

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou

Faculté du Génie de la construction

Département de Génie Mécanique



Mémoire de fin d'études

Présenté pour l'obtention du Diplôme de

Master Académique en

Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Thème :

*Contrôle actif de l'écoulement turbulent autour
d'un véhicule de forme simplifiée*

Proposé et dirigé par :

Réalisé par :

M. TEBBICHE. H

M.TACHEKORT Yacine

M. BOUTOUDJ M.S

M. MENAOUM Rafik

Promotion : 2024/2025

Remerciements

Ce mémoire est l'aboutissement de plusieurs années de formation et de travail, couronnés par des mois de recherches intenses. Animés par une volonté constante d'apprendre, de comprendre et d'analyser, nous avons surmonté les difficultés grâce à l'aide et au soutien de nombreuses personnes que nous tenons à remercier ici.

*Nous exprimons toute notre gratitude à notre promoteur, **M. TEBBICHE**, pour nous avoir proposé ce thème et pour son accompagnement constant, tant scientifique que moral, ainsi que pour sa disponibilité exemplaire.*

*Nos vifs remerciements s'adressent également à **M. BOUTOUDJ**, pour ses précieux conseils, son aide et son encadrement bienveillant.*

*Nous tenons aussi à remercier notre ami et collègue **Mohamed HADJER**, pour sa collaboration, son soutien et son implication tout au long de ce travail.*

Nos remerciements vont également à l'ensemble de la communauté universitaire : enseignants, administrateurs, ingénieurs et techniciens des laboratoires de recherche, de la soufflerie et du hall technologique d'OuedAissi, pour leur disponibilité et leur appui.

Un profond remerciement est adressé aux membres du jury qui ont accepté d'examiner et d'évaluer ce mémoire.

À nos amis, qui par leur sincérité et leur bienveillance sont devenus une véritable seconde famille, nous exprimons toute notre gratitude, avec l'espoir que nos chemins continueront de se croiser.

Enfin, nous ne saurions assez remercier nos parents pour leurs sacrifices et leur soutien inconditionnel, ainsi que nos frères et sœurs, qui occupent une place inestimable dans nos vies.

Dédicace

Nous dédions ce mémoire de fin d'études à nos chers parents, dont l'amour, les sacrifices et les encouragements ont été les piliers de notre parcours.

À nos frères, sœurs et à toute notre famille, pour leur affection et leur soutien indéfectible.

À nos amis, collègues et camarades de promotion, avec qui nous avons partagé des moments riches en apprentissage et en solidarité.

À toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail, nous témoignons notre profonde gratitude.

Résumé

Dans le cadre de la réduction de la traînée aérodynamique, cette étude expérimentale examine l'efficacité du contrôle actif de la couche limite par soufflage continu, appliqué à un modèle simplifié de type corps d'Ahmed. Les essais en soufflerie ont été réalisés à deux vitesses caractéristiques (60 km/h et 100 km/h), avec douze micro-orifices de 600 μm répartis entre la lunette arrière et le culot. L'impact de leur position, de la pression d'alimentation et de la vitesse d'éjection sur la traînée a été analysé. Les résultats montrent une réduction moyenne de 10 % de la traînée pour une lunette inclinée à 35,5°, comparée à une inclinaison de 25°.

Abstract

As part of aerodynamic drag reduction efforts, this experimental study investigates the effectiveness of active boundary layer control using continuous blowing, applied to a simplified Ahmed body model. Wind tunnel tests were conducted at two characteristic speeds (60 km/h and 100 km/h), using twelve 600 μm micro-orifices distributed between the rear window and the base. The influence of orifice position, supply pressure, and blowing velocity on drag was analyzed. Results show an average drag reduction of 10% for a rear window slope of 35.5°, compared to a 25° slope.

الملخص

في إطار تقليل مقاومة السحب الهوائي، تهدف هذه الدراسة التجريبية إلى تقييم فعالية التحكم النشط في طبقة الحد باستخدام النفط المستمر، وذلك على نموذج مبسط لجسم أحمد. أجريت التجارب في نفق هوائي بسرعتين مميزتين (60 كم/س و 100 كم/س)، باستخدام اثني عشر فتحة نفث دقيقة بقطر 600 ميكرون موزعة بين الزجاج الخلفي والمؤخرة. تم تحليل تأثير موقع الفتحات، ضغط التغذية، وسرعة النفث على مقاومة السحب. أظهرت النتائج انخفاضاً متوسطاً في السحب بنسبة 10%. عند ميل الزجاج الخلفي بـ 35.5° مقارنةً بميل 25°.

Introduction générale	1
I.1 Introduction	3
I.2 Notions sur l'aérodynamique.....	3
I.3. Phénomènes d'écoulement de l'air	4
I.3.1 La traînée.....	4
I. 3.2. Différentes traînées.....	5
I.3.3. Origines de la traînée aérodynamique	5
I.3.4.Portance	7
I.3.5. Formes aérodynamiques typiques et leurs coefficients de traînée	7
I.4. Concept de la couche limite	9
I.4.1. Notion de couche limite	9
I.4.2. Définition des épaisseurs de la couche limite bidimensionnelle	11
I.4.2.1. Epaisseur du déplacement	11
I.4.2.2 Epaisseur de la quantité de mouvement.....	13
I.5. Couches limites laminaire et turbulente	14
I.5.1. Écoulement laminaire	14
I.5.2. Écoulement turbulent	14
I.5.3.Écoulement tourbillonnaire	15
I.5.4.Transition Laminaire-Turbulent de la couche limite	15
I.5.5. Décollement de la couche limite	17
I.6. Corps d'A Ahmed.....	18
I.6.1. Écoulement autour du corps d'A Ahmed	19
I.6.1.1. Écoulement sur la partie avant	19
I.6.1.2. Ecoulement sur la partie arrière.....	20
I.7. Conclusion	21
Introduction.....	22
II.1. Approches de contrôle de l'écoulement	22
II.2. Contrôle passif.....	24

II.2.1 Optimisation du profil aérodynamique	24
II.2.2 Appendices aérodynamiques.....	26
II.2.3 Générateurs de vortex.....	27
II.2.4 Générateurs de vortex appliqués à corps d’Ahmed	27
II.2.5 Contrôle par modification de surface	28
II.2.6. Contrôle par déflecteur	29
II.2.7. Contrôle par des barreaux verticaux	30
II.2.8. Contrôle par des plaques séparatrices	31
II.2.8.1 Plaques séparatrices transversales (PST)	31
II.2.8.2 Plaques séparatrices longitudinales (PSL)	32
II.3. Contrôle actif.....	33
II.3.1 Contrôle actif par soufflage continu.....	34
II.3.2 .Contrôle actif par soufflage appliqué à un corps d’Ahmed.....	35
II.3.3. Contrôle actif par aspiration de la couche limite.....	36
II.3.4. Contrôle actif par aspiration appliqué à un corps d’Ahmed	37
II.3.5 Combinaison du soufflage et aspiration	38
II.3.5. Contrôle actif par jet synthétique	39
II.3.6. Contrôle actif par jet pulsé	40
II.3.7. Contrôle actif par jet balayant	41
II.4. Conclusion	42
III.1 Introduction	43
III.2 Géométrie du corps d’Ahmed	43
III.3 Conception et géométrie de la maquette.....	44
III.3.1 Réalisation et de la maquette	45
III.3.1.1 Parties avant et latérales.....	45
III.3.1.2 Partie basse de la maquette	45
III.3.1.3 Partie arrière de la maquette	46
III.4 Finition de la maquette	47

III.4.1 Le Bras coulissant	47
III.5 Dispositif expérimental	48
III.5.1 La soufflerie aérodynamique	49
III.5.2 Multi-manomètre et tube de Pitot.....	50
III.5.3 Balance aérodynamique à jauges de contraintes	51
III.5.4 Indicateur de contraintes	52
III.5.5 Convertisseur de signal.....	52
III.6 Dispositif de soufflage.....	53
III.6.1 Compresseur d'air	53
III.6.2 Chambre de tranquillisation	53
III.6.3 Manomètre.....	54
III.6.4 La rampe.....	55
III.6.5 Modes de soufflage	55
III.6.5.1 Configurations de soufflage	57
III.7 Étalonnage de la chaine d'acquisition	57
III.8. Résultats des essais.....	59
III.8 Paramètres du contrôle.....	60
III.8.1 La pression statique au niveau des orifices du jet	60
III.8.2 Pression, température, volume massique critique.....	64
III.8.3 Tracé des courbes théoriques	65
III. 8.4 Efforts aérodynamiques et gains	68
III.9. Combinaison du contrôle actif et passif	72
Conclusion	79

Fig. II. 1:	Classification des stratégies de contrôle des écoulements [13]	22
Fig. II. 2:	Principe de fonctionnement du générateur de jets synthétiques mécanique [16].	23
Fig. II. 3 :	système de Jet pulsé .[29]	23
Fig. II. 4 :	Voiture conçue par Camille Jenatzy en 1899 [18].	25
Fig. II. 5 :	L'Alfa Romeo du comte Marco Ricotti, conçue en 1913–1914	25
Fig. II. 6 :	Hyundai Ioniq 6 [19]	26
Fig. II. 7 :	Installation de becquets et diffuseurs dans un véhicule	26
Fig. II. 8 :	Exemple de contrôle passif par générateurs de vortex	27
Fig. II. 9:	Vue arrière du modèle (a), équipé d'un ensemble de générateurs de vortex fixés sur un axe rotatif motorisé (b). [20]	27
Fig. II. 10:	Dispositif PIV utilisé pour les mesures ($x = 0,53 \text{ m}$). La source laser et la caméra CCD sont positionnées au-dessus du toit de la section d'essai. a) Cas non contrôlé. b) Cas contrôlé. [20]	28
Fig. II. 11:	Illustration de la résistance de l'air en fonction de la rugosité de la surface d'une balle de golf.....	28
Fig. II. 12:	Contrôle d'écoulement turbulent par système de riblets (Peyrat-Armandy (1997)) [21].....	29
Fig. II. 13:	Vue de l'arrière du corps d'A Ahmed équipé de sept déflecteurs pilotés sur chacune des arrêtes. Les numéros indiquent les différentes configurations qui ont été testées. [20]	30
Fig. II. 14 :	Montage du corps d'A Ahmed avec cavité et barreau d'Evrard et al pour suppression passive de la bi-stabilité latérale [22]	31
Fig. II. 15 :	Plaques séparatrices transversales. La recirculation du fluide dans la cavité D entraîne une remontée de pression au niveau du culot d'origine. La présence de la plaque uniformise et augmente la pression [09].....	31
Fig. II. 16 :	Plaques séparatrices longitudinales [09]	32
Fig. II. 17 :	A gauche : Plaques longitudinales utilisées sur un poids lourd. A droite : Appendice amovible 'Aerovolution product'. [09].....	33
Fig. II. 18 :	Contrôle de la couche limite par soufflage tangentiel	34
Fig. II. 19 :	Illustration de l'écoulement avec et sans contrôle par micro-jets, visualisé par tomoscopie laser [23].....	35
Fig. II. 20 :	Position des orifices de soufflage sur le modèle du corps d'A Ahmed.....	35
Fig. II. 21:	Champ d'écoulement, (a) avec contrôle et (b) sans contrôle. [24]	36
Fig. II. 22 :	Contrôle aérodynamique de la couche limite par aspiration	36

Fig. II. 23: <i>Ecoulement autour d'un cylindre avec aspiration de la couche limite [25]</i>	37
Fig. II. 24 : <i>Champs du coefficient de perte de pression totale, mesurés dans le plan médian longitudinal : (a) sans contrôle ; (b) avec contrôle. [26]</i>	38
Fig. II. 25: <i>Modèle simplifié d'un EMU : (a) Modèle simplifié de la carrosserie des unités multiples ; (b) Modèle de bogie ; (c) Position des orifices d'aspiration et de soufflage ; (d) Dimensions des trous d'aspiration et de soufflage. [27]</i>	39
Fig. II. 26: <i>Représentation schématique du jet synthétique En (a) phase d'aspiration et (b) phase de soufflage [15]</i>	40
Fig. II. 27 : <i>Jet pulsé</i>	40
Fig. II. 28: <i>Principe du jet balayant [14]</i>	41

Chapitre III: Etude expérimentale

Fig. III. 1: <i>Modélisation géométrique du corps d'Ahmed</i>	44
Fig. III. 2: <i>Dimensions de la maquette</i>	44
Fig. III. 3: <i>Etapes de réalisation de la face avant</i>	45
Fig. III. 4: <i>Les différents constituants de bas de la maquette</i>	46
Fig. III. 5: <i>Représentation des micro-orifices sur l'arrière de la maquette</i>	47
Fig. III. 6 : <i>La maquette réalisée</i>	47
Fig. III. 7 : <i>Système de fixation</i>	48
Fig. III. 8 : <i>Dispositif expérimental (1 : compresseur d'air, 2 : vanne, 3 : manomètre, 4 : chambre de tranquillisation, 5 : flexible d'air, 6 : veine d'essais, 7 : balance aérodynamique, 8 : indicateur de contraintes, 9 : convertisseur, 10 : ordinateur, 11 : soufflerie)</i>	48
Fig. III. 9: <i>Soufflerie subsonique DeltalabTM, UMMTO</i>	49
Fig. III. 10 : <i>(a) tube de Pitot (b) multi-manomètre</i>	51
Fig. III. 11: <i>Balance aérodynamique</i>	51
Fig. III. 12: <i>Indicateur de contraintes</i>	52
Fig. III. 13 : <i>Système d'acquisition : a) convertisseur b) ordinateur</i>	53
Fig. III. 14: <i>Compresseur d'air</i>	53
Fig. III. 15 : <i>Chambre de tranquillisation</i>	54
Fig. III. 16 : <i>Manomètre</i>	54
Fig. III. 17 : <i>Rampe de soufflage</i>	55
Fig. III. 18: <i>Combinaison d'un contrôle actif et passif par une plaque longitudinale</i>	73
Fig. III. 19: <i>Variation du C_x à 60 km/h pour le contrôle combiné</i>	74

Fig. III. 20 : Gain en traînée pour la vitesse d'écoulement de 60 Km/h pour le contrôle combiné.	74
Fig. III. 21: Variation du C_x à 80 km/h pour le contrôle combiné.	75
Fig. III. 22: Gain en traînée pour la vitesse d'écoulement de 80 Km/h pour le contrôle combiné.	75
Fig. III. 23 : Variation du C_x à 100 km/h pour le contrôle combiné.	76
Fig. III. 24 : Gain en traînée pour la vitesse d'écoulement de 100 Km/h pour le contrôle combiné.	76
Fig. III. 25 : Variation du C_x à 120 km/h pour le contrôle combiné.	77
Fig. III. 26 : Gain en traînée pour la vitesse d'écoulement de 100 Km/h pour le contrôle combiné.	77

Chapitre III: Etude expérimentale

Tableau III. 1: caractéristiques techniques de la soufflerie	49
Tableau III. 2 : Configurations de soufflages	56
Tableau III. 3 : Modes de soufflages sélectionnés	57
Tableau III. 4: Valeurs du coefficient C_x et les gains en pourcentage (%) pour chaque mode.	60
Tableau III. 5: Pression statique des orifices de soufflage.	62
Tableau III. 6 : Débitmassique (Kg/s) en fonction de P_I et le nombre d'orifice.	67
Tableau III. 7 : Vitesse du jet en fonction de P_t	67
Tableau III. 8 : Valeurs du coefficient C_x et les gains en pourcentage (%) pour le contrôle combiné (actif-passif).....	73

Symbole	Signification	Unité
F_x	Force de traînée	N (newton)
ρ	Masse volumique du fluide	kg/m ³
S	Surface de référence	m ²
C_x	Coefficient de traînée	sans dimension
V	Vitesse relative	m/s
C_z	Coefficient de portance	sans dimension
F_z	Force de portance	N
δ	Épaisseur de la couche limite	M
δ_{99}	Épaisseur où $u = 0,99U_\infty$	M
ν	Viscosité cinématique	m ² /s
x	Distance depuis le bord d'attaque	M
U_∞	Vitesse de l'écoulement libre	m/s
Re_x	Nombre de Reynolds local	sans dimension
δ_1	Épaisseur de déplacement	M
δ_2	Épaisseur de quantité de mouvement	M
H	Facteur de forme (δ_1/δ_2)	sans dimension
Re	Nombre de Reynolds	sans dimension
D	Dimension caractéristique	M
τ_p	Contrainte de frottement pariétal	Pa
μ	Viscosité dynamique	Pa·s
$\vec{u}$	Vecteur vitesse	m/s
t	Temps	S
∇	Opérateur gradient	—
p	Pression	Pa
$\vec{f}$	Force volumique	N/m ³
L_A	Longueur du corps d'A Ahmed	M
l_A	Largeur du corps d'A Ahmed	M
H_A	Hauteur du corps d'A Ahmed	M
α	Angle d'inclinaison de la lunette arrière	°
C_p	Coefficient de pression	sans dimension
P_∞	Pression à l'infini amont	Pa
Z	Côte du liquide manométrique	m
P_A	Pression d'arrêt	Pa
Q	Débit massique	kg/s
k	Indice adiabatique	sans dimension
P_t	Pression totale	Pa
v_t	Volume massique total	m ³ /kg
T_t	Température totale	K

Symbole	Signification	Unité
R	Constante des gaz parfaits	J/(kg·K)
P_{cr}	Pression critique	Pa
T_{cr}	Température critique	K
ρ_{cr}	Masse volumique critique	kg/m ³
v_{cr}	Volume massique critique	m ³ /kg

Introduction générale

Introduction

Depuis plusieurs décennies, l'industrie automobile et aéronautique fait face à un double défi majeur : améliorer les performances énergétiques des véhicules tout en réduisant leur impact environnemental. Parmi les paramètres déterminants dans cette quête d'efficacité, la maîtrise de l'aérodynamique occupe une place centrale. En effet, la résistance aérodynamique constitue une part importante de la consommation énergétique des véhicules, en particulier à des vitesses élevées.

L'écoulement d'air autour d'un corps en mouvement est un phénomène complexe, marqué par la transition des régimes laminaires aux régimes turbulents, l'apparition de zones de recirculation et le détachement de la couche limite. Ces phénomènes induisent une traînée aérodynamique importante, qui pénalise directement la consommation de carburant ou d'énergie électrique, ainsi que la stabilité du véhicule. Ainsi, la compréhension et le contrôle de ces mécanismes représentent un enjeu scientifique et technologique de premier ordre.

Traditionnellement, la réduction de la traînée a été recherchée par des solutions passives telles que l'optimisation des formes (carrosseries profilées, carénages, ailerons fixes, etc.). Toutefois, ces approches présentent des limites liées aux contraintes de design, de coût et d'efficacité. Face à ces restrictions, les stratégies de contrôle actif de l'écoulement suscitent un intérêt croissant. Contrairement aux dispositifs passifs, elles consistent à agir dynamiquement sur l'écoulement par injection ou aspiration de fluide, excitation périodique, actionneurs plasma, volets mobiles, etc., afin de retarder le décollement de la couche limite, de réduire les fluctuations turbulentes ou de maîtriser les structures tourbillonnaires.

L'étude de telles techniques appliquées à un véhicule de forme simplifiée présente un intérêt académique et industriel notable. En travaillant sur une géométrie simplifiée, il est possible d'identifier et de comprendre les mécanismes physiques fondamentaux qui gouvernent l'interaction entre l'écoulement turbulent et les dispositifs de contrôle. Les résultats obtenus peuvent ensuite être transposés et adaptés à des géométries plus complexes et à des applications réelles.

Le présent mémoire s'inscrit dans ce cadre. Il vise à analyser l'efficacité de méthodes de contrôle actif de l'écoulement autour d'un modèle simplifié de véhicule de type corps d'Ahmed, en

mettant l'accent sur leur influence sur la structure de l'écoulement, la traînée aérodynamique et la stabilité globale.

Pour ce faire, ce mémoire est structuré en trois chapitres complémentaires. Le premier chapitre, consacré à l'aspect théorique, présente un rapport détaillé sur la couche limite, le phénomène de décollement et l'état de l'écoulement autour du corps d'A Ahmed. Il introduit également les notions essentielles d'aérodynamique nécessaires à la compréhension des mécanismes étudiés. Le deuxième chapitre s'attache à l'étude des solutions existantes de contrôle du décollement, à travers un état de l'art. Une attention particulière y est accordée aux deux grandes familles de stratégies largement documentées : les approches passives, reposant sur des modifications géométriques fixes (carénages, déflecteurs, ailerons), et les approches actives, utilisant des dispositifs dynamiques tels que les jets pulsés, l'aspiration d'air ou les actionneurs fluidiques. Enfin, le troisième chapitre décrit la méthodologie expérimentale adoptée : conception et fabrication du modèle du corps d'A Ahmed, essais réalisés en soufflerie et analyse des résultats obtenus pour évaluer l'impact des techniques de contrôle sur la traînée.

Enfin, une conclusion générale viendra synthétiser les résultats principaux et proposer des perspectives pour des applications futures.

Chapitre I

Généralités sur l'aérodynamique et la couche limite

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les notions de base liées à l'aérodynamique, indispensables pour comprendre le comportement de l'air au contact des surfaces solides, en particulier dans un contexte d'écoulement.

Nous aborderons notamment les caractéristiques générales de l'écoulement d'un fluide, les forces aérodynamiques, ainsi que le concept fondamental de la couche limite, qui joue un rôle déterminant dans les phénomènes de frottement et de transition laminaire-turbulent.

I.2 Notions sur l'aérodynamique

L'aérodynamique est la science qui étudie les phénomènes accompagnant tout mouvement relatif entre un corps et l'air qui l'entoure. (Le corps peut être immobile dans l'air en mouvement (écoulement autour d'un bâtiment soumis à l'action du vent) ou se déplacer dans l'air immobile (projectile, automobile, avion, etc.))[1].

Cette discipline joue un rôle fondamental dans la conception des objets exposés à l'air, notamment en ingénierie automobile, où l'optimisation des formes permet de réduire la traînée aérodynamique et d'améliorer les performances énergétiques des véhicules. (**Fig I.1**)

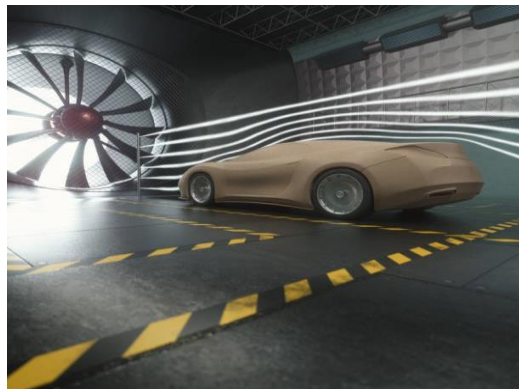


Fig. I. 1 : Visualisation de l'écoulement de l'air autour d'une maquette d'un véhicule à l'intérieur d'une soufflerie [2].

I.3. Phénomènes d'écoulement de l'air

I.3.1 La traînée

La traînée aérodynamique désigne l'ensemble des forces qui s'opposent au déplacement d'un corps dans un fluide gazeux, créant ainsi une résistance à son avancement. Elle agit dans le sens opposé à la vitesse du corps en mouvement et augmente proportionnellement au carré de cette vitesse.

En ingénierie automobile, cette résistance est quantifiée par le coefficient de traînée, le coefficient de traînée (C_x) est un nombre sans dimension qui sert à caractériser la résistance aérodynamique ou hydrodynamique d'un objet lorsqu'il se déplace dans un fluide (air, eau).

La traînée comprend notamment une composante de frottement, résultante des variations de vitesse entre les différentes couches de fluide, ce qui entraîne une dissipation de l'énergie mécanique sous forme de chaleur. Pour un corps profilé, plus sa géométrie s'éloigne de celle d'une plaque plane, plus la traînée de forme devient importante. Ainsi, l'analyse aérodynamique d'un véhicule vise à limiter cette résistance, en particulier à vitesse élevée.

Une meilleure pénétration dans l'air réduit l'effort demandé au moteur pour maintenir une vitesse constante, ce qui diminue la consommation de carburant.

Enfin, la forme arrière du véhicule joue un rôle déterminant dans ses performances aérodynamiques.

La traînée peut être calculée par la formule **(I.1)** suivante :

$$F_x = \frac{1}{2} \rho S C_x V^2 \quad (\text{I.1})$$

Où

- F_x : Force de traînée (en newtons, N).
- ρ : Masse volumique du fluide (en kg/m³).
- S : Surface de référence (en m²).
- C_x : Coefficient de traînée (sans unité).
- V : Vitesse relative entre le fluide et l'objet (en m/s).

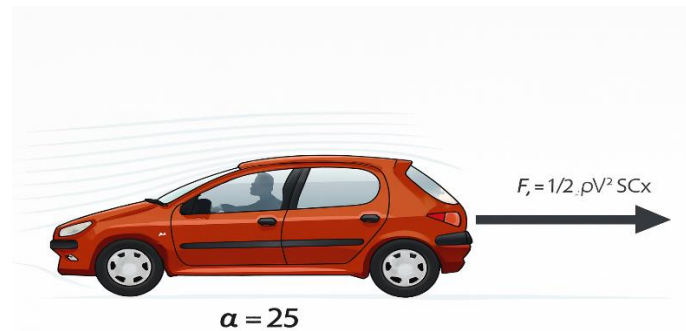


Fig. I. 2 : Génération de la force de la trainée autour d'un véhicule.

I. 3.2. Différentes trainées

a. trainée de forme : qui découle de la pression appliquée à l'avant du véhicule (en particulier sur la calandre et le pare-brise), et du vide partiel généré à l'arrière suite au mouvement du véhicule. Ce déséquilibre de pression a tendance à « tirer » le véhicule vers l'arrière, freinant donc son déplacement.

b. trainée de frottement : elle correspond à la résistance générée par l'air au contact direct de la surface de la carrosserie.

c. trainée de turbulence : L'air devient turbulent lorsqu'il rencontre divers obstacles, irrégularités ou protubérances (cadres de fenêtres, miroirs rétropectifs, passages de roues, etc.)

d. trainée interne : L'air doit pénétrer à l'intérieur de la carrosserie, non seulement pour alimenter le moteur en oxygène mais aussi pour refroidir le radiateur et ventiler l'habitacle.

Ainsi, **la trainée globale** est influencée par la forme et l'état de surface de l'ensemble des composants constituant la carrosserie : l'avant du véhicule, le toit, le bas (prises d'air, carénage sous le moteur, plancher, etc.), les passages de roues, les flancs et l'arrière.

Tous ces composants sont complémentaires et doivent être conçus pour favoriser le flux d'air global autour du véhicule.

I.3.3. Origines de la trainée aérodynamique

Il existe de nombreux endroits où l'air se détache autour d'un véhicule automobile. L'apparition de structures tourbillonnaires qui alimentent le sillage du véhicule est provoquée

Chapitre I Généralités sur l'aérodynamique et la couche limite

par les ruptures de pentes à divers endroits (**Fig I.3**), tels que la calandre (zone 1), le bas et les montants latéraux du pare-brise (zones 2 et 3), le soubassement (zone 4), ainsi que les roues (zone 5) ou les parois latérales (zone 6). L'expression de la traînée est également influencée par les flux secondaires internes au sein du compartiment moteur et du soubassement (zone 1 et 4).

Le sillage et une grande partie de la traînée de la voiture sont attribuables au courant qui se forme en aval du culot. En définitive, le mouvement des roues engendre la formation de tourbillons latéraux qui entrent également en interaction avec l'écoulement de culot.

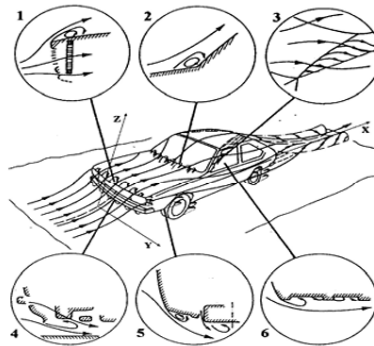


Fig. I. 3: Zone de décollement d'air autour d'un véhicule [3].

