

Visa du chef de département des
Sciences et de la Technologie
Signature:.....
Date :

Simulation aérodynamique d'une voiture par Solidworks

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de master académique en
«Installations énergétiques et turbomachines»

Encadreur: Dr. FERNINI Brahim
Signature:
Date:

Réalisé par : MEDHIA Alaeddine
Signature:
Date:

Membres du jury

Dr. KHERRIS Sahraoui (*Président*)
Dr. HAMDI Amine (*Examineur*)
Dr. FERNINI Brahim (*Encadreur*)

Tissemsilt, Année Universitaire – 2018-2019

Remerciement

*Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à monsieur Fernini
Brahim, enseignant au centre
universitaire de Tissemsilet, je le remercie de m'avoir encadré,
orienté, aidé et conseillé.
J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, et
toutes les personnes qui
par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont
guidé mes réflexions et ont accepté à me
rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches.
Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour
moi.*

*Un grand merci également à l'ensemble du personnel
pédagogique, technique et administratif du
département, principalement mes condisciples lors de la
formation.*

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Mes très chers parents pour leur aide

Leur patience et leur amour

Mes frères et sœurs

Toute ma famille

A mon encadrant Dr : Fernini Brahim

Tous mes amis

A tous mes enseignants et mes collègues

A tous qui m'a aidée

SOMMAIRE

Remerciement.....	2
Dédicace	3
Liste des Tableaux.....	6
Nomenclature	6
Introduction générale.....	9
1.1 Introduction.....	11
1.2 Historique	11
1.2.1 Les premières préoccupations	11
1.2.2 Quelques visionnaires	13
1.2.3 Les crises comme vecteurs de développement.....	14
1.2.4 La Formule 1, laboratoire de l'aérodynamique	16
1.2.5 Des années 1980 à aujourd'hui.....	18
1.3 Travail réalisé	19
1.4 Généralité sur l'aérodynamique du véhicule	22
2.1 Introduction.....	27
2.2 Quelques rappels des définitions	27
2.2.1 Les origines de la traînée aérodynamique.....	30
2.2.2 Le corps d'Ahmed : Un bicorps automobile simplifié.....	32
2.2.3 Description de l'écoulement	33
2.2.4 Dynamique instationnaire de l'écoulement de sillage.....	35
2.3 Forces s'exerçant sur un véhicule.....	36
2.4 Les sources de traînées aérodynamiques et leurs impacts	37
2.5 Enjeux de l'aérodynamique	38
2.5.1 Consommation	38
2.5.2 Vitesse maximale	40
2.5.3 Freinage et virage.....	42
2.6 Quelques solutions pour réduire la traînée aérodynamique des véhicules	43
2.7 Conclusion	44
3.1 Introduction.....	46
3.2 Modélisation d'une voiture.....	46
3.2 Les étapes de simulation par SW	47
3.3 Les résultats de simulation.....	49
3.4 D'autres simulations possibles	54
3.6 Conclusion	57
Conclusion générale	58

Bibliographie	59
Résumé	61

Liste des figures

Fig.1 - La Jamais Contente	12
Fig.2 - Alfa Romeo "La bomba" 1914	12
Fig.3 - La Rumpler Tropfenwagen	13
Fig.4 - la Ley T2	13
Fig.5 - Mathis 333, avec sa roue arrière unique	14
Fig.6 - La Peugeot 402	15
Fig.7 - La Citroën DS 1956	15
Fig.8 - La Citroën CX	16
Fig.9 - la Ferrari 312	16
Fig.10 - La Lotus 78	17
Fig.11 - Relation entre forme et Cx (objet se déplaçant de la gauche vers la droite)	24
Fig. 12 - Représentation schématique simplifiée des efforts aérodynamiques autour d'un objet en mouvement	28
Fig.13 - Définition des efforts et moments aérodynamiques dans le repère lié au véhicule	29
Fig.14 - Ecoulement autour de l'automobile	31
Fig.15 - Bilan intégral de quantité de mouvement d'après Gilliéron	32
Fig.16 - Géométrie simplifiée du corps d'Ahmed	33
Fig.17 - Lignes de courant dans le plan longitudinal médian en aval du corps de Ahmed pour différentes inclinaisons de lunette arrière	34
Fig.18 - Évolution et répartition du Cx en fonction de l'angle de lunette sur un corps de Ahmed ...	34
Fig.19 - Évolution de la traînée aérodynamique d'un corps d'Ahmed incliné à 30° en fonction du nombre de Reynolds	35
Fig.20 - Forces ayant une contribution à la dynamique longitudinale	36
Fig.21 - Puissance dissipée en roulage	37
Fig.22 - Écoulement d'une couche limite sur une plaque plane	38
Fig.23 - Vitesse maximale en fonction du Cx	41
Fig.24 - Peugeot 206 de série et WRC	42
Fig.25 - Modélisation de la voiture Clio Campus par SolidWorks	46
Fig.26 - le domaine de calcul.	47
Fig.27 - Maillage plus fin utilisé pour la simulation.	48
Fig.28 - surface de référence.	49
Fig.29 - La force de la traînée en fonction de nombre d'itérations	49
Fig.30 - Le coefficient de traînée en fonction de nombre d'itérations	50
Fig.31 - La force de la portance en fonction de nombre d'itérations.	51

Fig.32 - Le coefficient de portance en fonction de nombre d'itérations.	51
Fig.33 - Le rapport entre le coeff de portance et le coeff de trainé (La finesse).	52
Fig.34 - La pression aérodynamique.	52
Fig.35 - La densité de fluide.	53
Fig.36 - la pression du fluide.	53
Fig.37 - La vitesse du fluide.	54
Fig.38 - température du fluide.	55
Fig.39 - Le nombre de Mach.	55
Fig.40 - Vitesse du son.	56
Fig.41 - La dissipation turbulente.	56
Fig.42 - Energie turbulente.	57
Fig.43 - Viscosité turbulente.	57

Liste des Tableaux

Tableau 1 - Historique des records de C_x sur des modèles de série.	19
Tableau 2 - Frottement aérodynamique d'un SUV (en N).	39
Tableau 3 - Frottement aérodynamique d'une citadine (en N).	39
Tableau 4 - Perte énergétique d'origine aérodynamique d'un SUV (en kWh/100 km).	39
Tableau 5 - Perte énergétique d'origine aérodynamique d'une citadine (en kWh/100 km).	40
Tableau 6 - Perte énergétique d'origine aérodynamique d'un SUV (en l/100 km).	40
Tableau 7 - Perte énergétique d'origine aérodynamique d'une citadine (en l/100 km).	40
Tableau 8 - Les paramètres de simulation [44].	48

Nomenclature

A	Point d'application de la résultante des efforts aérodynamiques
C_l	Coefficient de roulis au point G
C_m	Coefficient de tangage au point G
C_n	Coefficient de lacet au point G
C_x	Coefficient de traînée aérodynamique
C_y	Coefficient de dérive aérodynamique
C_z	Coefficient de portance aérodynamique
\vec{F}_a	Résultante des efforts aérodynamiques
\vec{F}_f	Résultante des efforts visqueux et turbulents
\vec{F}_p	Résultante des efforts de pression
P	Coefficient de pression statique

F_x	Effort de traînée aérodynamique [N]
F_y	Effort de dérive aérodynamique [N]
F_z	Effort de portance aérodynamique [N]
G	Centre de gravité du véhicule
\vec{M}_a	(G) Moment aérodynamique transporté au centre de gravité
M_x	Moment et coefficient de roulis au point G
M_y	Moment et coefficient de tangage au point G
M_z	Moment et coefficient de lacet au point G
\vec{n}	Normale locale entrante dans le fluide
H_A	Hauteur du corps de Ahmed [m]
l_A	Largeur du corps de Ahmed (=0.389 m, échelle 0.7 = 0.272 m)
l_2	Longueur de la lunette arrière (=0.222 m, échelle 0.7 = 0.155 m)
P_{i0}	Pression totale de l'écoulement incident [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$]
P_i	Pression totale de l'écoulement aérodynamique [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$]
P_0	Pression statique de l'écoulement au repos (=101325 Pa)
$Re_{L_{\text{rèf}}}$	Nombre de Reynolds de l'écoulement aérodynamique basé sur $L_{\text{rèf}}$ et U_∞
S_w	Section transversale de l'écoulement de sillage [m^2]
S_∞	Maître couple du véhicule [m^2]
U_∞	Vitesse de déplacement du véhicule [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
σ_c	Surface d'un objet
ρ	Masse volumique de l'air [=1.225 kg/m^3]
$\bar{\tau}_\mu$	Tenseur des contraintes visqueuses
$\bar{\tau}_t$	Tenseur des contraintes turbulentes

Introduction générale

La science de l'aérodynamique est l'étude des forces exercées par l'air sur un objet. Elle s'applique aussi bien aux objets fixes qu'aux objets en mouvement tels que les véhicules.

C'est à partir de la fin du XIX^{ème} siècle avec le développement de l'aviation que les études sur l'aérodynamique se multiplient et s'approfondissent. Pourtant, cette notion était déjà présente depuis très longtemps dans la nature. En effet, depuis toujours les êtres vivants naissent avec des propriétés aérodynamiques leur permettant de voler et de nager.

L'Homme s'est inspiré de ces propriétés (matières, formes) afin de trouver des solutions pour concevoir des véhicules aérodynamiques. Ce principe est appelé le biomimétisme.

L'aérodynamique automobile est l'étude des phénomènes aérodynamiques induits par l'écoulement de l'air autour d'un véhicule automobile en mouvement. La connaissance de ces phénomènes permet entre autres, de réduire la consommation des véhicules en diminuant leur traînée, d'améliorer leur comportement routier en influant sur leur portance (ou leur déportance) et de diminuer les phénomènes aéroacoustiques ainsi que les turbulences à haute vitesse.

L'aérodynamique étant intrinsèquement liée à la mécanique des fluides, les essais en soufflerie sont aujourd'hui devenus indispensables aux constructeurs automobiles. Par ailleurs, en raison des phénomènes complexes mis en jeu en aérodynamique, ces derniers ont également recours à la simulation numérique.

Le sujet des travaux que nous présentons ici est la simulation aérodynamique d'une voiture.

Nous avons structuré ce mémoire de la façon suivante :

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art de l'aérodynamique des automobiles et présente quelques généralités sur l'aérodynamique des voitures.

Le deuxième chapitre nous permettra de faire un rappel théorique sur l'aérodynamique des automobiles.

Le troisième chapitre est consacré à la partie de simulation par logiciel SOLID WORKS, ainsi que les résultats atteints et les discussions. Finalement nous terminons par une conclusion générale.

CHAPITRE I :

Généralités, état de l'art sur
l'aérodynamique des voitures.

1.1 Introduction

L'aérodynamisme dans le domaine de l'automobile commence à se développer dans les années 1930; A cause de la crise économique, le prix du pétrole augmente considérablement, et les constructeurs automobiles cherchent un moyen de consommer moins tout en améliorant l'aspect esthétique des véhicules, afin de répondre aux demandes des clients. Depuis, l'aérodynamique automobile est donc une solution à la fois marketing et technique.

Le déplacement dans l'air d'un véhicule est soumis à la force du vent, qui évolue sans cesse en direction et en intensité. Ces phénomènes liés à la dérive entraînent des effets transitoires. Un véhicule terrestre se déplace dans une masse d'air non stationnaire, et le vent peut avoir de l'influence même lors d'un déplacement en ligne droite. Le plus important est d'avoir le moins de traînée et de portance possible.

1.2 Historique

1.2.1 Les premières préoccupations

Très tôt dans l'histoire de l'automobile, les constructeurs se sont intéressés à l'aérodynamique de leurs modèles. L'un des premiers fut le Belge Camille Jenatzy (figure 1) qui en 1889 conçoit une automobile électrique profilée comme une torpille dans le but de battre des records de vitesse. Dénommée la Jamais Contente, elle devient la même année la première automobile à franchir la barre symbolique des 100 km/h. Le texte du brevet de Jenatzy n° 281 660 du 26 septembre 1898 : « En résumé je revendique : Dans une voiture automobile, en vue de l'obtention de vitesses exceptionnelles, la disposition à l'avant de la voiture d'un bouclier ou coupe-vent terminé en pointe et formé par deux surfaces convexes s'élevant de manière à protéger jusqu'aux parties les plus élevées de la machine..." ». En phase préparatoire à la réalisation d'une réplique une maquette au 1/5 a été réalisée et testée en soufflerie par des étudiants de l'UTC (Université de Technologie de Compiègne) sous la direction de Joël Debout le C_x avec conducteur est de 0,758 [1].

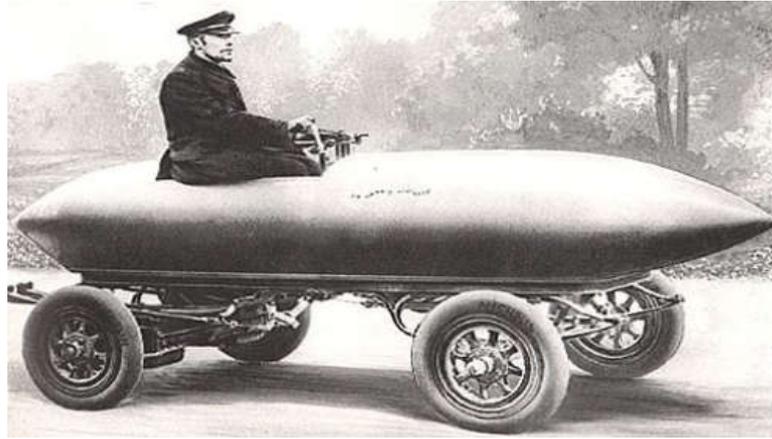


Fig.1 - La Jamais Contente [1].

Dans les années 1910, quelques dessinateurs s'intéressent également à l'aérodynamique des automobiles, à l'image de l'Alfa Romeo 40-60 HP dessinée par le carrossier Castagna, dont la carrosserie forme une carène profilée en forme d'aéronef (voir figure 2) [2]. Même si ces automobiles avant-gardistes demeurent marginales, elles traduisent une volonté des « grands » constructeurs automobiles de réduire la traînée : les pare-brise sont davantage inclinés, les roues sont carénées, etc [3].



Fig.2 - Alfa Romeo "La bomba" 1914 [2].

Contrairement à l'aéronautique, l'automobile a pu, dès le début, profiter « d'un corps de doctrine, de dispositifs d'essais et d'un nombre considérable de résultats expérimentaux » [4] issus de l'aviation. Ces résultats ayant permis, entre autres, de démontrer que le meilleur profil vis-à-vis du C_x est a priori celui d'une goutte d'eau, l'ingénieur autrichien Edmund Rumpler met au point au début des années 1920 une automobile profilée comme une goutte. Testé en soufflerie par Volkswagen en 1979, la Rumpler Tropfenwagen (figure 3) littéralement « voiture goutte » en allemand disposait d'un C_x de seulement 0,28 [5]; Volkswagen n'obtint un meilleur coefficient qu'en 1988, avec la Passat [5].



Fig.3 - La Rumpler Tropfenwagen [5].

1.2.2 Quelques visionnaires

À la même époque, l'ingénieur hongrois Paul Jaray est le premier à noter que la forme d'un « corps de moindre traînée » est différente suivant qu'il se situe dans l'air (aérodynamique) ou près du sol (automobile par exemple) [6]. En effet, la traînée d'un corps fuselé à proximité du sol augmente fortement par décollement de la couche limite.

Cette découverte faite, il réalise avec Wolfgang Klemperer, bien avant les constructeurs automobiles, des essais dans la soufflerie du comte Zeppelin à Friedrichshafen [6] ; le résultat est une automobile profilée à la manière d'une aile d'avion, la Ley T2 (figure 4), sans aspérités et dont tous les accessoires (phares, calandre, etc.) sont intégrés à la carrosserie. Son but était, selon Serge Bellu, « d'optimiser les performances, la consommation, la ventilation et le silence » [7].

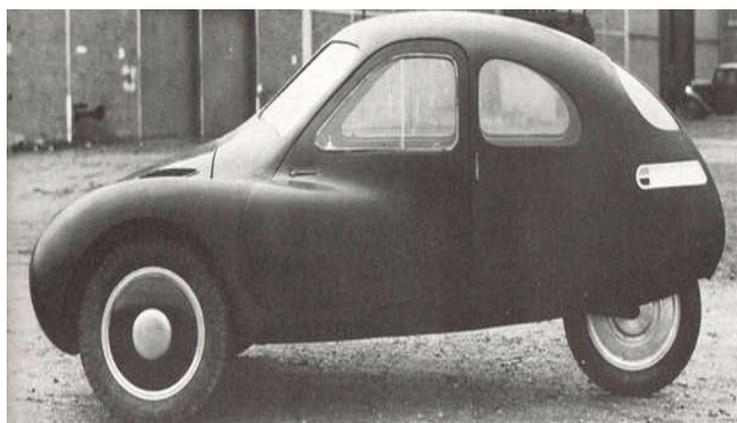


Fig.4 - la Ley T2 [7].

Si le gain aérodynamique est majeur, la carrosserie dessinée par Jaray et Klemperer engendre de la portance et donc de la traînée induite par la formation de deux importants vortex latéraux. Pour résoudre ce problème, Mauboussin propose « une carrosserie en forme d'aile verticale qui

élimine la traînée induite », puis, devant les problèmes de stabilité de route créés par cette solution, « un étage des maîtres couples vers la poupe formant une dérive stabilisatrice » [6].

Si les automobiles ont auparavant la forme d'une torpille, le dessin global est désormais celui d'un berlingot, à l'image de la Mathis 333 (ci-dessous), forme reprise par beaucoup de constructeurs automobiles de l'époque, surtout allemands, comme Mercedes-Benz, Opel ou Maybach [5].



Fig.5 - Mathis 333, avec sa roue arrière unique [5].

1.2.3 Les crises comme vecteurs de développement

Les années 1930 marquent réellement le début de l'aérodynamique moderne. Alors que le « Jeudi noir » plonge l'industrie automobile dans la crise, au même titre que les autres secteurs économiques ayant notamment pour conséquence l'augmentation du prix du pétrole, les constructeurs américains opèrent une véritable révolution esthétique ; c'est la période du Streamline Moderne.

Outre le fait de renouveler le style des automobiles pour mieux séduire, l'intérêt est d'améliorer l'aérodynamique et ainsi de diminuer la consommation [8]. Le constructeur américain Chrysler est le premier à s'intéresser à ce mouvement et à produire en série une automobile s'en inspirant. En 1934, la Chrysler Airflow, signifiant littéralement « flux d'air » en anglais, devient rapidement l'emblème le plus expressif du courant Streamline Moderne. Malgré la crise, elle se révèle trop innovante pour susciter, au-delà du « succès d'estime », un succès commercial [8]. Elle marque pourtant le début de l'ère des designers aérodynamiciens et le phénomène Streamline se propage à l'Europe.

En France, Peugeot dévoile au Salon de Paris 1935, la 402 (figure 6), berline aux lignes fluides marquée par une calandre arrondie, des ailes gonflées, une très longue carrosserie de six glaces, un pare-brise en coupe-vent deux parties ainsi que des phares intégrés à la calandre [9].



Fig.6 - La Peugeot 402 [9].

Les années 1970 marquent à leur tour un tournant dans l'histoire de l'aérodynamique automobile. Alors que le monde connaît son premier choc pétrolier le 6 octobre 1973, les constructeurs automobiles poussent plus loin l'aérodynamique de leurs véhicules ; le coefficient de traînée devient un critère important dans le cahier des charges. Le constructeur français Citroën décide de remplacer la DS (figure7) qui avait déjà franchi un pas grâce à l'ingénieur aéronautique André Lefebvre, en contraignant l'architecture de l'automobile à l'aérodynamique et non l'inverse [10] par la CX (figure 8), au nom évocateur de cette tendance [11].



Fig.7 - La Citroën DS 1956 [10].



Fig.8 - La Citroën CX [11].

1.2.4 La Formule 1, laboratoire de l'aérodynamique

« L'aérodynamique est la partie où le plus gros gain en performance peut être fait, mais essayer de l'anticiper dans le but d'être compétitif est très difficile [12]. »

En 1950, la Fédération internationale de l'automobile (FIA) instaure le premier championnat du monde des pilotes de Formule 1. Ceux-ci disputent des Grands Prix à bord de monoplaces aux roues non-carénées, ce qui engendre une traînée particulièrement handicapante pour les performances. Le perfectionnement de l'aérodynamique devient donc au fil des années un enjeu majeur, au même titre que celui des suspensions ou de la motorisation [13].

Les débuts sont pourtant assez lents. Ce n'est qu'en 1966 qu'une première Formule 1 est testée en soufflerie. En 1968, le premier aileron arrière apparaît sur la Ferrari 312 (figure 9) ; les concepteurs de F1 se contentaient jusque là de réduire la traînée, sans voir que l'aérodynamique pouvait servir à augmenter l'appui en ajoutant des masses fictives (des forces aérodynamiques qui n'augmentent pas la masse et donc l'inertie du véhicule) [13].



