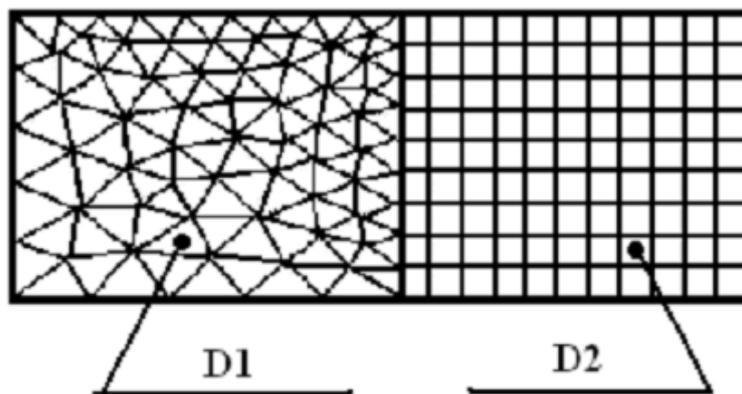
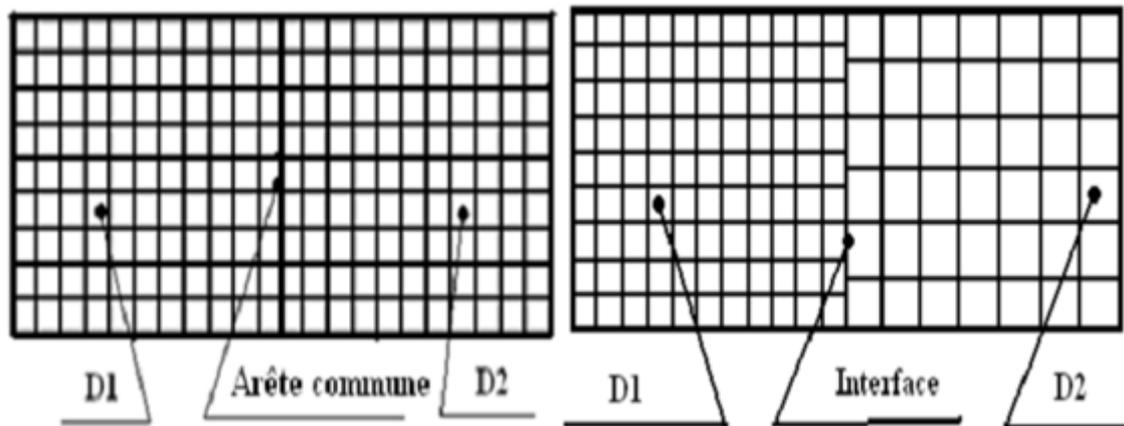


Figure 3. 6: Grille obtenue par un maillage multi-domaines.

### 3.1.8. Maillage par interfaces

La technique de maillage par interfaces consiste à superposer deux arêtes ayant la même dimension et un nombre d'intervalles différent, en les définissant comme des interfaces dans les conditions aux limites. De cette manière, les domaines adjacents qui ont les mêmes dimensions n'auront pas la même grille (Figure III.7).



**Figure 3. 7:** Grille obtenue par un maillage multi-domaines en utilisant une interface (sur la droite).

### 3.2. Couche limite et Emplacement du premier point de la grille

La viscosité d'un fluide en écoulement implique une évolution moins importante au voisinage des parois ; les variations ne se font sentir que dans une zone proche des parois appelée couche limite. En dehors de cette couche limite, la vitesse est pratiquement constante. Au voisinage des parois, la plupart des modèles numériques de modélisation éprouvent des difficultés à prédire la couche limite (Hanchi [21]). La figure (III.8) donne les vitesses adimensionnelles pour une variété d'écoulements turbulents dans les conduites et de couches limites.

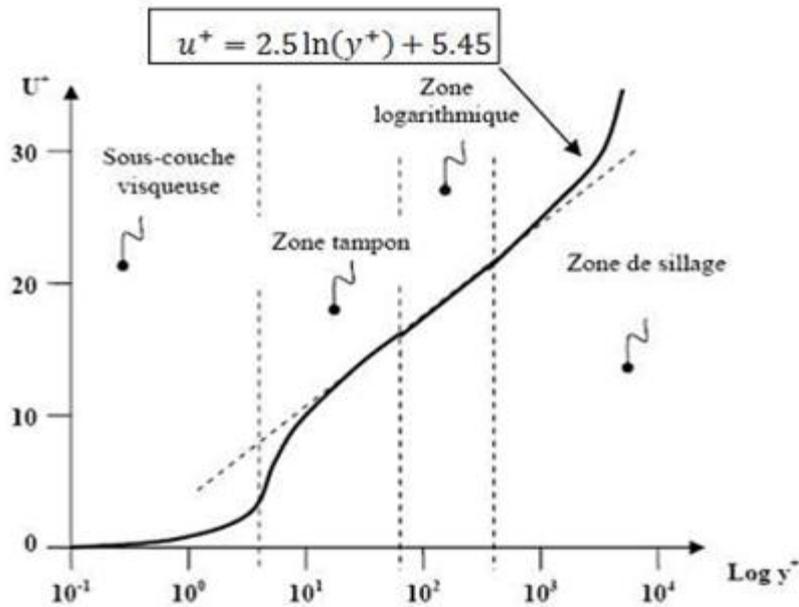


Figure 3. 8: Représentation de la couche limite turbulente en proche paroi turbulente

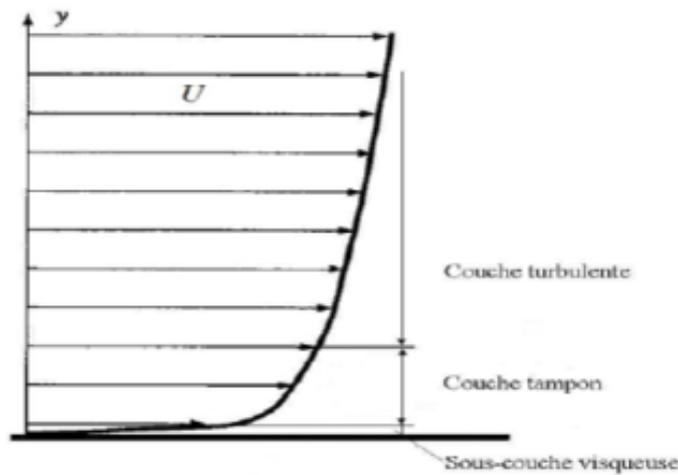


Figure 3. 9: Profil de vitesse pour un écoulement turbulent [22]

On constate la présence de trois sous-couches : La sous couche visqueuse, la sous Couche tampon (logarithmique) et la sous couche externe.

Il existe deux approches pour modéliser l'écoulement près des parois (L'une se base sur des formules semi-empiriques dites lois de paroi pour lier la couche limite complètement turbulente et la paroi sans tenir compte des autres couches. L'autre consiste à raffiner le maillage de telle sorte que la distance entre le premier nœud et la paroi soit inférieur à l'épaisseur de la sous couche visqueuse.

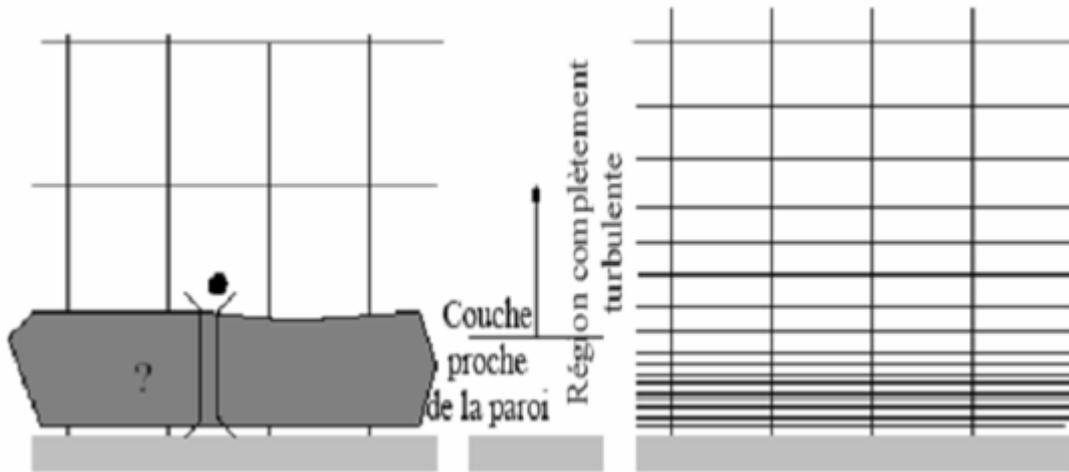


Figure 3.10: Traitements près des parois

On définit aussi :

- Le coefficient de frottement d'une plaque plane (cas turbulent) :  $\frac{\bar{C}_f}{2} = \frac{0.037}{R_2^{1/5}}$
- La vitesse adimensionnelle :  $U^+ = \frac{U_\infty}{U_\tau}$ , tel que  $U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{\frac{\bar{C}_f}{2}}$

$U_\tau$  C'est la contrainte de cisaillement à la paroi

- La distance normale à la paroi  $y^+ = \frac{yU_\tau}{\nu}$

L'emplacement de chaque centroïde de cellule adjacente à la paroi doit être situé dans la couche logarithmique pour la première approche, pour la seconde approche chaque centroïde doit être situé dans la couche visqueuse de tel sorte que  $y_p^+ = 1$ .

Finalement, on estime donc la taille de la cellule adjacente à la paroi de la manière suivante :  $y_p = \frac{y_p^+ \nu}{U_\tau}$

Gambit offre la possibilité de raffiner le maillage près des parois (second approche) en lui donnant l'emplacement de chaque centroïde des cellules adjacentes aux parois (0,01 mm) et le nombre des cellules (10 cellules).

### 3.3. Géométrie et conditions aux limites(CL)

La géométrie considérée est le plan médian du corps d'Ahmed (2D), avec les dimensions précisées précédemment. L'obstacle est placé dans une veine numérique rectangulaire (Figure

III.11) de longueur  $40L$  et de hauteur  $5,5L$  (la hauteur et la distance en aval sont identiques à ceux qui sont prises par Roumeas [1]). La vitesse de l'air à l'entrée est de  $U_{\infty}=16$  m/s.

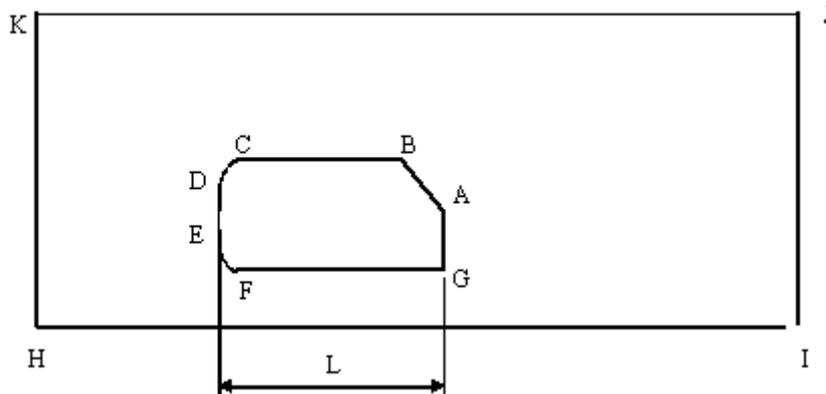


Figure 3. 11: La géométrie considérée et les conditions aux limites

Le tableau ci-après (Tableau III.2) résume les dimensions de la géométrie et les conditions aux limites.

Tableau 3. 2: Dimensions de la veine numérique et conditions aux limites.

Arêtes	Dimensions	C.L	Arêtes	Dimensions	C.L
EG	L	Paroi	JI	5.5L	Sortie d'air
HE	9L	Paroi	KJ	40L	Entrée d'air
GI	30L	Paroi			
HI	40L	Paroi			
HK	5.5 L	Entrée d'air			

### Implémentation sous Fluent

Le logiciel Fluent a les capacités de modélisation suivantes :

- Écoulements 2D ou 3D,
- États permanents ou transitoires ;
- Écoulements incompressibles ou compressibles, laminaires ou turbulents, etc.,
- Transfert de chaleur forcé, par conduction, par convection ou radiatif, etc.

Fluent est basé sur la méthode des volumes finis, Cette technique consiste à équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle pour arriver aux équations discrétisées qui conservent toutes les grandeurs physiques sur un volume de contrôle.

La méthode des volumes finis s'articule autour de trois étapes principales :

- Génération du maillage,
- Discrétisation basée sur le principe d'intégration des équations de transports sur un volume de contrôle,
- Résolution du système d'équations, par différentes méthodes de résolution numériques directes ou itératives (décomposition LU, méthode de Stone, etc...).

### 3.3.1. Schémas de discrétisations

Fluent fournit plusieurs schémas de discrétisations :

- Le schéma de premier ordre, Upwind : le plus rapide à converger, précis au premier ordre,
- Le schéma de loi en puissance, Power Law : plus précis que les schémas de 1er ordre quand pour les écoulements à faible nombre de Reynolds,
- Le schéma de second, Upwind second order : précis au 2<sup>ème</sup> ordre, convergence très lente,
- Le schéma d'interpolation quadratique, QUICK : appliqué pour les maillages quadrilatères, conseillé pour les écoulements tourbillonnants, 3<sup>ème</sup> ordre pour le maillage uniforme.

### 3.3.2. Méthodes d'interpolation de la pression sur les faces

Les schémas d'interpolation pour le calcul des pressions sur la face des cellules qu'utilise Fluent sont :

- **Standard** : exactitude réduite pour des écoulements montrant de grands gradients de pression normaux à la surface près des frontières.
- **PRESTO !** : pour des écoulements hautement tourbillonnants, des écoulements ayant de grandes sauts de pression, ou des domaines très courbés.
- **Linear** : utilisées quand les autres options ont des difficultés à converger ou des comportements non physiques.
- **Second-order** : utilisé pour des écoulements compressibles, plus précise au second ordre.
- **Body force weighted** : utilisé quand les forces sur les corps sont importantes, ou des écoulements hautement tourbillonnants.

**3.3.3. Algorithme de couplage vitesse-pression**

Les algorithmes de couplage vitesse-pression sont disponibles dans Fluent :

Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (SIMPLE) : schémas par défaut et robuste.

- SIMPLE-Consistent (SIMPLEC) : permet une convergence plus rapide pour les problèmes simples (par exemple : écoulements laminaires sans utilisation de modèle physique supplémentaires).
- Pressure-Implicit with Spiliting of Operators (PISO) : utile pour des écoulements instationnaires ou pour des maillages contenant des cellules avec une obliquité plus élevées que la moyenne.

**3.3.4. Approches numériques et modèles de turbulence**

Il existe trois méthodes de modélisation de l'écoulement turbulent résumé sur tableau ci-après (Tableau 3.3) :

**Tableau 3. 3:** Approches numériques.

RANS(Reynolds Average Navier-Stocks )	LES(Large Eddy simulation)	DNS(Direct Numerical Simulation)	DES ( Detached Eddy Simulation)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Résolvent les équations de Navier-Stokes moyennées (moyenne temporelle) avant la résolution</li> <li>• Toutes les échelles de turbulence sont modélisées dans les RANS.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les échelles plus petites que la maille sont modélisées.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Résolvent les équations de Navier-Stokes</li> <li>• Résolvent toutes les échelles.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les échelles plus petites que la maille sont modélisées</li> </ul>

Le logiciel de calcul offre la possibilité de choisir un des modèles de turbulence indiqués sur la figure III.12.