L'évaluation de l'impact de chacune de ces sources de traînée révèle que les pressions statiques à l'arrière du véhicule participent en grande partie, à hauteur de 30%, à la résistance totale du véhicule, au même niveau que la contribution du flux sous le plancher. L'apport des roues est également notable, représentant environ 15%.

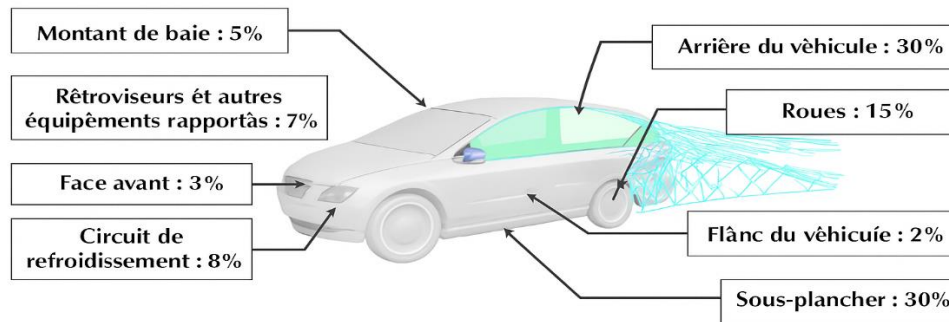


Fig. I. 4: Contributions relatives de chaque région du véhicule à la traînée globale. Source interne PSA Peugeot Citroën.

I.3.4. Portance

La portance est une force agissant perpendiculairement à la direction de l'écoulement, soit vers le haut. Cette force a pour effet de soulever le véhicule. C'est la même qui rend possible le vol plané des avions, la portance est déterminée à l'aide de l'équation suivant :

$$F_z = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_z \quad (I.2)$$

Où :

C_z : coefficient de portance

Il n'est pas forcément nécessaire d'éviter la portance sur une voiture ordinaire, car elle aide à réduire l'usure des pneus et la consommation de carburant. Ainsi, en ce qui concerne les voitures, l'objectif n'est pas tant de les fixer au sol que de les faire léviter, car la priorité pour les fabricants est de diminuer la consommation de carburant, l'émission de CO₂ et l'abrasion des pneus. Il est donc crucial de bien doser la portance. Effectivement, si cette valeur est trop importante, l'accroche sur la route sera très faible, et cela peut engendrer des accidents de la route. Mais, si la portance est trop faible, alors elle réduira la vitesse du véhicule. Il est donc important de bien doser ce paramètre, car il est très important, et modifie le comportement du véhicule.

I.3.5. Formes aérodynamiques typiques et leurs coefficients de traînée

On utilise le coefficient de traînée (aussi connu sous les symboles C_x ou C_D), comme un indice en aérodynamique pour évaluer la résistance qu'un objet rencontre lorsqu'il se déplace

Chapitre I Généralités sur l'aérodynamique et la couche limite

dans un fluide tel que l'air ou l'eau. Pour une demi-sphère, la résistance de l'air est atténuée car les particules d'air ont tendance à contourner facilement sa surface. Cependant, un fort tirage persiste derrière cette configuration. Pour une sphère de forme arrondie, l'air pourra y pénétrer beaucoup plus aisément.

Toutefois, cette forme n'est pas nécessairement la plus aérodynamique, car une légère dépression est observée à l'arrière de celle-ci. Bien qu'il n'y ait pas de forme aérodynamique idéale, il existe une forme qui s'en approche. Effectivement, la forme biseautée de la goutte d'eau présente la plus faible résistance à l'air. En outre, cela peut également être démontré par le fait que cette forme de goutte d'eau possède le plus faible coefficient de traînée.

Effectivement, pour celui-ci, il est de 0.05, alors que pour les autres formes, il est nettement plus élevé [4].

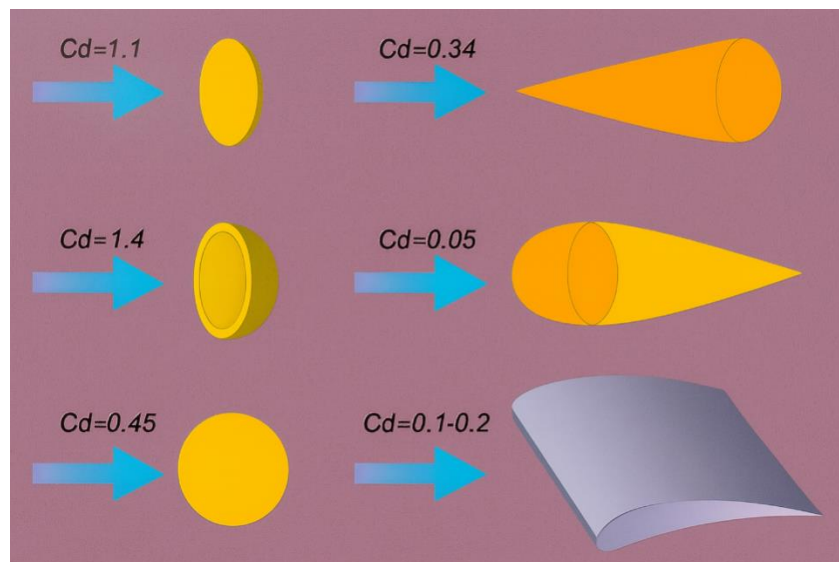


Fig. I. 5: Exemples de coefficients de traînée de quelques obstacles aérodynamiques [4].

On en conclut que la forme la plus appropriée pour une automobile serait celle d'un corps profilé, comparable à une goutte d'eau. En outre, les véhicules ne prennent jamais la forme d'une sphère ou d'un cube, car ces formes ayant un coefficient de traînée beaucoup trop important.

Bien que la forme de la goutte d'eau soit l'option la plus aérodynamique, elle reste rarement adoptée.

Les acquéreurs, dans leur grande majorité, privilégient le confort et le design du véhicule.

I.4. Concept de la couche limite

I.4.1. Notion de couche limite

Lorsqu'un fluide se déplace autour d'un obstacle, il entraîne une perturbation des champs de vitesse et de pression. La **couche limite** est la zone de fluide adjacente à la paroi, où s'effectue la transition entre la vitesse nulle au contact de la surface et la pleine vitesse de l'écoulement libre. Bien que mince, cette région joue un rôle central : frottement, transferts thermiques et éventuels décollements en dépendent directement.

Introduit pour la première fois par **Prandtl en 1904** [5], le concept de couche limite a permis d'interpréter de nombreux phénomènes inexpliqués par la théorie des fluides parfaits [3]. En effet, si l'approche macroscopique relie les forces aérodynamiques globales, comme la **traînée** et la **portance**, aux champs de vitesse et de pression autour du corps, leur origine réside essentiellement dans les mécanismes locaux de la couche limite. C'est elle qui conditionne à la fois la répartition des pressions et l'intensité des frottements visqueux, deux phénomènes à l'origine des efforts globaux exercés par le fluide.

En mécanique des fluides, certains écoulements sont étudiés en négligeant totalement la viscosité, tandis que d'autres montrent que ces effets sont prédominants. En réalité, les effets visqueux ne peuvent jamais être totalement ignorés : la couche limite représente précisément la région de l'écoulement où les contraintes visqueuses sont au moins aussi significatives que les effets inertiels. Loin de la paroi, au contraire, l'écoulement est qualifié « d'Euler » et peut être approché par un fluide parfait décrit par les équations d'Euler.

Ainsi, dans un écoulement réel comportant une couche limite, on distingue deux régions complémentaires :

- Une région proche de la paroi, gouvernée par les équations complètes de Navier–Stokes[6], où dominent les phénomènes visqueux ;
- Une région externe, où les effets visqueux deviennent négligeables et l'écoulement est correctement décrit par les équations d'Euler.

Equation de continuité (conservation de la masse)

Pour un fluide compressible:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (\text{I.4})$$

- $\vec{u}$: vecteur vitesse
- t : temps
- $\nabla \cdot$: divergence

Pour un fluide **incompressible** ($\rho = \text{constante}$) :

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (\text{I.5})$$

Equations de Navier–Stokes (conservation de la quantité de mouvement)

Forme générale pour un fluide Newtonien compressible:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{f} \quad (\text{I.6})$$

- p : pression
- $\nabla^2 \vec{u}$: Laplacien du champ de vitesse (diffusion visqueuse)
- $\vec{f}$: force volumique externe (ex. gravité)

La compréhension de cette distinction et du rôle central de la couche limite constitue donc une étape indispensable avant d'aborder les applications pratiques ou les géométries de référence. Elle fait le lien entre la description théorique d'un fluide parfait et le comportement réel d'un fluide visqueux.

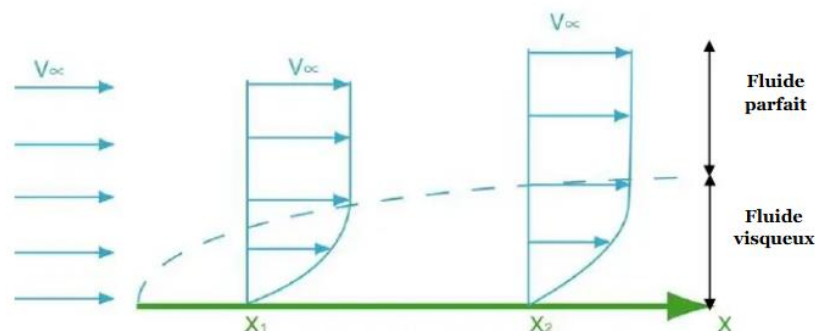


Fig. I. 6: Schéma descriptif de la couche limite.

I.4.2. Définition des épaisseurs de la couche limite bidimensionnelle

On définit l'épaisseur de la couche limite comme la distance verticale séparant la paroi solide du point où la vitesse d'écoulement (**Fig. I.7**).

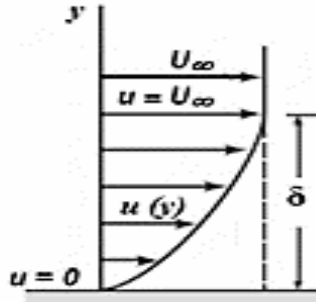


Fig. I. 7: Conventions de notation de la couche limite

Pour un écoulement laminaire sur une plaque plane, cette épaisseur peut être estimée par la relation :

$$\delta_{99}(x) \approx 5 \sqrt{\frac{\nu x}{U_{\infty}}} \quad (\text{I.7})$$

- ν : viscosité cinématique du fluide (en m^2/s)
- x : distance depuis le bord d'attaque de la plaque (en m)
- U_{∞} : vitesse de l'écoulement libre (en m/s)

Dans le cas d'un écoulement turbulent sur une plaque plane, l'épaisseur de la couche limite $\delta(x)$ peut être estimée par la relation suivante :

$$\delta(x) = 0,37 \left(\frac{\mu}{\rho U_{\infty}} \right)^{\frac{1}{5}} x^{\frac{4}{5}} = 0,37 \frac{x}{Re_x^{1/5}} \quad (\text{I.8})$$

- $Re_x = \frac{\rho U_{\infty} x}{\mu}$: Nombre de Reynolds local.

I.4.2.1. Epaisseur du déplacement

L'épaisseur de déplacement correspond à la distance verticale nécessaire pour que la paroi solide soit déplacée vers le haut afin que le débit massique du fluide réel coïncide avec celui du fluide idéal. On envisage deux types de flux de fluide sur une plaque horizontale fixe, avec une vitesse d'écoulement U_{∞} , comme illustré sur la (**Fig. 1.8**)

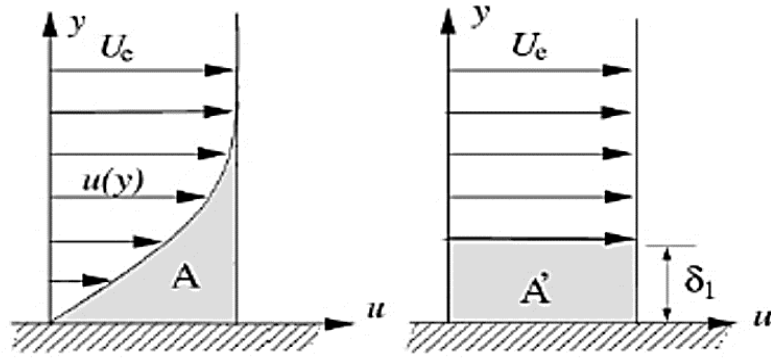


Fig. I. 8: Epaisseur du déplacement

Dans un fluide visqueux, les lignes de courant sont déplacées par rapport à leur position dans un fluide parfait. Cette translation est utilisée pour établir une épaisseur de manière à ce que les surfaces A et A' soient identiques.

$$A = \int_0^{\delta} (U_e - u) dy = A' = \delta_1 U_e \quad (\text{I.9})$$

On peut donc déduire que :

$$\delta_1 = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{u}{U_e}\right) dy \quad (\text{I.10})$$

Sachant que Q_p représente le débit massique du fluide parfait Q_v est celui du fluide visqueux:

- Débit massique du fluide parfait :

$$Q_p = \int_0^{\delta} \rho_e U_e dy \quad (\text{I.11})$$

- Débit massique du fluide visqueux :

$$Q_v = \int_0^{\delta} \rho u dy \quad (\text{I.12})$$

- Différence entre les deux débits :

$$\int_0^{\delta} \rho_e U_e dy - \int_0^{\delta} \rho u dy = \rho_e U_e \delta_1 \quad (\text{I.13})$$

Chapitre I Généralités sur l'aérodynamique et la couche limite

En supposant un flux incompressible ($V=\text{constante}$), δ_1 peut être défini par rapport au profil de vitesse dans la couche limite normalisée par la vitesse extérieure :

$$\delta_1 = \int_0^\delta \left(1 - \frac{u}{U_e}\right) dy \quad (\text{I.14})$$

I.4.2.2 Epaisseur de la quantité de mouvement

L'épaisseur de perte de quantité de mouvement δ_2 se réfère à la diminution de la quantité de mouvement dans la couche limite comparativement à un écoulement de fluide idéalisé. (Pour un débit massique donné $\int_0^\delta \rho u dy$), Soit :

$$\int_0^\delta \rho u dy \cdot U_e - \int_0^\delta \rho u^2 dy = \rho U_e^2 \delta_2$$

Donc δ_2 est donnée par :
$$\delta_2 = \int_0^\delta \frac{u}{U_e} \left(1 - \frac{u}{U_e}\right) dy \quad (\text{I.15})$$

On détermine aussi le facteur de forme H :

$$H = \delta_1 / \delta_2 \quad (\text{I.16})$$

Cela dépend des valeurs distinctes selon que la couche limite est laminaire ou turbulente.

Les propriétés de la couche limite dépendent de son état laminaire ou turbulent, lequel est lui-même lié au nombre de Reynolds. Ce nombre sans dimension, représentant le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses, est défini de la façon suivante :

$$R_e = \frac{U D}{\nu} \quad (\text{I.17})$$

Où :

- U : vitesse du fluide en mètres par seconde (**m/s**)
- ν : viscosité cinématique du fluide en mètres carrés par seconde (**m²/s**)
- D : dimension caractéristique de l'écoulement (ex. : diamètre ou longueur) en mètres (**m**)

I.5. Couches limites laminaire et turbulente

I.5.1. Écoulement laminaire

En dynamique des fluides, l'écoulement laminaire est caractérisé par des trajets lisses ou réguliers de particules du fluide, contrairement à un écoulement turbulent, marqué par des mouvements irréguliers désordonnés.

Le fluide s'écoule en couches parallèles, avec un mélange latéral minimal et sans perturbation entre les couches. Par conséquent, l'écoulement laminaire est également appelé écoulement fluide ou visqueux.

Le terme flux de courant est descriptif du flux car, dans un flux laminaire, des couches d'eau s'écoulant à différentes vitesses sans pratiquement se mélanger, les particules de fluide se déplacent dans des trajectoires ou des lignes de courant définies et observables.

Lorsqu'un fluide circule dans un canal fermé, tel qu'un tuyau ou entre deux plaques planes, deux types d'écoulement peuvent se produire : laminaire ou turbulent. Le type du flux dépend de la vitesse du fluide, de sa viscosité et de la taille du tuyau. L'écoulement laminaire a tendance à se produire à des vitesses plus basses et à une viscosité élevée.

I.5.2. Écoulement turbulent

En dynamique des fluides, un écoulement turbulent est caractérisé par le mouvement irrégulier (chaotique) des particules du fluide. Contrairement à l'écoulement laminaire, le fluide ne coule pas en couches parallèles, le mélange latéral est très élevé et il existe une rupture entre les couches.

La turbulence se caractérise par une recirculation, des remous et un caractère aléatoire apparent. Dans un écoulement turbulent, la vitesse du fluide en un point subit continuellement des changements d'amplitude et de direction.

Une connaissance détaillée du comportement du régime d'écoulement turbulent est importante en ingénierie, car la majorité des flux industriels, en particulier ceux de l'ingénierie nucléaire, sont turbulents. Malheureusement, le caractère hautement intermittent et irrégulier de la turbulence complique toutes les analyses. En fait, on dit souvent que la turbulence est le dernier défi non résolu de la physique mathématique classique.

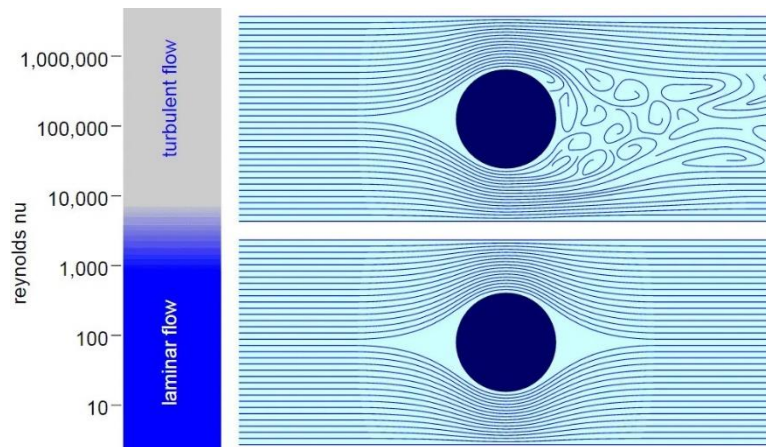


Fig. I. 9: Visualisation de la différence entre un écoulement laminaire et un Écoulement turbulent [7].

I.5.3. Écoulement tourbillonnaire

Ce type d'écoulement, qualifié de tourbillonnaire ou turbulent, se distingue par une forte instabilité du flux. Les particules fluides y adoptent des trajectoires irrégulières et désordonnées, générant des tourbillons, des zones de recirculation, et parfois même des mouvements rétrogradés.



Fig. I. 10: Écoulement tourbillonnaire [8]

I.5.4. Transition Laminaire-Turbulent de la couche limite

Généralement, la transition de l'état laminaire vers l'état turbulent est le produit d'une réaction non linéaire de la couche limite face à des perturbations.

Ces facteurs peuvent provenir de diverses sources, telles que le niveau de turbulence du flux libre, l'état de la surface (rugosité) ou encore les vibrations. Depuis les travaux menés par Reynolds en 1883, l'étude des phénomènes d'instabilité dans l'écoulement laminaire et de la transition vers la turbulence a toujours suscité un intérêt soutenu dans le domaine de la

Chapitre I Généralités sur l'aérodynamique et la couche limite

mécanique des fluides. Cette fascination découle du fait que des quantités aérodynamiques comme la portance ou la traînée sont liées à la transition. On utilise principalement des critères empiriques pour anticiper cette transition.

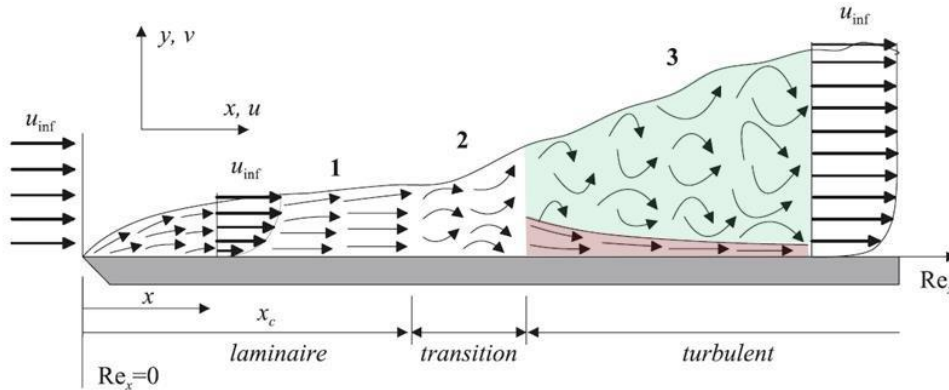


Fig. I. 11 : Couche limite se développant sur une plaque plane : passage de l'état Laminaire à l'état turbulent [9]

Quand la valeur du nombre de Reynolds franchit un seuil critique, on constate une transition de l'état laminaire de la couche limite vers un état turbulent.

L'apparition du phénomène est illustrée sur une plaque plane (**Fig. I.11**) On note un passage de la loi d'évolution en $x^{\frac{1}{2}}$ (couche limite laminaire) à la loi en $x^{\frac{4}{5}}$ (couche limite turbulente) pour le nombre de Reynolds critique $= 5 \times 10^5$, ce qui indique une transition de l'épaisseur de couche limite (**Fig. I.12**). D'autre part, au-dessus du nombre de Reynolds critique Re_c , des fluctuations turbulentes apparaissent dans la couche limite et intensifient les échanges de quantité de mouvement. La pente du profil de vitesse au voisinage de la paroi augmente en entraînant un accroissement de la contrainte pariétale [9].

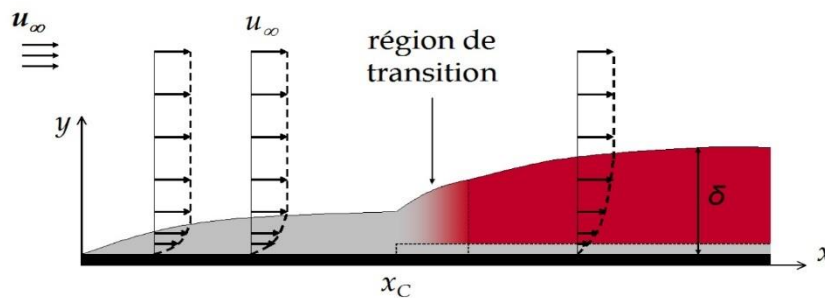


Fig. I. 12 : Transition de la couche limite sur plaque plane [8].

I.5.5. Décollement de la couche limite

Le décollement se produit lorsque l'on observe une progression de la couche limite en présence d'un gradient de pression défavorable, c'est-à-dire un gradient où la pression augmente dans le sens du flux. On peut rencontrer une telle situation, par exemple, lors d'un écoulement subsonique à travers un conduit divergent.

Dans ce type de géométrie, l'écoulement est freiné, ce qui se manifeste par une réduction de la vitesse extérieure $U_e(x)$ dans le sens du flux. De ce fait, selon la formule de Bernoulli, par une augmentation de la pression dans le sens de l'écoulement. Il est connu que la viscosité a pour effet de ralentir l'écoulement (en transférant, par diffusion, le moment cinétique des zones à haute vitesse vers les zones à basse vitesse) et que cet effet tend à être plus prononcé lorsque l'on est proche de la paroi. De plus, étant donné que les fluctuations de pression dans la couche limite sont minimales, on observe un gradient de pression positif dP/dx près de la paroi, dans la région où la vitesse est faible.

Si ce gradient de pression est assez puissant, il réduira la quantité de mouvement des particules fluides à proximité de la paroi d'une manière telle que la vitesse de ces particules finira par s'annuler puis par devenir négative : on dit alors que la couche limite décolle (**Fig.I.13**) [8].

On définit l'abscisse de décollement comme la position en laquelle la contrainte de frottement pariétal s'annule : $\tau_p = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} = 0$

Généralement, dans la région de recirculation qui suit le détachement, on observe une évolution d'instabilités et l'écoulement se transforme en turbulence. Si l'écoulement externe est accéléré (comme dans le cas d'un convergent), le gradient de pression négatif qui s'exerce sur la zone proche de la paroi favorise le transfert de quantité de mouvement et contribue à l'amincissement de la couche limite.

GRADIENT DE PRESSION DÉFAVORABLE

GRADIENT DE PRESSION FAVORABLE

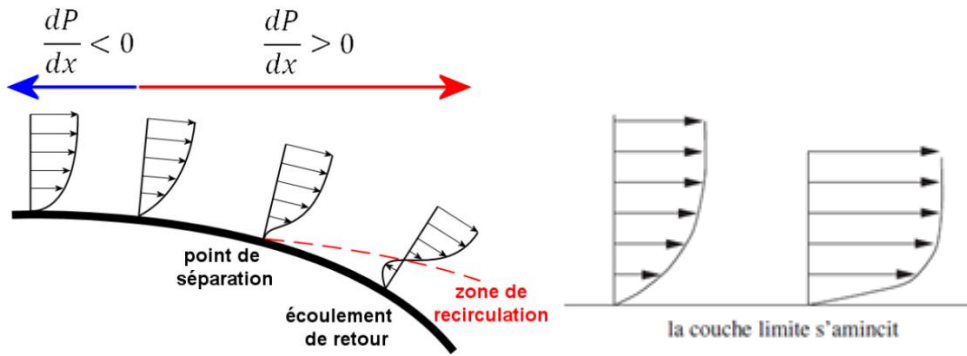


Fig. I. 13: Influence d'un gradient de pression extérieure sur le développement d'une couche limite [10].

I.6. Corps d'A Ahmed

Les écoulements d'air autour des véhicules automobiles sont régis par des phénomènes physiques complexes, étroitement liés à la forme et aux caractéristiques géométriques de chaque modèle. Pour analyser ces mécanismes de manière globale, il est indispensable d'utiliser un modèle simplifié.

C'est pourquoi le modèle du corps d'A Ahmed est couramment utilisé par les chercheurs et les professionnels du secteur automobile. Présenté dans les travaux d'A Ahmed et al. [10], ce modèle représente un véhicule simplifié à l'échelle 1/5, volontairement épuré de tout élément additionnel (**Fig. 1.14**).

Cette simplification géométrique permet de s'affranchir des effets aérodynamiques parasites générés par les éléments comme les rétroviseurs, les pare-brise ou les montants latéraux, dont les tourbillons peuvent influencer le sillage. Le modèle permet ainsi de se concentrer uniquement sur l'étude des écoulements liés aux décollements massifs à l'arrière du véhicule.

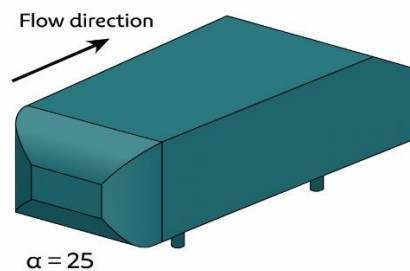


Fig. I. 14: Géométrie simplifiée d'A Ahmed dit corps d'A Ahmed [10].

I.6.1. Écoulement autour du corps d'Ahed

I.6.1.1. Écoulement sur la partie avant

L'écoulement sur la partie avant du corps d'Ahed a été étudié par Spohn et al. [11] à l'aide de techniques de tomographie et de visualisations pariétales. Il a été observé qu'un décollement se produit à environ 8 % de la longueur L de la géométrie (**Fig.I.15**). Sous la nappe de fluide décollée, un mouvement de rotation se développe. Le fluide remonte en direction de la ligne de séparation, ce qui provoque une expansion de la zone décollée dans les directions transversale et normale à la paroi. L'excès de fluide est alors périodiquement expulsé vers l'aval, induisant des oscillations du volume de la zone décollée à une fréquence d'environ 15 Hz [11].

