

LOUIS GAGNON

**CALCUL DE LA RÉSISTANCE  
AÉRODYNAMIQUE D'UN VÉHICULE MUNI  
DE PIÈCES EN MOUVEMENT**

Mémoire présenté  
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval  
dans le cadre du programme de maîtrise en génie mécanique  
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M. Sc.)

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE  
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE  
UNIVERSITÉ LAVAL  
QUÉBEC

2010

*À mes parents, mes frères, ma famille, mes amis, et  
tous les gens qui ont des rêves.*

# Remerciements

J'aimerais remercier tous ceux qui ont guidé et supporté mes choix. J'aimerais aussi remercier tous ceux qui ont contribué au développement et à la distribution sans frais du logiciel OpenFOAM, en particulier Hrvoje Jasak et Martin Beaudoin ; ce logiciel m'a permis de conduire ma recherche. Je remercie aussi les auteurs du logiciel Gmsh, Christophe Geuzaine et Jean-François Remacle. Je tiens aussi à mentionner l'aide, les suggestions, et les commentaires pertinents de Mathieu Olivier avec qui je partageai mon bureau au cours de mes études de maîtrise.

J'aimerais aussi remercier les professeurs Mohamed Bouazara et Jean Lemay qui ont gentiment accepté d'évaluer mon mémoire.

Je veux aussi remercier Benoît Lévesque qui a accepté d'être mon co-directeur de recherche et qui a pu me donner des conseils par rapport aux analyses CFD. En dernier mais non le moindre, je tiens à remercier mon directeur de recherche, Marc J. Richard, qui a cru en moi dès le début et qui m'a permis de faire mon propre projet de maîtrise tout en supportant mon désir de faire des recherches sur un sujet hors du commun et de manière autonome.

## Résumé

Ce mémoire documente la recherche sur l'ajout d'une pièce mobile à un modèle de voiture dont le but consiste à capturer de l'énergie de l'écoulement perturbé par le véhicule. Le but général est de réduire l'énergie requise par un véhicule afin de contrer les forces aérodynamiques qui travaillent sur celui-ci lorsqu'il est en mouvement. Le premier objectif du projet a été de modéliser numériquement l'écoulement sur le corps Ahmed et de valider ces résultats. Ensuite, une analyse numérique bidimensionnelle du corps Ahmed est faite en utilisant un modèle de turbulence  $k-\omega$ -SST disponible dans le logiciel OpenFOAM (OF). L'analyse est ensuite modifiée pour inclure une roue à aubes qui capture l'énergie de la vorticité qui se trouve derrière le véhicule. La roue   aubes est modélisée en utilisant une «General Grid Interface» (GGI) et l'énergie capturée est mesurée à l'aide des bibliothèques de forces disponibles dans le logiciel OF. La génération d'énergie atteint 16.1 watts pour les meilleures conditions. On trouve aussi comme effet secondaire une réduction de traînée qui atteint 8.2%. La plupart des simulations sont effectuées en parallèle sur un ordinateur à deux processeurs. Un maillage comprenant 30 000 cellules est utilisé. Les valeurs de  $y^+$  sur les parois du véhicule varient entre 60 et 500 pour les simulations avec roue   aubes. Des essais sont effectués pour des vitesses angulaires constantes et variables. L'écoulement atteint en général une stabilité, en moyenne, après 0.2 à 0.3 secondes. Le corps Ahmed est soumis à un écoulement qui se déplace à 60 m/s et cette vitesse est utilisée pour trouver la demande énergétique du véhicule soumis au coefficient de traînée calculé. Les résultats démontrent qu'il y a un certain intervalle de vitesses angulaires qui génère les quantités d'énergie les plus importantes ; cet intervalle est relié à la vitesse angulaire du tourbillon dans lequel la roue   aubes se trouve. La roue   aubes doit être située dans la bulle de séparation arrière du véhicule afin d'éviter d'augmenter la traînée en la plaçant dans l'écoulement non-perturbé. Un algorithme permettant de réguler l'énergie capturée de la roue   aubes en fonction des forces appliquées sur celle-ci est présentement en développement ; il permettra d'atténuer les fluctuations cycliques d'énergie capturée. Dans une application pratique, l'énergie capturée serait convertie en électricité et aurait le double avantage de permettre à un moteur électrique de réguler la vitesse angulaire de la roue en fonction de mesures ou de calculs et d'envoyer l'énergie générée directement à un système de batteries embarqué tel que l'on retrouve dans les véhicules hybrides de nos jours. Le système de roue   aubes aurait son impact le plus important sur des véhicules qui servent majoritairement à de la conduite sur autoroute car c'est là que les forces aérodynamiques atteignent leur intensité maximale.

## Abstract

This thesis documents the research on the addition of a mobile part to a car model whose purpose is to capture energy from the surrounding perturbed fluid. The overall intent is to reduce the energy a vehicle uses to overcome the aerodynamic forces that act on it while it is moving. The initial goal the project was to numerically model the flow around the Ahmed body and validate the results obtained that way. Then, a two-dimensional numerical analysis of the Ahmed body was performed using the  $k-\omega$ -SST turbulence model implemented in the OpenFOAM (OF) software. The analysis was then modified to include a rotating paddle wheel which captures energy from the swirl that forms behind the vehicle. The rotating wheel is modeled using a “General Grid Interface” (GGI) and the energy captured is calculated with the help of the forces library of the OF software. Power generation reaches 16.1 watts at optimal conditions. Drag reductions up to 8.2% were also found as side-effects of the rotating paddle wheel. Most computations are run in parallel on a dual core computer. A mesh of 30,000 cells is used.  $y^+$  values on the walls of the vehicle go from 60 to 500 for the simulations with a paddle wheel. Tests are run at both fixed and variable angular velocities of the paddle wheel. The flow usually reaches a steady state (in average) after 0.2 to 0.3 seconds. The Ahmed body is subjected to a flow velocity of 60 m/s and that velocity is used to calculate the equivalent power demand of the car subjected to a drag coefficient. It was found that there is a specific range of angular velocities that yield the best power output and that range is related to the angular velocity of the vortex in which the paddle wheel is located. The paddle wheel has to be located within the rear separation bubble to avoid increasing the drag on the car by locating it into the free-stream flow. An algorithm is currently being developed to have the angular velocity of the paddle wheel regulated by the flow in a manner where the energy harvested would be dependent on the magnitude of the force moment acting on the paddle wheel; that will dampen the cyclic variations of power generated by the paddle wheel. In a practical application, the energy captured would be converted into electricity which has the double advantage of allowing an electric motor to regulate the angular velocity according to calculated and/or measured quantities and sending the power directly to an on-board hybrid electric battery system, which is becoming more and more available in today’s vehicles. The paddle wheel system would have its most beneficial impact on vehicles that are involved in a lot of highway driving, where the forces of wind reach their peak.

# Table des matières

Remerciements	iii
Table des matières	ii
Nomenclature	v
Table des figures	vii
Liste des tableaux	ix
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Préambule . . . . .	1
1.2 Mise en contexte . . . . .	2
1.3 Outils numériques . . . . .	3
1.4 Objectifs . . . . .	4
1.5 Modèle du véhicule . . . . .	5
<b>2 Revue de littérature</b>	<b>7</b>
2.1 Approches visant à réduire la traînée d'un corps non-profilé . . . . .	7
2.2 Analyses du modèle Ahmed . . . . .	10
2.2.1 Résultats expérimentaux publiés . . . . .	10
2.2.2 Résultats numériques publiés . . . . .	11
2.3 Validité des résultats publiés . . . . .	13
2.4 Modélisation de la turbulence . . . . .	15
2.5 Fiabilité et état du logiciel d'analyse . . . . .	17
<b>3 Maillage et approche numérique</b>	<b>19</b>
3.1 Modèle géométrique . . . . .	19
3.2 Paramètres . . . . .	20
3.3 Solutions en régimes stationnaires et instationnaires . . . . .	21
3.4 Variables adimensionnelles . . . . .	21
3.4.1 Nombre de Reynolds . . . . .	21
3.4.2 Nombre de Courant . . . . .	22

3.4.3	Coefficients de traînée et de portance . . . . .	22
3.4.4	Distance à la paroi . . . . .	23
3.4.5	Variation de la vitesse à nombre de Reynolds constant . . . . .	24
3.5	Maillage . . . . .	25
3.5.1	Contexte . . . . .	25
3.5.2	Mailleur . . . . .	26
3.5.3	Maillage structuré . . . . .	26
3.5.4	Maillage agrandi . . . . .	29
3.5.5	Maillage non-structuré . . . . .	30
3.6	Approche numérique . . . . .	33
3.6.1	Modèles de turbulence . . . . .	33
3.6.2	Équations modélisées . . . . .	35
3.6.3	Calcul des forces de traînée . . . . .	36
3.7	Conditions aux limites . . . . .	37
3.8	Validation . . . . .	39
3.8.1	Contexte . . . . .	39
3.8.2	Comparaison avec la littérature . . . . .	39
3.8.3	Raffinement du maillage . . . . .	39
3.9	Capture d'énergie . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Résultats</b>	<b>42</b>
4.1	Résultats du modèle Ahmed seul . . . . .	42
4.1.1	Résultats avec maillage structuré . . . . .	42
4.1.2	Maillage non-structuré . . . . .	47
4.2	Résultats avec pièce ajoutée . . . . .	48
4.2.1	Cas sélectionnés . . . . .	51
4.2.2	Cas de comparaison . . . . .	58
<b>5</b>	<b>Analyses tridimensionnelles</b>	<b>62</b>
5.1	Introduction . . . . .	62
5.2	Modèle Ahmed . . . . .	62
5.3	Alérion Supermileage . . . . .	64
5.3.1	Contexte . . . . .	64
5.3.2	Paramètres . . . . .	65
5.3.3	Résultats et données . . . . .	67
5.3.4	Résultats et discussion . . . . .	67
5.3.5	Conclusion . . . . .	69
<b>6</b>	<b>Discussion</b>	<b>71</b>
6.1	Généralités . . . . .	71
6.2	Roue à aubes . . . . .	72

6.3 Résumé . . . . .	75
<b>7 Conclusion</b>	<b>77</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>78</b>
<b>A Conversion de Gmsh vers OF</b>	<b>81</b>
<b>B Calcul de <math>C_D</math> dans OF</b>	<b>83</b>
<b>C Décélération aérodynamique de l'Alérion</b>	<b>84</b>
<b>D Code modifié de rotation de l'interface</b>	<b>85</b>
<b>E Résultats graphiques de l'analyse de l'Alérion Supermileage</b>	<b>87</b>
E.1 Notes . . . . .	87
E.2 Résultats . . . . .	87

# Nomenclature

$\delta$	Épaisseur de la couche limite, voir les Éqs. 4.1 et 4.2
$\epsilon$	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente
$\mu$	Viscosité dynamique
$\nu$	Viscosité cinématique
$\nu_{eff}$	Viscosité turbulente effective, voir l'Éq. 3.12
$\nu_t$	Viscosité cinématique turbulente, voir l'Éq. 3.13
$\omega$	Taux de dissipation spécifique de l'énergie cinétique turbulente ( $\epsilon$ divisé par un facteur de $k$ )
$\rho$	Masse volumique du fluide
$\tau_w$	Cisaillement à la paroi, voir l'Éq. 3.7
$\varphi$	Angle oblique, angle entre la paroi oblique arrière du corps Ahmed et l'horizontale, voir la Fig. 1.1
$A_{ref,L}$	Aire de la surface horizontale du modèle.
$A_{ref}$	Aire de la surface frontale du modèle.
$C_D$	Coefficient de traînée du modèle, voir l'Éq. 3.3
$C_L$	Coefficient de portance du modèle, voir l'Éq. 3.4
$C_{D,évitée}$	Coefficient de la traînée évitée, voir l'Éq. 4.3
$C_{D,corps}$	Coefficient de traînée du corps Ahmed seul
$C_{D,pièce}$	Coefficient de traînée de la pièce ajoutée
$C_{D,watts}$	Énergie sauvée par la traînée évitée lorsque le véhicule se déplace à 60 m/s
$Co$	Nombre de Courant, voir l'Éq. 3.2
$e_{capture}$	Énergie en watts capturée par la roue à aubes, voir l'Éq. 3.24
$F_d$	Force totale de traînée sur le modèle
$F_l$	Force totale de portance sur le modèle

$k$	Énergie cinétique de turbulence
$L$	Longueur du modèle : 1.044 m
$R_L$	Nombre de Reynolds basé sur la longueur de la plaque plane ou du modèle Ahmed, voir l'Éq. 3.1
$U$	Vecteur de vitesse de l'écoulement
$u_*$	Vitesse de frottement, voir l'Éq. 3.6
$U_\infty$	Norme de la vitesse du champ non-perturbé
$x, y, z$	Coordonnées cartésiennes où $x$ représente le sens de l'écoulement et $z$ le sens de l'envergure
$y^+$	Variable adimensionnelle de distance entre la paroi et la première cellule, voir l'Éq. 3.5

# Table des figures

1.1	Le corps Ahmed. . . . .	5
3.1	Schéma du corps Ahmed avec roue à aubes. . . . .	20
3.2	Maillage utilisé pour les analyses structurées. . . . .	27
3.3	Distribution de la variable adimensionnelle $y^+$ sur la paroi du véhicule. . . . .	29
3.4	Maillage agrandi. . . . .	30
3.5	Maillage non-structuré du corps Ahmed bidimensionnel. . . . .	31
3.6	Maillage sur l'arrière du véhicule et sur l'interface de rotation. . . . .	32
3.7	Interface de rotation sous-résolue. . . . .	33
4.1	Évolution du $C_D$ pour $\varphi = 25^\circ$ . Maillage structuré. . . . .	44
4.2	Évolution du $C_D$ pour $\varphi = 35^\circ$ . Maillage structuré. . . . .	45
4.3	Lignes de courant montrant les tourbillons d'envergure sur le corps Ahmed. . . . .	47
4.4	Test de raffinement de maillage : pression. . . . .	49
4.5	Test de raffinement de maillage : vitesse. . . . .	50
4.6	Tourbillons d'envergure sur le corps Ahmed avec roue à aubes. . . . .	51
4.7	Tracé de $e_{capture}$ vs Temps pour une révolution complète de la roue à aubes du cas 3. . . . .	52
4.8	Tracé de $C_{D,évitée}$ vs Temps pour une révolution complète de la roue à aubes du cas 3. . . . .	52
4.9	Énergie capturée par révolution de la roue. Cas 6. . . . .	53
4.10	$e_{capture}$ vs Temps pour une pale du cas 3. . . . .	56
4.11	$e_{capture}$ vs Temps et $R$ vs Temps . . . . .	57
4.12	Génération d'énergie vs Temps. Cas 7. . . . .	58
4.13	Génération d'énergie vs Temps. Cas 8. . . . .	58
4.14	Corps Ahmed avec pièce ajoutée. Cas $0^\circ$ . . . . .	59
4.15	Corps Ahmed avec pièce ajoutée. Cas $30^\circ$ . . . . .	60
4.16	Corps Ahmed avec pièce ajoutée. Cas A. . . . .	60
4.17	Corps Ahmed avec pièce ajoutée. Cas B. . . . .	60
4.18	Corps Ahmed avec pièce ajoutée. Cas C. . . . .	61
4.19	Corps Ahmed modifié. Cas D. . . . .	61
5.1	Corps Ahmed avec maillage de couche limite partiellement structuré. . . . .	63

5.2	Vue agrandie de la Fig. 5.1. . . . .	64
5.3	Courbe de décélération aérodynamique de l'Alérion. . . . .	65
6.1	Schéma de l'écoulement pour deux différents angles. Tiré de l'article de Lienhart et Becker [24]. . . . .	72
6.2	Modifications suggérées aux pales de la roue à aubes. . . . .	75
E.1	Densité du maillage de l'Alérion. . . . .	87
E.2	Pression sur la coque de l'Alérion, vue frontale. . . . .	88
E.3	Pression sur la coque de l'Alérion, vue frontale. Intervalle réduit. . . . .	89
E.4	Pression sur la coque de l'Alérion, vue du flanc. Intervalle réduit. . . . .	89
E.5	Pression sur la coque de l'Alérion, vue du dessous. Intervalle réduit. . . . .	90
E.6	Pression autour de l'Alérion, au milieu. . . . .	91
E.7	Pression autour de l'Alérion, à 10 cm du milieu. . . . .	91
E.8	Distribution de pression autour de l'Alérion, à 20 cm du milieu. . . . .	92
E.9	Distribution de pression autour de l'Alérion, à 30 cm du milieu. . . . .	92
E.10	Énergie cinétique de turbulence autour de l'Alérion, au milieu. . . . .	93
E.11	Énergie cinétique de turbulence de la queue de l'Alérion. 6 figures. . . . .	96
E.12	Lignes de courant autour de l'Alérion. . . . .	97
E.13	Comparaison des résolutions du maillage de l'Alérion. . . . .	98
E.14	Comparaison des vitesses sous l'Alérion. . . . .	98

# Liste des tableaux

2.1	Classification des méthodes de réduction de la traînée . . . . .	8
2.2	Dimensions approximatives des domaines utilisés par quelques auteurs .	14
3.1	Conditions limites du maillage structuré . . . . .	38
3.2	Conditions limites du maillage non-structuré . . . . .	38
4.1	Valeurs de $y^+$ du maillage structuré. $\varphi = 25^\circ$ . . . . .	46
4.2	Valeurs de $y^+$ du maillage structuré. $\varphi = 35^\circ$ . . . . .	46
4.3	Résultats des cas avec vitesse angulaire constante . . . . .	52
4.4	Vecteurs de direction de l'écoulement autour de la roue à aubes du cas 3.	54
4.5	Distribution de pression de l'écoulement autour de la roue à aubes du cas 3. . . . .	55
4.6	Résultats des cas sélectionnés ayant une vitesse angulaire variable . . .	57
4.7	Résultats des cas de comparaison . . . . .	59
5.1	Conditions limites des variables du modèle de turbulence . . . . .	66
5.2	Résultats numériques de l'analyse flottante . . . . .	67
5.3	Résultats numériques de l'analyse au sol . . . . .	67

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Préambule

L'analyse aérodynamique d'écoulements turbulents demeure encore aujourd'hui un sujet qui suscite l'intérêt et présente un défi aux ingénieurs. Plusieurs questions demeurent en attente d'une réponse et en conséquence il existe beaucoup d'opportunités pour le développement technologique des outils soumis aux forces du vent. En fait, l'aérodynamique est un sujet important dans la conception de plusieurs projets d'ingénierie puisque souvent les forces du vent doivent être supportées par les structures tels que des ponts, des édifices, et des fils électriques. On accorde aussi une importance à l'analyse aérodynamique des systèmes de refroidissement par convection et des systèmes d'aération. Mais, un autre aspect qui a fasciné et dirigé le travail des ingénieurs depuis le temps où le transport propulsé par moteurs a vu le jour est l'efficacité aérodynamique de ces véhicules à moteur : la résistance du vent au mouvement d'une voiture, d'un autobus, d'un train, etc.. D'après le «Department of Energy» et le «Environmental Protection Agency» [12], au cours de sa vie, en moyenne, 2.6% de l'énergie que la voiture d'un américain moyen utilise sert à vaincre les forces aérodynamiques ; cela peut sembler minime mais c'est en fait, après avoir enlevé les pertes de combustion et de transmission, 20% de l'énergie qui se rend aux roues tandis que 46% de celle-ci est utilisée pour accélérer la voiture. Lorsque la voiture roule à une vitesse constante assez élevée, les forces aérodynamiques deviennent dominantes. Selon Choi *et al.* [9], aucune étude à ce jour ne vérifie la plus petite force de traînée qu'il est possible d'obtenir sur un corps. De plus, il n'est toujours pas assuré que la traînée sur un corps ne puisse pas atteindre une valeur nulle, tel que c'est le cas lorsqu'on considère un écoulement potentiel exempt de viscosité. Par contre, un tel écoulement exclut la présence de turbulence et de couches limites, ce qui peut être un objectif mais pas une condition. Ayant pour

but d'amener de nouvelles idées sur la table, ce projet de recherche démontre comment on peut réduire la consommation d'énergie d'un véhicule en ajoutant une pièce en mouvement sur celui-ci. On atteint ce but en capturant l'énergie cinétique de l'écoulement qui se trouve derrière un modèle de véhicule avec hayon arrière<sup>1</sup>. L'énergie est capturée d'un tourbillon qui se trouve dans la zone où l'écoulement est décollé, tout juste derrière la paroi arrière verticale du véhicule. La pièce en mouvement en question s'inspire d'une roue à aubes. Malgré que l'analyse soit conduite pour un modèle typique de voiture, des candidats idéaux pour un système à pièce mobile comme celui décrit dans ce mémoire seraient des véhicules à formes cubiques ainsi que des véhicules voyageant à grandes vitesses.

## 1.2 Mise en contexte

En observant la flotte de véhicules qui circulent sur les routes, nous constatons que l'aérodynamisme n'était pas le seul objectif du fabricant lors de leur conception. En fait, les véhicules prennent plus souvent une forme dictée par plusieurs facteurs dont la sécurité, la faisabilité, et l'ergonomie. L'expérience démontre que dans le cas d'une voiture, la majorité de la résistance aérodynamique vient de la différence de pression entre l'avant et l'arrière du véhicule et que le frottement sur les parois du véhicule contribue moindrement à la résistance aérodynamique. En d'autres mots, le coefficient de pression domine le coefficient de frottement et cela indique que les pertes d'énergie causées par le déplacement de l'air par le véhicule ne se font pas aux parois du véhicule mais plutôt par la friction air contre air qui résulte du déplacement brusque de l'air par le passage du véhicule. Serait-il donc possible de modifier le véhicule de façon à ce que sa forme ne génère plus de traînée due à la pression? Non, si l'air est déplacé pour le passage d'un véhicule il génère automatiquement une force de pression sur le véhicule. Il est possible de réduire de beaucoup cette force mais plusieurs facteurs s'y opposent : besoin de contact avec le sol en quatre points, besoin de visibilité pour le chauffeur, facilité de chargement du véhicule, résistance aux impacts, manoeuvrabilité, etc.. Et si on ajoute une pièce en mouvement sur le véhicule? Serait-ce possible de canaliser l'air incident pour réduire son déplacement total? Par exemple, un aileron qui change de position selon les caractéristiques de l'écoulement sur le véhicule ou encore un véhicule qui modifie sa forme selon son chargement? Dans ces mêmes lignes, il est tenté par la recherche ici documentée de non-seulement modifier l'écoulement sur le véhicule mais en fait de capturer de l'énergie que l'air gagne en étant poussé et tiré par le véhicule avant que cette énergie ne soit perdue en frottement par le contact air-air. Il faut cependant aussi se soucier de comment est-ce qu'il sera évité de causer plus de

---

<sup>1</sup>Hatchback en anglais.

résistance aérodynamique par cette capture d'énergie. Théoriquement, il est possible de capturer l'énergie cinétique gagnée par l'air lors de son impact avec le véhicule, mais en pratique comment peut-on atteindre cet objectif sans pour autant causer plus d'impact avec l'air par la présence de pièces ajoutées au véhicule ?

### 1.3 Outils numériques

L'idée générale du projet de maîtrise documenté par ce mémoire consiste à étudier à l'aide d'outils numériques la possibilité de capturer de l'énergie de l'écoulement autour d'une voiture en mouvement à l'aide d'un appareil qui est attaché au véhicule. Les outils en question sont des logiciels à code source ouvert, ils sont choisis pour leur malléabilité et surtout pour l'absence de frais de licences engendrés par ceux-ci. Pour effectuer une analyse de fluides numériques, plusieurs méthodes s'offrent à nous. La plus couramment utilisée est une analyse de volumes finis. Donc, le logiciel OpenFOAM (OF) a été choisi pour effectuer l'analyse de volumes finis. Ce logiciel est vraisemblablement le logiciel d'analyse numérique des fluides à code source ouvert le plus utilisé, autant par l'industrie privée que par le monde académique. Pour effectuer une analyse de volumes finis, il est aussi nécessaire de préalablement créer un maillage, qui dicte comment le volume total occupé par l'écoulement en question est décomposé en petites cellules. La suite OF vient avec un logiciel permettant de faire cette décomposition mais la spécialité d'OF demeure l'analyse et non la création d'un maillage. Donc, il a été jugé préférable pour le projet d'utiliser un logiciel spécialisé en création de maillages. Plusieurs logiciels ont été considérés et certains d'entre eux ont aussi été vérifiés. Le logiciel qui a été finalement choisi est le logiciel Gmsh, qui crée des maillages pouvant être facilement convertis en format lisible par OF. Une fois que les analyses sont effectuées par OF, on obtient les états de pression et vitesse de chaque cellule du volume analysé décomposé (maillage) et ce à chaque pas de temps. À partir de là, il est ensuite souhaitable de traiter ces données pour obtenir des propriétés recherchées. Dans le cas présent, puisque l'intérêt est la traînée et la génération d'énergie par le véhicule et ses composantes, il est essentiel d'utiliser des outils d'analyse après les simulations pour obtenir les forces appliquées par l'écoulement sur les parois du véhicule et de ses composantes. Des outils propices à cette tâche sont fournis dans la suite OF. Ensuite, il est fortement désirable de pouvoir visualiser les données de pression et vitesse obtenues par les calculs d'OF pour les comparer à celles obtenues par différents auteurs et ainsi repérer les erreurs de calcul. La visualisation a aussi pour but de comprendre ce qui se passe dans l'écoulement et quelles modifications/améliorations peuvent être faites pour, par exemple, capturer plus d'énergie de l'écoulement. La suite OF vient avec un logiciel de visualisation nommé ParaView, ce logiciel n'est pas développé par les auteurs d'OF mais il y est très bien

adapté et la plupart des utilisateurs d'OF y ont recours. Donc, le logiciel ParaView est le logiciel utilisé pour toutes les visualisations des champs de pression, vitesse, et autres. Tous les résultats graphiques présentés dans ce mémoire proviennent de ParaView. Le logiciel Gnuplot est utilisé pour les analyses de données qui sont faites sous forme de courbes (graphiques), comme par exemple l'évolution des forces sur la voiture avec le temps. Finalement, une série d'outils que l'on retrouve sur une distribution Linux standard sont utilisés pour manipuler les données obtenues d'OF afin de mieux comprendre les résultats.

## 1.4 Objectifs

Considérant la voiture comme le sujet de ce projet, il est de l'opinion de l'auteur que s'il existe plusieurs méthodes simples de modifier la forme générale d'un véhicule afin de réduire sa demande énergétique il y a aussi plusieurs moyens simples d'ajouter une pièce en mouvement, voire un aileron, sur un véhicule typique, afin de réduire cette demande. Le véhicule peut alors garder sa forme initiale tout en réduisant sa consommation de carburant.

L'idée est d'ultimement parvenir à capturer de l'énergie cinétique induite dans le fluide par le déplacement qui lui est imposé par le passage d'un véhicule avant que cette énergie se perde en dissipation visqueuse. Il y a aussi l'idée d'utiliser l'énergie de la pression atmosphérique lorsqu'elle cherche à remplir le vide qui se crée derrière le véhicule et de, entre autres, recréer ce vide à l'avant du véhicule et en quelque sorte «éviter» le fluide.

Le but de ce projet consiste donc à simuler numériquement des ajouts de pièces en mouvement sur un modèle de véhicule et de produire des résultats qui mettent en évidence quelles méthodes et paramètres sont plus prometteurs. Par contre, il est aussi reconnu que la simulation numérique des fluides n'est pas fiable au point que les résultats ainsi produits soient immédiatement utilisables en pratique. Donc, l'intention est plutôt de donner une direction aux prochains projets, qui raffineront les méthodes numériques utilisées ici et entreprendront peut-être des essais expérimentaux ou pratiques.

Un des défis à surmonter par l'auteur est de parvenir à utiliser une méthode de calcul numérique qui donne des résultats ayant une certaine fiabilité malgré le matériel informatique limité et les écoulements turbulents à haute vitesse. Les autres défis sont de simuler des pièces en mouvement qui capturent l'énergie du fluide et de produire des résultats à l'intérieur des délais prescrits et dans une forme qui sera compréhensible

aux futurs chercheurs qui se pencheront sur des questions similaires.

## 1.5 Modèle du véhicule

Une géométrie communément appelée le modèle Ahmed et qui a été originalement conçue par Ahmed *et al.* [1] a été choisie en tant que modèle de départ pour les simulations car elle est couramment utilisée dans la littérature et des résultats expérimentaux [1, 25] et numériques [7, 13, 16, 19] d'écoulements sur ce modèle ont été publiés par différents auteurs. La Fig. 1.1 donne la géométrie et les dimensions du corps Ahmed ; l'angle de la paroi oblique  $\varphi$  est appelé angle oblique tout au long de ce mémoire. Le dessin est une adaptation d'une figure provenant de Hinterberger, García-Villalba, et Rodi [18] et a été reproduit avec leur permission. Toutes les mesures sont en millimètres.

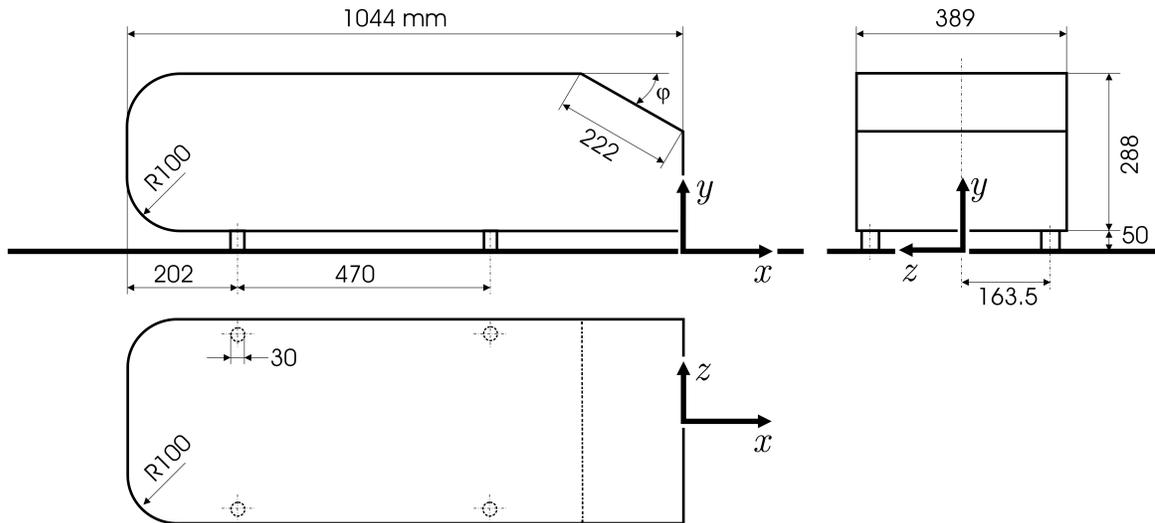


FIG. 1.1 – Le corps Ahmed.

En se basant sur la Fig. 1.1 on note que le devant du véhicule se trouve à gauche et on fera référence à la paroi oblique arrière du véhicule et la paroi verticale arrière du véhicule à maintes reprises dans ce mémoire. On note à nouveau l'angle oblique,  $\varphi$ , qui est l'angle entre l'horizontale (plan x-z) et la paroi oblique arrière du véhicule. On peut remarquer que le véhicule n'a pas la taille d'un véhicule qui circule sur les routes et donc les analyses sont effectuées à plus grande vitesse afin d'obtenir des résultats pertinents.

Le modèle Ahmed a reçu une attention globale de la communauté scientifique concernée par la dynamique des fluides et cela depuis sa première apparition lorsque

Ahmed *et al.* [1] l'ont utilisé dans une soufflerie pour reproduire des caractéristiques d'écoulements que l'on retrouve sur une voiture. Le modèle a aussi été étudié par le «European Research Community On Flow, Turbulence, And Combustion» (ERCOFTAC) afin de valider différents codes d'analyse numérique des fluides (CFD<sup>2</sup>). En fait, l'association ERCOFTAC a tenu des ateliers sur la simulation du modèle Ahmed à plus d'une reprise. Le premier objectif de ce projet de maîtrise a été de créer un cas de CFD qui reproduit les caractéristiques de l'écoulement sur le corps Ahmed et surtout son coefficient de traînée. On a aussi cherché à obtenir des erreurs minimales. Reproduire le coefficient de traînée expérimental a été un défi pour tous les chercheurs en CFD qui se sont penchés sur le modèle Ahmed car il est difficile de reproduire numériquement le début et la fin de la zone décollée que l'on retrouve sur la paroi oblique arrière du véhicule. Par contre, une idée générale d'un coefficient de traînée approprié a été prise de la littérature comme étant entre 0.22 et 0.35 pour les angles obliques considérés dans ce mémoire. Il faut cependant ajouter qu'entre les angles obliques de 25° et 35° survient une «crise de traînée». Ahmed *et al.* [1] précisent que cette crise survient à environ 30° et qu'elle se caractérise par un coefficient de traînée expérimental qui atteint subitement 37.8. Plusieurs tentatives de reproduire le phénomène qui survient entre ces deux angles ont été faites par différents auteurs. L'écoulement passe de la formation de tourbillons longitudinaux sur les côtés de la paroi oblique (25°) à leur formation plutôt sur les côtés de la paroi arrière verticale (35°). La Fig. 6.1 donne une bonne idée de ce phénomène. Ces tourbillons ont une importante influence sur le coefficient de traînée du corps Ahmed car ils interagissent avec les tourbillons d'envergure qui se trouvent sur les parois oblique et verticale arrière du véhicule.

L'énergie cinétique de ces tourbillons est ce qui est capturé par les roues à aubes étudiées ici. La zone étudiée pour ce projet se situe tout juste en aval de la paroi arrière verticale mais l'intention de ce projet demeure de démontrer comment il est possible de capturer l'énergie cinétique des structures tourbillonnaires que l'on trouve sur un modèle typique de véhicule et non de présenter les détails de la capture d'énergie sur un modèle spécifique de véhicule. Des modèles de véhicules commerciaux ne sont pas utilisés et le modèle Ahmed est simplement utilisé afin de recréer des structures d'écoulements propres à un véhicule et afin de valider la modélisation CFD.

---

<sup>2</sup>Computational Fluid Dynamics en anglais.

# Chapitre 2

## Revue de littérature

### 2.1 Approches visant à réduire la traînée d'un corps non-profilé

Plusieurs méthodes sont étudiées par différents auteurs pour réduire la traînée sur un corps non-profilé. Choi *et al.* [9] les classent selon trois caractéristiques indépendantes. Ces trois caractéristiques sont rapportées et définies dans le tableau 2.1.

Selon Choi *et al.* [9], plusieurs auteurs ont obtenu des résultats prometteurs en utilisant une méthode passive et tridimensionnelle influençant le sillage de corps bidimensionnels non-profilés. La plupart appliquent une perturbation tout juste après le décollement de la couche limite et atténuent ou suppriment ainsi la formation de tourbillons de von Kármán. Ces perturbations sont généralement causées par l'ajout d'une série de bosses suivant la direction d'envergure sur le corps. Par contre, cette méthode ne donne pas de résultats concluants pour un corps fortement tridimensionnel tel qu'un véhicule.

Des méthodes actives et tridimensionnelles dans le sillage ont aussi donné certains résultats prometteurs et leur influence est comparable aux méthodes passives mentionnées ci-haut. Leur différence est simplement qu'au lieu d'ajouter un obstacle pour modifier le sillage, on a plutôt recours à un soufflage ou une aspiration. Il semble plus difficile d'obtenir une configuration efficace avec une méthode active. L'utilisation d'un «jet synthétique<sup>1</sup>» sur le dessus d'un cylindre réduit la traînée à des Reynolds plus élevés ( $10^5$ ) et augmente aussi la portance dû au fait que le jet est utilisé en un seul point

---

<sup>1</sup>Jet composé de tourbillons générés à l'aide d'un diaphragme.