Fig.9 - la Ferrari 312 [13].

Par la suite vont naître les wing-cars, ou voitures à effet de sol, qui sont les premières monoplaces de Formule 1 dont l'intégralité (et plus seulement la carrosserie) est étudiée aérodynamiquement ; les pontons, notamment, prennent la forme d'ailes inversées. Ainsi, la forme des pontons sous la voiture rétrécit-elle l'espace entre le fond de la voiture et le sol avant d'élargir le passage. Cette particularité permet de bénéficier de l'effet Venturi, du nom de son inventeur qui avait montré que l'air, en passant par un tel chemin, crée une dépression. Dans le même temps, les côtés des pontons sont isolés des flux extérieurs par des « jupes » qui descendent jusqu'au sol. Ainsi les (wing-cars) bénéficient-elles d'un puissant phénomène aérodynamique qui leur permet de coller à la route dans les virages [3].

Parmi les premiers exemplaires, les Lotus 78 et Lotus 79 (voir figure 10), apparues en 1977, font preuve d'une incroyable efficacité, si bien qu'elles sont rapidement copiées par les autres écuries [13].

Colin Chapman, l'ingénieur responsable de Lotus, est l'un des initiateurs de cette innovation en Formule 1. Il choisit de s'intéresser au soubassement des monoplaces jusqu'alors largement oublié. Conscient que la création de déportance engendre celle de traînée, néfaste à l'avancement de l'automobile, il est persuadé que le soubassement peut offrir une déportance intéressante et une traînée minimale [13]. Chapman réalise alors l'intérêt d'abaisser la garde au sol de la monoplace pour profiter de l'effet de sol [3].



Fig.10 - La Lotus 78 [13].

À la suite de diverses interdictions et restrictions réglementaires de la FIA pour limiter l'efficacité des monoplaces une garde au sol minimale, un fond plat, etc. les ingénieurs cherchent à retrouver l'appui qu'ils ont perdu avec les nouvelles règles. C'est ainsi que naît à la fin des années 1980, et se développe dans les années 1990, le diffuseur [3]. Celui-ci est installé à l'arrière du fond

plat imposé aux monoplaces, pour recréer l'effet de sol grâce à sa forme qui canalise l'air, à sa sortie à l'arrière des voitures.

Beaucoup d'autres éléments aérodynamiques, comme les déflecteurs ou plus récemment le système F-Duct, ont fait leur apparition en Formule 1 mais demeurent spécifiques à ce domaine de l'automobile, contrairement aux ailerons ou au diffuseur qui sont maintenant présents sur certains modèles de série. De fait, jusqu'au milieu des années 1970, la plupart des améliorations aérodynamiques des modèles de série proviennent des connaissances acquises en sport automobile à travers les courses de prototypes d'endurance ou les courses de Formule 1 [5].

1.2.5 Des années 1980 à aujourd'hui

L'industrie automobile est durablement touchée par le choc pétrolier puis par la récession des années 1970. En conséquence, l'amélioration de l'aérodynamique automobile devient une réponse à la fois technique et marketing aux préoccupations des usagers [15].

Un des constructeurs à l'avoir très tôt compris est l'Allemand Audi. En 1982 est dévoilée l'Audi 100 (C3), dont le C_x de seulement 0,30 est le plus faible jamais atteint pour une automobile de série [5]. Cette prouesse pour l'époque est permise par le soin particulier apporté aux détails — qui représentent près de 6 % de la traînée [16] —, notamment au niveau des fenêtres, affleurantes à la carrosserie [5].

Afin de perfectionner leurs modèles, les constructeurs automobiles ont aujourd'hui systématiquement recours aux essais en soufflerie. Grâce à l'expérience ainsi acquise, les meilleures automobiles de série en termes d'aérodynamique obtiennent ainsi des valeurs de C_x proches de 0,25. Néanmoins, la diminution du C_x n'est pas aisée pour des automobiles de série ; si l'aérodynamique automobile des premières années permet des progrès rapides pour atteindre des valeurs de l'ordre de 0,30, il faut attendre près de dix ans pour passer du 0,26 de l'Opel Calibra au 0,25 de la Honda Insight I, et encore autant pour le 0,24 de la Mercedes-Benz Classe E W212 coupé [17]. Quatre ans après, Mercedes sort la Classe CLA et la Classe C W205, actuelles détentrices du record sur une automobile de grande série [18].

L'EV1 de General Motors, première voiture électrique « moderne » deux places, a bien atteint un C_x de 0,19 [19] mais pour seulement 1 117 exemplaires construits de 1996 à 1999.

De nos jours, le record du plus faible C_x obtenu par une automobile « grand public » est détenu par l'Aptera 2 Series, petite automobile à trois roues atteignant un C_x de 0,15. En véhicule classique à quatre roues, le concept car Mercedes-Benz Bionic, à la carrosserie inspirée d'un poisson-coffre, se distingue avec une valeur de 0,19.

Tableau 1 - Historique des records de C_x sur des modèles de série [19].

	Audi 100 (C3)	Renault 25	Subaru XT	Opel Calibra	General Motors EV1	Honda Insight	Mercedes Classe E	Mercedes - Classe CLA
Année de sortie	1982	1984	1985	1989	1996	1999	2009	2013
Coefficient C_x	0,30	0,28	0,29	0,26	0,19	0,25	0,24	0,23

1.3 Travail réalisé

Dans ce qui suit nous présentons quelques :

In Harinaldi et al. [20] étude, une fourgonnette familiale a été modélisée avec une forme modifiée du corps d'Ahmed en modifiant l'orientation du flux de sa forme d'origine (corps d'Ahmed modifié / inversé), et l'objectif était de déterminer les caractéristiques du champ d'écoulement et de la réduction de la traînée aérodynamique survenue au cours de l'essai modèle. Les résultats montrent que l'application de l'aspiration dans la partie arrière du modèle fourgon donne l'effet de réduire le sillage et la formation de vortex. Ils ont constaté que la réduction de la traînée aérodynamique est proche de 13,86% pour le approche informatique et 16,32% pour l'expérimental.

V.N.Kumar et al. [21] ont travaillé sur une berline avec différents types de déflecteurs afin de déterminer les forces de traînée et de portance à différents vitesses. La conception de la berline a été réalisée sur CATIA-2010 et l'analyse a été réalisée avec le solveur ANSYS-fluent analyse deux types de spoilers ont été appliqués, le spoiler principal était un spoiler de type «aile» monté à 28cm au-dessus de la surface du l'arrière de la voiture, et le spoiler 2d était accroché au bord de l'arrière de la voiture sans laisser d'espace entre le spoiler et la surface de la voiture. Comparaison des forces de traînée et de portance sans spoiler, avec spoiler 1 et avec spoiler 2 à différents les vitesses ont été obtenues. Le coefficient de traînée des ailerons en forme d'aile est réduit de 0,333 à 0,329. La simulation de l'aérodynamique externe est l'une des applications CFD automobiles les plus difficiles et les plus importantes. Avec les développements rapides des ordinateurs numériques, le CFD est utilisé comme un outil pratique dans la recherche moderne sur la dynamique des fluides. Il intègre disciplines de la mécanique des fluides, des mathématiques et de l'informatique. Avec les automobiles à grande vitesse beaucoup plus commune.

Hu et Wong [22] ont étudié le flux autour d'une voiture de tourisme à grande vitesse simplifiée avec aileron arrière et sans aileron arrière. Une analyse des résultats de la simulation a permis de concevoir un nouvel aileron arrière qui montre légère réduction de la traînée

aérodynamique du véhicule. Cela conduit à une consommation de carburant moindre sur la route. Usingspoiler à l'arrière fin de la réduction de 1,7% de la traînée obtenue à grande vitesse.

R. B. Sharma et Ram Bansal [23] ont réalisé une expérience utilisant une plaque de queue pour réduire la traînée. Dans cette étude modèle de générique voiture de tourisme a été mis au point dans le cadre des ouvrages-10 et a généré la soufflerie et appliqué les conditions aux limites ANSYS workbench 14.0 après les tests et la simulation pour l'évaluation du coefficient de traînée pour voiture de tourisme. Dans un autre cas, l'aérodynamisme de la conception la plus appropriée de la plaque de queue est présenté et analysé pour l'évaluation du coefficient de traînée pour les voitures particulières. Le modèle de base de la voiture de tourisme générique est conçu dans Solid Works. Les plaques de queue sont placées à l'arrière du toit et du pare-chocs arrière de la voiture à l'angle d'inclinaison de 12 °. Avec les plaques de queue, la valeur maximale du Le coefficient de traînée (C_x) est de 0,3376 et la valeur maximale du coefficient de portance (C_z) est de 0,1926. Ainsi, il est conclu que, le coefficient de traînée est réduit de 3,87% et le coefficient de portance est réduit de 16,62% avec l'installation de plaques de queue. Par conséquent, la queue La plaque est l'un des dispositifs puissants permettant de réduire la résistance aérodynamique d'une voiture.

Jeff Howell [24] a modifié une voiture simple en effilant l'arrière du corps à la fois sur le toit et sur les côtés. L'effet de l'angle de dépouille et la longueur du cône sur les caractéristiques de traînée et de portance est étudiée, à une longueur de cône plus courte que la réduction nette initiale de la traînée se produit, mais cette tendance est inversée et un pic de traînée local est expérimenté pour un angle de dépouille supérieur à 10 °. Aux angles de dépouille plus grands, une augmentation significative de la traînée peut se produire pour cette dépouille longueur. Une anomalie similaire dans la tendance de traînée avec la longueur du cône a été identifiée pour la carrosserie avec le cône du toit seulement à un cône angle de 15 °. La mesure de la pression a montré qu'une forte aspiration se forme à l'intersection de la surface arrière conique et le toit plat et le côté de la carrosserie qui affectent à la fois la traînée et la portance.

Rohan Yadav et Justin Fischer [25] ont introduit une nouvelle technique de fente d'aspiration pour réduire la traînée générée à l'arrière de véhicule. Le modèle physique est un SUV générique à l'échelle 1 / 10ème sans rétroviseurs extérieurs. Une fente rectangulaire a été ajoutée et fusionnée à l'arrière du véhicule. La longueur, la largeur et la coordonnée verticale du centre de la fente ont toutes été normalisées par rapport au véhicule. la taille. L'air est aspiré uniformément à travers la fente et la vitesse limite d'entrée a été considérée comme la conception variable.

L'optimisation orthogonale ou méthode de Taguchi est une technique statistique utilisée pour étudier l'effet simultané de multiples variables sur la performance d'un processus. Dans cette technique, ils ont utilisé des nombres de tableaux et des itérations pour obtenir une valeur minimale

de la traînée en incorporant Solid Works pour la modélisation Ansys pour la génération de maillages corrects et l'analyse fluide. Le modèle y compris la fente d'aspiration a été importé dans le modélisateur de conception et alignés sur un volume de contrôle. Un demi modèle a été utilisé pour permettre une solution plus rapide du modèle avec un maillage plus raffiné. La taille du volume de contrôle a été réglée selon les meilleurs résultats de Fluent guide de pratique pour l'analyse des véhicules.

Le gain de pression dans la partie inférieure de la fente d'aspiration était supérieur à la perte de pression au-dessus de l'ouverture. Globalement l'inclusion de l'aspiration a réduit la différence de pression entre les surfaces avant et après du véhicule ce qui a traînée réduite.

E. Wahba et al [26] ont réalisé une expérience pour étudier la capacité de réduction de traînée des aubes directrices en considérant deux types de véhicules terrestres, un modèle de bus simplifié et un modèle simplifié de véhicule utilitaire sport (VUS). Pour obtenir un optimal la configuration, la configuration de l'aube directrice, la longueur de la corde et l'angle d'attaque varient. Des aubes latérales de guidage ont été installées près de l'arrière du modèle à boîte qui dirige le flux d'air dans la région de sillage basse pression.

Une réduction globale du coefficient de traînée aérodynamique était jusqu'à 18% pour le modèle bus et SUV est observée avec le modèle proposé. Modifications les aubes directrices à section transversale symétrique permettaient une réduction de la traînée plus importante que les sections transversales asymétriques.

Générateur de vortex

Le générateur de vortex est une surface aérodynamique qui est essentiellement une petite aube qui crée un vortex. VG largement utilisé dans l'industrie aérospatiale, principalement pour contrôler la transition de la couche limite et retarder la séparation des écoulements. Un type différent de VG est utilisé sur les voitures de course pour manipuler le flux sur et sous le véhicule, principalement pour générer une force vers le bas.

K. Selvakumar et al. [27] ont testé l'effet d'un générateur de vortex en forme de bosse se fixant sur l'extrémité du toit d'une berline en utilisant à la fois des outils de calcul et des expériences en soufflerie. La méthode expérimentale et la méthode de calcul montrent que la force de traînée augmente avec la vitesse pour le modèle de base et le modèle VG. Après l'application de VG, on observe une réduction comparative de la valeur du coefficient de traînée. En raison de l'application de VG, une force d'appui crée ce qui pousse la voiture au sol, ce qui donne plus de stabilité à haute vitesse.

Gopal P et al [28] ont mené une étude expérimentale sur le coefficient de portance et de traînée avec et sans générateur de vortex le toit d'une voiture utilitaire à différents angles de lacet (10°, 15° et 20°). Une échelle réduite de 1:15 de véhicule utilitaire avec des vitesses de 2,42, 3,7, 5,42 et 7,14 m / s sont testées en soufflerie. Une réduction exceptionnelle de la force de traînée peut être obtenue en l'application de VG. Les résultats expérimentaux ont montré que le coefficient de traînée était réduit au maximum pour le générateur de vortex à 15 °. L'angle de lacet à basse vitesse et le coefficient de portance restent constants pour VG avec un angle de lacet variable à des vitesses plus élevées.

1.4 Généralité sur l'aérodynamique du véhicule

▪ La résistance de l'air

L'atmosphère terrestre se comporte comme un milieu visqueux qui freine le mouvement des véhicules en circulation, Plus précisément, l'atmosphère terrestre génère une force physique qu'on appelle résistance de l'air ou traînée. Réduire la résistance de l'air, autrement dit la traînée, est donc une préoccupation constante, soit pour gagner de la vitesse, soit pour économiser de l'énergie : les cyclistes, les skieurs, les patineurs adoptent instinctivement la position dite de "l'œuf". La résistance de l'air dépend de la densité de l'atmosphère qui diminue avec l'altitude, ce qui incite les avions de ligne à voler aussi haut que possible(1). À 20 000 mètres de hauteur, par exemple, la densité de l'air est si réduite que la traînée y est divisée par dix, ce qui permettait au Concorde d'atteindre la vitesse de 2 000 km/h. Un calcul montre qu'au niveau de la mer et à puissance égale, il n'aurait pas pu dépasser 600 km/h. À l'instar des planètes, les satellites qui évoluent dans l'espace, c'est-à-dire dans un vide presque parfait, s'affranchissent presque complètement de la résistance de l'air. Une fois sur orbite, leur mouvement devient perpétuel, ou presque [29].

Il est impossible de mesurer directement la résistance que l'air exerce sur la carrosserie d'un véhicule en mouvement, c'est pourquoi les expériences aérodynamiques nécessitent le recours à des installations appelées "tunnels aérodynamiques", ou plus couramment, "souffleries". Plus ou moins sophistiquées, ces installations sont toutes conçues sur le même principe : une turbine brasse un vent artificiel dirigé sur la carrosserie du véhicule immobile. Il suffit alors de mesurer la force qu'exerce le flux d'air pour en déduire le C_x [29].

▪ La forme idéale

La mise au point des fuselages d'avions a montré qu'il existe une forme aérodynamique idéale, dite "ovoïde" (ressemblant à un œuf) ou "pisciforme", car proche de celle des poissons ou des oiseaux. Cette forme idéale, capable d'optimiser la traînée globale, doit être de coupe circulaire et respecter certaines proportions, notamment en ce qui concerne le rapport entre la section et la longueur. Hélas, cette forme idéale n'est pas applicable aux véhicules terrestres pour des raisons

techniques et pratiques. De toutes manières, les carrosseries des voitures modernes sont dessinées avec comme premier souci celui de l'esthétique, car il faut avant tout plaire à l'acheteur. Tout l'art des "designers" consiste donc à concilier à la fois les exigences de la mode et celles de l'aérodynamique [29].

▪ La pénétration dans l'air

Toutes conditions égales par ailleurs (vitesse, température et pression atmosphériques), l'aptitude à la pénétration dans l'air d'un véhicule ne dépend que de deux paramètres, et deux seulement : la surface frontale, également appelée maîtrecouple, et la traînée, caractérisée par le C_x . La surface frontale étant fixée par le cahier des charges du constructeur selon le gabarit et l'usage auquel le véhicule est destiné, il n'y a guère de marge de manœuvre [29].

▪ La traînée

La traînée est donc le seul paramètre sur lequel les constructeurs s'activent car, à surface frontale égale, il conditionne la résistance de l'air et, par suite, la vitesse ou la consommation de carburant. Concrètement, la traînée globale générée par le déplacement d'un véhicule terrestre dépend de quatre phénomènes distincts :

- l'air exerce une pression directe sur l'avant de la carrosserie et le pare-brise, c'est la traînée de forme.
- l'air glisse à la surface de la carrosserie, c'est la traînée de frottement.
- l'air entre en turbulence au contact de divers obstacles, saillies ou protubérances (encadrements de vitres, rétroviseurs, passages de roues, etc.), c'est la traînée de turbulence.
- l'air doit pénétrer à l'intérieur de la carrosserie, non seulement pour alimenter le moteur en oxygène (pour délivrer une puissance de 100 ch, un moteur doit absorber environ 60 litres d'air par seconde), mais aussi pour refroidir le radiateur et ventiler l'habitacle, c'est la traînée interne.

La traînée globale dépend donc de la forme et de l'état de surface de l'ensemble des éléments qui composent la carrosserie : l'avant du véhicule, la partie supérieure (toit), inférieure (prises d'air, carénage sous le moteur, plancher, etc.), les passages de roues, les flancs et l'arrière (poupe). En effet, tous ces éléments sont complémentaires, chacun d'eux devant être conçu pour faciliter l'écoulement global de l'air autour de la voiture [29].

▪ Le coefficient de traînée (C_x)

Le coefficient de traînée (C_x) se définit comme un nombre sans dimension qui renseigne sur la traînée globale d'un objet quelconque, autrement dit sa capacité à générer le moins de résistance possible lors de son déplacement dans l'air. Ce nombre est toujours compris entre 0,07 et 1,4. En effet, le C_x le plus favorable est celui d'un objet de forme ovoïde (0,07), le plus défavorable étant

celui d'une demi-sphère creuse qui se déplace face au vent (1,4). Du point de vue de la physique, le C_x est un coefficient qui se rapporte à la surface frontale de l'objet en question. Ainsi, par convention, une surface plane qui se déplace face au vent présente un C_x égal à 1 [29].

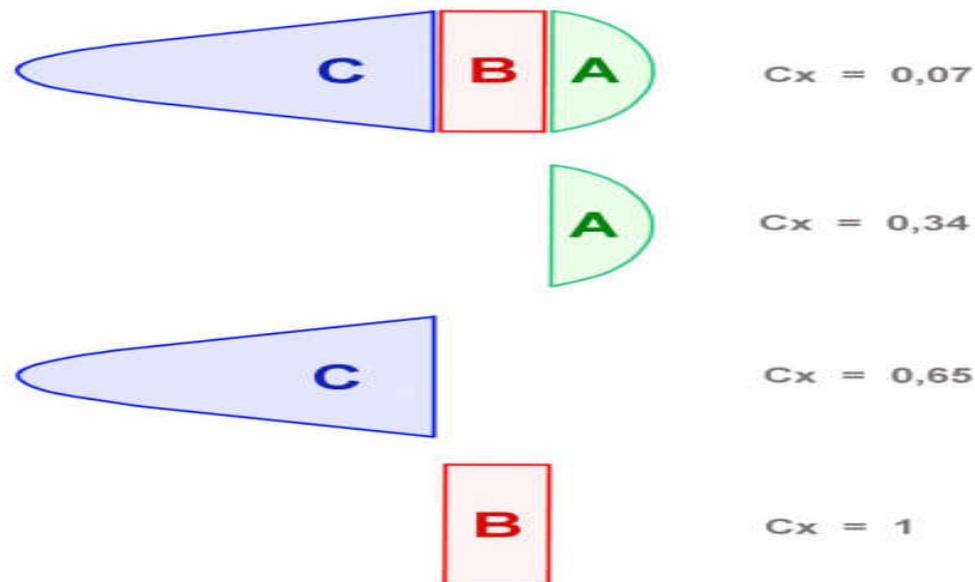


Fig.11 - Relation entre forme et C_x (objet se déplaçant de la gauche vers la droite) [29].