Le choix entre ces modèles de turbulence se base principalement sur les résultats que donne chacun.

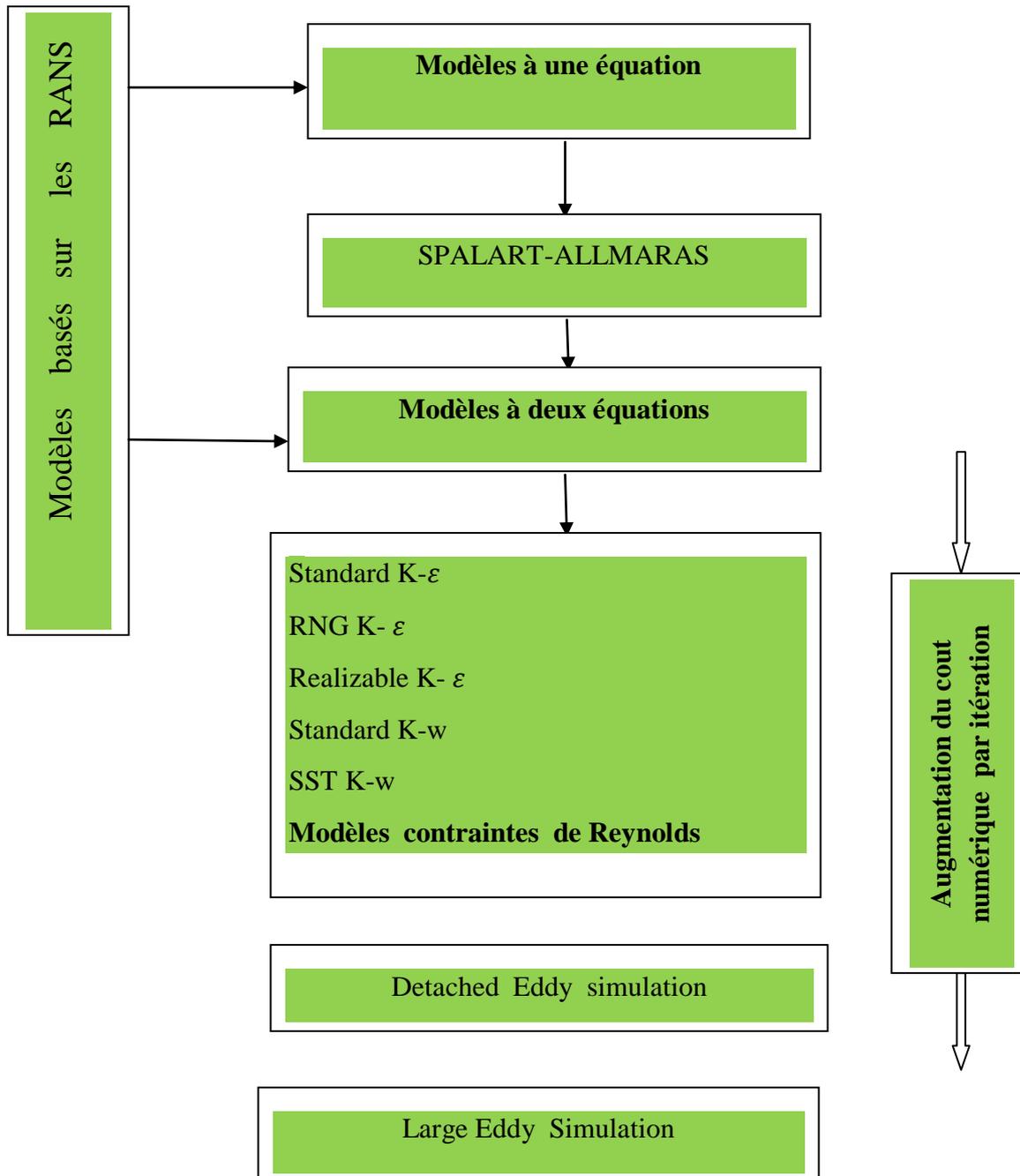


Figure 3. 12: Modèles de turbulence sous Fluent.

### 3.3.5. Coefficients de relaxations

La sous-relaxation est très pratique pour les problèmes non linéaires car elle permet d’éviter la divergence et d’accélérer la convergence des méthodes itératives utilisées pour la résolution. Le logiciel Fluent permet d'agir sur les facteurs de sous relaxations, nous illustrons les facteurs utilisés dans le tableau 3.1.4.

**Tableau 3. 4:** Coefficients de sous-relaxation.

Variables	Coefficients de sous relaxation
Pression	0.5
Densité	1
Forces de volume	1
Quantité de mouvement	0.5

### 3.3.6. Mise en œuvre du calcul

Au chargement du maillage sous Fluent, Il s'agit, en premier lieu, de mettre la géométrie à l'échelle appropriée.

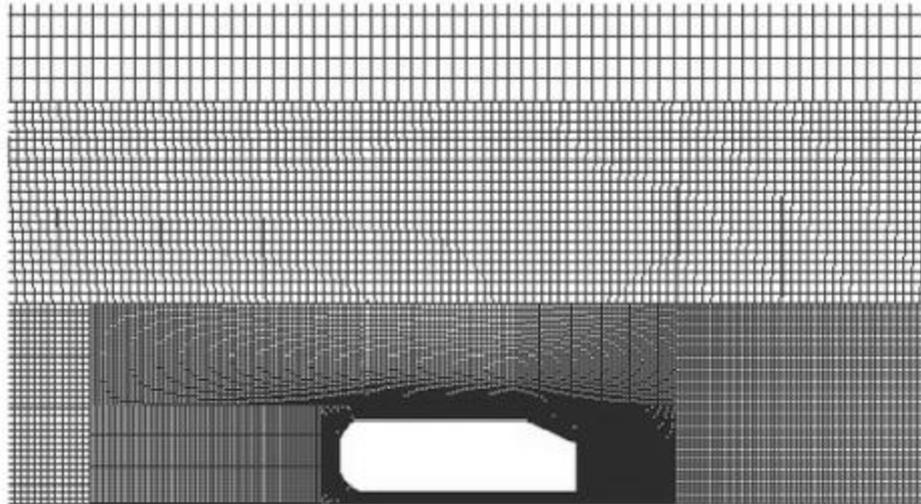
Après la spécification des caractéristiques du fluide utilisé (air) et les conditions aux limites, il s'agit de choisir le modèle de turbulence. Le schéma discrétisation, la méthode interpolation de pression et la méthode de couplage vitesse-pression sont résumé dans le tableau III. 5 ci-après :

**Tableau 3. 5:** Les schémas considérés.

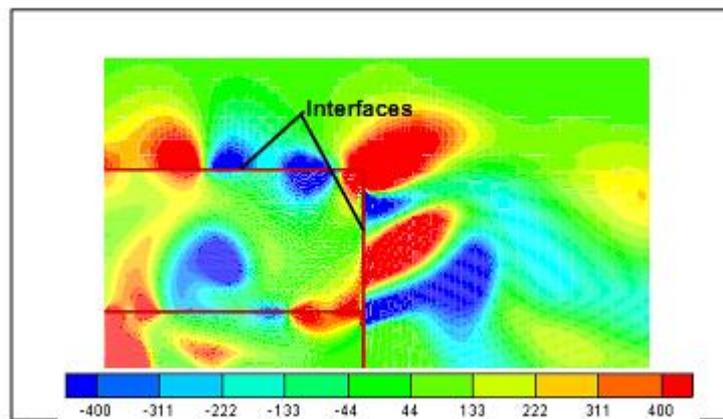
Schéma de discrétisation	QUICK
Interpolation de pression	Seconde-Ordre
Couplage vitesse-pression	Coupled

### 3.3.7. Choix de la configuration et de la résolution de la grille

Il s'agit de choisir la configuration de la grille pour mailler la géométrie 2D présentée sur la figure III.1.7. Pour cela il est mieux d'utiliser la technique des interfaces en respectant un rapport d'aspect de 0,5 à 0,7. (Figure III.13), au niveau des interfaces la présence des vorticités (Figure III.14) pénalisent ce choix de configuration de maillage. Comme solution, la subdivision de la surface en multi-domaines qui ont permis d'interchanger entre des cellules quadrilatères et des cellules triangulaires, des discontinuités au niveau des lignes de changement ont été observées.



**Figure 3. 13:** Technique des interfaces



**Figure 3. 14:** Champ de vorticité au niveau des interfaces.

A la présence d'un compromis (entre le nombre des nœuds et la discontinuité), nous avons utilisé une autre grille à base des cellules quadrilatères, sans avoir recours aux interfaces, cette configuration a permis de contrecarrer le problème de la vorticité avec une augmentation en nombre de nœuds (plus de 150.000 : inférieur à ce lui de la première grille). donne un aperçu sur la subdivision de la surface à mailler que nous avons retenue pour la suite de l'étude numérique.

Pour mettre en évidence le comportement de l'écoulement dans la couche limite (profil de vitesse, point de décollement, etc....), le maillage est raffiné près des parois(Figure 3.1.11.) de telle sorte que l'emplacement de chaque centroïde des cellules adjacentes aux parois sont à

$y_p = 0.001\text{mm}$ .

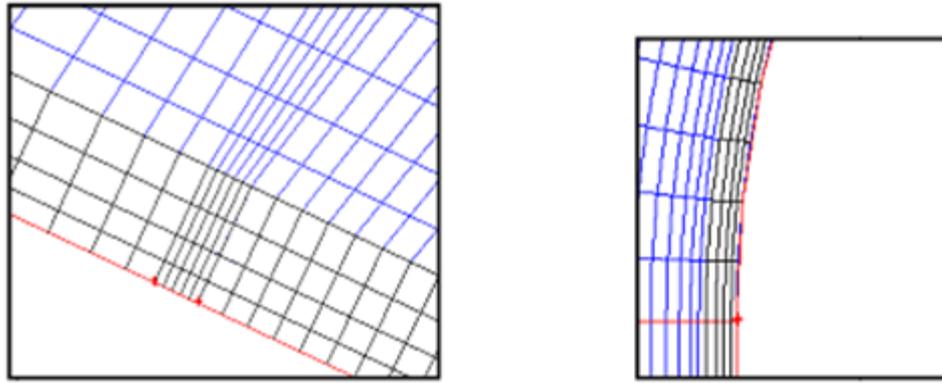


Figure 3. 15: Qualité du maillage près des parois

### 3.4. Méthodes de volumes finis

Le problème continu est formulé en termes d'équations de bilan (lois de conservation) sous forme intégrale s'appliquant à des sous-domaines quelconques de  $D$ . Le domaine  $D$  est discrétisé par des volumes élémentaires (ou cellules, ou volumes finis) pouvant se recouvrir partiellement, et le plus souvent définis par des maillages comme dans les méthodes de différences finies. Les inconnues  $p$  peuvent être les valeurs moyennes de  $f$  dans chaque cellule, ou plus généralement des valeurs de  $f$  en certains points de chaque cellule. Les équations discrètes résultent de l'application à  $f$  des équations de bilan dans chaque cellule.

#### 3.4.1. Procédure de résolution

Les équations qui gouvernent l'écoulement sont des équations aux dérivés partielles non linéaires qui n'ont pas de solution analytique d'où la nécessité de faire appel à une méthode de résolution numérique. Dans notre cas, Fluent été utilisé, incorporant la méthode des volumes finis, basée sur :

- Une génération du maillage : division du domaine physique en volumes de contrôles.
- Une discrétisation de différentes équations par intégration sur des volumes de contrôles permettant d'obtenir ainsi un système d'équations algébriques pour chaque variable dépendante du problème à résoudre.
- Mettre à jour des propriétés du fluide.
- Mettre à jour le champ de vitesse, c'est-à-dire la résolution des équations de transport de quantité de mouvement de  $u, v, w$ , en utilisant les valeurs courantes de pression.
- Corriger la pression si les vitesses trouvées dans l'étape précédente ne satisfont pas l'équation de continuité.
- Résoudre les équations de transport prenant compte des dernières valeurs

- trouvées dans ce qui précède.
- Tester la convergence, si celle-ci est atteinte, on arrête le processus de calcul.

### 3.5. Formulation mathématique

Les équations traduisant le transport de masse et de quantité de mouvement régissant les écoulements turbulent ou laminaire, stationnaire et instationnaire d'un fluide incompressible, sans transfert de chaleur avec les simplifications nécessaires sont faites dans le code FLUENT.

#### a) Equation du champ moyen

La décomposition de Reynolds est introduite dans les équations de Navier-stokes et les équations régissant pour un fluide incompressible s'écrivent comme suit.

#### b) La moyenne d'ensemble :

La moyenne d'ensemble de la quantité  $f$  à la position  $x$  et l'instant  $t$  est définie par :

$$\overline{f(x, t)} = \frac{1}{N} \sum_i^N f^{(i)}(x, t) \quad 3.1$$

#### c) La moyenne temporelle :

La moyenne temporelle est définie pour une seule expérience, une seule quantité à une seule position.

$$\bar{U}(x_j) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t U_i(x_j) dt \quad 3.2$$

$$\bar{P} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t P dt \quad 3.3$$

#### d) Equations de transport

Les équations qui régissent l'écoulement d'un fluide incompressible Newtonien sont :

- **Equation de continuité :**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0 \quad 3.4$$

- **Equations de quantité de mouvement (de Navier Stokes):**

La loi de conservation de quantité de mouvement traduite par les équations de Navier Stokes exprime tout simplement la loi fondamentale de la dynamique à un fluide Newtonien. Les équations de quantité de mouvement écrites suivants  $x_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) sont :

$$\underbrace{\frac{\partial U_i}{\partial t}}_{\text{instationnaire}} + \underbrace{U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j}}_{\text{convectif}} = - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i}}_{\text{pression}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \vartheta \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right)}_{\text{terme visqueux}} \quad 3.5$$

• **Décomposition statique**

Pour résoudre ce système une approche statique est utilisée. Les grandeurs caractéristiques instantanées de l'écoulement turbulent seront décomposées selon les règles de Reynolds comme suit : le premier représente le mouvement d'ensemble et le second le mouvement fluctuant, soient :

$$U_i = \bar{U}_i + \dot{u}_i, \dot{u}_i = 0 \quad 3.6$$

$$P = \bar{P} + \dot{p}, \dot{p} = 0 \quad 3.7$$

• **Les tensions de Reynolds**

Le formalisme des règles de Reynolds conduit en prenant la moyenne de chaque équation aux équations de Reynolds.

$$\frac{\partial}{\partial t} (U_i + \dot{u}) + (U_j + \dot{u}_j) \frac{\partial}{\partial x_j} (U_i + \dot{u}_i) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} (P + \dot{p}) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \vartheta \frac{\partial}{\partial x_i} (U_i + \dot{u}_i) \right) \quad 3.8$$

On moyenne ensuite ces équations et après calcul, on retrouve l'équation de continuité et celle de chaque celle de Navier-Stokes moyenné.