TAB. 2.1 – Classification des méthodes de réduction de la traînée

<b>type</b>	<u>passive</u>	<u>active</u>	<u>réactive</u>
	<i>modification de l'écoulement sans insertion d'énergie</i>	<i>modification de l'écoulement avec insertion d'énergie</i>	<i>modification de l'écoulement avec insertion d'énergie et adaptation à l'écoulement</i>
<b>dimension</b>	<u>bidimensionnelle</u>	<u>tridimensionnelle</u>	
	<i>invariable selon la position sur l'axe d'envergure</i>	<i>variable selon la position sur l'axe d'envergure</i>	
<b>zone</b>	<u>couche limite</u>	<u>sillage</u>	
	<i>influence l'écoulement dans la couche limite avant le décollement pour, la plupart du temps, le retarder</i>	<i>influence l'écoulement dans le sillage pour en modifier ses propriétés</i>	

(perte de symétrie) ; la réduction de traînée ne semble pas dépendante de la fréquence du jet.

Pour ce qui est des méthodes réactives, il semble qu'elles n'ont été vérifiées qu'à très faibles Reynolds. Les instabilités de l'écoulement sont plus nombreuses à haut Reynolds et il est donc beaucoup plus difficile de les capter. Les méthodes utilisées sont des aspirations, soufflages, et vibrations (induites par un haut-parleur) contrôlés par une sonde placée dans le sillage. Encore ici, les méthodes se concentrent sur l'élimination des tourbillons ce détachant du corps. Il est aussi mentionné que les tourbillons de von Kármán semblent exister seulement en paires et que la suppression d'un tourbillon au-dessus, par exemple, élimine le tourbillon en dessous du modèle.

En général, pour les méthodes agissant dans la couche limite, on retrouve beaucoup de cas de réduction de la traînée par déclenchement de la turbulence à un Reynolds critique dans le but de retarder le décollement. La turbulence est déclenchée soit en introduisant plus de quantité de mouvement dans l'écoulement ou en provoquant une pré-séparation, avec rattachement, et générant ainsi une couche limite turbulente qui décollera plus en aval. On a généralement recours à de la rugosité ou à des fossettes à la paroi pour introduire cette quantité de mouvement. Ces fossettes peuvent être comparées aux alvéoles que l'on retrouve sur une balle de golf.

Choi *et al.* [9] ajoutent que les modèles tridimensionnels ne sont pas bien couverts par la littérature et que ce qui est connu est qu'il est possible d'influencer leur traînée non seulement en modifiant les propriétés du sillage mais aussi en augmentant leur épaisseur de quantité de mouvement avant le décollement.

Par ailleurs, Choi *et al.* [9] ne rapportent aucune méthode de recaptage d'énergie. Ils mentionnent cependant que certains auteurs se demandent si la réduction de traînée optimale est en fait un écoulement potentiel où la pression sur les parois est balancée et ne contribue pas au coefficient de traînée. Dans le cas du véhicule Ahmed, une telle situation équivaldrait à une réduction de la traînée d'environ 85% à 90%. Le fait que des auteurs se posent encore cette question montre qu'il y a évidemment possibilité de réduire les pertes d'énergies en «évitant» le plus possible le fluide ou en recapturant son énergie cinétique avant qu'elle ne se dissipe ou, en d'autres mots, en tentant de réduire les pertes causées par le coefficient de pression au minimum.

Beaudoin et Aider [5] rapportent que la suppression des tourbillons<sup>2</sup> longitudinaux formés aux bouts du véhicule Ahmed réduit nettement la traînée et enlève la plupart des propriétés tridimensionnelles de l'écoulement. Ils suppriment ces tourbillons à l'aide d'ailerons placés sur les bouts de la paroi oblique du véhicule. Leurs mesures sont prises pour un angle oblique de 30°, ce qui correspond approximativement à l'angle de plus forte traînée du véhicule Ahmed. Ils ont testé en soufflerie l'effet d'ajouter des ailerons à différents endroits sur la partie arrière du véhicule et notent un certain succès à plusieurs de ces endroits. Ils rapportent les combinaisons d'ailerons les plus efficaces. L'angle optimal de ces ailerons varie selon la vitesse de l'écoulement extérieur et cela confirme les soupçons qu'une pièce mobile, à contrôle actif, a du moins le potentiel de pouvoir s'ajuster aux conditions auxquelles le véhicule est soumis si la capture d'énergie cinétique du fluide est trop complexe pour être présentement mise en pratique. Toujours dans la même optique, Lehugeur *et al.* [23] parviennent aussi à réduire la traînée en atténuant fortement les tourbillons longitudinaux et réduisant leur vorticité de 75% par un soufflage effectué là où Beaudoin et Aider [5] utilisent des ailerons.

---

<sup>2</sup>Voir la figure 6.1.

## 2.2 Analyses du modèle Ahmed

### 2.2.1 Résultats expérimentaux publiés

Selon les résultats expérimentaux publiés par Ahmed *et al.* [1], l'écoulement à l'arrière du modèle Ahmed est caractérisé par deux zones de recirculation situées dans une bulle de décollement qui prend place sur la paroi arrière verticale du véhicule. Une autre bulle de décollement accompagnée d'une autre zone de recirculation prend place sur l'angle oblique du véhicule lorsqu'il atteint  $30^\circ$ , angle où la traînée atteint son maximum. Ahmed *et al.* [1] rapportent que près de 85% de la traînée sur le modèle provient de la pression.

Lienhart *et al.* [25] observent un décollement sur la surface oblique du modèle pour un angle de  $35^\circ$  tandis qu'à  $25^\circ$  l'écoulement semble en contact avec la paroi sur la surface oblique à l'exception d'une petite bulle de séparation au début de cette surface. Leur écoulement est représenté dans la figure 6.1. Ils notent ces deux précédentes observations d'après leurs photographies de couches d'huile appliquées sur le modèle lors de leurs expériences en soufflerie. Lienhart *et al.* [25] déduisent qu'il y a une zone de décollement lorsqu'il y a absence de sillons dans l'huile et notent aussi une caractéristique bidimensionnelle de l'écoulement lorsque les sillons d'huile sur le modèle sont tous parallèles.

La paroi oblique du modèle présente des structures quasi-bidimensionnelles pour de très petits angles; elles deviennent de plus en plus tridimensionnelles lorsque l'angle augmente, et ce jusqu'à un angle critique d'environ  $30^\circ$ . À  $35^\circ$  l'écoulement sur cette paroi redevient bidimensionnel. Cette caractéristique variant selon l'angle oblique est due à la formation des tourbillons longitudinaux sur les «bouts»<sup>3</sup> de la paroi arrière du véhicule. Ils interagissent avec l'écoulement bidimensionnel en place. Les tourbillons se forment sur la paroi oblique pour de petits angles et sur la paroi verticale pour des angles supérieurs à  $30^\circ$ .

Ahmed *et al.* [1] rapportent qu'à l'angle de «crise de traînée» de  $30^\circ$  il suffit d'ajouter une plaque verticale et parallèle à l'écoulement située 0.025 m en aval du véhicule pour passer d'un régime à haute traînée ( $C_D = 0.378$ ) à un régime à basse traînée ( $C_D = 0.260$ ). Le frottement sur la plaque n'est pas calculé dans ce coefficient de traînée mais il ne pourrait contribuer que minimalement au coefficient total. En fait, l'idée que les auteurs tentent de souligner est que cette simple modification de l'écoulement en-

---

<sup>3</sup>Extrémités de la pièce sur l'axe d'envergure.

traîne un changement majeur dans la résistance aérodynamique sur le modèle car les tourbillons longitudinaux sont affaiblis et le fluide prend alors une distribution beaucoup plus bidimensionnelle. Cette modification ne peut être modélisée en simulation bidimensionnelle mais elle se rapproche vraisemblablement beaucoup plus d'une simulation bidimensionnelle que tridimensionnelle vu que les caractéristiques tridimensionnelles de l'écoulement sont fortement atténuées par la présence de la plaque.

## 2.2.2 Résultats numériques publiés

Howard et Pourquie [19] rapportent que dans leurs simulations le coefficient de frottement contribue à moins de 10% du coefficient de traînée total : la majorité de la traînée est créée par la différence de pression entre les parois avant et arrière du véhicule.

Möller *et al.* [29] ont utilisé OF afin de simuler l'écoulement sur un modèle Ahmed tridimensionnel et ont obtenu des résultats de traînée et portance concordant avec la littérature pour la plupart des angles obliques (25° et 35°) et angles de lacet (0°, 9°, et 15°) testés. Ils ont choisis d'utiliser un algorithme d'écoulements stationnaires. Ils ont utilisé les modèles  $k-\omega$ -SST et Realizable-K- $\epsilon$ . Leurs calculs ont été effectués à une vitesse de l'écoulement extérieur de 40 m/s et dans un domaine de 15 x 1.87 x 1.4 m, comme suggéré par le ERCOFTAC. Ils ont aussi manipulé la condition limite de la paroi représentant la chaussée afin d'obtenir une couche limite réaliste et pour ce faire ils ont forcé une condition de paroi mobile<sup>4</sup> en amont du modèle et fixe en-dessous et en aval du modèle. Il semble possible qu'ils aient eu à ajuster la couche limite incidente simplement parce qu'ils utilisent un domaine beaucoup plus grand qu'en soufflerie en aval du véhicule. D'après l'image du domaine qu'ils ont utilisés il semble en fait qu'ils aient utilisé la paroi mobile au sol jusqu'à une distance en aval du corps approximativement égale à celle que les autres auteurs utilisent.

Sur un modèle de véhicule plus détaillé que le corps Ahmed et avec un différent logiciel de CFD, le modèle  $k-\epsilon$  a aussi été utilisé par Angelis *et al.* [2] pour simuler un écoulement bidimensionnel entourant un véhicule à corps non profilé. Contrairement aux faiblesses connues du modèle  $k-\epsilon$  ils ont obtenu une meilleure prédiction des vitesses de l'écoulement près de la paroi qu'à la frontière de la couche limite. Des fonctions de parois ont servies à résoudre le fluide près de la paroi, ce qui fait de ce modèle un homologue du modèle  $k-\omega$ -SST. Angelis *et al.* [2] rapportent que leur modèle donne

---

<sup>4</sup>Condition limite qui n'influence pas la vitesse parallèle à la paroi du fluide collé à cette dernière et donc qui ne crée pas de couche limite.

certaines discordances par rapport aux résultats expérimentaux qu'ils ont produits eux-mêmes et ils attribuent cela à une faiblesse du modèle  $k-\epsilon$ . Leurs résultats numériques sont tout-de-même généralement acceptables. Leurs mesures de vitesses expérimentales ont été prises par anémométrie laser.

Une étude numérique bidimensionnelle de Bruneau *et al.* [7] sur le  $C_D$  où différentes surfaces du modèle Ahmed sont remplacées par des surfaces poreuses produit des  $C_D$  concordant, à l'intérieur d'une marge raisonnable, avec les résultats obtenus dans la littérature générale. Le modèle Ahmed utilisé a un angle de la paroi oblique de  $30^\circ$ , angle auquel on s'attend à observer une certaine influence des structures tridimensionnelles; le nombre de Reynolds est de  $R_L = 3 \times 10^4$ , ce qui correspond à une vitesse de l'écoulement extérieur de 0.5 m/s. Les auteurs sont au courant des structures tourbillonnaires tridimensionnelles (longitudinales) et mentionnent à ce sujet qu'ils souhaitent plutôt voir s'il y a possibilité de réduire la taille de la bulle de séparation qui se forme à l'arrière du modèle sur sa ligne de symétrie. Leur étude indique aussi que le nombre de Reynolds semble avoir une faible influence sur le  $C_D$  obtenu pour un corps Ahmed, même pour de très grandes différences du  $R_L$ .

Plusieurs auteurs utilisent des modèles de Simulation des Grandes Échelles (SGE)<sup>5</sup> pour leur capacité à résoudre les structures turbulentes avec une précision améliorée sans toutefois nécessiter une analyse en Simulation Numérique Directe (SND)<sup>6</sup> qui demande beaucoup plus de temps de calcul. Par contre, les modèles SGE s'appliquent généralement aux calculs tridimensionnels et demandent un maillage très adapté à l'écoulement, il faut donc connaître les propriétés générales de l'écoulement avant de le simuler ou sinon il faut procéder par itération. Bouris et Bergeles [6] ont tout-de-même obtenus de bons résultats lorsqu'ils ont modélisé la turbulence avec la SGE pour un corps non-profilé bidimensionnel soumis à un écoulement incident avec génération de tourbillons de Von Kármán.

La plupart des simulations numériques du corps Ahmed rapportées dans la littérature sont effectuées en trois dimensions. Selon Guilmineau [16], cela est dû au fait que l'écoulement sur ce corps a des propriétés tridimensionnelles qui deviennent particulièrement importantes lorsqu'on arrive dans la zone de «crise de traînée» découverte par Ahmed *et al.* [1] et qu'elles influencent évidemment le  $C_D$  du modèle. Ces propriétés tridimensionnelles se résument par la présence de deux tourbillons longitudinaux qui se forment sur les cotés arrière du véhicule et qui viennent influencer l'écoulement bidimensionnel situé sur les parois arrière du véhicule. Un autre facteur qui pousse la communauté scientifique à faire de plus en plus d'analyses tridimensionnelles du corps

---

<sup>5</sup>LES en anglais.

<sup>6</sup>DNS en anglais.

Ahmed est l'accès à des machines grappes<sup>7</sup> très puissantes qui permettent l'analyse de maillages comportant un grand nombre de cellules beaucoup plus rapidement que l'analyse de maillages comportant moins de cellules de plus petites tailles. Cela est dû au fait que lorsqu'en analyse instationnaire on considère une cellule deux fois plus petite on doit diviser le pas de temps en deux tandis que si on double le nombre de cellules on peut simplement doubler le nombre de processeurs qui effectuent le calcul ; on ne peut pas nécessairement doubler le nombre de processeurs lorsqu'on divise le pas de temps car la communication d'un processeur à un autre est limitante et qu'il n'est pas efficace d'attribuer un nombre trop petit de cellules à chaque processeur. Les processeurs doivent communiquer ensemble plus souvent lorsqu'il y a plus de pas de temps.

Un problème commun des modèles de turbulence couramment utilisés est leur faible capacité à résoudre les écoulements décollés. Par exemple, dans le cas du véhicule Ahmed, Guilmineau [16] rapporte que toutes les analyses numériques tridimensionnelles qu'il a effectué sur le corps Ahmed à angle oblique de  $25^\circ$  ont manqué de prédire que l'écoulement se recollait à la surface à environ mi-chemin de la fin de la paroi oblique. Il a utilisé plusieurs différents modèles de turbulence dont le Spalart-Allmaras et le  $k-\omega$ -SST.

## 2.3 Validité des résultats publiés

Pour une simulation bidimensionnelle utilisant un modèle de turbulence Spalart-Allmaras et un nombre de Reynolds  $R_L = 1 \times 10^4$ , il a été démontré par Julien et Métivier [20] que la position des parois extérieures, qui délimitent le domaine de l'écoulement, influence les forces appliquées sur le modèle par le fluide. Pour obtenir des résultats qui représentent la réalité, les limites du domaine de calcul doivent être situées suffisamment loin du modèle. Les simulations d'une aile fixe de Julien et Métivier [20] rapportent que pour une paroi extérieure située à moins de 5 fois la longueur de corde de cette aile, les coefficients de traînée et de portance sont largement exagérés. Pour obtenir un  $C_D$  en dedans de 1% de ce que l'on obtient pour un domaine qui tend vers l'infini on doit utiliser une distance d'au moins 7 fois la longueur de corde de l'aile. Au delà d'une distance de 10 cordes, les valeurs atteignent une erreur de moins de 0.2% pour la traînée et 1% pour la portance. Ils mentionnent aussi dans leur rapport que les effets d'une distance réduite en amont du modèle seront une traînée augmentée par le frottement et une portance augmentée par la pression.

Les observations de Julien et Métivier [20] semblent généralement en concordance

---

<sup>7</sup>Cluster en anglais.

TAB. 2.2 – Dimensions approximatives des domaines utilisés par quelques auteurs

<b>Auteur</b>	<b>Amont</b>	<b>Aval</b>	<b>Dessus</b>	<b>Cotés (3D)</b>
Franck <i>et al.</i> [13]	$2L$	$6.5L$	$L$	<i>n.d.</i>
Howard et Pourquie [19]	$2L$	$5L$	$0.85L$	$0.8L$
Vengadesan et Nakayama [38]	$7L$	$18L$	$7.5L$	<i>n.d.</i>
Guilmineau [16]	$2L$	$L$	$3L$	<i>n.d.</i>
Bruneau <i>et al.</i> [7]	$2L$	$L$	$L$	$0L$
Beaudoin et Aider [5] <sup>a</sup>	$L$	$2.5L$	$L$	$2.5L$
Angelis <i>et al.</i> [2] <sup>b</sup>	$L$	$4.66L$	$2.6L$	$0L$

---

<sup>a</sup>Expérimentale.

<sup>b</sup>Différente géométrie.

avec les choix de domaines que les auteurs s'étant penchés sur le modèle Ahmed ont constatés. La plupart des essais documentés de calculer numériquement la traînée sur le modèle Ahmed ne respectent pas cette distance de 10 cordes en amont du véhicule et cela est vraisemblablement parce que les effets du frottement sont minimes sur le corps Ahmed et qu'une différence n'apparaît pas dans le  $C_D$ . Le tableau 2.2 donne un aperçu des différentes distances utilisées par les auteurs ayant publié leurs résultats d'analyses du corps Ahmed, où plusieurs d'entre eux utilisent un modèle de turbulence de type SGE.

Dans la littérature, la grande majorité des analyses expérimentales et numériques de l'écoulement sur le corps Ahmed sont effectuées au-dessus d'un sol immobile relativement au véhicule, comme si le cas étudié était un véhicule étant transporté par un tapis roulant sans fin et non propulsé par ses roues ; ceci est une simplification effectuée en soufflerie pour éviter d'avoir recours à un tapis roulant, qui permettrait de mieux représenter la réalité. Ensuite, les paramètres des souffleries sont pris tels quels dans les analyses numériques afin d'éviter des différences qui modifieraient inévitablement l'écoulement. Les propriétés générales de l'écoulement ne sont pas modifiées par cette simplification mais Krajnovic et Davidson [22] calculent une influence de 8% sur le coefficient de traînée ainsi qu'un sillage modifié. Par contre, il faut rappeler que, pour ce mémoire, le choix de modéliser le véhicule Ahmed est fait afin de reproduire un écoulement typique de véhicule et non un véhicule spécifique. Il faut cependant garder ce fait important à l'esprit si des analyses d'un véhicule spécifique étaient considérées. Comme pour la plupart des chercheurs, les résultats expérimentaux produits par Ahmed *et al.* [1] proviennent d'une expérience où le sol est représenté par une plaque plane. Cela est équivalent à ajouter une couche limite supplémentaire entre le véhicule et le sol due à la différence de vitesse entre le sol et l'écoulement et ajouter une couche limite sur le sol en amont du véhicule où en pratique il n'y en aurait pas. Cela explique peut-être

aussi le choix d'un domaine rétréci en amont du corps Ahmed. Il est probable que la distance entre le modèle et le sol immobile soit assez grande pour que la couche limite qui se forme entre le fluide et le véhicule soit semblable à celle qui se formerait entre un sol réaliste et le modèle. Les autres parois de la soufflerie ne sont pas mobiles mais leur influence est plutôt négligeable vu leur position éloignée.

Par ailleurs, il a été rapporté par Kim et Geropp [21] que le simple fait d'utiliser une chaussée mobile, modifie la portance et légèrement la traînée. Ils recourent à un tapis roulant pour simuler la différence de vitesses qu'il doit y avoir entre le véhicule et la chaussée. Strachan *et al.* [35] rapportent aussi, pour la simulation du modèle Ahmed avec une chaussée mobile, la présence de structures tourbillonnaires qui n'avaient pas été détectées par les auteurs précédents.

À un nombre de Reynolds  $R_L = 4.82 \times 10^6$ , Barlow et Guterres [3] trouvent une certaine influence de la distance entre la chaussée et un modèle semblable au Ahmed sur le coefficient de traînée du modèle. Ils rapportent que l'influence sur le  $C_D$  est beaucoup plus prononcée dans le cas d'un modèle à surface rugueuse et que pour un modèle à surface lisse, le coefficient de traînée subi une modification d'environ 1% à 5% en doublant la distance entre le modèle et le pavé. Par contre, les distances étudiées par Barlow et Guterres [3] sont supérieures à  $0.3L$  alors que dans le cas du modèle Ahmed, la distance entre la chaussée et le véhicule est approximativement égale à  $0.05L$ . Il semble donc important pour la simulation d'un véhicule spécifique, ayant toutes ses pièces à découvert sous le véhicule, d'utiliser la bonne distance entre le modèle et la chaussée.

## 2.4 Modélisation de la turbulence

Parmi les modèles de turbulence offerts par OF, certains sont mieux adaptés à certaines applications. Un algorithme pré-codé a été choisi pour les simulations afin d'éviter les complications associées à l'intégration d'un nouveau modèle de turbulence dans le logiciel. Il est possible de manipuler les fichiers sources du logiciel OF et d'incorporer une méthode numérique basée sur des équations et méthodes choisies. Par contre, il est tout-de-même possible de modifier un modèle afin de raffiner la solution. De plus, plusieurs constantes peuvent être ajustées pour chaque modèle. D'un modèle à l'autre et d'un angle oblique à l'autre, les résultats seront plus ou moins en concordance avec les résultats expérimentaux. Shih *et al.* [33] soulignent aussi que le modèle standard  $k-\epsilon$  n'est pas fiable pour les écoulements à fort cisaillement et les écoulements décollés. Parmi les modèles inclus dans OF, on trouve le *Realizable - k -  $\epsilon$*  et le  $k-\omega$ -SST. Ils sont basés sur des modèles améliorés du  $k-\epsilon$  provenant des articles de Shih *et al.* [33]

et de Menter et Esch [28] respectivement. Le modèle *Spalart – Allmaras* est basé sur l'article de Spalart et Allmaras [34]. Ces trois modèles ont été considérés car les deux premiers sont réputés pour leur capacité améliorée à résoudre les écoulements décollés et le dernier est légèrement plus simple et très répandu pour les simulations aéronautiques.

Le modèle  $k-\omega$ -SST utilise les équations  $k-\epsilon$  pour résoudre la turbulence loin des parois, là où le modèle  $k-\epsilon$  est efficace. Le modèle  $k-\omega$ -SST a été testé par Menter et Esch [28] et leurs résultats montrent qu'il prédit bien les points de décollement et les propriétés de l'écoulement près des parois. De plus, il évite l'accumulation d'énergie turbulente dans les zones stagnantes et ne subit pas une influence déraisonnable de l'écoulement extérieur, deux problèmes typiquement associés au modèle  $k-\epsilon$ .

Menter [27] mentionne que pour une condition de paroi sans glissement il est préférable d'avoir recours à une condition limite de  $\omega$  définie selon l'équation suivante,

$$\omega = 10 \frac{6\nu}{\beta_1(\delta y)^2} \quad (2.1)$$

où  $\delta y$  représente la distance entre le centre de la première cellule et la paroi.  $\nu$  est la viscosité cinématique et  $\beta_1 = 0.075$  est une constante. Le 10 est un multiplicateur déterminé arbitrairement pour ajuster la valeur de  $\omega$  à ce quelle est à la paroi puisque  $\omega = \frac{6\nu}{\beta_1(\delta y)^2}$  au centre de la première cellule.

D'un avis sensiblement similaire, Hellsten [17] rapporte que le modèle  $k-\omega$ -SST présente une certaine dépendance à la densité du maillage près de la paroi mais qu'elle est tout-de-même moins prononcée que pour les modèles  $k-\epsilon$  et  $k-\omega$ . Il note aussi que la prédiction du coefficient de frottement, qui dans notre cas influence la composante visqueuse du  $C_D$  sur le corps Ahmed, est plus précise pour le modèle  $k-\omega$ -SST; la composante visqueuse compte pour 5% à 15% du coefficient de traînée total. Ses tests numériques sont conduits sur une couche limite de plaque plane à haut nombre de Reynolds. Il rapporte aussi que le modèle  $k-\omega$ -SST se comporte mieux pour des  $R_L \gtrsim 10^6$ . Il propose de remplacer la constante 10 dans l'Éq. 2.1 par une constante de 1.5. Selon Hellsten [17], cette équation peut aussi être réécrite en fonction de  $\frac{(\frac{\partial u}{\partial y})^2}{y^{+2}}$  où  $(\frac{\partial u}{\partial y})$  représente le gradient normal à la paroi de la vitesse tangentielle à la paroi. Il montre ensuite que la dépendance du coefficient de frottement sur la distance entre la paroi et le centre de la première cellule est très atténuée dans les régions  $0 < y^+ < 4$  lorsqu'on a recours à la constante 1.5 et que les autres données ne sont pas influencées. Il ajoute que l'importance de changer ce ratio est basée sur le fait qu'un maillage plus serré près de la paroi avait tendance, dans les équations originales de Menter [27], à surestimer la valeur de  $\omega$  puisque la méthode de différenciation de  $\omega$  a recours à l'épaisseur de la première cellule. Il faut tout-de-même souligner que Menter [27] a vérifié la validité

de ses équations pour différents types d'écoulements, incluant une marche provoquant un décollement, tandis qu'Hellsten [17] s'est pratiquement limité à une plaque plane. On ne peut donc pas affirmer que la version modifiée du modèle  $k-\omega$ -SST de Hellsten [17] soit plus appropriée que celle de Menter [27] pour le corps Ahmed. De plus, Maciel [26] souligne que la condition limite de la variable  $\omega$  à la paroi est connue pour avoir une grande influence sur les résultats ; il ne serait donc pas recommandé de jouer avec la valeur présentement utilisée par OF sans, par la suite, valider la nouvelle condition utilisée.

La variable  $y^+$  sert à donner une idée de la finesse du maillage près de la paroi. Les résultats rapportés par Howard et Pourquie [19] utilisent un  $y^+$  moyen d'environ 80 qui atteint 400 à son maximum. Ces derniers rapportent aussi différents auteurs qui utilisent des  $y^+$  moyens de 30 et 200. Un  $y^+$  couvrant la zone interdite de 5-30 n'est pas recommandé car les structures tourbillonnaires seront partiellement captées par le modèle et les résultats perdront de la précision en comparaison avec les calculs utilisant des  $y^+$  de moins de 1-4 ou de plus de 30. Thompson *et al.* [37] recommandent un  $y^+ < 1$  pour un modèle de turbulence à deux équations. Par contre, pour le modèle  $k-\omega$ -SST il semblerait acceptable de se trouver dans la zone interdite. Et selon De Villiers [11] lorsqu'on utilise un modèle SGE, il ne semblerait pas y avoir de zone interdite pour la valeur de  $y^+$ . Par ailleurs, avec un modèle de turbulence  $k-\epsilon$  Gilliéron et Chometon [15] n'ont pas noté de problème lié à l'utilisation d'un  $y^+ = 30$  en moyenne qui comporte inévitablement beaucoup de valeurs dans la zone interdite. Il semblerait que la meilleure technique pour déterminer si les résultats obtenus sont biaisés par la valeur de  $y^+$  serait de vérifier l'influence d'une légère modification du  $y^+$  sur le cas en question ; cette méthode de validation qu'on appelle un test de raffinement du maillage sera discutée plus en détail dans les sections 3.8.3 et 4.1.2. Il est donc apparent qu'un degré de précision tout-de-même appréciable peut être obtenu en ayant recours à des fonctions de parois dans la couche limite même si elles ne peuvent pas analyser aussi bien les zones de décollement. La section 3.4.4 donne les détails du calcul du nombre de Reynolds local de la turbulence,  $y^+$ .

## 2.5 Fiabilité et état du logiciel d'analyse

Le logiciel OF est en constante évolution, et il est reconnu comme aussi fiable que les logiciels commerciaux concurrents. Par exemple, Campos [8] a démontré que les coefficients de traînée obtenus par OF en analyses tridimensionnelles ont des erreurs qui varient entre 0.3% et 2% pour plusieurs modèles de véhicules tels que des Audi et des Volkswagen. Toujours avec le logiciel OF, Möller *et al.* [29] ont aussi obtenus des coef-

ficients de traînée en concordance avec les résultats expérimentaux publiés. Par contre, ils notent qu'une certaine connaissance du CFD est requise afin de bien ajuster le programme et d'obtenir la précision des résultats qu'ils recherchent. Ils notent aussi une faiblesse : prédire le coefficient de portance pour le cas Ahmed avec un angle oblique de  $35^\circ$ . Ils ont légèrement modifié l'algorithme d'OF mais ne donnent pas de détails sur cette modification, il est donc impossible de déterminer si cette modification est réellement bénéfique. Ils mentionnent aussi dans leur présentation que seulement leurs meilleurs résultats sont rapportés, c'est probablement le cas pour plusieurs auteurs. La distribution libre et à code source ouvert de OF lui donne un aspect plus malléable et permet à ses utilisateurs d'y intégrer de nouvelles fonctions visant à satisfaire leurs besoins. La dernière version, nommée 1.5-dev (dev pour en développement) inclut l'interface de rotation développée en grande partie par Martin Beaudoin de l'Institut de Recherche en Électricité du Québec (IREQ), filiale de Hydro-Québec. Le logiciel intègre aussi les fonctions permettant de calculer les forces et couples sur toute paroi solide du domaine. Ces deux aspects du logiciel ouvrent donc une grande porte vers l'analyse énergétique de pièces en mouvement. Par ailleurs, Olivier et Dumas [30] rapportent que le logiciel OF additionné d'un module d'interaction fluide structure donne des résultats quasi-identiques à ceux générés par le logiciel commercial Fluent pour le calcul des forces subies par un objet élastique, en mouvement, exposé aux tourbillons générés par un objet à corps non-profilé situé en amont.

# Chapitre 3

## Maillage et approche numérique

Puisque la recherche est un processus itératif, ici sont rapportées les méthodes utilisées pour obtenir les résultats finaux du projet ainsi que les étapes et difficultés rencontrées. Cette section est jugée enrichissante pour un chercheur souhaitant se pencher sur la question de l'analyse numérique des fluides sur le corps Ahmed ou encore de l'analyse d'un modèle avec des pièces en mouvement.

D'abord la section 3.1 couvre les détails des modèles géométriques utilisés pour les simulations, ensuite la section 3.2 donne les différents paramètres utilisés dans les simulations. Une discussion sur le choix d'une analyse stationnaire ou instationnaire suit dans la section 3.3. La section 3.4 couvre les variables adimensionnelles qui entrent en jeu dans les simulations numériques, on y inclut une discussion sur les effets d'une variation de la vitesse de simulation à nombre de Reynolds constant. Après, la section 3.5 couvre tous les maillages documentés dans ce mémoire. On couvre l'approche numérique à la section 3.6, les conditions aux limites du domaine dans la section 3.7, la validation des calculs dans la section 3.8, et finalement la méthode employée pour calculer l'énergie capturée à la section 3.9.

### 3.1 Modèle géométrique

Un modèle géométrique bidimensionnel du corps Ahmed a d'abord été conçu. Les dimensions du véhicule ont été prises directement à partir du profil du modèle Ahmed tel qu'il est montré sur la Fig. 1.1. Un maillage a ensuite été conçu et des simulations ont été effectuées. Après que des résultats satisfaisants aient été obtenus, le maillage a

été modifié pour faire place à une roue à aubes en aval de la paroi verticale arrière. La roue est le capteur d'énergie et elle tourne. On peut voir un schéma représentant la position de la roue à aubes derrière le véhicule dans la Fig. 3.1. Les dimensions du domaine de l'écoulement et les détails du maillage sont discutés dans la section 3.5.

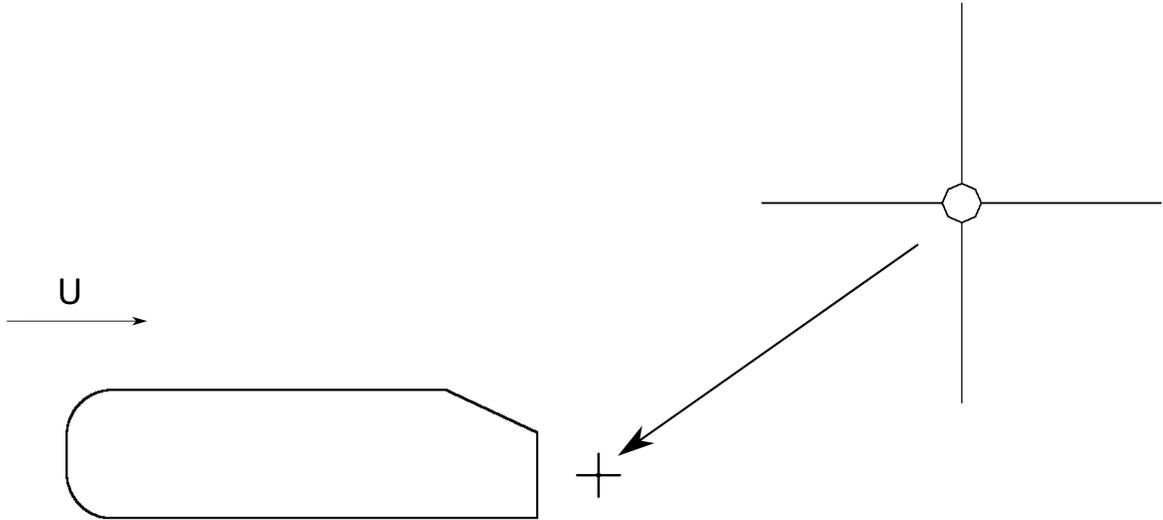


FIG. 3.1 – Schéma du corps Ahmed avec roue à aubes.

## 3.2 Paramètres

La vitesse de l'écoulement extérieur utilisée pour toutes les analyses non-structurées est de  $U = 60 \text{ m/s}$ , la viscosité cinématique est de  $\nu = 14.75 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Les analyses structurées utilisent plutôt une vitesse simulée de  $U = 1 \text{ m/s}$  et une viscosité cinématique de  $\nu = 3.6875 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ . Les conditions initiales et conditions aux parois des variables du modèle de turbulence,  $k$  et  $\omega$ , sont calculées à partir d'une intensité de la turbulence de 0.5% telle que mesurée par Ahmed *et al.* [1] et une échelle de longueur de la turbulence de 5 cm basée sur une approximation. L'angle de la paroi oblique est de  $25^\circ$ .

### 3.3 Solutions en régimes stationnaires et instationnaires

Une question qui se pose dans le cadre du projet est si la solution recherchée aura des propriétés constantes dans le temps. En fait, il est attendu d'obtenir du moins des propriétés (pression, vitesse) constantes en moyennes car les résultats expérimentaux de Guilmineau [16] démontrent une solution constante et symétrique, en moyenne. Pour les calculs avec maillages structurés, la méthode adoptée est tout d'abord d'obtenir une solution qui converge en régime stationnaire et ensuite d'effectuer une analyse instationnaire en démarrant avec les résultats de la solution stationnaire. Ainsi, un sillage est déjà présent au démarrage de la solution instationnaire et la convergence est obtenue plus rapidement. Certains résultats instationnaires ne diffèrent pas, ou presque pas, du résultat stationnaire ; ceci est le cas si l'écoulement étudié est constant dans le temps. Pour les simulations avec maillage non-structuré il a été décidé d'effectuer les calculs directement en mode instationnaire puisque des économies de temps n'étaient pas notés pour la méthode précédente.