Grâce à des méthodes empiriques, le C_x moyen des voitures de tourisme n'a cessé de progresser. Voisin de 0,45 dans les années soixante, il est aujourd'hui inférieur à 0,30. De même, le C_x moyen des camions, qui était de 1,1 au début des années soixante-dix, est aujourd'hui inférieur à 0,9. Cette dernière valeur pourrait être encore améliorée si ce n'était une réglementation qui s'obstine à limiter la longueur hors-tout plutôt que celle du chargement : un constructeur propose d'ores et déjà un véhicule articulé dont le C_x est inférieur à 0,6... Pour obtenir un tel résultat, la recette a consisté à réduire ou supprimer toutes les sources de turbulences : le tracteur ressemble à une motrice de TGV, l'espace entre le tracteur et la semi-remorque est protégé par un déflecteur, la semi-remorque étant pourvue de jupes latérales parfaitement lisses recouvrant l'intégralité des flancs, roues comprises, du toit jusqu'au ras du sol. Ainsi profilé, la puissance nécessaire pour maintenir ce camion à vitesse stabilisée sur route horizontale a été réduite de 30 % [29].

▪ Le vent latéral

L'aérodynamique s'intéresse aussi aux effets des vents latéraux. La sensibilité au vent latéral dépend de la forme et de la surface latérale de prise au vent, mais surtout, de la masse du véhicule. Ainsi un camion de 40 tonnes avec une surface latérale de 60 m² se révélera quatre fois moins sensible au vent latéral qu'une camionnette de 1 800 kilogrammes avec une surface latérale de 12 m². Mais attention : si le camion est vide, ce rapport n'est plus le même [29].

▪ La déportance

La plupart des voitures de tourisme sont affectées d'une légère portance, elle aussi proportionnelle au carré de la vitesse. Ce phénomène est dû à la pression de l'air qui s'engouffre sous la voiture et tend à la soulever, réduisant ainsi l'adhérence des pneumatiques à haute vitesse. Pour éviter cet inconvénient, les carrosseries des voitures de sport sont conçues de manière à générer de la déportance, également appelée charge aérodynamique : au lieu d'être soulevée, la voiture est plaquée au sol à haute vitesse. La charge aérodynamique s'ajoute au poids de la voiture sans pénaliser la masse surfacique. Les performances d'indentation et d'adhésion des pneumatiques sont alors améliorées. La charge aérodynamique se mesure dans une soufflerie équipée d'une balance et s'exprime grâce à un coefficient appelé C_z [29].

CHAPITRE II :

Rappel théorique sur
l'aérodynamique des
voitures.

2.1 Introduction

L'air provenant du système de ventilation ou l'effet d'une rafale de vent sont généralement les seules manifestations de la mécanique des fluides perceptibles par le conducteur et les passagers sur le fonctionnement de leur véhicule. La réalité est tout autre et les thèmes impactés par l'aérodynamique sont nombreux et de première importance. On citera :

- **Le coût d'usage**

La consommation est directement liée au coefficient de traînée qui peut être responsable d'une différence de consommation importante. De même, la durée de vie de certains organes, comme les freins ou le moteur, est dépendante de l'efficacité de leur refroidissement.

- **La sécurité et le comportement routier**

La sensibilité au vent latéral et la tenue de route sont des éléments importants de sécurité qui sont conditionnés par l'écoulement autour du véhicule comme le sont aussi l'efficacité des freins, l'encrassement des vitres et des feux et le désembuage des vitres.

- **L'agrément de conduite**

La vitesse maximale d'un véhicule et dans une moindre mesure son accélération sont fonction de la traînée aérodynamique .

- **Le confort**

Le client est sensible aux bruits d'origine aérodynamique qu'ils soient externes ou liés au système de ventilation ainsi qu'aux odeurs diffusées et aux conditions aérothermiques de l'habitacle.

- **L'image**

Les interactions entre style et aérodynamique auront évidemment un impact sur l'image que le client percevra du véhicule.

2.2 Quelques rappels des définitions

Les efforts aérodynamiques qui s'exercent sur un objet naissent de la mise en mouvement de cet objet dans le fluide qui l'entoure. La résultante des efforts aérodynamiques \vec{F}_a est une force de surface qui se décompose comme la somme d'une force \vec{F}_f d'origine visqueuse et turbulente liée au frottement de l'air sur les parois de l'objet et d'une force \vec{F}_p associée à la répartition de pression statique à la surface σ_c de l'objet (Figure 12)[30].

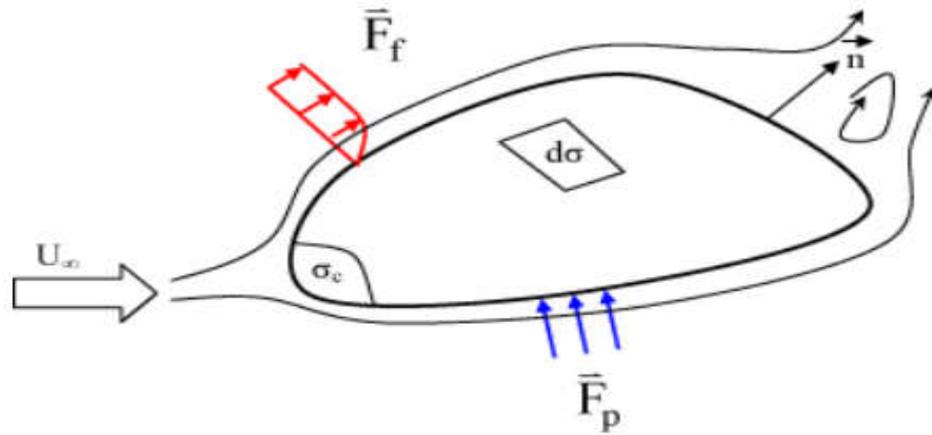


Fig. 12 - Représentation schématique simplifiée des efforts aérodynamiques autour d'un objet en mouvement [30].

La résultante des efforts aérodynamiques exercés par le fluide sur le véhicule s'exprime alors comme:
$$\vec{F}_a = \vec{F}_f + \vec{F}_p = \int_{\sigma_c} (\bar{\tau}_\mu + \bar{\tau}_t) \vec{n} \, d\sigma - \int_{\sigma_c} (P - P_0) \vec{n} \, d\sigma \quad (1)$$

Où $\bar{\tau}_\mu$ et $\bar{\tau}_t$ représentent respectivement les tenseurs des contraintes visqueuses et turbulentes appliquées sur la surface σ_c de l'objet, P désigne la pression statique, P_0 la pression statique de l'écoulement au repos et \vec{n} la normale locale entrante dans le fluide [30].

La contribution de chacune des origines \vec{F}_f et \vec{F}_p à l'effort aérodynamique global \vec{F}_a dépend essentiellement de la forme de l'objet en mouvement.

Si l'objet est un profil d'aile, les rayons de courbure sont importants et, en régime de croisière, l'écoulement reste attaché sur la majeure partie de la surface. Les contributions sont alors équivalentes.

Pour un véhicule automobile, la complexité de la forme du véhicule, l'envergure limitée et les petits rayons de courbure favorisent le décollement, l'enroulement de l'écoulement à proximité de la surface et la formation de structures tourbillonnaires. La formation de ces structures tourbillonnaires correspond pour le fluide à une perte d'énergie volumique et à une diminution de la pression statique. Les efforts de pression représentent alors près de 90% des efforts aérodynamiques globaux, contre 10% pour les effets visqueux et turbulents. Les recherches menées dans le milieu automobile se concentrent donc principalement sur l'étude de la dynamique des décollements et l'optimisation de la répartition des pressions statiques autour du véhicule. Les efforts visqueux et turbulents \vec{F}_f sont donc négligés et l'équation (1) s'écrit alors :

$$\vec{F}_a = \vec{F}_p = \int_{\sigma_c} (P - P_0) \vec{n} \, d\sigma \quad (2)$$

La surface d'intégration σ_c est composée de la carrosserie externe et de tous les circuits dans lesquels l'écoulement d'air prend place (carrosserie, compartiment moteur, climatisation,...) [30].

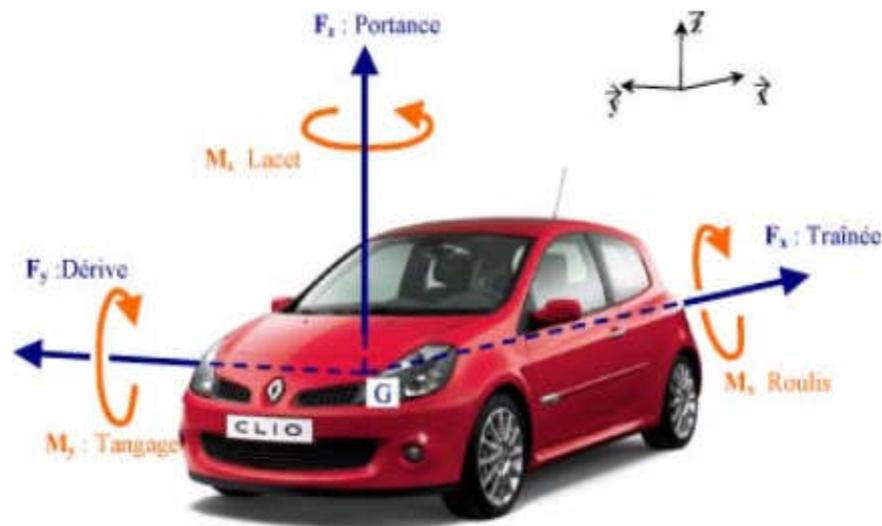


Fig.13 - Définition des efforts et moments aérodynamiques dans le repère lié au véhicule [30].

La résultante des efforts aérodynamiques se décompose usuellement dans le repère mobile lié au véhicule $(G, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$, où G est le centre de gravité du véhicule, comme (Figure 13) :

$$\vec{F}_a = F_x \vec{i} + F_y \vec{j} + F_z \vec{k} \quad (3)$$

Où F_x est la traînée, F_y la dérive et F_z la portance.

Et les moments aérodynamiques \vec{M}_a sont définis au centre de gravité par :

$$\vec{M}_a(G) = \vec{GA} \wedge \vec{F}_a = M_x \vec{i} + M_y \vec{j} + M_z \vec{k} \quad (4)$$

Où A est le point d'application de la résultante des efforts aérodynamiques, M_x est le roulis, M_y le tangage et M_z le lacet.

Pour s'affranchir des dimensions du véhicule et des conditions de roulage du véhicule, les efforts aérodynamiques sont exprimés sous forme de coefficients aérodynamiques par :

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 S_\infty}, \quad C_y = \frac{F_y}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 S_\infty}, \quad C_z = \frac{F_z}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 S_\infty},$$

$$C_l = \frac{M_x}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 L S_\infty}, \quad C_m = \frac{M_y}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 L S_\infty}, \quad C_n = \frac{M_z}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 L S_\infty},$$

Où ρ est la masse volumique de l'air, U_∞ la vitesse de déplacement du véhicule, S_∞ le maître couple et L la longueur du véhicule. Ces coefficients permettent de disposer d'éléments de comparaison adimensionnels entre les différents modèles. Le maître couple S_∞ varie entre 1.5 m² pour les petits véhicules particuliers (VP) du segment A (Twingo par exemple) à 2.5 m² pour les

grands VP (de type Espace). A coefficient aérodynamique constant, la tendance actuelle qui consiste à proposer des véhicules de plus en plus grands, se traduit alors par une augmentation des efforts aérodynamiques pour le véhicule [30].

Les efforts aérodynamiques ont un impact significatif sur la dynamique du véhicule pour des vitesses de déplacement du véhicule supérieures à 90 km/h et sur un grand nombre de prestations automobiles, comme par exemple :

- la qualité (salissures).
- le confort (bruits aérodynamiques, ventilation/climatisation, toit ouvrant).
- la sécurité (sensibilité au vent latéral, adhérence au sol, désembuage des vitres).
- les performances (consommation, vitesse de pointe, refroidissement moteur).

Les efforts transversaux ($\vec{F}_y, \vec{M}_x, \vec{M}_z$) ont essentiellement trait au comportement transitoire du véhicule au cours des phases transitoires de dépassement, croisement ou autre coup de vent latéral en sortie de tunnel. Le ressenti de ces efforts par les occupants du véhicule se traduit principalement par une sensation d'inconfort et d'insécurité. Les travaux de recherche menés sur ce thème sont encore peu nombreux et reposent essentiellement sur la caractérisation des phénomènes transitoires [31]. L'une des perspectives du développement d'actionneurs est de contrôler les écoulements aérodynamiques et d'utiliser ces actionneurs pour optimiser les efforts aérodynamiques au cours des phases transitoires et améliorer le confort [32].

Parmi les efforts longitudinaux ($\vec{F}_x, \vec{F}_z, \vec{M}_y$), la portance et le tangage impactent principalement l'adhérence longitudinale et latérale du véhicule au cours du freinage, de l'accélération ou en virage. L'effort de traînée nous intéresse particulièrement dans ce travail parce qu'il représente une force qui s'oppose à l'avancement du véhicule et influence significativement sa consommation. La section suivante est dédiée à l'identification des sources de traînée aérodynamique automobile.

2.2.1 Les origines de la traînée aérodynamique

Autour d'un véhicule automobile, les zones de décollement d'air sont nombreuses (Figure 14.a). Les ruptures de pentes au niveau de la calandre (zone 1), sur le bas et les montants latéraux du pare-brise (zone 2 et 3), dans le soubassement (zone 4), au niveau des roues (zone 5) ou des parois latérales (zone 6) provoquent l'apparition de structures tourbillonnaires qui viennent alimenter le sillage du véhicule. Des écoulements secondaires internes au niveau du compartiment moteur et du soubassement (zone 1 et 4) participent également à l'expression de la traînée. L'écoulement qui se développe en aval du culot est directement responsable du sillage et participe très largement à la traînée de la voiture [33].

Enfin, la rotation des roues provoque l'apparition de vortex latéraux qui interagissent aussi avec l'écoulement de culot. La quantification de l'influence de chacune de ces sources de traînée (Figure 14.b) montre que les pressions statiques sur l'arrière du véhicule contribuent majoritairement, à hauteur de 30%, à la traînée totale du véhicule, à égalité avec la contribution de l'écoulement de sous plancher. La contribution des roues est aussi significative, de l'ordre de 15%.

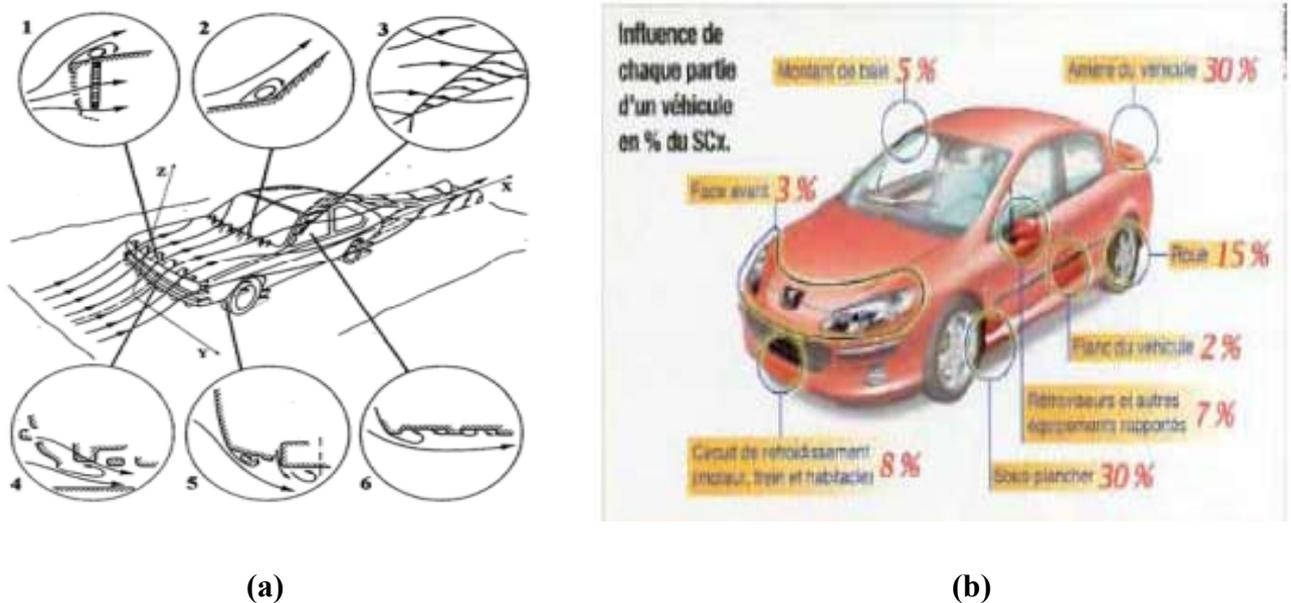


Fig.14 - Ecoulement autour de l'automobile : (a) Identification des sources de traînée aérodynamique [34] et (b) Evaluation de leur contribution [35].

Une formulation analytique de l'effort de traînée aérodynamique \vec{F}_x est proposée par Onorato *et al.* [33]. L'expression de la traînée est obtenue à partir d'un bilan intégral de quantité de mouvement dans un tube de courant contenant le véhicule (Figure 15). En négligeant les effets visqueux, turbulents et de pesanteur, devant les effets de pression, la traînée s'exprime par :

$$F_x = - \int_{S_\infty} (P_{i0} - P_i) d\sigma + \frac{\rho U_\infty^2}{2} \int_{S_\infty} \left(\frac{U_y^2}{U_\infty^2} + \frac{U_x^2}{U_\infty^2} \right) d\sigma + \frac{\rho U_\infty^2}{2} \int_{S_\infty} \left(1 - \frac{U_x^2}{U_\infty^2} \right) d\sigma, \quad (5)$$

(a)

(b)

(c)

Où P_{i0} est la pression totale de l'écoulement amont, (U_x, U_y, U_z) les composantes de la vitesse \vec{U} d'une particule fluide, S_w la section transversale du sillage relevée une hauteur de véhicule en aval et P_i la pression totale en ce point.

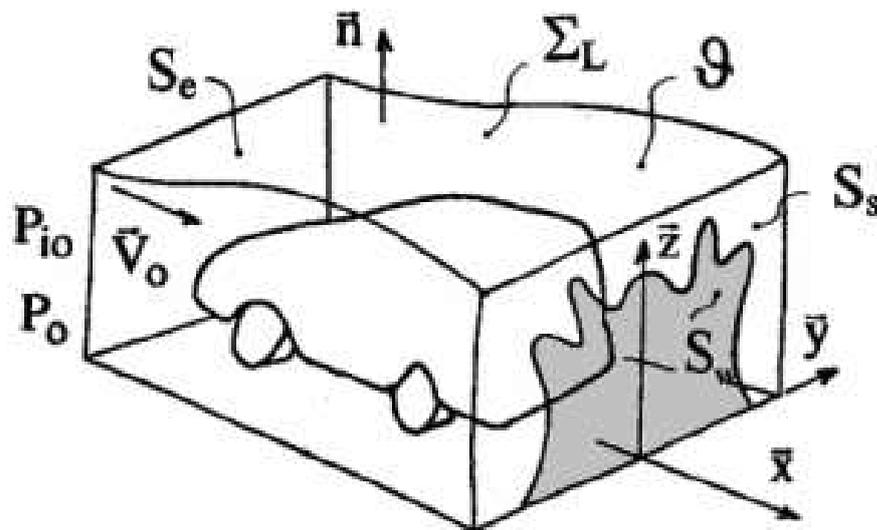


Fig.15 - Bilan intégral de quantité de mouvement d'après Gilliéron [36]

Le terme (a) traduit la traînée induite par les pertes de pression totale issues de la formation de structures tourbillonnaires dans le sillage. Le terme (b) représente l'énergie cinétique du mouvement de rotation du fluide dans le plan transversal au sillage. La rotation des structures tourbillonnaires longitudinale de part et d'autre de la lunette arrière est la principale cause de pertes énergétiques sous cette forme. Le terme (c) représente quant à lui la traînée associée à la perte de vitesse longitudinale dans le sillage proche. Ce terme tend rapidement vers 0 en aval de la géométrie. Pour un véhicule automobile, la longueur du sillage est de l'ordre de 1.5 fois sa hauteur.

Cette relation permet d'identifier les trois paramètres principaux qui contribuent à la traînée aérodynamique d'un véhicule automobile : le développement transversal de la section de sillage, l'intensité tourbillonnaire (rotation de l'écoulement) et les pertes de pression d'arrêt. Dans l'optique de réduire la traînée aérodynamique d'un véhicule, il est nécessaire de développer des solutions de contrôle capables de réduire la section transversale S_w de développement du sillage et/ou de diminuer la rotation des structures tourbillonnaires longitudinales et/ou encore de diminuer les pertes de pression totale dans le sillage [30].