• **Equation de continuité :(conservation de la masse)**

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad 3.9$$

• **Equation de transport de quantité de mouvement :**

$$\underbrace{\bar{U}_j \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{U}_i)}_{\text{terme convectif}} = - \frac{1}{\rho} \underbrace{\frac{\partial p}{\partial x_i}}_{\text{effet de la pression}} + \underbrace{\vartheta \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_i^2}}_{\text{contrainte visqueuse}} + \frac{\partial}{\partial x_j} \underbrace{\overline{(-\vartheta \dot{u}_i \dot{u}_j)}}_{\text{contrainte de reynolds}} \quad 3.10$$

En utilisant le théorème de Green Ostrogradski, les intégrales sur le volume peuvent être réécrites sous forme d'intégrale sur la surface enveloppant le volume, et l'équation (III.9) deviendra alors[15] :

$$\iint_S (\rho \phi \vec{V}) \cdot \vec{n} ds = \iint_S (\Gamma_\phi \text{grad} \phi) \cdot \vec{n} ds + \iiint_V S_\phi dV \quad 3.11$$

Après intégration, l'équation (3.10) donne

$$\sum_f^{N_{faces}} \rho \vec{v}_f \phi_f \vec{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_\phi (\nabla \phi)_n \vec{A}_f + \bar{S}_\phi V \quad 3.12$$

Où

$N_{faces}$  = nombre de faces de la cellule

$\phi_f$  = valeur de  $\phi$  évaluée à la face  $f$

$\rho \vec{v}_f \phi_f \vec{A}_f$  = débit massique à travers la face  $f$

$\vec{A}_f$  = surface de la face  $f$

$(\nabla \phi)_n$  = grandeur de  $\nabla \phi$ , normale à la face  $f$

$\bar{S}_\phi$  = source évaluée au centre du volume  $V$

$V$  = volume de la cellule.

Les équations résolues par Fluent prennent la même forme générale que celle donnée ci-dessus et s'appliquent aux différents maille des volumes de contrôle.

#### 4. Résultats et discussions

##### 4.1.1. Étude de la stabilité du maillage

Plusieurs maillages avec différents nombres de nœuds ont été simulés pour déterminer le maillage optimal avec :

- Vitesse d'entrée  $U = 16$  m/s,
- Pas de temps  $\Delta t = 10^{-4}$  s,
- un nombre de pas  $N = 20000$  pas,
- Maillage fin avec un nombre de nœud entre 100000 et 300000 nœuds,
- Maillage raffiné avec un nombre de nœuds entre 300000 et 400000 nœuds,
- Maillage plus raffiné avec un nombre de nœuds supérieurs à 400000 nœuds.

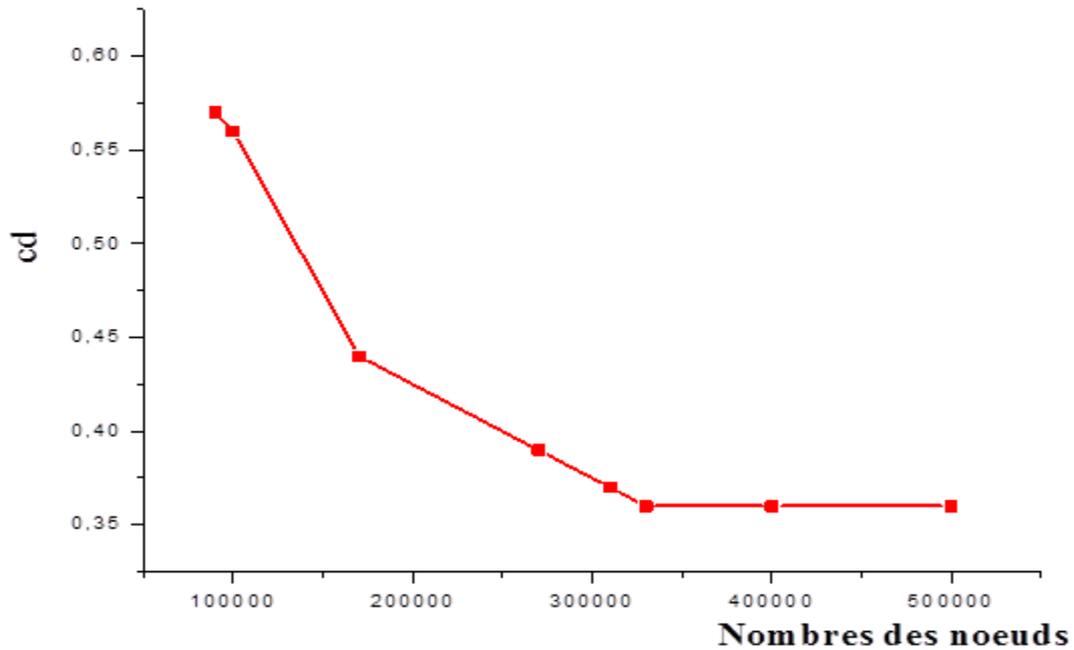
Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau 4. 1:** Choix du maillage approprié

Type de maillage	Coefficient de trainée moyen ( $\overline{Cd}$ )
Fin (100000 à 300000 nœuds)	0.57 à 0.38
Raffiné (300000 à 400000 nœuds)	0.38 à 0.36
Plus raffiné ( $\geq 400000$ nœuds)	0.36

D'après les résultats obtenus le choix est porté sur un maillage qui donne un coefficient de trainée moyen optimal  $\overline{Cd} = 0.36$ .

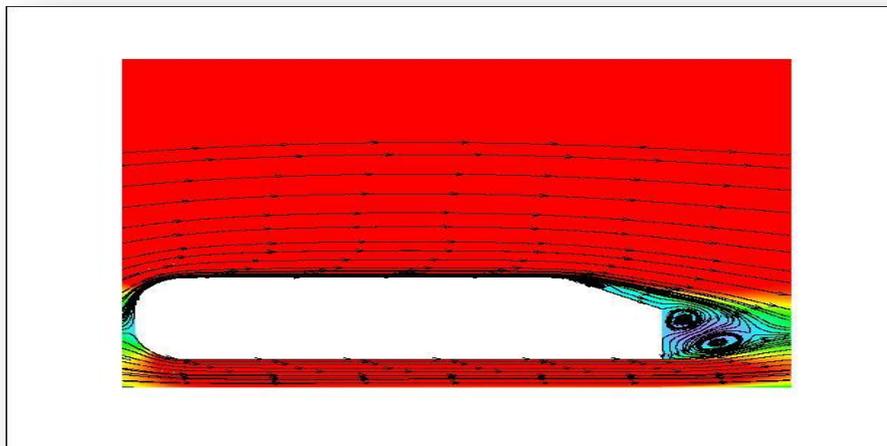
Le choix est basé sur l'évolution du coefficient de trainée moyen  $\overline{Cd}$  en fonction de nombres de nœuds comme il est illustré sur le graphe suivant (figure 4.1).



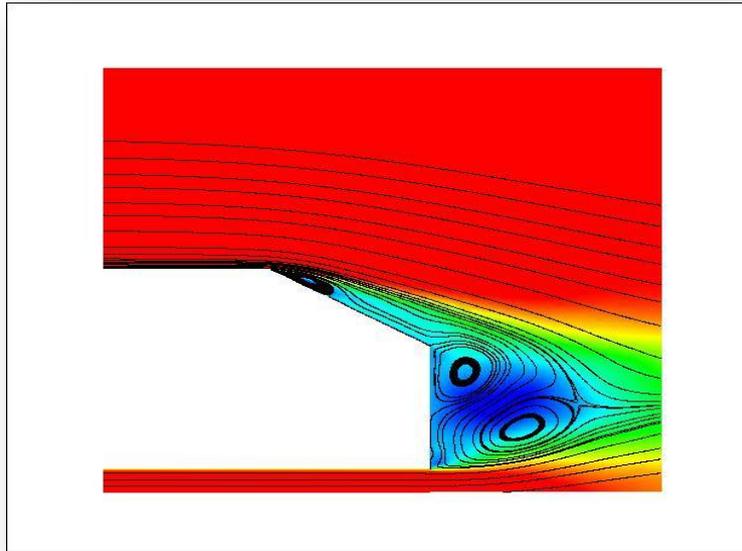
**Figure 4. 1:** Stabilité du maillage et l'évolution de coefficient de traînée

#### 4.2. Structure de l'écoulement sans contrôle

L'écoulement fait apparaître des instabilités qui conduisent à la formation d'une structure tourbillonnaire émise dans le sillage. La structure de l'écoulement est représenté sur la figure suivante (figure IV.2) où on remarque la présence de deux vortex derrière le culot et un tourbillon sur le point de la lunette. La simulation numérique avec le modèle de turbulence DES (Detached Eddy Simulation) donne un coefficient de traînée moyen  $\overline{C_d}=0.36$ .



**Figure 4. 2:** Champs de vitesse et les lignes de courant

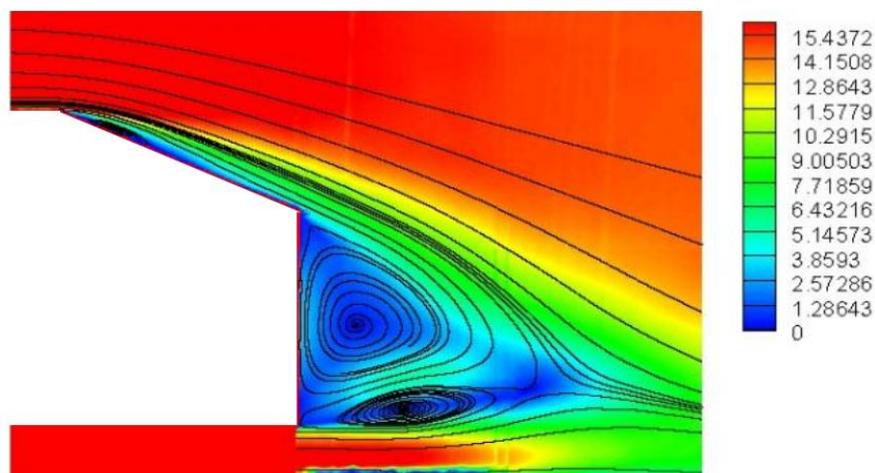


**Figure 4. 3:** Structure de l'écoulement simulation numérique (DES).

Les résultats obtenus par le modèle de turbulence DES (Detached Eddy Simulation) indiquent la présence d'une zone de recirculation derrière le corps, une petite zone de recirculation sur la lunette, et deux vortex derrière le culot (un supérieur et l'autre inférieur), ces résultats sont identiques à ceux donnés par la PIV TOUNSI [27] (Figure 4.3).

Les résultats obtenus par la simulation numérique avec le modèle DES sont identiques avec les résultats expérimentaux et les études numériques cités dans les figures suivantes

(Figure 4. 4et Figure 4. 5 ).



**Figure 4. 6:** Résultat expérimentale Structure obtenue en PIV [27]

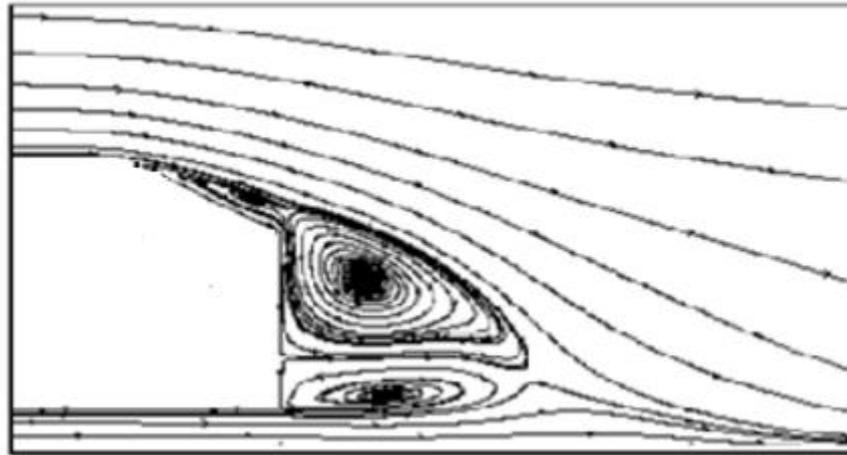


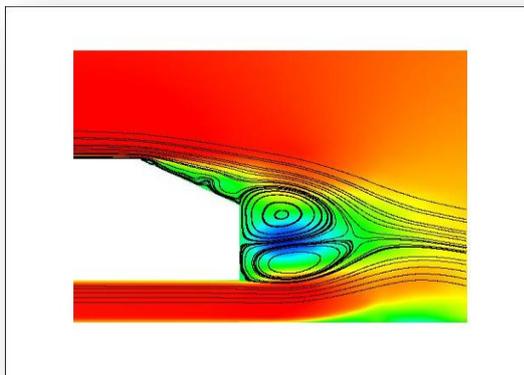
Figure 4. 7: Structure obtenue par Guilmineau [28]

### 4.3. Ecoulement moyen instantané sans contrôle

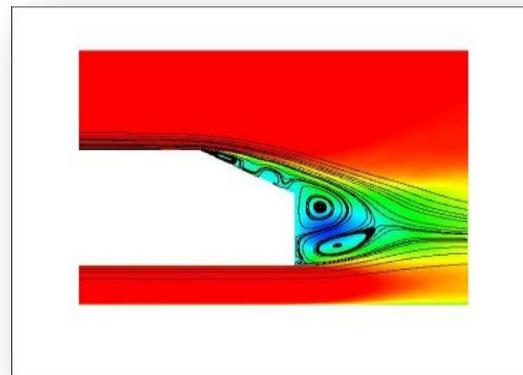
#### 4.3.1. Structure de l'écoulement

Les champs des vitesses moyennées et les lignes de courants sont calculé a déférents instants de simulation numérique , et les résultats sont représentés dans la figure suivante :