### 3.4 Variables adimensionnelles

Plusieurs variables adimensionnelles sont utilisées au cours de l'analyse et elles sont documentées dans la présente section. L'utilisation de ces variables peut avoir une influence majeure sur la qualité des résultats obtenus avec le logiciel OF.

#### 3.4.1 Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds utilisé est basé sur la longueur du modèle. Il est défini selon l'équation suivante,

$$R_L = \frac{U_\infty L}{\nu} \quad (3.1)$$

où  $U_\infty$  représente la norme de la vitesse de l'écoulement non-perturbé et  $L$  la longueur du modèle. Une minorité d'auteurs ont préféré baser leur nombre de Reynolds sur la hauteur du modèle.

Le nombre de Reynolds utilisé pour les analyses structurées est basé sur une vitesse réelle de 40 m/s, une viscosité cinématique  $\nu = 1.475 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ , et une longueur

du véhicule de 1.044 m. Donc,  $R_L = 2.8312 \times 10^6$ . Un modèle de fluide newtonien est employé car l'air a une viscosité constante pas rapport aux forces qui le contraignent. Les analyses non-structurées du corps Ahmed rapportées dans ce mémoire utilisent plutôt une vitesse de l'écoulement de 60 m/s, et donc un nombre de Reynolds  $R_L = 4.25 \times 10^6$ . Cette valeur est en accord avec les analyses expérimentales de Ahmed *et al.* [1].

### 3.4.2 Nombre de Courant

Un pas de temps de  $1 \times 10^{-5}$  seconde est utilisé pour les simulations avec le maillage non-structuré de référence (non-raffiné). Les simulations avec la roue à aubes utilisent un pas de temps du même ordre de grandeur mais variable. Le nombre de Courant  $Co$ , défini dans l'équation suivante, sert de variable qui permet de savoir si la taille du pas de temps causera une divergence du calcul due à une trop grande distance parcourue par le fluide à chaque pas de temps.

$$Co = \frac{\delta t |U|}{\delta x} \quad (3.2)$$

$\delta t$  est la grandeur du pas de temps,  $\delta x$  est la longueur de la cellule dans la direction de l'écoulement, et  $|U|$  est la norme de la vitesse dans la cellule en question. Dans le cas avec roue à aubes, les pas de temps sont automatiquement ajustés à chaque itération de façon à ce que  $Co \leq 0.5$  et cela permet de maintenir la stabilité du calcul en s'assurant que le fluide ne traverse pas plus que la moitié d'une cellule à chaque pas de temps, tel que mentionné par OpenCFD [31]. Le nombre de Courant est calculé pour chaque cellule à chaque pas de temps afin que le pas de temps suivant soit ajusté par rapport au nombre de Courant maximum calculé.

### 3.4.3 Coefficients de traînée et de portance

Pour calculer le coefficient de traînée, la formule standard donnée dans l'équation suivante est utilisée.

$$C_D = \frac{F_d}{0.5 \rho A_{ref} U_\infty^2} \quad (3.3)$$

Où  $\rho$  représente la masse volumique de l'air,  $U_\infty$  la norme de la vitesse de l'écoulement non-perturbé, et  $F_d$  la force totale de traînée sur le modèle.  $A_{ref}$  représente l'aire de la surface de référence du modèle, ici choisie comme étant l'air frontale du modèle, pour être consistant avec [13, 1], et ainsi avec les autres auteurs se référant au modèle Ahmed.

Similairement, on calcule la portance selon l'équation suivante,

$$C_L = \frac{F_l}{0.5\rho A_{ref,L}U_\infty^2} \quad (3.4)$$

où  $F_l$  est la force totale de portance sur le corps et  $A_{ref,L}$  est l'aire de la surface de référence du modèle pour la portance. Cette aire est choisie comme étant l'aire de la section horizontale du modèle, pour être consistant avec les standards généralement acceptés qui veulent que l'aire de référence soit l'aire qui, si changée, aura la plus grande influence sur le coefficient qu'elle sert à calculer. Dans le cas du corps Ahmed, les coefficients de traînée et de portance sont influencés majoritairement par la pression et donc les aires de références sont les aires des surfaces auxquelles les forces calculées sont normales.

### 3.4.4 Distance à la paroi

Un facteur limitant dans les simulations effectuées est le temps requis par un ordinateur pour effectuer le calcul demandé. Donc, il est évident que des simulations tridimensionnelles doivent recourir à un maillage plus grossier qui utilise inévitablement des fonctions de paroi pour estimer les caractéristiques de l'écoulement près de la paroi. On tente de raffiner autant que possible les cellules qui se trouvent dans la couche limite de l'écoulement sur le véhicule. Le temps de calcul augmente lorsqu'on raffine le maillage afin de réduire la valeur  $y^+$ . Cette valeur donne une indication de la taille de la première cellule normale à la paroi par rapport aux tensions que le fluide y subit.

En fait, la variable de paroi  $y^+$  donne la distance adimensionnelle entre le centre d'une cellule et la paroi. Elle représente le nombre de Reynolds local de la turbulence. Elle est calculée selon la formule

$$y^+ = u_*y/\nu \quad (3.5)$$

où la viscosité cinématique est dans notre cas  $\nu = 14.75 \times 10^{-6}m^2/s$  et  $y$  est la distance entre la paroi et le centre de la première cellule. La vitesse de frottement est définie par

$$u_* = \sqrt{\tau_w / \rho} \quad (3.6)$$

où  $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$  et représente la masse volumique. Le cisaillement à la paroi,  $\tau_w$ , est défini par

$$\tau_w = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (3.7)$$

où  $u$  est la vitesse parallèle à la paroi et  $\frac{\partial}{\partial y}$  représente le taux de changement par rapport à la distance à la paroi. La viscosité dynamique est finalement définie,

$$\mu = \rho \nu \quad (3.8)$$

### 3.4.5 Variation de la vitesse à nombre de Reynolds constant

Une méthode courante en calcul numérique des fluides est d'avoir recours à une vitesse de 1 m/s, une longueur de modèle de 1 m et d'ajuster la viscosité de manière à obtenir le nombre de Reynolds désiré. Pour les simulations du modèle avec maillage structuré, une vitesse de 1 m/s a été utilisée en souhaitant augmenter la grandeur des pas de temps du calcul instationnaire et ainsi réduire les erreurs numériques associées à des pas de temps très petits et à une vitesse non-unitaire. Par contre il faut noter qu'en calcul instationnaire il prendra plus de temps au fluide ralenti pour traverser le domaine de calcul et que donc, la solution convergée prend approximativement le même temps réel à être obtenue. En considérant l'Éq. 3.3 il est important de montrer que le coefficient de traînée demeure le même pour différentes vitesses si le  $R_L$  demeure inchangé.

On a  $C_{D1} = \frac{F_{d1}}{0.5\rho A_{ref}(1^2)}$  et  $C_{D40} = \frac{F_{d40}}{0.5\rho A_{ref}(40^2)}$  où les indices inférieurs représentent la vitesse utilisée pour le calcul.  $\rho$  et  $A_{ref}$  demeurent constants. On peut aussi calculer la force sur le corps à partir de l'équation suivante,

$$F_{d1} = \langle \Delta (p_1) \rangle A_{ref} + \langle \mu_1 \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_1 \rangle A_{paroi} \quad (3.9)$$

où  $\Delta(p_1)$  est la moyenne des différences entre les pressions sur la surface frontale et la surface arrière du corps et  $A_{paroi}$  est l'aire totale de la paroi projetée sur les deux plans perpendiculaires qui sont parallèles à l'écoulement.

À  $R_L$  égaux, deux écoulements ont la même distribution de vitesses mais ajustée proportionnellement à la vitesse extérieure et donc  $(\frac{\partial u}{\partial y})_{40} = 40(\frac{\partial u}{\partial y})_1$ . Pour garder les  $R_L$  identiques,  $\mu_{40} = 40\mu_1$ .

L'équation de Bernoulli est utilisée pour démontrer que  $p_{40} = 40^2 p_1$ . Elle s'écrit  $\frac{U^2}{2} + gh + \frac{p}{\rho} = \text{constante}$ . Donc, en suivant une particule de fluide qui prend un chemin partant de loin en amont du véhicule pour se rendre sur la paroi du véhicule où sa vitesse devient nulle, en négligeant la gravité et la viscosité, on peut écrire pour  $U = (40, 0, 0)$  que  $\frac{U_{aval}^2}{2} + \frac{p_{aval}}{\rho} = \frac{U_{paroi}^2}{2} + \frac{p_{paroi}}{\rho}$  et donc  $\frac{40^2 \rho}{2} + \frac{0 \rho}{\rho} = \frac{0^2 \rho}{2} + \frac{p_{paroi_{40}} \rho}{\rho}$  et similairement pour  $U = (1, 0, 0)$  que  $\frac{1^2 \rho}{2} + 0 = 0 + p_{paroi_1}$ . En combinant ces deux équations on obtient  $\frac{40^2 \rho}{2} = p_{paroi_{40}} = 40^2 p_{paroi_1}$ , ce qui équivaut à  $p_{40} = 40^2 p_1$ .

Finalement, on obtient en utilisant l'Éq. 3.9 que pour un  $R_L$  identique,  $F_d$  est dépendante des valeurs qui composent le  $R_L$  puisque  $F_{d_{40}} = (40)(40)F_{d_1}$ . Par contre, le  $C_D$  demeure identique en autant que le  $R_L$  le demeure aussi, ceci est vérifiable en utilisant l'Éq. 3.3 avec les forces trouvées par l'Éq. 3.9. Il est évident que cette démonstration s'applique à tout changement de vitesse et non seulement à l'exemple démontré de 1 m/s et 40 m/s. Ce raisonnement s'applique aussi au  $C_L$ .

## 3.5 Maillage

### 3.5.1 Contexte

Deux différents types de maillages sont étudiés dans cette section. D'abord, les maillages structurés qui ont été utilisés afin de donner les premiers résultats de traînée. Ces maillages ont servi à faire des simulations où l'écoulement extérieur a une vitesse réelle de 40 m/s et une vitesse simulée de 1 m/s. Ensuite, les maillages non-structurés sont couverts, ils sont utilisés pour établir un coefficient de traînée de référence pour les calculs de gains d'énergie et aussi pour effectuer les simulations avec une roue à aubes. Malgré qu'il ait été rapporté un certain succès par Howard et Pourquie [19] quant à l'usage d'un modèle du véhicule suspendu dans l'air pour des calculs de traînée du véhicule Ahmed, il a été choisi de produire une simulation qui inclut l'influence de la proximité d'une route afin d'obtenir des résultats qui représentent bien les expériences de Ahmed *et al.* [1]. D'ailleurs, il est reconnu par Kim et Geropp [21] qu'un sol situé très près du véhicule a une certaine influence sur les propriétés de l'écoulement autour du véhicule.

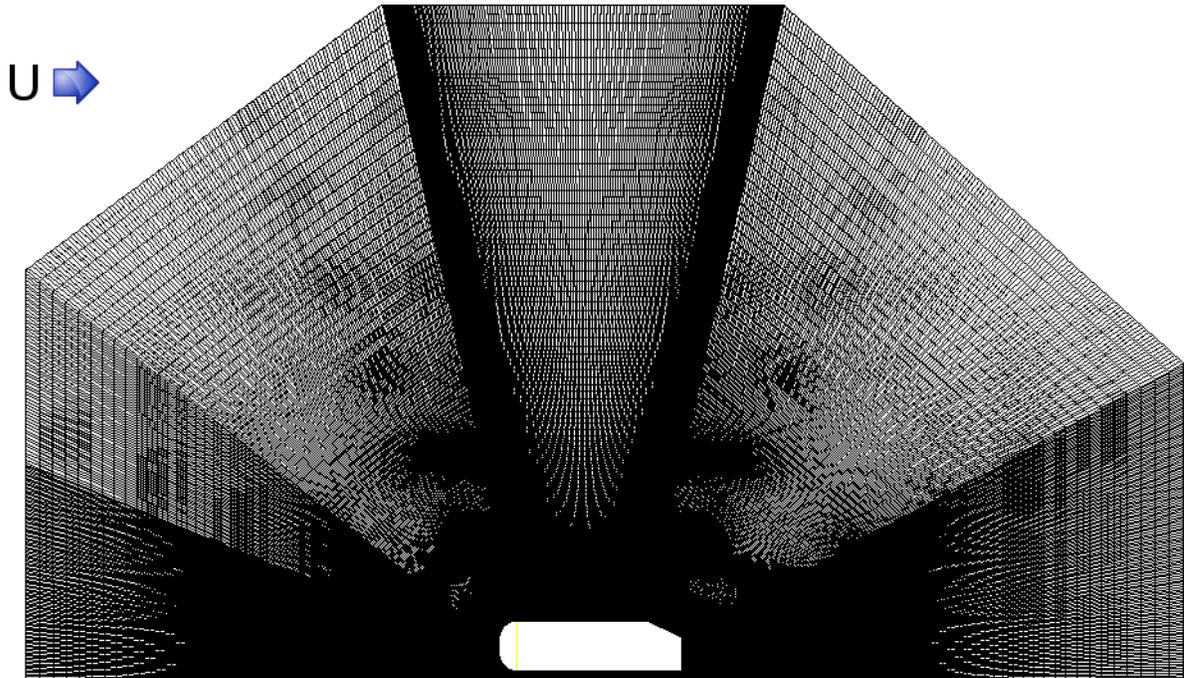
### 3.5.2 Mailleur

Quelques logiciels ont été considérés pour modéliser la géométrie et générer le maillage du modèle. Entre autres : Gmsh, Netgen, Calculix, et Salomé. BlockMesh a aussi été considéré puisqu'il fait parti de la suite OF mais il n'a pas été retenu car il n'offre pas d'interface graphique, ce qui est jugé important pour la construction et la modification des géométries. Le programme retenu est Gmsh. Le choix a été posé sur ce dernier car il s'installe, s'apprend, et s'utilise assez facilement. Il est aussi mis à jour fréquemment et l'auteur est disponible pour répondre aux questions par l'entremise d'une liste de courriels. Gmsh est doté d'une interface graphique. La conversion vers OF des maillages se fait plutôt aisément et les détails de cette conversion sont donnés dans l'annexe A. Comme pour tous les programmes qui ont recours à des maillages, Gmsh et le convertisseur vers OF flanchent lorsque le nombre de cellules demande une quantité de mémoire supérieure à ce qui est disponible. En général, on a besoin de 1 Ko de mémoire vive par cellule. Gmsh utilise un algorithme Netgen, qui est généralement apprécié par les utilisateurs d'OF, pour générer les maillages tridimensionnels. Pour obtenir plus de détails sur le logiciel Gmsh, le lecteur est encouragé à consulter l'article de Christophe Geuzaine et Jean-François Remacle [14].

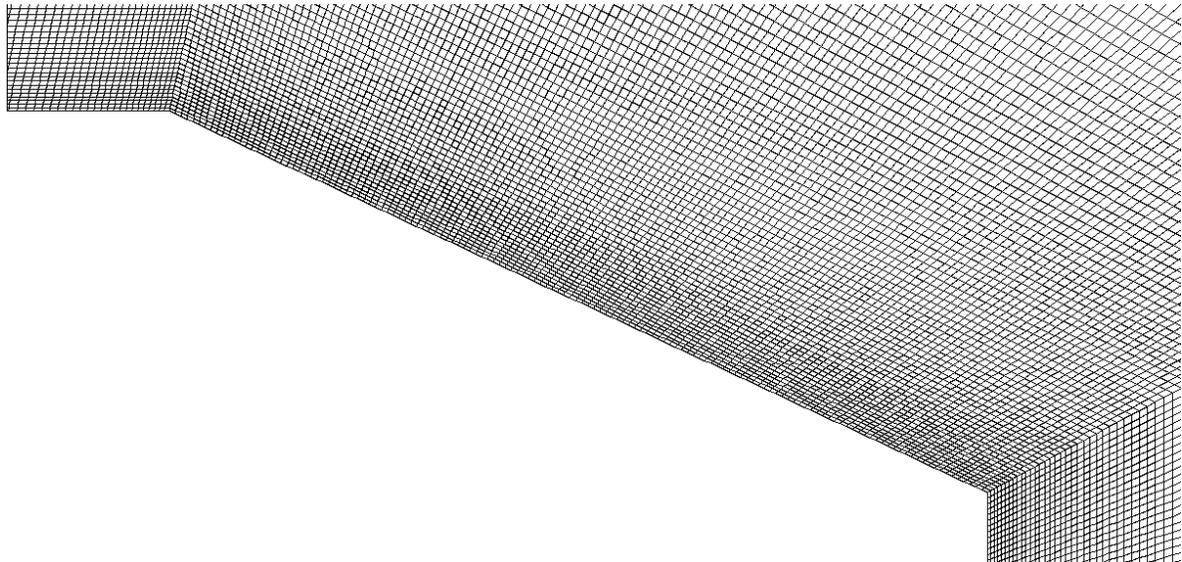
### 3.5.3 Maillage structuré

Le maillage s'avère une partie importante de l'analyse car la résolution de ce dernier déterminera si les structures de petites échelles (présentes surtout près de la paroi) seront prises en compte. Près de la paroi, la variable adimensionnelle  $y^+$  est utilisée pour calculer la distance normalisée entre la paroi et le centre de la première cellule collée à celle-ci. Selon Thompson *et al.* [37], si on souhaite résoudre les petites échelles, nous devons avoir un  $y^+$  de 1-3 pour un modèle Spalart-Allmaras et de moins de 1 pour des modèles à deux équations (tels que  $k-\omega$  et  $k-\epsilon$ ). Un maillage de type structuré a été utilisé près de la paroi pour permettre un ajustement efficace du maillage situé dans la couche limite où l'on s'attend à avoir, du moins dans la partie plane et non-décollée de l'écoulement, des gradients de vitesse et de pression beaucoup plus prononcés en direction normale à la paroi qu'en direction tangentielle. Le maillage orthogonal près de la paroi permet aussi une manipulation plus efficace de la valeur  $y^+$ . Deux choix ont été utilisés pour le maillage en dehors de la couche limite. Le maillage non-structuré donne une malléabilité accrue en s'éloignant de la paroi. Le maillage non-structuré permet d'avoir un plus grand domaine et de donner une plus fine résolution de maillage dans le sillage du véhicule tout en ayant une résolution beaucoup moins serrée en s'éloignant des zones raffinées. Il est inutile et inefficace de résoudre finement les échelles de la

turbulence à travers tout le domaine. La Fig. 3.2 montre le maillage utilisé pour les analyses structurées du modèle à angle oblique de  $25^\circ$ , qui comporte le même nombre de cellules et est quasi-identique au maillage du modèle à angle oblique de  $35^\circ$ . On y voit aussi un agrandissement de la zone oblique du modèle afin de distinguer les cellules situées près de la paroi.



(a) Domaine complet.



(b) Agrandissement de la paroi oblique.

FIG. 3.2 – Maillage utilisé pour les analyses structurées.

Il faut aussi considérer que la valeur de  $y^+$  (voir la section 3.4.4) change beaucoup sur le véhicule Ahmed car le cisaillement à la paroi varie beaucoup entre la zone d'attaque, la zone plane, et les zones de décollement. Il serait donc préférable de maintenir la valeur maximale de  $y^+$  aux environs des valeurs suggérées par Thompson *et al.* [37] quitte à obtenir une valeur minimale de  $y^+$  relativement très petite.

### Épaisseur variable du maillage adapté à la couche limite

Il a été tenté de définir une épaisseur variable du maillage près de la paroi du véhicule pour ainsi éviter une résolution trop fine dans les sections où la couche limite est épaisse et que les gradients de vitesse à la paroi sont plus faibles (donc  $y^+$  plus petit). Par contre, la présence de décollement dont la position calculée varie d'une simulation à l'autre et une forte turbulence empêche la prédiction des endroits où il serait possible de relaxer la résolution du maillage près de la paroi. Par exemple, d'après des simulations antérieures et les hypothèses de couche limite il avait été jugé raisonnable de relaxer la résolution du maillage vers la fin de la «plaque plane» représentant le dessus du véhicule mais des simulations utilisant le modèle  $k-\omega$ -SST en régime stationnaire ont ensuite révélé un  $y^+$  maximal dans cette zone relaxée, possiblement dû au décollement qui survient à la paroi oblique. Pour ce maillage variable, on peut voir les valeurs de  $y^+$  sur la paroi du corps Ahmed à la Fig. 3.3 ; on y voit la distribution de la variable adimensionnelle  $y^+$  sur la paroi du véhicule lors d'une simulation stationnaire utilisant le modèle de turbulence  $k-\omega$ -SST. L'endroit où  $y^+$  est maximal montrait avec le maillage non variable de faibles valeurs de  $y^+$  et c'est pour cela que l'épaisseur des cellules à cet endroit avait été doublée. L'idée a donc été abandonnée.

Il serait toujours possible de réajuster les zones de relaxation du maillage mais le temps requis dépasse le temps de calcul ainsi épargné pour les simulations de ce projet puisque les zones de décollement peuvent changer à chaque modification de la géométrie du modèle. De plus, la zone de la couche limite ne peut pas être si facilement ajustée car le maillage doit maintenir un nombre constant de cellules dans la zone structurée. Une densité de maillage variable sera reconsidérée si les valeurs très éparpillées de  $y^+$  s'avèrent être un problème, ce qui n'a pas été le cas pour les calculs avec maillage structuré ou non-structuré. Les calculs numériques en fluides ont une tendance à donner des décollements qui ne correspondent pas tout à fait à la réalité et qui dépendent du modèle utilisé. D'ailleurs, il n'est pas possible de vérifier l'exactitude du point de décollement pour les simulations comprenant des pièces en mouvement car il n'y a pas d'expérience en soufflerie qui ait été conduite à ce jour.

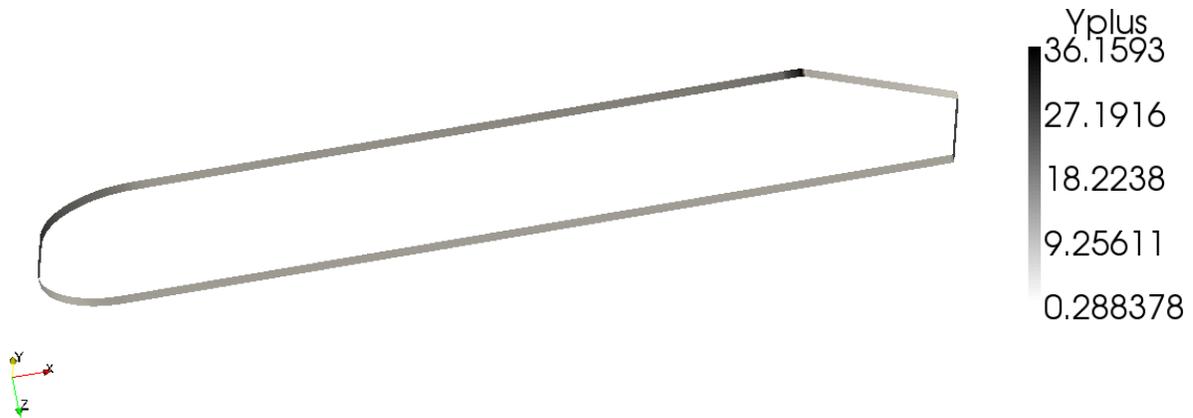


FIG. 3.3 – Distribution de la variable adimensionnelle  $y^+$  sur la paroi du véhicule.

### 3.5.4 Maillage agrandi

Un maillage représentant un domaine extrêmement agrandi a été créé et une simulation numérique a été tentée. Il est montré à la Fig. 3.4. Il mesure  $25L$  en amont, aval, et au-dessus du véhicule et comporte 480 000 cellules. Des résultats stationnaires ont été obtenus dans une marge de temps raisonnable mais les résultats instationnaires demandent un trop gros temps de calcul pour qu'il soit envisageable d'utiliser un maillage comprenant autant de cellules. Un plus fort gradient d'agrandissement des cellules du maillage en s'éloignant des parois aurait pu réduire le nombre de cellules requises. Le maillage du sillage a visiblement été trop raffiné pour le modèle extrêmement agrandi et cela contribue fort probablement à une grande portion du temps de calcul. Il faut faire attention cependant car un fort gradient d'agrandissement donnera de grandes cellules très minces causant le critère «aspect-ratio» d'OF d'exéder la limite permise ; il doit demeurer plus petit que 1000. On considère généralement pour le corps Ahmed qu'un domaine de calcul d'environ  $5L$  en amont,  $1.6L$  au-dessus, et  $10L$  en aval, comme recommandé par ERCOFTAC selon Möller *et al.* [29], est largement suffisant. La distance au-dessus étant choisie petite pour concorder avec les méthodes utilisées par les différents auteurs et pour éviter un maillage comprenant trop de cellules, même si les cellules ajoutées en hauteur sont de plus en plus grandes. On note que le chauffeur d'une voiture ne remarque pas de différence dans la demande énergétique de son véhicule lorsqu'il entre dans un tunnel. Le domaine recommandé par ERCOFTAC concorde, dans les grandes lignes, avec les observations de Julien et Métivier [20] mais les dimensions ont finalement été ajustées selon Ahmed *et al.* [1] pour les simulations avec maillage non-structuré de la setion suivante.

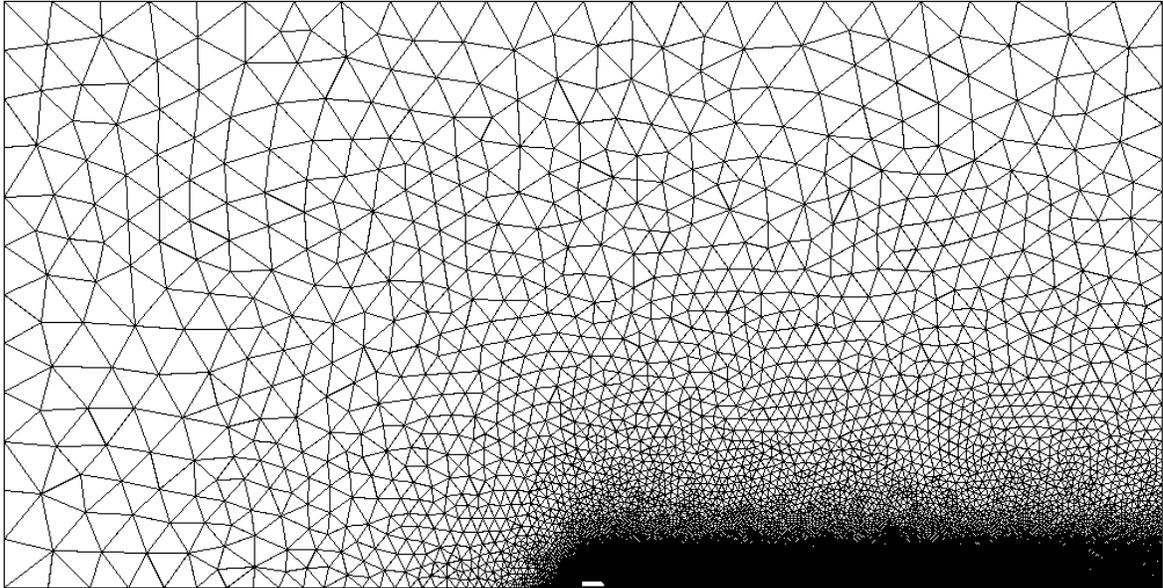


FIG. 3.4 – Maillage agrandi.

### 3.5.5 Maillage non-structuré

Les analyses numériques à un nombre de Reynolds de  $4.25 \times 10^6$  exigent un maillage relativement fin. L'écoulement autour du corps Ahmed est plutôt complexe. Donc, le maillage utilisé pour modéliser le véhicule Ahmed en deux dimensions est le résultat de plusieurs itérations, dont le maillage structuré discuté dans la section 3.5.3. Contrairement aux attentes, il est conclut que le type de maillage le plus approprié à utiliser est un maillage avec très peu de zones structurées. Le maillage structuré des couches limites est donc à peine utilisé pour ledit modèle. On recommande généralement d'avoir 15 cellules dans la couche limite et on estime l'épaisseur de la couche limite à environ 2 cm à son maximum. La couche limite n'est donc pas résolue complètement et l'analyse de la turbulence à ce nombre de Reynolds élevé a recours aux lois de parois du modèle  $k-\omega$ -SST. Donc, le maillage n'utilise des cellules structurées (prismes hexaèdres) qu'aux deux endroits que l'on peut voir sur la Fig. 3.5 qui montre le maillage autour du corps Ahmed ; il est à noter que le domaine extérieur est coupé dans cette figure. Sur le devant du véhicule, le gradient de pression est pratiquement égal en direction normale de la paroi et en direction tangente ; cela rend l'utilisation de cellules allongées pratiquement inutile. En arrière du véhicule, la zone de recirculation est grande et une zone de très basse pression se forme dès le début de la paroi oblique du véhicule : il est donc nécessaire d'aussi bien y résoudre l'écoulement dans la direction tangente à la paroi. Les deux seules zones appropriées pour un maillage structuré sont donc le dessous du véhicule, à une distance raisonnable des parois fortement courbées de l'avant et l'arrière

du corps, et le dessus du véhicule, toujours à une distance raisonnable des parois fortement courbées. Le maillage a aussi dû être raffiné dans la zone du sillage du véhicule pour s'assurer que tous les tourbillons qui se créent dans ce sillage soient tout-de-même assez bien résolus puisqu'ils ont une influence sur les forces de pression qui agissent sur les parois arrières du corps et donc sur la traînée totale. Pour ce qui est de la zone en amont du véhicule, le maillage a aussi dû être raffiné, mais avec une densité légèrement plus faible puisque l'aspect important de cette zone est la prolongation du point selle.

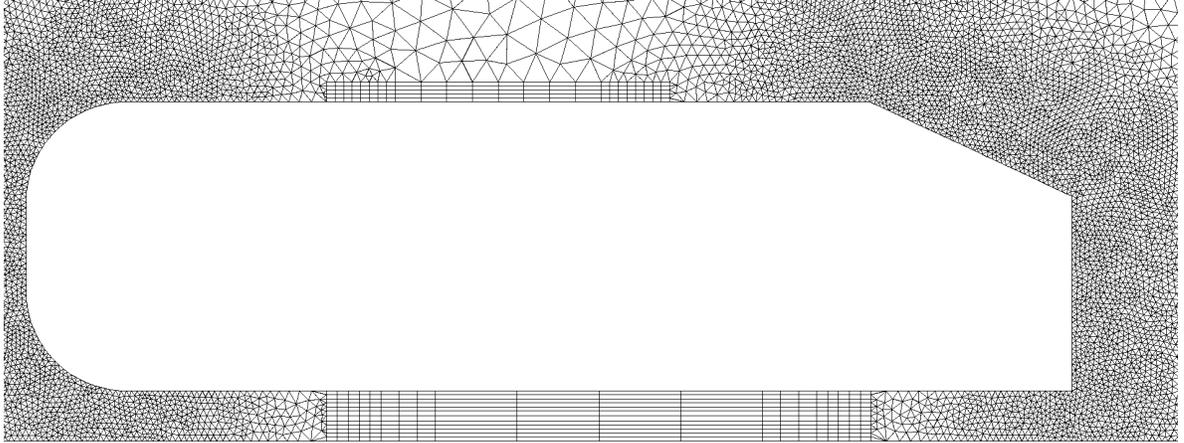


FIG. 3.5 – Maillage non-structuré du corps Ahmed bidimensionnel.

Pour leur analyse numérique tridimensionnelle, Bayraktar *et al.* [4] ont trouvé après des tests de raffinement de leur maillage qu'un maillage ayant 4.4 millions de cellules non-structurées donne un bon accord entre les coefficients de traînée expérimental et numérique. À partir de ce nombre de cellules et en supposant que le nombre de cellules dans les directions longitudinale, latérale, et verticale ( $x,z,y$ ) sont  $a$ ,  $0.25a$ , et  $0.2a$ , respectivement, il est trouvé en utilisant l'équation suivante que le nombre équivalent de cellules pour un maillage bidimensionnel est de 40 000 cellules.

$$a \times 0.2a \times 0.25a = 4.4 \times 10^6 \implies a = 444.80 \quad \therefore N_{cells,2D} = a \times 0.2a \approx 40000 \quad (3.10)$$

Dans cette équation,  $N_{cells,2D}$  est le nombre de cellules du maillage bidimensionnel équivalent au maillage tridimensionnel et  $a$  est l'inconnue. Les maillages utilisés pour ce projet sont légèrement plus grossiers et utilisent entre 27 500 to 34 000 cellules mais ils ont tout-de-même une petite zone structurée qui permet de réduire le nombre de cellules d'environ 500 sans compromettre les résultats.

### Interface de rotation

La «General Grid Interface» (GGI) du logiciel OpenFOAM est utilisée pour permettre à la roue à aubes de tourner par rapport au véhicule. Celle-ci permet de définir un maillage circulaire en rotation à l'intérieur d'un maillage fixe. Les deux maillages sont unis par l'interface qui est représentée par deux cercles coïncidents qui délimitent les parties en rotation et fixe du maillage. Une vitesse de rotation est choisie pour cette zone et l'algorithme résout les valeurs du champ de l'écoulement à l'interface GGI en interpolant entre les facettes des cellules de chaque côté de l'interface.

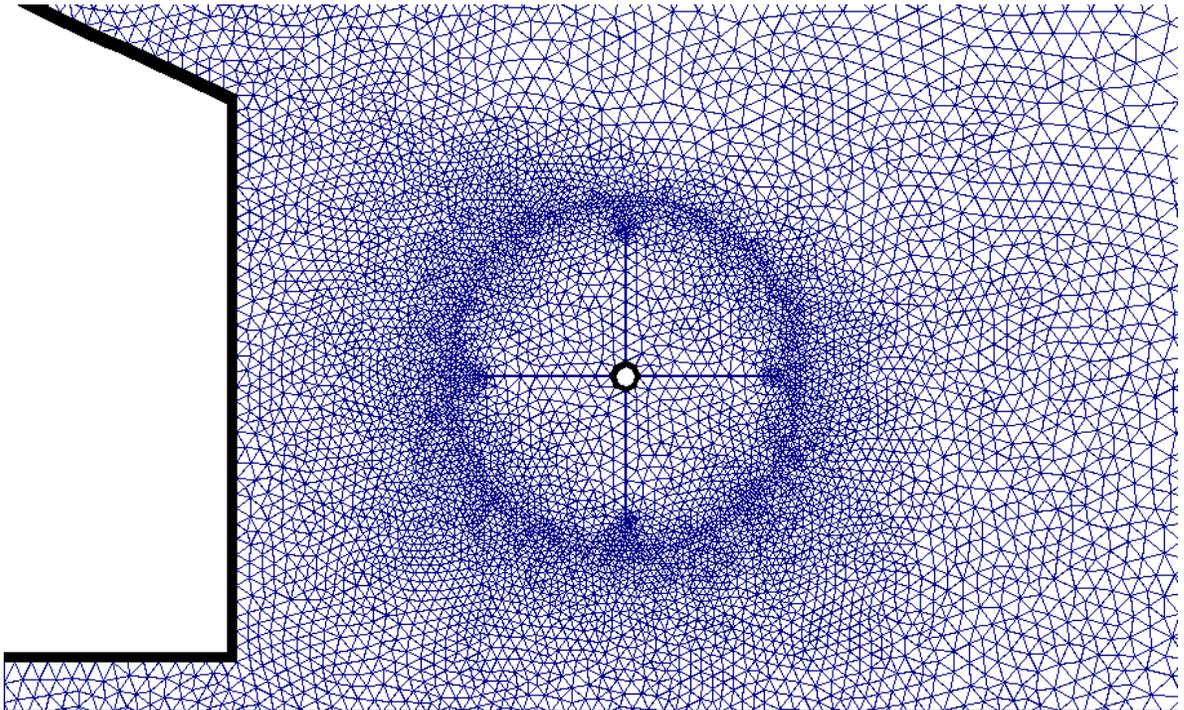


FIG. 3.6 – Maillage sur l'arrière du véhicule et sur l'interface de rotation.

