

UNIVERSITÉ DE LILLE 1

THÈSE

pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LILLE

Spécialité : Mécanique des fluides

par

Franck Chauveau

Aérodynamique de l'avant-corps
d'une Formule 1: Approche numérique

Soutenue le 04 décembre 2002 devant la commission d'examen

M. J.P. BRANCHER	Professeur, Université de Nancy	Rapporteur
M. J. HUREAU	Professeur, Université d'Orléans	Rapporteur
M. A. MERLEN	Professeur, Université de Lille	Directeur de thèse
M. P. GUILLEN	Ingénieur, ONERA	Examineur
M. D. BUISINE	Professeur, Université de Lille	Examineur
M. P. GILLIERON	Directeur de recherche associé CNRS & Ingénieur Renault	Examineur
M. A. LAPOUILLE	Ex-responsable CFD de Prost Grang Prix, responsable calcul Aero Concept Engineering	Examineur

Résumé:

L'objectif de cette étude est la compréhension de l'aérodynamique de la partie avant d'une Formule 1, comprenant l'aileron avant et la roue.

Ces deux éléments vont être tout d'abord étudiés séparément. Compte tenu du peu d'information disponible sur l'écoulement autour d'une roue et de la complexité des phénomènes physiques présents, l'étude de la roue débute par une analyse théorique bidimensionnelle autour de 3 points fondamentaux: la forme du sillage, l'allure des profils de vitesse sur une paroi en mouvement qui révèle l'existence d'une nouvelle instabilité, et enfin le pompage visqueux apparaissant au point de contact entre la roue en rotation et le sol. L'étude de la roue se poursuit de façon tridimensionnelle autour de 3 configurations différentes: une géométrie simplifiée avec des bords droits ou ronds permettant une étude paramétrique, une roue sur laquelle on dispose de résultats expérimentaux et enfin la roue réelle. Les calculs stationnaires sont effectués avec et sans modèle de turbulence (Baldwin-Lomax (BL) et Spalart-Allmaras (SA)). Les résultats font suspecter l'existence de phénomènes instationnaires qui seront approchés par des techniques MILES "Monotonic Integrated Large-Eddy Simulation".

L'étude de l'aileron avant débutera par des calculs autour d'une configuration simplifiée où seuls subsistent les éléments profilés. La comparaison entre les configurations simplifiées et réelles nous permet de déterminer le rôle de chaque élément constituant un aileron avant. Les phénomènes d'effet de sol et de modélisation du tapis sont également analysés.

Les influences de la roue sur l'aileron et de l'aileron sur la roue ont finalement été montrées par des calculs stationnaires turbulents (SA) sur un maillage comprenant les deux éléments en interaction.

Mots-clés: Naviers-Stokes, aileron, roue, pompage visqueux, effet de sol.

Abstract:

The aim of this work is the comprehension of the aerodynamics of a Formula 1 front part, including the front wing and the front wheel.

At first, this two elements are studied separately. Because of the lack of information on the flow around a wheel and the complexity of physical phenomenon which appear, the study of the wheel begins with a theoretical approach in two-dimensional configuration. Three fundamental points are analysed: the shape of the wake, the velocity profiles on a moving wall which reveals a new unstability, and finally the viscous pumping which appears at the contact between a rotating wheel and the ground. The study of the wheel continues with numerical simulations of three-dimensional configurations of several wheels: a simplifical geometry with sharp or well-rounded edges which allow a parametrical study, a wheel for which experimental results exist, and the real wheel. Steady computations are performed with and without turbulence model (Baldwin-Lomax (BL) and Spalart-Allmaras (SA)). The results reveal unsteadiness phenomena which have been simulated by a MILES "monotonic Integrated Large-Eddy Simulation" approach.

The front wing study begin with a simplify configuration where only wing elements are represented. The comparison with the real configuration isolated the effect of each element composing the front wing. Ground effect is also brought out.

The influence of the wheel on the wing and the wing on the wheel have been shown by turbulent (SA) steady computations on a mesh which includes the two elements in interaction.

Keywords: Navier-Stokes, wing, wheel, viscous pumping, ground effect.