L'écoulement de sillage est donc la principale source de traînée aérodynamique. Dans ce sens, les ingénieurs de recherche Renault ont pris l'habitude de travailler sur une géométrie simplifiée reproduisant les structures tourbillonnaires caractéristiques qui composent le sillage d'un bicorps automobile [30].

2.2.2 Le corps d'Ahmed : Un bicorps automobile simplifié

La géométrie utilisée pour cette étude est issue de travaux d'Ahmed et al. [37]. Elle représente une géométrie simplifiée de véhicule automobile 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 (Figure16). L'avant de la géométrie est arrondi pour s'affranchir des structures tourbillonnaires longitudinales qui se développent en réalité sur les arêtes latérales du pare-brise. La partie arrière est constituée d'une lunette arrière de biais et d'un culot droit. La longueur de la lunette l_2 est constante, $l_2=0.222$ m, et son inclinaison α variable permet de reproduire différentes topologies d'écoulement de sillage. La géométrie repose sur quatre pieds qui définissent la garde au sol et le soubassement est plan et lisse.

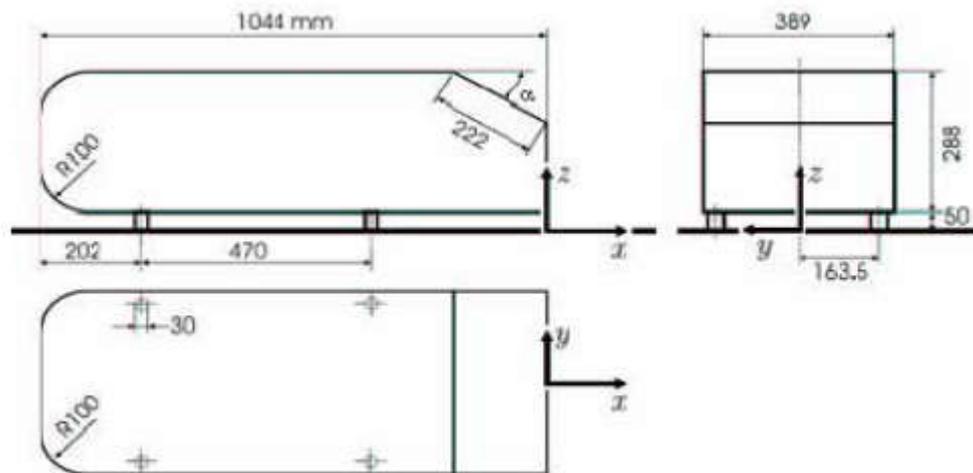


Fig.16 - Géométrie simplifiée du corps d'Ahmed [38].

2.2.3 Description de l'écoulement

La Figure 17 expose les différents types de topologies rencontrées à l'arrière du corps de Ahmed selon la plage de valeur de l'angle de lunette α . Deux types de topologie, dépendant des deux angles limites $\alpha_m = 10^\circ$ et $\alpha_M = 30^\circ$, sont mis en évidence :

- Pour $\alpha < \alpha_m$ et $\alpha > \alpha_M$: l'écoulement a un comportement de type culot droit.

L'écoulement issu du pavillon décolle sur toute la périphérie du culot pour former un système tourbillonnaire en forme de tore. La traînée est principalement pilotée par le terme (b) du bilan intégral de quantité de mouvement formulé par Onorato et al. [33]. Les effets de rotation dans le plan transverse sont négligeables devant les pertes de pression générées par le décollement de culot et la traînée dépend essentiellement de la taille du sillage.

- Pour $\alpha_m < \alpha < \alpha_M$: l'écoulement est de type bicorps.

L'écoulement issu du pavillon décolle au niveau de l'arête entre le pavillon et la lunette et recolle sur la surface de la lunette (décollement D), et décolle à nouveau à la périphérie du culot. Des structures tourbillonnaires longitudinales prennent également naissance sur les arêtes latérales de la lunette arrière et forment alors une topologie fortement tridimensionnelle. L'énergie extraite à l'écoulement pour sa mise en rotation devient significative en plus des pertes de pressions générées par le décollement de culot et de lunette arrière.

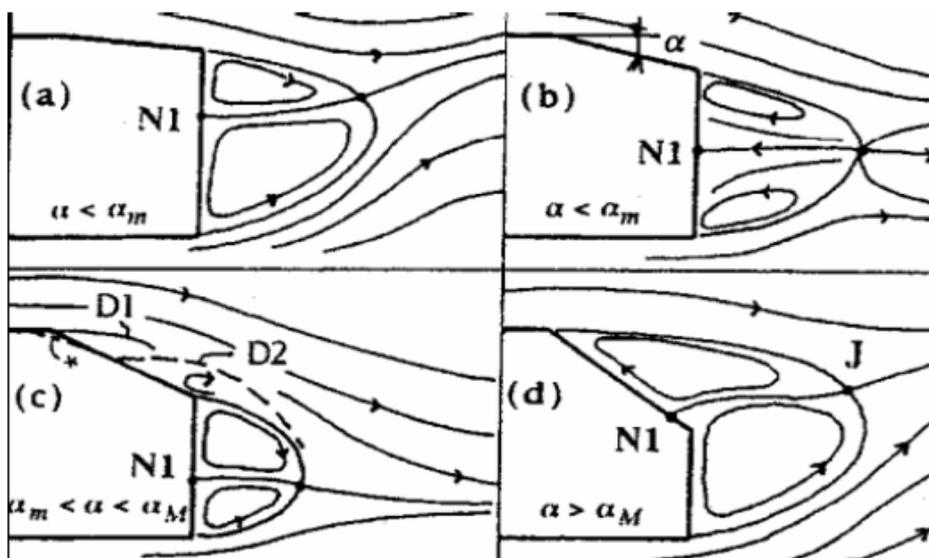


Fig.17 - Lignes de courant dans le plan longitudinal médian en aval du corps de Ahmed pour différentes inclinaisons de lunette arrière [30].

La Figure 18 illustre l'évolution du coefficient de la traînée en fonction de l'angle de la lunette, elle est extraite des travaux d'Ahmed et al. [37]. On observe dans la zone d'angle de lunette $\alpha_m < \alpha < \alpha_M$, que l'écoulement de type bicorps est accompagné d'une hausse de la traînée par rapport aux configurations de type culot droit. La traînée augmente en fonction de l'angle jusqu'à la valeur critique de $\alpha=30^\circ$ au-delà de laquelle la traînée chute brutalement vers des valeurs plus basses, la topologie de l'écoulement reprend alors un comportement de type culot droit. La figure illustre également une estimation de la répartition de la traînée en fonction de la lunette, du culot et de la calandre. Nous retiendrons que pour l'angle de 90° , le culot (droit) représente environ 70% de la traînée totale.

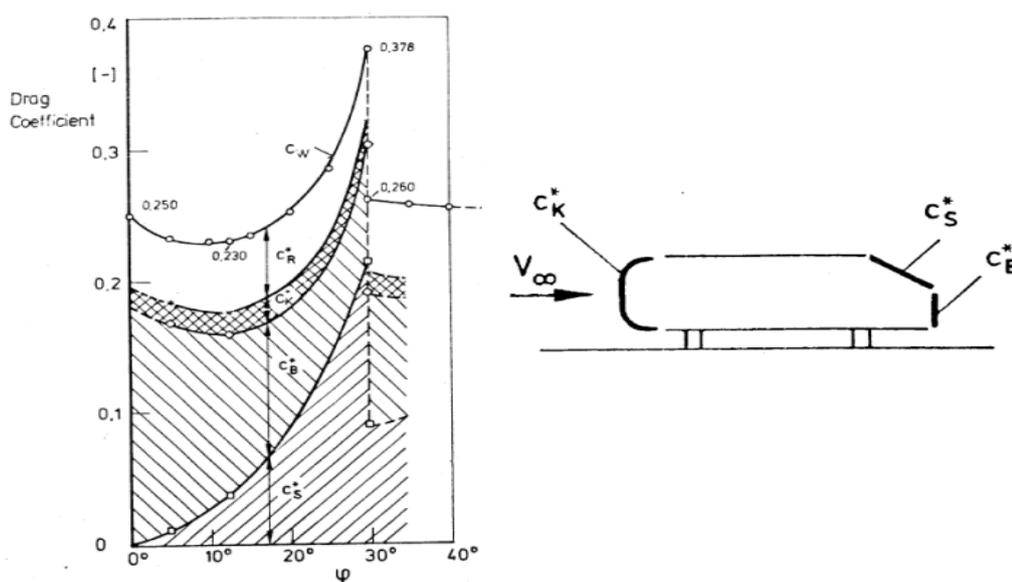


Fig.18 - Évolution et répartition du C_x en fonction de l'angle de lunette sur un corps de Ahmed [37].

2.2.4 Dynamique instationnaire de l'écoulement de sillage

La caractérisation instationnaire de l'écoulement de sillage d'un véhicule automobile est un thème encore peu abordé dans la littérature. Ceci s'explique par le fait que les techniques de mesures expérimentales actuellement développées ne sont pas encore utilisables dans le monde industriel. Cependant, les perspectives de contrôle des écoulements actuellement explorées nécessitent d'y porter attention [30].

La vitesse de l'écoulement incident U_∞ est l'un des paramètres dimensionnant de la dynamique instationnaire des structures tourbillonnaires d'un écoulement. Le nombre Reynolds Re défini par :

$$Re = \frac{U_\infty L_{ref}}{\nu}, \quad (6)$$

Où ν est la viscosité cinématique de l'air et L_{ref} une longueur de référence de l'écoulement, permet de comparer les effets inertiels aux effets visqueux. Dans notre cas, l'advection des structures tourbillonnaires émises dans le sillage représente les effets inertiels et leur enroulement les effets visqueux. Vano *et al.* étudient l'évolution du coefficient de traînée aérodynamique C_x du corps d'Ahmed en fonction du nombre de Reynolds (Figure 19). L'inclinaison α de la lunette arrière est égale à 30° et la racine carré du maître couple est utilisée comme longueur de référence, $L_{ref} = S_\infty = 0.334m$. Les résultats reportés sur la Figure 19 montrent que le C_x de la géométrie diminue avec l'augmentation du nombre de Reynolds. Cette évolution est observée de manière générale pour tous les véhicules automobiles [30].

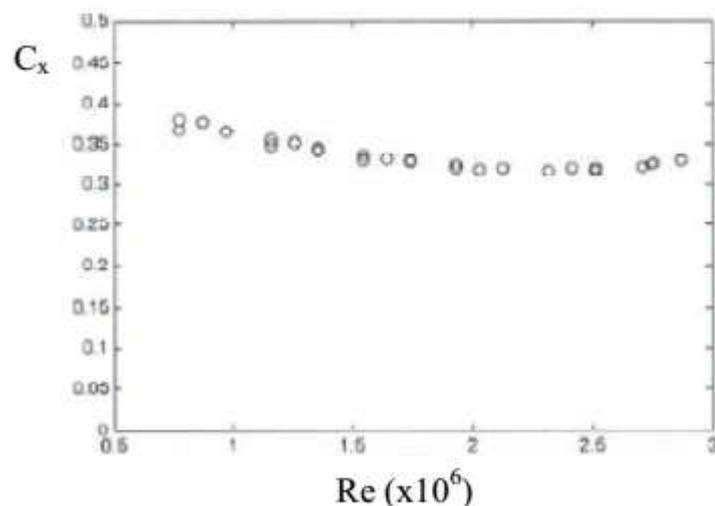


Fig.19 - Évolution de la traînée aérodynamique d'un corps d'Ahmed incliné à 30° en fonction du nombre de Reynolds [30].

L'étude fréquentielle menée par Vano *et al.* montre par ailleurs que l'écoulement est quasi-bidimensionnel au voisinage du plan longitudinal médian de la maquette. Les résultats mettent en

évidence la formation d'une instabilité de type allée de Von Karman dans le sillage proche de la géométrie. Cette instabilité est caractérisée par le lâché alternatif de structures tourbillonnaires contrarotatives provenant d'une part du décollement de l'écoulement en fin de pavillon et d'autre part du décollement de soubassement. Le nombre de Strouhal S_t sans dimensions et défini par :

$$S_t = \frac{f L_{ref}}{U_\infty}, \quad (7)$$

Permet de caractériser la fréquence f d'émission des structures tourbillonnaires [30].

2.3 Forces s'exerçant sur un véhicule

Pour un véhicule se déplaçant en ligne droite et en roue libre (sans force de traction ou de freinage) à la vitesse V , la relation fondamentale de la dynamique projetée sur un axe parallèle à la route peut s'écrire sous la forme (figure 20) [39] :

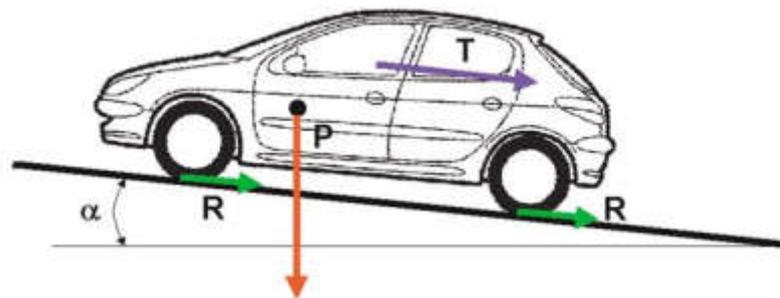


Fig.20 - Forces ayant une contribution à la dynamique longitudinale [39].

$$P + \sum R + T = M_e \frac{dV}{dt} \quad (8)$$

Où:

- M_e est la masse effective du véhicule, c'est-à-dire comprenant l'inertie des éléments en rotation :

$$M_e \approx M + 4 \frac{I_r}{r^2} \quad (9)$$

Avec M , la masse du véhicule et I_r l'inertie de la roue de rayon r . L'inertie due à la rotation des autres parties tournantes de la transmission peut généralement être négligée et $M_e = 1,03M$ constitue généralement une bonne approximation [39].

- P est le poids du véhicule, résistant ou moteur suivant l'angle que fait la route avec l'horizontale :

$$P = \pm M g \sin \alpha \quad (10)$$

- T est la traînée d'origine aérodynamique :

$$T = 1/2 \rho V^2 S C_x \quad (11)$$

- R est la résistance au roulement due au pneumatique set aux parties tournantes de la transmission :
- $$R = (mg \cos \alpha - \frac{1}{2} \rho V^2 S C_z C_R) \quad (12)$$

Le coefficient de résistance au roulement C_R est fonction du type de pneumatique, de leur état (usure, pression de gonflage), du type de route mais aussi de la vitesse du véhicule. Ce coefficient est déterminé expérimentalement soit sur banc à rouleaux soit par des mesures sur véhicules sur route inclinée [39].

A vitesse constante et sur route horizontale, la puissance utile (i.e. transmise aux roues) fournie par le moteur compense les pertes dues à la traînée aérodynamique et de roulement :

$$P_{\text{utile}} = \eta P_{\text{moteur}} = mg C_R V + \frac{1}{2} \rho V^3 S C_x \quad (13)$$

Où η représente le rendement de la boîte de vitesse et des éléments tournants.

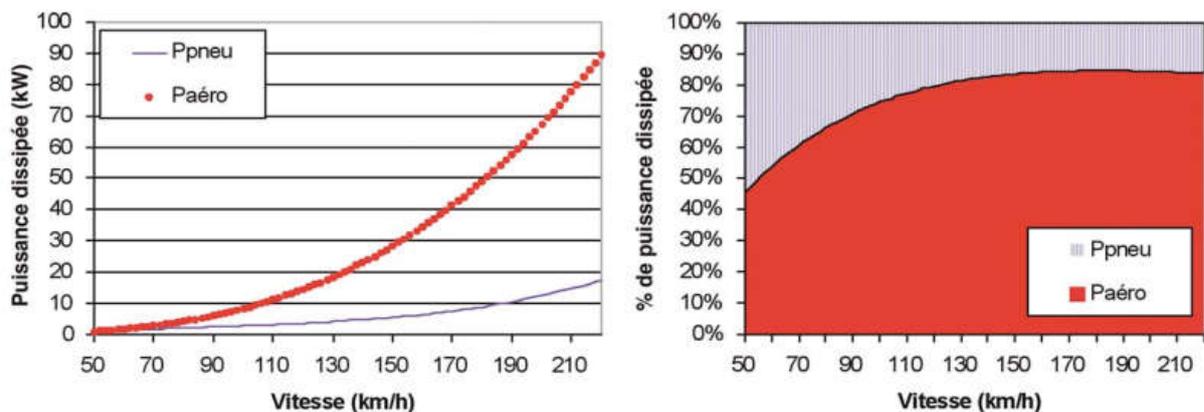


Fig.21 - Puissance dissipée en roulage [39].

La figure 21 montre l'évolution de 2 résistances en fonction de la vitesse pour un véhicule actuel. La contribution des deux résistances à la résistance totale varie de manière importante : la part de la traînée aérodynamique étant d'autant plus importante que la vitesse est élevée. Ainsi, à 50 km/h, la traînée aérodynamique représente moins de 50 % de la résistance totale, contre plus de 80 % pour une vitesse de 130 km/h. On notera aussi dans l'équation ci-dessus que plus les véhicules seront légers, et c'est bien la volonté actuelle, plus la traînée aérodynamique sera prédominante [39].

2.4 Les sources de traînées aérodynamiques et leurs impacts

Il faut préciser que les traînées qui ont le plus d'impact sur un véhicule terrestre par ordre d'importance sont celles de pression, de frottement et enfin d'interférence.

La traînée de pression est due au gradient de pression appliqué sur un objet. Ainsi, plus le gradient de pression est important, plus l'objet génère de traînée et celle-ci ne dépend que de la géométrie.

La traînée de frottement est due à la viscosité du fluide dans lequel évolue le véhicule. En effet, le véhicule a une vitesse donnée alors que le fluide qui l'entoure est initialement au repos. Il se produit donc un gradient de vitesse important entre la surface et le fluide où les phénomènes visqueux prennent de l'importance. Cette zone s'appelle la couche limite. La couche limite évolue en fonction de la viscosité du fluide, de la rugosité de la surface et de la vitesse. Le décollement de cette couche limite de la surface entraîne une augmentation brutale de la traînée suite à la création de tourbillons. La couche limite peut prendre trois états différents (Figure 22): laminaire (minimum de traînée de frottement), transitoire et turbulent (plus de traînée de frottement).

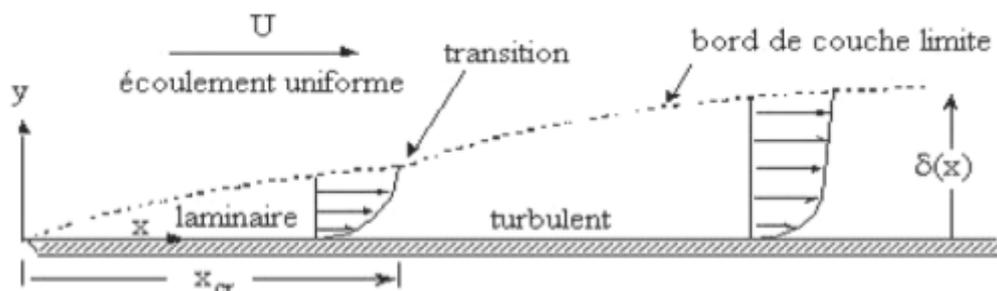


Fig.22 - Écoulement d'une couche limite sur une plaque plane.

Pour connaître l'état de la couche limite, différentes méthodes existent dont la plus connue est la méthode intégrale de Von Karman, 1881-1963. Pour estimer l'état de la couche limite le plus rapidement possible, on se base sur le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} L}{\mu} \quad (14)$$

ρ : Masse volumique du fluide (Kg/m³).

U_{∞} : Vitesse du fluide à l'infini (sans perturbations, loin de l'objet).

L : Longueur caractéristique de la zone étudiée (m).

μ : Viscosité dynamique du fluide (kg/m.s).

En fonction de l'ordre de grandeur du nombre de Reynolds, il est possible de faire une première estimation de l'état de la couche limite.

2.5 Enjeux de l'aérodynamique

2.5.1 Consommation

En utilisation routière, une grande partie de l'énergie consommée par une automobile est utilisée pour vaincre la résistance aérodynamique à l'avancement. À grande vitesse, la résistance

aérodynamique est prépondérante sur les autres résistances à l'avancement, étant donné que sa valeur évolue avec le carré de la vitesse [40].

Pour diminuer la résistance aérodynamique d'une automobile, les constructeurs peuvent agir sur deux paramètres : le C_x et le maître-couple S . L'évolution à la hausse des standards en termes de confort et d'habitabilité étant incompatibles avec une réduction du maître-couple, c'est essentiellement le C_x qui peut évoluer. En diminuant de 15 % un C_x initialement à 0,40, un véhicule roulant à 120 km/h économise un litre de carburant aux 100 km [40].