Il faut cependant faire attention au maillage utilisé dans le cercle de l'interface car un maillage trop grossier cause des erreurs de convergence dues à d'importantes zones sous-résolues autour du cercle d'interface ; ceci est dû au fait que le cercle n'est pas modélisé en tant que cercle dans le maillage mais plutôt comme un polygone ayant un nombre de côtés déterminé par le nombre de cellules utilisées sur l'interface. On peut voir un exemple de la résolution du maillage de l'interface dans la Fig. 3.6. Le pourtour de la roue à aubes a été maillé avec une bonne précision afin d'éviter que les résultats perdent de leur validité. D'ailleurs les pales des roues à aubes sont extrêmement minces et courtes et il faut tout-de-même pouvoir observer le gradient de pression qui se forme le long de celles-ci pour calculer leur forces et moments. On peut aussi voir ce dont

un maillage à faible résolution peut avoir l'air à la Fig. 3.7 qui représente une vue très agrandie de l'interface de rotation.

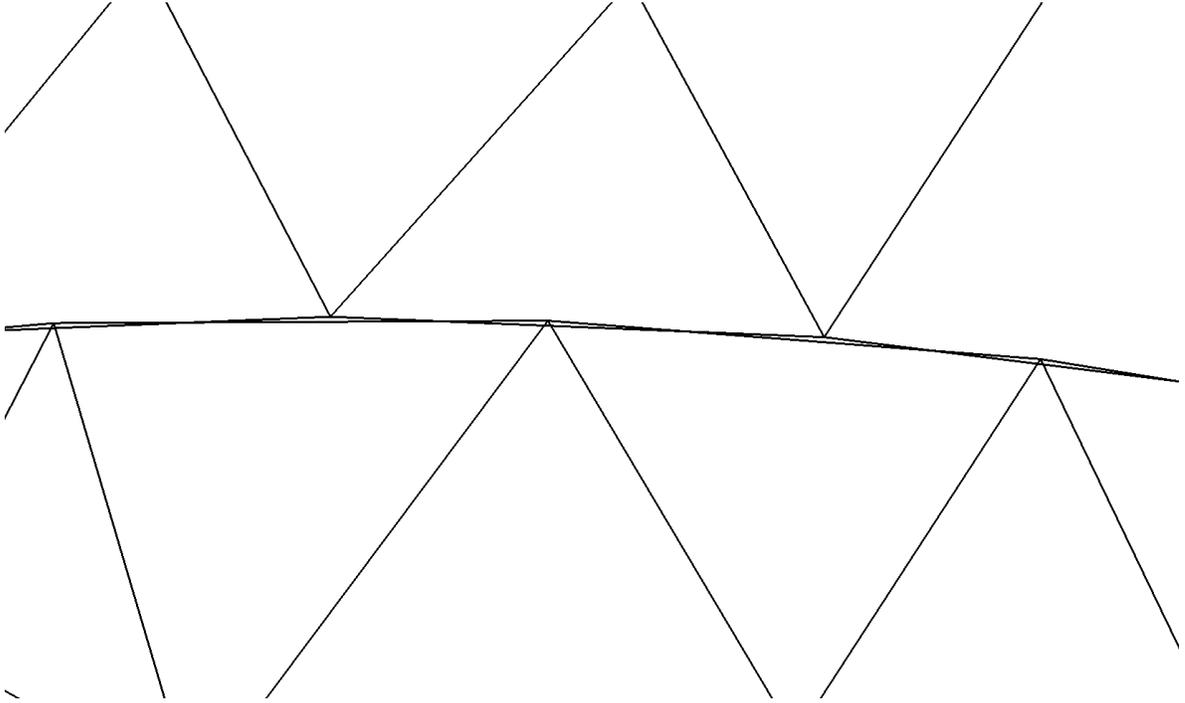


FIG. 3.7 – Interface de rotation sous-résolue.

## 3.6 Approche numérique

### 3.6.1 Modèles de turbulence

Différents modèles de turbulence sont incorporés dans le logiciel OF. Les simulations sont effectuées en ayant recours à un modèle de turbulence car la présence de turbulence influence inévitablement le résultat d'intérêt de ce projet : le coefficient de traînée du véhicule. Un nombre de Reynolds réduit, tel que le  $R_L = 3 \times 10^4$  utilisé par Bruneau *et al.* [7], n'est pas utilisé malgré la réduction du temps de calcul qu'il procure. Il est plutôt choisi de concorder avec la plupart des auteurs et de ne pas risquer d'obtenir, par exemple, un décollement de la couche limite où il ne devrait pas y en avoir à cause de la présence de turbulence sur la paroi à haut Reynolds. Au  $R_L$  utilisé, il n'est pas possible de simuler numériquement avec une méthode laminaire sans considérer l'influence de la turbulence. Du moins, pas pour la résolution de maillage qui est utilisée pour le projet. Notons que si on réduit le  $R_L$  à une valeur permettant une simulation laminaire, les zones

de décollement changeront ou disparaîtront et les résultats seront vraisemblablement insatisfaisants.

Une modélisation de la turbulence par la SGE n'est pas utilisée pour l'analyse rapportée dans ce mémoire car elle requiert un maillage plus adapté et qu'il n'est pas désirable d'augmenter le nombre d'itérations du maillage, cela prolongerait les simulations plus qu'il est acceptable. Un modèle de turbulence qui utilise les moyennes de Reynolds (RANS) est utilisé suite au rapport plutôt encourageant de Guilmineau [16].

Un modèle incompressible avec  $\rho = 1.2kg/m^3$  est utilisé car les calculs sont effectués à un nombre de Mach bien en dessous du régime transsonique et la masse volumique est donc pratiquement constante à travers l'écoulement. Vu que nous sommes en présence d'un fluide où il y a présence de décollement, il est préférable d'avoir recours à un modèle de turbulence qui peut bien simuler, dans la limite du possible, le décollement.

Le modèle k- $\epsilon$  n'a pas été utilisé pour les simulations car il est plutôt connu pour ses faiblesses dans la zone visqueuse, là où il est requis de résoudre le fluide le plus précisément possible. Pour la plupart des modèles de turbulence d'OF, l'état de l'écoulement près de la paroi peut être calculé soit par une fonction de paroi ou soit directement par analyse de volumes finis. Pour ce projet, il serait souhaitable de porter l'analyse de volumes finis le plus près des parois pour ainsi obtenir plus de précision dans le calcul. Une certaine précision du calcul est importante vu que l'objectif de ce projet est de remarquer quelles modifications apportées à la carrosserie pourraient avoir des impacts positifs en termes d'économie d'énergie. Par contre, vu les contraintes de temps, il est aussi souhaitable que les calculs soient effectués dans une marge de temps de l'ordre d'une heure à une journée, il n'est donc pas possible de résoudre l'écoulement aussi précisément dans les zones de cisaillement prononcé. Le modèle k- $\omega$ -SST présentement codé dans OF utilise une fonction de paroi et décide automatiquement où la fonction sera utilisée et où la distance à la paroi est assez grande, exprimée en  $y^+$ , pour ne plus l'utiliser. Le modèle de turbulence k- $\omega$ -SST d'OF procure un traitement automatique des parois et utilise les équations k- $\omega$  dans la couche limite et les équations k- $\epsilon$  dans l'écoulement extérieur. Une fonction de mélange assure que la transition entre les deux types d'équations utilisées se fait sans discontinuités. Puisque Bayraktar *et al.* [4] ont obtenu de très bons résultats en utilisant un modèle de turbulence RNG k- $\epsilon$  sur le corps Ahmed, il semblerait que la présence des équations k- $\epsilon$  dans l'écoulement extérieur constitue une bonne approche. Après l'essai de différents modèles de turbulence et la considération des raisons énumérées dans la revue de littérature, le modèle k- $\omega$ -SST a été choisi pour la modélisation de la turbulence de ce projet.

### 3.6.2 Équations modélisées

L'algorithme «turbDyMFoam» d'OF, qui est celui utilisé pour les calculs présentés, se sert d'un modèle de fluide instationnaire. Il est utilisé ici en couple avec un modèle de turbulence k- $\omega$ -SST. On note qu'OF enlève le terme de masse volumique  $\rho$  de ses équations de fluides incompressibles et cela donne donc un résultat de pression qui est en fait la pression divisée par la masse volumique. Les équations de Navier-Stokes sont résolues dans une boucle d'itération de type PISO. La turbulence est modélisée par un modèle RANS utilisant l'équation suivante,

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \phi \mathbf{U} = -\nabla p + \nabla \cdot \nu_{eff} \nabla \mathbf{U} + \nabla \cdot (\nu_{eff} ((\nabla \mathbf{U})^T - \frac{1}{3} (\nabla \cdot \mathbf{U}) \mathbf{I})) \quad (3.11)$$

où la viscosité turbulente effective est

$$\nu_{eff} = \nu_t + \nu \quad (3.12)$$

et d'après le modèle de turbulence k- $\omega$ -SST, la viscosité cinématique turbulente,  $\nu_t$  est

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, F2 \sqrt{S2})} \quad (3.13)$$

Toujours selon le modèle k- $\omega$ -SST, il est possible de résoudre l'énergie cinétique turbulente,  $k$ , ainsi que la fréquence de turbulence,  $\omega$  ;

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}k) = \min(G, c_1 \beta^* k \omega) - \beta^* \omega k + \nabla \cdot (\alpha_k \nu_t + \nu) \nabla k \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\omega) = 2\gamma S2 - \beta \omega^2 + \nabla \cdot (\alpha_\omega \nu_t + \nu) \nabla \omega - ((F1 - 1) \frac{(2\alpha_\omega \omega^2 (\nabla k \cdot \nabla \omega))}{\omega}) \quad (3.15)$$

Pour plus de détails sur les équations du modèle de turbulence k- $\omega$ -SST et leur origine, le lecteur est dirigé vers l'article de Menter et Esch, [28] où l'on trouve une description physique et mathématique du modèle. Les détails du modèle tel qu'il est mis en place dans OF peuvent être obtenus dans OpenCFD [32].

### 3.6.3 Calcul des forces de traînée

Afin de calculer les forces qui agissent sur les différentes géométries testées, le logiciel OF a recours à la démarche qui est décrite dans la présente section.

Le logiciel calcule les coefficients de traînée en divisant la force totale agissant sur la pièce analysée par l'aire de référence et la pression dynamique. Cette approche du logiciel est représentée dans les équations qui suivent, où les noms des variables sont préservés, autant que possible, tels que dans le code source du logiciel.

$$C_D = \frac{dragForce}{Aref \times pDyn} \quad (3.16)$$

où la pression dynamique est,

$$pDyn = 0.5 \times rhoRef \times magUinf \times magUinf \quad (3.17)$$

Dans l'Éq 3.16, les valeurs  $Aref$ ,  $magUinf$ , et  $rhoRef$  sont données par l'utilisateur avant l'exécution de la simulation. Plus de détails sur ces constantes sont fournis dans l'annexe B. Pour ce qui est de la force totale,  $dragForce$ , elle comprend les forces de frottement et les forces de pression. Elle est définie dans l'équation suivante,

$$dragForce = \{rho(p) \times \sum(pf) + \sum(vf)\} \cdot \{dragDir\} \quad (3.18)$$

où  $rho(p)$  représente la masse volumique et  $dragDir$  représente le vecteur direction de la traînée, tels que définis par l'utilisateur. Rappelons que le terme de pression d'OF est multiplié par la masse volumique afin d'obtenir la pression en unités de force divisée par aire. On définit aussi,

$$\sum(pf) = \sum_{i=patchi} (Sfb_i \times pb_i) \quad (3.19)$$

et

$$\sum (vf) = \sum_{i=patchi} (Sfb_i) \cdot (devRhoRef fb_i) \quad (3.20)$$

où *patchi* est un indice qui représente la surface sur laquelle est calculée la traînée. *Sfb<sub>i</sub>* est un vecteur ayant une direction normale à la surface de l'élément *i*. *pb<sub>i</sub>* et *devRhoRef fb<sub>i</sub>* sont les valeurs du champ de pression, *p*, et du tenseur de contraintes, *devRhoRef f*, à la surface de l'élément *i*. Lorsque le modèle de turbulence k- $\omega$ -SST est choisi, on utilise,

$$devRhoRef f = rhoRef \times -nuEff \times dev((\nabla U) + (\nabla U)^T) \quad (3.21)$$

où *nuEff* est  *$\nu_{eff}$*  telle qu'elle est définie à l'Éq. 3.12 et l'opérateur *dev*, le déviatorique, est défini, dans notre cas, par,

$$dev(T) = T - \frac{1}{3}(T_{11} + T_{22} + T_{33})I \quad (3.22)$$

où *T* est une matrice 3 × 3 et *I* est la matrice d'identité.

### 3.7 Conditions aux limites

Pour bien définir le problème il faut fournir au programme les conditions limites pour les champs de vitesse et de pression à toutes les extrémités du domaine, aux parois du véhicule, à l'entrée, et à la sortie. Il faut aussi définir les conditions limites des variables utilisées par le modèle turbulent. Dans le cas du modèle k- $\omega$ -SST les conditions limites de *k* et  $\omega$  doivent être données au programme. Le tableau 3.1 donne les conditions limites utilisées pour le modèle avec maillage structuré et le tableau 3.2 donne celles du modèle avec maillage non-structuré. Les valeurs de *k* et  $\omega$  à l'entrée sont choisies selon l'intensité de la turbulence et leur influence sur les résultats est faible. Elles représentent un écoulement entrant ayant un faible taux de turbulence. Pour ces variables, Sumer [36] recommande une condition  $\nabla = 0$  à l'entrée. Le modèle k- $\omega$ -SST d'OF utilise une fonction de paroi jusqu'à une valeur de  $y^+$  de 11 pour ensuite utiliser une fonction de mélange jusqu'à l'endroit où les équations k- $\epsilon$  sont utilisées. La condition limite de *k* et  $\omega$  aux murs est fournie à OF comme étant  $\nabla = 0$  car le logiciel a recours à cette fonction de paroi et exige cette condition pour mettre en oeuvre ses lois de paroi.

TAB. 3.1 – Conditions limites du maillage structuré

<b>paroi</b>	<b>pression</b>	<b>vitesse</b>	<b>k</b>	<b><math>\omega</math></b>
entrée	$\nabla p = 0$	$U = (1,0,0)$	$k = 0.00325$	$\omega = 0.057$
sortie	$p = 0$	$\nabla U = 0$	$\nabla k = 0$	$\nabla \omega = 0$
mur supérieur	$\nabla p = 0$	$U = (1,0,0)$	$\nabla k = 0$	$\nabla \omega = 0$
mur inférieur	$\nabla p = 0$	$U = (1,0,0)$	$\nabla k = 0$	$\nabla \omega = 0$
paroi du véhicule	$\nabla p = 0$	$U = (0,0,0)$	$\nabla k = 0$	$\nabla \omega = 0$
écoulement initial	$p = 0$	$U = (1,0,0)$	$k = 0.00325$	$\omega = 0.057$

TAB. 3.2 – Conditions limites du maillage non-structuré

<b>paroi</b>	<b>pression</b>	<b>vitesse</b>	<b>k</b>	<b><math>\omega</math></b>
entrée	$\nabla p = 0$	$U = (60,0,0)$	$k = 0.135$	$\omega = 13.333$
sortie	$p = 0$	$\nabla U = 0$	$\nabla k = 0$	$\nabla \omega = 0$
mur supérieur	<i>symmétrie</i>	<i>symmétrie</i>	<i>symmétrie</i>	<i>symmétrie</i>
mur inférieur	$\nabla p = 0$	$U = (0,0,0)$	$\nabla k = 0$	$\nabla \omega = 0$
paroi du véhicule	$\nabla p = 0$	$U = (0,0,0)$	$\nabla k = 0$	$\nabla \omega = 0$
écoulement initial	$p = 0$	$U = (0,0,0)$	$k = 0.00325$	$\omega = 0.057$
paroi de la roue	$\nabla p = 0$	$U = (v_x, v_y, 0)^a$	$\nabla k = 0$	$\nabla \omega = 0$

<sup>a</sup> $v_x = v_R \cos \theta$  et  $v_y = v_R \sin \theta$ .  $v_R = 2\pi R r$  où  $R$  est la vitesse angulaire de la roue à aubes en révolutions par minute et  $r$  est la distance entre le centre de rotation et le point considéré.  $\theta$  est l'angle que fait une droite passant par le centre de rotation et le point considéré avec la verticale. Cette fonction représente en fait une vitesse nulle relative à la paroi en mouvement.

## 3.8 Validation

### 3.8.1 Contexte

Le cas de référence qui est utilisé dans le calcul de la réduction de traînée avec différentes pièces ajoutées est le modèle du corps Ahmed sans roue à aubes et avec un maillage non-structuré d'environ 30 000 cellules. Il est donc important d'avoir une certaine assurance quant à la validité des résultats. C'est pour cela qu'une procédure de validation des résultats du modèle sans roue à aubes est entreprise. Cette section couvre les deux méthodes utilisées à cette fin qui sont la comparaison avec les résultats publiés et le test de raffinement du maillage.

### 3.8.2 Comparaison avec la littérature

Comme il est mentionné plus haut, le modèle initial du véhicule a été choisi en fonction des modèles utilisés dans la littérature car des données sont disponibles pour valider les résultats qui seront présentés ici. Guilmineau [16] rapporte des résultats de traînée obtenus par différents modèles de turbulence ainsi que par les expériences de Ahmed *et al.* [1]. En se basant sur ces résultats nous nous attendons à obtenir un coefficient de traînée de 0.23-0.35 pour le modèle à angle oblique de  $35^\circ$  et de 0.21-0.33 pour un angle oblique de  $25^\circ$ .

Il n'est pas possible de déterminer autrement qu'en comparant avec les résultats publiés quelles solutions donnent la bonne traînée et quelles en donnent une erronée. Une méthode de calcul robuste sera développée pour mettre en place des modèles avec roue à aubes car il n'est pas possible de vérifier les résultats en comparant avec des articles publiés par différents auteurs.

### 3.8.3 Raffinement du maillage

Le maillage a été raffiné par un facteur de 2 dans le but de comparer les champs de pression, vitesse, et valeurs turbulentes des différents maillages et ainsi valider la modélisation. Certaines nuances ont été observées entre les champs des maillages original et modifié mais les aspects principaux de l'écoulement ont bien été respectés. D'ailleurs, notons que le coefficient de traînée le plus faible provient du modèle initial,

non-raffiné. C'est cette valeur conservatrice qui est utilisée pour les comparaisons entre le coefficient de traînée du véhicule original et celui du véhicule ayant la pièce rotative pour les deux raisons suivantes : (1) il donne la valeur la plus conservatrice et (2) il représente pratiquement le même maillage que celui utilisé pour les simulations avec la pièce en mouvement, à l'exception de l'ajout de ladite pièce. Les détails du test de maillage sont donnés dans la section 4.1.2.

### 3.9 Capture d'énergie

Le but de ce projet consiste à monter sur le véhicule une pièce ajoutée qui capture l'énergie cinétique de l'écoulement. Les roues à aubes de l'époque sont la source d'inspiration pour les pièces mobiles utilisées ici et chaque roue mentionnée dans les résultats à 4 pales. Une vitesse angulaire constante est imposée à la roue et l'énergie générée est calculée à partir de la moyenne des moments agissants sur la roue pendant un certain nombre de cycles. Des tests ont aussi été effectués avec une vitesse angulaire variant selon une fonction sinusoïdale. On considère que dans une application pratique, un générateur répondrait aux fluctuations des moments sur la roue en ajoutant ou retirant de l'énergie de la roue de façon à obtenir et maintenir la vitesse angulaire souhaitée.

Pour des résultats intéressants, il faut aussi éviter d'augmenter le coefficient de traînée sur le véhicule ou, dans le cas contraire, la pièce doit capturer plus d'énergie que ce qui sera perdu pour vaincre une augmentation de traînée du véhicule. Pour comparer l'énergie capturée avec le coefficient de traînée, l'équation suivante mesure quelle puissance, en watts, est requise pour faire avancer le véhicule à sa vitesse de croisière sous l'influence d'un certain coefficient de traînée.

$$e_{drag} = \left(\frac{1}{2} \times \rho U^2 A C_D\right) \times U \quad A = 0.288 \times 0.389 \quad (3.23)$$

Afin de calculer combien d'énergie cinétique est extraite de l'écoulement, le moment autour de l'axe d'envergure,  $M_z$ , est récupéré des résultats de l'analyse OF et converti en watts,  $e_{capture}$ , selon

$$e_{capture} = M_z \times \frac{R \times 2\pi}{60} \times \frac{w}{T} \quad (3.24)$$

où  $U$  est la vitesse du véhicule,  $\rho$  est la masse volumique de l'air ambiant,  $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ ,  $R$  est la vitesse angulaire de la roue à aubes en révolutions par minute (RPM),  $A$  est

l'aire frontale du véhicule en  $m^2$ ,  $C_D$  est le coefficient de traînée à être converti en énergie équivalente,  $w$  est l'épaisseur du modèle Ahmed tridimensionnel et  $T$  est l'épaisseur du modèle utilisé pour l'analyse bidimensionnelle,  $w = 0.389 m$  et  $T = 0.01 m$ .

Le code source de la suite OF a ensuite été modifié pour permettre la mise en place d'une vitesse angulaire variable de la roue à aubes. Le code modifié est utilisé afin de donner à la roue une vitesse qui varie sinusoidalement avec le temps et a la même fréquence que le cycle de génération de puissance des simulations avec vitesse angulaire constante. Cette fréquence est en fait celle de la roue à aubes multipliée par le nombre de pales. À l'aide d'une autre modification du code source, une vitesse dépendante des forces appliquées sur la roue est aussi mise en place de façon à fournir un moment d'inertie à l'algorithme. Il est alors possible de faire varier la vitesse angulaire à chaque pas de temps selon le moment appliqué sur la roue par le fluide à ce pas de temps. On nomme ce mode de rotation le modèle réactif. Le modèle réactif a été validé en comparant l'accélération d'un disque d'une inertie spécifiée lorsque soumis à une force quelconque à l'accélération théorique du disque qui est définie selon la formule de l'équation suivante,

$$\begin{aligned}
 F = ma \quad \int Fdr = \int \frac{mar}{r}dr \quad M = \int mr\alpha dr \quad m = \rho Ar \\
 \frac{\partial m}{\partial r} = \rho A \quad \therefore M = \int r^2\alpha dm \quad \therefore M = I\alpha
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

où  $\alpha$  est l'accélération angulaire en  $rad/s^2$ ,  $F$  est la force (en newtons) appliquée en un point sur la roue à aubes,  $r$  est le rayon de la roue à ce point et  $m$  est la masse de la roue en  $kg$ .  $A$  est l'aire de la section roue à un rayon spécifique et  $\rho$  est la masse volumique de la roue à aubes.  $a$  est l'accélération de la roue en  $m/s^2$  et  $I$  est le moment d'inertie de la roue en  $kg/m^2$ . Un simple test a aussi été effectué pour confirmer qu'une roue submergée dans un fluide et en rotation s'arrête par elle-même si aucune force autre que la résistance du fluide ne lui est appliquée.

Les tests du corps Ahmed avec l'algorithme réactif ont confirmé que la roue à aubes est effectivement accélérée par le fluide car sa vitesse de rotation augmente continuellement jusqu'à environ 2500 RPM où elle se met à osciller entre 2500 RPM et 2600 RPM. La cause de cette oscillation n'est pas entièrement connue mais elle semble due à la différence de fréquence entre le cycle de puissance appliquée sur la roue et son accélération car la roue accélère due aux pressions appliquées sur celle-ci mais suite à son accélération les forces de pressions n'ont plus la même influence sur son accélération/décélération.

# Chapitre 4

## Résultats

Cette section du mémoire présente les résultats obtenus. La section 4.1 démontre certaines étapes d'une évolution vers le maillage utilisé pour les simulations. Les premiers maillages ayant eu un certain succès étaient des maillages complètement structurés et leurs résultats sont donnés à la section 4.1.1. Ensuite, furent choisis des maillages ayant seulement la couche limite maillée en cellules structurées. Finalement, pour obtenir une meilleure flexibilité de la grandeur des cellules du maillage selon les zones du modèle Ahmed et de la roue à aubes, un maillage étant constitué en quasi-totalité de cellules non-structurées (prismes triangulaires) est utilisé pour les simulations avec la roue à aubes. On peut voir les résultats de ce dernier maillage à la section 4.1.2. La section 4.2 donne les résultats des analyses avec pièce mobile ajoutée au corps Ahmed. Finalement, la section 4.2.2 donne les résultats obtenus avec des pièces choisies dans le but de comparer l'efficacité des roues à aubes à réduire la traînée totale sur le corps.

### 4.1 Résultats du modèle Ahmed seul

#### 4.1.1 Résultats avec maillage structuré

Les premières analyses du modèle Ahmed ont servi d'étapes itératives vers l'obtention d'une combinaison de maillage et paramètres qui donne des résultats désirables. On utilise ici un nombre de Reynolds  $R_L = 2.8312 \times 10^6$  équivalent à une vitesse de 40 m/s mais on simule à une vitesse de 1 m/s et une viscosité augmentée, comme démontré dans la section 3.4.5. Des résultats en accord avec la littérature ont été obtenus en uti-

lisant un maillage complètement structuré et un modèle de turbulence  $k-\omega$ -SST. Pour ces maillages, des résultats acceptables ont été obtenus pour le corps Ahmed à angles obliques de  $25^\circ$  et  $35^\circ$ .

Le maillage structuré comporte uniquement des cellules à six côtés (hexaèdres). Dans OF, les calculs bidimensionnels sont effectués sur des maillages tridimensionnels qui n'ont qu'une cellule en épaisseur alors le maillage structuré bidimensionnel se compose de polyèdres à six faces : des hexaèdres. Le maillage comprend des plans avant et arrière, qui sont identiques, et portent la condition limite «empty» qui est gérée par OF pour maintenir la bidimensionalité du calcul. Dans OF, un maillage a tout-de-même une épaisseur dans la direction «non-dimensionnelle», cette épaisseur doit être ajustée afin de réduire la distorsion dans les cellules. La distorsion est appelée «aspect ratio» dans OF et elle peut être vérifiée avec l'utilitaire «checkMesh». À cause de cette approche tridimensionnelle, les coefficients de traînée calculés par OF pour un calcul bidimensionnel tiennent compte de l'aire frontale comme s'il s'agissait d'un calcul tridimensionnel et les valeurs appropriées doivent être fournies à OF dans le fichier «controlDict». L'annexe B donne un exemple des commandes utilisées dans ce fichier afin de calculer la traînée. Des maillages semi-structurés ont aussi été testés ; ils comprennent des cellules hexaèdres, prismes rectangulaires, dans la zone de couche limite et des cellules à cinq côtés (pentaèdres) en dehors de la couche limite. L'avantage d'utiliser les cellules pentaèdres est une réduction du nombre de cellules nécessaires au maillage vu la possibilité de facilement ajouter un gradient de grandeur aux cellules en s'éloignant de la paroi du véhicule. Une autre propriété des maillages est leur non-orthogonalité ; dans le cas étudié, il est inévitable d'avoir une non-orthogonalité vu les courbes du modèle. Le programme OF a la capacité de tolérer une certaine non-orthogonalité et offre même la possibilité de raffiner la solution des équations des volumes finis en prenant compte de la non-orthogonalité. Cette option s'appelle «nNonOrthogonalCorrectors» et elle peut être réglée à une valeur de 0 à l'infini en théorie mais elle ne dépasse habituellement pas 4. Il faut mentionner que plus la valeur de «nNonOrthogonalCorrectors» est élevée, plus le calcul est ralenti. La «nNonOrthogonalCorrectors» est ajustable dans le fichier «fvSolution».

Parmi les bonnes solutions obtenues, nous obtenons à l'angle oblique de  $25^\circ$  des solutions permanente et transitoire quasi-identiques et un coefficient de traînée constant de 0.326. Dans la Fig. 4.1, on peut voir l'évolution du coefficient de traînée au début du calcul instationnaire qui est lui-même initialisé à partir des résultats du calcul stationnaire. On rappelle que  $R_L = 2.8312 \times 10^6$  et que le modèle de turbulence utilisé est le  $k-\omega$ -SST. Par contre, le coefficient de portance de 1.087 ne concorde pas avec les résultats publiés par Bruneau *et al.* [7] qui rapportent un coefficient de portance d'environ 0.67. Considérant que l'intérêt de ce projet porte sur le coefficient de traîné

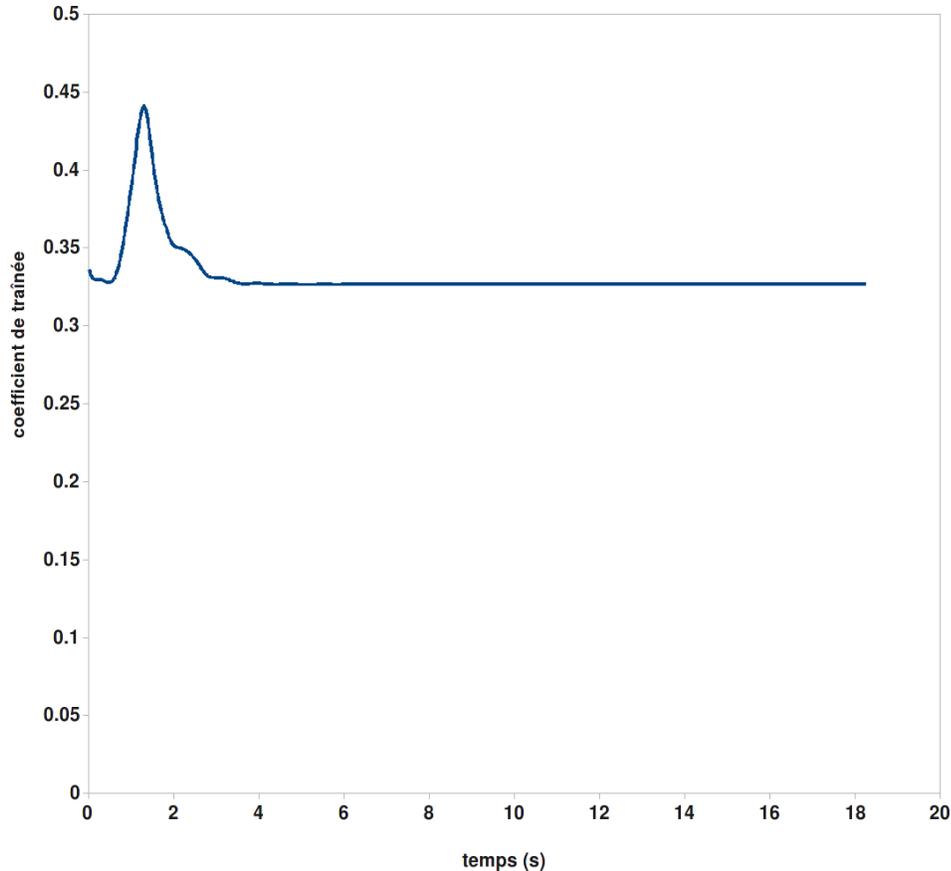


FIG. 4.1 – Évolution du  $C_D$  pour  $\varphi = 25^\circ$ . Maillage structuré.

et qu'il est généralement plus difficile de calculer le coefficient de portance du modèle Ahmed, la plupart des auteurs cités ne rapportent pas leurs résultats du coefficient de portance. L'effet du coefficient de portance sur la consommation d'essence du véhicule est négligeable mais il est tout-de-même à considérer afin de maintenir une bonne stabilité du véhicule, surtout lorsqu'on considère des véhicules de plus en plus légers qui voyagent à haute vitesse et qui sont munis d'une hélice.

Pour un maillage presque identique où l'angle oblique est la seule variable qui change et devient  $\varphi = 35^\circ$ , la solution stationnaire converge vers un coefficient de traînée d'environ le double de ce qui était attendu. Par contre, en poursuivant la solution en mode instationnaire à partir des résultats «erronés» obtenus par le calcul stationnaire, la solution converge vers le coefficient de traînée attendu. On peut observer l'évolution du coefficient de traînée à la Fig. 4.2, la figure montre l'évolution à partir du début du calcul instationnaire.

Il a été constaté que le modèle  $k-\omega$ -SST de OF, qui est basé sur l'article de Menter et Esch [28], montre quelques légères différences avec le modèle décrit dans leur article.

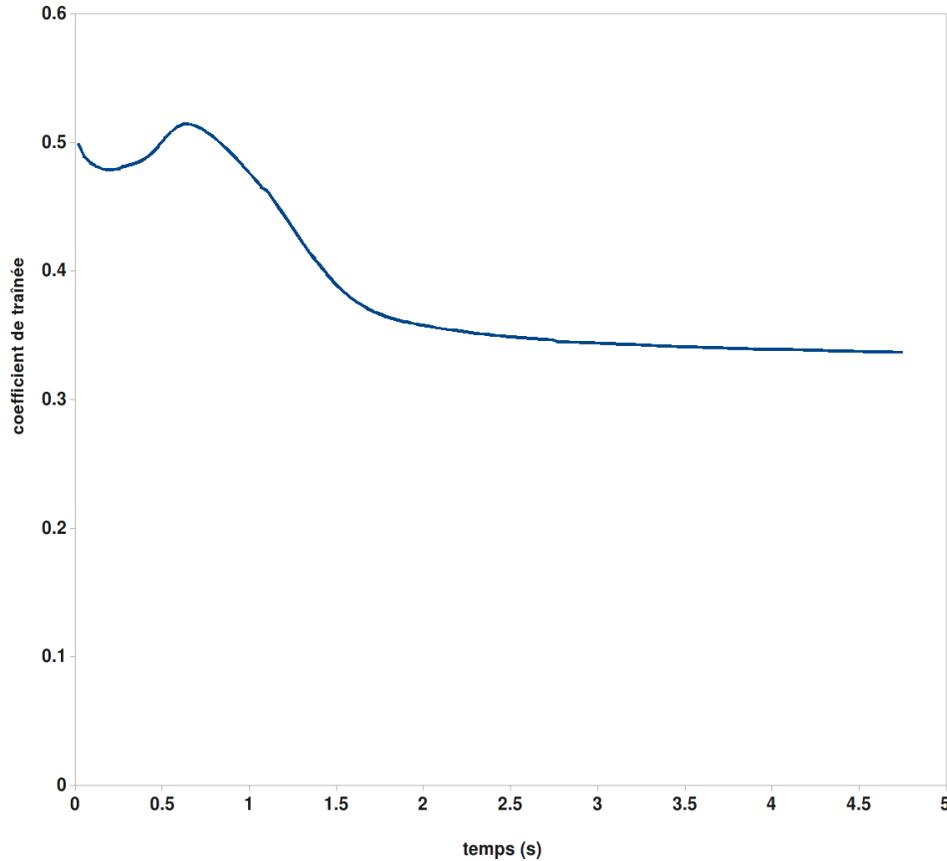


FIG. 4.2 – Évolution du  $C_D$  pour  $\varphi = 35^\circ$ . Maillage structuré.

Quelques constantes utilisées semblent plutôt avoir été tirées de l'article de Menter [27]. Les fonctions de parois utilisées ont quelques légères différences, justifiées par les programmeurs, avec les fonctions de parois recommandées par Menter et Esch [28].