Ces oscillations génèrent des structures tourbillonnaires de type Kelvin-Helmholtz, liées aux forts gradients de vitesse au sein du fluide, qui sont émises à une fréquence plus élevée, de l'ordre de 200 Hz .

De part et d'autre du plan de symétrie longitudinal, les lignes de courant à proximité de la paroi visualisées par tomographie dans un plan horizontal situé à 3×10^{-3} m du pavillon s'enroulent autour de deux foyers, formant deux vortex contrarotatifs qui se détachent de la paroi. Ces tourbillons, observés en lumière blanche, sont ensuite advectés le long du pavillon en direction de la zone de sillage.

Cependant, ces structures présentent une énergie moindre comparée à celle des tourbillons longitudinaux qui se développent le long des arêtes latérales du pare-brise sur une géométrie réelle de véhicule.

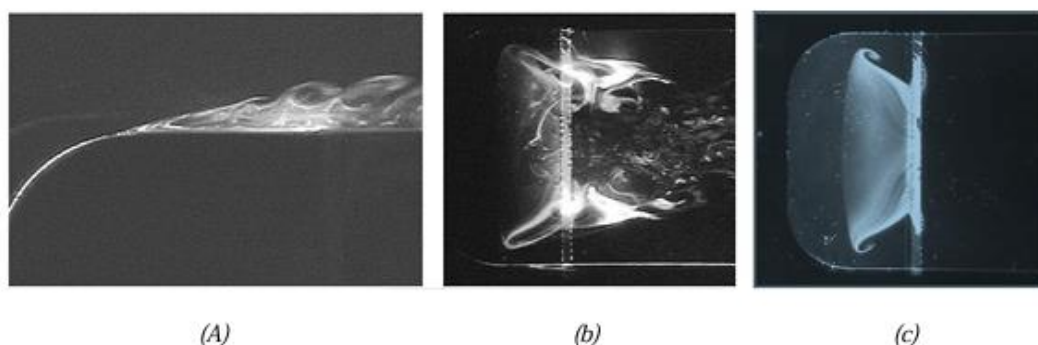


Fig. I. 15: (a) Visualisation du décollement avant en canal hydraulique avec un plan laser situé sur le plan de symétrie longitudinal, (b) Tomographie laser relevée dans un plan horizontal situé à 3.10^{-3} m au-dessus du pavillon. Vue du dessus de la maquette (c) Visualisation pariétale, lignes de frottement relevées sur le pavillon. Vue du dessus de la maquette en lumière blanche, d'après Spohn et al [11].

I.6.1.2. Ecoulement sur la partie arrière

Les analyses paramétriques portant sur l'angle d'incidence α de la lunette arrière ont permis de caractériser la structure de l'écoulement, ses propriétés aérodynamiques, ainsi que d'identifier une valeur critique à $\alpha=30^\circ$, marquant une transition nette dans la topologie de l'écoulement. Lorsque l'angle dépasse cette valeur critique ($\alpha>30^\circ$), la configuration de l'écoulement se modifie de manière significative, entraînant une diminution notable du coefficient de traînée (Fig1.16). En revanche, pour des angles inférieurs à 30° ($\alpha<30^\circ$), une augmentation progressive de l'incidence provoque un décollement partiel de l'écoulement, initialement attaché à la surface de la lunette arrière. Parallèlement, deux tourbillons de traînée contrarotatifs, de forte intensité, se forment aux coins supérieurs délimités par la jonction entre la lunette et les parois latérales, et se prolongent loin dans le sillage. La zone de recirculation partielle, observée par Ahmed et al, s'intensifie progressivement avec l'augmentation de l'angle d'incidence de la lunette.

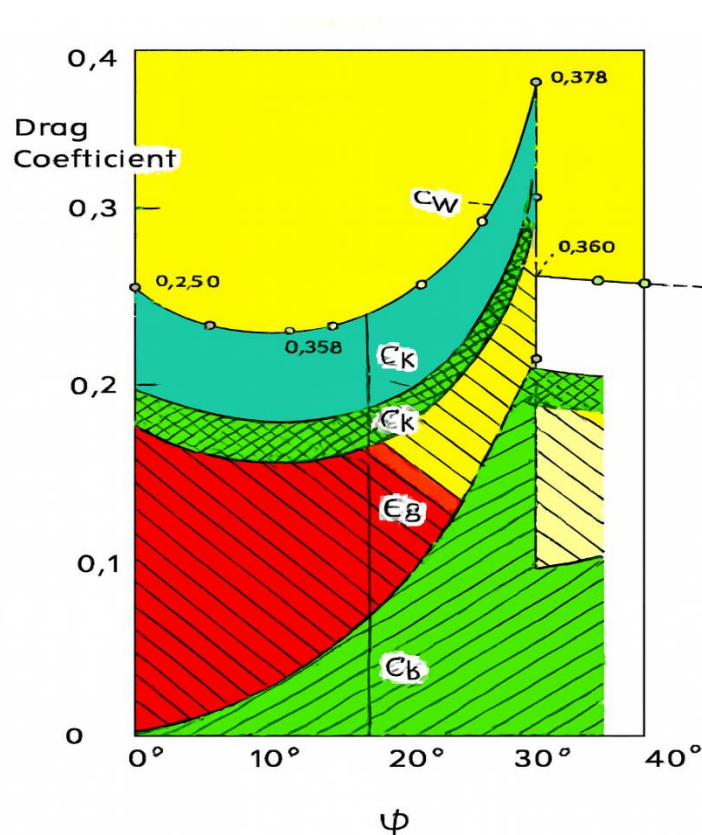


Fig. I. 16: Variation du coefficient de traînée en fonction de l'angle d'inclinaison de la lunette (Ahmed et al. (1984)) [12].

Dans le régime sur-critique, lorsque l'angle d'incidence α dépasse 30° , l'écoulement ne se réattache plus à la lunette arrière. Les tourbillons de traînée générés dans cette configuration sont alors moins intenses, ce qui conduit à une diminution marquée du coefficient de traînée (**Fig. I.16**).

La (**Fig. I.17**), illustre la topologie de l'écoulement pour deux angles distincts de la lunette arrière : $\alpha=25^\circ$ et $\alpha=30^\circ$.

Dans leur étude de 1984, Ahmed et ses co-auteurs ont montré que, dans ce contexte aérodynamique, environ 80 % de la traînée provient des forces de pression. Ils précisent également que la lunette arrière constitue la principale source de cette traînée.

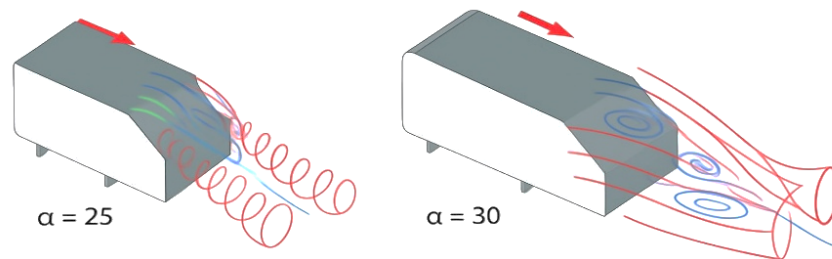


Fig. I. 17: Topologie de l'écoulement autour du corps d'Ahed pour les incidences sous-critique (gauche) et sur-critique (droite)[12].

I.7. Conclusion

Ce premier chapitre a permis de présenter les bases de l'aérodynamique et de montrer que les forces globales, comme la traînée et la portance, trouvent leur origine dans les mécanismes locaux de la couche limite. L'étude de ses caractéristiques, ainsi que l'exemple du corps d'Ahed, ont mis en évidence l'importance de ce concept pour relier la théorie des fluides parfaits aux applications pratiques en ingénierie automobile et préparer l'analyse des stratégies de contrôle développées dans les chapitres suivants.

Chapitre II

Etat de l'art

II.1. Introduction

La couche limite influence directement la traînée, la portance et le risque de décrochage. Pour améliorer les performances aérodynamiques, diverses techniques de contrôle ont été développées. Elles se divisent en deux catégories : passives, fondées sur des dispositifs fixes sans apport d'énergie, et actives, qui modifient l'écoulement par injection, aspiration ou apport énergétique. Ce chapitre présente une synthèse de ces méthodes et leurs applications dans les domaines automobile et aéronautique.

II.1.2. Approches de contrôle de l'écoulement

Le contrôle du décollement de la couche limite fait référence à plusieurs travaux dans le but d'améliorer les performances aérodynamiques, que ce soit en réduisant la traînée ou en augmentant la portance. Parmi les différentes stratégies développées, Gad El Hak [13] propose une classification en deux grandes stratégies : active et passive. Cette distinction repose principalement sur le type d'actionneur utilisé. L'ensemble de ces stratégies est synthétisé dans le schéma ci-dessus (Fig. II.1) :

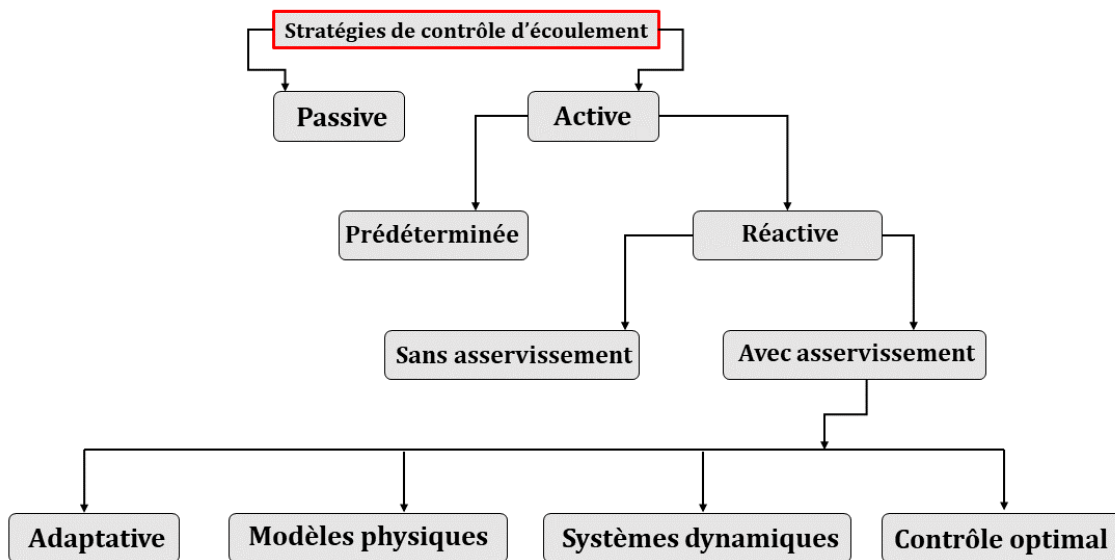


Fig. II. 1: Classification des stratégies de contrôle des écoulements [13].

En s'inspirant de la classification de Gad El Hak[13], Célestin Ott [14] a proposé une synthèse structurée des différentes catégories de méthodes de contrôle passif et actif :

Le contrôle passif se définit comme un mécanisme ne nécessitant aucun apport d'énergie externe au système. Il peut être classé selon plusieurs critères [14]. On distingue notamment le contrôle local, qui inclut l'utilisation de générateurs de tourbillons ou de cavités, ainsi que le contrôle pariétal, basé sur des modifications appliquées aux parois, telles que la variation de la rigidité, de la souplesse ou encore l'introduction de rugosité. On retrouve également le contrôle par ajout de corps, qui consiste à intégrer des dispositifs tels que des béquets, des ailerons, des déflecteurs ou des Winglets. À l'inverse, le contrôle actif correspond à un mécanisme nécessitant un apport d'énergie externe au système. Dans ce cadre, plusieurs approches peuvent être envisagées, comme l'utilisation d'actionneurs fluidiques fonctionnant à débit nul, à l'image des jets synthétiques [15] dans le schéma ci-dessous (**Fig.II.2**), ou à débit non nul, tels que les jets continus ou pulsés [14] comme ce présenté dans le schéma ci-dessous (**Fig. II.3**)

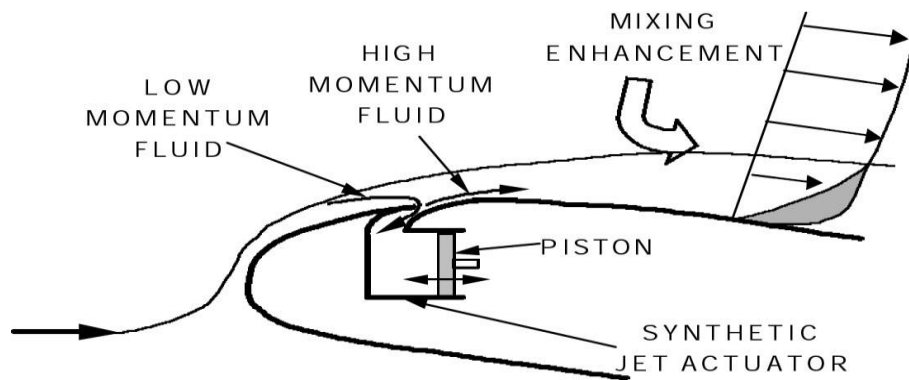


Fig. II. 2: Principe de fonctionnement du générateur de jets synthétiques mécanique [08].

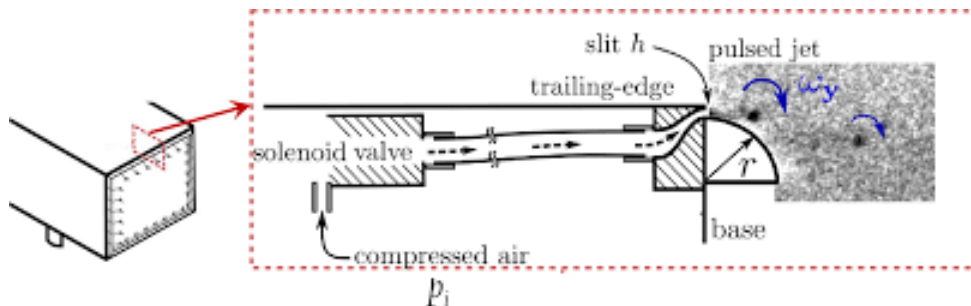


Fig. II. 3 : système de Jet pulsé [28].

D'autres méthodes reposent sur l'emploi de surfaces mobiles, par exemple vibrantes ou tournantes, ou encore sur l'application de la méthode plasma [16], comprenant notamment les sparkjets et les décharges diélectriques.

II.2. Contrôle passif

Dans le monde de l'automobile, chaque détail compte pour améliorer les performances d'un véhicule. Le contrôle passif en est un bon exemple : il permet d'optimiser l'aérodynamique sans recourir à des systèmes complexes, il s'appuie sur des modifications physiques ou géométriques de la surface ou de l'environnement de l'écoulement. Ces ajustements influencent naturellement la façon dont l'air circule autour de la carrosserie.

II.2.1 Optimisation du profil aérodynamique

À la fin du XIX^e et au début du XX^e siècle, les ingénieurs ont tenté d'appliquer à l'automobile des formes inspirées de la marine et des dirigeables, comme la torpille. Ces profils se sont souvent révélés peu efficaces, car les faibles vitesses rendaient la traînée aérodynamique secondaire. De plus, ils ignoraient que l'écoulement de l'air change lorsqu'un véhicule est proche du sol et équipé de roues, ce qui limite l'efficacité de ces formes. Certaines silhouettes, adoptées plus pour leur style que pour leur performance, ont même accentué les perturbations du flux d'air.

Malgré ces limites, certains véhicules ont marqué des avancées. La voiture électrique conçue par Camille Jenatzy en 1899, première à dépasser les 100 km/h, illustre cette évolution. Sa carrosserie en forme de torpille, (**Fig.II.4**) avec un rapport longueur/diamètre de 4, était profilée, mais les roues et le conducteur restaient exposés, augmentant considérablement la traînée. Ce véhicule est considéré comme le précurseur des voitures de course monoplaces, bien que sa carrosserie fût encore placée au-dessus des roues.

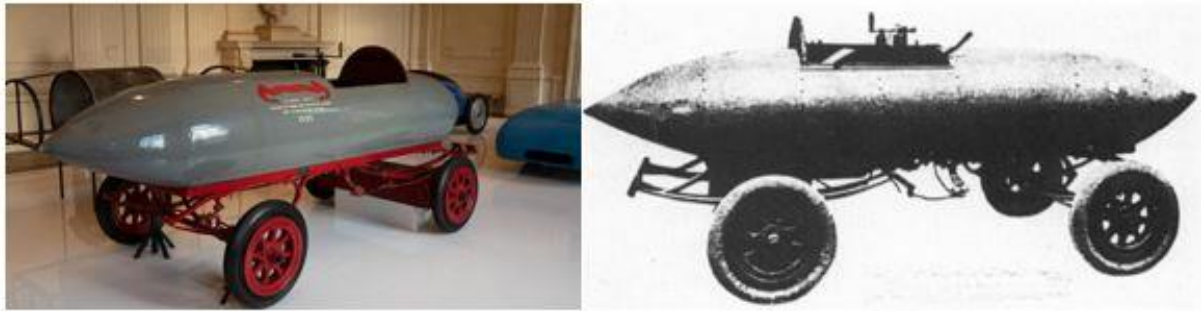


Fig. II. 4 : Voiture conçue par Camille Jenatzy en 1899 [16].

D'autres tentatives ont suivi, comme celle de l'Alfa Romeo de 1913 (**Fig.II.5**), dont le rapport longueur/hauteur atteignait environ 3. Des designs plus intégrés ont été proposés, notamment par O. Bergmann [16] avec des roues partiellement carénées. Cependant, ces projets n'ont pas abouti à une production industrielle. Parallèlement, le "cul de bateau", utilisé sur certaines limousines et voitures de sport, s'est avéré totalement inefficace sur le plan aérodynamique. L'air, qui se sépare à l'avant et au niveau des ailes, ne se réattache pas à l'arrière, ce qui annule les bénéfices supposés de cette forme. Ce type de design illustre comment des arguments techniques peuvent être détournés pour justifier des choix purement stylistiques.



Fig. II. 5 : L'Alfa Romeo du comte Marco Ricotti, conçue en 1913–1914.

Dans le cas des véhicules de série, l'application de géométries aérodynamiques idéales est souvent limitée par des contraintes liées au design, au confort des passagers et aux exigences pratiques de production. En effet, une forme parfaitement profilée, comme celle d'une goutte d'eau inversée, n'est pas compatible avec les besoins d'habitabilité, d'esthétique ou de sécurité. Pour pallier ces limitations, les constructeurs intègrent des appendices aérodynamiques, généralement placés à l'arrière du véhicule. Ces éléments permettent de guider l'écoulement de l'air et d'optimiser artificiellement la forme globale du véhicule. Ainsi, même si la carrosserie ne peut adopter une géométrie idéale, ces dispositifs contribuent

Chapitre II : Etat de l'art

à améliorer les performances aérodynamiques tout en respectant les contraintes du design automobile moderne.

La Hyundai Ioniq 6 illustre parfaitement ce que peut être une voiture moderne pensée pour l'efficacité. Ce modèle 100 % électrique mise sur un design épuré et des lignes soigneusement travaillées pour optimiser l'aérodynamisme. Chaque détail semble avoir été conçu pour fendre l'air avec le moins de résistance possible.

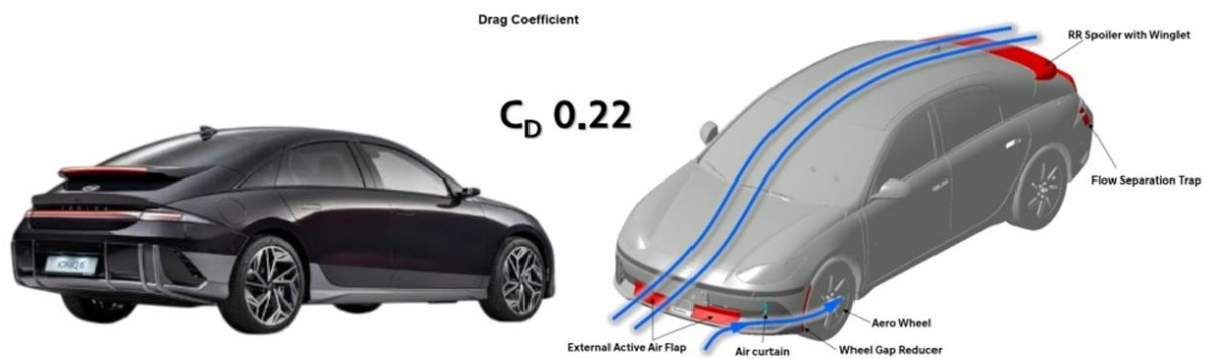


Fig. II. 6 : Hyundai Ioniq 6 [18].

II.2.2 Appendices aérodynamiques

Les dispositifs comme les enjoliveurs profilés ou les jupes latérales aident à calmer les turbulences autour des roues, ce qui améliore à la fois l'efficacité énergétique et le confort de conduite. Prenons le cas des becquets (**Fig. II.7. a**) ou des diffuseurs (**Fig. II.7. b**), ces éléments ne sont pas là uniquement pour le style. Ils dirigent le flux d'air, réduisent la traînée et renforcent la stabilité du véhicule, surtout à grande vitesse.



Fig. II. 7 : Installation de becquets et diffuseurs dans un véhicule.

II.2.3 Générateurs de vortex

Les générateurs de vortex, sont conçus pour modifier l'écoulement de l'air à proximité des parois. Ce sont de petits dispositifs, proportionnellement réduits par rapport aux dimensions de l'objet étudié, et installés à intervalles réguliers perpendiculairement à la direction de l'écoulement principal. La figure (**Fig. II.8**) illustre une série de générateurs de vortex installés sur la partie supérieure d'un véhicule.



Fig. II. 8 : Exemple de contrôle passif par générateurs de vortex.

II.2.4 Générateurs de vortex appliqués à corps d'A Ahmed

Les générateurs de vortex ont été notamment appliquée sur des configurations de type corps d'A Ahmed. Une étude [7] explore le contrôle passif de l'écoulement autour d'un corps d'A Ahmed modifié (lunette arrière arrondie), à l'aide de générateurs de vortex trapézoïdaux. L'angle α peut être varié. Elle montre que ces dispositifs influencent fortement les forces aérodynamiques, avec une réduction maximale de traînée de 12 % et de portance de plus de 60 %, selon divers paramètres géométriques et la vitesse de l'écoulement.

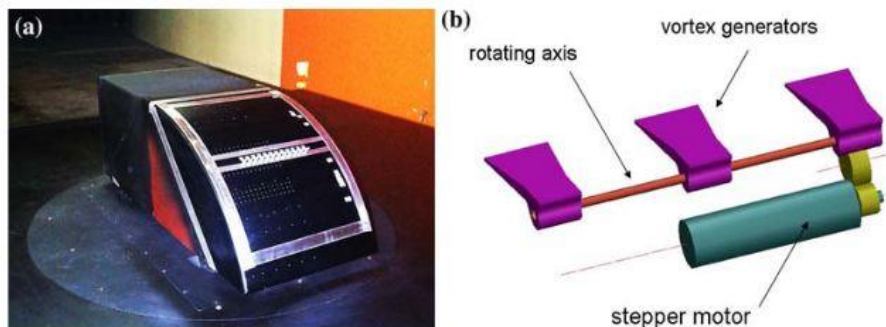


Fig. II. 9: Vue arrière du modèle (a), équipé d'un ensemble de générateurs de vortex fixés sur un axe rotatif motorisé (b) [19].

Les visualisations PIV révèlent une influence marquée sur le sillage, caractérisée par un allongement de la zone de recirculation.

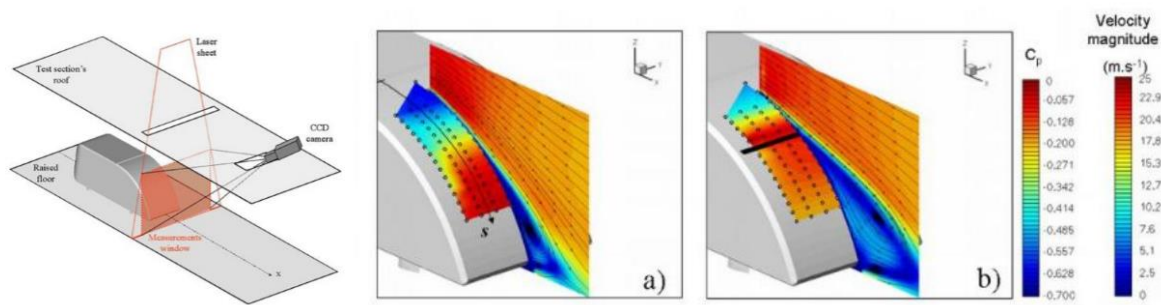


Fig. II. 10: Dispositif PIV utilisé pour les mesures ($x= 0,53$ m). La source laser et la caméra CCD sont positionnées au-dessus du toit de la section d'essai. a) Cas non contrôlé. b) Cas contrôlé [19].

II.2.5 Contrôle par modification de surface

Cette méthode consiste à modifier la texture d'une surface en y ajoutant de la rugosité afin d'influencer l'écoulement du fluide. En favorisant la transition vers un régime turbulent, la couche limite devient plus énergétique et reste mieux accrochée, ce qui retarde son décollement. Cela permet, dans certains cas, de limiter les pertes liées à la séparation du flux. Cependant, une rugosité trop marquée peut accroître la traînée par frottement, d'où l'importance de trouver un équilibre judicieux dans le design des surfaces.

Parmi les exemples les plus connus de cette stratégie est l'ajout d'aspérités sur les balles de golf (**Fig. II.11**). Cette idée repose sur une observation simple : les irrégularités en surface génèrent des turbulences dans le flux d'air, ce qui diminue la traînée aérodynamique et permet à la balle de parcourir une plus grande distance.

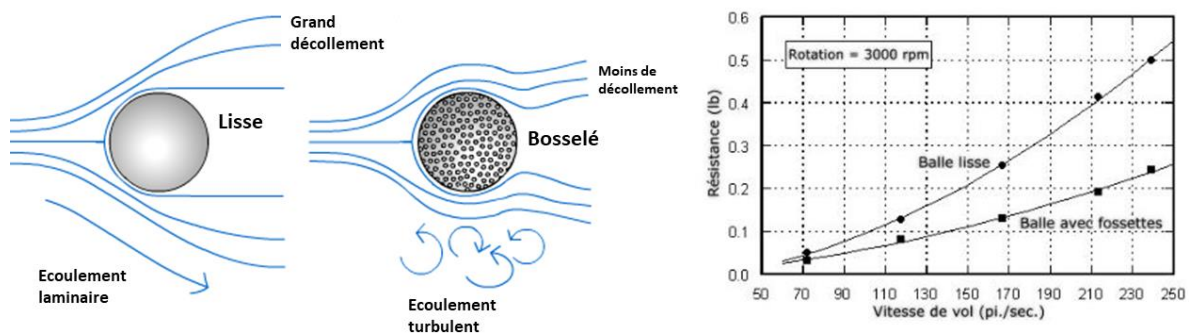


Fig. II. 11: Illustration de la résistance de l'air en fonction de la rugosité de la surface d'une balle de golf.

Comparées aux surfaces lisses, les parois rugueuses tridimensionnelles induisent une intensification du frottement pariétal et de la turbulence, en favorisant l'apparition de structures tourbillonnaires à petite échelle au sein de la couche limite (**Fig.II.12**). Ces aspérités perturbent l'écoulement local, déclenchant plus rapidement la transition vers un régime turbulent.