La densité de l'air est prise égale à $1,2 \text{ kg/m}^3$ à $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Considérons ci-dessous un tableau récapitulatif des frottements aérodynamiques d'un SUV d'une surface frontale de $2,70 \text{ m}^2$ en fonction de sa vitesse, pour deux C_x de 0,3 et 0,38[40] :

Tableau 2 - Frottement aérodynamique d'un SUV (en N) [40].

Surface frontale = $2,70 \text{ m}^2$	50 km/h	70 km/h	90 km/h	110 km/h	130 km/h
$C_x = 0,38$	118,8	232,8	384,8	574,8	802,8
$C_x = 0,30$	93,8	183,8	303,8	453,8	633,8

Considérons ci-dessous un tableau récapitulatif des frottements aérodynamiques d'une citadine à moteur Diesel de surface frontale de $1,74 \text{ m}^2$ en fonction de sa vitesse, pour deux C_x de 0,3 et 0,38 :

Tableau 3 - Frottement aérodynamique d'une citadine (en N) [40].

Surface frontale = $1,74 \text{ m}^2$	50 km/h	70 km/h	90 km/h	110 km/h	130 km/h
$C_x = 0,38$	76,5	150,0	248,0	370,4	517,3
$C_x = 0,30$	60,4	118,4	195,8	292,4	408,4

L'unité kWh/100 km étant l'équivalent d'une force de 36 N, les tableaux peuvent être écrits :

Tableau 4 - Perte énergétique d'origine aérodynamique d'un SUV (en kWh/100 km) [40].

Surface frontale = $2,70 \text{ m}^2$	50 km/h	70 km/h	90 km/h	110 km/h	130 km/h
$C_x = 0,38$	3,3	6,5	10,7	16,0	22,3
$C_x = 0,30$	2,6	5,1	8,4	12,6	17,6

Ainsi que :

Tableau 5 - Perte énergétique d'origine aérodynamique d'une citadine (en kWh/100 km) [40].

Surface frontale = 1,74 m ²	50 km/h	70 km/h	90 km/h	110 km/h	130 km/h
C _x = 0,38	2,1	4,2	6,9	10,3	14,4
C _x = 0,30	1,7	3,3	5,4	8,1	11,3

Un litre d'essence représentant environ 10 kWh, le tableau devient :

Tableau 6 - Perte énergétique d'origine aérodynamique d'un SUV (en l/100 km) [40].

Surface frontale = 2,70 m ²	50 km/h	70 km/h	90 km/h	110 km/h	130 km/h
C _x = 0,38	0,33	0,65	1,07	1,60	2,23
C _x = 0,30	0,26	0,51	0,84	1,26	1,76

Ainsi que :

Tableau 7 - Perte énergétique d'origine aérodynamique d'une citadine (en l/100 km) [40].

Surface frontale = 1,74 m ²	50 km/h	70 km/h	90 km/h	110 km/h	130 km/h
C _x = 0,38	0,21	0,42	0,69	1,03	1,44
C _x = 0,30	0,17	0,33	0,54	0,81	1,13

Il reste à tenir compte de l'efficacité globale du véhicule, illustrée par le schéma ci-contre. Elle vaut de 13 à 20 % pour les véhicules thermiques et autour de 50 % pour les véhicules électriques (en tenant compte du chauffage, de la climatisation et des pertes du réseau électrique [41]).

2.5.2 Vitesse maximale

Si les vitesses élevées sont fortement sanctionnées en France, la vitesse maximale d'un véhicule demeure un argument de vente dans les pays où elle n'est pas limitée sur autoroute, comme en Allemagne par exemple. De plus, les journaux automobiles l'utilisent toujours comme élément de comparaison des véhicules concurrents. Pour un moteur donné, la vitesse maximale d'un véhicule est directement fonction de son C_x [34] :

$$V_{\max} = k \sqrt[3]{\frac{P_{\text{utile}}}{SC_x}} \quad (15)$$

Le facteur k ($k \approx 38$ pour un véhicule de milieu de gamme) dépend du véhicule et prend en compte un nombre important de paramètres : le rendement de la chaîne de traction, la masse du véhicule, la traînée de roulement [34].

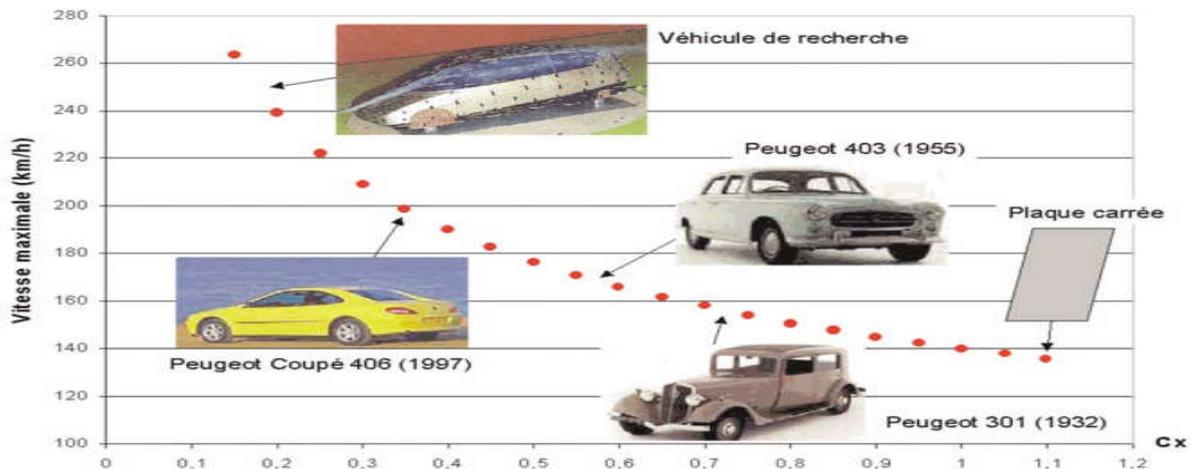


Fig.23 - Vitesse maximale en fonction du C_x [39].

On donne sur la figure 23 l'évolution de la vitesse maximale d'un véhicule en fonction de son C_x . Les valeurs ont été calculées pour un véhicule de $160C_v$ (environ 100 kW utiles) ayant un maître couple de 2 m^2 . Ce graphique permet aussi une lecture « historique » en mettant en évidence l'évolution des véhicules Peugeot depuis 70 ans. La réduction de la traînée sur cette période a été réalisée à l'aide de deux techniques très distinctes. D'une part, et c'est évidemment la plus visible des deux, par une amélioration de la forme générale du véhicule (sa macro forme) et d'autre part par une optimisation des « détails ». Cette deuxième technique, introduite par Huchot [34], est un processus itératif qui consiste à modifier localement le véhicule sans modifier son style. Il s'agit d'optimiser sur le plan aérodynamique tous les éléments de carrosserie pouvant déclencher un décollement (jonction capot/calandre, jonction calandre/coté de caisse, montant de baie. . .) et d'ajouter des artifices aérodynamiques permettant d'améliorer l'écoulement autour des parties mécaniques (roues, sous plancher. . .). Ces deux approches interviennent à des moments différents de la conception d'un nouveau véhicule et subissent des contraintes très différentes :

- La forme générale du véhicule est décidée très en amont dans un projet. Elle est évidemment très dépendante du style mais aussi de l'habitabilité et de l'espace nécessaire pour le moteur et les équipements.

- L'optimisation des détails intervient plus tard dans le projet et ses contraintes principales sont la faisabilité industrielle d'une part et le coût d'autre part (artifices supplémentaires).

Si l'optimisation des « détails » ne peut se faire qu'avec une méthode essais/erreurs en soufflerie, la simulation peut dès aujourd'hui permettre d'aider à la définition de la macro forme du véhicule [34].

2.5.3 Freinage et virage

Le potentiel de freinage d'un véhicule est directement relié à la force verticale s'appliquant sur les pneumatiques. En effet, pour éviter le dérapage, il faut respecter la relation [39] :

$$F_f \leq \mu F_z$$

Où F_f est la force de freinage et F_z la charge s'exerçant sur le véhicule. L'adhérence longitudinale μ est évidemment fonction du pneu (sculpture, dureté de la gomme, usure, pression) mais aussi de l'état de la route. Ainsi, un pneu classique sur route sèche aura un coefficient d'adhérence de l'ordre de 0,8, cette valeur chutant à 0,4 par temps de pluie [39].

Les traînées de roulement et aérodynamique étant très faibles par rapport à la force de freinage, l'équation fondamentale de la dynamique projetée sur l'axe x peut s'écrire :

$$\begin{aligned} M = \left(\frac{dV}{dt} \right)_{max} &= F_{f\ max} = \mu F_z \\ &= \mu \left(-Mg + \frac{1}{2} \rho V^2 S C_z \right) \\ \Rightarrow \frac{dV}{dt} &= -\mu \left(g - \frac{\rho V^2 S C_z}{2M} \right) \end{aligned}$$

Pour un véhicule possédant une portance nulle, la décélération maximale sera donc d'environ 0,8 fois l'accélération de la pesanteur. Cette valeur peut être modifiée de façon importante par l'adjonction d'artifices aérodynamiques (aileron, becquet). A titre d'exemple, on comparera la Peugeot 206 de série, dont le faible C_z n'entame que de quelques % son potentiel de freinage, avec sa cousine championne du monde WRC dont la portance négative permet d'augmenter de plus de 15 % ce potentiel (figure 24) [39].



Fig.24 - Peugeot 206 de série et WRC [39].

Les artifices aérodynamiques utilisés pour obtenir une portance négative détériorent généralement la traînée. Mais en rallye, un freinage retardé au maximum et une vitesse en courbe élevée sont beaucoup plus importants qu'une vitesse maximale élevée ou qu'une consommation réduite de toute manière celle-ci dépasse les 60 l/100 km. Un raisonnement similaire peut être appliqué pour les virages et dans une moindre mesure à l'accélération (Celle-ci dépendant surtout

du moteur). Ainsi, les voitures de sport prototypes peuvent avoir des accélérations latérales supérieures à 1,8 g à 200 km/h [39].

2.6 Quelques solutions pour réduire la traînée aérodynamique des véhicules

La recherche de solutions pour réduire la traînée aérodynamique du véhicule a fait l'objet de nombreuses études. Des solutions dites passives, sans apport d'énergie, ont tout d'abord été employées pour diminuer la traînée des véhicules. La première orientation du contrôle passif consiste à modifier la forme extérieure des véhicules. Ainsi, les arêtes vives, sources de décollements, sont remplacées par des formes plus arrondies, l'inclinaison du pare-brise et de la lunette arrière par rapport à l'horizontale est réduite, et la garde au sol du véhicule, distance entre son soubassement et la route, diminue. Ces techniques permettent de passer, en moyenne, d'un coefficient aérodynamique de traînée de 0,45 en 1970 à un coefficient de 0,30 en 1990. Le contrôle passif se manifeste ensuite sous la forme d'appendices ajoutés au véhicule, tels que des becquets, des ailerons ou encore des générateurs de vortex [42].

A l'heure actuelle, les choix esthétiques des constructeurs automobiles fixent la forme des véhicules, et l'impact des solutions de contrôle des écoulements doit être négligeable sur la forme extérieure des véhicules. Pour cette raison, le contrôle actif, caractérisé par un apport d'énergie, et dont les actionneurs peuvent être intégrés à l'intérieur des géométries, constitue une nouvelle voie d'investigation. Parmi les solutions de contrôle actif figurent l'aspiration ou le soufflage continu, le jet synthétique ou pulsé, ou encore le contrôle par plasma. Depuis le début des années 2000, ces solutions de contrôle ont fait l'objet de nombreuses recherches sur des géométries représentatives de véhicules. Quelques exemples sont succinctement donnés dans la suite [42].

Comme il a été indiqué précédemment, des tourbillons longitudinaux de forme conique se forment au niveau des montants de baie des véhicules. Aspirer l'air au niveau du montant de baie d'une géométrie simplifiée de type corps de Ahmed permet de traiter ces tourbillons. L'étude est réalisée sur un pare-brise incliné à 45°. L'aspiration engendre un décalage de l'axe tourbillonnaire vers le montant de baie, et le phénomène s'amplifie avec l'augmentation de la vitesse. Par simulation numérique, une vitesse d'aspiration égale au double de la vitesse infinie amont permet de supprimer complètement le tourbillon, et engendre une réduction de la traînée totale de près de 40%. L'efficacité de l'aspiration diminue cependant rapidement avec le module de la vitesse. En effet, pour une vitesse d'aspiration égale à la vitesse de l'écoulement incident, la réduction de la traînée totale s'élève à environ 5%. Les tourbillons longitudinaux qui prennent naissance sur les montants de lunette arrière peuvent également être traités par une solution de contrôle actif de type soufflage. Sans contrôle, le cœur de la structure tourbillonnaire est quasiment circulaire, et les coefficients de pressions statiques sur la lunette arrière sont faibles. L'application d'un contrôle actif par jet synthétique permet, sous certaines conditions de vitesse et de fréquence du jet, de

recoller l'écoulement sur la lunette arrière de la géométrie bidimensionnelle. La diminution des coefficients de pression statique au culot se traduit par une réduction de la traînée totale qui peut atteindre 28%. Sur une géométrie identique, des actionneurs plasma sont placés sur la partie inclinée du culot dans le but de recoller l'écoulement décollé du haut de la lunette arrière. Sous certaines conditions de tension et de puissance, l'utilisation d'un seul actionneur sur le haut de la lunette arrière permet de recoller l'écoulement. Une réduction de traînée de près de 4% est obtenue. Malgré l'important potentiel de réduction de traînée associé à ces différentes solutions de contrôle actif, celles-ci ne sont pas encore intégrées aux véhicules automobiles. D'une part parce qu'elles génèrent un coût supplémentaire pour les constructeurs, notamment un coût énergétique, et d'autre part parce qu'elles sont développées sur des géométries simplifiées et nécessitent des adaptations pour être efficaces sur les véhicules réels [42].

2.7 Conclusion

L'optimisation de l'aérodynamique des véhicules a pour résultat :

- réduction considérable de la consommation de carburant .
- amélioration des caractéristiques de confort et caractéristiques de conduite plus favorables des véhicules terrestres.

L'optimisation de la simulation numérique d'écoulement domaine est devenue de plus en plus important.

CHAPITRE III :
Simulation aérodynamique par
SolidWorks.

3.1 Introduction

Partant des fondements théoriques, abordés dans les chapitres précédents, qui consistent en la modélisation en aérodynamique avec tous ces axes d'études. Dans ce chapitre on procède à la modélisation d'une voiture à l'aide du logiciel SolidWorks en introduisant les équations de l'aérodynamique montrées dans les chapitres précédents.

3.2 Modélisation d'une voiture

La réalisation d'une simulation théorique permettant de décrire l'état et le comportement global d'une structure mécanique ou tout autre système nécessite de combiner plusieurs concepts mécanique.

L'objectif principal de la modélisation est de trouver une interprétation des résultats entre les équations données et la simulation en utilisant des modèles simple.

Vue la complexité et la non linéarité des problèmes, un modèle complet du comportement d'une voiture n'est pas réalisable. La modélisation se fait généralement sur des modèles simplifiés en introduisant les hypothèses de l'aérodynamique sui décrivent le comportement du modèle.

Dans ce chapitre un modèle simplifié de la voiture Clio Campus (Voir Figure 25) a été choisi pour le simuler par SolidWorks en introduisant les équations de l'aérodynamique.

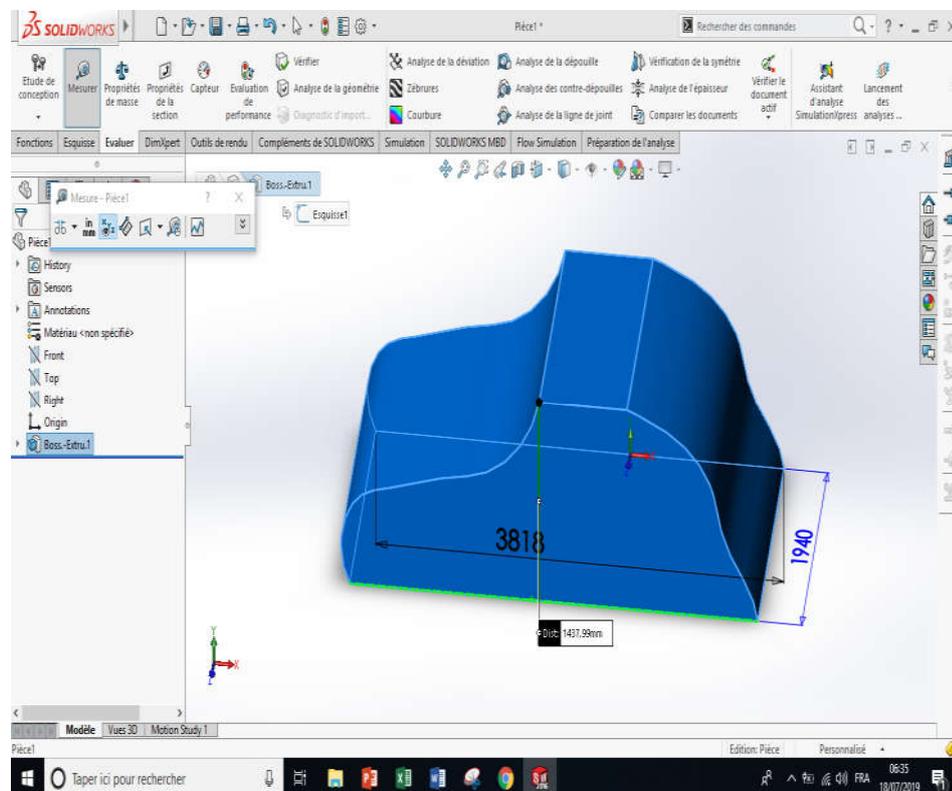


Fig.25 - Modélisation de la voiture Clio Campus par SolidWorks.

3.2 Les étapes de simulation par SW

SOLIDWORKS Flow Simulation est une solution intuitive de calcul de dynamique des fluides (CFD) par la méthode des volumes finis (MVF) intégrée au logiciel de CAO 3D SOLIDWORKS vous permettant de simuler rapidement et facilement les écoulements de liquide et de gaz à l'intérieur et autour de vos conceptions afin de calculer les performances et fonctionnalités des produits [43]. Il est nécessaire de connaître bien les étapes de simulation afin d'obtenir des bons résultats. La première des choses il faut choisir le domaine de calcul comme montre la figure ci-dessous.

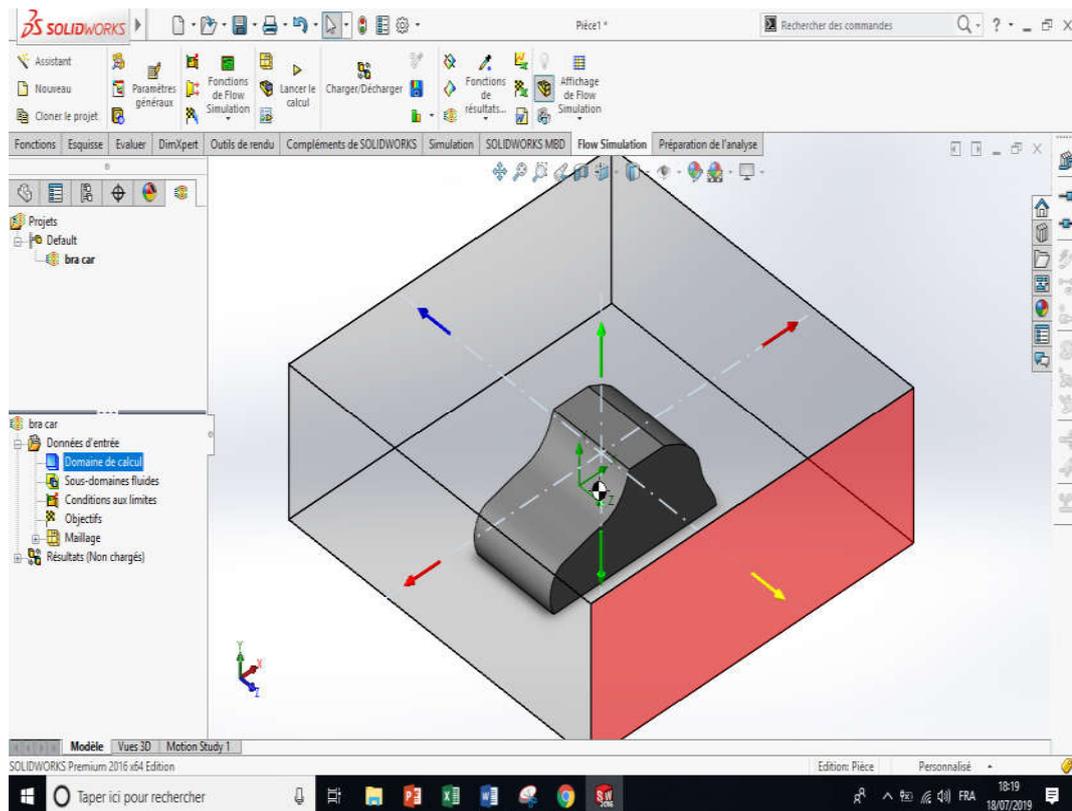


Fig.26 - le domaine de calcul.