Menter et Esch [28] suggèrent que, pour leur modèle, les valeurs de  $y^+$  à la paroi n'ont pas une aussi grande influence sur les résultats que pour les autres modèles. Par exemple, une valeur de  $1 < y^+ < 30$ , ne donnerait pas un calcul erroné mais plutôt simplement moins de précision près de la paroi. D'après les bonnes solutions obtenues avec le modèle  $k-\omega$ -SST pour différents intervalles de  $y^+$ , il semblerait qu'en effet la valeur de  $y^+$  puisse varier le long de la paroi et même atteindre des valeurs qui ne seraient pas recommandées pour des modèles tels que le Spalart-Allmaras sans pour autant obtenir des résultats invalides.

Le tableau 4.1 donne les valeurs de  $y^+$  minimum, maximum, et moyenne sur la paroi du corps Ahmed pour la simulation à angle oblique de  $25^\circ$  en calcul instationnaire avec maillage structuré et une vitesse simulée de 1 m/s. Les valeurs sont prises au temps  $t = 18.25$  s, temps où la simulation a été arrêtée.

TAB. 4.1 – Valeurs de  $y^+$  du maillage structuré.  $\varphi = 25^\circ$ .

min	max	moy
2.10	116.62	51.28

Le tableau 4.2 donne les valeurs de  $y^+$  minimum, maximum, et moyenne sur la paroi du corps Ahmed pour la simulation à angle oblique de  $35^\circ$  en calcul instationnaire avec maillage structuré et une vitesse simulée de 1 m/s. Les valeurs sont prises au temps  $t = 4.75$  s, temps où la simulation a été arrêtée. On note un intervalle des valeurs de  $y^+$  légèrement plus grand et cela est probablement dû à la faible augmentation des tourbillons d'envergure due à l'angle oblique plus prononcé.

TAB. 4.2 – Valeurs de  $y^+$  du maillage structuré.  $\varphi = 35^\circ$ .

min	max	moy
1.90	116.70	51.38

Dans presque toutes les solutions obtenues, on retrouve un profil de vitesse semblable, et cela même lorsque le coefficient de traînée n'est pas en accord avec les résultats publiés. En se référant au système d'axes pratique où le véhicule serait en mouvement dans le sens de l'accélération positive et la route immobile, le profil de vitesse montre une accélération du fluide en amont et en aval du véhicule et une décélération au dessus du véhicule au point d'attaque du toit du véhicule. Les profils de vitesse et pression obtenus montrent une ressemblance assez prononcée avec les traits généraux des profils obtenus par les différents auteurs. En général, le modèle pousse le fluide qui repose devant lui et un vide est créé derrière le modèle, ce vide attire le fluide situé sur le dessus et derrière ce modèle. Une couche limite légèrement plus mince que pour une plaque plane se forme sur les parois planes du véhicule. Pour une plaque plane en écoulement turbulent, l'équation suivante provenant de Couteix [10] donne une couche limite de l'ordre de grandeur de 0.02 m sur les parois planes supérieures et inférieures du véhicule.

$$\frac{\delta}{L} \sim 2\% \quad (4.1)$$

$$\frac{\delta}{L} = 0.38 * R_L^{-1/5} \quad (4.2)$$

Par ailleurs, l'équation 4.2 qui est aussi tirée de Couteix [10] donne une épaisseur plus précise de 0.0203 m. Ces épaisseurs sont en accord avec les simulations et les

résultats expérimentaux. L'épaisseur utilisée pour la zone structurale du maillage est 0.05 m vu que cette épaisseur s'harmonise bien avec la zone de 0.05 m sous le véhicule et ne sera réduite que si des valeurs réduites de  $y^+$  s'avèrent nécessaires.

## 4.1.2 Maillage non-structuré

### Propriétés de l'écoulement

Les simulations sont effectuées sur le maillage non-structuré à une vitesse réelle et simulée de 60 m/s afin de réduire toute imprécision venant du fait que la viscosité est ignorée dans la démonstration de la section 3.4.5 qui montre que le  $C_D$  n'est pas fonction de  $U$  en autant que le  $R_L$  demeure constant. Il faut tout-de-même noter que les imprécisions venant des approximations utilisées dans cette démonstration sont minimes. Il est plus simple pour les calculs de forces et de moments d'utiliser la vitesse originale et cela a fait pencher le choix vers l'utilisation de la vitesse réelle dans les simulations. Par contre, il est à noter que si les vitesses avaient atteint des valeurs extrêmes, il aurait fallu s'assurer que la stabilité numérique n'en est pas affectée de manière à causer des erreurs de calcul. Des précisions sur le maillage utilisé ici ont été données dans la section 3.5.5.

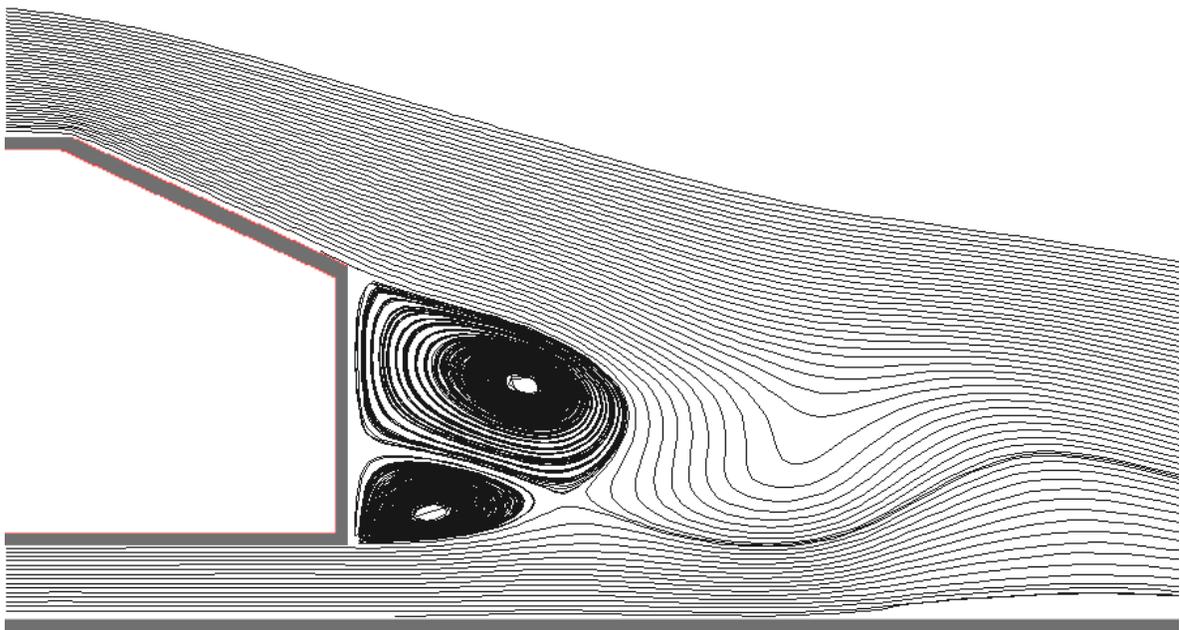


FIG. 4.3 – Lignes de courant montrant les tourbillons d'envergure sur le corps Ahmed.

La Fig. 4.3 montre les tourbillons d'envergure qui se forment à l'arrière du corps

Ahmed. Le derrière du corps Ahmed est visualisé dans la partie gauche de la Fig. 4.3. On note que le tourbillon supérieur semble dominer mais il faut mentionner que ces tourbillons sont stationnaires seulement en moyenne temporelle.

### Test de raffinement du maillage

On valide aussi le calcul en raffinant le maillage de manière à effectuer ce qui est communément appelé un test de raffinement de maillage. Le maillage est donc raffiné en doublant le nombre de cellules dans chaque direction. Le maillage raffiné a 111.5K cellules, cela constitue un raffinement de maillage important. Les Figs. 4.4 et 4.5 montrent que les résultats obtenus avec les deux maillages sont en accord pour chacun des champs considérés, en y comparant les champs de vitesse et de pression. Un accord assez précis (6% de différence) des coefficients de traînée des deux maillages est aussi obtenu. La simulation avec le maillage raffiné donne un coefficient de traînée plus grand et cela indique que les calculs de  $C_{D,évitée}$  faits à partir du coefficient de traînée du maillage plus grossier sont conservateurs. Le maillage raffiné produit visiblement un écoulement plus détaillé mais les deux maillages produisent des résultats qui partagent les mêmes caractéristiques générales de l'écoulement, et ce aux mêmes positions géométriques.

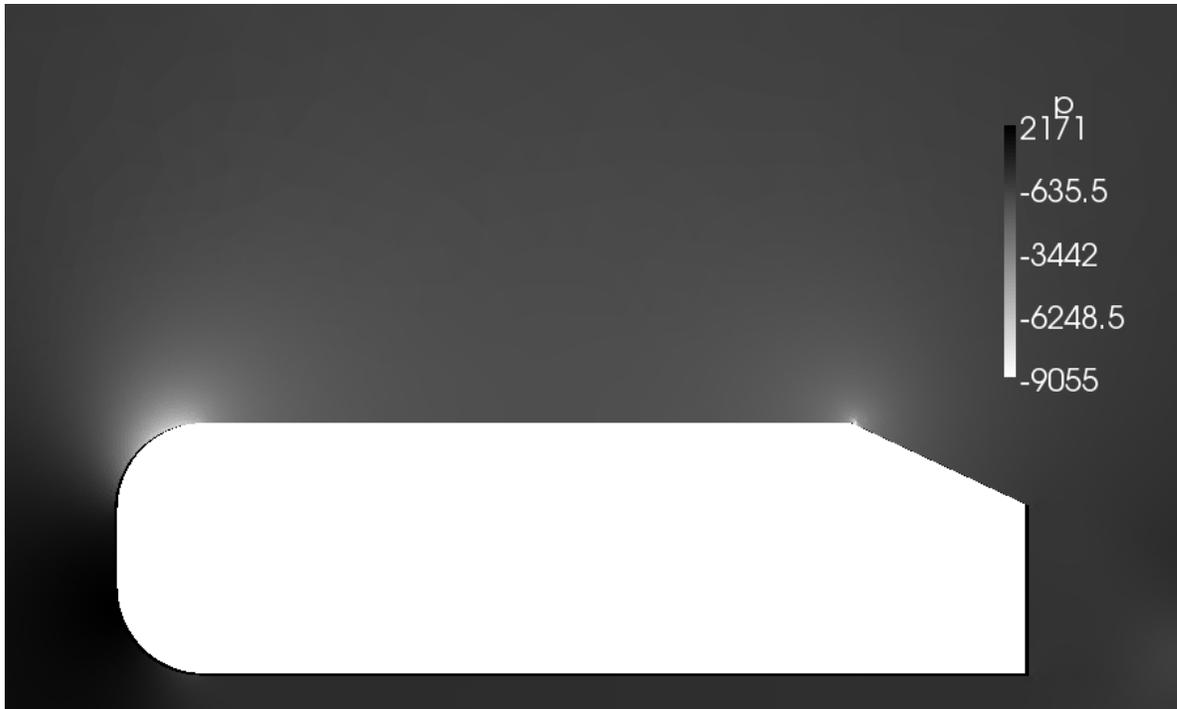
## 4.2 Résultats avec pièce ajoutée

La Fig. 4.6 montre comment le tourbillon d'envergure supérieur en aval du corps Ahmed est affecté par la présence de la roue à aubes en rotation. On peut noter qu'il devient plus petit et qu'un nouveau tourbillon est créé par la présence de la roue. Un autre tourbillon se détache de la roue et on le voit en aval de la roue sur la Fig. 4.6. Comme pour le corps sans roue à aubes, dans la section 4.1.2, l'écoulement n'est stationnaire qu'en moyenne temporelle.

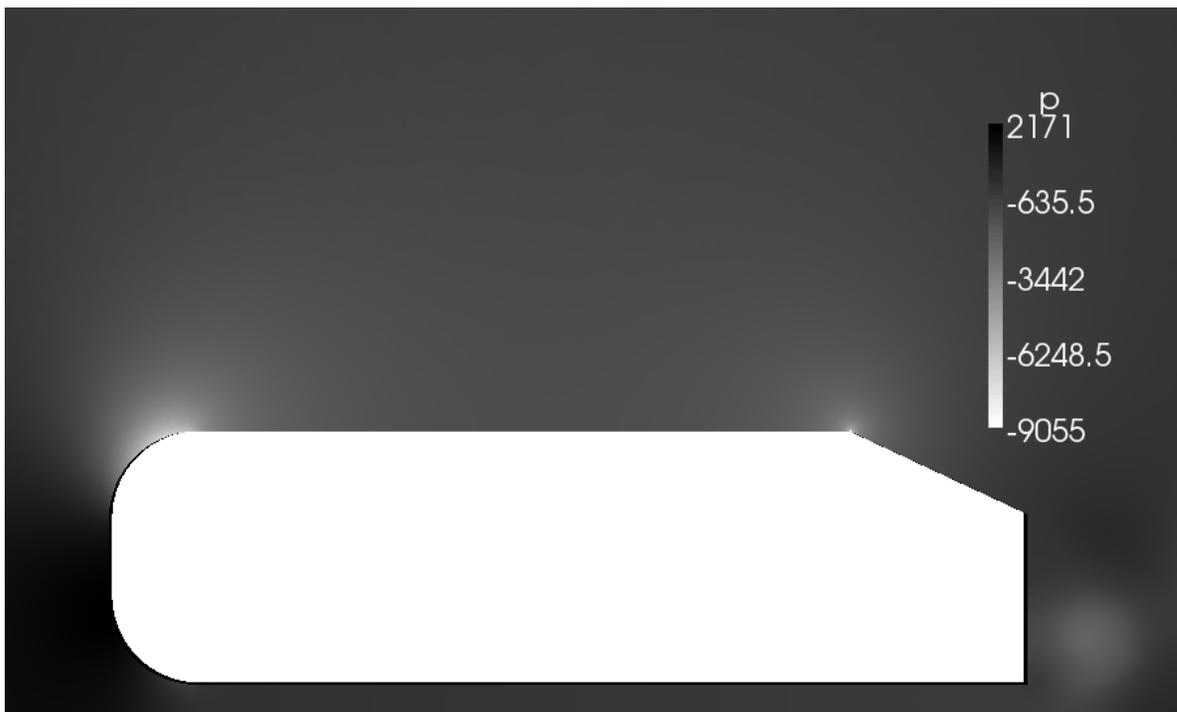
Pour les résultats,  $C_{D,corps}$  et  $C_{D,pièce}$  représentent les coefficients de traînée sur le modèle Ahmed et sur la pièce ajoutée, respectivement.  $C_{D,watts}$  est l'énergie économisée par la traînée évitée lorsque le véhicule se déplace à 60 m/s.  $e_{capture}$  est l'énergie en watts capturée par la roue à aubes.  $C_{D,évitée}$  est le coefficient de la traînée évitée et est défini par l'équation suivante.

$$C_{D,évitée} = 0.300 - C_{D,corps} - C_{D,pièce} \quad (4.3)$$

Le cas Ahmed de base, sans la roue à aubes, donne un  $C_{D,corps}$  de 0.300 et cette valeur est utilisée pour quantifier la quantité de traînée sauvée par les différentes configurations



(a) Champ de pression du maillage original.



(b) Champ de pression du maillage raffiné.

FIG. 4.4 – Test de raffinement de maillage : pression.



(a) Champ de vitesse du maillage original.



(b) Champ de vitesse du maillage raffiné.

FIG. 4.5 – Test de raffinement de maillage : vitesse.

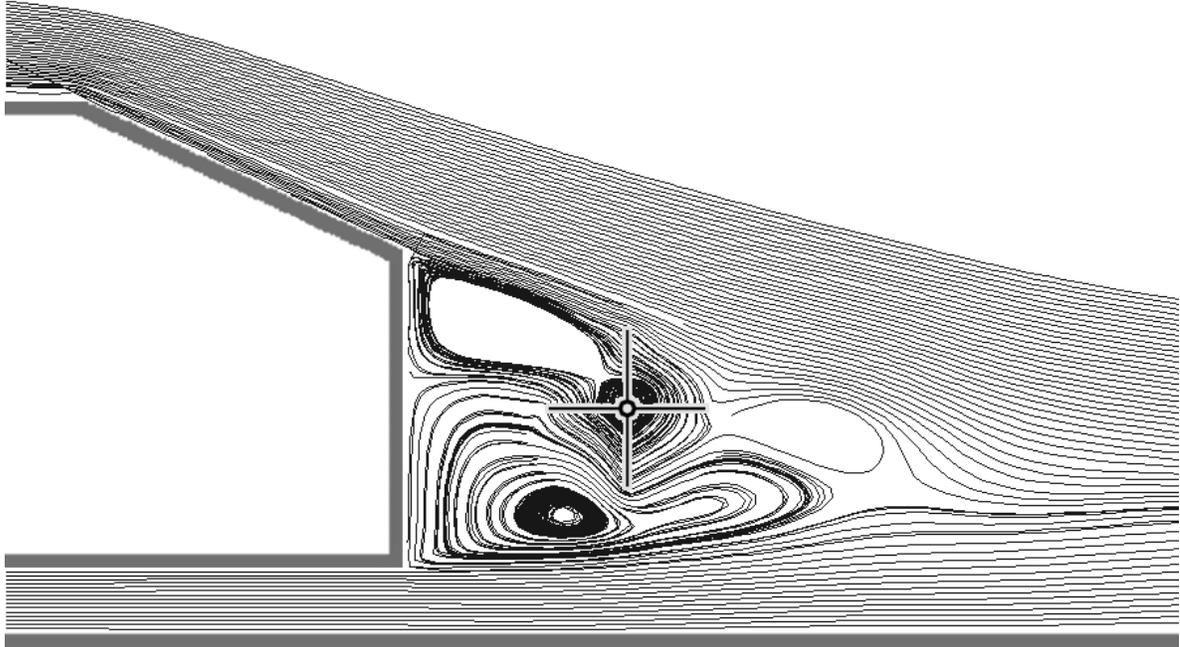


FIG. 4.6 – Tourbillons d’envergure sur le corps Ahmed avec roue à aubes.

de roue à aubes. D’après l’Éq. 3.23 et au point de référence  $C_{D,corps} = 0.300$ , le véhicule Ahmed tridimensionnel requiert 4.36 kW lorsqu’en mouvement à une vitesse constante de 60m/s. L’angle oblique du modèle Ahmed avec pièce ajouté est de  $25^\circ$ .

## 4.2.1 Cas sélectionnés

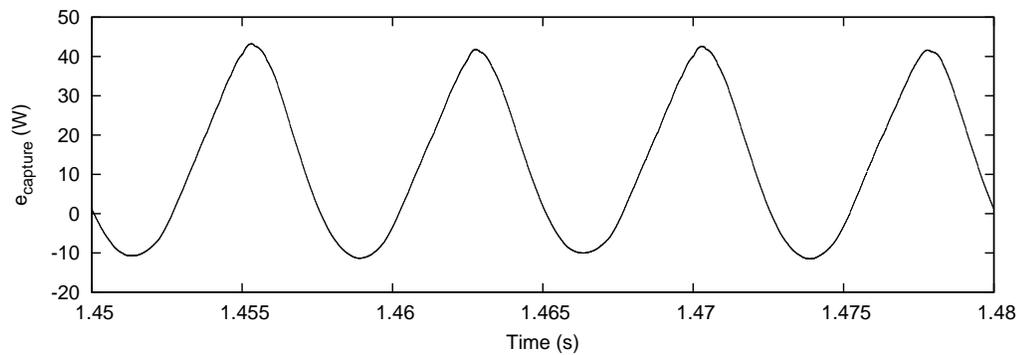
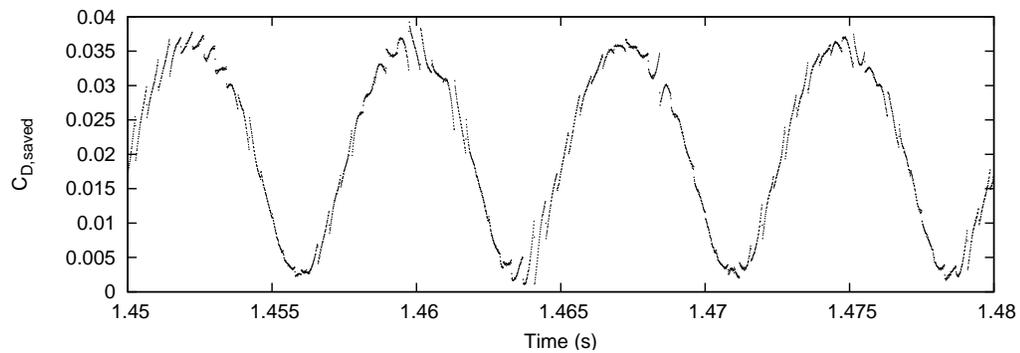
### Vitesse angulaire constante

Les résultats des cas avec roue en rotation à vitesse angulaire constante sont compilés dans le tableau 4.3. La valeur  $y$  du centre de rotation et centre de masse de la roue est 19 cm sous la paroi supérieure du corps Ahmed.  $x_{centre}$  est la distance en cm entre la paroi verticale arrière du modèle Ahmed et le centre de rotation de la roue à aubes.  $R$  est la vitesse angulaire en RPM et  $r$  est le rayon de la roue à aubes en cm. Une valeur négative de  $e_{capture}$  indique que de l’énergie est fournie à la roue à aubes plutôt que d’être extraite.

Les Figs. 4.7 et 4.8 illustrent la puissance capturée et le coefficient de traînée évitée, respectivement, pour une révolution complète de la roue à aubes du cas 3. Les données sont prises de  $t = 1.45s$  à  $t = 1.48s$ . Afin d’illustrer comment l’écoulement se stabilise

TAB. 4.3 – Résultats des cas avec vitesse angulaire constante

Cas	1	2	3	4	5	6
$x_{centre}$	13.3	16.6	13.3	16.6	13.3	13.3
$r$	5	4	5	4	4	5
$R$	2500	2000	2000	4000	2000	2300
$C_{D,corps}$	0.3084	0.2939	0.3122	0.2954	0.3130	0.3122
$C_{D,pièce}$	-0.0323	-0.0148	-0.0335	-0.0207	-0.0353	-0.0334
$C_{D,évitée}$	0.0240	0.0209	0.0213	0.0252	0.0227	0.0213
$C_{D,watts}$	348	304	309	366	324	309
$e_{capture}$	0.9	8.2	12.8	-4.6	6.0	10.4

FIG. 4.7 – Tracé de  $e_{capture}$  vs Temps pour une révolution complète de la roue à aubes du cas 3.FIG. 4.8 – Tracé de  $C_{D,évitée}$  vs Temps pour une révolution complète de la roue à aubes du cas 3.

dans les premiers dixièmes de seconde, la puissance capturée au cas 6 est tracée par rapport au temps dans la Fig. 4.9 où chaque point est la moyenne de puissance générée pendant une révolution complète de la roue à aubes : 4 cycles géométriques. Chaque

cycle dure 0.0261 secondes à la vitesse angulaire de 2300 RPM. Après le temps  $t = 0.26s$  la capture de puissance se stabilise à  $e_{capture} = 10.38 \pm 0.01W$ .

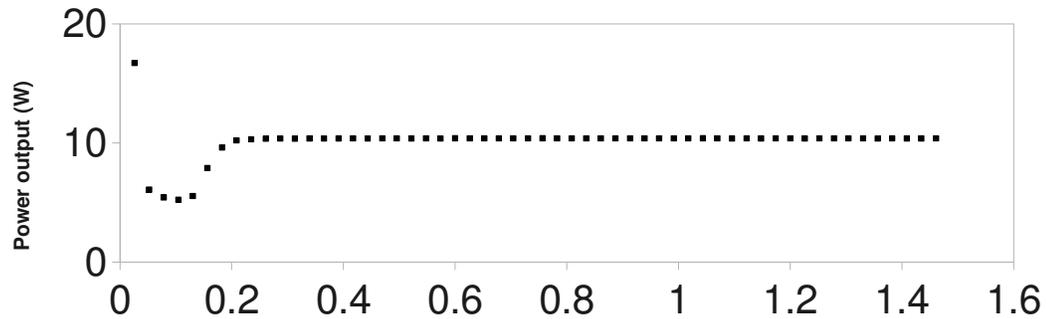
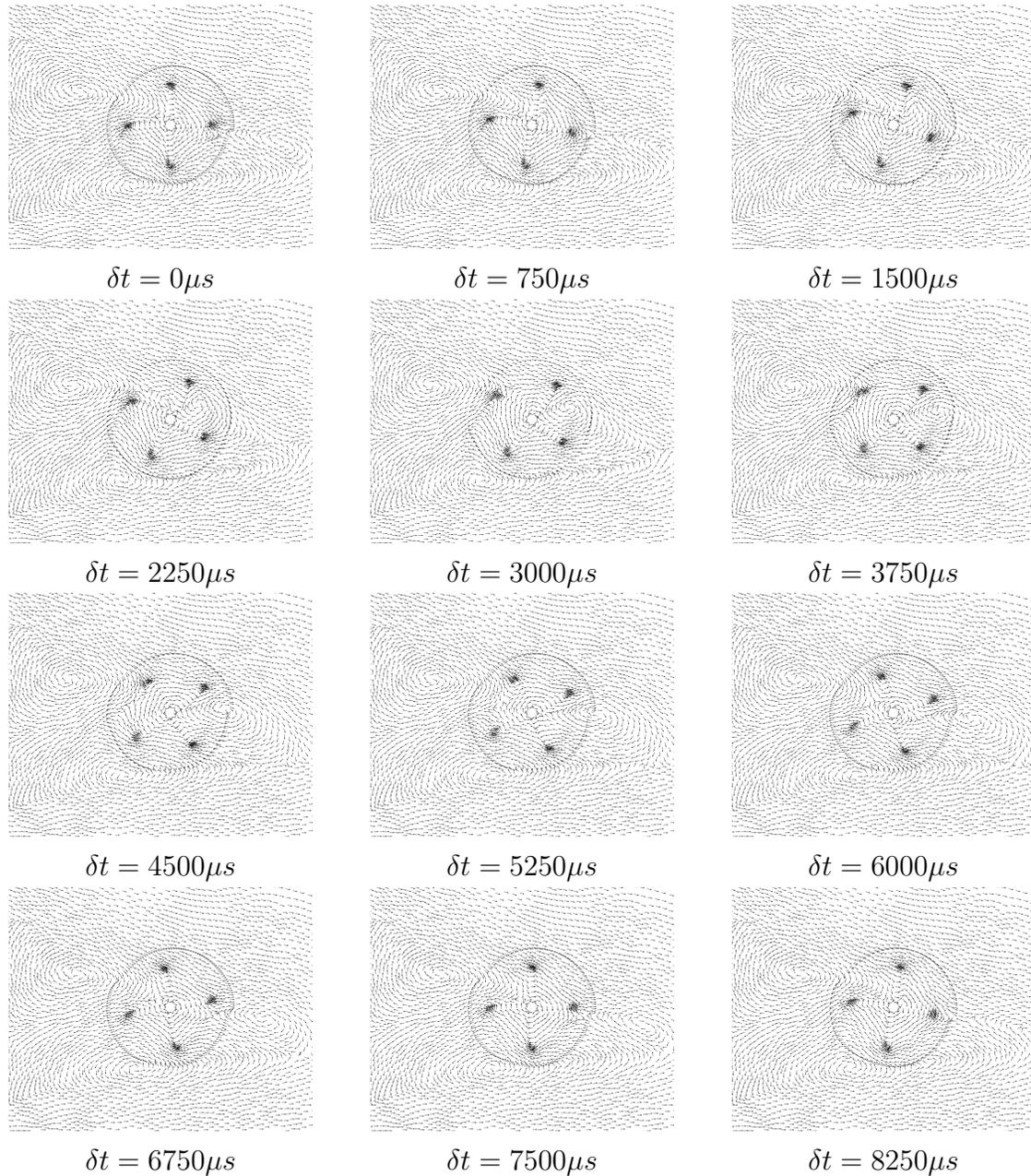


FIG. 4.9 – Énergie capturée par révolution de la roue. Cas 6.

La Fig. 4.10 montre un tracé de  $e_{capture}$  par rapport au temps pour une pale, telle qu'illustrée sous le graphique. L'axe des ordonnées de gauche donne les valeurs pour les devant et arrière de la pale tandis que l'axe des ordonnées de droite donne la puissance totale générée par cette même pale. Les données proviennent du cas 3. On constate donc que la plus grande partie de l'énergie est capturée par le devant de la pale ce qui indique qu'une forme plus profilée pour le derrière de la pale augmenterait fort probablement la génération d'énergie de la roue. Le cycle de génération de puissance est illustré pour une pale mais est identique pour chacune des 4 pales et leur cycle est chacun déphasé de  $90^\circ$  à cause de leur arrangement géométrique. Finalement, afin de montrer l'influence de la rotation de la roue sur les tourbillons, le tableau 4.4 montre l'évolution de ceux-ci pour un cycle géométrique de la roue du cas 3. L'écoulement est identique pour les cycles qui suivent, comme on le remarque aux temps  $\delta t = 7500\mu s$  et  $\delta t = 8250\mu s$  qui correspondent aux temps respectifs  $\delta t = 0\mu s$  et  $\delta t = 750\mu s$  du cycle qui suit. On remarque aussi qu'un tourbillon se détache en aval, à droite, de la pale du dessus; ce tourbillon résulte de la zone de basse pression qui se forme derrière la pale qui passe au point le plus élevé de sa course et qui est une des deux structures qui génèrent de la puissance. L'autre structure qui génère de la puissance est une grande différence de pression entre l'avant et l'arrière de la pale qui passe au point le plus bas de sa course. On constate ces deux phénomènes en étudiant le tableau 4.5 et la figure 4.10. Il est à noter que la répartition des vecteurs de direction est uniquement liée à la répartition des cellules du maillage et sa densité ne représente aucune valeur physique.

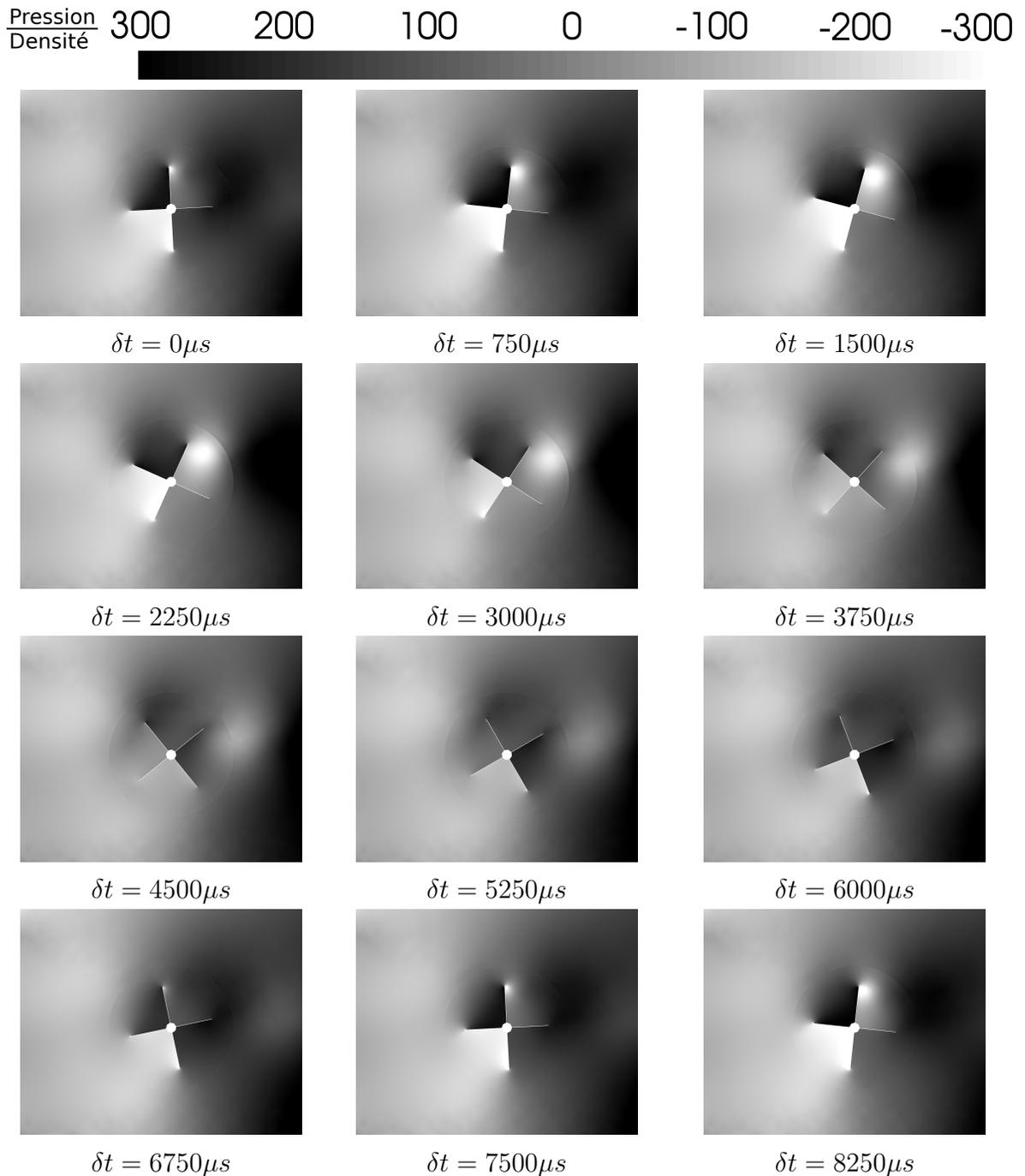
TAB. 4.4 – Vecteurs de direction de l'écoulement autour de la roue à aubes du cas 3.