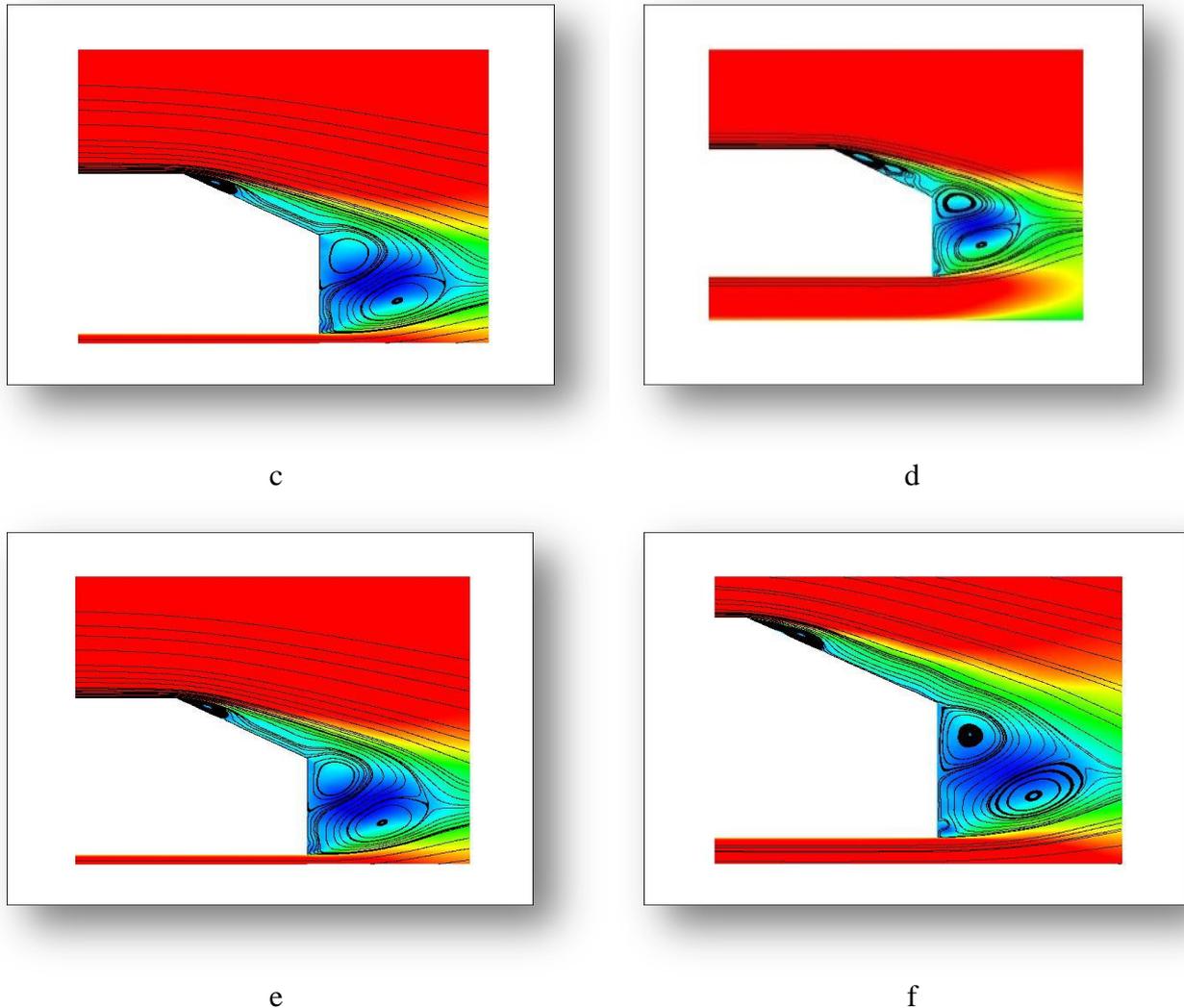
Le temps de simulation est étendu jusqu'à avoir une bonne convergence du champ moyen de l'écoulement.



a



b

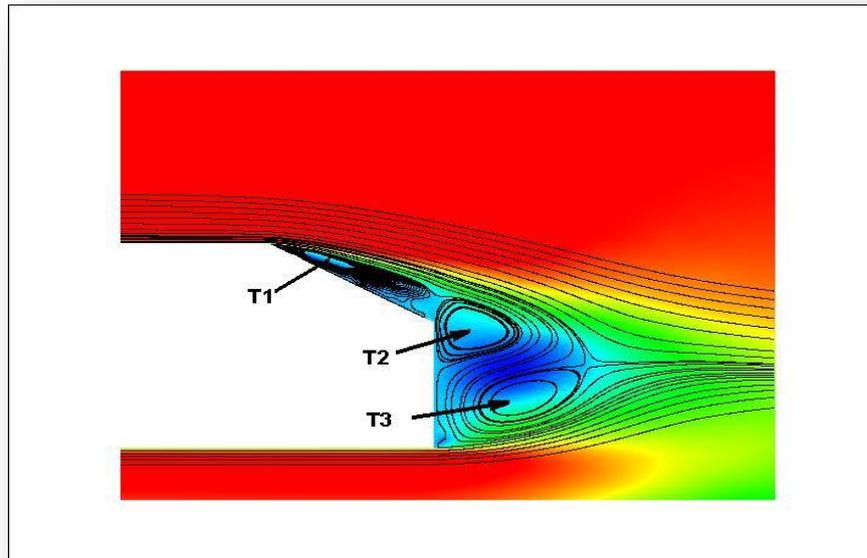


**Figure 4. 8:** La vitesse moyenne et lignes de courant dans le sillage sans contrôle au cours du temps  
 $a=0.27s, b=0.5s, c=0.8s, d=1s, e=1.5, f=2s$

LA simulation numérique est étendue jusqu'à l'obtention de la convergence du champ moyen de l'écoulement. LA simulation numérique est étendue jusqu'à l'obtention de la convergence du champ moyen de l'écoulement.

Ces structures tourbillonnaires sont issues de l'enroulement des lignes de cisaillement créées par le décollement des couches limites aux niveaux des arêtes adjacentes au pavillon et à la lunette arrière, d'une part, puis au culot et au soubassement d'autre part.

Les structures tourbillonnaires sont issues de l'enroulement des lignes de cisaillement créées par le décollement des couches limites aux niveaux des arêtes adjacentes au pavillon et à la lunette arrière, d'une part, puis au culot et au soubassement d'autre part.

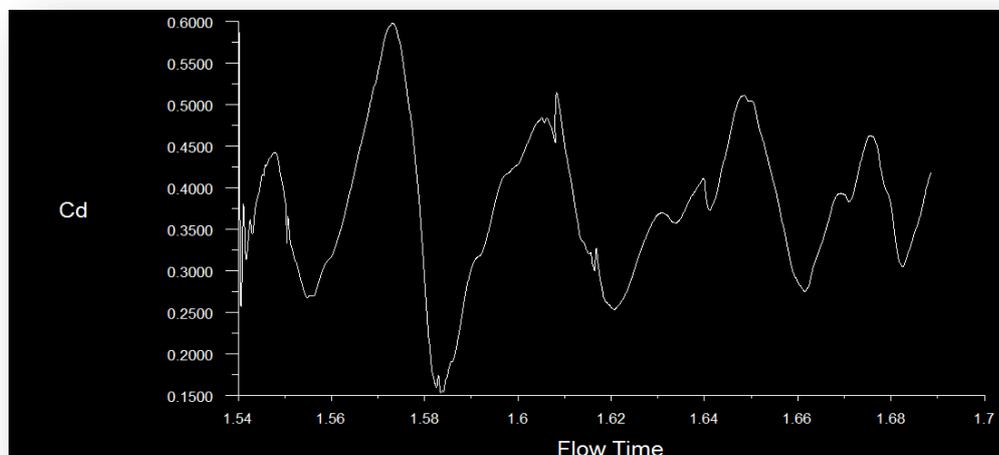


**Figure 4. 9:** Convergence du champ moyen

#### 4.4. Evolution temporelle du Coefficient de traînée

La présence des fluctuations (minimas et des maximas) dans le signal de la traînée est due à la formation des structures tourbillonnaires en aval de la géométrie. L'évolution temporelle de la traînée aérodynamique est liée à l'émission tourbillonnaire dans le sillage. La figure IV.5 montre l'évolution instantanée de la traînée le long de la simulation numérique.

On remarque que le coefficient de traînée moyen converge vers une structure moyenne à partir de 1s.

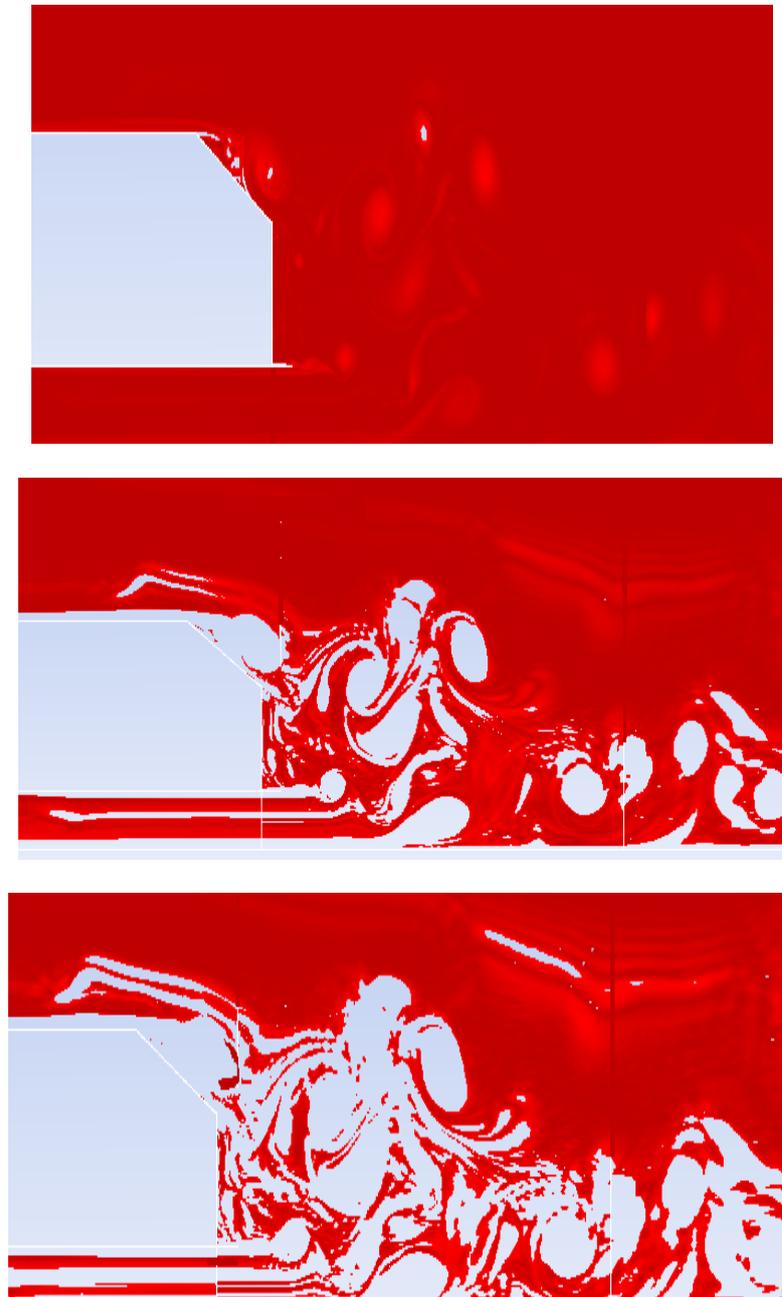


**Figure 4. 10:** Evolution temporelle du coefficient de traînée lors de la simulation.

**4.5. Champ instantané de vorticité**

Les structures tourbillonnaires qui se développent dans le sillage le long de la simulation sont représenté par un champ instantané de vorticité.

On remarque sur le haut de la lunette arrière le développement des structures tourbillonnaires et d'autres sur le culot ces tourbillons seront advectés dans le sillage, puis ils se dissipent par effet visqueux.



**Figure 4. 11:** Champ de vorticité instantané.

**4.6 : Evolution des pressions statiques :**

L'évolution des pressions statiques engendrées à la surface de la géométrie sont dues aux pertes d'énergie volumique observées dans le sillage. Cette évolution est reportée sous forme de coefficient de pression statique  $C_p$  (Figure 4.10 et Figure 4.11).

Les coefficients moyens de pression statique sont reportés suivant  $Y$  la direction perpendiculaire à l'écoulement telle que l'origine coïncide avec le bas du culot. L'ordonnée  $Y$  d'un point de la surface est adimensionnée par la hauteur  $HA$  du véhicule.

La distribution des coefficients de pression statique  $C_p$  sur la lunette arrière et sur culot est représenté sur les Figures ( 4.10,11) l'évolution du  $C_p$  est en fonction de la hauteur adimensionnelle ( $Y/HA$ ).

Le long de la lunette arrière, et le culot on constate que toutes les valeurs de  $C_p$  sont négatives. Ce qui signifie la présence d'une dépression sur cette paroi. La chute de pression est due au décollement qui se produit sur le haut de la lunette arrière et la dépression sur le culot.

**Sur la lunette arrière :** Les valeurs de  $C_p$  varient entre: -1.6 et -0.2 ces faibles valeurs de  $C_p$  résultent des pertes initiées par la formation de la bulbe T1, ensuite y a une évolution des coefficients de pression statique d'une façon continue, cette évolution continue traduit par un rattachement de l'écoulement.

**Au culot:** les valeurs de  $C_p$  varient entre  $C_p=-0.40$  et  $cp=-0.20$ . Les valeurs de  $C_p$  négatives sur la lunette arrière et au culot montrent que les distributions de pression statique à l'arrière de la géométrie sont sources de traînée. Pour la réduire, il est nécessaire d'augmenter les pressions statiques en retardant le décollement de lunette arrière et la formation de la structure tourbillonnaire T1.