Le domaine de calcul nous permet de définir le périmètre de la simulation et minimiser le temps de calcul.

Pour le type de maillage, on choisit un maillage plus fin pour obtenir des résultats plus précis comme montre la figure suivante.

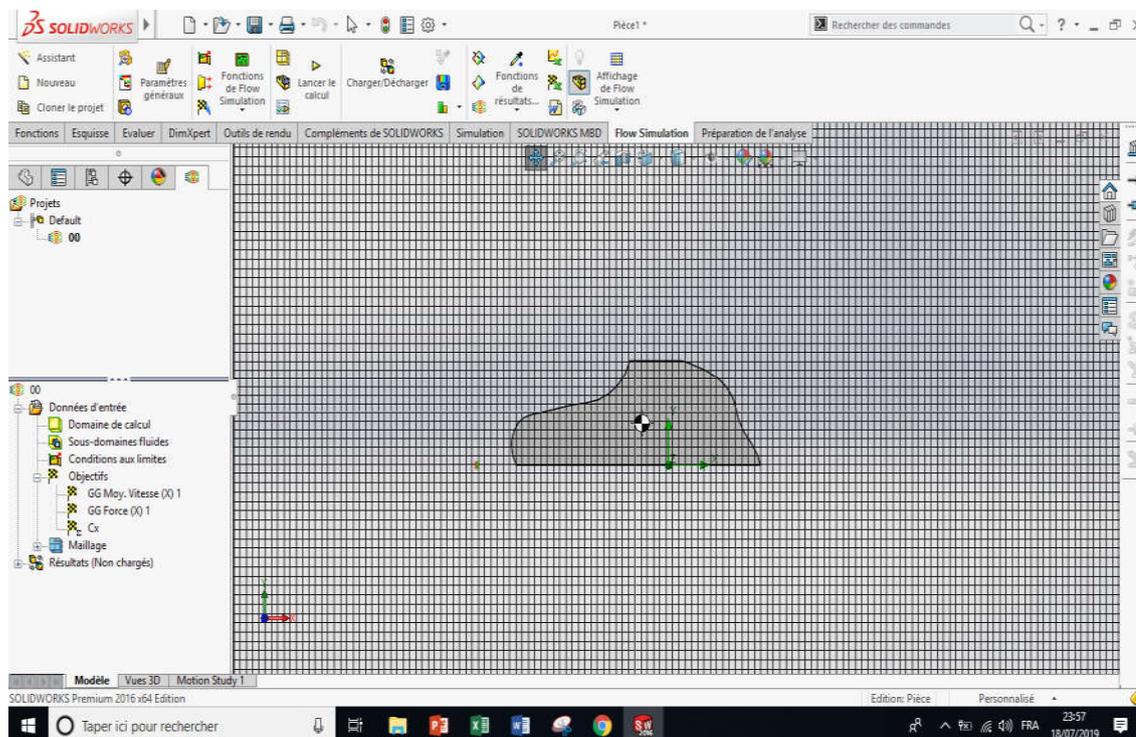


Fig.27 - Maillage plus fin utilisé pour la simulation.

Dans ce chapitre on va simuler les deux coefficients trainé et portance ; la validation de ces résultats nous permet d'extraire d'autres résultats qui nous intéressent en aérodynamique en utilisant les données de simulation suivantes :

Tableau 8 - Les paramètres de simulation [44].

Longueur	3818mm
Largeur	1940mm
Hauteur	1438mm
Poids	920Kg
Gravité	Composante X=0m/s ² Composante Y=-9.81m/s ² Composante Z=0 m/s ²
Fluide du projet	Air
Type d'écoulement	Laminaire +Turbulent
Condition thermique de paroi	Paroi adiabatique
Paramètres thermodynamique	Pression=101325 Pa Températures=293.2K
Paramètres de vitesse	Vitesse dans la direction X= 50m/s Vitesse dans la direction Y= 0m/s Vitesse dans la direction Z= 0m/s
Paramètres de turbulence	Intensité de turbulence=2% Longueur de turbulence=0.0143799439m
Energie de turbulence (k)	1J/Kg
Dissipation de turbulence (ε)	1W/Kg

La figure ci-dessous montre la surface de référence pour calculer les deux paramètres : coefficient de trainé et de portance.

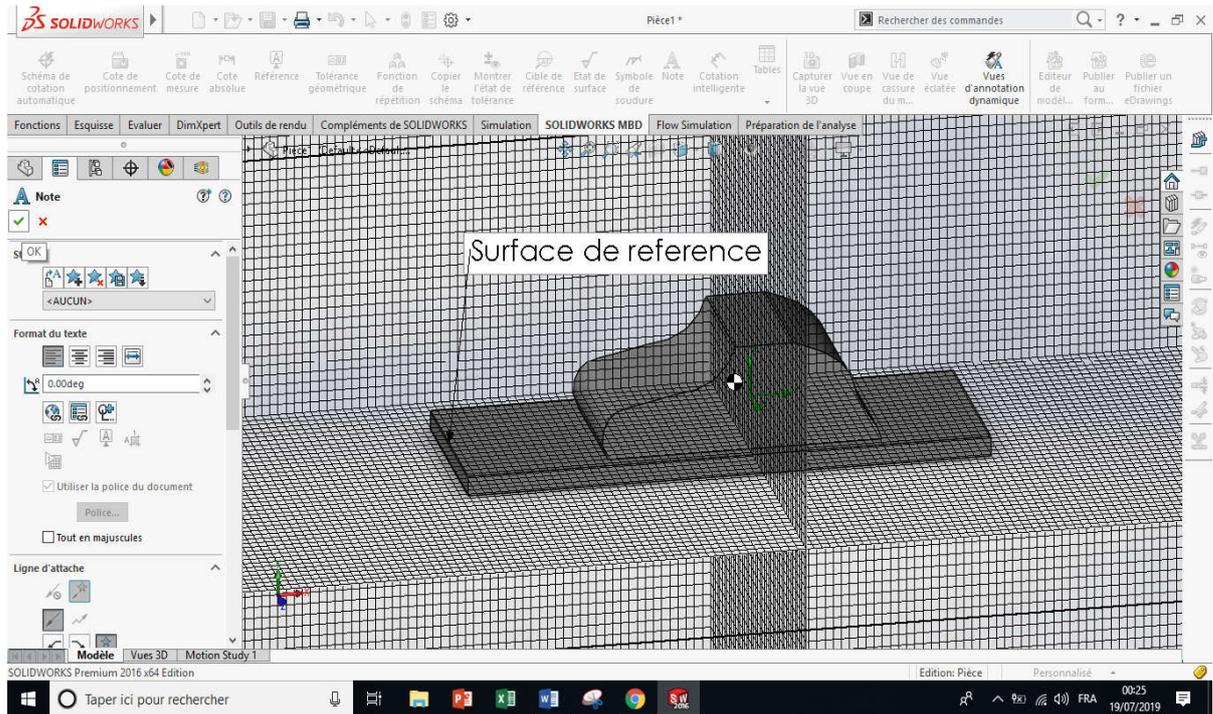


Fig.28 - surface de référence.

3.3 Les résultats de simulation

Ce graphe montre la force de trainée on fonction de nombre d'itérations :

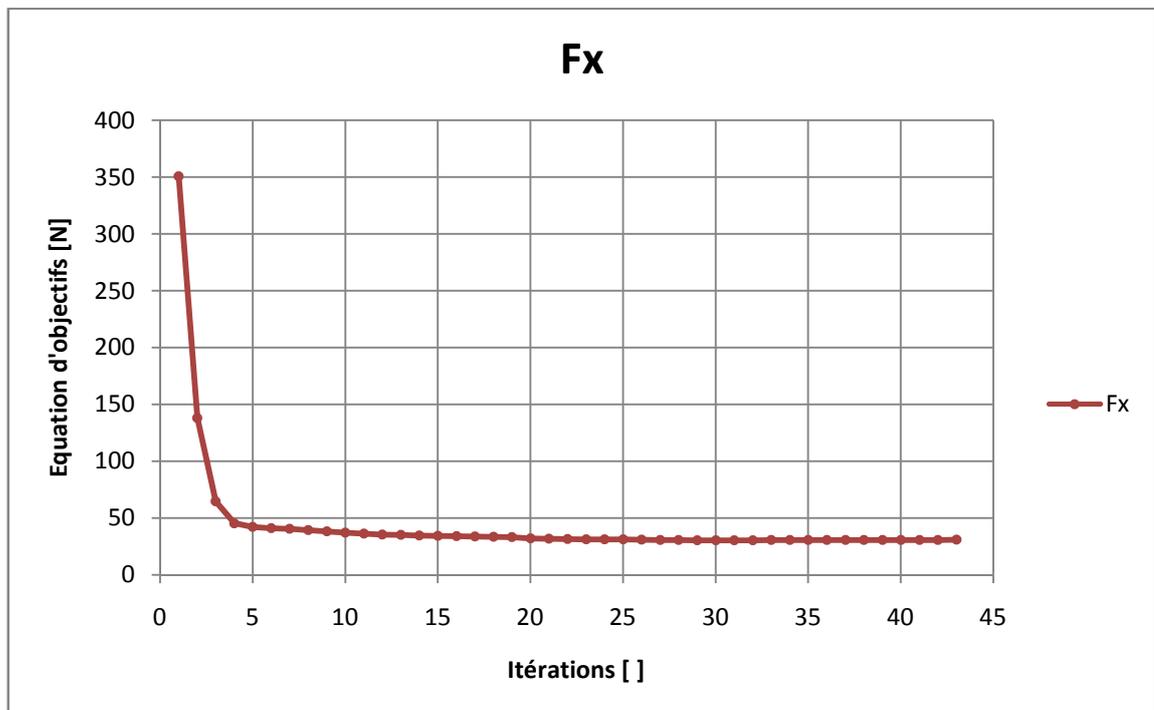


Fig.29 - La force de la trainé en fonction de nombre d'itérations.

Ce graphe montre le coefficient de trainée on fonction de nombre d'itérations :

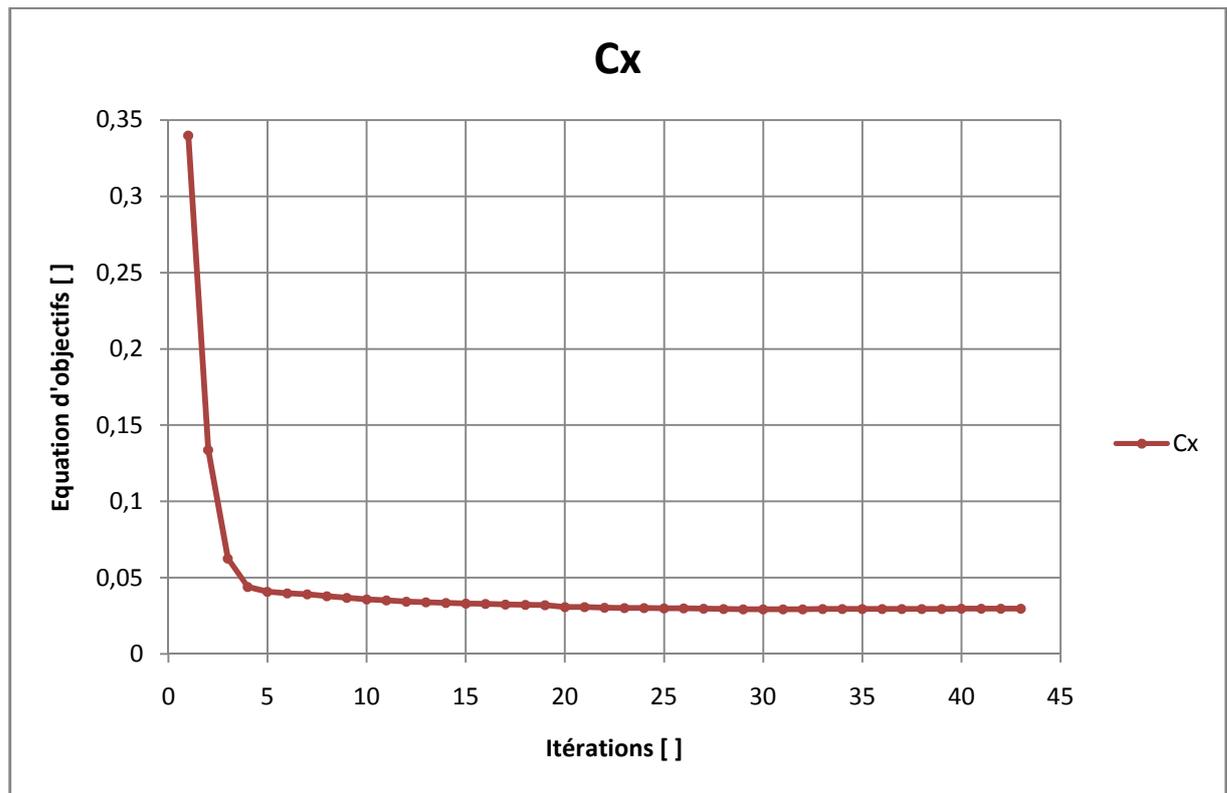


Fig.30 - Le coefficient de trainé en fonction de nombre d'itérations.

Ce graphe montre la force de portance on fonction de nombre d'itérations :

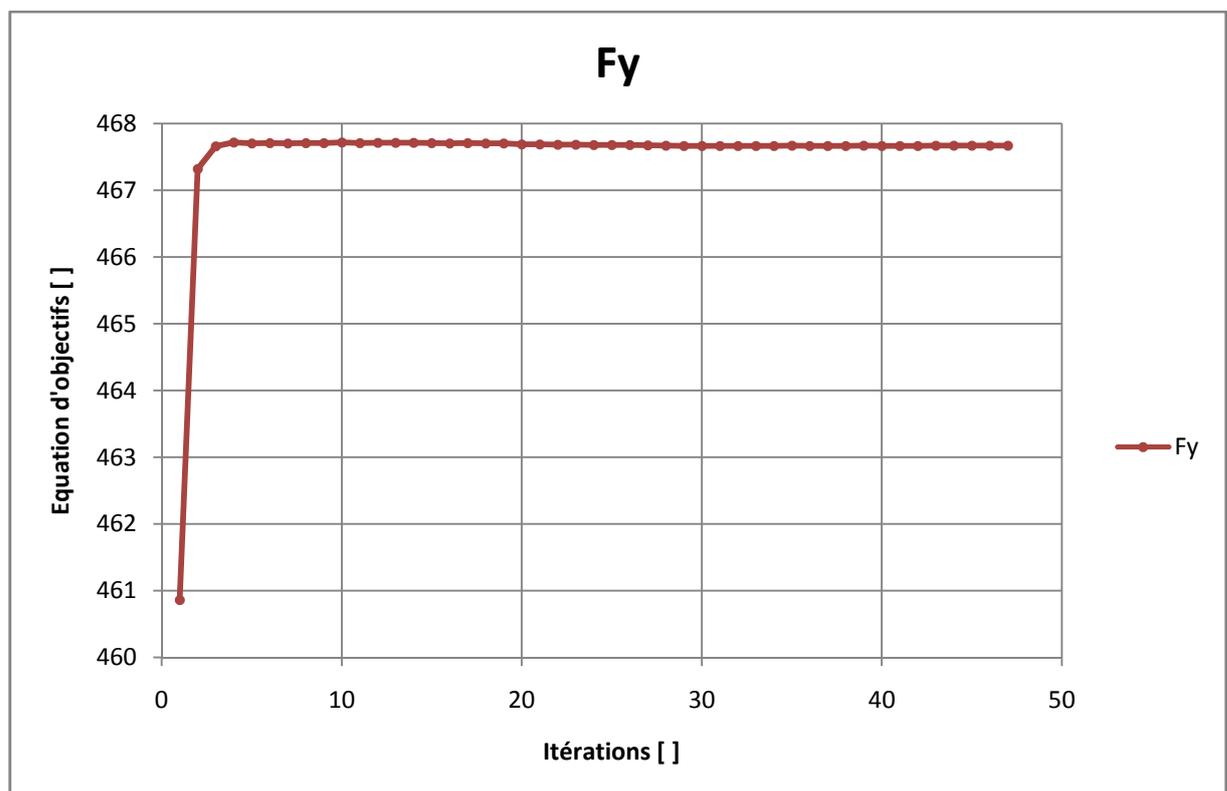


Fig.31 - La force de la portance en fonction de nombre d'itérations.

Ce graphe montre le coefficient de portance on fonction de nombre d'itérations :

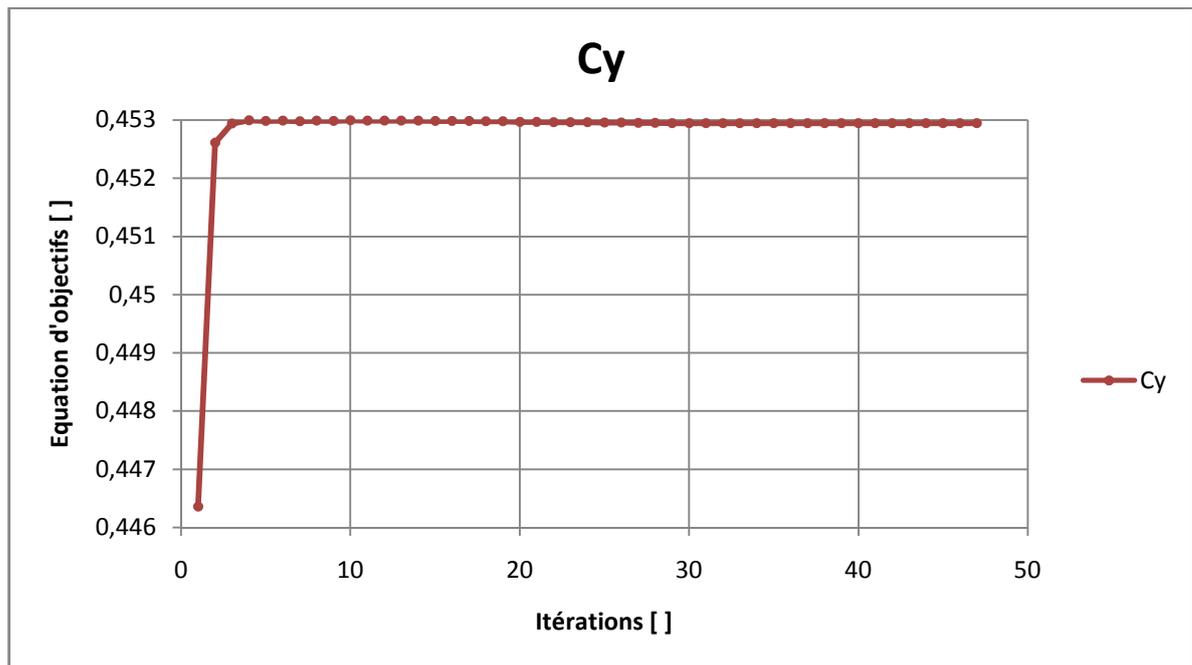


Fig.32 - Le coefficient de portance en fonction de nombre d'itérations.

Les résultats de simulation montrés dans les figures (29 ~ 32) et les résultats de simulation montré dans [45] nous permet de valoriser et mettre en relief la pertinence de nos simulation.

On remarque d'après ces figures que les deux coefficients suivent la même trajectoire de leurs forces et les deux coefficients ont une valeur inférieur à 1. On remarque aussi que la force de la portance est plus grande que la trainé c'est pour cela dans les voitures de course ils mettent des spoilers pour réduire la force de portance qui influe directement sur la stabilité de la voiture pendant la marche.