### Vitesse angulaire variable

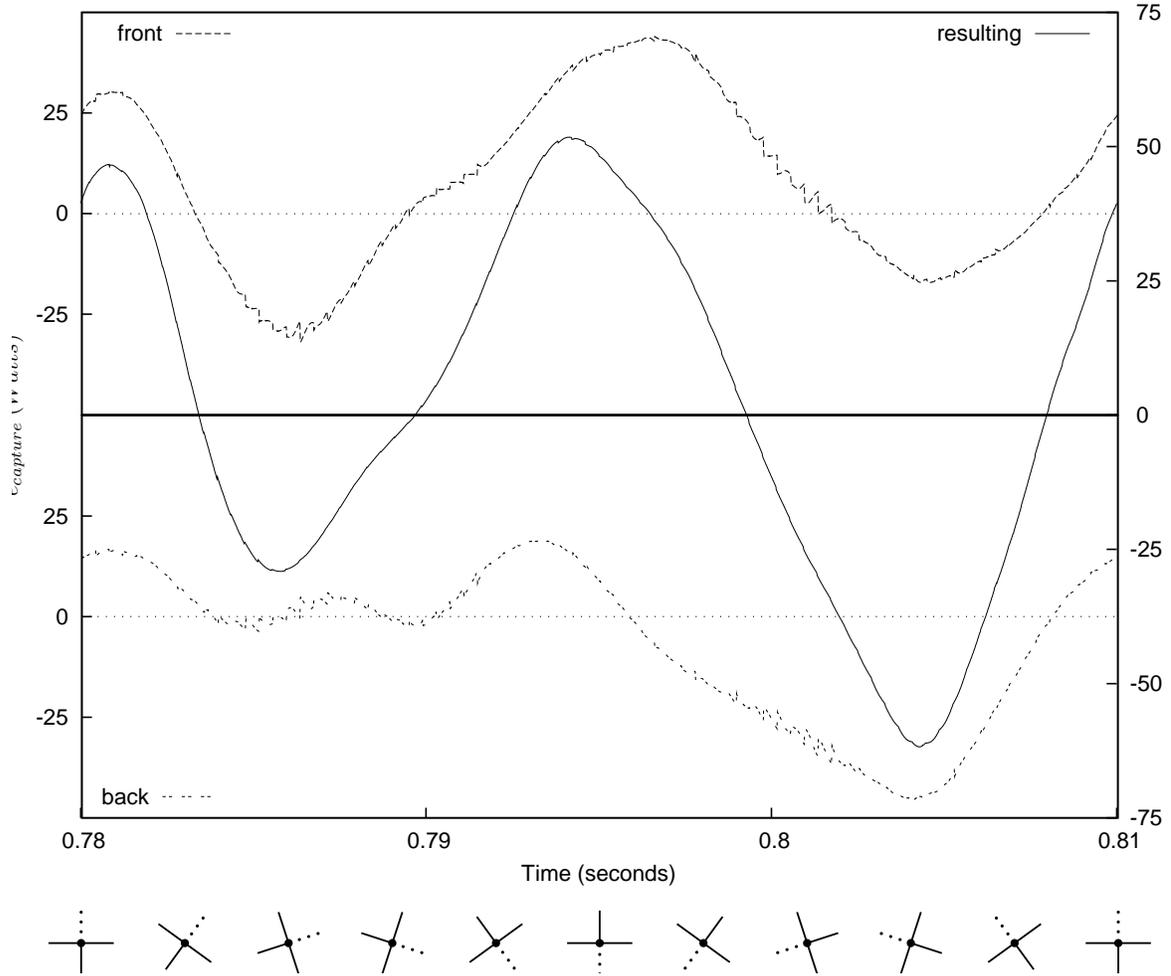
Le code source de l'interface GGI d'OF a été modifié afin de permettre à la roue à aubes de tourner à une vitesse angulaire variable, des cas ont ensuite été simulés pour une vitesse de rotation sinusoïdale. Les résultats de deux simulations sont compilés dans le tableau 4.6 et leurs conditions géométriques sont identiques au cas 3, la seule

TAB. 4.5 – Distribution de pression de l'écoulement autour de la roue à aubes du cas 3.



différence étant la vitesse de rotation de la roue qui est variable,  $R$  devient  $R_{var}$ .

Les cas 7 et 8 du tableau 4.6 ont leur vitesse angulaire définie par,  $R_{var}$ , dans les équations suivantes,


 FIG. 4.10 –  $e_{capture}$  vs Temps pour une pale du cas 3.

$$R_{var,7} = R \times \left( 1.0 + 0.2 \times \sin\left(-2.9249 + \frac{R \times \pi}{7.5} \times t\right) \right) \quad (4.4)$$

$$R_{var,8} = R \times \left( 1.0 + 0.2 \times \sin\left(-2.3 + \frac{R \times \pi}{7.5} \times t\right) \right) \quad (4.5)$$

où la vitesse de rotation de base est  $R = 2000 \text{ RPM}$ , pour les deux cas, et  $t$  est le temps en secondes. Puisque la courbe de production d'énergie a une période identique à un quart de tour de la roue à aubes qui a 4 pales, la période de la fonction sinusoïdale a été choisie identique à un quart de tour afin que la production d'énergie et la vitesse de rotation soient en décalage de phase constant. La seule différence entre les cas 7 et 8 est l'angle de déphasage avec la production d'énergie.  $R_{var,7}$  a été choisie de façon à ce que la roue atteigne sa vitesse maximale lorsque la production d'énergie est aussi maximale, donc un  $M_z$  maximal. L'angle de déphasage est mesuré depuis une approximation faite à partir des courbes de production d'énergie du cas 3. Le but d'utiliser la même phase que

pour la production d'énergie est de réduire les fluctuations d'énergie générée puisque l'on s'attend à ce que les forces  $M_z$  diminuent lorsque la vitesse de rotation augmente. Mais, on note que cette approche n'est pas très fructueuse en observant la Fig. 4.11 où l'on voit les courbes de puissance capturée et de vitesse angulaire pour une révolution complète de la roue du cas 7. Par contre, une plus grande puissance est générée que pour le cas à vitesse angulaire constante.

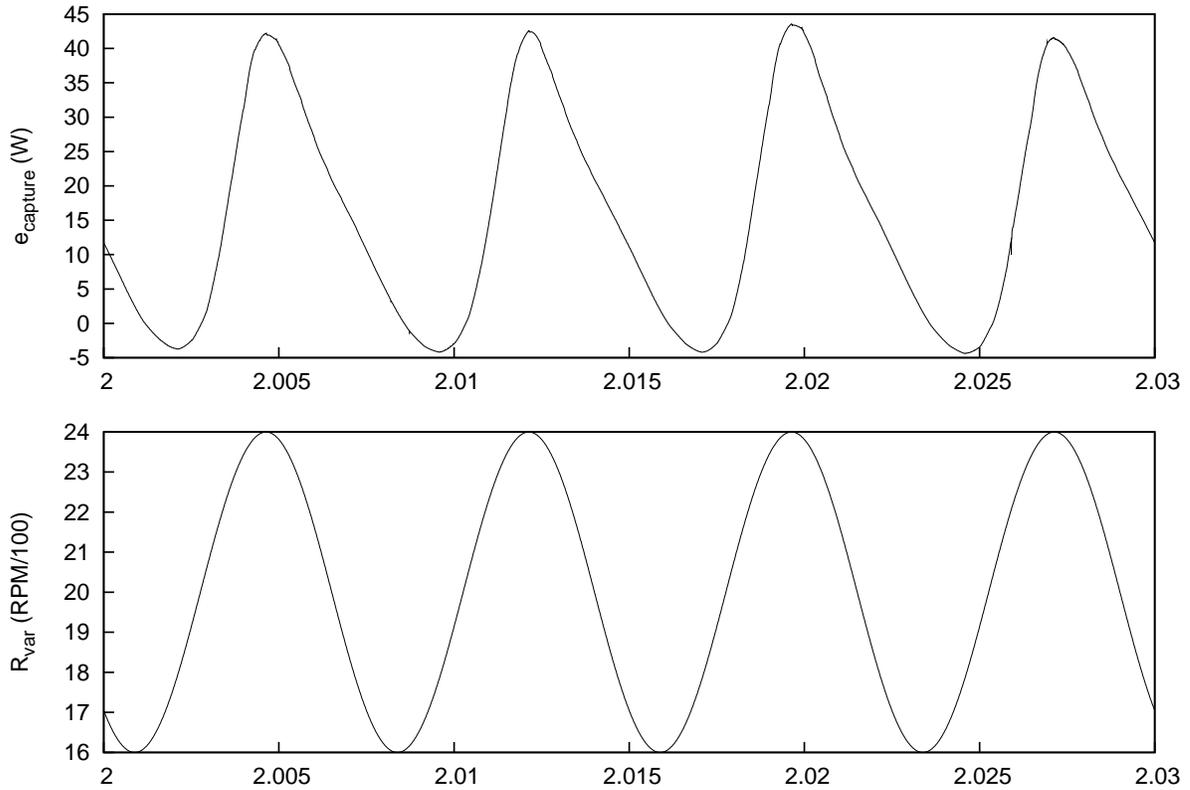


FIG. 4.11 –  $e_{capture}$  vs Temps et  $R$  vs Temps

TAB. 4.6 – Résultats des cas sélectionnés ayant une vitesse angulaire variable

Cas	7	8
$C_{D,corps}$	0.3104	0.3095
$C_{D,pièce}$	-0.0335	-0.0342
$C_{D,évitée}$	0.0231	0.0248
$C_{D,watts}$	336	359
$e_{capture}$	16.1	12.0

Les Figs. 4.12 et 4.13 montrent les tracés de puissance générée calculés pour chaque révolution de la roue à aubes en commençant au temps où la vitesse angulaire a été

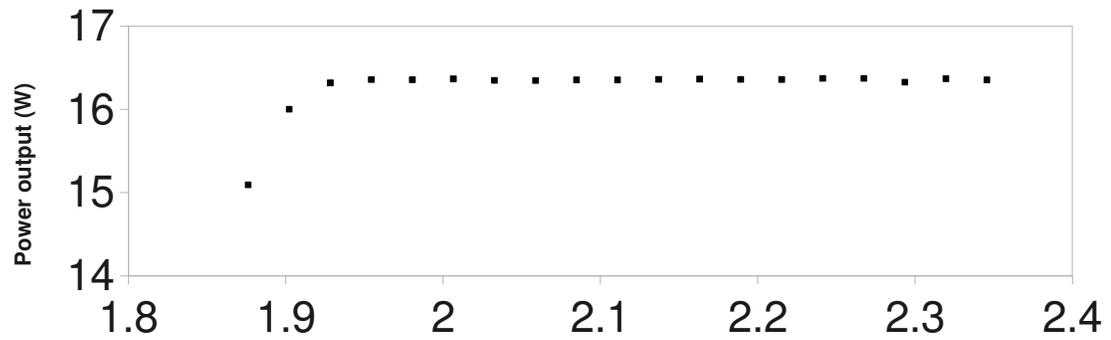


FIG. 4.12 – Génération d'énergie vs Temps. Cas 7.

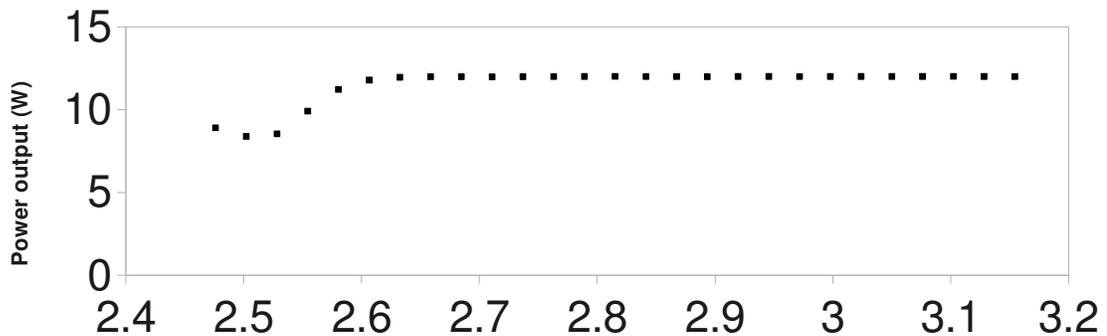


FIG. 4.13 – Génération d'énergie vs Temps. Cas 8.

initialisée dans la simulation. On peut remarquer en comparant avec le tracé de la Fig. 4.9 que le fait d'avoir une vitesse angulaire variable n'augmente pas le temps requis pour atteindre une stabilité des résultats moyens par cycle. Chaque cycle dure 0.03 secondes en se basant sur la vitesse angulaire de 2000 RPM.

#### 4.2.2 Cas de comparaison

Des cas de roues à aubes à vitesse angulaire nulle et des roues modifiées ont été simulés afin de vérifier si la réduction de traînée était exclusive aux roues à aubes en rotation où si elle pouvait être atteinte autrement. L'angle oblique de ces modèles est de  $25^\circ$ , tel que pour les simulations avec pièce en rotation. Les résultats de ces cas sont donnés dans le tableau 4.7. Les pièces ajoutées ont leur centre 13 cm en aval de la paroi arrière et 19 cm sous la paroi du dessus du véhicule et elles ont un rayon de 5 cm. Les

cas  $0^\circ$  et  $30^\circ$  modélisent une roue à aubes fixe tournée de  $0^\circ$  et  $30^\circ$  depuis sa position horizontale, respectivement. Le cas A modélise une roue à aubes dont le rayon interne a été augmenté à 4.5 cm ce qui en fait presque un cylindre. Le cas B est une copie du cas A mais l'objet tourne à 2500 RPM. La puissance consommée par la pièce du cas B est de 1.28 watts. Le cas C est un cylindre ayant un rayon de 5 cm et ne tourne pas. Le cas D est une tentative de rendre le derrière du modèle Ahmed plus aérodynamique afin de comparer les gains d'énergie, ou plutôt les pertes de coefficient de traînée, avec les différentes configurations de roues à aubes et autres objets. Des représentations de ces objets sont données dans le tableau 4.7. Pour le cas D on montre la forme modifiée du corps Ahmed. Afin de clarifier la disposition des pièces ajoutées pour les cas de comparaison, un schéma agrandi de chaque pièce ajoutée au modèle est présenté dans les figures 4.14 à 4.19.

TAB. 4.7 – Résultats des cas de comparaison

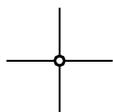
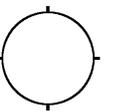
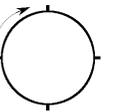
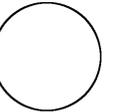
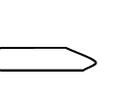
Cas	$0^\circ$	$30^\circ$	A	B	C	D
$C_{D,corps}$	0.3111	0.3063	0.3099	0.3288	0.3107	0.2151
$C_{D,pièce}$	-0.0046	-0.0069	-0.0392	-0.0351	-0.0551	-
$C_{D,évitée}$	-0.0065	0.0006	0.0292	0.0061	0.0445	0.0849
$C_{D,watts}$	-94.5	8.8	445	87.9	645	1233
						

FIG. 4.14 – Corps Ahmed avec pièce ajoutée. Cas  $0^\circ$ .

On note d'après les résultats que la roue à aubes qui n'est pas en rotation ne diminue pas la traînée totale du véhicule. Par contre, un cylindre fixe à l'arrière du modèle cause une plus grande réduction de traînée que ce qui a été trouvé avec une roue à aubes en rotation. Si on raffine le derrière du modèle Ahmed on obtient alors un coefficient de traînée encore plus petit qu'avec le cylindre fixe; on réduit donc la traînée total

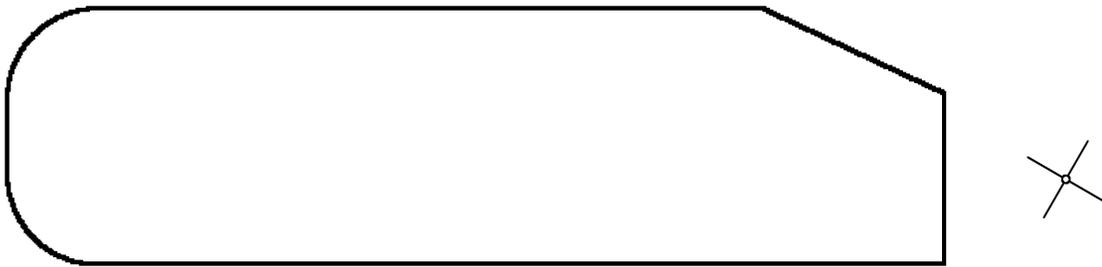


FIG. 4.15 – Corps Ahmed avec pièce ajoutée. Cas 30°.



FIG. 4.16 – Corps Ahmed avec pièce ajoutée. Cas A.

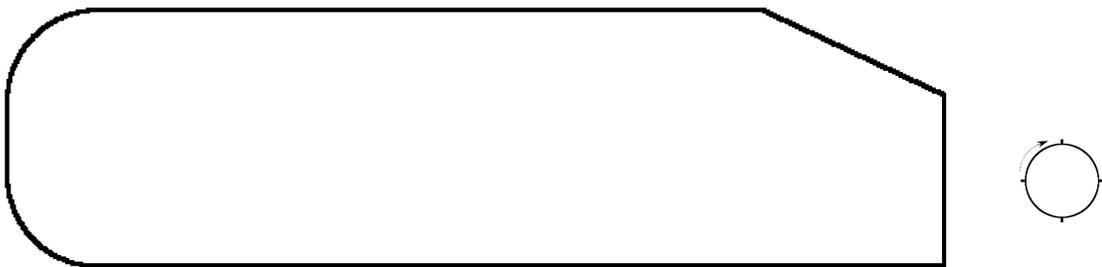


FIG. 4.17 – Corps Ahmed avec pièce ajoutée. Cas B.

d'une quantité approximativement quatre fois plus grande qu'avec une roue à aubes en rotation.

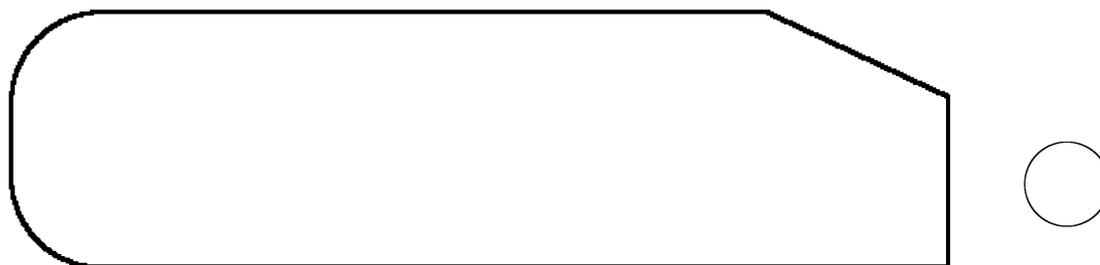


FIG. 4.18 – Corps Ahmed avec pièce ajoutée. Cas C.

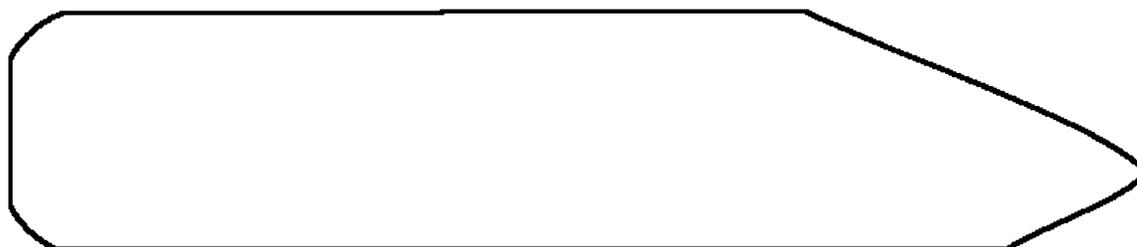


FIG. 4.19 – Corps Ahmed modifié. Cas D.

# Chapitre 5

## Analyses tridimensionnelles

### 5.1 Introduction

Cette section du mémoire rapporte les analyses tridimensionnelles qui ont été effectuées à l'aide du logiciel OF et qui préparent le terrain pour les analyses tridimensionnelles avec pièce mobile sur le modèle Ahmed et sur différents modèles. Les simulations tridimensionnelles ont quelques différences avec les simulations bidimensionnelles, la plus importante est le maillage. Donc, certains paramètres des simulations sont redéfinis dans cette section.

### 5.2 Modèle Ahmed

Un maillage du véhicule Ahmed tridimensionnel a été conçu dans le logiciel Gmsh et analysé dans OF. Il semble par contre, vu la restriction du nombre de cellules dû aux limites du système informatique, que les résultats obtenus par des simulations issues de ce modèle ne sont pas précis. On obtient 20% à 30% d'erreur sur le  $C_d$ . De plus, il a été tenté de créer un maillage structuré dans la couche limite mais le nombre de cellules utilisé est trop petit et le même problème de précision apparaît. Aussi, un maillage structuré dans la couche limite seulement où cela est nécessaire, tel que dans la modélisation bidimensionnelle, a été tenté mais le logiciel de maillage ne permet pas de créer des cellules qui font la transition entre les parois d'un maillage structuré et un maillage non structuré. Il est en fait plutôt irréalisable de vouloir mailler les côtés d'un maillage structuré et extrêmement fin sans recourir à un maillage structuré.

On constate cette difficulté lorsqu'on se demande quels types de cellules pourraient compléter le maillage de couche limite sur les parois arrière oblique et verticale du modèle présenté dans les Figs. 5.1 et 5.2.

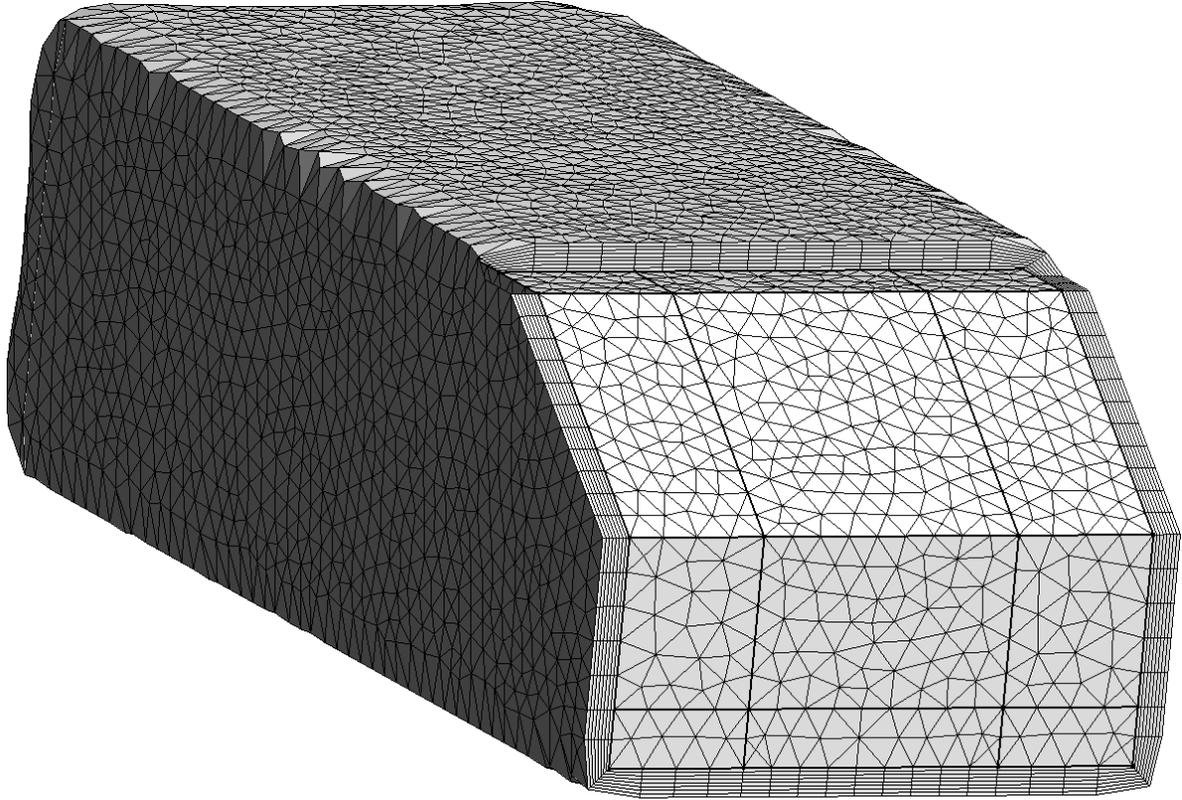


FIG. 5.1 – Corps Ahmed avec maillage de couche limite partiellement structuré.

On voit dans la Fig. 5.1 une vue d'ensemble, du corps Ahmed tridimensionnel avec un maillage de couche limite partiellement structuré. On peut noter en avant plan la paroi oblique au dessus de la paroi arrière verticale. La Fig. 5.2 montre la vue agrandie de ce même maillage et elle met en évidence les difficultés rencontrées par un logiciel de maillage lorsque le maillage structuré de couche limite ne couvre pas la totalité du corps. De plus, les cellules doivent aussi maintenir un gradient d'agrandissement raisonnable.

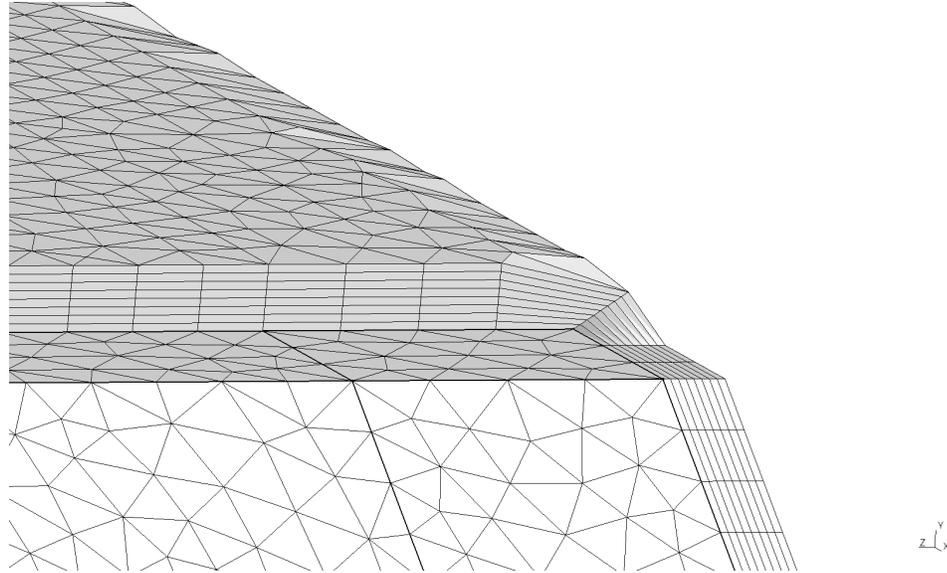


FIG. 5.2 – Vue agrandie de la Fig. 5.1.

## 5.3 Alérion Supermileage

### 5.3.1 Contexte

L'analyse CFD de l'Alérion Supermileage a été effectuée dans le but d'acquérir une meilleure compréhension des effets de la résistance de l'air sur le véhicule. De toute évidence, la traînée sur la coque de l'Alérion est un aspect ayant une influence majeure sur les performances du véhicule. Le véhicule avec pilote pèse environ 100 kg et se déplace à une vitesse maximale d'environ 15 m/s ; son énergie cinétique linéaire à cette vitesse est donc 11250 J. Donc, pour un coefficient de traînée estimé à 0.10, on obtient une force de 3.78 N sur le corps. En supposant que le véhicule maintient une vitesse constante on peut affirmer qu'à chaque seconde il perd 56.7 J d'énergie à cause de la résistance aérodynamique. Il perd donc 0.5% de son énergie cinétique à chaque seconde, ce n'est pas négligeable. On suppose que l'énergie cinétique angulaire emmagasinée dans les roues en rotation est négligeable car elle est de 24 J par roue.

Par ailleurs, si on utilise le calcul numérique montré dans le script donné à l'annexe C pour simuler une décélération de l'Alérion due uniquement à la résistance de l'air on constate que le véhicule initialement à 15 m/s prendra environ 90 minutes pour atteindre une vitesse de 1 m/s mais seulement 3 minutes pour atteindre une vitesse de 10 m/s. On peut voir une courbe de décélération due aux forces aérodynamiques de

l'Alérion à la Fig. 5.3, qui est générée en utilisant le script.

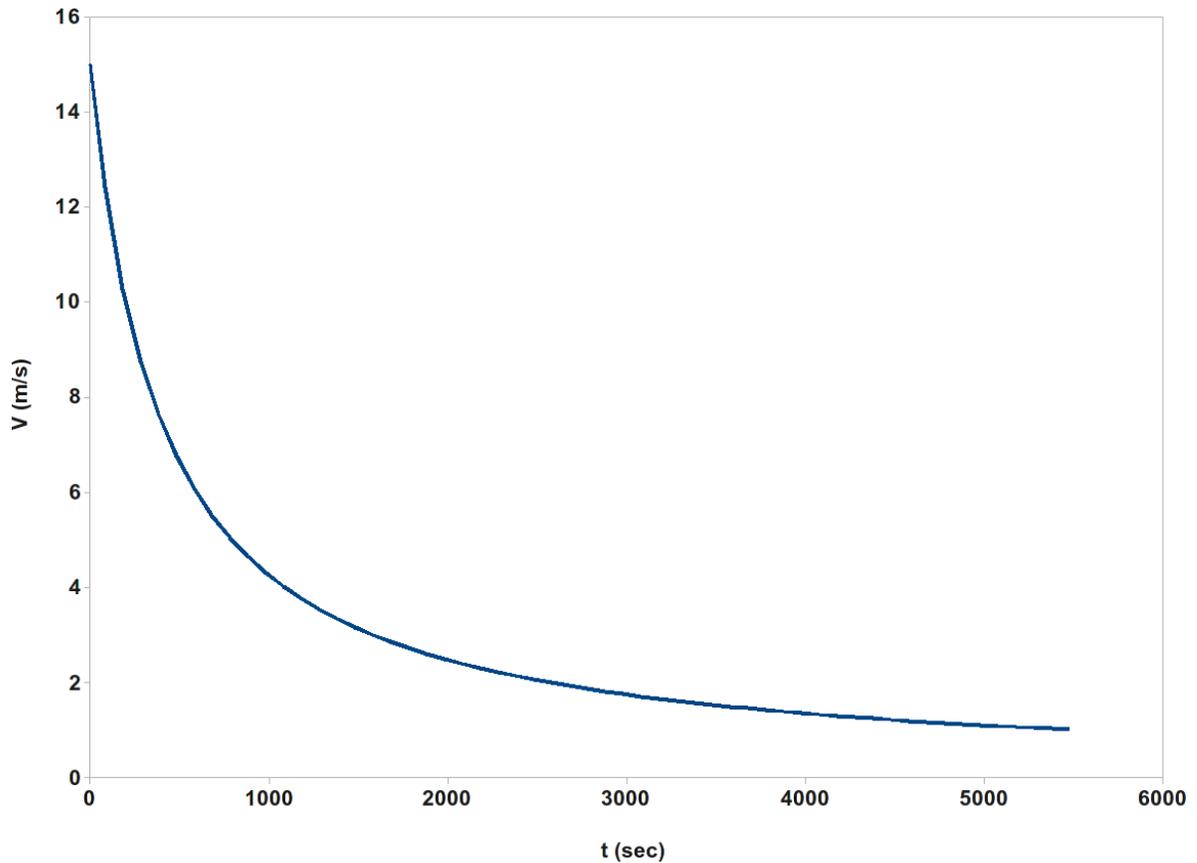


FIG. 5.3 – Courbe de décélération aérodynamique de l'Alérion.

### 5.3.2 Paramètres

D'après les résultats dévoilés par d'autres équipes participant aux compétitions de véhicules à faible consommation d'essence, il était attendu que le coefficient de traînée de l'Alérion ( $C_D$ ) se trouve entre 0.08 et 0.15. Cette plage de  $C_D$  a donc été utilisée pour guider les simulations. L'analyse de l'Alérion est effectuée à l'aide d'un algorithme d'écoulements stationnaires. On utilise ici encore le modèle  $k-\omega$ -SST à cause de sa fiabilité accrue en présence de gradients de pression adverses ainsi que pour des écoulements décollés.

Ici aussi le maillage a été fait à partir du logiciel Gmsh. La génération d'un maillage approprié a été un défi en soit car il était nécessaire de bien résoudre les coins pointus du modèle tout en maintenant le nombre total de cellules assez bas pour permettre

TAB. 5.1 – Conditions limites des variables du modèle de turbulence

	<b>Entrée</b>	<b>Sortie</b>	<b>Sol</b>	<b>Coque</b>	<b>Extérieur</b>
<b>Pression</b>	$\Delta P=0$	0	$\Delta P=0$	$\Delta P=0$	symétrie
<b>Vitesse</b>	9	$\Delta U=0$	0 où 9	0	symétrie
<b>k</b>	.00325	$\Delta k=0$	$\Delta k=0$	$\Delta k=0$	symétrie
$\omega$	13.333	$\Delta \omega=0$	$\Delta \omega=0$	$\Delta \omega=0$	symétrie

une analyse dans des délais raisonnables. Le nombre de cellules a donc été limité à 2 millions en prenant en considération le matériel informatique disponible.

Les résultats de deux analyses légèrement différentes sont donnés. Une à proximité d'un sol fixe, est dénommée «analyse au sol», l'autre avec le véhicule suspendu 30 cm au-dessus du sol, est dénommée «analyse flottante». Le but d'effectuer cette analyse flottante est de réduire les difficultés liées au maillage et à la modélisation de l'écoulement dans la zone complexe située entre le véhicule et le sol. Les résultats présentés pour chacune des analyses convergent complètement.

Puisque l'Alérion ne se déplace pas à sa vitesse maximale en tout temps, sa vitesse moyenne lors des compétitions, 9 m/s, est utilisée pour les deux analyses. La densité de l'air est  $1.2 \text{ kg/m}^3$  et la viscosité cinématique de  $14.75 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . La taille du domaine d'analyse est fixé à 5.2 m x 2.1 m x 22.45 m (largeur x hauteur x longueur) et est choisie en adaptant les dimensions recommandées par (ERCOFTAC) pour le corps Ahmed à l'Alérion. Il faut cependant noter que le modèle Ahmed modélise la forme d'une voiture typique tandis que l'Alérion se situe plutôt à mi-chemin entre une voiture et un avion. Par contre, il semble raisonnable d'analyser ce modèle tel que l'on ferait pour un véhicule terrestre.

Les conditions utilisées aux limites du domaine et sur les parois du modèle sont données dans le tableau 5.1. Les valeurs de k et  $\omega$  sont calculées en supposant une intensité de la turbulence de 0.5% à l'entrée du domaine. Même si en pratique le sol devrait reculer à une vitesse de 9 m/s pour imiter une situation réelle et non à 0 m/s comme on voit en soufflerie, une vitesse du sol de 9 m/s est utilisée pour l'analyse flottante et une vitesse de 0 m/s pour l'analyse au sol. Des tests ont été faits et ont démontré que le choix d'un sol fixe ou en mouvement avait une très faible influence sur les résultats numériques du  $C_D$  de l'Alérion.

TAB. 5.2 – Résultats numériques de l’analyse flottante

Trainée	$F_{pression}$	$F_{visqueuse}$	$C_D = \mathbf{0.08867}$ $y^+_{coque} = 34.7$ (moy.)
Portance	0.872 N	0.334 N	
	-2.27 N	0.00974 N	

TAB. 5.3 – Résultats numériques de l’analyse au sol

Trainée	$F_{pression}$	$F_{visqueuse}$	$C_D = \mathbf{0.1194}$ $y^+_{coque} = 22.6$ (moy.)
Portance	1.32 N	0.302 N	
	-8.15 N	0.00714 N	

### 5.3.3 Résultats et données

Les résultats d’intérêt pour l’analyse de l’Alérion sont enregistrés aux Tabs. 5.2 et 5.3 pour les analyses flottante et au sol, respectivement. Pour simplifier la lecture du mémoire, les résultats graphiques sont donnés dans l’annexe E. Toutes les images sont en niveaux de gris afin de conserver leur lisibilité lorsqu’imprimées.

### 5.3.4 Résultats et discussion

La différence la plus importante entre les forces aérodynamiques sur une voiture standard et celles sur l’Alérion est que sur cette dernière entre 19% et 28% des forces de trainée sont causées par le frottement sur la coque. Sur une voiture typique telle que le modèle Ahmed, les forces de frottement comptent pour environ 5% à 15% de la trainée totale comme documenté par Howard et Pourquoiie [19] et Ahmed *et al.* [1]. Une autre différence importante est le fait qu’il n’y a pas de zone de basse pression derrière la paroi arrière verticale de l’Alérion ; par contre, l’aire de cette paroi est si petite, soit environ un trentième de l’aire frontale, que les effets de la pression sur celle-ci ont une très petite influence sur la trainée totale. La trainée de pression vient des parois courbées du côté du véhicule en débutant vers la zone où le pilote est assis et en continuant jusqu’à l’extrémité arrière du véhicule. C’est sur ces parois que la pression est légèrement négative et cause de la trainée de pression. La trainée de pression est aussi due à la zone de haute pression qui se crée au nez du véhicule. C’est là que l’écoulement incident doit changer abruptement de direction à cause de la forme arrondie du nez.