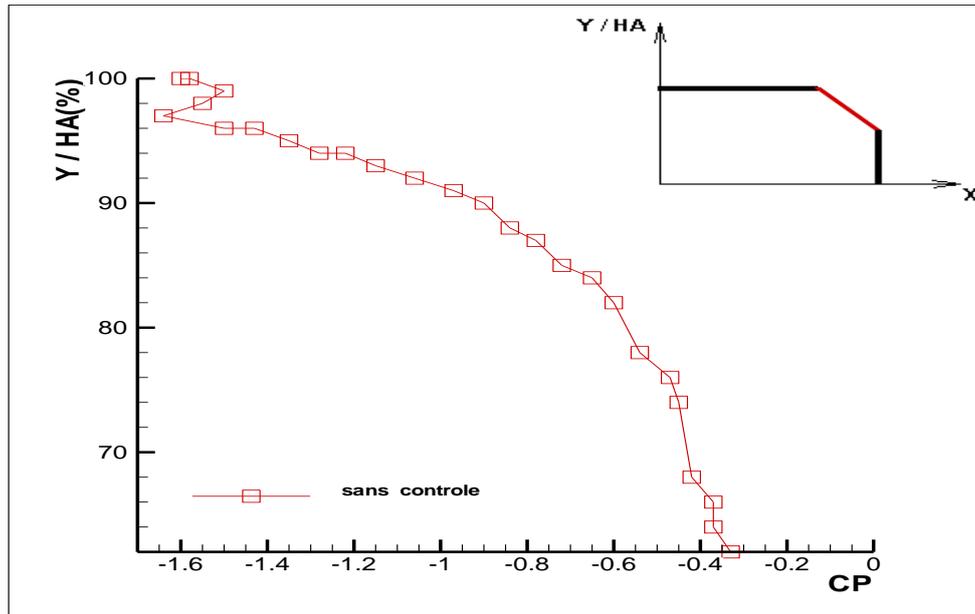


Figure 4.12: Distributions de CP sur la lunette arrière

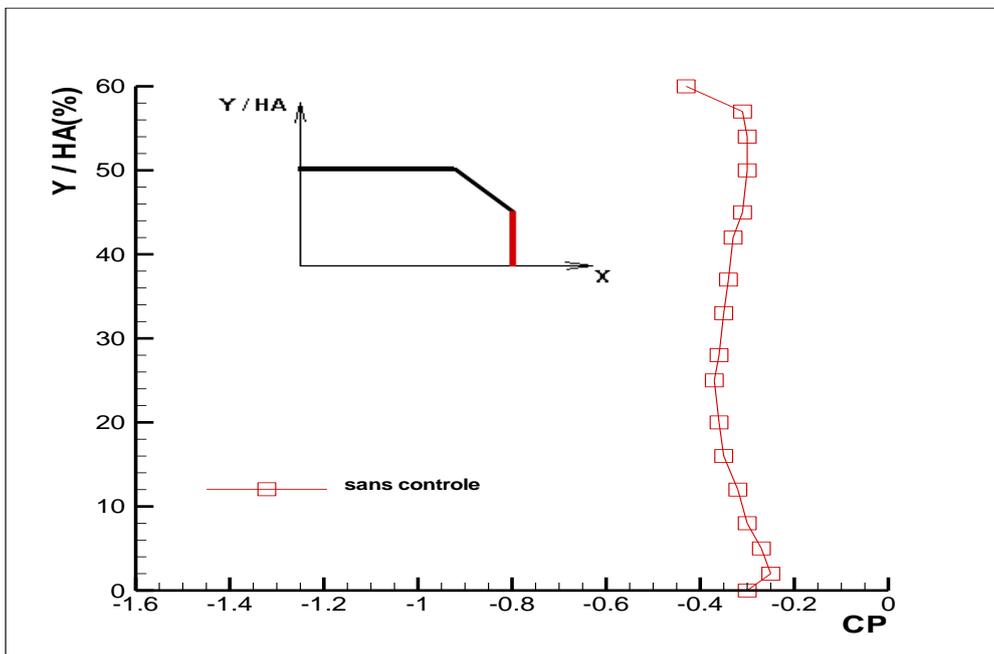


Figure 4.13: Distributions de CP sur la lunette arrière

#### 4.7.Caractérisation fréquentielle du sillage

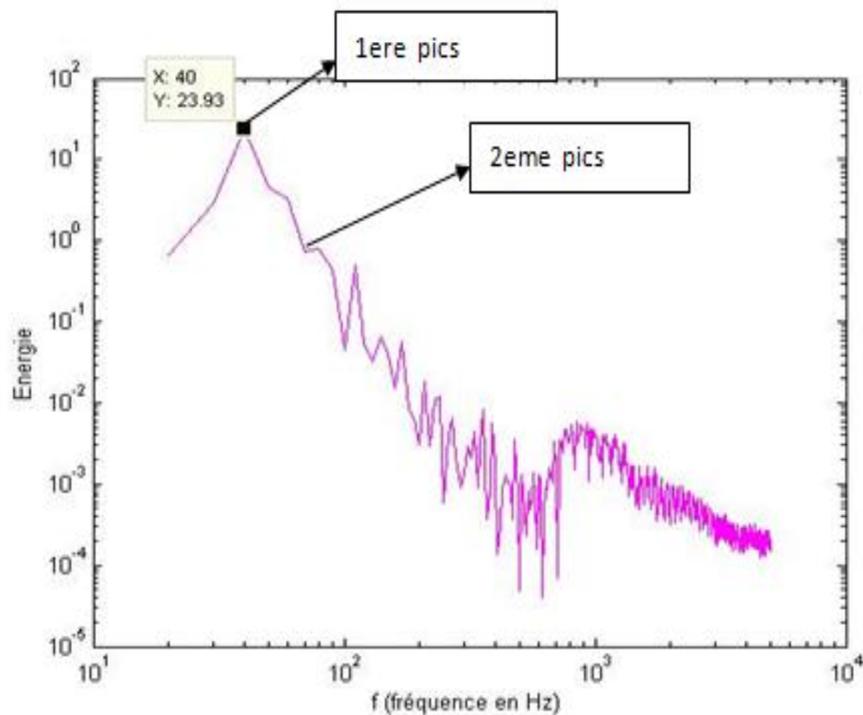
Deux pics de puissance se dégagent (Figure 4.12 ) à  $f = 40\text{Hz}$  et  $f = 55 \text{ Hz}$  correspondent aux fréquences de détachements des structures tourbillonnaires derrière le culot.

Les valeurs de nombre de strouhal, construits avec  $L_{ref}= HA$  et  $U = 16 \text{ m/s}$ , associés à ces deux fréquences sont respectivement égaux à  $St_1= 0.72$ ,  $St_2=0.99$ . LECLERC [28] trouve par une analyse spectrale des signaux de vitesses récupéré par deux sondes placées à  $10^{-2} \text{ m}$  en aval de la géométrie, sur deux axes prolongeant respectivement la surface haute et le soubassement

deux fréquences d'émission  $f_1=18$  Hz et  $f_2=12$  Hz pour  $St_1= 0.13$ ,  $St_2=0.14$ . Ces deux pics ont été associés à l'émission tourbillonnaire qui s'effectue sur le soubassement et au pavillon.

Les fréquences des deux pics due à l'émission de deux tourbillon celui de sous bassement et celui de pavillon ce qui permis de mesuré deux fréquences. Le coefficient de traînée ( Cd) est sensible à l'émission des deux structures émise par le sous bassement et le pavillon.

Dans le cas naturel le détachement tourbillonnaire s'effectue au niveau de la rupture de pente et au niveau du soubassement à des fréquences  $St_1=0.72$  et  $St_2=0.99$ différents.



**Figure 4. 14:** Densités Spectrales de Puissance (DSP) normé du signal de traînée sans contrôle.

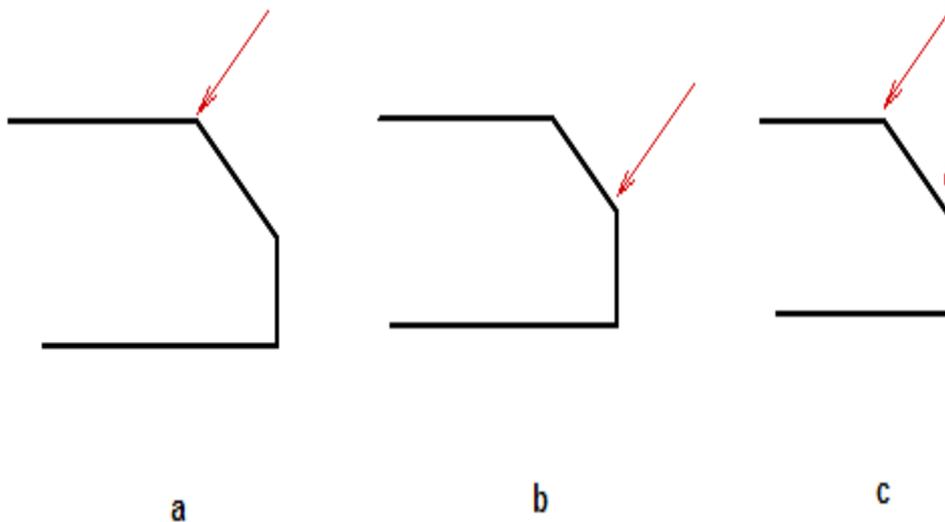
#### 4.8 Ecoulement avec contrôle

Actuellement, le contrôle des écoulements trouve des applications nombreuses et variées car l'aptitude à modifier la dynamique d'un fluide permet d'obtenir une amélioration des performances aérodynamiques. En particulier, contrôler le phénomène de décollement de la couche limite. Il s'agit de diminuer la traînée aérodynamique, cette dernière est analysée en pourcentage de réduction de  $C_d$  par rapport au cas de référence sans contrôle.

Les distributions de coefficient de pression statique  $C_p$  relevés sur la lunette arrière et le culot et les Densités Spectrales de Puissance complètent l'analyse.

Les paramètres de contrôle dans cette étude sont

- L'amplitude du jet  $U_{JET\ max}$ , et la fréquence du jet.
- Epaisseur de la fente, et sa position.
- La direction du jet est normale à la paroi.
- Fréquences réduites et les coefficients de quantité de mouvement.
- $F^+ = 6.12$ ,  $C_\mu = 8.68 \times 10^{-6}$
- $F^+ = 6.48$ ,  $C_\mu = 1.1 \times 10^{-5}$
- $F^+ = 9.00$ ,  $C_\mu = 1.1 \times 10^{-5}$



**Figure 4. 15:** Position des fentes sur la géométrie

4.8.1 Contrôle sur la lunette arrière :

Le champ de vitesse et les lignes de courant nous renseignent sur la réduction de trainée lors de l'activation de la fente sur la lunette arrière.

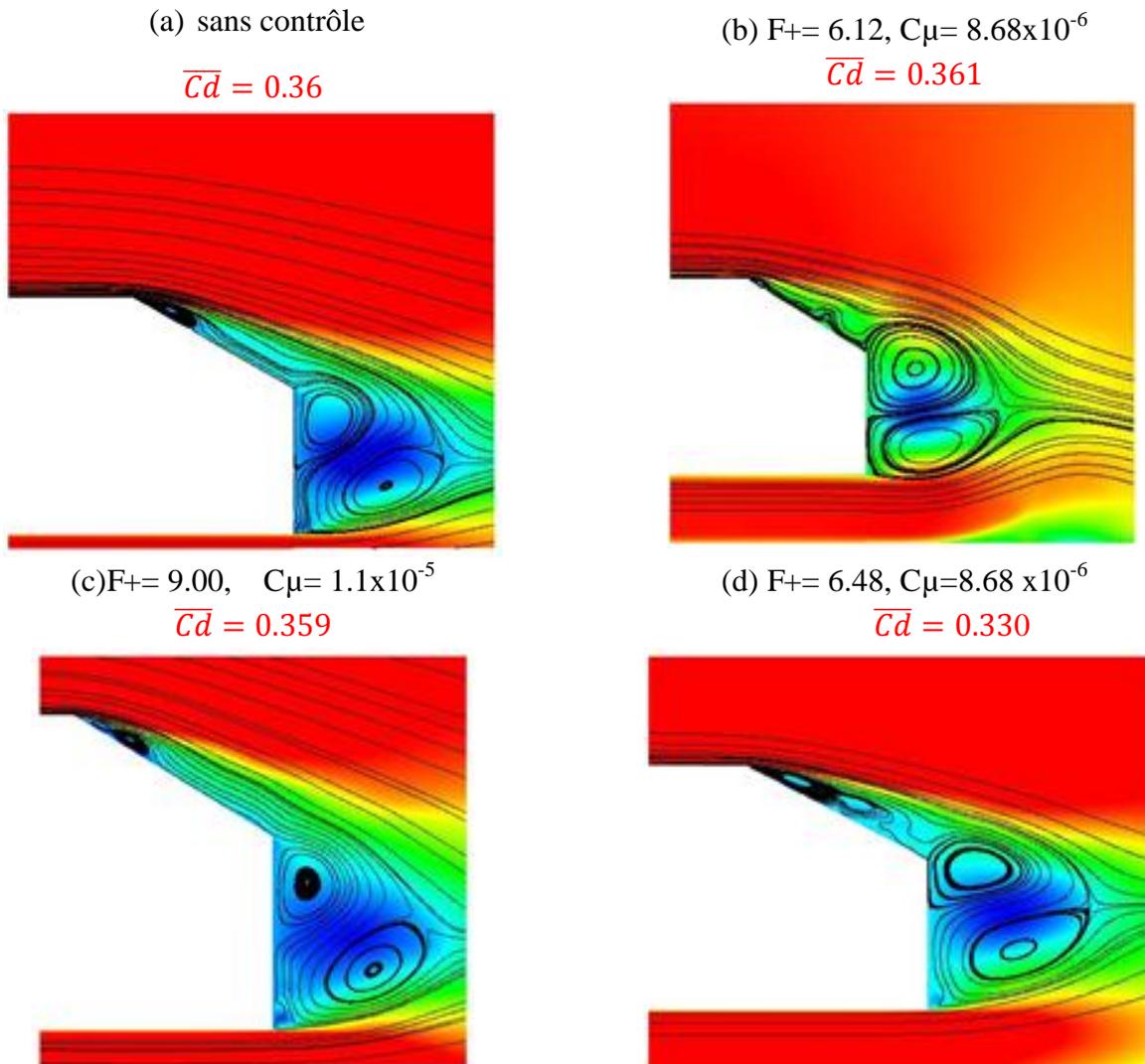


Figure 4. 16: Vitesse moyenne et lignes de courant dans le sillage avec et sans contrôle sur la lunette arrière.

D’après les résultats obtenus pour le contrôle sur la lunette arrière avec la fréquence réduite  $F^+ = 6.48$ ,  $C_\mu = 8.68 \times 10^{-6}$  on constate une réduction importante du coefficient de traînée (réduction de 9%) par visualisation on remarque :

- Réduction de la taille le bulbe décollé T1 avec son déplacement du a l’injection du jet synthétique sur la rupture de la pente .
- Réduction de la taille du vortex supérieur
- Déplacement du vortex inférieur

Ce qui conduit à la réduction du coefficient de traînée

Le tableau suivant représente la caractéristique du sillage avec contrôle

**Tableau 4. 2:** Caractéristique du sillage

	Centre du vortex supérieur (mm)	Centre du vortex inférieur (mm)	Zone de recirculation (mm)
Sans contrôle	(1092.01, 170)	(1139.7, 71.18)	92.54
Avec contrôle $F^+ = 6.12$ , $C_\mu = 8.68 \times 10^{-6}$	(1088.02, 166)	(1135.8, 66.23)	88.11
Avec contrôle $F^+ = 6.48$ , $C_\mu = 8.68 \times 10^{-6}$	(1111.01, 165.02)	(1142.25, 60.24)	96.95
Avec contrôle $F^+ = 9.00$ , $C_\mu = 1.1 \times 10^{-5}$	(1086.02, 185)	(1136.3, 66.51)	85.14

4.8.2 Contrôle sur le culot :

Champ des vitesses et lignes de courant obtenus par jet synthétique sur le culot représenté sur la figure suivante.

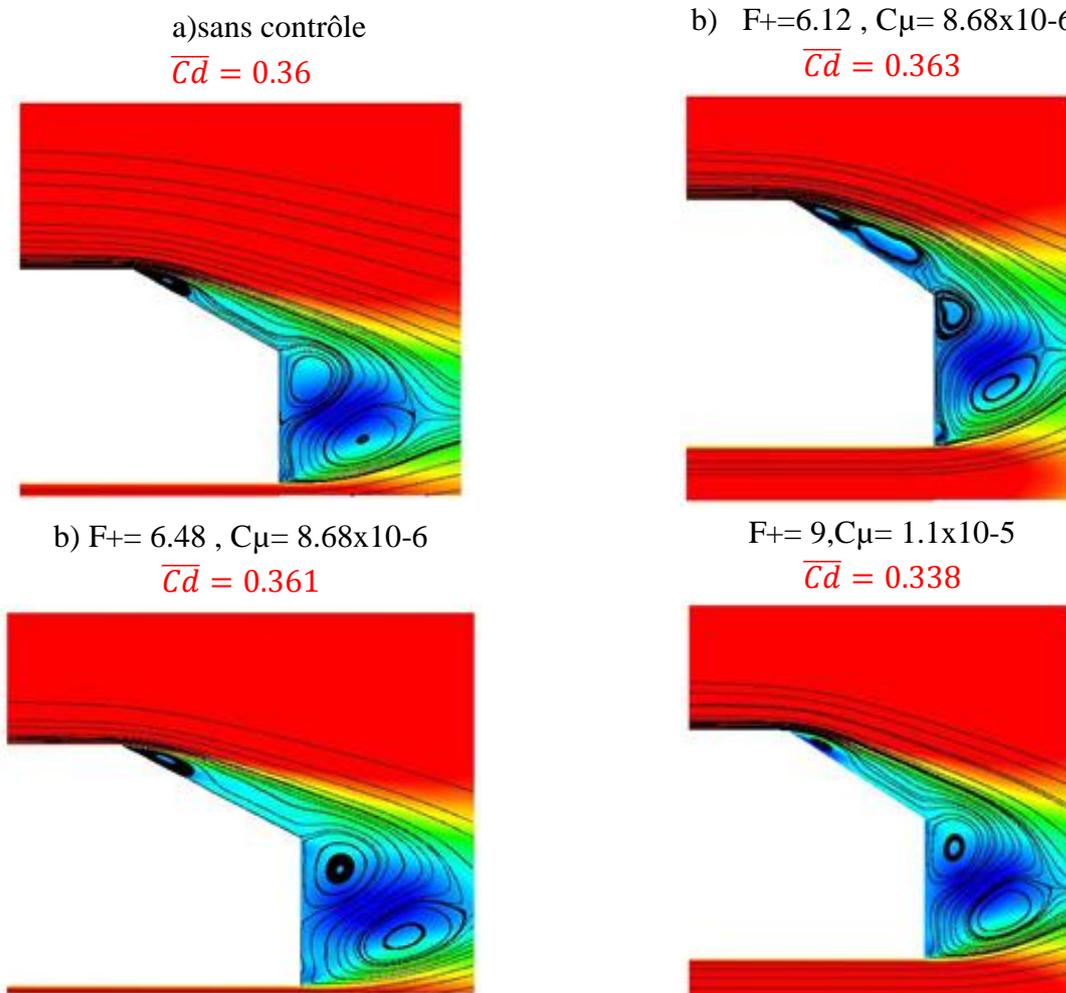


Figure 4. 17: Structure de l'écoulement contrôle sur le culot.