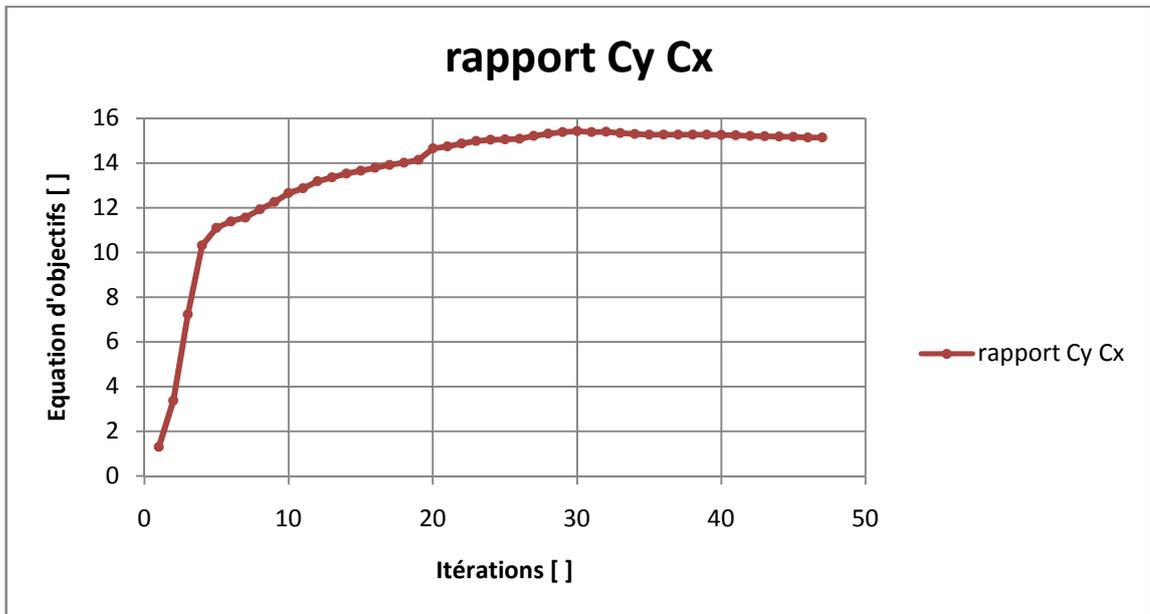


Fig.33 - Le rapport entre le coeff de portance et le coeff de trainé (La finesse).

On profite des résultats de simulation pour extraire d'autres résultats qui nous intéressent pour comprendre mieux l'aérodynamique des voitures comme montre ci-dessous :

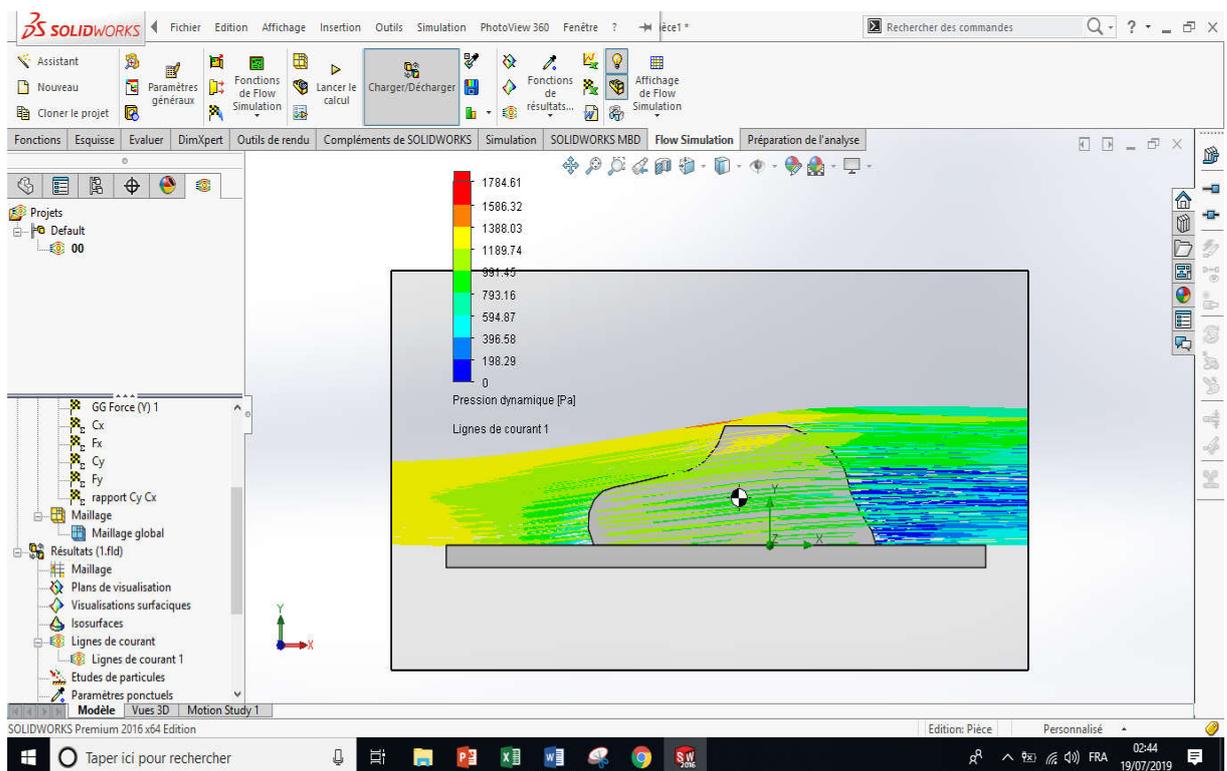


Fig.34 - La pression aérodynamique.

Cette figure montre la pression dynamique pendant la simulation. On remarque de cette figure que la pression dynamique diminue quand l'air il est en contact avec la voiture, c'est normal parce que l'équation de la pression dynamique est proportionnelle avec la vitesse au carré.

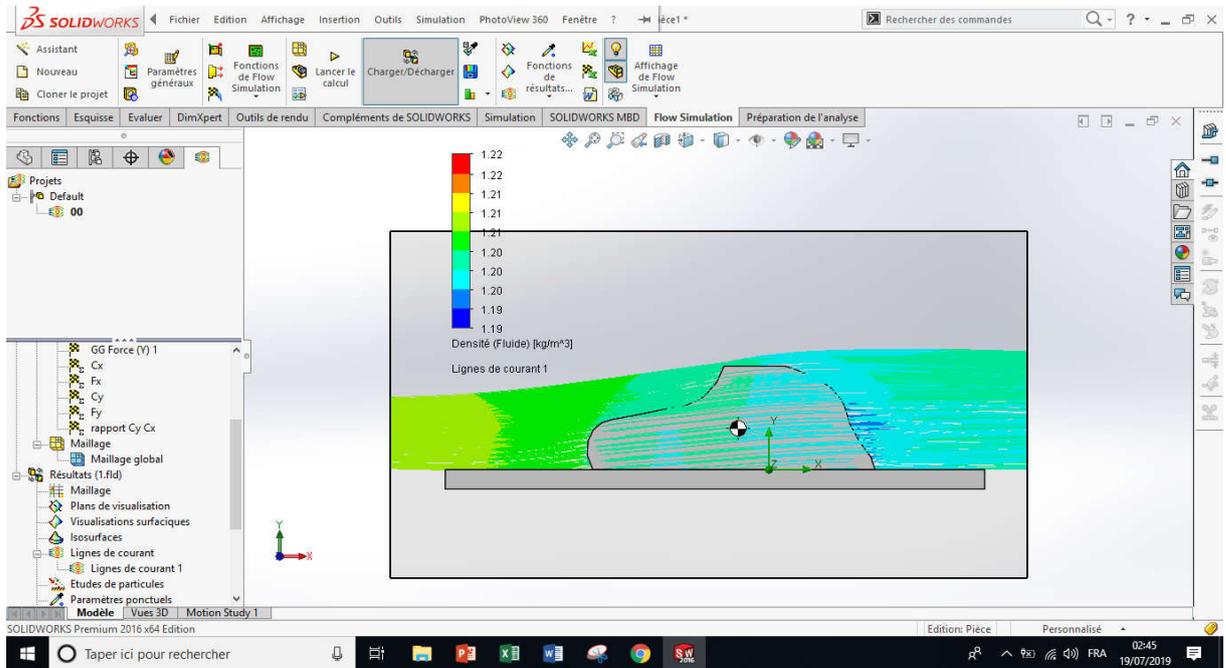


Fig.35 - La densité de fluide.

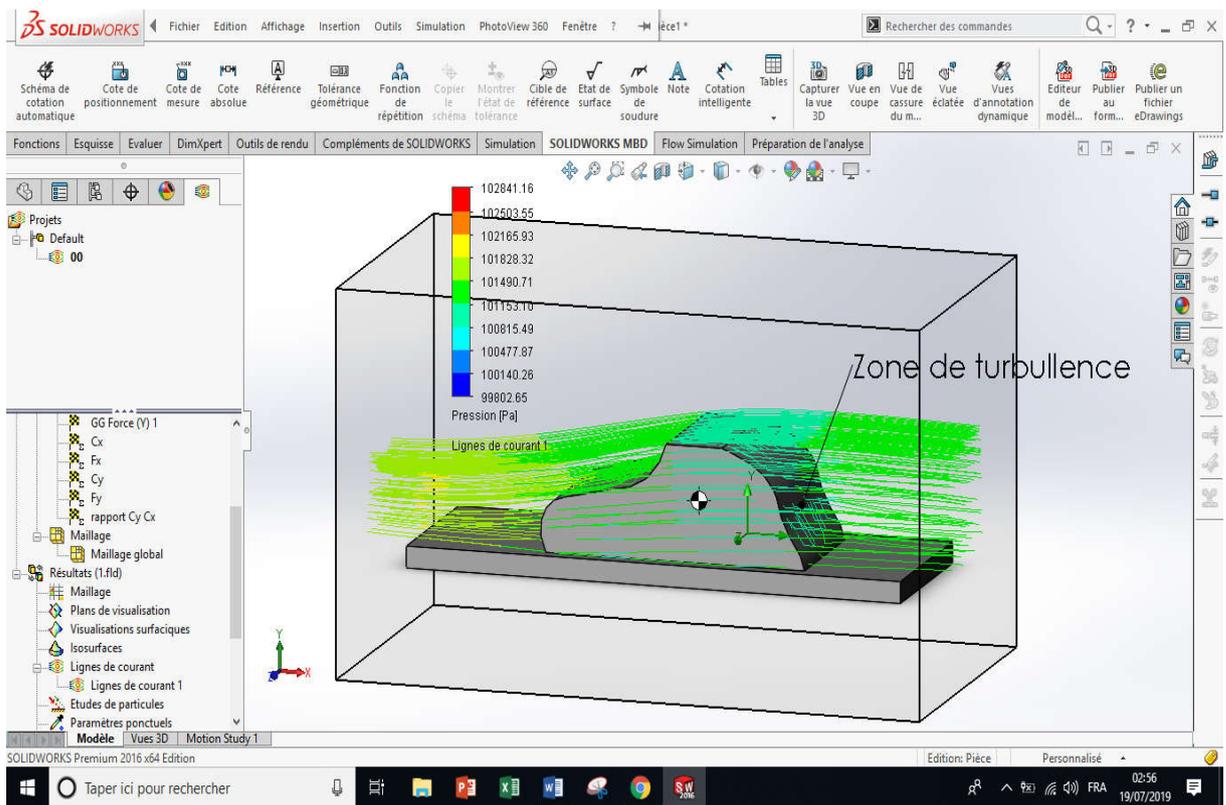


Fig.36 - la pression du fluide.

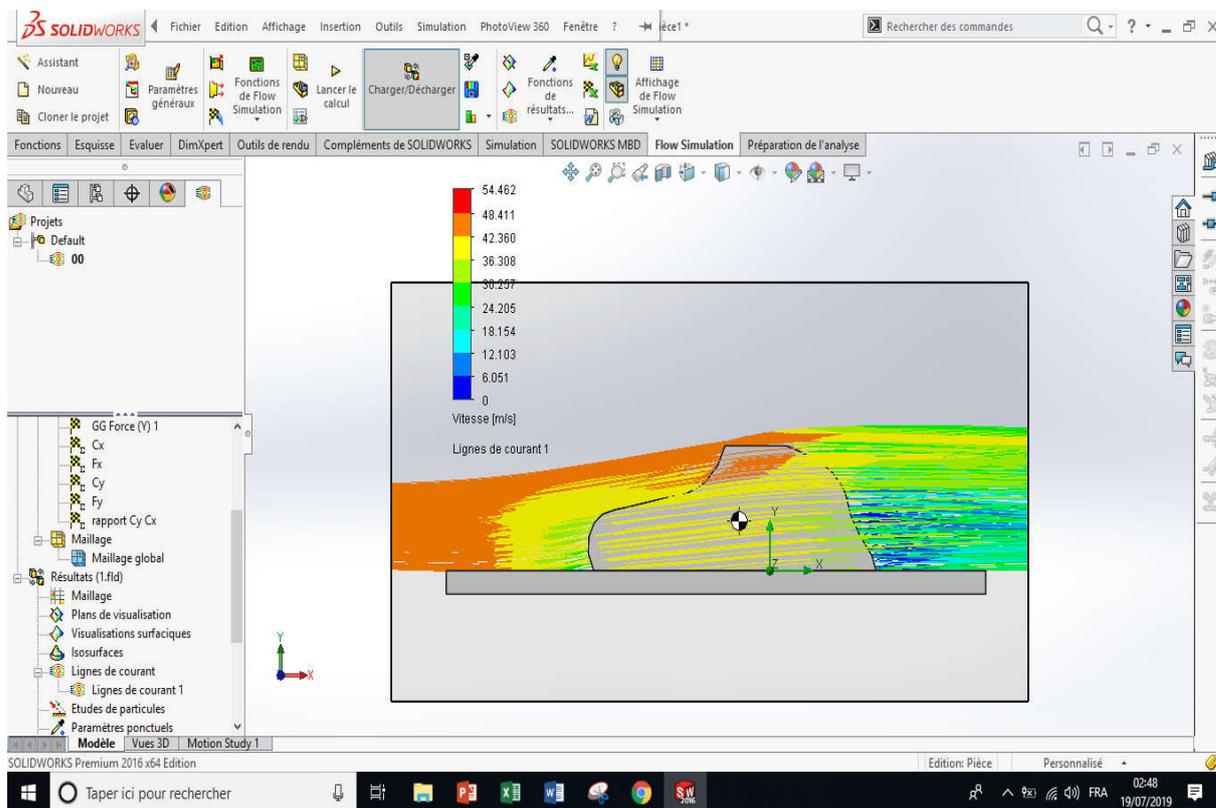


Fig.37 - La vitesse du fluide.

On remarque d'après les trois figures 35, 36 et 37 que la densité du fluide reste à peu près stable rien a changé et la vitesse du fluide diminue dès que le fluide est en contact avec la voiture à cause du frottement. Une autre remarque qui est très intéressante est la forme arrière de la voiture qui crée des turbulences qui font augmenter la vitesse de la voiture et diminuent la consommation du carburant comme montre la figure 36.

3.4 D'autres simulations possibles

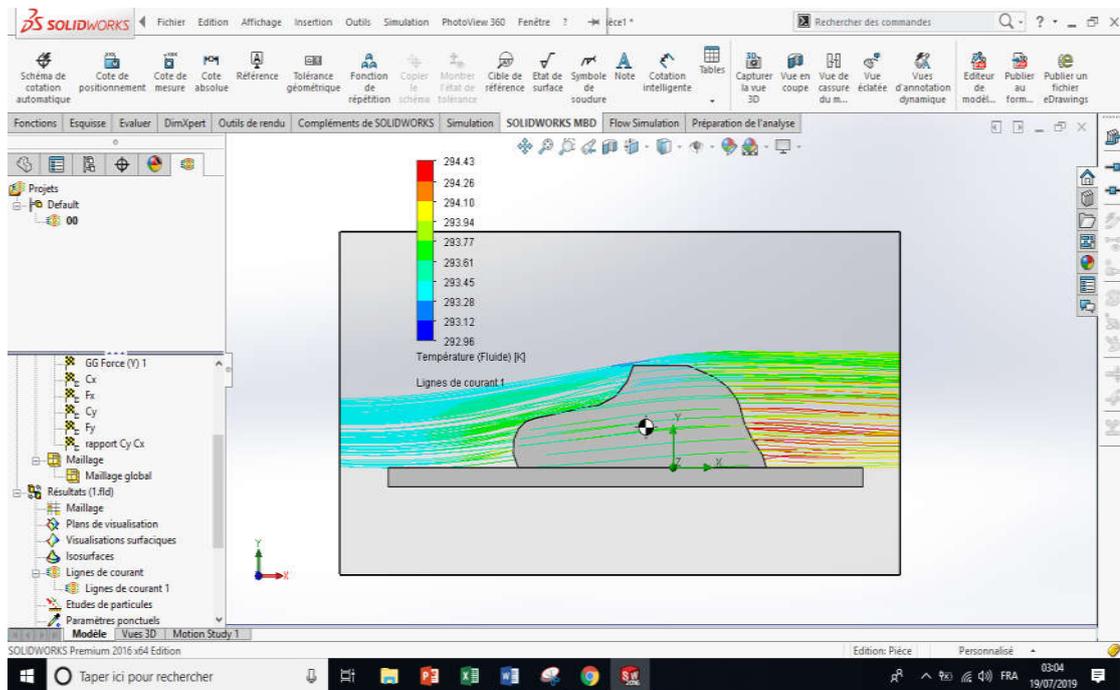


Fig.38 - température du fluide.

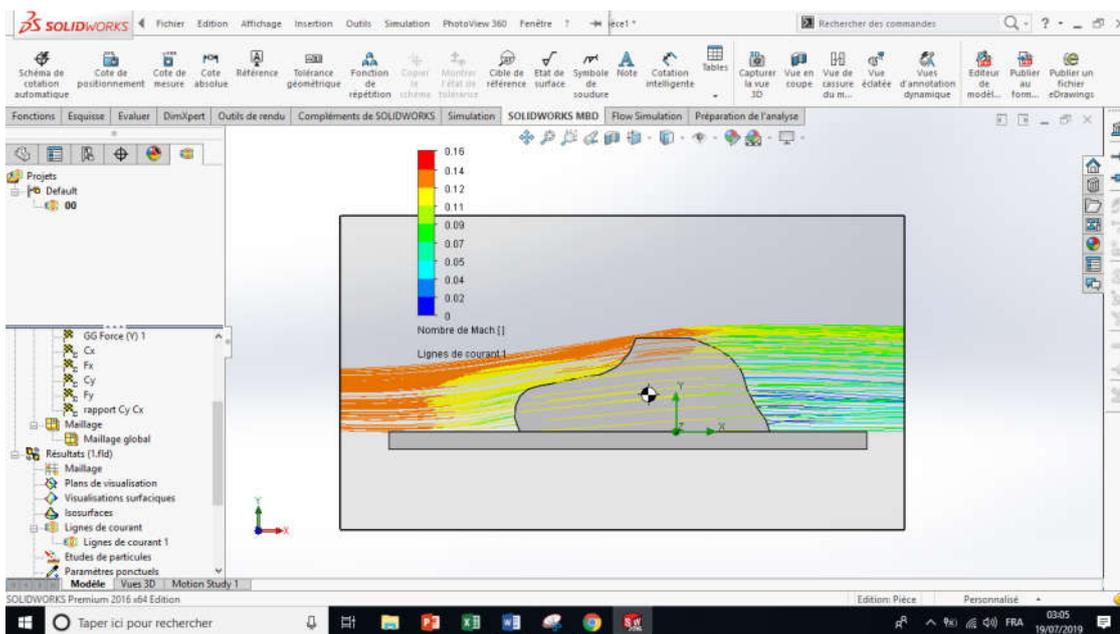


Fig.39 - Le nombre de Mach.

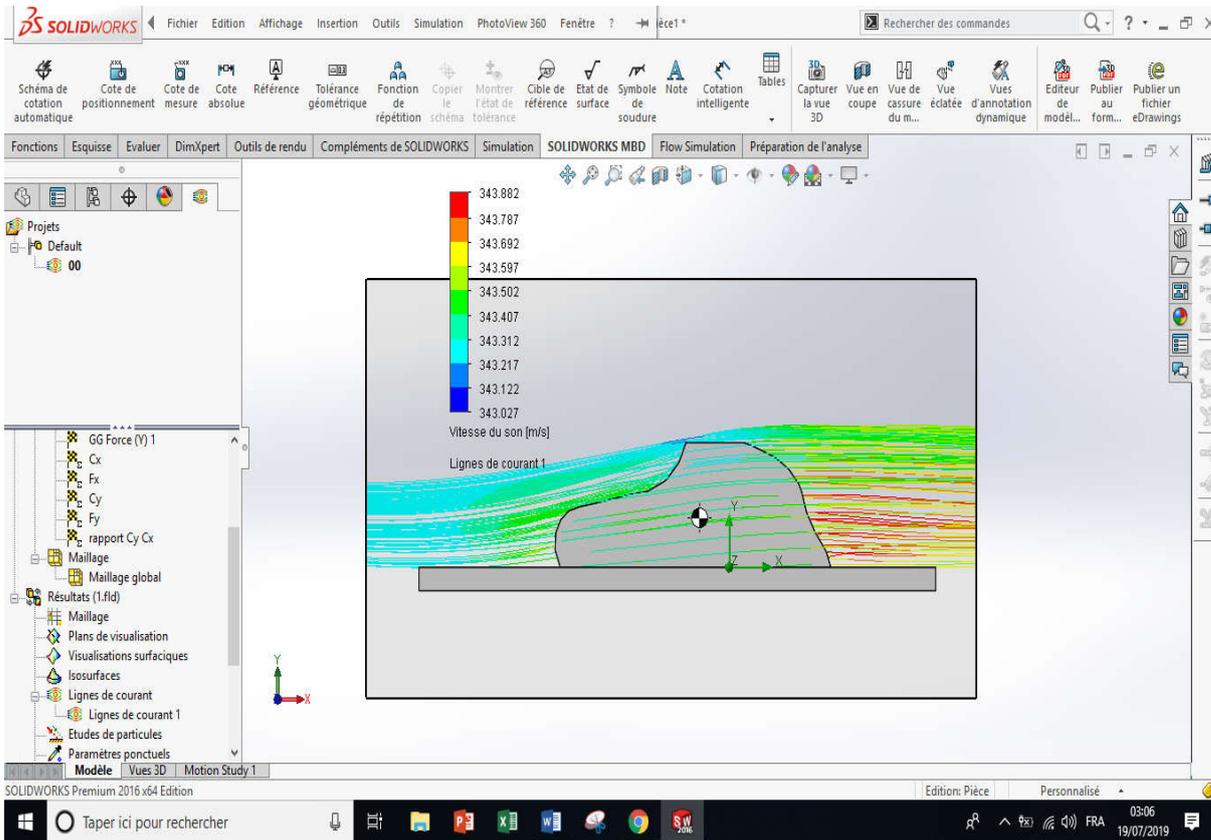


Fig.40 - Vitesse du son.