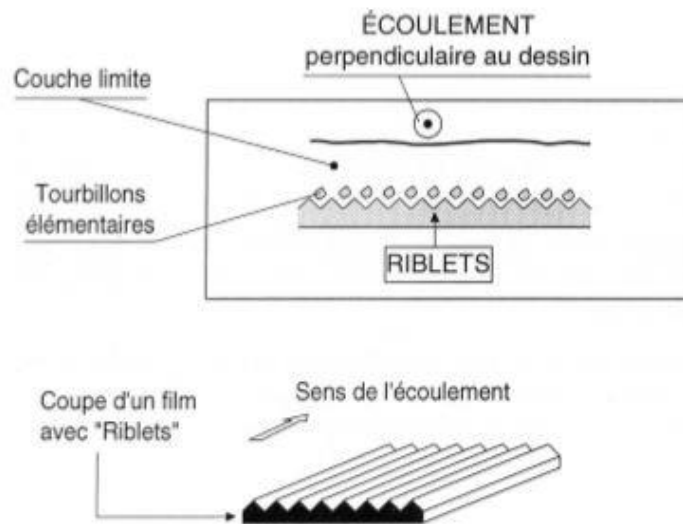
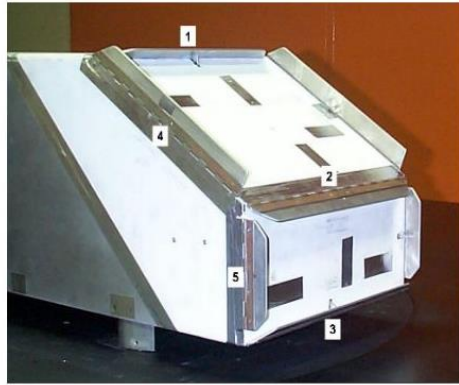


Fig. II. 12: Contrôle d'écoulement turbulent par système de riblets (Peyrat-Armandy (1997)) [20].

II.2.6. Contrôle par déflecteur

Parmi les stratégies de contrôle passif classiques, on trouve l'utilisation de déflecteurs placés aux points de décollement. Ces dispositifs sont positionnés selon une longueur et un angle bien défini. Dans l'étude précédente [19], le corps d'Ahmed a été équipé de sept déflecteurs, disposés comme illustré dans la figure ci-dessous (**Fig. II.13**). Plusieurs combinaisons de configurations ont été testées, conduisant à une réduction de la traînée pouvant atteindre 25 %. Ce type de contrôle a permis aussi une réduction significative de portance allant jusqu'à un gain supérieur à 100% en portance (force inversée).



Configuration number	ΔC_x (%)	ΔC_z (%)
6 (configurations 1 et 4)	-0.073 (-20.7%)	-0.435 (-94.3%)
7 (configurations 4 et 2)	-0.031 (-8.9%)	-0.129 (-26.2%)
8 (configurations 3 et 5)	-0.025 (-7.1%)	-0.084 (-18.3%)
9 (configurations 2, 3 et 5)	-0.044 (-12.4%)	-0.210 (-46.7%)
10 (configurations 4, 3 et 5)	-0.079 (-22.4%)	-0.496 (-107.4%)
11 (configurations 1, 2, 3, 4 et 5)	-0.089 (-25.2%)	-0.488 (-105.7%)

↓ Gain en trainée
 ↓ Gain en portance

Fig. II. 13: Vue de l'arrière du corps d'A Ahmed équipé de sept déflecteurs pilotés sur chacune des arrêtes. Les numéros indiquent les différentes configurations qui ont été testées[19].

II.2.7. Contrôle par des barreaux verticaux

Dans leur étude, Evrard et al. (2016) [21] se sont penchés sur un corps d'A Ahmed à culot droit, équipé de volets formant une cavité à l'arrière. Ce dispositif expérimental permettait d'ajuster la profondeur de la cavité (d), offrant ainsi une flexibilité dans l'analyse des écoulements. Les prises de pression, réparties sur le modèle et représentées par des points bleus, fournissaient une cartographie fine des variations de pression. L'origine du système de coordonnées était placée au centre de la base arrière du corps, facilitant les mesures et les comparaisons.

Pour enrichir cette configuration, les chercheurs ont introduit un cylindre vertical passif, fixé à l'arrière du corps à l'aide de deux fines tiges. Placé au centre de la zone de recirculation, ce barreau avait pour objectif de perturber le sillage et de modifier la dynamique des tourbillons. En combinant une profondeur de cavité suffisante (10 % de la hauteur caractéristique H du corps étudié) avec l'ajout du barreau, les fluctuations du gradient de pression latéral, responsables de la bi-stabilité sur le culot, ont été supprimées. Cette stabilisation du sillage s'est traduite par une réduction significative de la traînée atteignant 9 %.

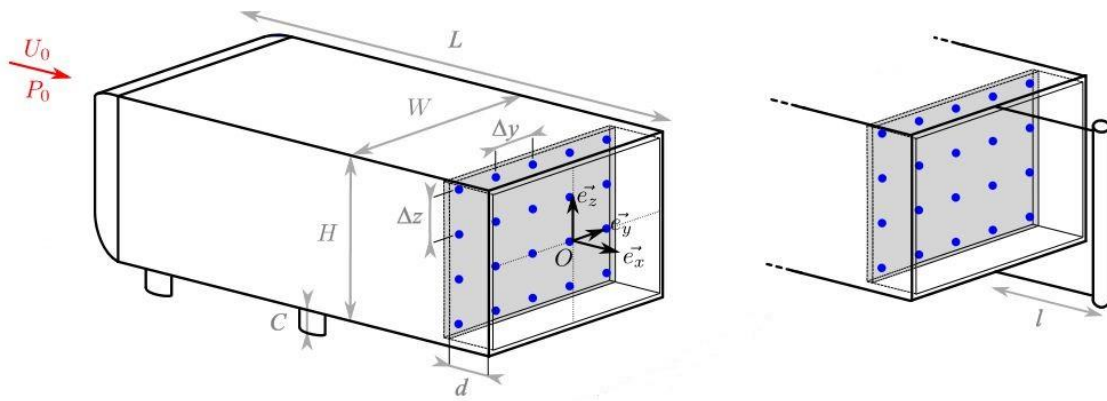


Fig. II. 14 : Montage du corps d'A Ahmed avec cavité et barreau d'Evrard et al pour suppression passive de la bi-stabilité latérale [21].

II.2.8. Contrôle par des plaques séparatrices

II.2.8.1 Plaques séparatrices transversales (PST)

Les plaques séparatrices transversales (PST) jouent un rôle stratégique dans le contrôle du sillage aérodynamique (**Fig.II.15**). Leur principe repose sur une perturbation ciblée de l'écoulement derrière le corps, dans le but de réduire la surface du sillage et d'augmenter la pression au niveau du culot.

Des essais en soufflerie réalisés sur un modèle de corps d'A Ahmed à culot droit ont mis en évidence l'efficacité de ce dispositif [09]. En positionnant une plaque à $0,7H$ en aval du culot (où H représente la hauteur du culot), les chercheurs ont observé un resserrement du sillage d'environ 10 %. Ce resserrement s'est traduit par un gain aérodynamique significatif, avec une réduction de traînée de 11,6 %.

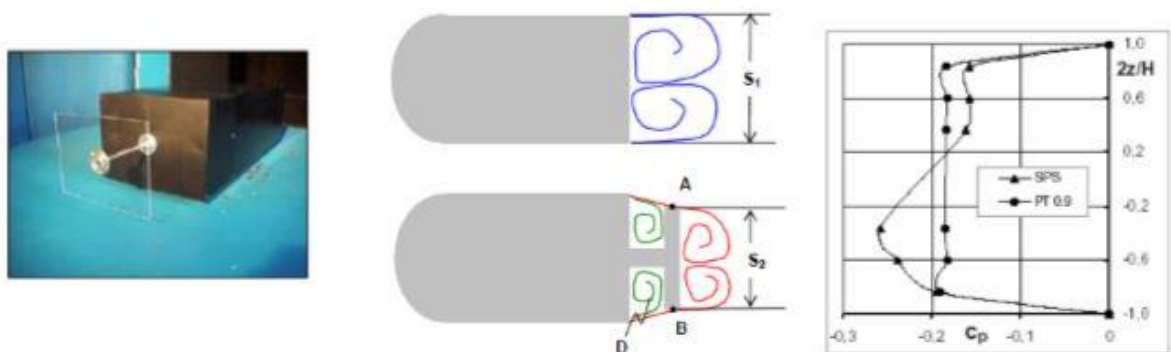


Fig. II. 15 : Plaques séparatrices transversales. La recirculation du fluide dans la cavité D entraîne une remontée de pression au niveau du culot d'origine. La présence de la plaque uniformise et augmente la pression [9].

II.2.8.2 Plaques séparatrices longitudinales (PSL)

Les plaques séparatrices longitudinales (PSL) fonctionnent selon le même principe que les plaques séparatrices transversales (PST), en modifiant la structure du sillage afin de réduire la traînée aérodynamique. Disposées sur la périphérie du culot et inclinées à 15° par rapport à l'horizontale, elles permettent de canaliser l'écoulement et de limiter les fluctuations latérales. L'utilisation de ce type de contrôle a permis une réduction de la traînée de l'ordre de 22 % sur un corps d'Ahmed à culot droit, accompagnée d'une diminution de la section de sillage et d'une augmentation de la pression relevée sur le plan longitudinal médian [9].

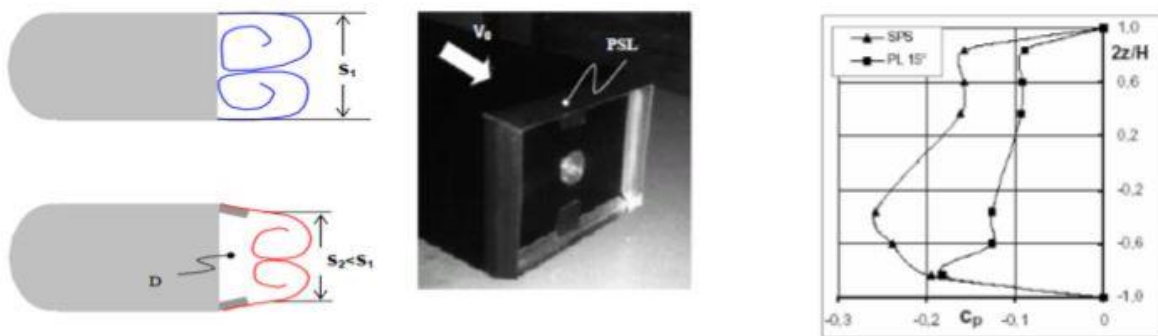


Fig. II. 16 : Plaques séparatrices longitudinales [9].

Ce type de solution de plaques longitudinales a également été testé dans l'industrie du véhicule lourd de transport de marchandise. On estime entre 4 et 6% les gains que l'on peut apporter sur un camion (Américain) via des appendices aérodynamiques. Ces solutions doivent permettre d'inhiber les zones de pertes de pression classiques sur les camions. À savoir, la forme globale du tracteur, l'écart et la transition avec la remorque, l'écoulement de soubassement de la remorque ou encore le décollement massif au niveau du culot de la remorque. Certaines sociétés proposent actuellement des produits d'ajout d'appendice de solution passive de contrôle d'écoulement (**Fig.II.17**) et communiquent sur des chiffres de réduction de fuel de l'ordre de 3.5%. Il s'agit dans ce cas de jouer sur le décollement en fin de remorque. Le décollement est reporté et réorienté afin de réduire les sections équivalentes de sillage dans l'écoulement [9].



Fig. II. 17 : A gauche : Plaques longitudinales utilisées sur un poids lourd. A droite : Appendice amovible "Aerovolutionproduct" [9].

II.3. Contrôle actif

Le contrôle actif de l'écoulement est une approche qui consiste à intervenir directement sur le fluide en mouvement (comme l'air autour d'un véhicule) pour modifier son comportement. Contrairement au contrôle passif, qui repose uniquement sur la forme de l'objet (profil, courbure, inclinaison...), le contrôle actif injecte de l'énergie ou une puissance auxiliaire dans le fluide pour influencer son écoulement.

Afin d'influencer le comportement d'un écoulement, on peut lui injecter de l'énergie (un peu comme donner une impulsion à un courant d'air pour le rediriger). Cette énergie peut venir de différentes sources : électrique, mécanique, thermique, acoustique ou même fluide. Elle est transmise au fluide grâce à des dispositifs appelés actionneurs, qui utilisent des techniques comme le soufflage, l'aspiration ou des jets pulsés pour agir précisément sur certaines zones du flux.

Mais tous les actionneurs ne se valent pas : ils diffèrent selon le type d'énergie qu'ils utilisent, leur position par rapport au flux (qu'ils agissent sur le côté ou dans le sens de l'écoulement), et l'étendue de leur influence (locale ou globale). Le défi, c'est donc de choisir le bon actionneur, celui qui permettra d'atteindre l'objectif de contrôle tout en consommant le moins d'énergie possible.

II.3.1 Contrôle actif par soufflage continu

Le soufflage à travers des micro-orifices. Est parmi les méthodes utilisées afin de retarder une séparation, améliorer le mélange, ou stabiliser une zone critique, tout en ajoutant de l'énergie cinétique au fluide. Contrairement aux systèmes classiques qui consomment beaucoup d'air pour un effet parfois limité, cette approche permet d'agir de manière plus précise et plus efficace. Grâce à leur petite taille et à leur placement stratégique, ces micro-orifices injectent le jet d'air directement là où il est le plus utile, pénétrant plus profondément dans le flux et améliorant ainsi le contrôle aérodynamique.

Ce procédé est particulièrement utile dans plusieurs domaines, comme l'aéronautique, l'automobile ou les systèmes de refroidissement de haute performance. En jouant finement sur la quantité de mouvement introduite dans le fluide.

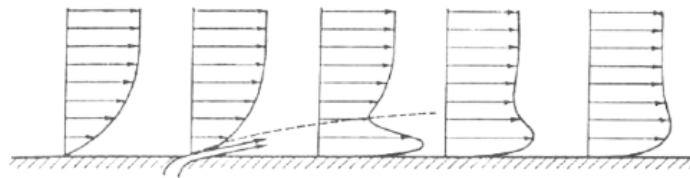


Fig. II. 18 : Contrôle de la couche limite par soufflage tangentiel.

S. Bourgois et al. [22] ont utilisés cette technique avec un actionneur sur un profil épais (de type NACA 0015). L'étude porte sur l'utilisation de micro-jets et de fentes de soufflage tangentiel afin de retarder ou d'éliminer les décollements de couche limite. Deux configurations expérimentales sont considérées : une plaque plane présentant un décollement inertiel et un profil d'aile symétrique de type ONERA D avec un décollement au bord d'attaque. Les actionneurs fluidiques fonctionnent en mode continu, tandis que les effets sont évalués au moyen de la tomoscopie laser, de visualisations pariétales et de mesures de pression. Les résultats mettent en évidence une amélioration notable du comportement aérodynamique grâce au soufflage induit par ces micros jets.

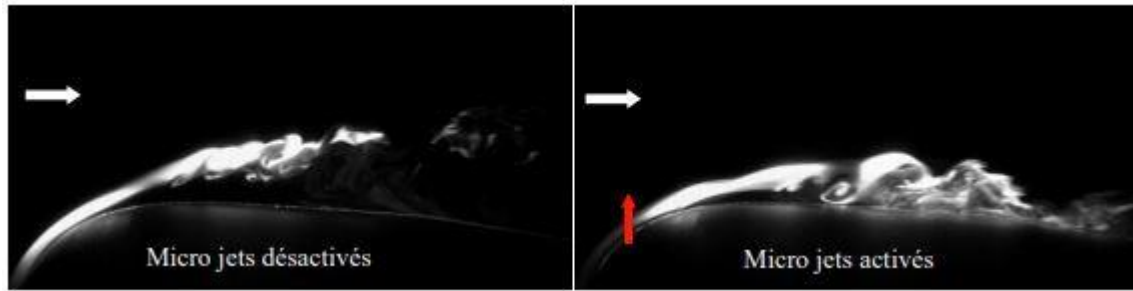


Fig. II. 19 : Illustration de l'écoulement avec et sans contrôle par micro-jets, visualisé par tomoscopie laser [22].

II.3.2. Contrôle actif par soufflage appliqué à un corps d'A Ahmed

Dans une démarche plus récente et orientée vers des applications industrielles, Tarakka et al. (2023) [23] ont évalué l'efficacité du soufflage actif à l'arrière d'un modèle automobile simplifié, en utilisant une injection contrôlée d'air à travers des orifices judicieusement positionnés, (**Fig. II.20**).

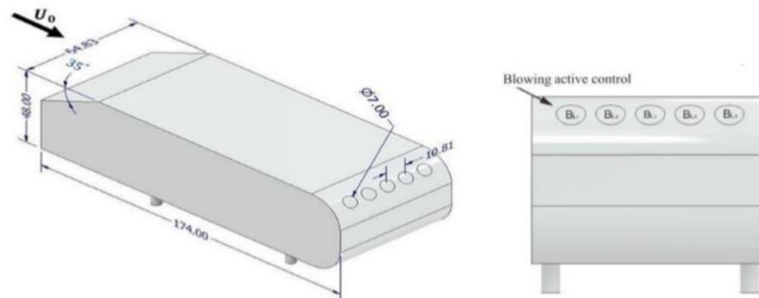


Fig. II. 20 : Position des orifices de soufflage sur le modèle du corps d'A Ahmed[23].

Leur méthode repose sur le principe de l'apport d'énergie cinétique dans la couche limite afin de retarder la séparation de l'écoulement. Grâce à une distribution ciblée des jets, ils ont réussi à limiter la formation de tourbillons longitudinaux et transversaux, réduisant ainsi les fluctuations de pression dans le sillage. Cette stratégie a permis une réduction de traînée d'environ 12 %.

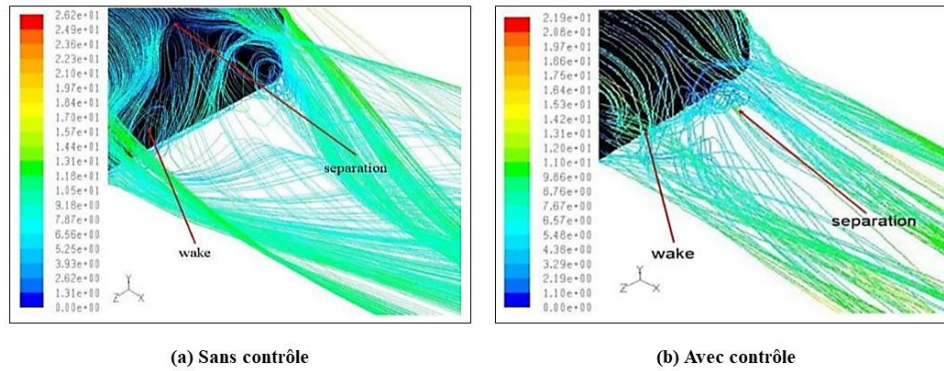


Fig. II. 21: Champ d'écoulement, (a) avec contrôle et (b) sans contrôle [23].

II.3.3. Contrôle actif par aspiration de la couche limite

Le principe de l'aspiration de la couche limite repose sur une modification du profil de vitesse de l'écoulement externe, généralement réalisée en aspirant l'air à travers une fente placée sur la surface. Cette aspiration a pour effet d'accélérer le flux juste après le point d'aspiration, ce qui entraîne une réduction significative de la traînée. En plus de cela, elle permet à l'écoulement de mieux résister au gradient de pression défavorable. En effet, après la fente, la couche limite se redéveloppe à partir d'une épaisseur très faible, voire quasiment nulle, ce qui améliore la stabilité du flux. La Figure (**Fig.II.22**) illustre clairement comment l'aspiration influence le profil de vitesse dans la couche limite.

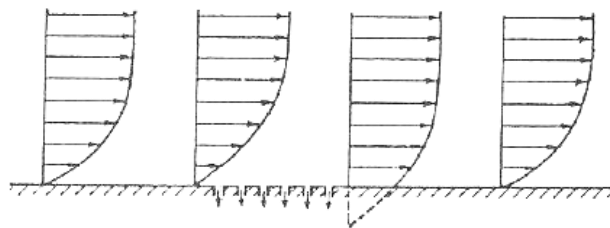


Fig. II. 22 : Contrôle aérodynamique de la couche limite par aspiration.

La Figure (**Fig.II.23**) montre une visualisation de l'écoulement autour d'un cylindre réalisé par Prandtl en 1904. L'aspiration est appliquée par une fente sur l'extrados. L'écoulement a suivi la surface sur laquelle l'aspiration a été appliquée, ce qui repousse le point de séparation loin en aval [24].

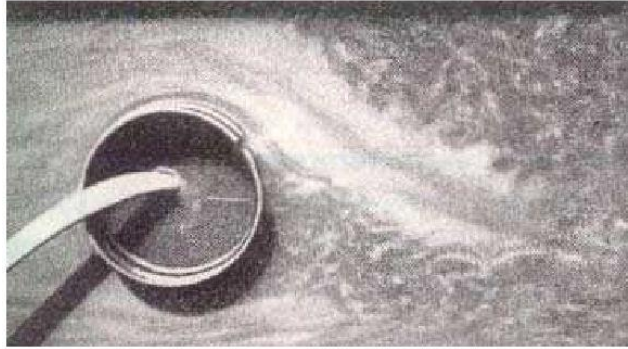


Fig. II. 23: *Ecoulement autour d'un cylindre avec aspiration de la couche limite [24].*

II.3.4. Contrôle actif par aspiration appliqué à un corps d'A Ahmed

Rouméas et al, [25] ont testé un système d'aspiration placé en haut de la lunette arrière sur un modèle simplifié de voiture, construit selon le modèle simplifié du corps d'A Ahmed. L'idée était simple : éviter que l'air ne se détache brutalement à l'arrière, comme c'est souvent le cas sur les véhicules fastback. En intervenant directement sur la couche limite, ce dispositif a réussi à stabiliser l'écoulement et à réduire les zones de recirculation. Ce qui a permis une baisse de la traînée aérodynamique allant jusqu'à 17 %, sans modifier la forme du véhicule.

Dans l'étude du sillage proche, certains repères comme le centre du tourbillon **C**, le point selle **S** et le point d'attachement **N** permettent de décrypter le comportement du fluide. Ils révèlent les zones de recirculation, les transitions d'écoulement et les limites de séparation, essentiels pour comprendre l'impact d'un contrôle actif sur l'aérodynamique.

Selon l'étude menée par Rouméas et al. [25], l'intégration d'un système d'aspiration à l'arrière du véhicule a profondément modifié la structure du sillage proche. Ce dispositif élimine la zone de séparation au niveau de la lunette arrière, aligne les centres tourbillonnaires **C1** et **C2** sur une même abscisse ($x/h_c = 0,48$) et repositionne le point d'attachement **N** vers la partie supérieure de la base. Ces transformations stabilisent l'écoulement, atténuent les phénomènes de recirculation et renforcent la symétrie du sillage, entraînant ainsi une réduction significative de la perte de pression et une amélioration notable des performances aérodynamiques.

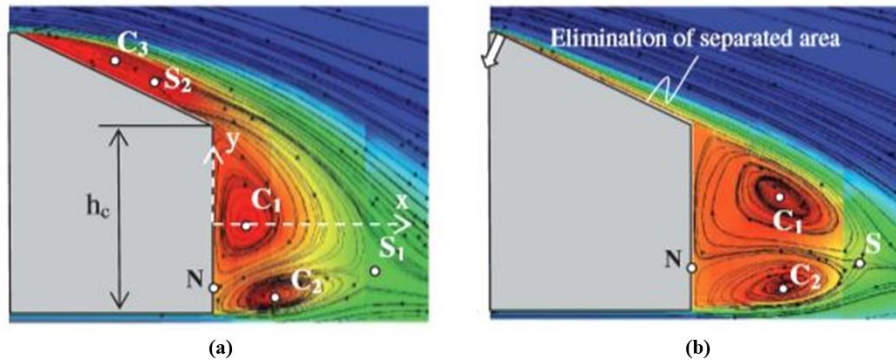


Fig. II. 24 : Champs du coefficient de perte de pression totale, mesurés dans le plan médian longitudinal : (a) sans contrôle ; (b) avec contrôle [25].

II.3.5 Combinaison du soufflage et aspiration

Dans le domaine de l'aérodynamique ferroviaire, certains chercheurs tentent à repousser les limites des méthodes classiques en combinant deux techniques : le soufflage et l'aspiration d'air. Parmi eux, Hongjiang Cui et al. [26] (2024), ont mené une étude particulièrement intéressante. Leur objectif est de réduire la traînée aérodynamique qui freine les trains à grande vitesse, en s'attaquant spécifiquement au bogie situé à l'arrière d'un train à unité multiple (EMU).

Pour tester leur idée, ils ont utilisé des simulations numériques afin d'observer comment l'air circule autour du bogie lorsqu'on y ajoute des orifices d'aspiration et de soufflage sur les plaques avant et arrière. Les résultats sont prometteurs : cette méthode permet de diminuer la traînée de pression, avec une réduction allant jusqu'à 3,82 % pour la voiture de queue à une vitesse de soufflage de $0,05U$, et jusqu'à 4,61 % pour le bogie à $0,2U$.

En modifiant la façon dont l'air s'écoule, cette approche aide le fluide à mieux résister aux zones de pression défavorable, là où il a tendance à ralentir ou à créer des turbulences. Cela ouvre la voie à des solutions plus actives et efficaces que les dispositifs passifs traditionnels, pour rendre les trains encore plus rapides et économes en énergie.

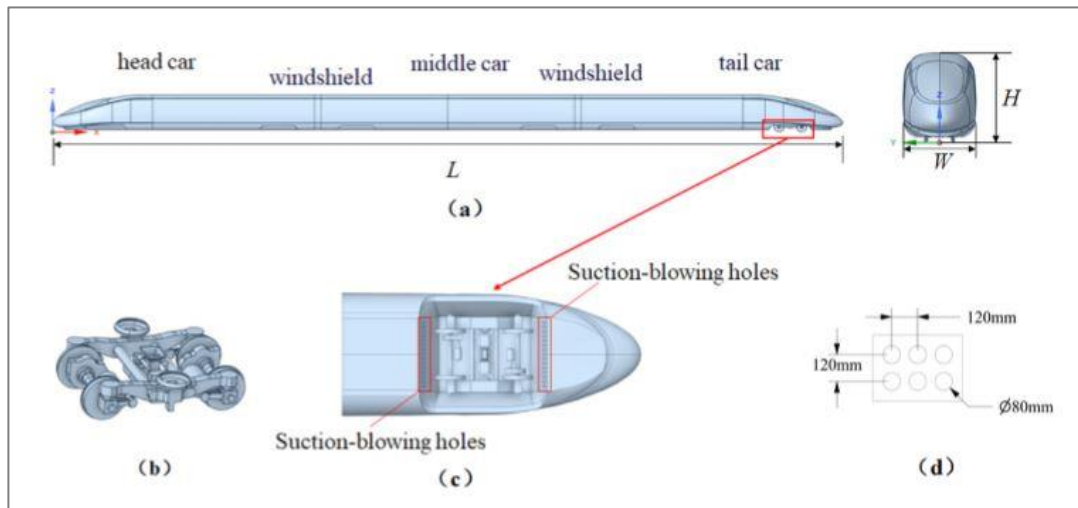


Fig. II. 25: Modèle simplifié d'un EMU : (a) Modèle simplifié de la carrosserie des unités multiples ; (b) Modèle de bogie ; (c) Position des orifices d'aspiration et de soufflage ; (d) Dimensions des trous d'aspiration et de soufflage [26].