Pour le contrôle sur le culot le jet synthétique avec  $F_+ = 9, C_\mu = 1.1 \times 10^{-5}$  nous donne une réduction de 6.5% de la traînée aérodynamique .

Même chose que précédemment réduction de la taille des deux vortex longitudinaux, l'écrasement du vortex inférieur qui dû au déplacement du vortex supérieur, cela peut bien expliquer la réduction de la traînée. Une réduction de la bulbe T1 dans les 3ème cas et augmentation de cette dernière pour les deux autres cas .

Le tableau suivant donne la caractéristique du sillage avec contrôle

Tableau 4. 3: Caractéristique du sillage

	Centre du vortex supérieur (mm)	Centre du vortex inférieur (mm)	Zone de recirculation (mm)
Sans contrôle	(1092.01, 170)	(1139.7, 71.18)	92.54
Avec contrôle $F+=6.48, C\mu=8.68 \times 10^{-6}$	(1095.02, 166.04)	(1145.7, 75.23)	110.64
Avec contrôle $F+= 6.48, C\mu= 8.68 \times 10^{-6}$	(1085.02, 786)	(1135, 69.25)	100.45
Avec contrôle $F+=6.48, C\mu=1.1 \times 10^{-5}$	(1101.12, 166.3)	(1150, 55.58)	85.02

4.8.2 Contrôle sur la lunette arrière et le culot

Champ de vitesses et de lignes de courant par jet combiné donné par la figure suivante

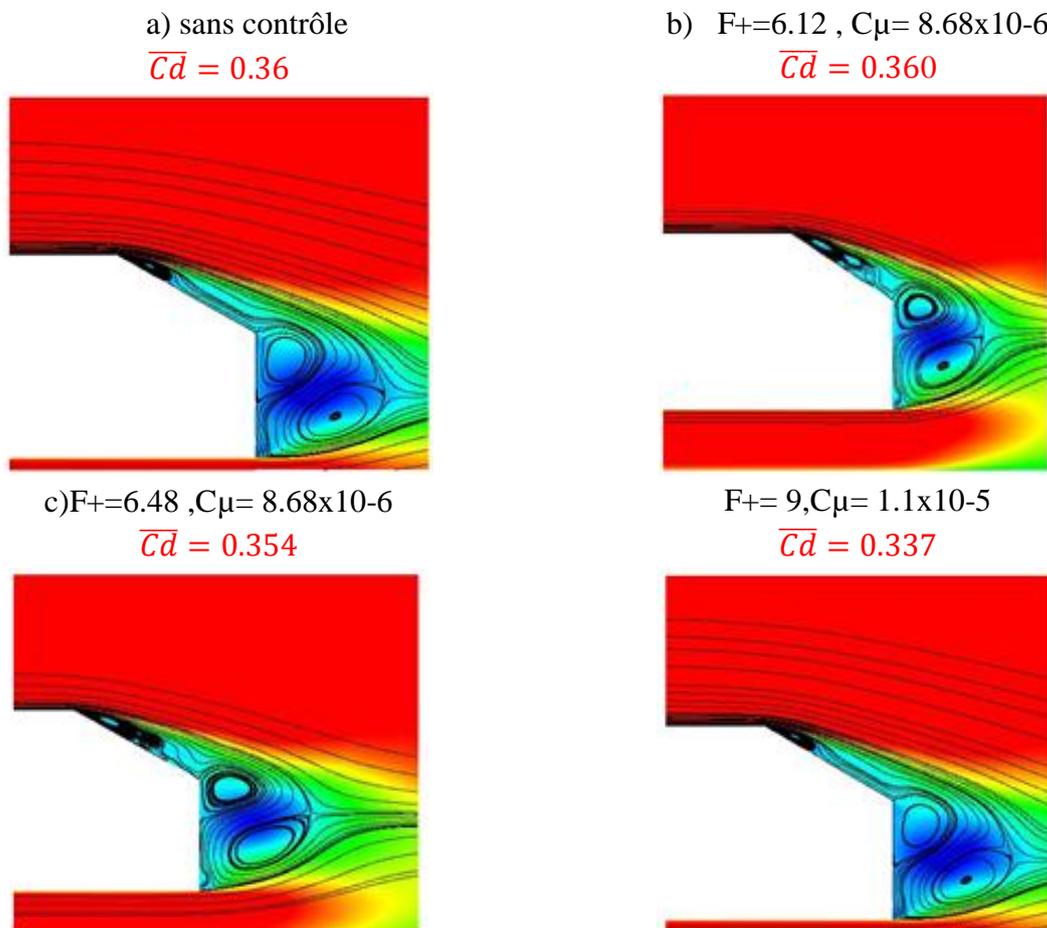


Figure 4. 18: Structure de l'écoulement contrôle sur la lunette et le culot

Lors du contrôle combinée on obtient une réduction de coefficient de trainée de 6.8% pour un jet synthétique de  $F+= 9, C_{\mu}= 1.1 \times 10^{-5}$ . On remarque toujours une réduction du coefficient de trainée

Réduction de la taille le bulbe décollé T1 dans les 3<sup>eme</sup> cas du jet.

Réduction de la taille du vortex inférieur

Déplacement du vortex supérieur

Ce qui conduit à la réduction du coefficient de trainée

Le tableau suivant représente la caractéristique du sillage avec contrôle

**Tableau 4. 3:** Caractéristique du sillage

	Centre du vortex supérieur (mm)	Centre du vortex inférieur (mm)	Zone de recirculation (mm)
Sans contrôle	(1092.01, 170)	(1139.7, 71.18)	92.54
Avec contrôle $F+=6.48, C_{\mu}=8.68 \times 10^{-6}$	(1088, 166.23)	(1144.23, 61.55)	86.65
Avec contrôle $F+= 6.48, C_{\mu}= 8.68 \times 10^{-6}$	(1083.78, 178.23)	(1165.23, 68.24)	86.12
Avec contrôle $F+=6.48, C_{\mu}=1.1 \times 10^{-5}$	(1110.66, 175.33)	(1177.22, 67.75)	84.33

**4.9 L'impact de la fréquence réduite sur l'écoulement :**

4.9.1 Contrôle sur la lunette arrière

La figure suivante représente la variation du coefficient de traînée moyen, en fonction de la fréquence réduite avec coefficient de quantité de mouvement, sur la lunette arrière. On obtient une réduction de traînée de 9% pour une fréquence  $F+=6.48$ ,  $C\mu= 8.68 \times 10^{-6}$  et une réduction de 0.2% pour  $F+= 9, C\mu= 1.1 \times 10^{-5}$ .

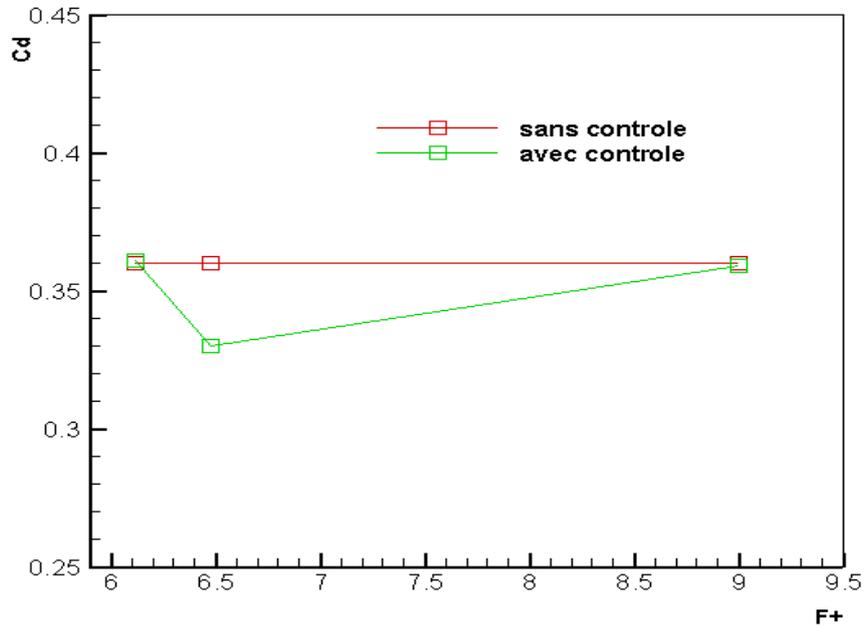


Figure 4. 19: Variation de coefficient de trainée en fonction de la fréquence réduite

4.9.2 Contrôle sur le culot

Pour le cas de contrôle sur culot (figure 4.18), on remarque une réduction de coefficient de traînée de l'ordre de de 6.5% pour un jet de  $F+=9.00$ ,  $C\mu= 1.1 \times 10^{-5}$ . Par contre les deux autres cas donnent une augmentation de la traînée.

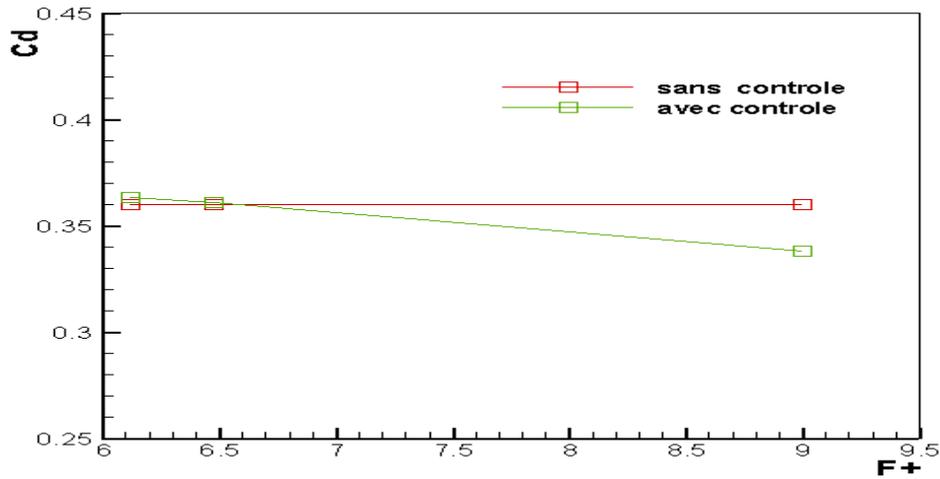


Figure 4. 20: Variation de coefficient de trainée en fonction de la fréquence réduite

### 4.9.3 Contrôle sur la lunette arrière et le culot

Pour un jet combinée sur le culot et lunette arrière(figure 4.19), une réduction du coefficient de trainée de l'ordre de 1.6% et 6.8% est obtenu pour les deux cas respectives  $F+=6.48, C_{\mu}=8.68 \times 10^{-6}$  et  $F+=9.00, C_{\mu}=1.1 \times 10^{-5}$ .

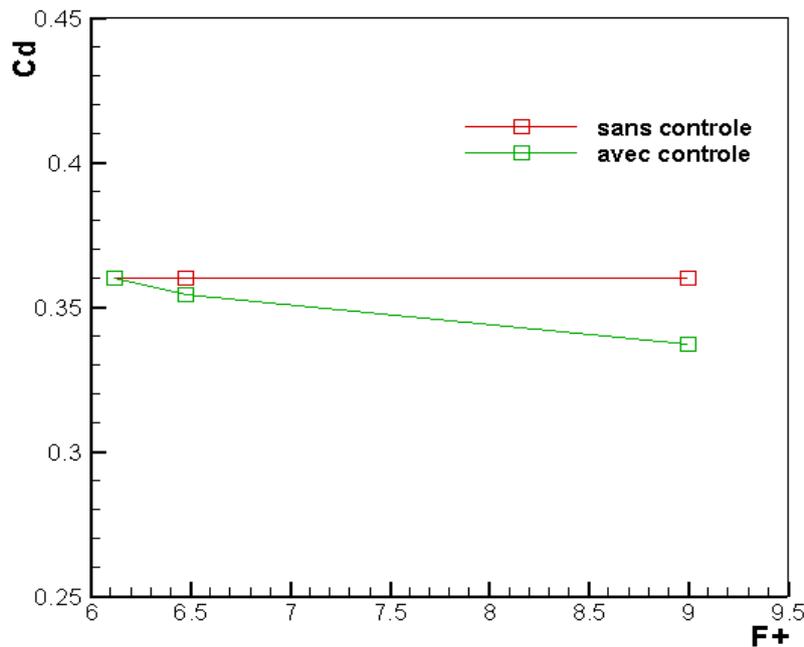


Figure 4. 21: Variation de coefficient de trainée en fonction de la fréquence réduite

4.10 Distribution de coefficient de pression CP

4.10.1 Contrôle sur la lunette arrière

Les coefficients de pression statique augmentent dans le culot et dans la lunette arrière cela du a la région décollée qui existe dans le sillage, on constate une importante augmentation de Cp au cours de l'écoulement sur la lunette arrière dans la zone  $60\% \leq Y/HA \leq 95\%$ . Pour l'écoulement dans le culot une importante augmentation du Cp est observé dans la zone de  $5\% \leq Y/HA \leq 58\%$ . L'augmentation du Cp peut être expliqué par la réduction du Cd obtenu (9%). les résultats sont illustrés dans la figure suivante.