La zone où l’on retrouve la plus forte énergie cinétique turbulente est tout juste en aval de la paroi arrière du véhicule où l’on peut remarquer que cette énergie turbulente

se dissipe très rapidement, tel qu'illustré dans la Fig. E.11. On remarque aussi que  $k$  est extrêmement moins présent que dans les résultats du modèle Ahmed. Dans les Tabs. 5.2 et 5.3 la valeur moyenne de  $y^+$  sur la coque est donnée comme un indicateur de la résolution du maillage près des parois mais on rappelle qu'elle n'a pas une influence importante sur la validité de la turbulence dissipée par le modèle  $k-\omega$ -SST, différence intéressante avec le modèle Spalart-Allmaras.

Un autre résultat intéressant est que même s'il était attendu que la présence du sol fixe sous le véhicule réduirait la traînée totale en réduisant la vitesse de l'écoulement sous le modèle analysé pour réduire ainsi le frottement sous la coque du véhicule, la traînée totale s'est avérée être plus basse pour l'analyse flottante. Par contre, les forces de frottement sont légèrement moindres pour l'analyse au sol et cela peut être expliqué par le fait que selon les formules empiriques pour une plaque plane, Éqs. 4.1 et 4.2, la couche limite sous le véhicule atteint à son maximum une épaisseur de 6 cm ; donc, la zone de 3 cm entre le dessous du véhicule et le sol devient, dans l'analyse, une zone encombrée de deux couches limites chacune plus épaisse que la zone elle-même. On peut donc croire que le fluide sous le véhicule qui était extérieur au véhicule dans l'analyse flottante est maintenant ralenti par le sol fixe.

Notons que les forces de pression diffèrent beaucoup, comme on voit dans la section 5.3.3. Aussi, en notant que les forces de portance négative sont quatre fois plus fortes dans l'analyse au sol, on prédit que la pression sous le véhicule est plus négative pour l'analyse au sol et que cela cause des zones négatives de pression derrière les protège-roues plus fortes que dans l'analyse flottante et crée plus de traînée de pression. De plus, ceci est confirmé par les résultats, où l'on note que les zones de pression sur les parois arrières des protège-roues avants du véhicule sont plus fortes que dans l'analyse flottante. On peut aussi expliquer cela en supposant que le fluide est comprimé sous le véhicule et que cela crée une plus forte zone de basse pression derrière les roues, comme on voit dans la Fig. E.14 où les vitesses sont plus élevées sous le véhicule dans l'analyse au sol. Malgré que le  $C_D$  plus faible de l'analyse flottante pourrait être justifié par seulement cette différence de pression aux roues, il doit être précisé que la résolution du maillage sur les parois de véhicule pour l'analyse flottante est plus corsée et qu'il serait possible que cela ait causé la différence de traînée entre les deux analyses. On peut comparer les deux résolutions à la Fig. E.13. Cela est plausible puisque la pression sur la surface est prise en tant que la valeur de la paroi d'une cellule et cette valeur est moins précise en un point lorsqu'on a de grandes cellules ; on a aussi une perte de précision pour la direction dans laquelle la pression fait effet. Il est aussi connu que la distance entre le sol et le véhicule est supposée avoir plus d'influence sur le coefficient de portance que sur le coefficient de traînée pour un véhicule typique. La portance n'est pas un soucis majeur dans le cas de l'Alérion puisqu'il ne voyage jamais à de grandes

vitesse et que donc les forces aérodynamiques ne seront jamais assez fortes pour le faire basculer, à moins qu'il soit soumis à des vents extrêmes.

### 5.3.5 Conclusion

À partir de cette analyse, on peut considérer quelques chemins à explorer afin de réduire les forces de traînée sur l'Alérion. Il ne semble pas que l'utilisation d'une pièce mobile telle que celle utilisée sur le modèle Ahmed pourrait bénéficier de l'énergie de tourbillons puisqu'il n'y a pratiquement pas de décollement du fluide dans l'écoulement autour de l'Alérion. Il serait peut-être possible de recapturer de l'énergie cinétique turbulente derrière le véhicule mais les méthodes envisagées ne seront pas déclarées avant d'avoir effectué une analyse CFD plus poussée de l'Alérion. Il serait peut-être aussi plus simple de chercher à éviter cette création d'énergie turbulente puisque l'Alérion n'est pas une voiture ayant des standards de sécurité et d'ergonomie comparables à la plupart des voitures présentes sur les routes. Il faut aussi ajouter que sur l'Alérion la paroi arrière du véhicule ne se termine pas aussi abruptement que sur le modèle numérique, elle est plus arrondie ; c'est une des quelques petites différences entre le modèle numérique et le modèle réel.

Une autre approche serait de réduire la traînée sur la surface, cela n'est pas aussi simple qu'il peut le sembler. Une méthode pour y arriver consiste à utiliser des matériaux ayant une rugosité de surface moindre que celle du matériau présentement utilisé. Le maillot de bain Speedo LZR Racer a recours à ce genre de méthode. Par contre, cette amélioration ne devrait pas être considérée comme prioritaire dans les améliorations de l'Alérion puisqu'elle est coûteuse, demande des analyses poussées, et ce type de matériau se dégrade avec l'utilisation. Il serait plus simple de réduire l'aire frontale du véhicule. Une réduction de l'aire frontale de l'Alérion n'entraînerait pas de réduction du coefficient de traînée si les mêmes proportions sont gardées, mais une réduction des forces de traînée proportionnelle à la réduction d'aire frontale en résulterait. On note ici la deuxième légère différence entre le modèle numérique et l'Alérion : l'aire de l'Alérion réel est légèrement différente du modèle numérique, la différence est inférieure à 5%.

Il serait probable aussi qu'une modification du nez de l'Alérion réduise les forces de pression sur celui-ci mais il faudrait tout-de-même faire attention de ne pas ajouter plus de forces de frottement en agissant ainsi. Des simulations CFD de différentes formes de nez mèneraient probablement à la forme optimale. Puisque l'Alérion se déplace à de basses vitesses, le nez rond n'est pas nécessairement la forme optimale.

Abaisser le dessous du véhicule aurait probablement un effet bénéfique ; Par contre,

cela n'est peut-être pas possible à cause du rayon des roues qui sont présentement utilisées. Si possible, abaisser le véhicule contribuerait à réduire les forces turbulentes qui agissent sur la coque derrière les protège-roues. Une autre manière de s'occuper du problème de la pression négative créée par les protège-roues est de prendre l'air incident sur le nez du véhicule et de le rediriger derrière les roues où la pression est négative. Cela pourrait être fait avec un tube connecté au point le plus à l'avant du véhicule et qui passerait à l'intérieur du véhicule. Des calculs doivent d'abord être faits pour s'assurer que le tube soit bien conçu afin d'éviter d'ajouter plus de frottement que les pertes de pression compenseraient. On note que cette modification aurait le double avantage de réduire la pression à l'avant du véhicule et de l'augmenter derrière les roues.

# Chapitre 6

## Discussion

### 6.1 Généralités

Lors d'un calcul bidimensionnel du corps Ahmed, les roues, qui sont en fait de simples piliers, ne sont pas incluses dans la structure analysée. De plus, les côtés de la voiture ne sont pas modélisés et ne contribuent donc ni au coefficient de frottement ni au coefficient de traînée du véhicule comme il serait le cas en pratique et lors d'une analyse tridimensionnelle. De plus, les structures tourbillonnaires tridimensionnelles que sont les tourbillons longitudinaux ne peuvent être résolues en deux dimensions, il est donc inévitable que la solution bidimensionnelle représente moins bien la réalité qu'un calcul tridimensionnel ayant une résolution de maillage aussi fine. Dans le cas d'une aile d'avion, il est plus facile d'ignorer les effets de bouts vu la grande envergure de l'aile. Dans le cas du véhicule Ahmed, les effets de bouts sont présents et prennent la forme de deux tourbillons longitudinaux qui se développent sur les côtés des parois arrières du modèle et qui influencent la structure bidimensionnelle de l'écoulement. Ces tourbillons sont présents à tous les angles obliques du modèle. On peut voir leur description schématique à la Fig. 6.1 où les structures tourbillonnaires tridimensionnelles sont localisées sur les côtés du corps Ahmed. Il est important de souligner que tous les calculs rapportés dans ce mémoire ignorent toutes les pertes d'énergie telles que la résistance au roulement de la roue à aubes.

Les résultats obtenus avec le modèle de turbulence en deux dimensions sont satisfaisants : l'écoulement sur la paroi oblique demeure attaché sur sa longueur et une petite zone de très basse pression apparaît au début de cette paroi oblique ; cela s'accorde bien avec les études expérimentales de Guilmineau [16] sur le corps Ahmed à angle oblique de  $25^\circ$  où l'écoulement sur la paroi oblique se rattache rapidement sur celle-ci.

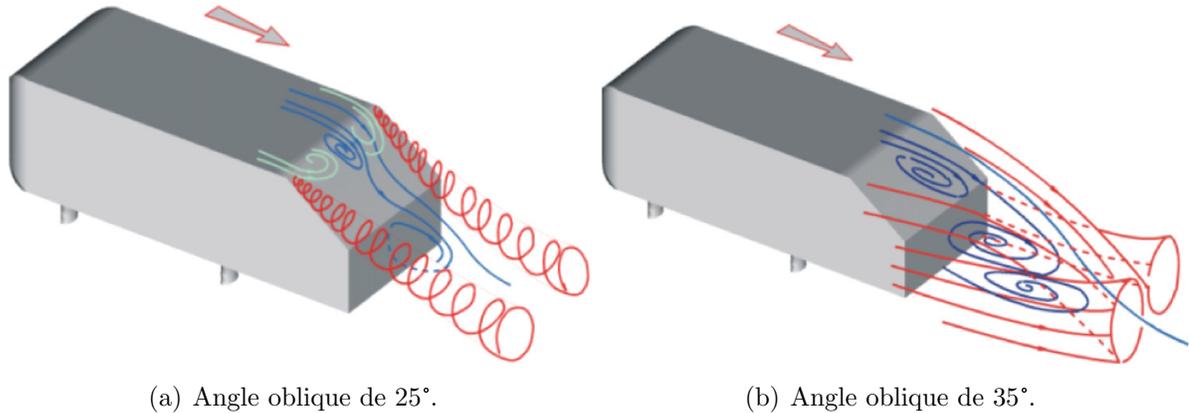


FIG. 6.1 – Schéma de l'écoulement pour deux différents angles. Tiré de l'article de Lienhart et Becker [24].

De plus, Guilmineau [16] note que les analyses tridimensionnelles et instationnaires avec un modèle RANS n'étaient pas en mesure de prédire le recollement sur la paroi oblique.

Afin d'être en accord avec les résultats expérimentaux, les conditions utilisées par Ahmed *et al.* [1] ont été utilisées dans la modélisation numérique malgré qu'elles représentent moins bien la réalité d'un véhicule sur une route. L'objectif consiste à valider les résultats par comparaison avec la littérature. Ces résultats doivent provenir d'un modèle reproduisant le mieux possible les paramètres utilisés dans la soufflerie. Donc, un sol immobile a été modélisé et l'intensité de la turbulence de la soufflerie a été utilisée pour déterminer les valeurs de  $k$  et  $\omega$  à l'entrée du domaine. Les distances aux parois ont aussi été utilisées telles que données dans Ahmed *et al.* [1].

## 6.2 Roue à aubes

Plusieurs configurations de roue à aubes ont été testées. On obtient le maximum d'énergie capturée dans le cas 7 du tableau 4.6 qui simule une roue à aubes ayant un rayon de 5 cm et tournant à une vitesse angulaire moyenne de  $R = 2000 \text{ RPM}$  et une vitesse angulaire  $R_{var}$  définie par l'Éq. 4.4; l'énergie capturée est de 16.1 watts. La configuration de roue à aubes qui donne la plus grande réduction du coefficient de traînée est une roue qui tourne à 4000 RPM et est située légèrement en aval de la zone de l'écoulement où on retrouve le maximum d'énergie cinétique turbulente; elle a un rayon de 4 cm. Cette réduction de traînée est quasiment égalée par la roue à aubes à vitesse angulaire variable du cas 7. Des cas de roue à aubes ayant un centre vide ont été testés et ne donnent pas de résultats intéressants car les roues laissent le fluide

s'échapper d'une pale à l'autre par le centre. Ces résultats ne sont pas répertoriés dans ce mémoire et un centre plein est jugé nécessaire afin d'éviter que le fluide perde son énergie cinétique de manière inefficace où encore de manière à ralentir le mouvement de la roue à aubes. Il est aussi noté d'après des tests qui ne sont pas détaillés dans ce mémoire que le positionnement de la roue à aubes en dehors de la zone de recirculation, et donc faisant obstruction à l'écoulement non ralenti par le véhicule, ne donne pas de bons résultats en termes de traînée car la roue ralentit l'écoulement extérieur et subit alors un grand coefficient de traînée sans toutefois augmenter les forces  $M_z$  qui servent à la génération d'énergie.

Afin de vérifier si la réduction de traînée n'est simplement qu'un résultat obtenu suite à la modification de la géométrie du modèle Ahmed par la présence de la roue à aubes des tests sont faits avec une roue à aubes ayant une vitesse angulaire nulle. Différents objets se rapprochant de la géométrie des roues à aubes sont aussi analysés afin de calculer la réduction de traînée que ceux-ci amènent. On voit alors que les roues à aubes à vitesse angulaire nulle ne réduisent pas le coefficient de traînée par rapport au modèle Ahmed seul. Par contre, le cylindre à vitesse angulaire nulle du cas C réduit le coefficient de traînée visiblement à cause d'une zone de pression positive en aval du cylindre.

En comparant les lignes de courant du cas de référence avec celles du cas avec roue à aubes on note que le tourbillon d'envergure supérieur est beaucoup plus petit en présence de la roue à aubes, comme on le voit lorsqu'on compare les Figs. 4.3 et 4.6. Cette modification de l'écoulement par la présence de la roue à aubes explique en partie pourquoi le coefficient de traînée est réduit. Ce vortex crée aussi une succion sur la roue à aubes et augmente alors  $C_{D,évitée}$ . Il y a visiblement moins d'énergie cinétique turbulente dans les cas avec la roue à aubes et cela indique que moins d'énergie est perdue par le frottement air-air. En se basant sur l'analyse, il semble évident que la vitesse angulaire  $R$  de la roue à aubes a une grande influence sur la quantité d'énergie qui est capturée par le système. Les meilleurs résultats sont obtenus pour une révolution moyenne  $R = 2000 \text{ RPM}$ . Tel qu'anticipé, lorsque la vitesse angulaire de la roue à aubes atteint une certaine vitesse, l'énergie capturée devient nulle et de l'énergie doit être fournie à la roue pour qu'elle puisse maintenir sa vitesse de rotation. Par ailleurs, pour de très basses vitesses de rotation les forces sur la roue à aubes n'augmentent pas assez pour compenser pour la réduction de vitesse de la roue et donc la génération d'énergie diminue.

Les fluctuations d'énergie capturée et du coefficient de traînée ont la même période que la rotation de la roue, comme on le note d'après les Figs. 4.7 et 4.8. Quatre cycles de génération d'énergie sont aperçus pour chaque révolution complète de la roue à

aubes. Dans le cas d'une roue à 4 pales, on considère que chaque révolution de la roue correspond à quatre cycles géométriques identiques. L'écoulement modifié par la présence de la roue à aubes crée un tourbillon sur le bout de la paroi de la pale qui fait face à l'écoulement en aval lorsqu'elle passe à son point le plus élevé du cycle. Ce tourbillon se détache de la pale avant qu'un quart de tour de roue soit complété est une des deux forces desquelles de l'énergie peut être capturée. L'autre force qui permet de capturer de l'énergie est la différence de pression entre l'avant et l'arrière de la pale qui passe à son point le plus bas du cycle.

Il y a certainement un avantage à adapter la quantité d'énergie capturée de l'écoulement aux forces qui sont appliquées sur la roue. On le constate car la plus grande quantité d'énergie a été capturée pour un cas avec une vitesse angulaire variable de la roue à aubes. Une modification au code source d'OF est présentement en cours de manière à ce que la vitesse de rotation de la roue à aubes soit fonction des forces qui sont appliquées sur celle-ci. Un tel code sera intéressant pour simuler une roue à aubes qui recapture l'énergie de l'écoulement à l'aide d'un moteur électrique car il est possible d'ajouter une variable d'emmagasinage d'énergie dans un code ainsi modifié. Des candidats idéaux de véhicules sur lesquels installer une roue à aubes qui capte l'énergie seraient un véhicule électrique ou un véhicule hybride fonctionnant à l'essence et l'électricité, puisqu'ils sont déjà équipés du système électrique nécessaire à l'emmagasinage d'énergie électrique.

L'énergie utilisée pour accélérer et décélérer le poids de la roue à aubes pour un cas à vitesse angulaire variable n'a pas été considérée dans le calcul de  $e_{capture}$  puisque la somme d'énergie est nulle après chaque cycle de rotation car  $R_{var}$  revient à sa valeur initiale et que le cycle de génération d'énergie a la même période que le cycle de  $R_{var}$ . En pratique, une certaine partie de l'énergie générée par la roue à aubes lorsqu'elle accélère serait absorbée dans l'inertie de rotation de la roue et une certaine partie de l'énergie de rotation perdue par la roue en décélérant serait capturée. Il est possible de tracer une nouvelle courbe d'énergie capturée qui tient compte des variations d'énergie cinétique de la roue à aubes mais l'énergie générée au bout d'un cycle demeurerait la même. La courbe montrerait vraisemblablement de moins grandes fluctuations.

Finalement, il faut ajouter que plus de tests doivent être effectués afin de déterminer les zones, vitesses, et géométries optimales pour la génération d'énergie. Il serait probable que des résultats soient obtenus où l'on génère de l'énergie tout en réduisant la traînée de façon aussi efficace qu'avec les cas de comparaisons ayant les meilleures réductions de traînée. Il serait préférable pour les prochaines simulations de raffiner le maillage sur les pales à l'endroit où le tourbillon se décolle de celles-ci de manière à mieux modéliser la dissipation visqueuse de ce tourbillon qui semble disparaître un peu rapidement dans les simulations. Une valeur à la paroi de  $\omega = 1.5 \frac{6\nu}{\beta_1(\delta y)^2}$  serait aussi à

vérifier. On rappelle que le facteur 1.5 remplace une valeur de 10, comme mentionné par Hellsten [17], et qu'il faut tenir compte que des tests de validation seront à effectuer avant de procéder aux calculs avec pièce mobile.

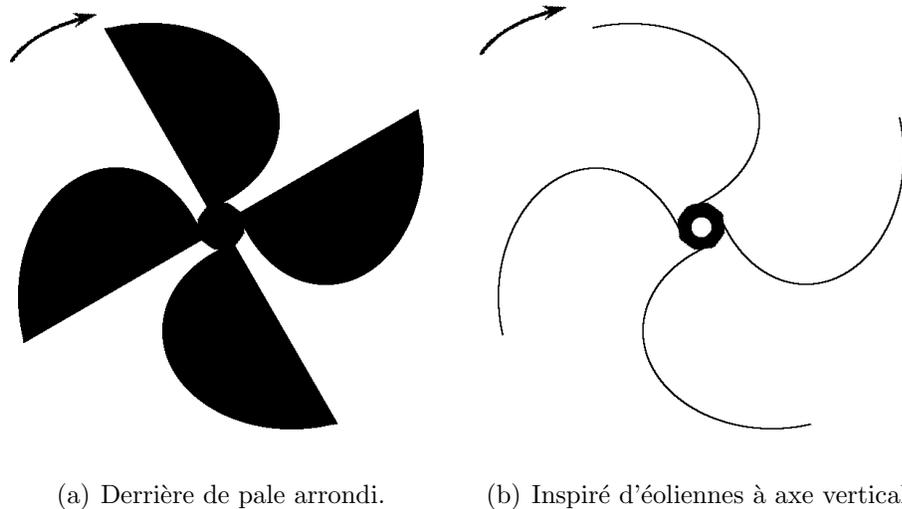


FIG. 6.2 – Modifications suggérées aux pales de la roue à aubes.

La Fig. 6.2 montre deux géométries qui devraient être les prochaines étudiées puisqu'elles ont chacune un avantage face à la géométrie utilisée à présent. On y voit un modèle avec le derrière de la pale arrondi afin de réduire la traînée de rotation sur cette pale, tel que discuté et tel que montré à la Fig. 4.10. On y voit aussi un modèle inspiré des éoliennes à axe vertical car elles sont naturellement bidimensionnelles et utilisées pour la capture d'énergie des vents incidents. Cette géométrie permettrait peut-être même de pouvoir empiéter légèrement dans la zone de l'écoulement extérieur à la bulle de séparation ou dans le tourbillon tournant dans la direction contraire sans pour autant augmenter la traînée totale du véhicule. Le nombre de pales n'est pas invariable. Pour les étapes à venir, il semble souhaitable d'étudier différentes formes de pales, des vitesses de rotations qui sont fonctions des forces appliquées sur celles-ci, et des maillages plus précis et adaptés aux tourbillons. Des analyses tridimensionnelles et des tests expérimentaux sont aussi à considérer.

### 6.3 Résumé

Cette section donne un aperçu rapide des étapes complétées et des démarches à entreprendre pour la poursuite de la recherche effectuée dans le cadre de ce projet de maîtrise.

Ci-dessous sont énumérés les objectifs atteints au cours de cette recherche.

- Choix du programme de maillage.
- Choix du modèle servant à valider le calcul : le modèle Ahmed.
- Essais de plusieurs différents maillages et modèles de turbulence.
- Choisir une combinaison de paramètres de modélisation.
- Valider les résultats via un test de raffinement du maillage.
- Mettre en place des corps en mouvement sur le modèle.
- Modéliser un véhicule plus réaliste, la voiture Alérion Supermileage.
- Répertorier les résultats obtenus avec différentes pièces en mouvement et commenter sur la mise en place pratique de telles pièces.

Finalement, voici une brève énumération des plans futurs pour ce projet.

- Tester de nouvelles géométries d'hélices.
- Essayer de nouvelles configurations.
- Obtenir plus de précision en raffinant le maillage aux points stratégiques.
- Faire des tests tridimensionnels avec une pièce en mouvement.
- Faire des tests expérimentaux avec une pièce en mouvement.
- Faire les analyses sur un véhicule commercial.
- Mettre au point le modèle de turbulence  $k-\omega$ -SST.

# Chapitre 7

## Conclusion

Beaucoup d'information a été accumulée à partir des articles publiés par différents auteurs qui se sont penchés sur le même modèle de véhicule. Il semble que le modèle Ahmed représente encore à ce jour un défi pour la communauté scientifique et que les analyses doivent être bien ajustées pour obtenir de bons résultats numériques.

Pour le modèle Ahmed, il a été possible d'obtenir plusieurs solutions ayant convergé en ayant recours à différents modèles de turbulence, domaines de calcul, résolutions du maillage, conditions limites, et paramètres généraux de l'algorithme. Il semblerait aussi que pour certains cas la solution stationnaire soit la bonne tandis que pour d'autres il faut trouver une solution instationnaire pour obtenir de bons résultats. Le modèle qui a été choisi pour effectuer les simulations avec une pièce en mouvement est un modèle instationnaire qui modélise la turbulence avec les équations  $k-\omega$ -SST.

Il a été trouvé qu'une roue à aubes en rotation peut générer 16.1 watts tout en réduisant la traînée de 7.7%. Elle peut aussi réduire la traînée de 8.4% si au lieu de lui enlever de l'énergie on lui en fournit. Ces résultats sont calculés en extrapolant les résultats de l'analyse du modèle bidimensionnel sur la largeur d'un modèle Ahmed tridimensionnel. Cette extrapolation est vraisemblable en autant qu'on a recours à un système similaire à ce que Beaudoin et Aider [5] ou Lehugeur, Gilléron, et Ivanić [23] ont utilisé pour fortement affaiblir les tourbillons longitudinaux et ainsi supprimer la plupart des propriétés tridimensionnelles de l'écoulement près des parois arrières du corps Ahmed. De cette manière, les tourbillons en envergure gardent leur qualité bidimensionnelle telle que simulée.

# Bibliographie

- [1] S. R. Ahmed, G. Ramm, and G. Faltn. Some salient features of the time averaged ground vehicle wake. Technical Report TP-840300, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., 1984.
- [2] W. Angelis, D. Drikakis, F. Durst, and W. Khier. Numerical and experimental study of the flow over a two-dimensional car model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 62(1) :57–79, 1996.
- [3] J. B. Barlow, R. Guterres, and R. Ranzenbach. Experimental parametric study of rectangular bodies with radiused edges in ground effect. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89(14-15) :1291–1309, 2001.
- [4] I. Bayraktar, D. Landman, and O. Baysal. Experimental and computational investigation of ahmed body for ground vehicle aerodynamics. *SAE Transactions : Journal of Commercial Vehicles*, 110(2) :613–626, 2001.
- [5] J.-F. Beaudoin and J.-L. Aider. Drag and lift reduction of a 3d bluff body using flaps. *Experiments in Fluids*, 44(4) :491–501, 2008.
- [6] D. Bouris and G. Bergeles. 2d les of vortex shedding from a square cylinder. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 80 :31–46, 1999.
- [7] C.-H. Bruneau, P. Gilliéron, and I. Mortazavi. Flow manipulation around the ahmed body with a rear window using passive strategies. *Comptes Rendus Mécanique*, 335(4) :213–218, 2007.
- [8] F. Campos. Application of openfoam for automotive aerodynamics development. In *Proceedings of the 4th OpenFOAM Workshop*, 2009.
- [9] H. Choi, W.-P. Jeon, and J. Kim. Control of flow over a bluff body. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 40 :113–139, 2008.
- [10] J. Cousteix. *Turbulence et couche limite*. Cépaduès Éditions, 1989.
- [11] E. de Villiers. *The Potential of Large Eddy Simulation for the Modeling of Wall Bounded Flows*. PhD thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, 2006.

- [12] U.S. Department of Energy : Office of Energy Efficiency and Renewable Energy and U.S. Environmental Protection Agency. Advanced technologies & energy efficiency. <http://www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml>, 2009.
- [13] G. Franck, N. Nigro, M. Storti, and J. D’Elia. Numerical simulation of the ahmed vehicle model near-wake. Technical report, Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química, Argentina, 2007.
- [14] C. Geuzaine and J.-F. Remacle. Gmsh : a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *Int. J. Numer. Meth. Engng*, 79(11) :1309–1331, 2009.
- [15] P. Gilliéron and F. Chometon. Modelling of stationary 3d separated air flows around an ahmed reference model. In *Third International workshop on vortex*, pages 173–182. ESAIM, 1999.
- [16] E. Guilmineau. Computational study of flow around a simplified car body. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(6-7) :1207–1217, 2008.
- [17] A. Hellsten. On the solid-wall boundary condition of omega in the k-omega-type turbulence models. Technical Report B-50, Helsinki University of Technology, Laboratory of Aerodynamics, 1998.
- [18] C. Hinterberger, M. García-Villalba, and W. Rodi. Large eddy simulation of flow around the ahmed body. In R. McCallen, F. Browand, and J. Ross, editors, *Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, The Aerodynamics of Heavy Vehicles : Trucks, Buses, and Trains*, pages 77–87. Springer Verlag, 2004.
- [19] R. J. A. Howard and M. Pourquie. Large eddy simulation of an ahmed reference model. *Journal of Turbulence*, 3 :012, 2002.
- [20] S. Julien and V. Métivier. Effet de la longueur du domaine de calcul. 2007.
- [21] M. S. Kim and D. Geropp. Experimental investigation of the ground effect on the flow around some two-dimensional bluff bodies with moving-belt technique. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74-76 :511–519, 1998.
- [22] S. Krajnovic and L. Davidson. Influence of floor motions in wind tunnels on the aerodynamics of road vehicles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93 :677–696, 2005.
- [23] B. Lehugeur, P. Gilléron, and T. Ivanić. Contribution de l’éclatement tourbillonnaire à la réduction de la traînée des véhicules automobiles : approche numérique. *C. R. Mécanique*, 334 :368–372, 2006.
- [24] H. Lienhart and S. Becker. Flow and turbulence structures in the wake of a simplified car model. *SAE Technical Paper*, 2003-01-0656, 2003.
- [25] H. Lienhart, C. Stoots, and S. Becker. Flow and turbulence structures in the wake of a simplified car model (ahmed model). Technical report, Lehrstuhl für

- Strömungsmechanik (LSTM), Universität Erlangen-Nürnberg, Cauerstr. 4, 91058 Erlangen, Germany, 2000.
- [26] Y. Maciel. Notes du cours couches limites. Université Laval, 2008.
- [27] F. R. Menter. Improved two-equation k-omega turbulence models for aerodynamic flows. *NASA STI/Recon Technical Report N*, 93 :22809–+, October 1992.
- [28] F. R. Menter and T. Esch. Elements of industrial heat transfer predictions. In *Proceedings of the 16th Brazilian congress of mechanical engineering (COBEM)*, 2001.
- [29] S. Möller, D. Suzzi, and W. Meile. Investigation of the flow around the ahmed body using rans and urans with various turbulence models. In *3rd OpenFOAM Workshop*, 2008.
- [30] M. Olivier and G. Dumas. Non-linear aeroelasticity using an implicit partitioned finite volume solver. In *Proceedings of the 17th Annual Conference of the CFD Society of Canada*, 2009.
- [31] OpenCFD. *OpenFOAM user guide*. OpenCFD Limited, Berkshire, UK, 2008.
- [32] OpenCFD. *OpenFOAM-dev-1233 source code*. OpenCFD Limited, Berkshire, UK, 2009.
- [33] T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, and J. Zhu. A new k-[epsilon] eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, 24(3) :227–238, 1995.
- [34] P.R. Spalart and S.R. Allmaras. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. *La Recherche Aérospatiale*, 1994.
- [35] R. Strachan, K. Knowles, and N. Lawson. The vortex structure behind an ahmed reference model in the presence of a moving ground plane. *Experiments in Fluids*, 42(5) :659–669, 2007.
- [36] B. M. Sumer. Lecture notes on turbulence. Technical University of Denmark, 2007.
- [37] J. F. Thompson, B. K. Soni, and N. P. Weatherill. *Handbook of grid generation*. CRC Press, 1999.
- [38] S. Vengadesan and A. Nakayama. Evaluation of les models for flow over bluff body from engineering application perspective. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 30(1) :11–20, 2005.

# Annexe A

## Conversion de Gmsh vers OF

Vu que nous traitons avec un logiciel à code source ouvert en constant développement et que les conditions limites ne peuvent être spécifiées directement dans le logiciel Gmsh, un script Perl est utilisé pour ajuster quelques valeurs du fichier «boundary» qui est créé par le programme de conversion GmshToFoam afin de le rendre utilisable par OF sans avoir à modifier les données à la main à chaque usage. Le fichier «boundary» est lu par OF au début du calcul et lui indique les conditions limites de chaque paroi du maillage. Le script est retranscrit ci-dessous et il est lancé dans un terminal Linux en écrivant la commande `perl nom_du_script.pl $PWD` depuis le dossier principal de l'analyse en cours.

```
1 open(INPUT, "<${ARGV[0]}/constant/polyMesh/boundary") or die;
2 @input_array=<INPUT>;
3 close(INPUT);
4 $input_scalar=join("", @input_array);
5 # Do your substitution here.
6 $input_scalar =~ s/#frontAndBack\n.*{\n.*patch;#frontAndBack\n
   {\n          type          empty;#i;
7 $input_scalar =~ s/#defaultFaces\n.*{\n.*\n.*\n.*}##i;
8 $number_in = $input_scalar;
9 $number_in =~ s/#\n\n\(\n.*frontAndBack(.|\n)*##i;
10 $number_in =~ s#(.|\n)*//\n\n##i;
11 $number_in = $number_in -1;
12 $input_scalar =~ s#//\n\n\d\n\(\n#//\n\n$number_in\n\(\n#i;
13 $input_scalar =~ s/#fixedWalls\n.*{\n.*patch;#fixedWalls\n
   {\n          type          wall;#i;
14 $input_scalar =~ s/#movingWall\n.*{\n.*patch;#movingWall\n
   {\n          type          wall;#i;
```

```

15 $input_scalar =~ s#splitWall\n.*{\n.*patch;#splitWall\n    {\n
        type                wall;#i;
16 $input_scalar =~ s#topWall\n.*{\n.*patch;#topWall\n    {\n
        type                symmetryPlane;#i;
17
18
19 $input_scalar =~ s#insideSlider\n.*{\n.*patch;#insideSlider\n
        {\n                type                ggi;\n zone insideZone;\n
        bridgeOverlap    false;\n    shadowPatch outsideSlider;#i;
20 $input_scalar =~ s#outsideSlider\n.*{\n.*patch;#outsideSlider\
n    {\n                type                ggi;\n zone
        outsideZone;\n    bridgeOverlap    false;\n    shadowPatch
        insideSlider;#i;
21 $input_scalar =~ s#impellerWall\n.*{\n.*patch;#impellerWall\n
        {\n                type                wall;#i;
22 $input_scalar =~ s#baffleWall\n.*{\n.*patch;#baffleWall\n
        {\n                type                wall;#i;
23
24
25 $input_scalar =~ s#floor\n.*{\n.*patch;#floor\n    {\n
        type                wall;#i;
26 $input_scalar =~ s#outdoors\n.*{\n.*patch;#outdoors\n    {\n
        type                symmetryPlane;#i;
27
28 open(OUTPUT, ">$ARGV[0]/constant/polyMesh/boundary") or die;
29 print(OUTPUT $input_scalar);
30 close(OUTPUT);

```

# Annexe B

## Calcul de $C_D$ dans OF

Portion du fichier «controlDict» concernant le coefficient de traînée. Le fichier «controlDict» est lu par OF au début du calcul et lui indique les paramètres généraux du calcul. Ici, rhoInf représente la masse volumique  $\rho$  du fluide, dragDir la direction dans laquelle on calcule la traînée, magUInf la norme de U loin des parois, lRef la longueur référence (L), et Aref l'aire de référence (aire frontale projetée dans le plan y-z).

```
1 forceCoeffs
2 {
3   type forceCoeffs;
4   functionObjectLibs ("libforces.so");
5   patches (fixedWalls);
6   rhoInf 1.2;
7   CofR (0 0 0);
8   liftDir (0 1 0);
9   dragDir (1 0 0);
10  pitchAxis (0 0 0);
11  magUInf 1;
12  lRef 1.044;
13  Aref 0.00288;
14 }
```

## Annexe C

# Décélération aérodynamique de l'Alérion

Ci-dessous est montré le fichier Octave servant à calculer numériquement le ralentissement de l'Alérion dû uniquement aux forces aérodynamiques. Le calcul est effectué seconde par seconde et est basé sur l'énergie cinétique du véhicule.  $k$  est l'énergie cinétique perdue au pas de temps en question et  $V$  est la vitesse du véhicule à ce pas de temps.  $t$  est le temps en secondes.

```
1 Vo=15;
2 Fd=0.1*0.28*1.2*0.5;
3 V=15;
4 kNow=11250;
5 tPrev=0;
6 for t = 1:10000
7 tNow=t ;
8 dt=tNow-tPrev ;
9 k=Fd*V^2*V*dt ;
10 kNow=kNow-k ;
11 V=sqrt(kNow/50)
12 if (V <= 1)
13 break ;
14 endif
15 tPrev=t ;
16 endfor
```

# Annexe D

## Code modifié de rotation de l'interface

Ci-dessous est copié certaines parties du code source qui ont été modifiées dans le fichier «mixerGgiReactFvMesh.C» en langage C++. Le fichier «mixerGgiReactFvMesh.C» est compilé afin de créer une nouvelle bibliothèque de maillage mobile et il a été inspiré du fichier «mixerGgiFvMesh.C» qui est le code de l'interface GGI d'OF. Le but n'est pas de reproduire ici un fichier prêt à compiler mais plutôt de donner une idée générale du fonctionnement du code modifié. Ces modifications ont pour but de permettre une rotation avec une vitesse angulaire sinusoïdale ou avec vitesse angulaire dépendante des forces appliquées sur la roue à aubes.