II.3.5. Contrôle actif par jet synthétique

Les bases du jet synthétique sont décrites par Ingard dès 1953 [15], 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 [27] sur un cylindre circulaire. C'est une technique de contrôle actif des écoulements qui injecte de l'énergie dans l'air sans ajouter de masse, grâce à un mouvement de piston. Lors de la remontée du piston, l'air est soufflé à travers un orifice, créant un jet avec turbulence et tourbillons. Lors de la descente, l'air est aspiré de l'extérieur, surtout près des parois, ce qui génère du cisaillement et aide à détacher le jet soufflé. Ce cycle d'aspiration et de soufflage produit un effet net sur l'écoulement, avec des anneaux tourbillonnaires visibles dans le champ de vitesse moyen. C'est une méthode efficace pour influencer le comportement de l'air autour d'un objet sans modifier sa forme.

La Figure (**Fig.II.26**) 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 [15]. Le débit de masse moyen d'un jet synthétique est donc nul, ce qui est un avantage certain car cela permet de s'affranchir des problèmes dus au stockage de l'air soufflé ou aspiré.

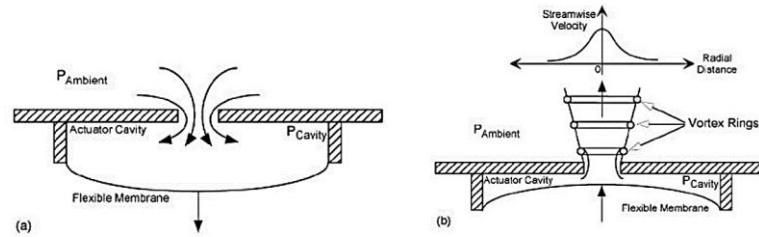


Fig. II. 26: Représentation schématique du jet synthétique En (a) phase d'aspiration et (b) phase de soufflage [15].

II.3.6. Contrôle actif par jet pulsé

Les jets pulsés sont des écoulements d'air dont le comportement peut être ajusté grâce à un mécanisme d'actionnement régulier, souvent piloté par des valves ou des systèmes électromécaniques. Ce qui influence le plus leur efficacité, c'est la fréquence à laquelle on les active. Si cette fréquence est élevée, les tourbillons créés par chaque impulsion se rapprochent, interagissent et fusionnent pour former un jet plus homogène, semblable à un jet continu, capable de mieux pénétrer dans le flux principal. En revanche, si la fréquence est trop basse, les tourbillons n'ont pas le temps de se rencontrer ni de se renforcer mutuellement, ce qui rend le jet moins structuré et moins performant. C'est pourquoi bien régler cette fréquence est crucial : cela permet d'adapter le jet à différents objectifs, comme améliorer le contrôle des écoulements, réduire la traînée ou encore optimiser le refroidissement dans des systèmes complexes. En somme, c'est un jeu d'équilibre entre rythme et efficacité.

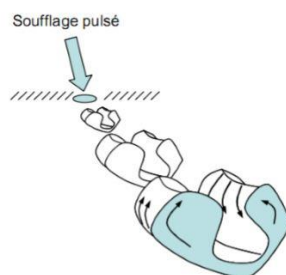


Fig. II. 27 : Jet pulsé.

II.3.7. Contrôle actif par jet balayant

Un jet balayant est un jet d'air continu qui oscille latéralement, c'est-à-dire qu'il se déplace d'un côté à l'autre de la sortie de l'actionneur. Ce mouvement est obtenu grâce à un phénomène appelé effet Coanda, qui fait que le jet d'air s'attache naturellement à une paroi. Quand le jet se colle à une paroi, il crée une surpression dans un canal de retour, qui pousse ensuite le jet à changer de côté. Ce va-et-vient se répète en continu, créant une oscillation automatique du jet.

Ce type de jet est intéressant car il perturbe efficacement l'écoulement de l'air sans nécessiter un gros débit, ce qui le rend plus économique que les jets classiques. Il est utilisé pour contrôler la couche limite, afin d'éviter la séparation de l'écoulement et réduire la traînée.

Cependant, l'actionneur qui produit ce jet présente une limite : sa fréquence d'oscillation, sa vitesse et sa pression d'alimentation sont liées entre elles, ce qui empêche de modifier un paramètre sans affecter les autres. C'est pourquoi le choix des dimensions et des matériaux utilisés pour usiner ce type d'actionneur doit être fait par affinité. Célestin [14] s'est basé sur la géométrie développée par Wygnanski et al [28]. Afin d'usiner un actionneur, qui a ensuite été imprimé en résine pour s'adapter au dispositif expérimental. Son principe de fonctionnement est illustré dans la figure suivante :

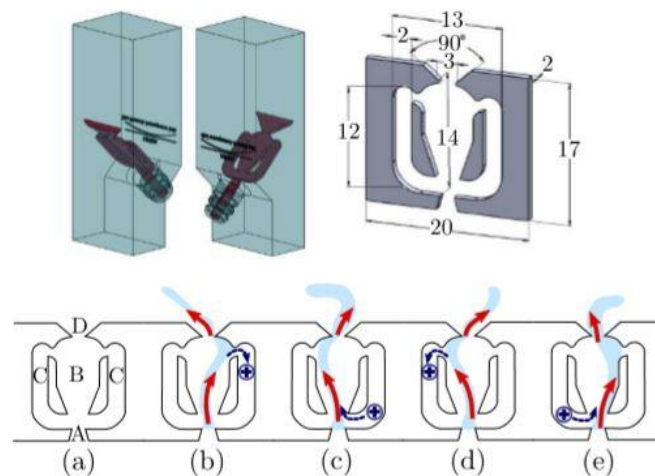


Fig. II. 28: Principe du jet balayant [14].

L'actionneur est composé de plusieurs parties : une entrée d'air (A), un corps principal (B), deux canaux de retour (C) et une sortie (D). Quand l'air entre, il s'attache naturellement à l'une des parois internes grâce à l'effet Coanda. Ce jet collé crée une surpression dans le canal

de retour correspondant, qui se propage jusqu'à la base de l'actionneur et pousse le jet à changer de côté. Une fois passé de l'autre côté, le même phénomène se produit dans le second canal, ramenant le jet à sa position initiale. Ce va-et-vient se répète en continu, créant une oscillation automatique du jet[14].

II.4. Conclusion

Le contrôle de la couche limite constitue un enjeu majeur pour améliorer les performances aérodynamiques et énergétiques des systèmes de transport. Les techniques passives offrent des solutions simples, robustes et peu coûteuses, mais restent limitées en flexibilité. À l'inverse, les méthodes actives permettent un contrôle plus efficace et adaptable, au prix d'une complexité accrue et d'une consommation énergétique supplémentaire.

L'analyse des différentes approches montre que le choix d'une stratégie dépend fortement de l'application visée : automobile, aéronautique ou ferroviaire. Dans la pratique, une combinaison judicieuse de dispositifs passifs et actifs représente souvent la solution la plus performante.

Ce chapitre met ainsi en évidence l'importance de la maîtrise de la couche limite dans la réduction de la traînée, le retardement du décollement et l'amélioration de la stabilité. Les recherches actuelles visent à optimiser ces techniques, afin de concilier efficacité, faisabilité industrielle et durabilité énergétique.

Chapitre III

Etude expérimentale

III.1 Introduction

L'étude des écoulements autour des véhicules est d'une importance majeure. Les discontinuités ou changements brusques dans la forme de la carrosserie (comme les arêtes, les angles vifs ou les appendices) perturbent l'écoulement de l'air autour du profil. Par conséquent, la formation des tourbillons et du sillage à la lunette arrière génèrent des zones de séparation responsables de l'augmentation de la traînée. Pour cette raison les ingénieurs d'automobiles utilisent des tests aérodynamiques dans des souffleries afin d'améliorer l'efficacité énergétique d'un véhicule avant qu'il ne soit disponible sur le marché. Une grande partie de ces techniques ont été illustrés dans le chapitre précédent.

D'autre part les dimensions d'un véhicule réel sont grandes ce qui nécessite des souffleries à grande échelle. Pour cette raison les chercheurs utilisent des maquettes à échelle réduite. Tel que celle utilisé par Ahmed et al [10].

Ce chapitre est consacré pour la partie expérimentale, après usinage d'une maquette de type corps d'Ahmed sur laquelle on fera des mesures en utilisant la technique du soufflage continu avec douze orifices, réparties sur la lunette arrière et le culot du modèle et qui vont être définies d'une manière détaillée dans ce qui suit. En suite en utilisant une chaîne d'acquisition au laboratoire de l'université, nous allons explorer et discuter les résultats obtenus des essais en soufflerie.

III.2 Géométrie du corps d'Ahmed

Ahmed et al, [10] Ont utilisé une maquette qui représente un véhicule simplifié connu sous le nom Corps d'Ahmed. Ce modèle se distingue par une partie avant arrondie qui facilite le passage de l'air, et une partie arrière inclinée, appelée lunette, qui joue un rôle central dans la formation des tourbillons et du sillage. C'est justement cette zone arrière qui attire l'attention des chercheurs, car elle influence fortement la résistance à l'air et donc la consommation énergétique des voitures. Cette maquette à l'échelle 1/5ème dépourvue de tout appendice géométrique. La géométrie mesure $L_A=1.044$ m de long, $l_A=0.389$ m de large et $H_A=0.288$ m de haut. Voir figure (III.1).

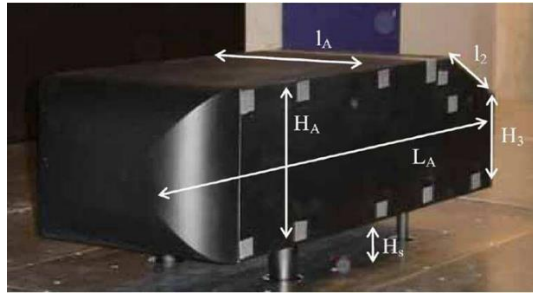


Fig. III. 1:Modélisation géométrique du corps d'A Ahmed.

L'arrière du modèle se compose d'une lunette inclinée et d'un culot vertical. Sa longueur, fixée à 0,222 m, reste constante, tandis que l'angle d'inclinaison (α) varie afin de simuler différentes configurations d'écoulement dans le sillage. Le modèle repose sur quatre pieds qui déterminent la garde au sol, et son soubassement est plat et lisse pour garantir une surface uniforme.

III.3 Conception et géométrie de la maquette

La maquette de Corp d'A Ahmed a été esquissée à l'aide du logiciel SolidWorks™, tout en se basant sur la forme originale du corps d'A Ahmed. En raison des dimensions restreintes de la veine d'essai disponible (30 cm de côté), la maquette a été réduite à l'échelle à l'aide d'un facteur de réduction de 0,28 afin d'avoir une réduction de la maquette d'A Ahmed à 72%.

La lunette arrière inclinée selon un angle $\alpha = 25^\circ$. Elle a été conçue pour reproduire avec précision les principales structures tourbillonnaires responsables de la traînée aérodynamique dans le sillage d'un véhicule automobile. La figure (III.2) présente une vue en perspective de la géométrie retenue, accompagnée des dimensions définitives suivantes :

- Longueur : $L_A = 292$ mm,
- Largeur : $l_A = 110$ mm,
- Hauteur : $H_A = 81$ mm,
- Longueur de la lunette arrière : $L_2 = 40$ mm,

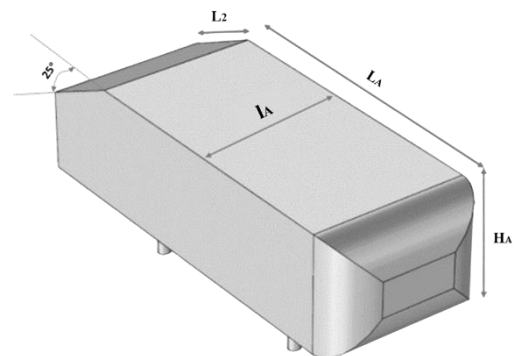


Fig. III. 2: Dimensions de la maquette.

Chapitre III : Etude expérimentale

La maquette repose sur quatre pieds cylindriques de diamètre $\varnothing = 8$ mm. Le soubassement a été maintenu plat et lisse afin de concentrer l'analyse sur l'impact de la forme générale et de l'inclinaison de la lunette.

III.3.1 Réalisation et de la maquette

III.3.1.1 Parties avant et latérales

La partie avant de la géométrie est caractérisée par sa forme arrondie, d'abord imprimée sur un plan à l'échelle (1:1), puis collée sur une tôle métallique de 0,5 mm. Cette dernière est découpée soigneusement et courbée selon la forme souhaitée. Une fois cette étape terminée, la pièce est assemblée avec le toit et les deux parois latérales, réalisés par la méthode du pliage.

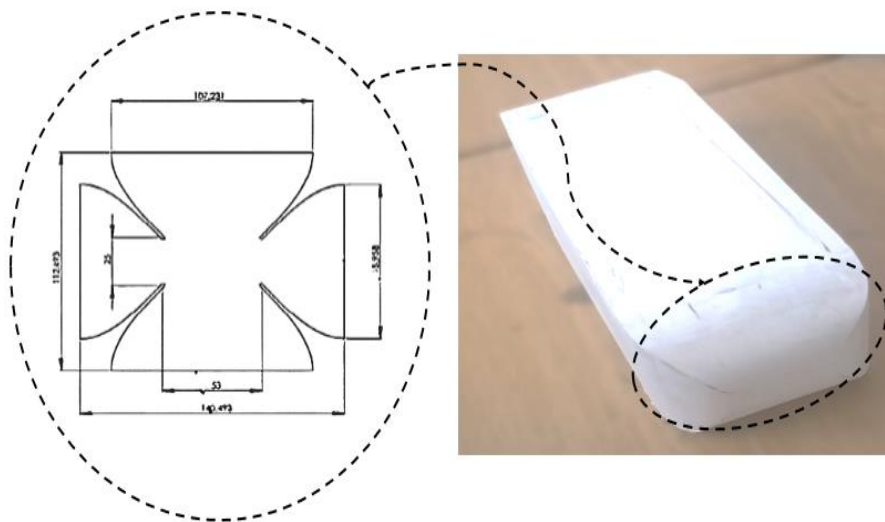


Fig. III. 3: Etapes de réalisation de la face avant.

III.3.1.2 Partie basse de la maquette

Une plaque stabilisatrice, considérée comme un châssis rigide, épaisse de 1 mm, a été utilisée afin qu'elle puisse comporter les boulons sur lesquels nous allons fixer les quatre pieds d'assise cylindriques de $\varnothing = 4$ mm. Ensuite, une tige de fixation à la balance aérodynamique est soudée à cette plaque.

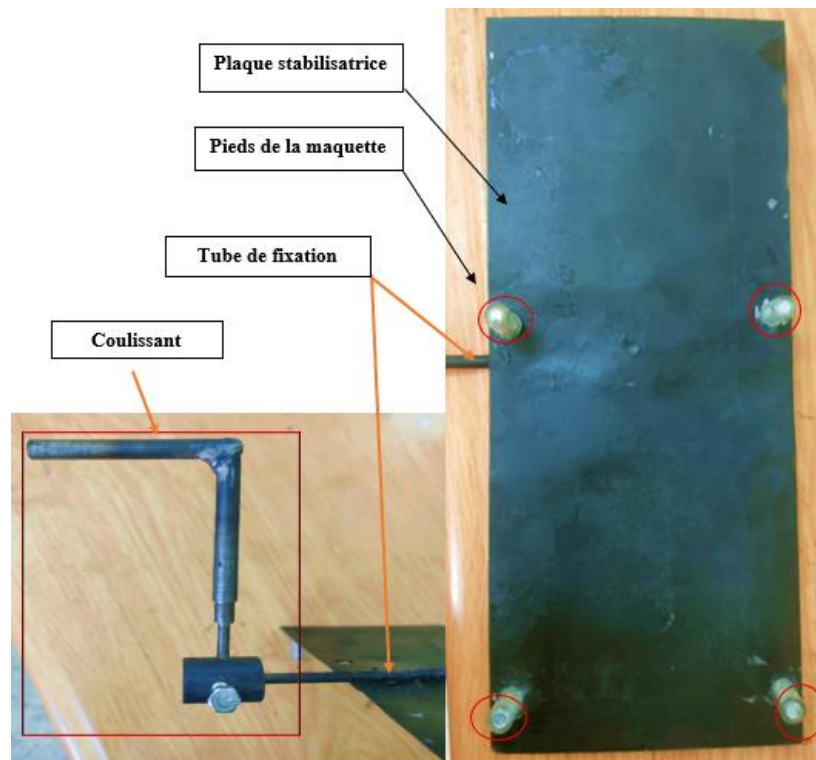


Fig. III. 4: Les différents constituants de bas de la maquette.

III.3.1.3 Partie arrière de la maquette

L'arrière de notre maquette se compose du culot et d'une lunette arrière inclinée d'un angle $\alpha = 25^\circ$ par rapport au toit, dans lesquels nous avons appliqué le perçage de douze micro-orifices de soufflage. Ces derniers sont constitués de tubes en cuivre de diamètre extérieur et intérieur respectivement $\varnothing = 2 \text{ mm}$ et $\varnothing = 0,65 \text{ mm}$. Ces micro-orifices sont par la suite connectés à une rampe commune à l'aide de tubes en plastique.

Les micro-orifices sont répartis d'une manière bien définie, avec six orifices placés sur la lunette arrière et six sur le culot. Par la suite, ils sont numérotés afin de bien définir les modes de soufflage choisis. Leur répartition est représentée dans la figure suivante :

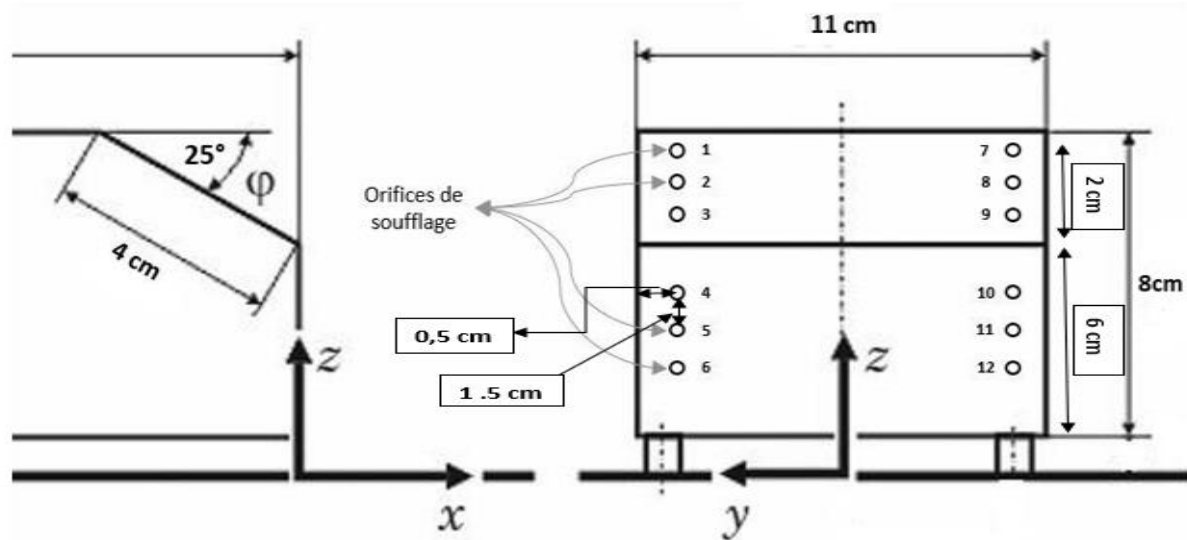


Fig. III. 5: Représentation des micro-orifices sur l'arrière de la maquette.

III.4 Finition de la maquette

Après avoir terminé l'ensemble des parties de la maquette, nous avons opté, à cette étape, pour un collage à l'aide d'une colle spéciale de type AKFIX. Les arêtes ont été poncées afin d'obtenir un bon état de surface. Enfin, l'ensemble de la maquette a été recouvert d'une couche de peinture.



Fig. III. 6 : La maquette réalisée.

III.4.1 Le Bras coulissant

La maquette est suspendue dans la veine d'essais et maintenue à 20 mm au-dessus de la paroi inférieure grâce à un bras coulissant, tout en laissant suffisamment d'espace. Cette configuration permet d'éviter les interférences avec les effets de paroi. Le système coulissant

Chapitre III : Etude expérimentale

facilite également les réglages fins nécessaires lors des phases de calibration ou de modification des paramètres expérimentaux.

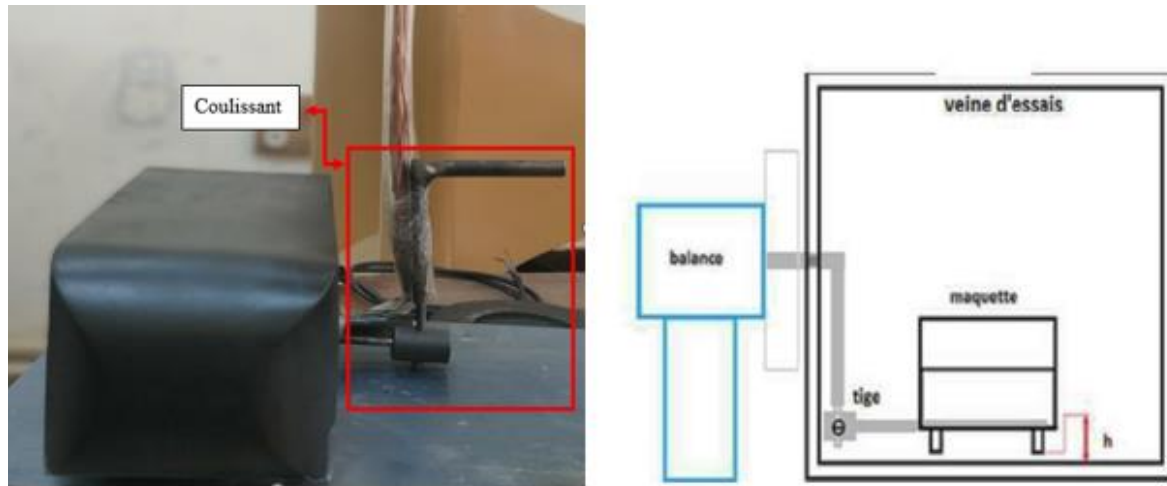


Fig. III. 7 : Système de fixation.

III.5 Dispositif expérimental

La figure ci-dessous représente une schématisation des différents dispositifs utilisés dans la soufflerie lors des essais :

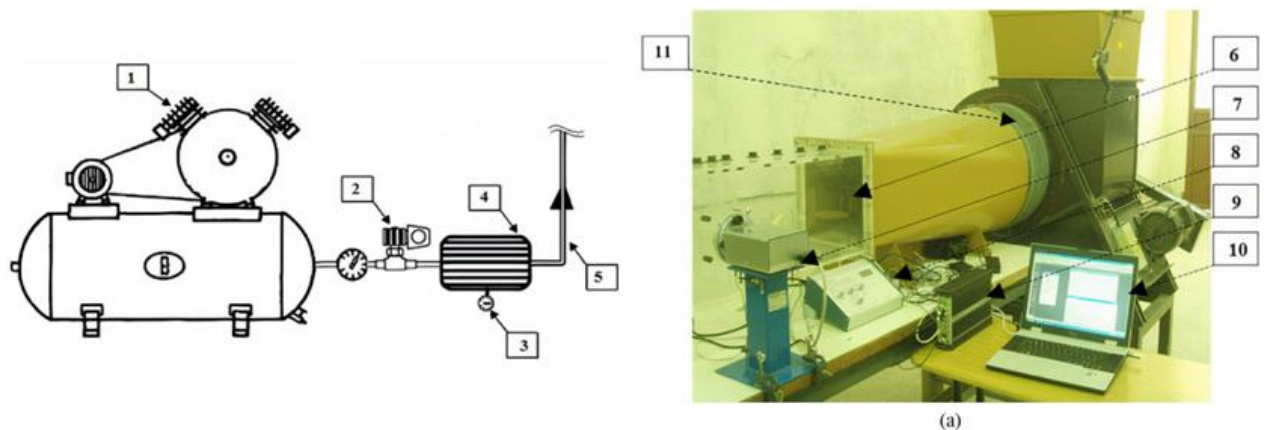


Fig. III. 8 : Dispositif expérimental (1 : compresseur d'air, 2 : vanne, 3 : manomètre, 4 : chambre de tranquillisation, 5 : flexible d'air, 6 : veine d'essais, 7 : balance aérodynamique, 8 : indicateur de contraintes, 9 : convertisseur, 10 : ordinateur, 11 : soufflerie).

Chapitre III : Etude expérimentale

III.5.1 La soufflerie aérodynamique

Une soufflerie subsonique est un dispositif qui permet de faire des mesures sur l'aérodynamique d'objets soumis à un écoulement d'air dont la vitesse est plus faible que celle du son (soit $Mach < 1$, d'ordinaire $< 0,3$ pour les modèles pédagogique). Elle permet d'étudier les phénomènes comme la portance, la traînée, ou la répartition de pression autour d'un corps. La soufflerie utilisée dans notre étude est une soufflerie subsonique de marque DeltalabTM, ces caractéristiques techniques sont regroupées dans le tableau suivant :

Caractéristique	Valeur / Description
Dimensions de la veine d'essai	30 × 30 × 100 cm (section carrée, veine transparente)
Longueur totale	4 mètres
Vitesse d'écoulement	Variable de 0 à 45 m/s
Puissance du moteur	4 Kw
Vitesse du moteur	1440 tr/min
Structure	Montée sur un plan de travail rigide, avec diffuseur et nid d'abeilles pour stabiliser le flux

Tableau III. 1:Caractéristiques techniques de la soufflerie.



Fig. III. 9:Soufflerie subsonique DeltalabTM, UMMTO.

Chapitre III : Etude expérimentale

III.5.2 Multi-manomètre et tube de Pitot

Afin de déterminer la vitesse d'écoulement du fluide à l'infini amont, nous allons utiliser un tube de Pitot placé en parallèle à l'écoulement de l'air, ce dernier est relié par des conduits en plastique avec le multi-manomètre. Cet appareil possède 24 petits tubes, numérotés de 0 à 24, qu'on branche aux prises de pression pour effectuer les mesures.

Par la suite la dénivellation de hauteur d'huile mesurée nous permet de déterminer la vitesse de l'air grâce à l'équation déduite par la relation de Bernoulli :

En appliquant le théorème de Bernoulli entre le point d'arrêt a et un point m situé sur la surface du tube, on obtient l'expression suivante :

$$P_a = P_m + \frac{1}{2} \rho V_m^2 \quad (1)$$

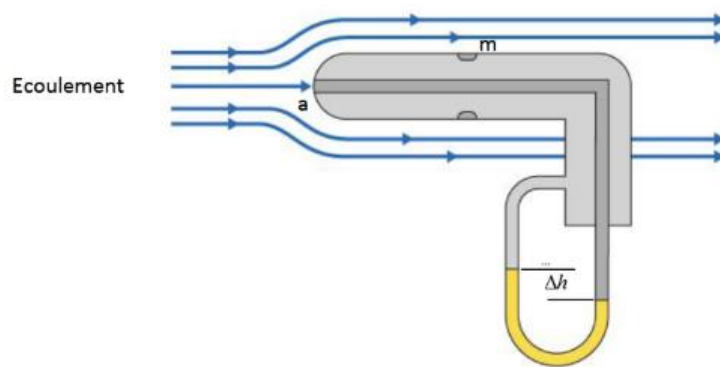
D'autre part sur le manomètre on a :

$$P_a = P_m + \rho_h g \Delta h \quad (2)$$

Avec : $\rho_h = 856,418 \text{ g/m}^3$

D'où :

$$V_m = \sqrt{\frac{2 \rho_h g \Delta h}{\rho}} \quad (3)$$



(a)



(b)

Fig. III. 10 : (a) tube de Pitot (b) multi-manomètre.