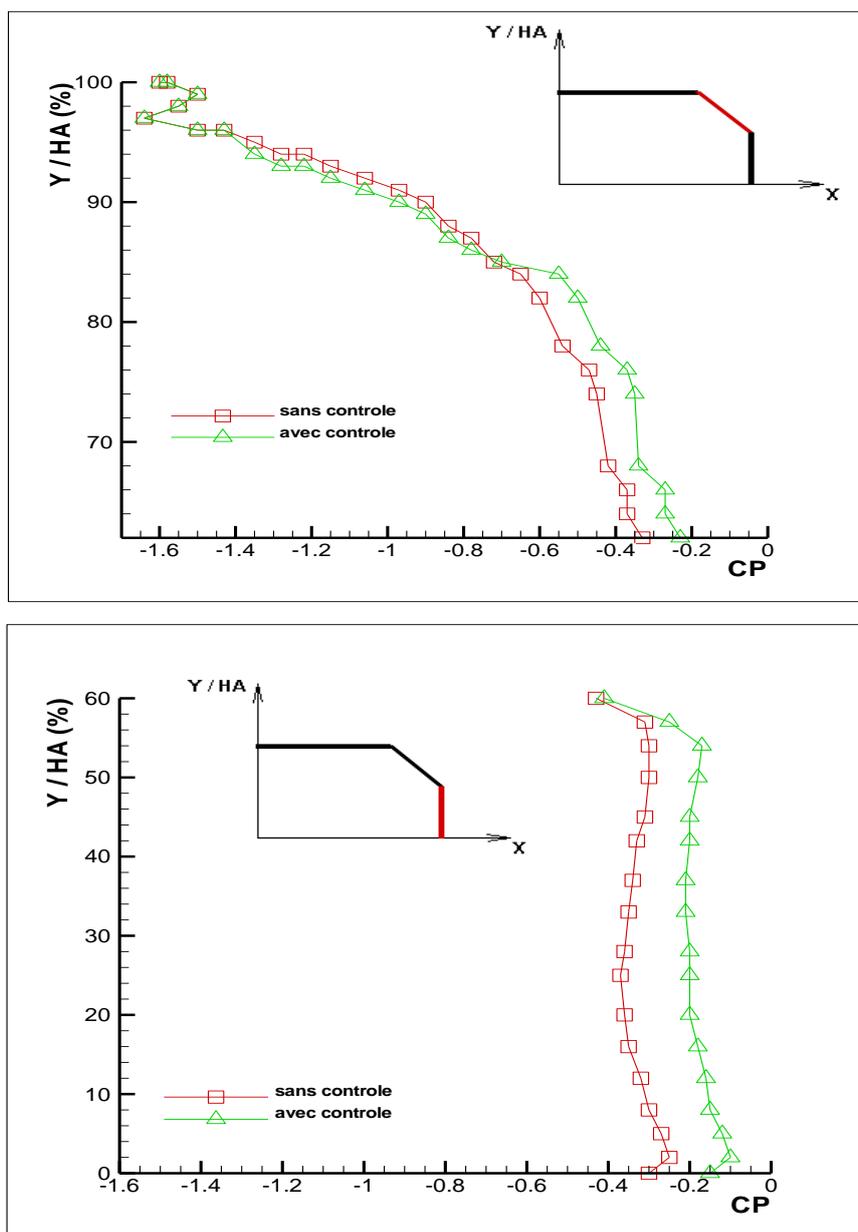


Figure 4. 22: Distributions de Cp en aval de la géométrie simplifiée sans et avec contrôle

4.10.2 Contrôle sur le culot

Dans le cas de contrôle sur le culot la variation du  $C_p$  sur la lunette arrière est presque négligeable ou très faible, sur le culot on remarque une augmentation de  $C_p$  dans la zone de  $5\% \leq Y/HA \leq 40\%$ . La faible variation du  $C_p$  du a la faible réduction de la trainée, la figure suivante montre la distribution du  $C_p$  sur le culot .

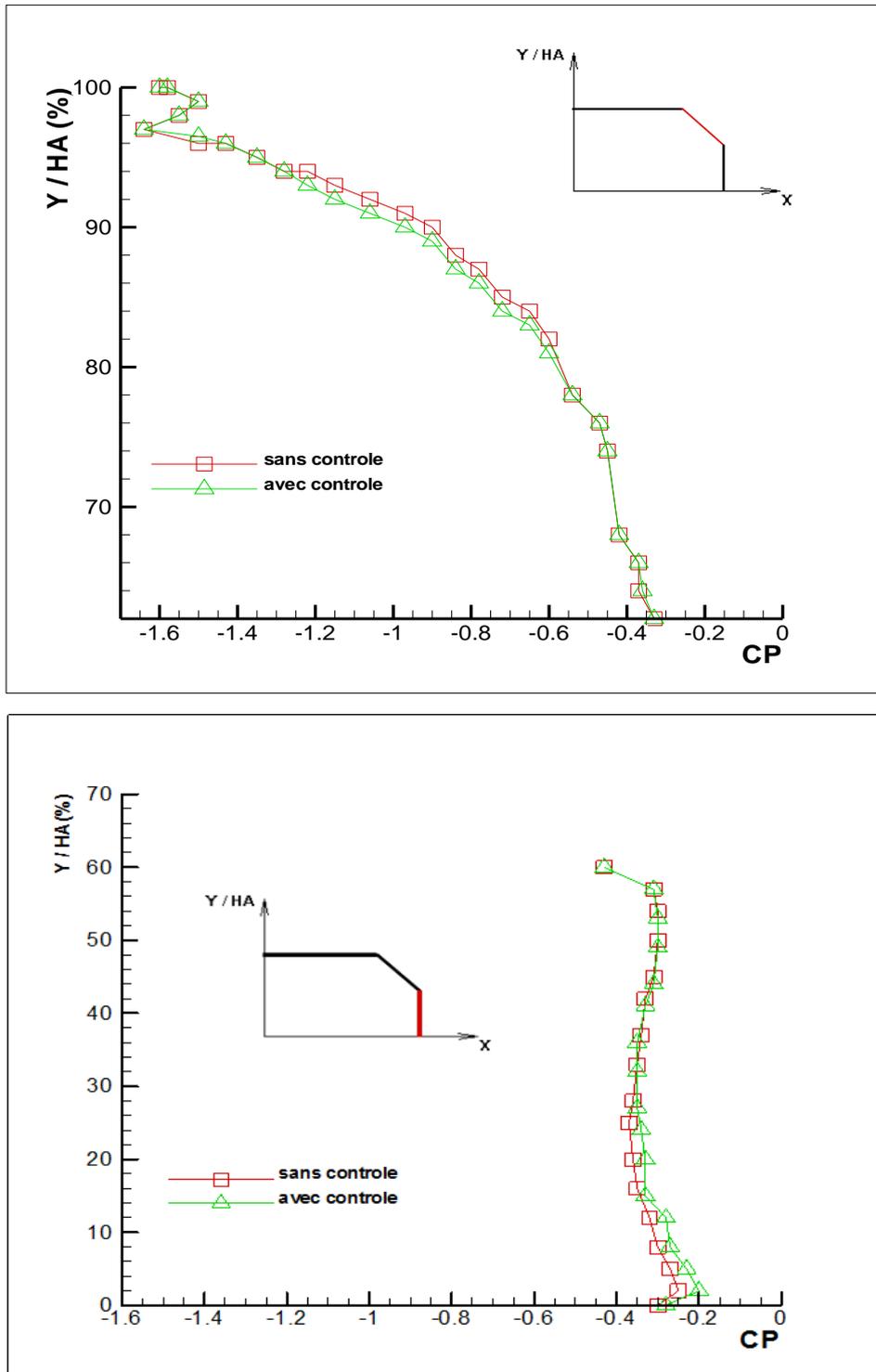


Figure 4. 23: Distributions de  $C_p$  en aval de la géométrie simplifiée sans et avec contrôle.

4.10.3 Contrôle sur la lunette et le culot

Une augmentation de  $C_p$  par rapport au cas sans contrôle sur la lunette dans la zone de  $63\% \leq Y/HA \leq 95\%$ . Une augmentation considérable de la distribution de  $C_p$  le long du culot ce qui est défavorable pour la diminution de la traînée. Le coefficient de la traînée est en relation direct avec le coefficient de pression donc toute variation de la distribution de pression influence directement sur la traînée, et la figure suivante donne la distribution du  $C_p$  sur la lunette arrière et le culot lors du jet combiné.

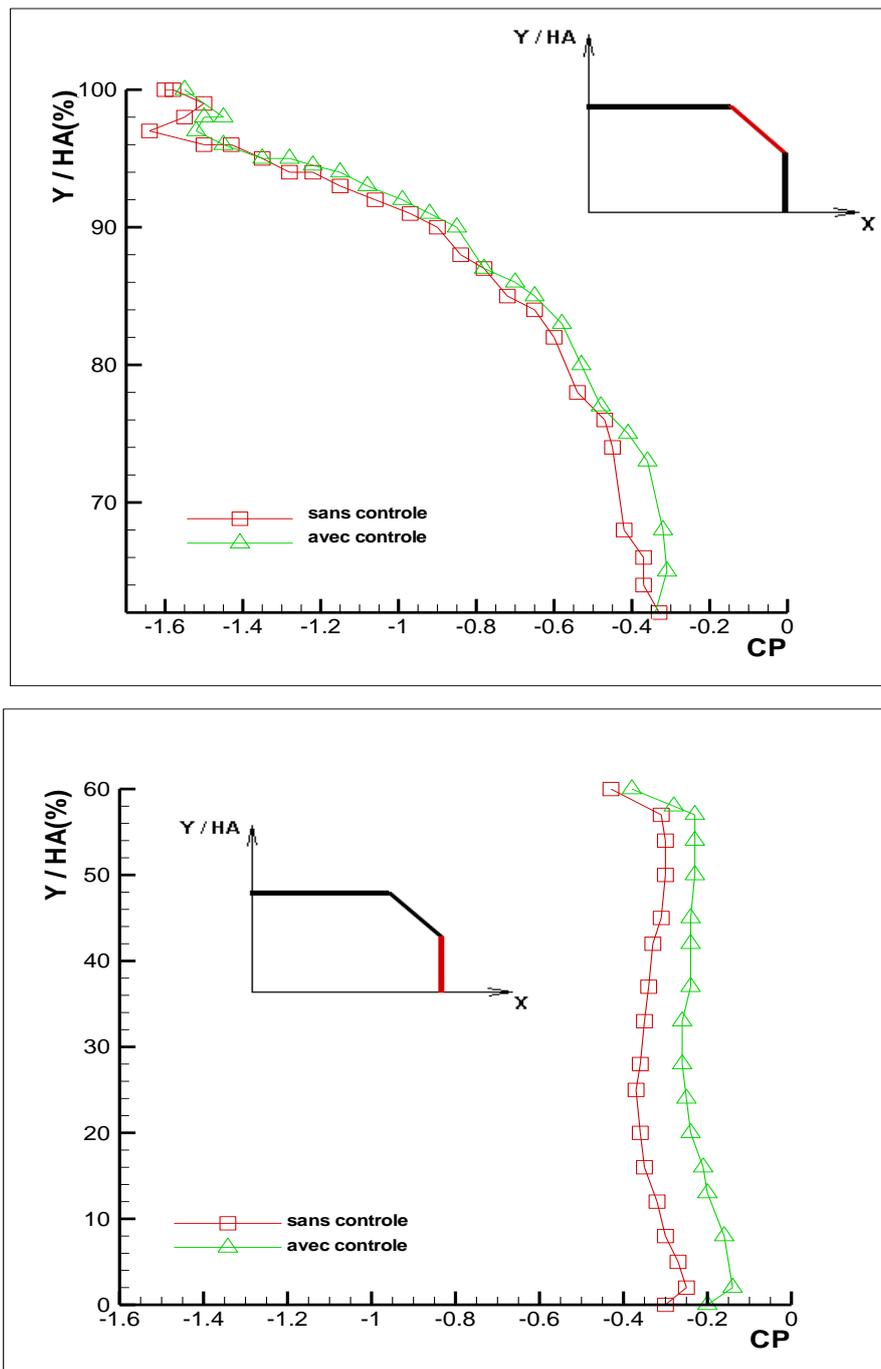


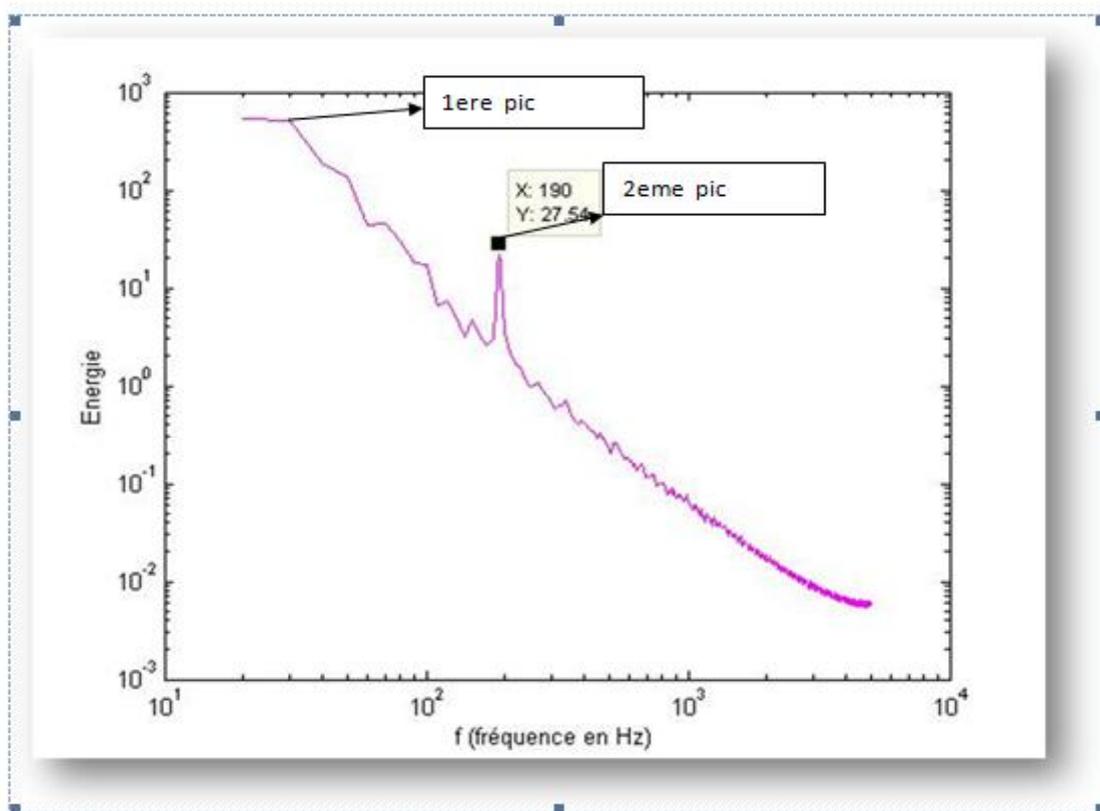
Figure 4. 24: Distributions de  $C_p$  en aval de la géométrie simplifiée sans et avec contrôle

#### 4.11 Caractérisation fréquentielle du sillage

- **Contrôle sur la lunette arrière** pour  $F^+ = 9$ ,  $C_{\mu} = 1.1 \times 10^{-5}$

La densité spectrale d'énergie (DSP) du coefficient de traînée aérodynamique  $C_d(t)$  avec contrôle sur la lunette arrière est représenté dans la figure suivante.