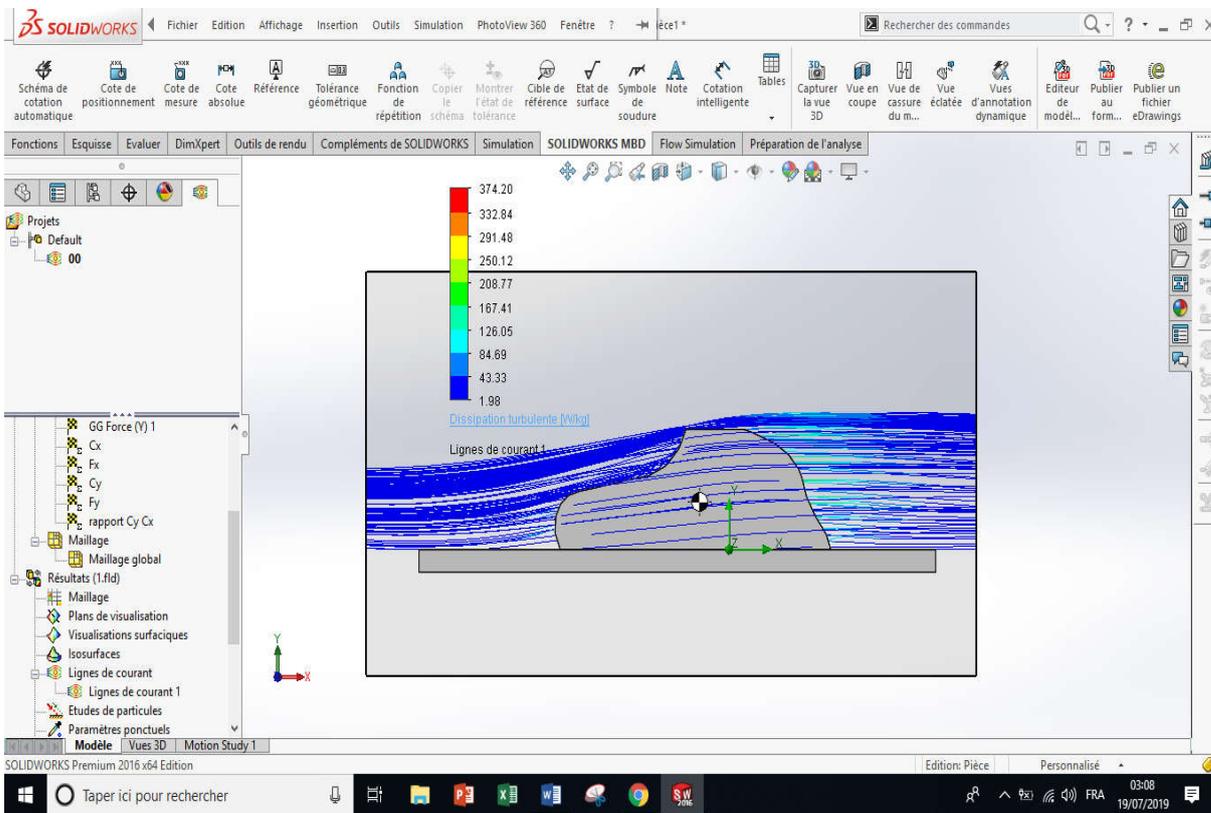


Fig.41 - La dissipation turbulente.

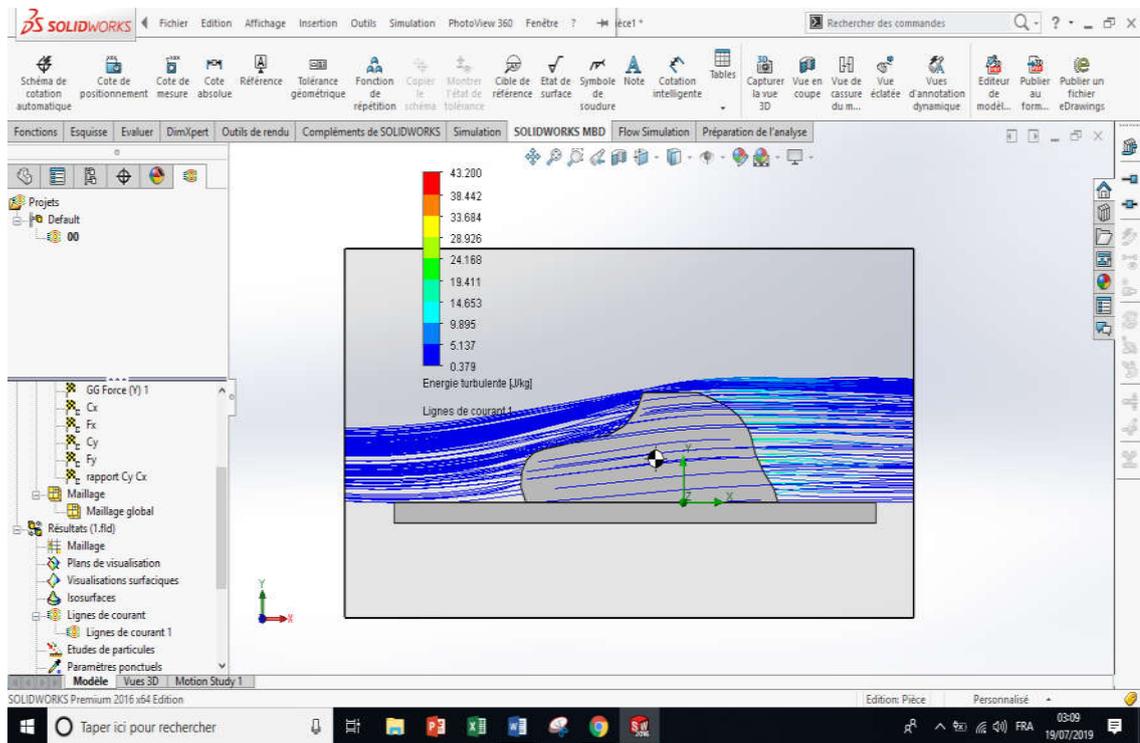


Fig.42 - Energie turbulente.

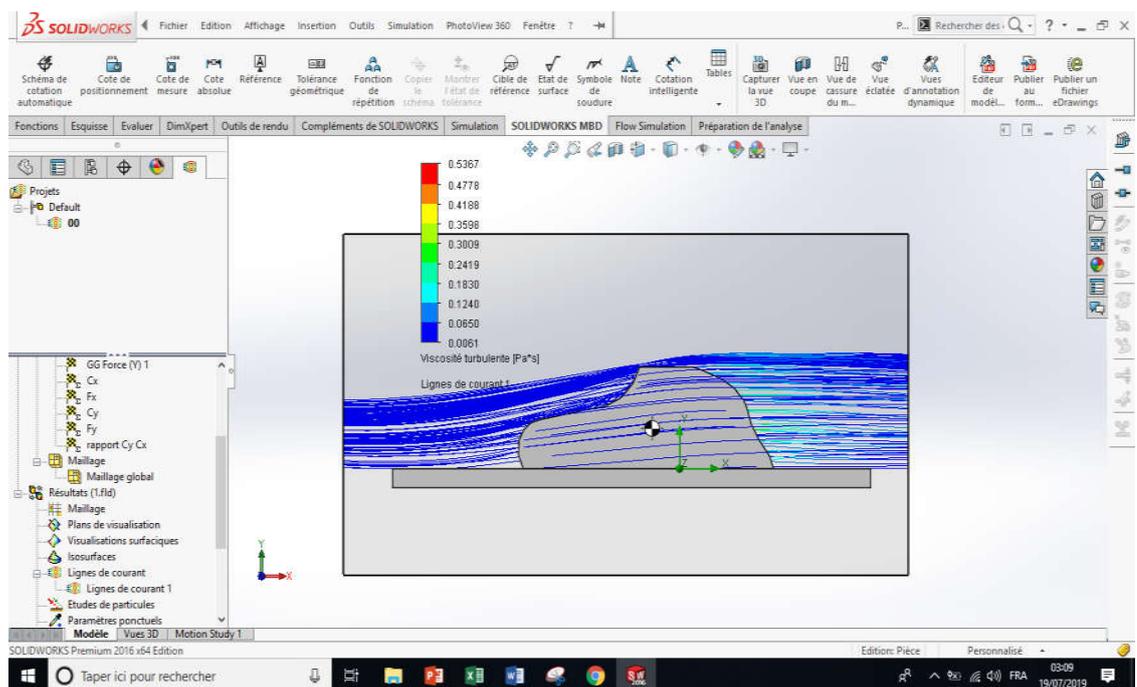


Fig.43 - Viscosité turbulente.

3.6 Conclusion

Les résultats de simulation avec celle de la théorie nous permettent de mettre en relief la pertinence de notre simulation. On a trouvé de ces résultats que la force de portance est importante par rapport à la force de la traînée et la forme aérodynamique de la voiture joue un rôle très essentiel pour minimiser l'énergie pendant le mouvement.

Conclusion générale

La modélisation et la simulation sont des étapes cruciales dans l'aérodynamique. Un modèle régissant le comportement aérodynamique et tenant compte de tous ses paramètres s'avère indispensable. La simulation d'une scène d'aérodynamique nécessite une recherche théorique approfondie.

Dans une proposition de démarche à suivre lors de l'étude d'un sujet d'aérodynamique, notre travail porte particulièrement sur la modélisation et la simulation d'une voiture de type Clio campus. Une recherche bibliographique approfondie nous a aidé à exposer les différents concepts théoriques et formalismes nécessaires à une compréhension assez large de ce domaine.

Notre thème dont intitulé est su indiqué, porte sur « la simulation aérodynamique d'une voiture par SolidWorks », ce travail est subdiviser en trois chapitres essentiels :

- Généralités sur l'aérodynamique nous a permet de comprendre mieux les concepts essentiels utilisés dans ce domaine.
- Rappel théorique nous a aidé de connaître les équations essentiels de l'aérodynamique tel que le coefficient de trainé et de portance.
- La simulation en utilisant le logiciel SolidWorks nous a permet de voir le comportement aérodynamique d'une voiture.

Concernant la fiabilité de nos résultats, une confrontation avec les résultats donnés en littératures nous renseigne sur la justesse de notre simulation.

Notre travail peut être considéré comme une base de départ pour une recherche approfondie dans le domaine de l'aérodynamique. Dans un travail futur, une étude complémentaire peut être envisagé en proposant des modélisations et simulations pour :

- Un model proche la réalité.
- Vérification de nos résultats avec l'expérimental et d'autres logiciels.
- Changer le profil de la voiture pour améliorer les paramètres aérodynamique.

Bibliographie

- [1] « *Caractéristiques de la Jamais Contente* » [archive], sur Energie Ouest Suisse [PDF] ;
- [2] Serge Bellu, *Histoire mondiale de l'automobile*, La fascination de la vitesse, p. 49;
- [3] Florent Mortel, « *L'aérodynamique dans l'automobile* » [archive] [PDF], sur Université de technologie de Belfort-Montbéliard ;
- [4] Jean-Pierre Brossard, *Dynamique du véhicule : Modélisation des systèmes complexes*, p. 235-239;
- [5] Paul Niedermeyer, « *An Illustrated History Of Automotive Aerodynamics – In Three Parts* » [archive], sur The Thruth About Cars, 14 février 2010;
- [6] Matthieu Barreau, Laurent Boutin, *Aérodynamique-Et-Automobiles Réflexions sur l'énergétique des véhicules routiers*, mai 2009, p. 11;
- [7] Serge Bellu, « L'âge d'or de la carrosserie » dans *Histoire mondiale de l'automobile*, p. 92;
- [8] Serge Bellu, « *Chrysler Airflow, Aérodynamique et fluidité* », *Science & Vie*, n° Hors Série, 2008, p. 37;
- [9] Serge Bellu, « *Peugeot 402, l'automobile streamline made in France* », *Science & Vie*, n° Hors Série, 2008, p. 40;
- [10] « *Cinquantenaire Citroën DS - Saga d'une voiture d'exception* » [archive], sur Cité des Sciences [PDF] ;
- [11] Serge Bellu, *Histoire mondiale de l'automobile*, Les chocs pétroliers, p. 251;
- [12] « *Introduction à l'aérodynamique en Formule 1* » [archive], sur F1 Technologies, 17 juillet 2006;
- [13] Julien Trombini, *Comprendre la Formule 1*, chp. 2, Aérodynamique, p. 13-43;
- [14] Jean Alami, « *Le coin du technicien - Le diffuseur* » [archive], sur Endurance info;
- [15] Benoît Solivellas, « *Le design automobile des années 1970 : aérodynamique !* » [archive], sur Cartech, 30 octobre 2009;
- [16] Pierre Duysinx, « *Performances du véhicule* » [archive] [PDF], sur ac.be;
- [17] « *Cx 0,24 - Mercedes classe E coupé, la voiture la plus aérodynamique du monde* » [archive], sur Moteur Nature, 2009;
- [18] « *La Mercedes CLA est la plus aérodynamique des voitures de série* » [archive], sur Le blog auto, 12 février 2013;
- [19] « *Aerodynamics : Cd World Record* » [archive], sur AutoZine Technical School;
- [20] Harinaldi, B., Warjito, E. A. K., and RustanTarakka, S. P. S. (2012) Modification of flow structure over a van model by suction flow control to reduce aerodynamics drag. *Makara Seri Teknologi*, Vol. 16(1), pp15-21;
- [21] V.N .Kumar,K.L .Narayan,L.N.V.Narasimha Rao and Y Sri Ram, "Investigation of Drag and Lift forces over the Profile of Car with Rearspoiler using CFD" in *International Journal of Advances in Scientific Research*,2015;
- [22] Hu, X. X., and Wong, T. T. (2011) A numerical study on rear-spoiler of passenger vehicle, *World Academy of Science, Engineering and technology*, Vol. 57, pp636-641;
- [23] Sharma, R. B, and Bansal, R. (2013) CFD simulation for flow over passenger car using tail plates for aerodynamic drag reduction, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, Vol. 7, No. 5, pp 28-35;

- [24] Jeff Howell, Martin Passmore, Simon Tuplin “Aerodynamic drag reduction on a simple car – like shape with rear upper body taper”, SAE International journal, Mech syst. 6(1):2013, doi: 10.4271/2013-01-0462;
- [25] Rohan Yadav and Justin Fischer “Aerodynamic Drag Reduction for A Generic Sport Utility Vehicle Using Rear Suction”- AbdellahAit Moussa;
- [26] Wahba, E., Al-Marzooqi, H., Shaath, M., Shahin, M., and El-Dhmashawy, T. (2012) Aerodynamic drag reduction for ground vehicles using lateral guide vanes, CFD Letters, Vol.4(2), pp68-79;
- [27] “Experimental Investigations on Optimization of Aerodynamic Characteristics in a Hatchback Model Car” Using vortex Generators ,December 2013- by K.Selvakumar et al;
- [28] Gopal P and Senthilkumar T, “Aerodynamic Drag Reduction in a Passenger Vehicle Using Vortex Generator With Varying Yaw Angles”in Journal of Applied Science and Engineering, Vol-7, 2012;
- [29] Les lois physiques de l’automobile www.adilca.com;
- [30] Cédric LECLERC, thèse de doctorat, « REDUCTION DE LA TRAINEE D’UN VEHICULE AUTOMOBILE SIMPLIFIE A L’AIDE DU CONTROLE ACTIF PAR JET SYNTHETIQUE » ;
- [31] Cogotti A., "Unsteady aerodynamics at Pininfarina road turbulences simulation and timedependant technics", *5th Stuttgart International Symposium Automotive and Engine Technology*, Stuttgart, 2003;
- [32] Noger C. & Gilliéron P., "Banc expérimental d'analyse des phénomènes aérodynamiques générés par le dépassement de deux véhicules automobiles", *16ème Congrès Français de Mécanique*, Nice, France, 1-5 Sept. 2003;
- [33] Onorato M., Costelli A.F. & Garonne A., "Drag measurement through wake analysis", *SAE International congress and Exposition*, No. SP6569, pp. 85-93, Detroit, 1984;
- [34] Huchot W.H., "Aerodynamics of road vehicles (4th ed.)", *Society of Automotive Engineers, Inc.* ISBN 0-7680-0029-7, 1998;
- [35] "Petits arrangements avec le vent", *Action Auto Moto Magazine*, No. 144, pp. 104-107, 2007;
- [36] Gilliéron P., "Analyse, modélisation et topologie des écoulements de culot dans l'automobile", *AAAF-36ème colloque d'aérodynamique appliquée*, Orléans, 20-22 Mars 2000;
- [37] Ahmed S.R., Ramm G. & Faltin G., "Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake", *SAE technical paper series*, No. 840300, Detroit, 1984;
- [38] Hinterberger C., Garcia-Villalba & Rodi W., "Large Eddy Simulation of flow around the Ahmed body", 2003;
- [39] <https://zero.sci-hub.tw/1412/6516295ba3d8786b0dba5458d63d7291/elena2001.pdf> . Date de la dernière consultation du site: 17/05/2019;
- [40] Douglas C. Giancoli, *Physique générale 1 : Mécanique et thermodynamique*, De Boeck Université, 1993 (ISBN 978-2804117009, lire en ligne [archive]), p. 130, « L'importance du C_x » ;
- [41] La voiture électrique [archive] sur jancovici.com, site de Jean-Marc Jancovici;
- [42] Marion D’HONDT, thèse de doctorat « Etude théorique, expérimentale et numérique de l’écoulement de refroidissement et de ses effets sur l’aérodynamique automobile » ;
- [43] Tutoriel SolidWorks 2016;
- [44] Ankit Shrivastava , Deepak kumar singh 2, Pranesh Mohan Mishra. Aerodynamic analysis of the vehicle sing solidworks flow simulation. IJRTER2018;
- [45] Ladjedel Omar, Cours aerodynamuqe . Faculté genie mecanique. USTO Oran;

Abstract

The topic of our study is the simulation of aerodynamics of a car (campus) by SolidWORKS software. The main objective of the modeling is to find an interpretation of the results between the given equations and the simulation using simple models.

These results show that the lift force is important in relation to the force of the drag and the aerodynamic shape of the car plays a very essential role in minimizing the energy during the movement.

Key words : simulation; aerodynamic; lift; drag; SolidWORKS.

Résumé

Notre sujet de thèse est la simulation d'aérodynamique d'une voiture (campus) par logiciel SOLIDWORKS. L'objectif principal de la modélisation est de trouver une interprétation des résultats entre les équations données et la simulation en utilisant des modèles simple.

On a trouvé de ces résultats que la force de portance est importante par rapport a la force de la traînée et la forme aérodynamique de la voiture joue un rôle très essentiel pour minimiser l'énergie pendant le mouvement.

Mots clés: simulation; aérodynamique; portance; traînée; SOLIDWORKS.

ملخص

موضوع أطروحة لدينا هو محاكاة الديناميكا الهوائية للسيارة (Campus) من خلال برنامج SolidWORKS. الهدف الرئيسي من النمذجة هو إيجاد تفسير للنتائج بين المعادلات المعينة والمحاكاة باستخدام نماذج بسيطة. توضح هذه النتائج أن قوة الرفع مهمة بالنسبة إلى قوة السحب وأن الشكل الديناميكي الهوائي للسيارة يلعب دوراً أساسياً للغاية في تقليل الطاقة أثناء الحركة.

كلمات البحث: المحاكاة؛ الهوائية؛ الرفع؛ السحب.