III.5.3 Balance aérodynamique à jauges de contraintes

Pour la mesure des efforts aérodynamiques nous utilisons une balance aérodynamique à jauges de contraintes, ce dispositif est composé des éléments suivants : un pied stable qui absorbe les vibrations, une platine, qui transmet les forces au fléau, un bras articulé chargé de mesurer la portance et la traînée.

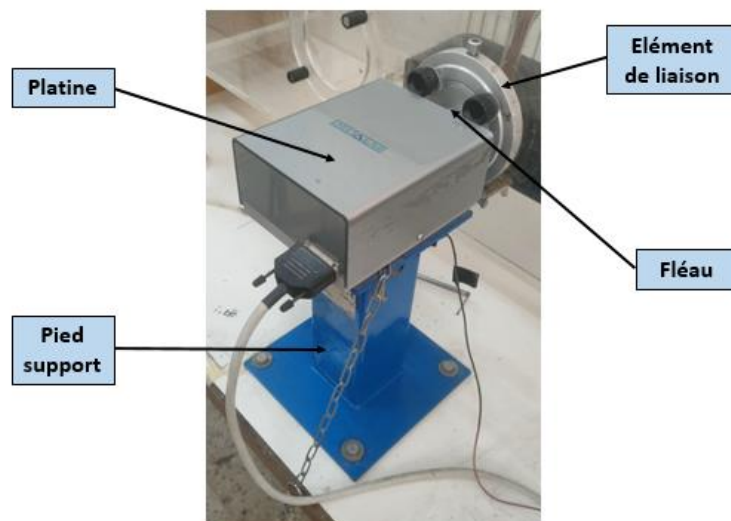


Fig. III. 11: Balance aérodynamique.

Chapitre III : Etude expérimentale

La platine sert à orienter le fléau dynamométrique dans l'axe du flux d'air. Le pied support, indépendant de la veine d'essai, transmet les efforts aérodynamiques à la table de manipulation. Quant au fléau dynamométrique, équipé de jauges de déformation, il permet de mesurer séparément la portance et la traînée grâce à un câblage spécifique.

III.5.4 Indicateur de contraintes

Le principe de fonctionnement de ce dispositif est simple : lorsqu'une jauge de déformation est soumise à une contrainte mécanique, sa résistance électrique varie. Cette variation est traduite en un signal électrique, lequel subit ensuite plusieurs étapes de traitement : amplification pour en faciliter la lecture, filtrage pour éliminer les interférences, puis conversion en une forme exploitable. L'ensemble de ce processus permet d'obtenir une mesure précise, directement affichée en valeur numérique sur l'écran de l'indicateur.

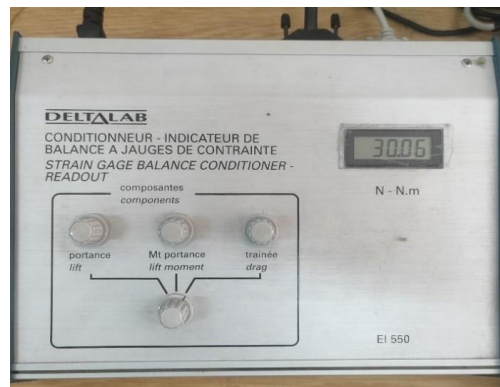


Fig. III. 12:Indicateur de contraintes

III.5.5 Convertisseur de signal

La collecte des données est assurée par un système reliant un convertisseur de signal à un logiciel installé sur l'ordinateur, via la plateforme *Pulse*. Ce dispositif permet de définir la durée et la fréquence des mesures. Une fois lancé, il enregistre les données en temps réel et en extrait une moyenne des valeurs enregistrées. Les résultats sont sauvegardés dans des fichiers au format *.txt*, puis traités sous *Matlab*. La force de traînée est alors calculée instantanément, offrant une lecture claire et précise du comportement aérodynamique du corps d'Ahmed testé.



(a)



(b)

Fig. III. 13 : Système d'acquisition : a) convertisseur b) ordinateur.

III.6 Dispositif de soufflage

III.6.1 Compresseur d'air

Pour appliquer le soufflage lors des essais, un compresseur d'air d'une capacité de 16 bars, disponible au niveau de la soufflerie de l'UMMTO, a été utilisé. Cet équipement comprime l'air et alimente ensuite le système expérimental.



Fig. III. 14: Compresseur d'air.

III.6.2 Chambre de tranquillisation

Afin d'éliminer les effets de la turbulence causée par le compresseur, l'air généré par ce dernier passe d'abord par une vanne de régulation qui permet de stabiliser sa pression, puis il est dirigé vers la chambre de tranquillisation, dont le rôle est de réduire davantage ces perturbations afin d'obtenir un écoulement stable.

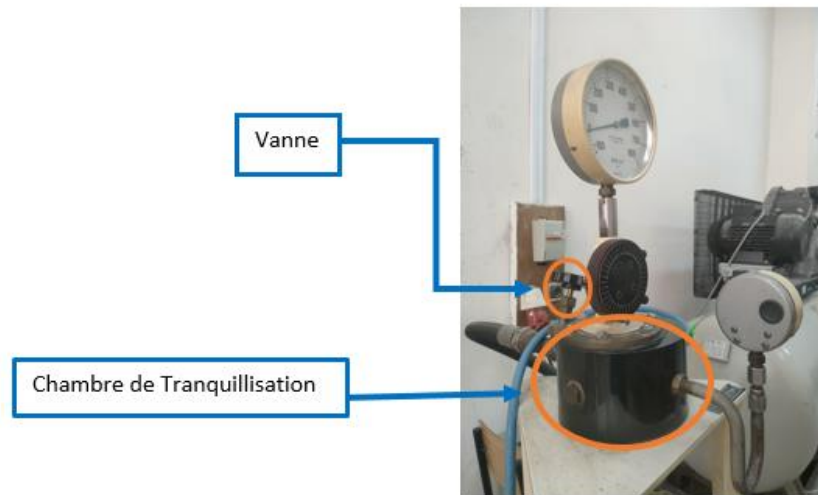


Fig. III. 15 : Chambre de tranquillisation.

III.6.3 Manomètre

La manipulation de la pression est assurée par un manomètre connecté directement avec la chambre de tranquillisation, la valeur indiquée par ce dernier est une valeur relative par rapport à la pression atmosphérique.



Fig. III. 16 : Manomètre.

III.6.4 La rampe

La rampe a été soigneusement conçue à partir d'un tube en cuivre d'un diamètre de 12 mm. Sur cette base, douze tubes capillaires ont été implantés avec précision. Ce dispositif permet de sélectionner le mode de soufflage souhaité. Chacun de ces tubes capillaires possède une section de sortie de 0,6 mm, assurant ainsi une distribution homogène et une répartition régulière de l'air à travers les différents points de sortie.

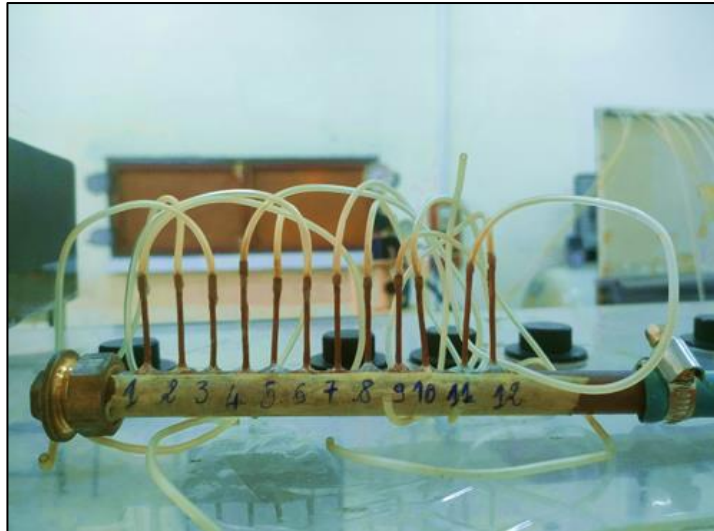


Fig. III. 17 :Rampe de soufflage.

III.6.5 Modes de soufflage

Les orifices de soufflage sont numérotés de 1 à 12, et chacun d'eux peut se trouver dans deux états : allumé ou éteint. Le nombre total de combinaisons possibles est donc de $2^{12} - 1 = 4095$, en considérant que, dans tous les cas, au moins un orifice doit être actif. Il est évidemment impossible de réaliser des essais expérimentaux sur l'ensemble de ces configurations. Pour cette raison, neuf configurations représentatives ont été retenues, en fixant la vitesse d'écoulement de l'air à 80 km/h et en faisant varier la pression de soufflage pour chacune d'elles à 1 bar, 1,5 bar et 2 bar.

Les résultats expérimentaux permettront par la suite d'identifier les configurations de soufflage les plus performantes. Ils sont récapitulés dans les tableaux suivants (**Tableau III.2**).

Chapitre III : Etude expérimentale

mode de soufflage	Configuration 1 (1-----12)			
Coefficient Cx	sans soufflage	1,81026	Gain relatif (%)	/
	1 bar	1,78704		-1,287
	1,5 bar	1,79359		-0,928
	2 bar	1,79106		-1,0605

mode de soufflage	Configuration 5 (4-5-6-10-11-12)			
Coefficient Cx	sans soufflage	1,810258	Gain relatif (%)	/
	1 bar	1,891083		4,46
	1,5 bar	1,756101		-2,99
	2 bar	1,768893		-2,29

mode de soufflage	Configuration 2 (1-3-5-7-9-11)			
Coefficient Cx	sans soufflage	1,81026	Gain relatif (%)	/
	1 bar	1,7559		-3,005
	1,5 bar	1,75824		-2,878
	2 bar	1,77123		-2,1599

mode de soufflage	Configuration 6 (1-3-7-9)			
Coefficient Cx	sans soufflage	1,810258	Gain relatif (%)	/
	1 bar	1,862442		2,87
	1,5 bar	1,740877		-3,84
	2 bar	1,749755		-3,35

mode de soufflage	Configuration 3 (2-4-6-8-10-12)			
Coefficient Cx	sans soufflage	1,81026	Gain relatif (%)	/
	1 bar	1,73091		-4,38
	1,5 bar	1,75255		-3,1928
	2 bar	1,77504		-1,95

mode de soufflage	Configuration 7 (2-8)			
Coefficient Cx	sans soufflage	1,810258	Gain relatif (%)	/
	1 bar	1,842483		1,77
	1,5 bar	1,762941		-2,62
	2 bar	1,778527		-1,76

mode de soufflage	Configuration 4 (1-2-3-7-8-9)			
Coefficient Cx	sans soufflage	1,81026	Gain relatif (%)	/
	1 bar	1,7268		-4,61
	1,5 bar	1,74584		-3,56
	2 bar	1,76186		-2,68

mode de soufflage	Configuration 8 (4-6-10-12)			
Coefficient Cx	sans soufflage	1,810258	Gain relatif (%)	/
	1 bar	1,830875		1,13
	1,5 bar	1,754589		-3,08
	2 bar	1,792765		-0,97

mode de soufflage	Configuration 9 (5-11)			
Coefficient Cx	sans soufflage	1,81026	Gain relatif (%)	/
	1 bar	1,82315		0,71
	1,5 bar	1,75295		-3,17
	2 bar	1,78346		-1,49

Tableau III. 2 : Configurations de soufflage

D'après les résultats obtenus des tableaux précédents, nous avons choisi quatre modes de soufflage remarquables comme performants : le premier mode, où tous les orifices sont actifs, ainsi que les modes 3, 4 et 6. Il a également été constaté que l'augmentation de la pression à l'état générateur est nécessaire, compte tenu des faibles gains enregistrés à basse pression.

Chapitre III : Etude expérimentale

III.6.5.1 Configurations de soufflage

Le système de soufflage par micro-jets fonctionne selon quatre configurations distinctes, définies à la fois par le nombre d'orifices activés et par la pression d'air appliquée au niveau du générateur (voir Tableau 3.3).

Dans le tableau ci-dessous, chaque mode est représenté par une combinaison binaire :

- 1 indique qu'un orifice est ouvert (soufflage actif)
- 0 signifie qu'il est fermé (soufflage inactif)

Ces configurations permettent d'explorer différentes stratégies de contrôle du flux, en modulant à la fois la répartition spatiale du soufflage et son intensité.

Code	Mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	2-4-6-8-10-12	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
B	1-2-3-7-8-9	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
C	1-3-7-9	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
D	De 1 à 12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tableau III. 3 : Modes de soufflages sélectionnés.

III.7 Étalonnage de la chaîne d'acquisition

Avant le démarrage des essais, une procédure d'étalonnage a été réalisée afin de garantir la précision des mesures de force délivrées par la balance aérodynamique intégrée à la soufflerie. Cette opération constitue une étape essentielle pour assurer la fiabilité des coefficients aérodynamiques déterminés au cours des campagnes expérimentales.

L'étalonnage a été effectué au moyen de cinq masses étalonnées, placées successivement à l'intérieur de la soufflerie, au niveau de la balance aérodynamique (**Fig. III.18**). Un système de poulies a été mis en œuvre afin de générer une force de traînée orientée selon l'axe x. Cette configuration a permis de vérifier la conformité du fonctionnement de la balance aérodynamique ainsi que la justesse de la réponse fournie par son indicateur de contraintes.

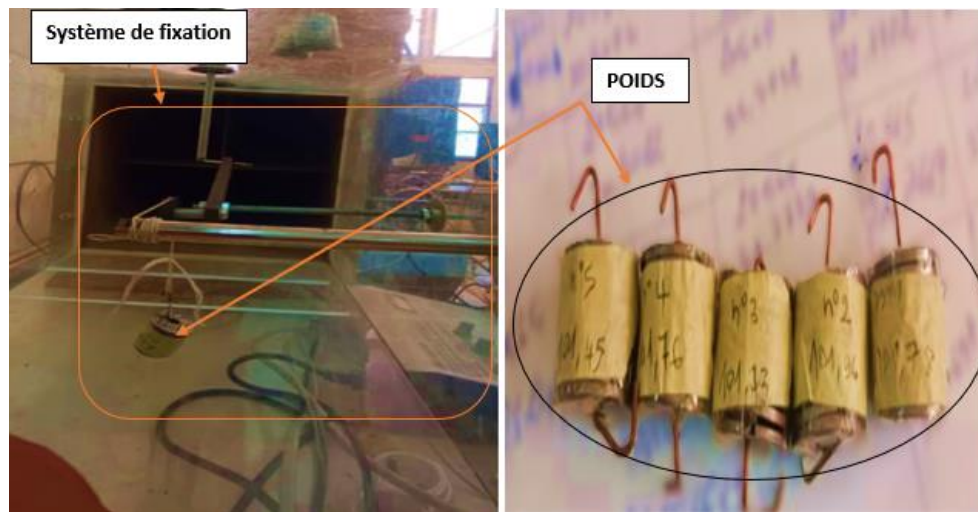


Figure III .18. Système de fixation des masses calibrées à l'intérieur de la soufflerie pour l'étalonnage.

À l'issue de la procédure d'étalonnage, les résultats obtenus sont consignés dans le tableau (III.4):

N° du Poids	Poids calibrés suspendu(N)	Effort mesuré(N)
1	0,99	0,9814
1+2	1,99	2,0002
1+2+3	2,99	2,9938
1+2+3+4	3,99	3,9557
1+2+3+4+5	4,99	4,953

Tableau III .4 : Résultats d'étalonnage.

Ce qui donne :

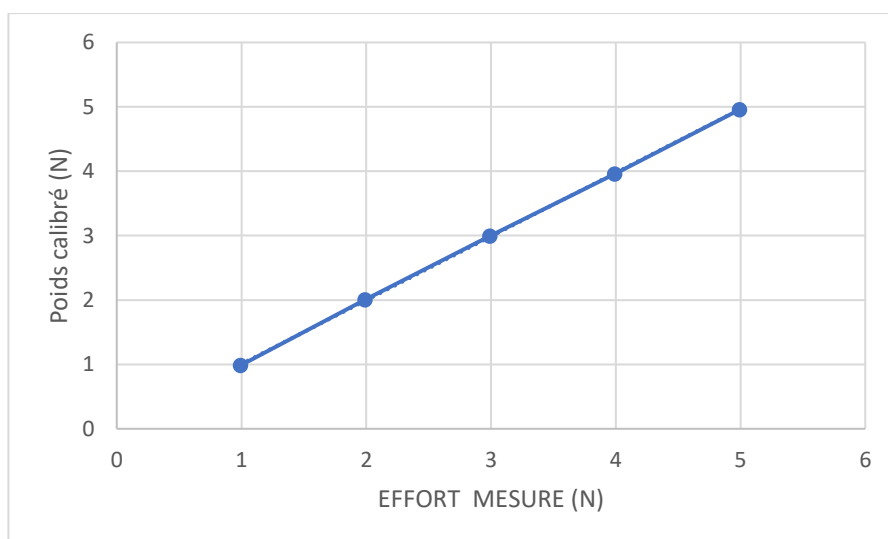


Fig III.19 : Courbe d'étalonnage de la chaîne d'acquisition.

Chapitre III : Etude expérimentale

Une régression linéaire a été appliquée aux points expérimentaux, donnant l'équation suivante : $y=0,9899x+0,0171$, avec un coefficient de détermination $R^2=0,9999$

Les résultats obtenus montrent que la balance aérodynamique est correctement étalonnée et prête à fournir des mesures fiables lors des essais de soufflage. Cette validation garantit que les forces aérodynamiques mesurées pourront être utilisées en toute confiance pour le calcul du coefficient de traînée.

III.8. Résultats des essais

- **Sans contrôle :**

Avant d'entamer les essais de soufflage sur le corps d'A Ahmed, des tests préliminaires ont été effectués dans le cas sans soufflage (cas de référence), afin de caractériser l'état initial et de disposer d'une base de comparaison pour l'analyse des effets induits par le soufflage.

Vitesse (km/h)	Vitesse(m/s)	Effort (N)	Coefficient de Cx
60	16,8	3,2933	1.9252
80	22,4	5,6459	1.8565
100	28	8,7368	1.8386
120	33,6	12,4846	1.8245

Tableau III .4: Valeurs du coefficient Cx sans contrôle.

- **Avec contrôle actif par micro-soufflage :**

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats des essais effectués sur la maquette réalisée. Nous considérons quatre vitesses d'écoulement et quatre modes de soufflage.

Chapitre III : Etude expérimentale

Mode de soufflage		2-4-6-8-10-12			1-2-3-7-8-9		1-3-7-9		De 1 à 12	
Vitesse km/h	Cx	Pression relative (bar)	Cx	Gain relatif (%)	Cx	Gain relatif (%)	Cx	Gain relatif (%)	Cx	Gain relatif (%)
60	1,9252	1.5	1,9141	-2,8119	1,8823	-4,4296	1,9281	-2,1026	1,9141	-0,58
		2,5	1,8671	-5,2013	1,8282	-7,1751	1,8818	-4,4533	1,8671	-3,02
		3.5	1,8266	-7,2552	1,7786	-9,692	1,8441	-6,3648	1,8239	-5,26
80	1,8565	1.5	1,8304	-1,4068	1,8214	-1,8886	1,798	-3,1514	1,8304	-1,41
		2,5	1,8157	-2,1985	1,7969	-3,2116	1,784	-3,906	1,8157	-2,2
		3.5	1,8038	-2,8379	1,7625	-5,0643	1,7695	-4,687	1,7921	-3,47
100	1,8386	1.5	1,8025	-1,9607	1,793	-2,4781	1,7855	-2,889	1,8161	-1,22
		2,5	1,7813	-3,1156	1,771	-3,6753	1,7795	-3,2129	1,8014	-2,02
		3.5	1,7685	-3,815	1,7498	-4,8291	1,7674	-3,8722	1,7804	-3,16
120	1,8245	1.5	1,839	0,794	1,8239	-0,035	1,8356	0,6058	1,8268	0,12
		2,5	1,8181	-0,349	1,8122	-0,6758	1,8229	-0,0879	1,8151	-0,52
		3.5	1,8035	-1,1524	1,7976	-1,4768	1,8125	-0,6574	1,7976	-1,47

Tableau III.5: Valeurs du coefficient Cx et les gains en pourcentage (%) pour chaque mode.

III.8 Paramètres du contrôle

III.8.1 La pression statique au niveau des orifices du jet

Le coefficient de pression est donné par la relation suivant :

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2} = \frac{Z - Z_\infty}{Z_A - Z_\infty} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

P : Pression statique au niveau du profil.

P_∞ : Pression à l'infini amont (tube de Pitot).

Z : Côte du liquide correspondant à la pression statique locale.

Z_∞ : Côte du liquide correspondant à la pression statique à l'infini amont.

Z_A : Côte du liquide correspondant à la pression d'arrêt à l'infini amont.

ρ_∞ : La masse volumique de l'air.

V_∞ : Vitesse à l'infini amont.

$$P_\infty + \rho_h g Z_\infty = P_A + \rho_h g Z_A$$

Chapitre III : Etude expérimentale

$$P_A - P_\infty = \rho_h g (Z_\infty - Z_A) \quad (\text{III.2})$$

$$P_A + \frac{1}{2} \rho_A V_A^2 + \rho_A g Z_A = P_\infty + \frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2 + \rho_\infty g Z_\infty$$

$$P_A - P_\infty = \frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2 \quad (\text{III.3})$$

Avec :

P: Pression au point d'arrêt (tube de Pitot).

ρ_h : La masse volumique de l'huile.

D'où:

$$\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2 = \rho_h g (Z_\infty - Z_A)$$

De l'équation (1):

$$\begin{aligned} (P - P_\infty) &= \frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2 = \rho_h g (Z_\infty - Z_A) \\ &= \rho_h g \left(\frac{Z_\infty - Z_{atm}}{Z_A - Z_{atm}} \right) (Z_A - Z_{atm}) = \rho_h g \left(\frac{Z_\infty - Z_{atm}}{Z_A - Z_{atm}} \right) (Z_{atm} - Z_A) \\ (P - P_\infty) &= \rho_h g (Z_{atm} - Z_A) \left(\frac{Z_\infty - Z_{atm}}{Z_A - Z_{atm}} \right) \\ (P - P_\infty) &= \rho_h g (Z_\infty - Z_A) \end{aligned} \quad (\text{III.4})$$

$$P_\infty + \rho_h g (Z_{atm} - Z_A) = P_{atm} + \rho_h g Z_{atm}$$

Donc:

$$P_\infty = P_{atm} + \rho_h g (Z_{atm} - Z_\infty) \quad (\text{III.5})$$

À partir de l'équation (4) :

$$P = P_\infty + \rho_h g (Z_\infty - Z_A)$$

En remplaçant P_∞ par l'expression donnée dans l'équation (5),

On obtient :

Chapitre III : Etude expérimentale

$$P = P_{\text{atm}} + \rho_h g (Z_{\text{atm}} - Z_{\infty}) + \rho_h g (Z_{\infty} - Z)$$

Ce qui se simplifie en:

$$P = P_{\text{atm}} + \rho_h g (Z_{\text{atm}} - Z)$$

Avec :

Z_{atm} : Lecture sur le manomètre au repos.

P_{atm} : La pression atmosphérique.

Les résultats de calculs des pressions statiques sont donnés par le tableau suivant :

Vitesse (Km/h)	60	80	100	120
Pression statique (Pa)	105035,9	104774,5	104513,1	104251,7

Tableau III. 6: Pression statique des orifices de soufflage.

Notre système peut être comparé à une tuyère convergente, dans laquelle le col est assimilé à l'orifice cylindrique des tubes utilisés pour le soufflage.

En partant de l'équation de Bernoulli sous sa forme différentielle :

$$v dp + g dz + d\left(\frac{v^2}{2}\right) = 0 \quad (\text{III.6})$$

Hypothèses du problème :

- L'écoulement est permanent, l'équation de Bernoulli s'applique donc parfaitement.
- La tuyère étant très courte, le terme $g dz$ est négligeable.
- L'écoulement est unidirectionnel le long de l'axe X, avec $V_z = 0$, $V_y = 0$ et $V_x = V$.
- Le réservoir est grand par rapport à l'orifice du jet. On peut donc considérer que la vitesse de l'air dans le réservoir est nulle ($V_1 = 0$).
- Le temps de passage du fluide étant très court, on peut considérer que l'écoulement est adiabatique, ce qui nous permet d'écrire :

Chapitre III : Etude expérimentale

$$v_2 = v_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (\text{III.7})$$

Après intégration de l'équation de Bernoulli, nous obtenons l'expression du débit Q :

$$Q = S_2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_t}{v_t} \left[\left(\frac{P}{P_t} \right)^{2/k} - \left(\frac{P}{P_t} \right)^{\frac{k+1}{2}} \right]} \quad (\text{III.8})$$

$$V_2 = \frac{Q}{\rho_2 S_2} \quad (\text{III.9})$$

$$\rho_2 = \frac{P_2}{RT_t} \left(\frac{P_2}{P_t} \right)^{-\frac{k-1}{k}} \quad (\text{III.10})$$

Avec

k : constante adiabatique,

P_t : pression totale à l'état générateur,

v_t : volume massique à l'état générateur.

P_2 : pression statique en sortie

T_2 : température statique en sortie

R : constante spécifique de l'air ($\approx 287 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$)

Lorsque les conditions initiales (P_1 , T_1 , v_1) ne varient pas on peut en examinant les relations que nous venons d'établir tirer les conclusions suivantes :

- Le volume massique v_2 augmente lorsque la pression P_2 diminue, ce qui est cohérent avec la loi des gaz parfaits.
- Lorsque $P_1 = P_2$, le débit massique est nul, car il n'existe plus de gradient de pression pour générer l'écoulement.

Chapitre III : Etude expérimentale

III.8.2 Pression, température, volume massique critique.

Comme notre système est similaire à une tuyère, le débit massique dépend du rapport entre les pressions amont P_1 et aval P_2 . Ce débit augmente à mesure que la pression aval diminue, jusqu'à atteindre une valeur maximale correspondant à une pression critique, notée P_{cr} . Au-delà de cette pression, toute diminution supplémentaire de P_2 n'a plus d'effet sur le débit. Cette condition de débit maximal est déterminée mathématiquement en annulant la dérivée du débit par rapport au rapport $\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$, ce qui permet d'identifier le point où le débit cesse de croître.

$$\text{Pression critique} \quad P_{cr} = P_1 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (\text{III.11})$$

$$\text{Débit massique maximal} \quad Q_{\max} = S_2 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1} \cdot \frac{1}{v_1}} \quad (\text{III.12})$$

On peut aussi définir la température critique (T_{cr}), la masse volumique critique (ρ_{cr}) et donc le volume massique critique (v_{cr})

$$\text{Température critique :} \quad T_{cr} = \frac{2T_1}{k+1} \quad (\text{III.13})$$

$$\text{Masse volumique critique :} \quad \rho_{cr} = \rho_1 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \quad (\text{III.14})$$

$$\text{Volume massique critique :} \quad v_{cr} = \frac{v_1}{\left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}}} \quad (\text{III.15})$$

III.8.3 Tracé des courbes théoriques

Grâce aux équations théoriques et à l'utilisation d'un programme *Matlab*, il est possible de représenter les courbes de fonctionnement de notre tuyère de manière analytique. L'exécution du programme permet d'obtenir le débit massique ainsi que la vitesse du jet en fonction de la pression statique en sortie (P_2). Par ailleurs, l'évolution du débit de soufflage peut être étudiée en fonction du nombre d'orifices présents dans le système.