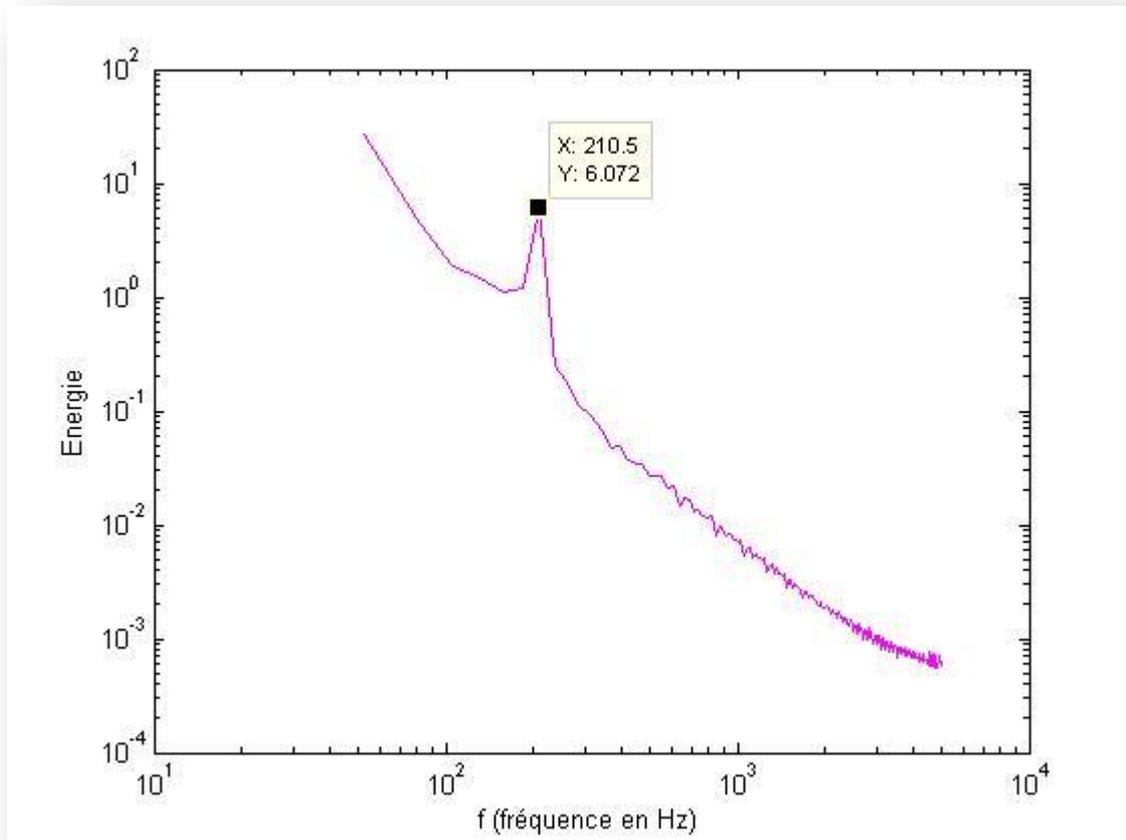
Deux pics de puissance se dégagent (Figure IV.24) un premier pic à  $f = 40$  Hz proche de la fréquence naturelle et un autre pic à  $f = 190$  Hz les deux fréquences correspondent à deux nombres de Strouhal  $St_1 = 0.72$  et  $St_2 = 3.43$  est enregistré sur la lunette arrière.



**Figure 4. 25:** Densités Spectrales de Puissance (DSP) normé du signal de traînée avec contrôle sur la lunette arrière.

- **Contrôle sur le culot :**  $F^+ = 9$ ,  $C_{\mu} = 1.1 \times 10^{-5}$

La densité spectrale de puissance du signal de traînée avec contrôle sur le culot est donnée sur la figure 4.24. Un pic de puissance (Figure IV.25) à  $f = 210.5$  Hz qui correspond à un nombre de Strouhal  $St_1 = 3.789$ .

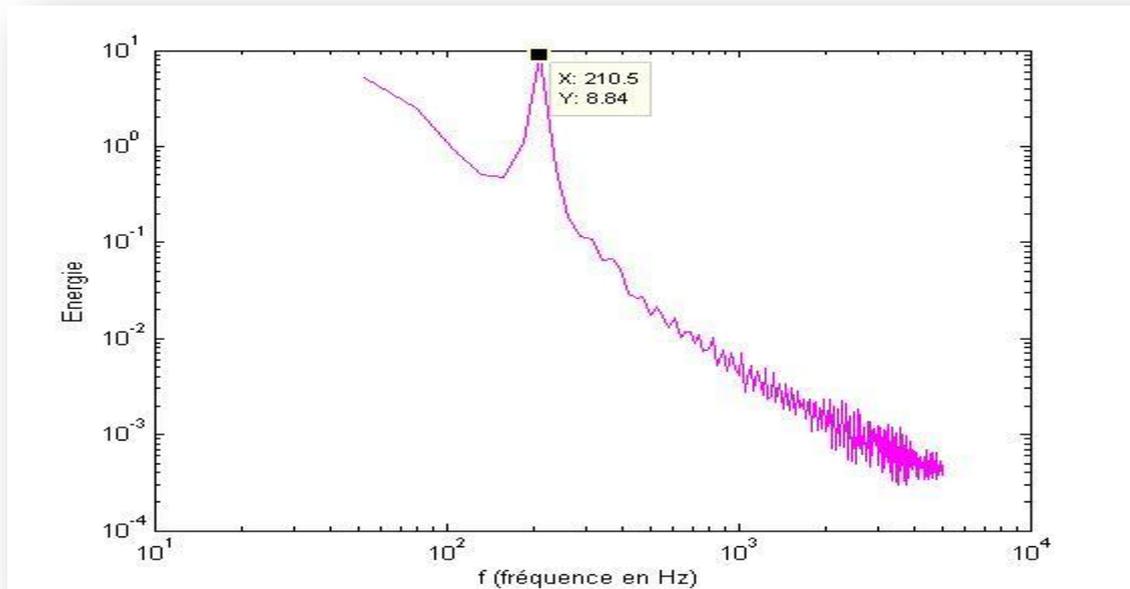


**Figure 4. 26:** Densités Spectrales de Puissance (DSP) normé du signal de traînée avec contrôle sur le culot.

➤ **Contrôle sur la lunette et le culot**

On remarque le même comportement que celui enregistré dans le cas d'un jet appliquée sur le culot. C'est-à-dire une seule fréquence d'émission (Figure 4.25) pour les cas avec une fréquence de  $f=210.5$  Hz et nombre de strouhal  $St1=3.789$ , cela s'explique par le fait que le jet synthétique synchronise l'émission tourbillonnaire à celle de la dynamique des contrôles.

Lorsque un jet est appliqué au niveau du culot on détecte qu'une seule fréquence d'émission ceci peut être expliqué par la synchronisation de l'émission des structures issues du pavillon et du soubassement. Lorsqu'on introduit un contrôle au niveau de la lunette arrière, on remarque que l'écoulement retrouve son caractère initial (émission désynchronisé).



**Figure 4. 27:** Densités Spectrales de Puissance (DSP) normé du signal de traînée avec contrôle sur la lunette arrière et le culot.

## Conclusion générale

---

### CONCLUSION

Cette étude nous a amené dans un premier temps à effectuer des recherches sur l'aérodynamique en générale et sur son application à l'automobile d'une manière particulière. Une voiture qui roule dans un fluide (air), est soumise à des forces (résistance de l'air, poids, frottements, ...), réparties en surface, dont les valeurs et distributions dépendent du fluide, de son état physique (gazeux), de la vitesse relative, et bien sûr de la forme du corps et de la rugosité de sa surface. La somme de ces forces peut être décomposée en une composante dirigée en sens inverse de la vitesse, appelée résistance ou traînée.

Il faut savoir que la traînée aérodynamique d'une voiture est proportionnelle au carré de sa vitesse. C'est-à-dire que, lorsque le véhicule double sa vitesse, cette force se voit surmultipliée par quatre. L'étude aérodynamique d'un véhicule permet de réduire sa résistance à l'avancement aux vitesses. Meilleure est sa pénétration dans l'air, moins le moteur est sollicité pour maintenir sa vitesse et, donc, moins il consomme.

Dans un deuxième temps, le projet nous a amené à se familiariser avec le logiciel Fluent, qui est l'un des logiciels les plus performants existant sur le marché actuellement dans le domaine de la mécanique des fluides, et ainsi pouvoir mettre en évidence par simulation les phénomènes aérodynamiques, étudié théoriquement.

La voie numérique était notre choix pour déterminer le coefficient de traînée aérodynamique sans contrôle et évalué l'efficacité du contrôle. Les structures tourbillonnaires présentes dans le sillage en aval de cette géométrie sont la principale source de la traînée aérodynamique.

L'exploration numérique 2D est faite à l'aide du code de calcul Fluent. Le modèle numérique choisi c'est le modèle D.E.S qui a permis dans un premier lieu de reproduire la structure de l'écoulement sans contrôle donnée par la littérature en aval du corps, avec un coefficient de traînée moyen égal à 0.36 ( $\overline{Cd} = 0.36$ ) pour une vitesse d'entrée fluide égale à 16 m/s. Les résultats obtenus sont en bon accord avec les résultats numériques proposés par la bibliographie GUILMINEAU E ,2005 [28] et très proches des résultats expérimentaux obtenus par TOUNSI [27] pour la même vitesse.

## Conclusion générale

---

Le but de contrôle de l'écoulement était de montrer l'efficacité du contrôle par jet synthétique et d'étudier les différents paramètres qui l'influencent : position, fréquence réduite, et coefficient de quantité de mouvement, le contrôle par jet synthétique nous a permis d'obtenir une amélioration des performances aérodynamiques. En particulier, la réduction de coefficient de traînée, les résultats obtenus sont :

Une réduction de coefficient de traînée de 9% pour une fréquence réduite  $F_+ = 6.48$ , et un coefficient de quantité de mouvement  $C_\mu = 8.68 \times 10^{-6}$ , et une réduction de 0.2% pour  $F_+ = 9.00$ ,  $C_\mu = 1.1 \times 10^{-5}$  pour le contrôle sur la lunette arrière. Une réduction de coefficient de traînée de l'ordre de 6.5% pour un jet de  $F_+ = 9.00$ ,  $C_\mu = 1.1 \times 10^{-5}$  pour le contrôle sur culot et une réduction du coefficient de traînée de l'ordre de 1.6% et 6.8% est obtenu pour les deux cas respectifs  $F_+ = 6.48$ ,  $C_\mu = 8.68 \times 10^{-6}$  et  $F_+ = 9.00$ ,  $C_\mu = 1.1 \times 10^{-5}$  pour le contrôle sur la lunette arrière et le culot.

Nous avons vérifié l'efficacité du contrôle par jet synthétique, et la fiabilité du modèle D.E.S qui donne de bons résultats. Il s'agit d'améliorer la stabilité, et de diminuer la traînée, pour améliorer les performances des véhicules. Il est aussi question de réduire la consommation, ce qui se traduit par une économie d'énergie et par la diminution des émissions de gaz à effet de serre.

Pour les perspectives afin d'améliorer les résultats il faut élargir les résultats obtenus en 2D au cas 3D sous Fluent pour étudier l'effet des tourbillons en trois dimensions, il serait naturel de poursuivre cette étude par une optimisation des paramètres du jet synthétique.

Une étude expérimentale en utilisant les techniques de la PIV.

## Bibliographies

---

- [1] **Roumeas Mathieu** : contribution a l'analyse et au control des sillages de corps épais par aspiration ou soufflage continu.
- [2] **Delphine DEPEREYRAS** Contrôles actifs et passives appliqués a l'aérodynamiques automobile Université de Bordeaux 2009.
- [3] **Ahmed S. R., Ramm R. & Falting G.**, 1984, some salient features of the time averaged ground vehicle wake, *SAE technical paper series 840300*, Detroit 1984
- [4] **Lehuteur, B.** caractérisation et controle des structures tourbillonnaires longitudinales en aérodynamique automobile. Dynamique des fluides et des transferts, Université Pierre et Marie Curie , May 2007
- [5] **Gilliéron, P.** Controle des écoulements appliqué à l'automobile, Etat de l'art. Mécanique et Industries, vol.3 : 515-524, 2002.
- [6] **JANSSEN, L.J. & HUCHO, W.H. (1974)**, Aerodynamische Formoptimierung der Type VW-Golf und VW-Sirocco. Kolloquium über Inderstrie-aerodynamik, Aachen, Part 3, pp.46-49
- [7] **AHMED, S.R., BAUMERT, W. (1979)**, The Structure of Wake Flow Behind Road Vehicles. Aerodynamics of Transportation , ASME-CSME Conference, Niagara Falls, June 18th-20th, pp93-103
- [8] **AHMED, S.R. (1981)**, Wake Structure of Typical Automobile Shapes. ASME Journal of Fluids Engineering, Vol.103, pp.162-169
- [9] **AHMED, S.R. (1983)**, Influence of Base Slant on Wake Structure and Drag of Road Vehicles. ASME Journal of Fluids Engineering, Vol.105, pp.429-434
- [10] **SCIBOR-RYLSKI, A.J., (1984)**, Road Vehicle Aerodynamics, 2nd Edition, Pentech Press Limited ISBN-0-7273-1805-5
- [11] **Hinterberger C., Garcia-Villalba & Rodi W.**, «Large Eddy Simulation of flow around the Ahmed body", 2003.

## Bibliographies

---

- [12] **Spohn A. & Gilliéron P.**, 2002 Flow Separations Generated by a Simplified Geometry of an Automotive Vehicle, Congrès IUTAM Symposium on Unsteady Separated Flows, April 8-12, 2002, Toulouse, France
- [13] **Matthieu Minguez, Richard Pasquetti & Eric Serre** Simulations des Grandes Echelles du sillage turbulent du corps d'Ahmed par une méthode de viscosité spectrale évanescence.
- [14] **M Martinat Guillaume** Analyse physique et modélisation d'écoulements instationnaires turbulents autour de profils oscillants et d'éoliennes, thèse de doctorat institut national polytechnique de Toulouse
- [15] **Ahmad BATIKH.** Contrôle de l'aérodynamique externe des véhicules aériens par des dispositifs micro fluidiques : étude de l'effet de mini et micro-jets synthétiques sur des écoulements pariétaux 10 janvier 2008.
- [16] **Glezer A., Amitay M. and Honohan A.M.** "Aspects of low- and high-frequency actuation for aerodynamic flow control". AIAA J., 43(7) :1501-1511, 2005.
- [17] **Ingard U.**, "On the theory and design of acoustic resonators", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 25, n°6, pp.1037-1061, Nov. 1953.
- [18] **Smith B. L. & Glezer A.**, 1997, Vectoring and small-scale motions effected in free shear flows using synthetic jet actuator, AIAA Paper No 97-0213, 35th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, January.
- [19] **CHESTER L, HONG G, HA Q.P., MALLINSON S.G** , 2003 A piezoelectrically actuated micro synthetic jet for active flow control, faculty of engineering, University of technology, Australia.
- [20] **guide utilisateur logiciel gambit**
- [21] **HANCHI.S**, 2007, Introduction à Fluent, Guide des principaux modèles utilisés .
- [22] **A. Batikh, R. Caen, S. Colin, L. Baldas, A. Kourta, and H.-C. Boisson**, "Numerical and experimental study of micro synthetic jets for flow control," Accepté en juin 2007 pour publication dans International Journal of Heat and Technology.
- [23] **N.Tounsi** contribution a l'étude et au contrôle de l'écoulement autour d'une géométrie simplifiée de véhicule

## Bibliographies

---

[24] GUILMINEAU E ,2005 , Le corps d'ahmed simulation vers le contrôle , équipe modélisation numérique laboratoire de mécanique des fluides CNRS UMR 6598 école centrale de Nantes , France .