`rpm_` est la valeur de vitesse angulaire fournie au logiciel, `rpmMod_` est la valeur de la vitesse angulaire ajustée par le code, `rpmPrev_` est la valeur de la vitesse angulaire à l'itération précédente, `alpha_` est l'accélération angulaire de la roue à aube, `MofI_` est le moment d'inertie de la roue, `react_` est une variable qui détermine si la vitesse angulaire est laissée constante (`react_=off`), si elle est ajustée sinusoïdalement (`react_=sin`), ou si elle est ajustée selon les forces appliquées (`react_=yes`). `rhoRef` et `rhoInf` sont la masse volumique  $\rho$ . `CofR` est le centre de rotation. `fm` est le vecteur comportant les forces calculées sur la roue à aubes.

```
1  forcesMoments fm = calcForcesMoment ();
2  //applying function to RPM
3  if ( react_ == "yes" )
4      {
5  // rotational acceleration in rad/s^2
6      alpha_ = (fm.second().first().component(vector::Z) + fm.
                second().second().component(vector::Z))/(MofI_.component
```

```

        (vector::Z));
7 rpmMod_ = rpmPrev_+(alpha_*60/(2*Pi_))*time().deltaT().value()
    ;
8 rpmPrev_ = rpmMod_;
9 }
10 else if (react_ == "sin")
11 {
12 rpmMod_ = rpm_*(1.0+0.2*sin(-2.3+(rpm_*Pi_/7.5)*time().value
    ()));
13 }
14 else if (react_ == "off")
15 {
16 rpmMod_ = rpm_;
17 }
18 else
19 {
20     FatalErrorIn("mixerGgiReactFvMesh::update()")
21         << "Invalid_value_of_react_in_dynamicMeshDict"
22         << exit(FatalError);
23 }
24     // Rotational speed needs to be converted from rpm
25     movePoints
26     (
27         csPtr_>globalPosition
28         (
29             csPtr_>localPosition(allPoints())
30             + vector(0, rpmMod_*360.0*time().deltaT().value()
31                 /60.0, 0)
32             *movingPointsMask()
33         )
34     );
35 //write RPM to file
36 writeRpm();

```

# Annexe E

## Résultats graphiques de l'analyse de l'Alérion Supermileage

### E.1 Notes

Les résultats affichés dans cette section proviennent de l'analyse au sol sauf indication contraire. Il sont montrés en échelles de gris afin d'éviter les confusions lorsqu'imprimés en noir et blanc.

### E.2 Résultats

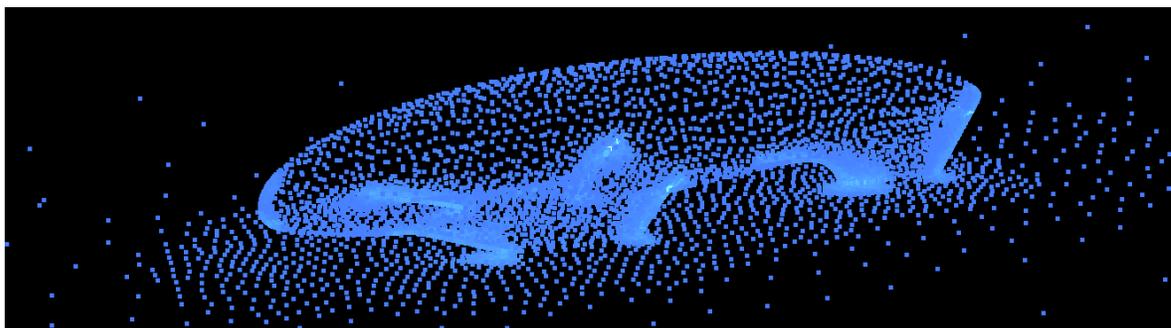


FIG. E.1 – Densité du maillage de l'Alérion.

La Fig. E.1 montre la densité du maillage de l'analyse au sol. Chaque point représente le centre d'une face de paroi. Les cellules qui ne sont pas en contact avec le véhicule ou le sol ne sont donc pas montrées.

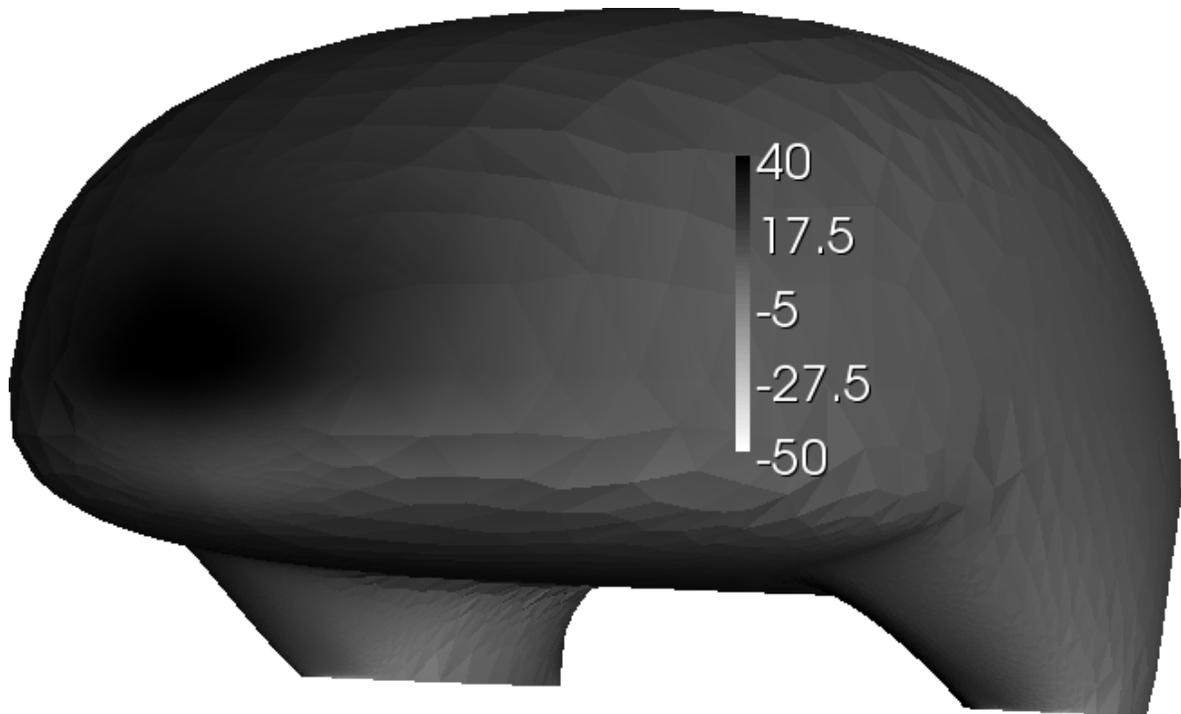


FIG. E.2 – Pression sur la coque de l'Alérion, vue frontale.

La Fig. E.2 montre la distribution de la pression sur la coque, telle que vue depuis le devant de l'Alérion. On y montre une étendue représentant l'intervalle total des valeurs de pression. On rappelle que les pressions données par OF sont divisée par la masse volumique,  $\rho = 1.2$ .

La Fig. E.3 montre la distribution de la pression sur la coque, telle que vue depuis le devant de l'Alérion. On y montre une étendue représentant un intervalle réduit des valeurs de pression afin de bien discerner les endroits où la pression est positive des endroits où la pression est négative.

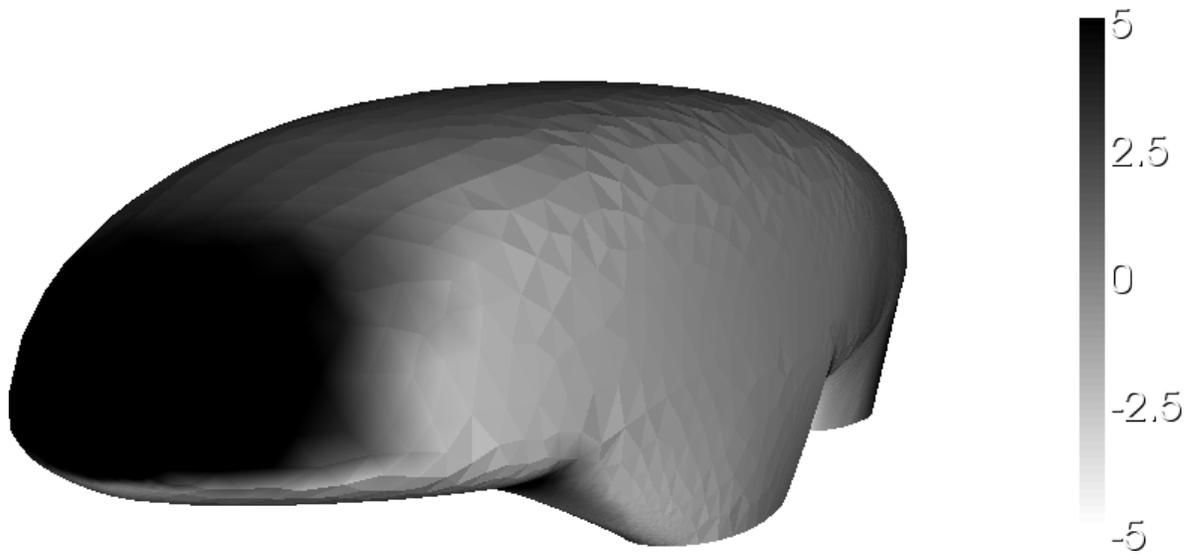


FIG. E.3 – Pression sur la coque de l'Alérion, vue frontale. Intervalle réduit.

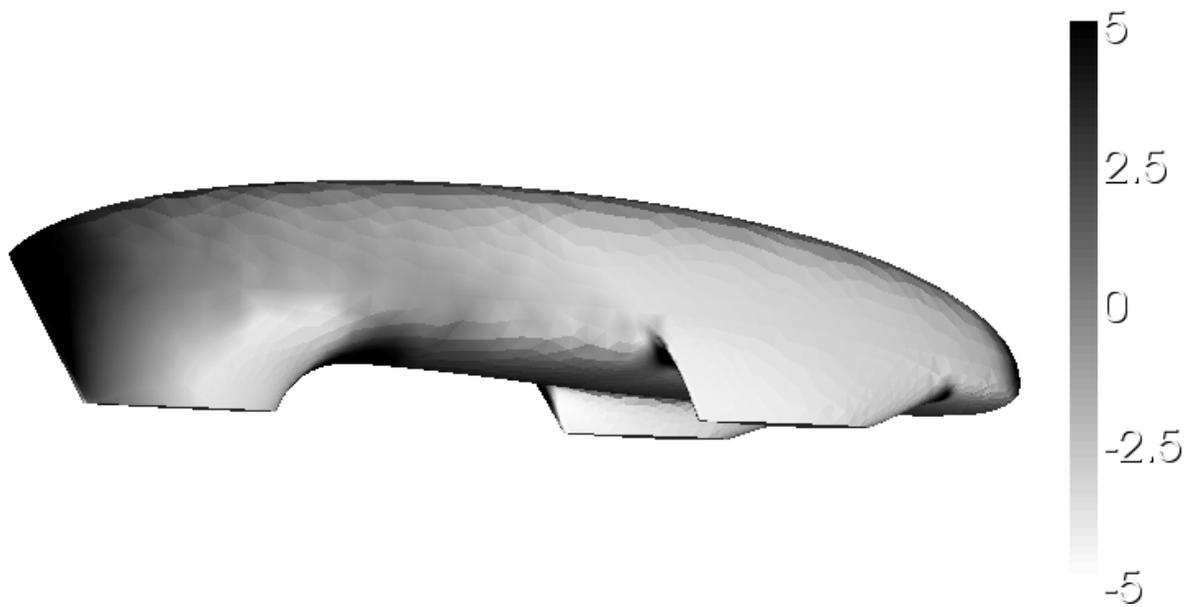


FIG. E.4 – Pression sur la coque de l'Alérion, vue du flanc. Intervalle réduit.

La Fig. E.4 montre la distribution de la pression sur la coque, telle que vue depuis le côté de l'Alérion. On y montre une étendue représentant un intervalle réduit des valeurs de pression afin de bien discerner les endroits où la pression est positive des endroits où la pression est négative. Le derrière de l'Alérion est à gauche.

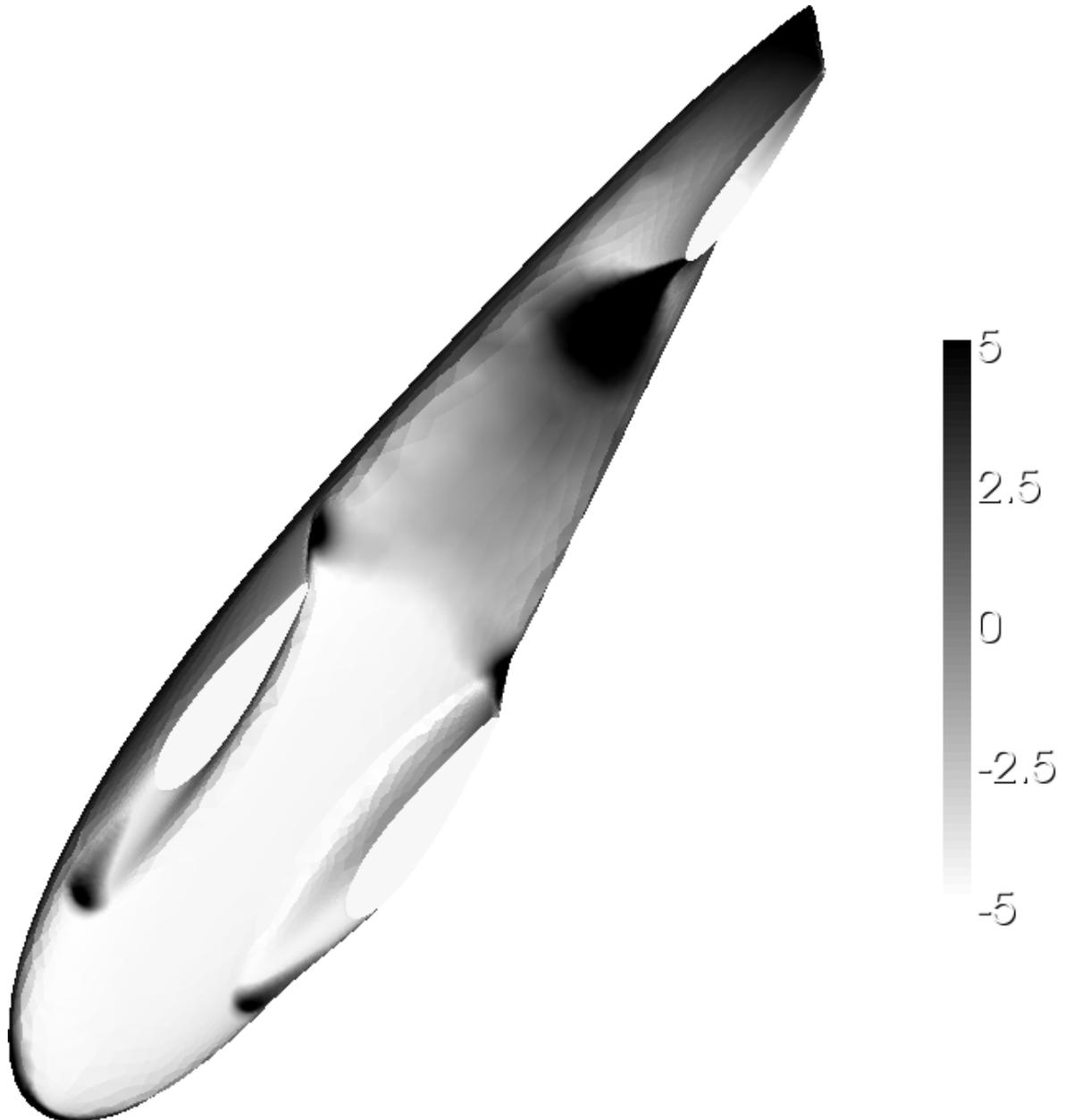


FIG. E.5 – Pression sur la coque de l'Alérion, vue du dessous. Intervalle réduit.

La Fig. E.5 montre la distribution de la pression sur la coque, telle que vue depuis le dessous de l'Alérion. On y montre une étendue représentant un intervalle réduit des valeurs de pression afin de bien discerner les endroits où la pression est positive des endroits où la pression est négative.

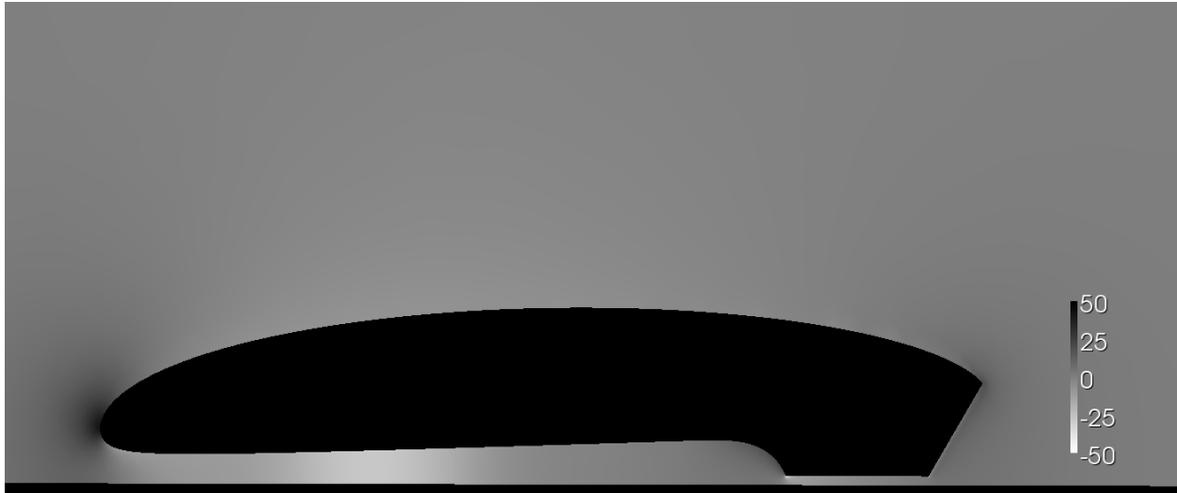


FIG. E.6 – Pression autour de l'Alérion, au milieu.



FIG. E.7 – Pression autour de l'Alérion, à 10 cm du milieu.

Les Figs. E.6, E.7, E.8, et E.9 sont une série de plans coupés afin de montrer l'évolution tridimensionnelle du champ de pression autour de l'Alérion. Elles représentent des plans coupés du milieu, à 10 cm du milieu, à 20 cm du milieu, et à 30 cm du milieu, respectivement. Le devant du véhicule est à gauche et le derrière à droite. L'intervalle de pression est représenté dans son intégrité.

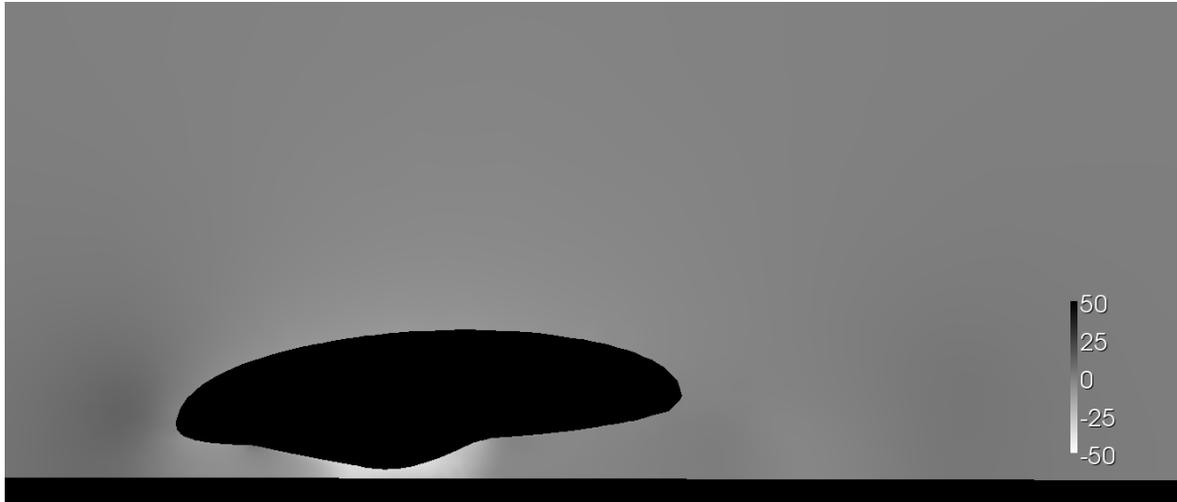


FIG. E.8 – Distribution de pression autour de l'Alérion, à 20 cm du milieu.

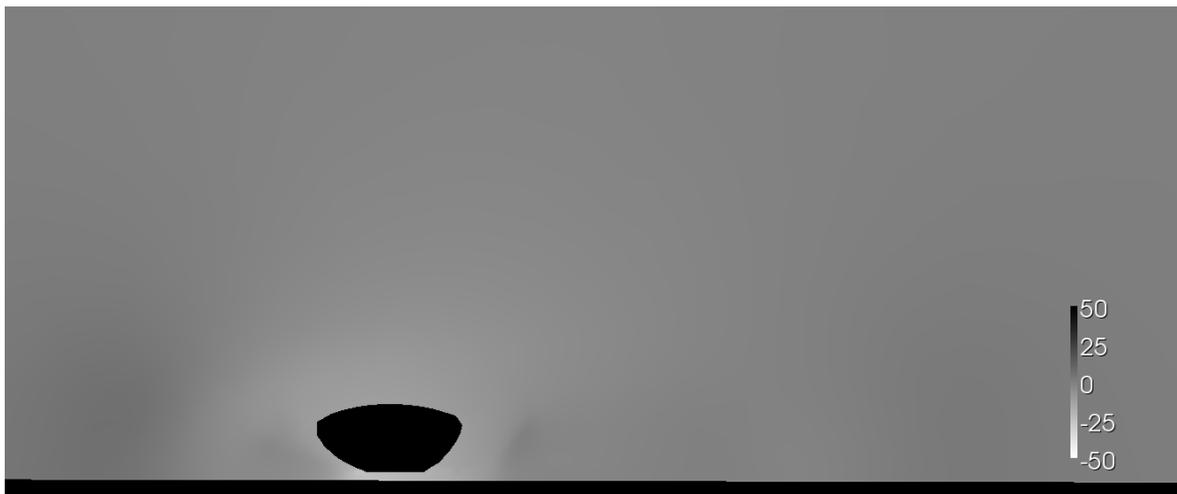


FIG. E.9 – Distribution de pression autour de l'Alérion, à 30 cm du milieu.

La Fig. E.10 représente l'énergie cinétique turbulente  $k$  autour de l'Alérion. Le plan est coupé au milieu du modèle. On montre seulement la moitié arrière du modèle car l'énergie cinétique turbulente n'est pas significativement présente ailleurs. Le derrière du modèle est à droite.

La Fig. E.11 représente six plans coupés de la queue de l'Alérion. Les plans sont pris comme vus de derrière. Le but est de montrer le caractère tridimensionnel de la petite zone d'énergie cinétique turbulente qui disparaît rapidement en aval du véhicule. Chaque plan est coupé 2 cm en aval du plan précédent. Les ellipses noir foncé visibles dans les deux premières illustrations représentent le contour de la queue de l'Alérion.



FIG. E.10 – Énergie cinétique de turbulence autour de l'Alérion, au milieu.

La Fig. E.12 montre les lignes de courant tridimensionnelles autour de l'Alérion afin de montrer que la turbulence et le détachement sont quasiment inexistantes autour de l'Alérion. On peut distinguer les trois trous qui représentent les protège-roues. Le plan est pris près du sol, on regarde du dessus du véhicule. Le devant est en haut à droite tandis que le derrière est en bas à gauche.

La Fig. E.13 donne une comparaison des résolutions du maillage surfacique des analyses de l'Alérion. On voit le maillage de l'analyse au sol à gauche et celui de l'analyse flottante à droite. La couleur représente les valeurs de pression sur la surface selon les valeurs indiquées dans l'échelle à droite.

La Fig. E.14 montre un plan coupé au milieu de l'Alérion afin de montrer que la vitesse est plus grande sous le modèle au sol que sous le modèle flottant. Le figure du haut montre le modèle de l'analyse au sol et la figure du bas montre celui de l'analyse flottante. On note une vitesse environ 10% à 20% plus élevée dans la zone où les deux roues avant forment un semblant de compresseur. Le devant du modèle est à gauche et le derrière à droite. On regarde de côté.



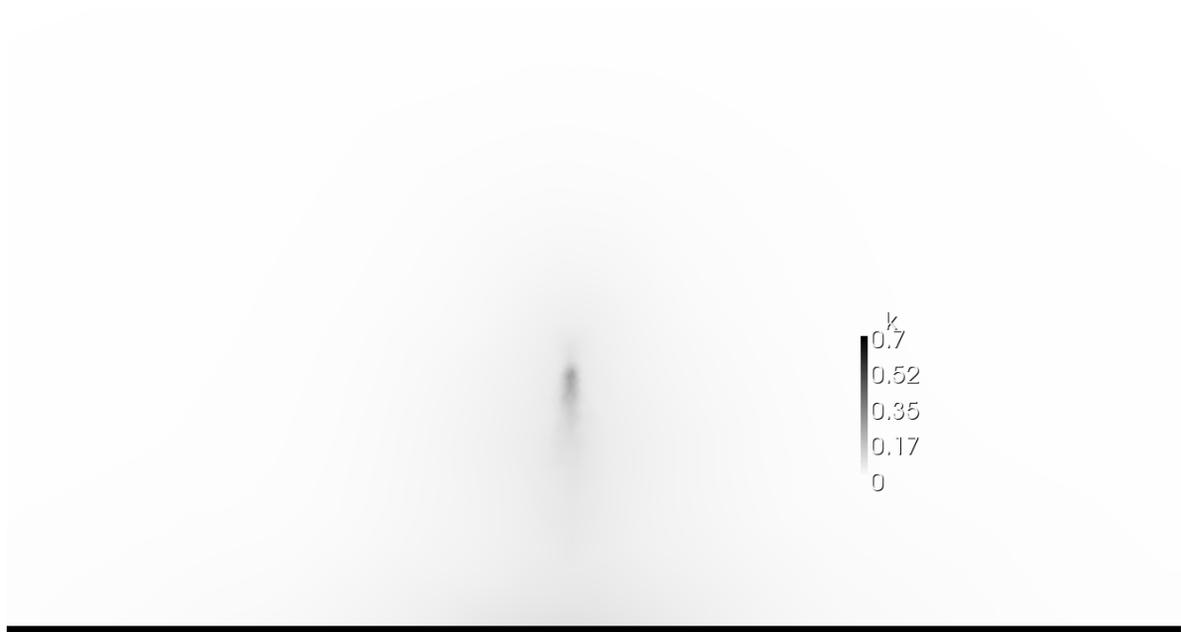
(a)



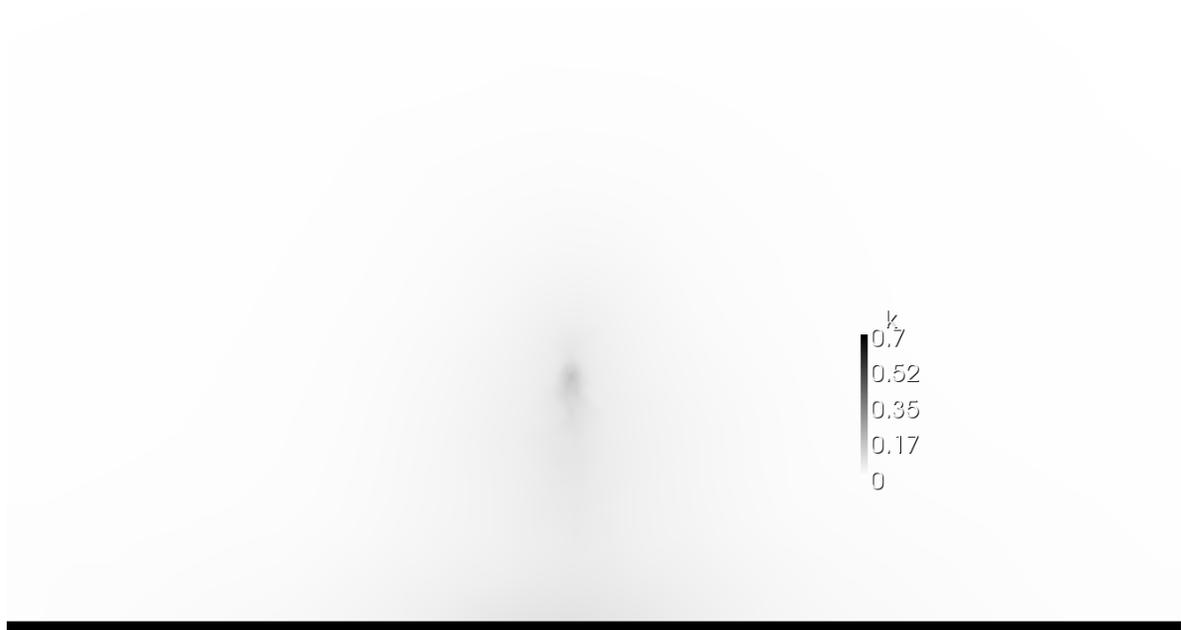
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

FIG. E.11 – Énergie cinétique de turbulence de la queue de l'Alérion. 6 figures.

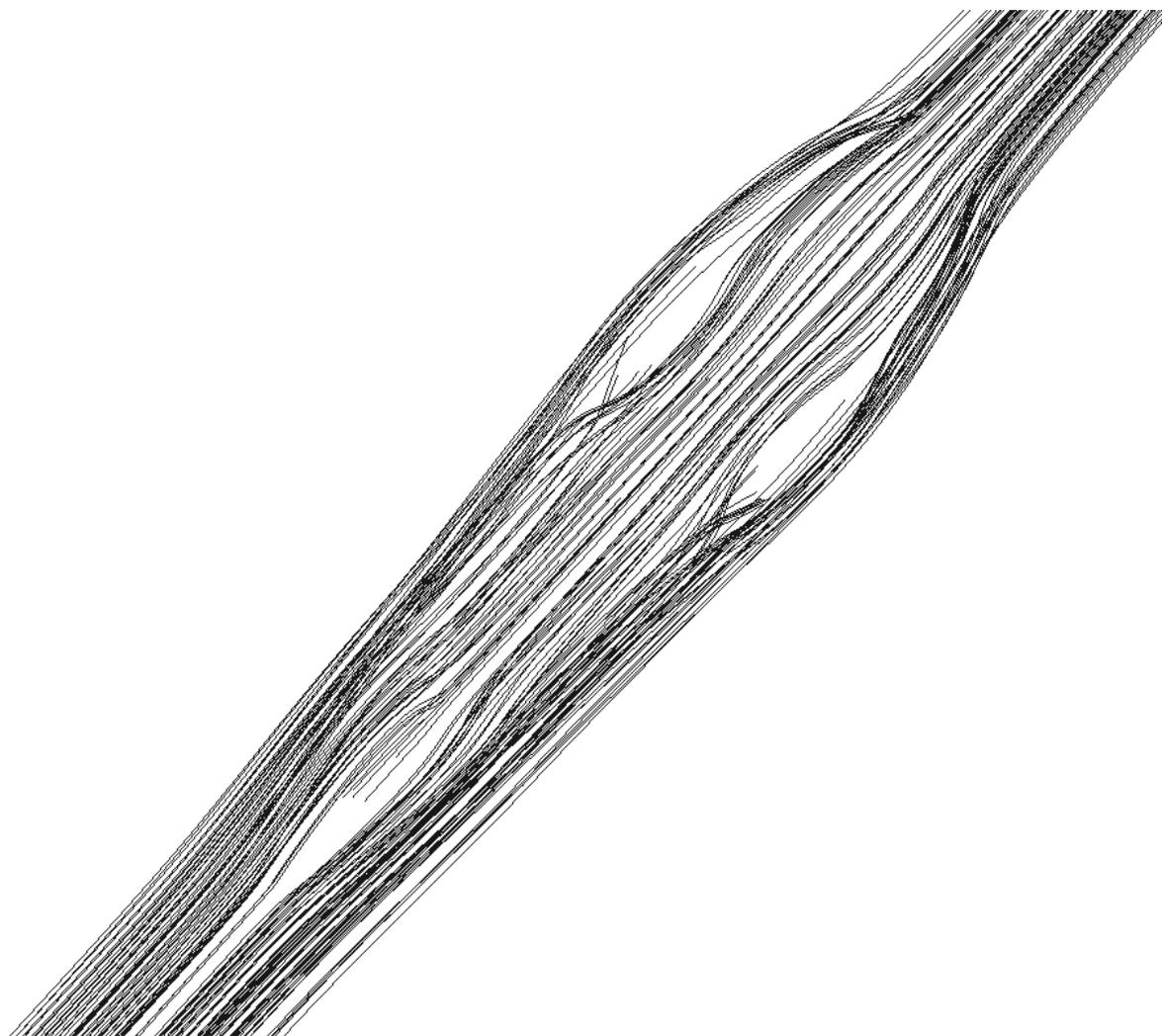


FIG. E.12 – Lignes de courant autour de l'Alérion.

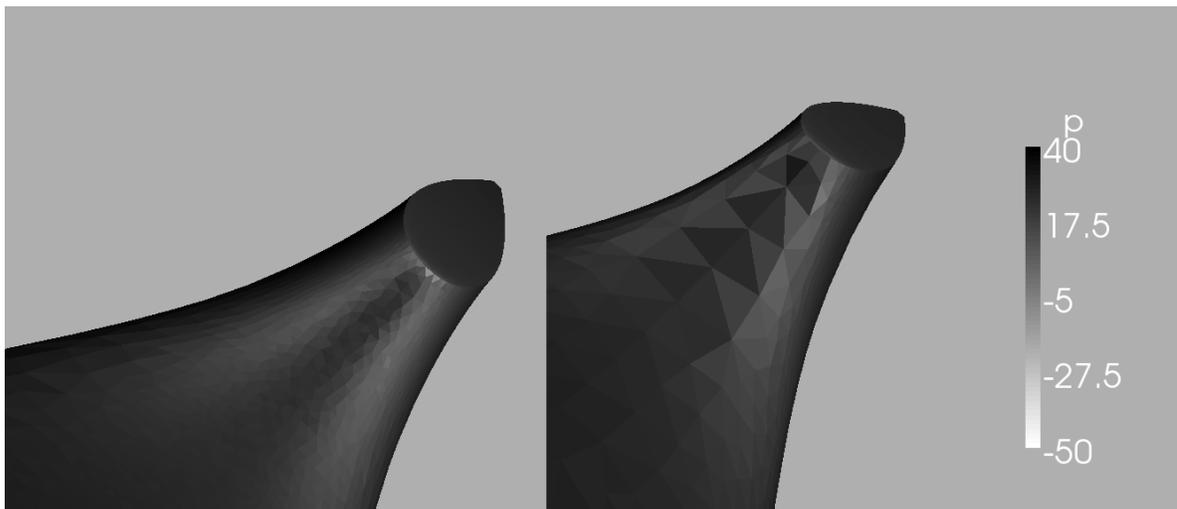


FIG. E.13 – Comparaison des résolutions du maillage de l'Alérion.



FIG. E.14 – Comparaison des vitesses sous l'Alérion.