- **Débit de soufflage en fonction des nombres d'orifices**

Grace au programme Matlab nous allons représenter les courbes du débit en fonction du nombre d'orifices selon les configurations choisit auparavant :

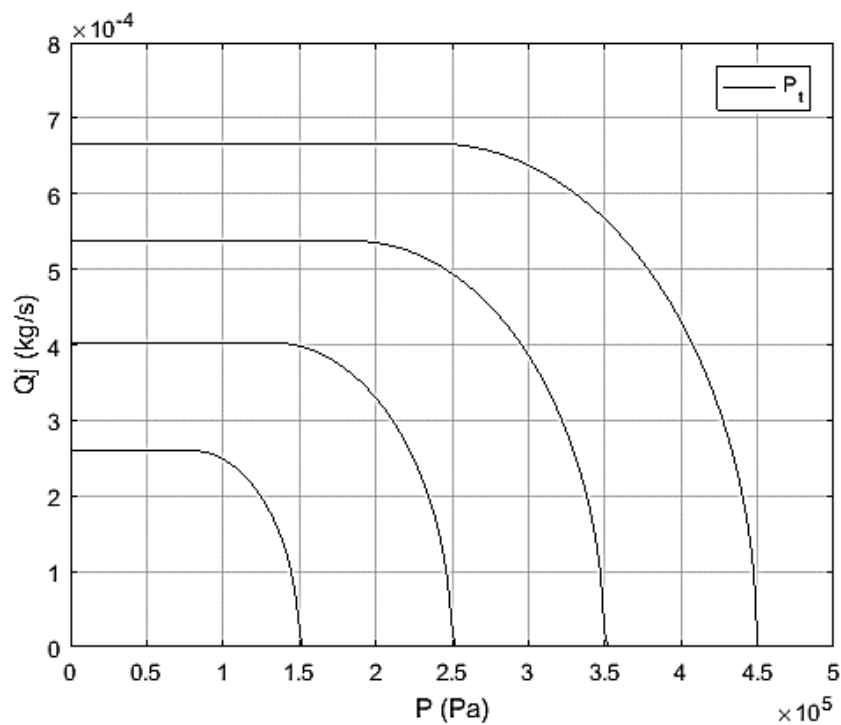


Fig. III.20: Débit pour 4 orifices

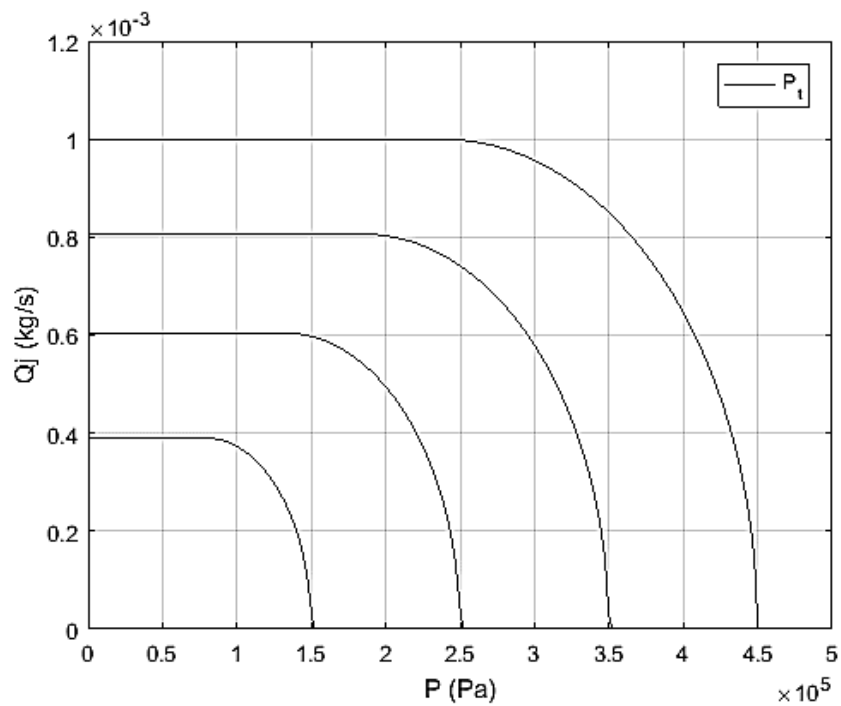


Fig. III.21: Débit pour 6 orifices

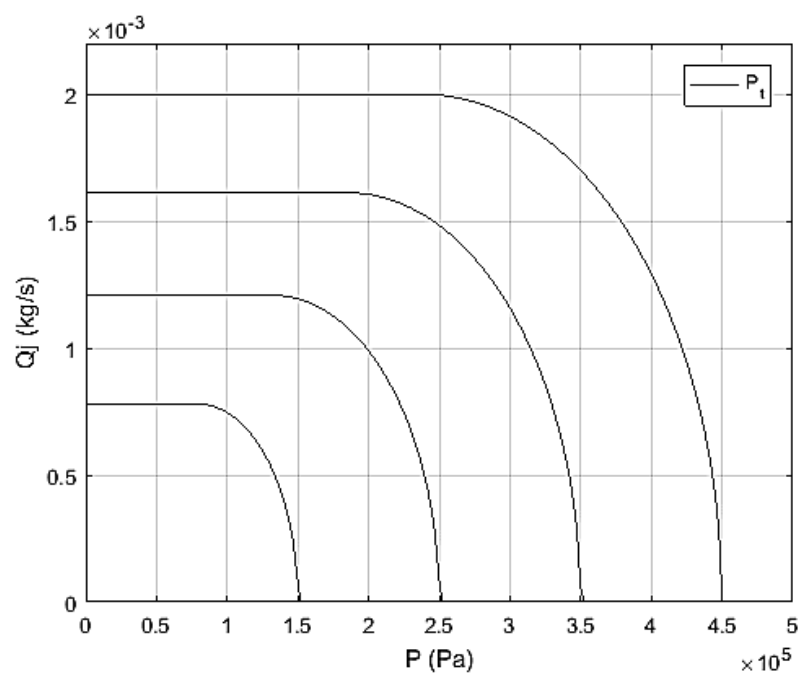


Fig. III.22: Débit pour 12 orifices

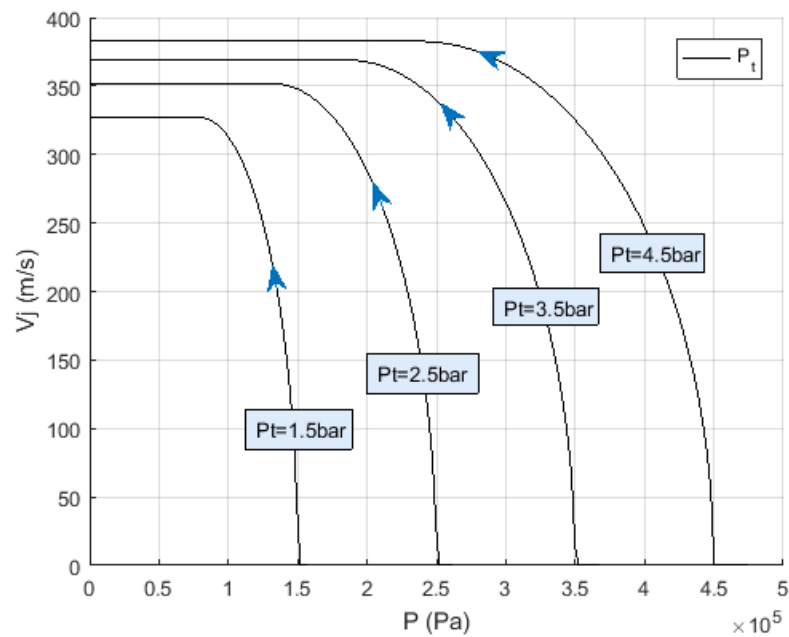


Fig. III.23: Evolution de la vitesse du jet de soufflage.

Les vitesses du jet et les débits de soufflage ont été déterminés en relevant, sur l'axe vertical, les valeurs correspondant au point où la pression statique P_2 croise la courbe de la pression totale à l'état générateur.

P_t (bar)	4 Orifices	6 Orifices	12 Orifices
1,5	$4,028 \times 10^{-4}$	$6,042 \times 10^{-4}$	$12,08 \times 10^{-4}$
2,5	$5,374 \times 10^{-4}$	$8,061 \times 10^{-4}$	$16,12 \times 10^{-4}$
3,5	$6,666 \times 10^{-4}$	$9,999 \times 10^{-4}$	20×10^{-4}

Tableau III.7 : Débit massique (Kg/s) en fonction de P_t et le nombre d'orifice.

P_t (bar)	1,5	2,5	3,5
V_{jet} (m/s)	351.8	369.1	382.6

Tableau III. 8 : Vitesse du jet en fonction de P_t .

Chapitre III : Etude expérimentale

III. 8.4 Efforts aérodynamiques et gains

Nous allons exposer dans cette partie l'évolution du coefficient de traînée aérodynamique (C_x) en fonction du nombre d'orifices ouverts et de la pression à l'état générateur, ainsi que les gains associés en pourcentage (%), en fonction des quatre vitesses d'écoulement de l'air (60 km/h, 80 km/h, 100 km/h et 120 km/h), et selon quatre configurations de contrôle différentes, ainsi que le mode sans contrôle :

- **Vitesse 60 km/h :**

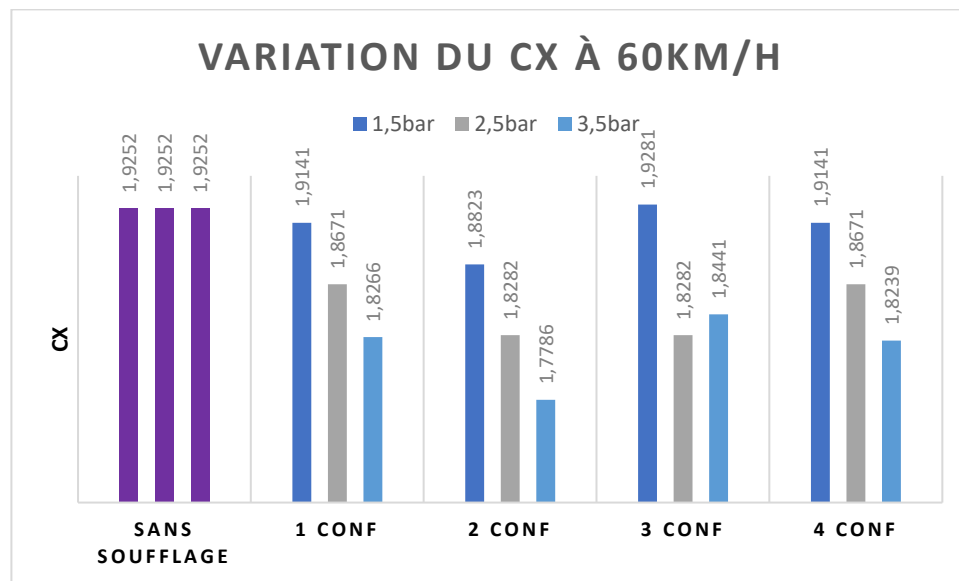


Fig. III.24 : Variation du C_x à 60 km/h.

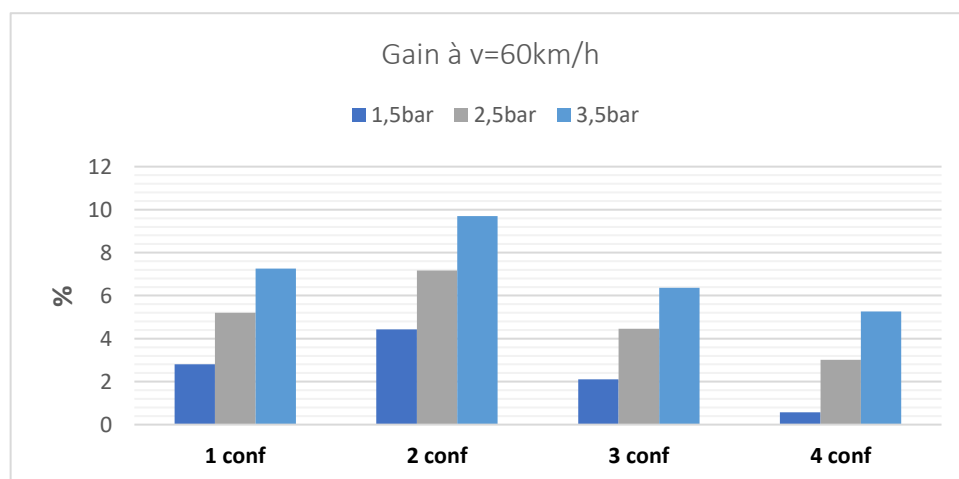


Fig. III.25: Gain en traînée pour la vitesse d'écoulement de 60 Km/h

Chapitre III : Etude expérimentale

- Vitesse 80 km /h :

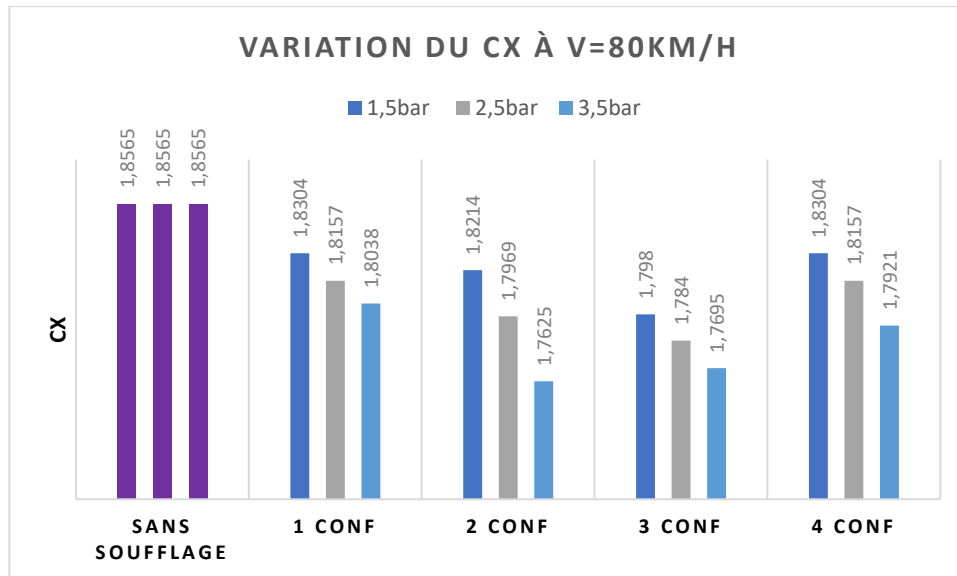


Fig. III.26 : Variation du C_x à 80 km/h.

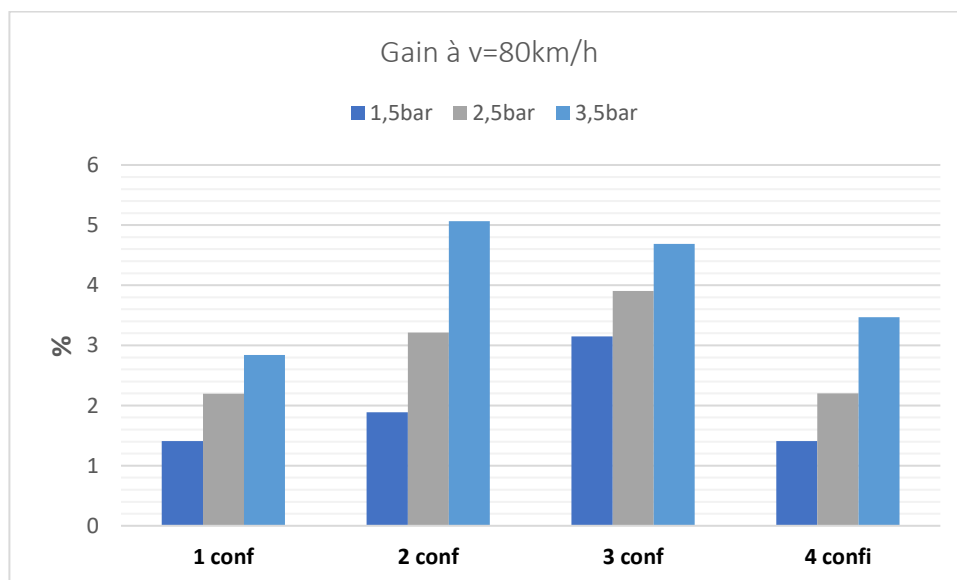


Fig. III.27: Gain en traînée pour la vitesse d'écoulement de 80 Km/h

Chapitre III : Etude expérimentale

- Vitesse 100 km/h :

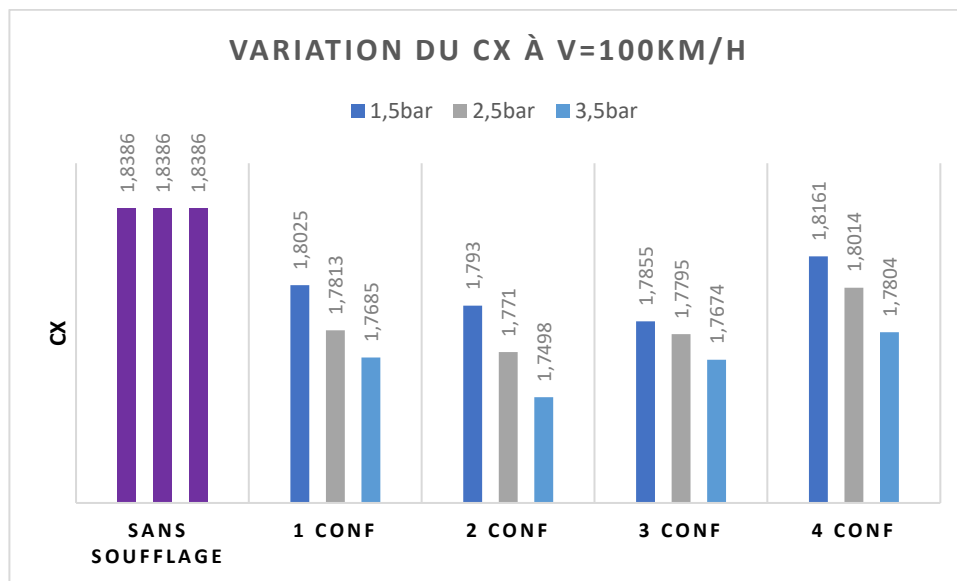


Fig. III.28 : Variation du C_x à 100 km/h.

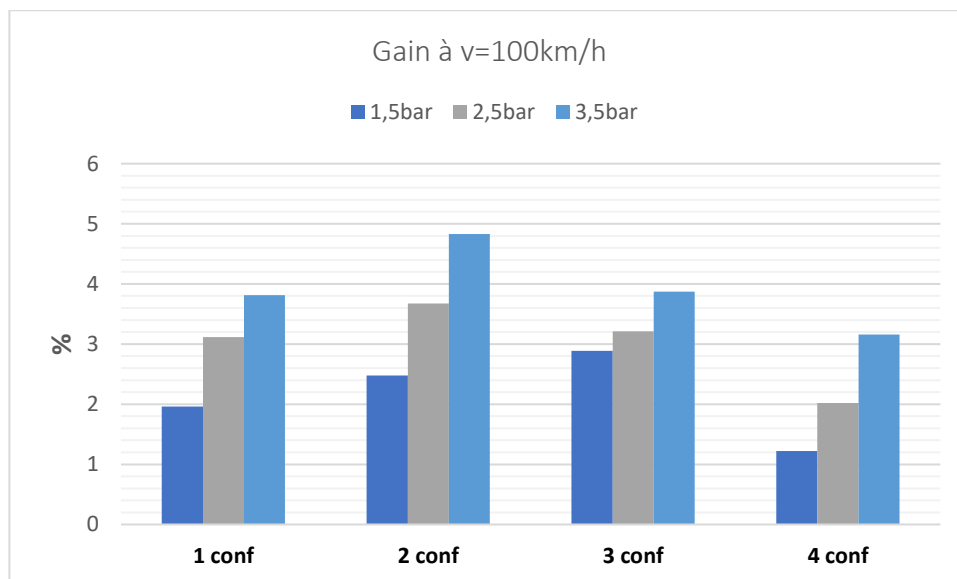


Fig. III.29: Gain en traînée pour la vitesse d'écoulement de 100 Km/h

Chapitre III : Etude expérimentale

- Vitesse 120 km/h :

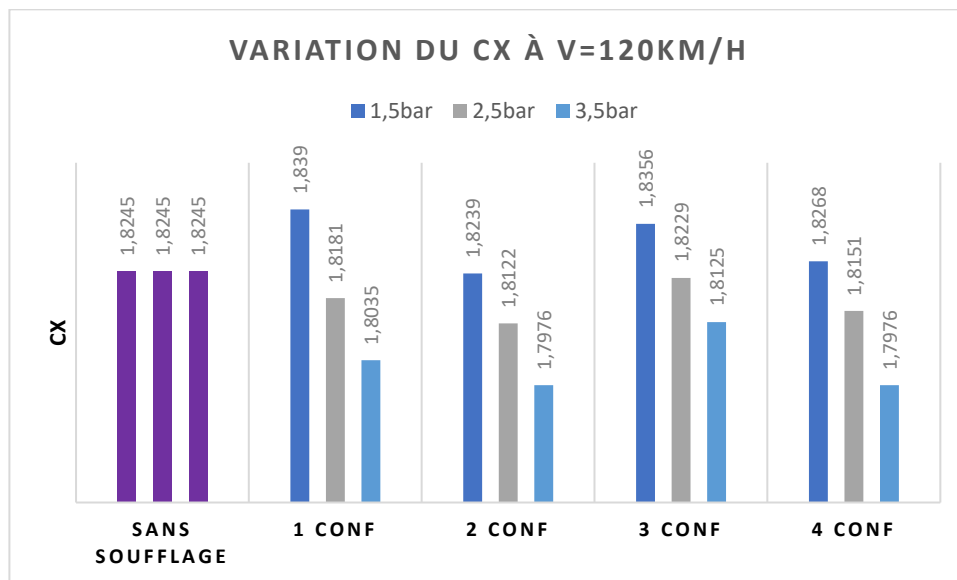


Fig. III.30 : Variation du C_x à 120 km/h.

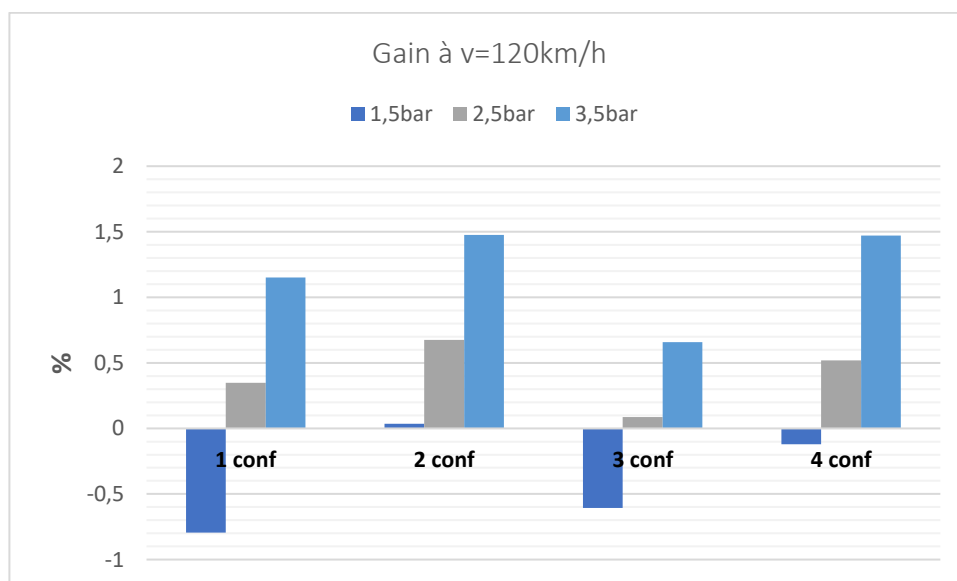


Fig. III.31 : Gain en traînée pour la vitesse d'écoulement de 120 Km/h

III.8.5 Interprétations

Contrôle actif par soufflage continu

D'après les histogrammes relatifs aux valeurs du C_x et des gains on peut tirer les observations suivantes :

- À 60 km/h, la configuration de soufflage sur la lunette arrière (1-2-3-7-8-9) a permis d'obtenir une réduction de traînée maximale de 10 %. Ce gain optimal a été atteint en augmentant la pression de soufflage jusqu'à 3,5 bars.
- L'augmentation du débit de soufflage contribue à l'efficacité de réduction de la traînée.
- On observe une proportionnalité entre la vitesse d'écoulement de l'air et la traînée aérodynamique. Au-delà de 60 km/h, cette traînée augmente nettement en raison de la hausse du coefficient C_x .
- Le soufflage intégral des micro-orifices a montré ses limites à grande vitesse : la réduction de traînée obtenue reste faible, ce qui suggère que cette stratégie perd en efficacité lorsque les régimes d'écoulement deviennent plus intenses. Cela met en évidence la nécessité d'adapter les configurations de soufflage en fonction des conditions aérodynamiques pour maintenir des performances optimales.
- À mesure que la vitesse d'écoulement augmente, il devient indispensable d'ajuster la pression de soufflage à la hausse pour maintenir l'efficacité aérodynamique.

III.9. Combinaison du contrôle actif et passif

Dans cette section, nous avons opté pour l'ajout d'une plaque longitudinale positionnée sur la partie arrière inférieure du corps d'Ahmed étudié (voir figure). Cette plaque, d'une longueur de 8 cm, est inclinée selon un angle de $\beta = 45^\circ$. Nous avons ensuite appliqué un soufflage en utilisant les trois modes les plus performants identifiés lors des analyses précédentes, dans le but d'évaluer l'évolution du coefficient de traînée (C_x) et de quantifier les gains obtenus pour différentes vitesses d'écoulement.

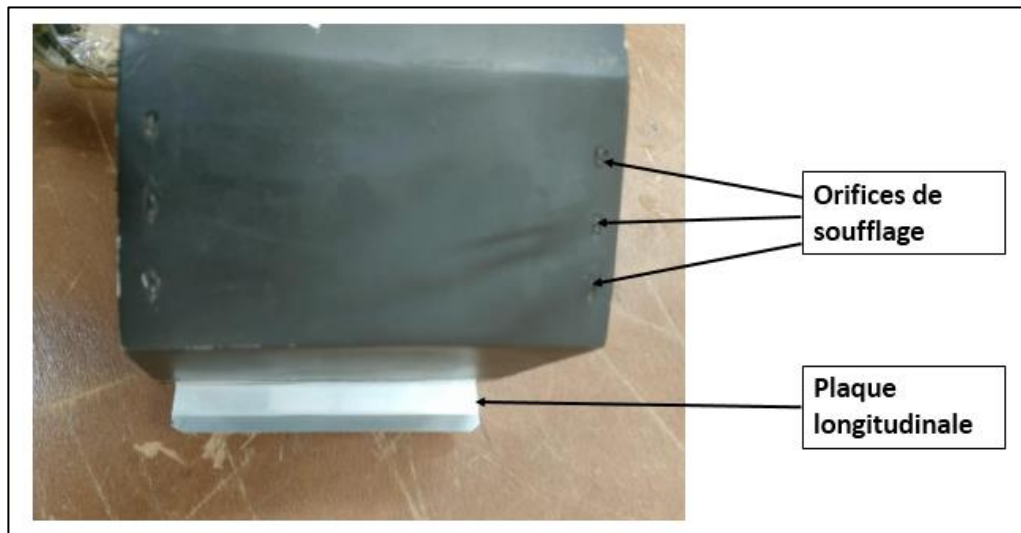


Fig. III. 18: Combinaison d'un contrôle actif et passif par une plaque longitudinale.

mode de soufflage		2-4-6-8-10-12			1-2-3-7-8-9			1-3-7-9		
vitesse km/h	Cx	pression relative (bar)	Cx	Gain relatif	pression relative (bar)	Cx	Gain relatif	pression relative (bar)	Cx	Gain relatif
60	1,9252	1.5	1,9141	-0,5756	1.5	1,8642	-3,1687	1.5	1,8823	-2,2274
		2,5	1,8671	-3,0199	2,5	1,7814	-7,4683	2,5	1,8388	-4,4865
		3.5	1,8114	-5,9106	3.5	1,7128	-11,033	3.5	1,807	-6,1383
80	1,8565	1.5	1,7954	-3,2913	1.5	1,8028	-2,8928	1.5	1,8101	-2,5014
		2,5	1,7735	-4,471	2,5	1,7838	-3,9166	2,5	1,7884	-3,6704
		3.5	1,7339	-6,6017	3.5	1,7608	-5,1564	3.5	1,7649	-4,9315
100	1,8386	1.5	1,8087	-1,6242	1.5	1,7922	-2,5239	1.5	1,769	-3,7852
		2,5	1,7977	-2,2251	2,5	1,7711	-3,6708	2,5	1,7526	-4,6769
		3.5	1,7813	-3,1145	3.5	1,7436	-5,1656	3.5	1,7407	-5,3224
120	1,8245	1.5	1,8493	1,3587	1.5	1,8195	-0,2753	1.5	1,8136	-0,5981
		2,5	1,8366	0,6619	2,5	1,8109	-0,7471	2,5	1,8044	-1,1028
		3.5	1,8232	-0,0703	3.5	1,8037	-1,138	3.5	1,7981	-1,4496

Tableau III.9 : Valeurs du coefficient Cx et les gains en pourcentage (%) pour le contrôle combiné (actif-passif)

Chapitre III : Etude expérimentale

Représentation des efforts aérodynamique :

- Vitesse 60 km/h :

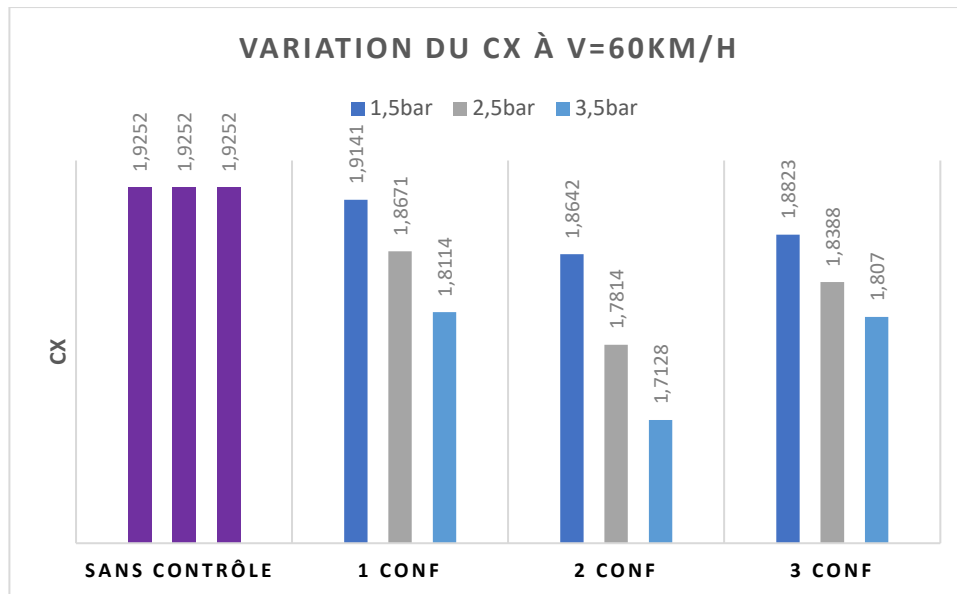


Fig. III. 19: Variation du C_x à 60 km/h pour le contrôle combiné.

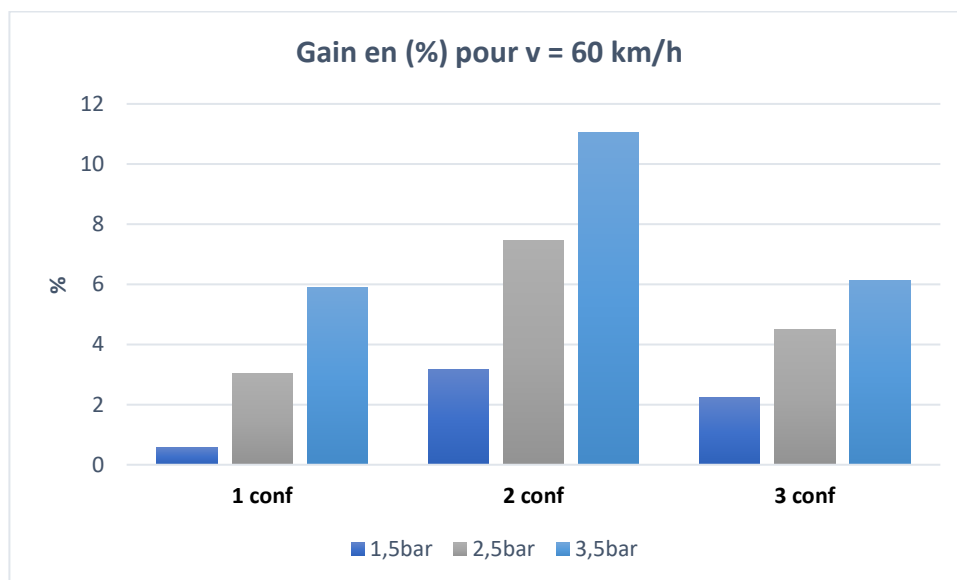


Fig. III. 20 : Gain en traînée pour la vitesse d'écoulement de 60 Km/h pour le contrôle combiné.

Chapitre III : Etude expérimentale

- Vitesse 80 km/h :

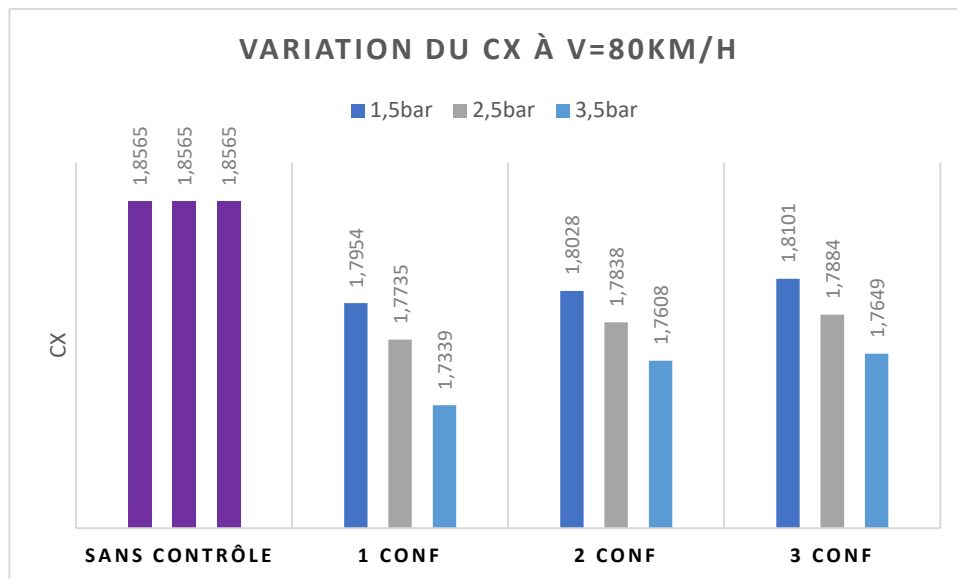


Fig. III. 21: Variation du C_x à 80 km/h pour le contrôle combiné.

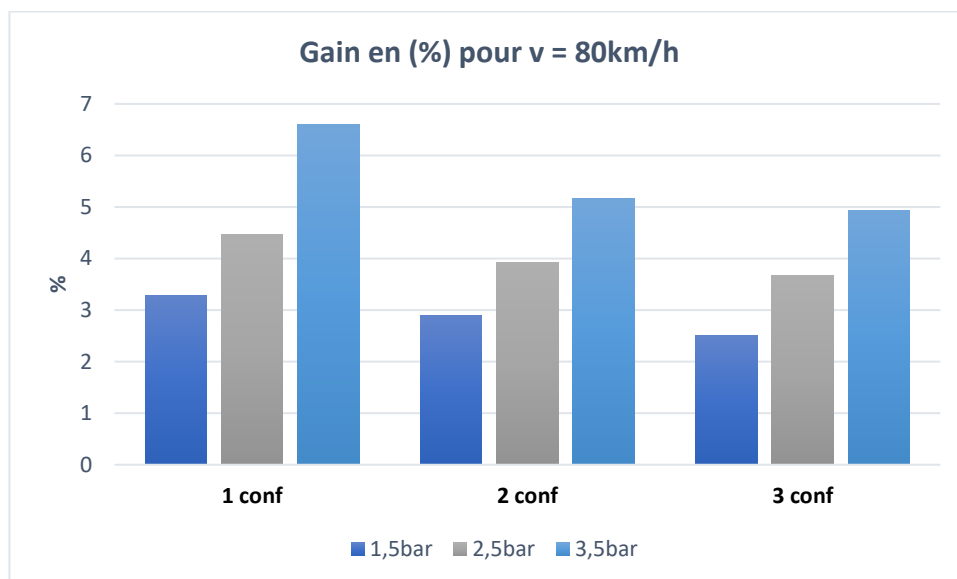


Fig. III. 22: Gain en traînée pour la vitesse d'écoulement de 80 Km/h pour le contrôle combiné.

- Vitesse 100 km/h :

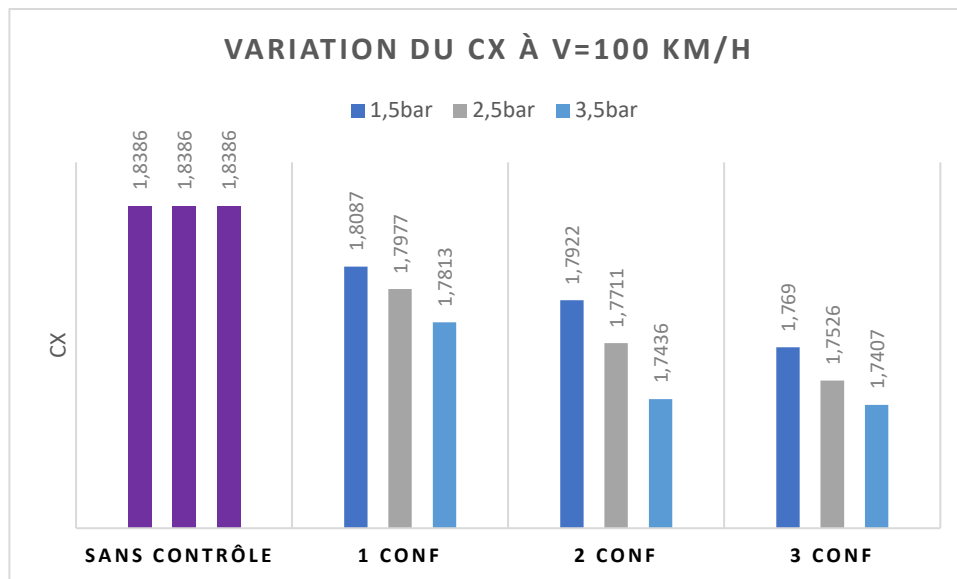


Fig. III. 23 : Variation du C_x à 100 km/h pour le contrôle combiné.

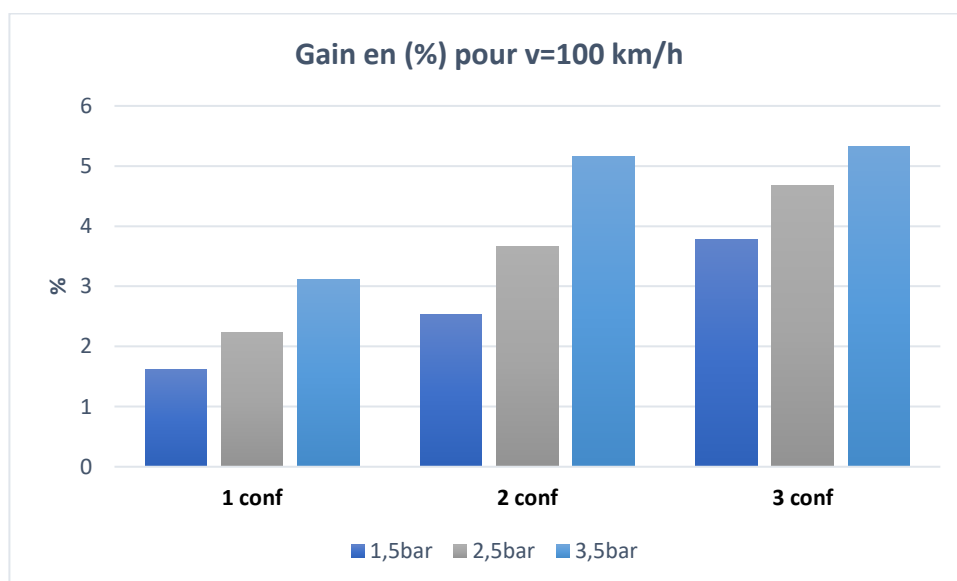


Fig. III. 24 : Gain en traînée pour la vitesse d'écoulement de 100 Km/h pour le contrôle combiné.

- Vitesse 120 km/h :

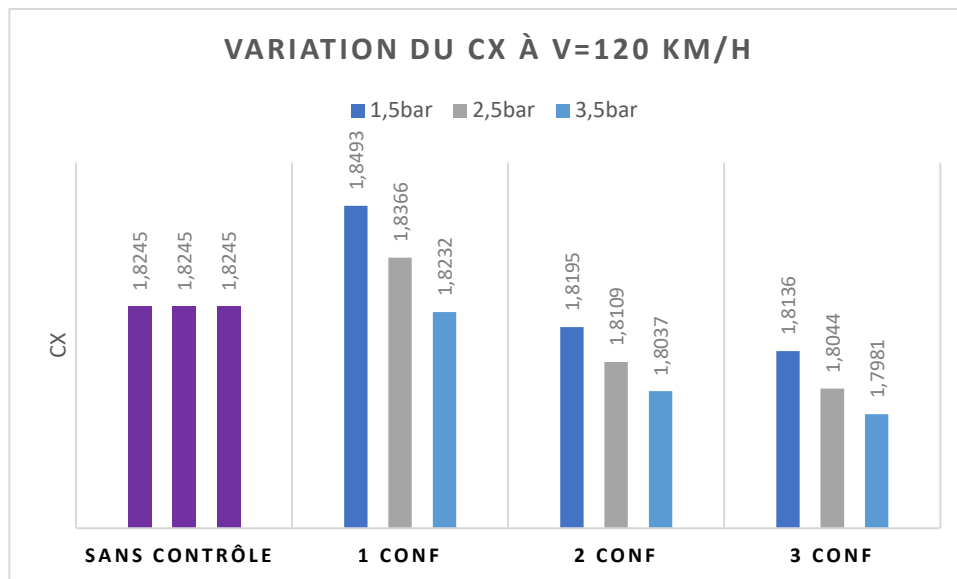


Fig. III. 25 : Variation du C_x à 120 km/h pour le contrôle combiné.

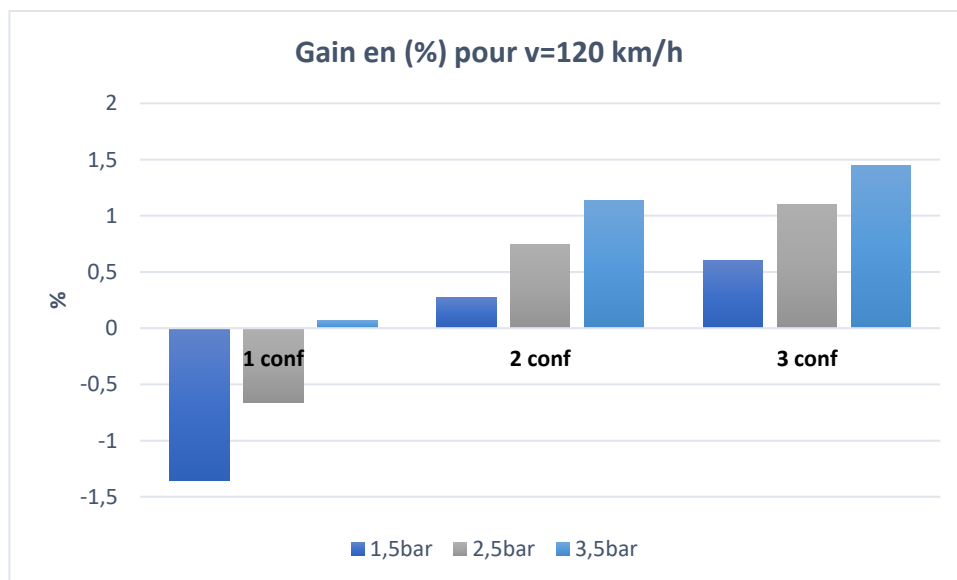


Fig. III. 26 : Gain en traînée pour la vitesse d'écoulement de 120 Km/h pour le contrôle combiné.

Le contrôle hybride

En intégrant un soufflage actif associé à une solution passive sous forme d'une plaque longitudinale, la réduction de trainée a pu atteindre 11% pour la même configuration de soufflage en contrôle actif seul.

III.10. Conclusion

L'étude a aussi révélé non seulement la place stratégique des orifices de soufflage, mais aussi le rôle prépondérant des différents agencements d'implémentation et de la pression de soufflage pour l'efficacité globale du dispositif, montrant comment le contrôle actif, seul ou en combinaison avec des solutions passives, peut contribuer à l'optimisation de la performance aérodynamique.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

Au terme de ce travail consacré à l'étude et à la mise en œuvre de techniques de réduction de la traînée aérodynamique, nous avons démontré l'efficacité du contrôle actif par soufflage continu à travers douze micro-orifices judicieusement répartis sur un modèle simplifié de type Corps d'A Ahmed, caractérisé par un angle d'inclinaison de lunette arrière de 25°. Ce choix s'appuie sur les travaux antérieurs d'A Ahmed et al. [10], qui ont montré que cette configuration génère un coefficient de traînée particulièrement élevé, offrant ainsi un cadre pertinent pour l'évaluation de stratégies de contrôle.

Parmi les différentes approches explorées, le contrôle actif par soufflage continu s'est révélé capable de réduire la traînée aérodynamique jusqu'à 10 % à basse vitesse (60 km/h), avec une efficacité encore perceptible aux vitesses plus élevées. L'association de ce contrôle actif avec une solution passive – l'ajout d'une plaque longitudinale – a permis d'atteindre une réduction totale de 11 %, confirmant la pertinence des stratégies hybrides pour des applications automobiles.

L'étude a également mis en évidence une relation proportionnelle entre l'augmentation de la vitesse d'écoulement et le coefficient de traînée, soulignant la nécessité d'un traitement plus spécifique à grande vitesse. Dans cette optique, le soufflage à faible débit via micro-orifices s'est montré efficace, offrant une double optimisation : une consommation réduite de débit et une diminution significative de la traînée.

Par ailleurs, les résultats obtenus soulignent l'importance du choix des configurations de soufflage. À nombre égal de micro-orifices, différentes dispositions ont conduit à des performances contrastées, révélant les limites à ne pas dépasser pour éviter l'apparition de traînées parasites, notamment à haute vitesse, où certains effets négatifs ont été observés par rapport au cas de référence sans soufflage.

Enfin, l'application d'un contrôle hybride, combinant soufflage actif et dispositif passif, a montré des résultats prometteurs. Cette approche ouvre des perspectives intéressantes pour le développement de solutions plus efficaces de contrôle de couche limite et incite à poursuivre les travaux afin d'optimiser davantage les performances aérodynamiques tout en réduisant la consommation énergétique.

Les techniques de contrôle de l'écoulement constituent ainsi un champ d'innovation majeur pour l'industrie automobile. Une meilleure maîtrise de la dynamique de l'air autour des

véhicules pourrait contribuer à la conception de modèles plus économes en énergie et adaptés aux exigences de confort et de performance.

Références bibliographiques

- [1] Larousse. *Aérodynamique* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.larousse.fr/>
(Consulté le 24 septembre 2025).
- [2] Renault Sport. *Tests aérodynamiques en soufflerie sur modèle réduit de voiture*. Guyancourt : Centre technique Renault, 2022.
- [3] Wikipédia. (n.d.). *Aérodynamique automobile*. Dans Wikipédia. (Consulté le 24 septembre 2025).
- [4] Cengel, Yunus A., et Cimbala, John M. *Mécanique des fluides : Écoulements externes*. Québec : Presses de l'Université du Québec, 2009.
- [5] Prandtl, L. (1904). *Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung*. In *Verhandlungen des dritten Internationalen Mathematiker-Kongresses* (pp. 484–491). Heidelberg.
- [6] Batchelor, G.K.. *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press. (2000).
- [7] Perrin, R. (2005). *Analyse physique et modélisation d'écoulements incompressibles instationnaires turbulents autour d'un cylindre circulaire à grand nombre de Reynolds* (Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse).
- [8] Bourgois S, *Etude expérimentale du décollement sur profile d'aile : analyse et contrôle*, thèse de doctorat, Université de Poitiers 2006 .
- [9] Eulalie, Yoann. *Étude aérodynamique et contrôle de la traînée sur un corps de Ahmed culot droit*. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux. 2014.
- [10] 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.
- [11] Spohn A., Gilliéron P., *Flow Separations Generated by a Simplified Geometry of an Automotive Vehicle*, IUTAM Symposium: unsteady separated flows, 2002.
- [12] Durand, L., M. Kuntz, and F. Menter. *Validation of CFX-5 for the Ahmed car body*. CFX Validation Report, CFX-Val 13 (2002): 1002.

- [13] Gad-el-hak, Mohamed. *Flow control: The future*. Journal of aircraft, 2001, vol. 38, no 3, p. 402-418.
- [14] Ott, Célestin. *Caractérisation dynamique d'actionneurs fluidiques, et identification expérimentale des mécanismes dynamiques d'interaction jet-couche limite induits*. 2020. Thèse de doctorat. Université Polytechnique Hauts-de-France.
- [15] Leclerc, Cédric. *Réduction de la traînée d'un véhicule automobile simplifié à l'aide du contrôle actif par jet synthétique*. 2008. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique (Toulouse).
- [16] Dong, B. (2008). *Étude et caractérisation de plasmas destinés au contrôle actif d'écoulements gazeux subsoniques*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans.
- [17] Hucho, W. H. (1998). *Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering*. SAE International.
- [18] Hyundai. (2022). *Ioniq 6 aerodynamic design*. Hyundai Motor Company.
- [19] Jean-Luc Aider, Jean-Jacques Lasserre, Jean-François Beaudoin, Vincent Herbert, José Eduardo Wesfreid. *Contrôle d'écoulement en Aérodynamique automobile*. CFM2009-19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France.
- [20] Magnier, Pierre. *Etude expérimentale du contrôle d'écoulements aérodynamiques subsoniques par action de plasmas froids surfaciques à pression atmosphérique*. 2007. Thèse de doctorat. Université d'Orléans.
- [21] Evrard, Antoine., et al. *Fluid force and symmetry breaking modes of a 3D bluff body with a base cavity*. Journal of Fluids and Structures, 2016, vol. 61, p. 99-114.
- [22] Bourgois, S., Favier, J., Sommier, E., et al. *Etude expérimentale du contrôle des décollements de couche limite par aspiration et soufflage*. In : Actes du Colloque FLUVISU11. 2005.
- [23] Tarakka, Rustan, Salam, Nasaruddin, Mochtar, Andi Amijoyo, et al. *On the aerodynamics of rear of vehicle model with active control by blowing: computational and experimental analysis*. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 2023, vol. 12, no 2, p. 84-90.

- [24] Batikh, Ahmad. *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*. 2008. Thèse de doctorat. INSA Toulouse.
- [25] Rouméas, Mathieu, Gilliéron, Patrick, et Kourta, Azeddine. *Drag reduction by flow separation control on a car after body*. International journal for numerical methods in fluids, 2009, vol. 60, no 11, p. 1222-1240.
- [26] Hongjiang Cui, Huaiyu Tang, Ying Guan et al. *Research on Aerodynamic Drag Reduction of EMU Tail Car Bogie on Combined Suction and Blowing*, 02 February 2024, PREPRINT (Version 1) available at Research Square [<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3875082/v1>].
- [27] Smith, B. L., & Glezer, A. (2002). *Jet Vectoring Using Synthetic Jets*. Journal of Fluid Mechanics, 458, 1–34.
- [28] Wygnanski, et al (2001). *Control of Separation Using Steady and Oscillatory Jets*. AIAA Journal, 39(8), 1514–1525.

Soumission de communication scientifique à une conférence internationale ICESSE'25

Tizi-Ouzou Algeria 29-30 October 2025

Résumé de la communication scientifique :

*International Conference on Engineering
Sciences for a Sustainable Environment*

ICESSE'25"



Contrôle Actif par Soufflage Continu de l'Ecoulement Turbulent Autour d'un Véhicule Simplifié de Type Corps d'A Ahmed

Hadjer Mohamed^{1,2}, Menaoum Rafik¹, Tachekort Yacine¹, Tebbiche Hocine^{1,2,✉}, Boutoudj
Mohammed Said^{1,2}

¹ Département de génie mécanique, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 15 000, Algérie

² Laboratoire d'Energétique, Mécanique et Matériaux (LEMM), Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 15 000, Algérie.

✉ Corresponding author : hocine.tebbiche@ummto.dz

ICESSE'25

International Conference on Engineering
Sciences for a Sustainable Environment.
ICESSE'25

Tizi Ouzou Algeria 29-30 October 2025

Keywords

Soufflage;
Corps d'A Ahmed;
Traînée.

Abstract:

Dans un objectif de réduction de la traînée aérodynamique, cette étude expérimentale évalue l'efficacité du contrôle actif de la couche limite par soufflage continu, appliqué à un modèle simplifié de type corps d'A Ahmed. Cette technique vise à limiter les écoulements décollés en aval du véhicule ou à réduire la section du sillage, principale source de traînée. Les essais ont été réalisés en soufflerie subsonique pour deux vitesses caractéristiques : 60 km/h et 100 km/h. Le contrôle est effectué via douze micro-orifices de soufflage de 600 µm de diamètre, répartis entre la lunette arrière et le culot, afin d'étudier l'effet de leur position, de la pression d'alimentation et de la vitesse d'écoulement amont sur la traînée. Les résultats montrent une amélioration sensible des performances aérodynamiques, avec une réduction de la traînée d'environ 10 % pour un soufflage à 3,5 bar appliqué au niveau de la lunette arrière inclinée de 25 degrés.

Lettre d'acceptation :



Mouloud Mammeri University of Tizi-Ouzou - Faculty of Construction Engineering

XoOΛoεX C:I:Λ oXCΛoEo

*International Conference on Engineering Sciences
for a Sustainable Environment*

ICESSE'25

29-30 Oct 2025 Tizi Ouzou (Algeria)



ACCEPTANCE LETTER

Dear **HADJER Mohamed,**

Thank you for submitting your paper ID: **ICESSE2025-EE-031**

entitled:

Contrôle Actif par Soufflage Continu de l'Ecoulement Turbulent Autour d'un Véhicule Simplifié de Type Corps d'A Ahmed

to the First International Conference on Engineering Sciences for a Sustainable Environment, Tizi Ouzou, ALGERIA (ICESSE'25).

We are pleased to inform you that your paper has been accepted for the conference program. Please incorporate reviewer and Program Committee comments into the final version, due September 13th.

The conference registration form will be available on our website shortly. In case you need any further information, do not hesitate to contact us at: samir.tiachacht@ummto.dz or abdelmadjid.sisalem@ummto.dz

You will receive confirmation regarding the type of your presentation (oral or poster) at a later time.

Thank you for giving us the opportunity to consider your work and we look forward to seeing you at ICESSE'25 on 29 and 30th October, 2025.

Yours sincerely,
Scientific Committee of the ICESSE'25 Conference