Sommaire

Notations	xiii
Introduction	1
I Problème de la roue	3
1 Présentation des phénomènes physiques	5
1.1 Etat des recherches antérieures sur la roue	5
1.1.1 Présentation	5
1.1.2 Phénomènes physiques	5
1.1.3 Bilan des travaux antérieurs	10
1.2 Analyse dimensionnelle du problème de la roue	11
1.2.1 Bilan des paramètres physiques	11
1.2.2 Exemple du cas classique	13
1.3 Résumé des problèmes autour de la roue	16
2 Cas du cylindre bidimensionnel	17
2.1 Introduction	17
2.2 Aspect numérique	17
2.2.1 Introduction	17
2.2.2 Maillage et méthode numérique	17
2.2.3 Mise en évidence des phénomènes physiques	20
2.2.4 Conclusion de l'aspect numérique du cas bidimensionnel	26
2.3 Représentation analytique de l'écoulement autour d'un cylindre	26
2.3.1 Introduction	26
2.3.2 La transformation conforme	26
2.3.3 Modélisation d'un sillage à vortacité constante	31
2.3.4 Conclusion de la représentation analytique de l'écoulement autour d'un cylindre	37

2.4	Caractérisation des profils de vitesse sur une paroi en mouvement	38
2.4.1	Introduction	38
2.4.2	Présentation des équations	38
2.4.3	Résolution des équations et comparaison avec les calculs numériques .	40
2.4.4	Explication du phénomène instationnaire	44
2.4.5	Discussion	51
2.4.6	Conclusion	55
2.5	Pompage visqueux	55
2.5.1	Introduction	55
2.5.2	Présentation	56
2.5.3	Roue avec interstice au point de contact	67
2.6	Conclusion générale sur le cylindre bidimensionnel	78
3	Simulation numérique de l'écoulement autour d'une roue	79
3.1	Présentation	79
3.2	Roues simplifiées	79
3.2.1	Introduction	79
3.2.2	Maillage et méthode numérique	80
3.2.3	Résultats	84
3.2.4	Conclusion sur la roue numérique	97
3.3	Roue Fackrell	100
3.3.1	Introduction	100
3.3.2	Maillage et méthode numérique	100
3.3.3	Approche stationnaire	101
3.3.4	Calculs instationnaires	106
3.3.5	Conclusion sur la roue Fackrell	110
3.4	Roue PGP	110
3.4.1	Introduction	110
3.4.2	Maillage et méthode numérique	110
3.4.3	Calculs	111
3.5	Discussion des résultats pour une roue isolée	115
3.5.1	Comparaison entre les 3 roues	115
3.5.2	Forme générale de l'écoulement autour d'une roue: synthèse	121
3.6	Conclusion sur la roue isolée	123

II	Cas de l'avant corps	125
1	Présentation des phénomènes physiques	127
1.1	Etat des recherches antérieures sur l'aileron avant	127
1.1.1	Présentation	127
1.1.2	Phénomènes physiques	127
1.2	Résumé de l'aérodynamique de l'aileron avant	142
2	Simulation de l'écoulement autour d'un aileron avant	143
2.1	Présentation	143
2.2	Première approche: l'aileron simplifié	143
2.2.1	Maillage et conditions aux limites	143
2.2.2	Calcul stationnaire	145
2.2.3	Conclusion sur l'aileron simplifié	151
2.3	L'aileron complet	152
2.3.1	Maillage et méthode numérique	152
2.3.2	Calculs	153
2.3.3	Discussion des résultats	161
2.4	Conclusion sur l'aileron avant isolé	167
3	Écoulement autour de l'ensemble roue-aileron	169
3.1	Présentation	169
3.2	Maillage	169
3.3	Calculs	169
3.4	Discussion des résultats	171
3.4.1	Influence de la roue sur l'aileron	171
3.4.2	Influence de l'aileron sur la roue	174
3.5	Conclusion de l'ensemble roue-aileron	179
	Conclusion et Perspectives	181
	Bibliographie	185
	Annexes	189
A	Méthode numérique	189
A.1	Présentation	189
A.2	Modélisation de la turbulence	189
A.2.1	Généralités	189

A.2.2	Equations de Navier-Stokes instantanées	190
A.2.3	Equations de Navier-Stokes moyennées	191
A.2.4	Fermeture des équations	191
A.2.5	Le modèle de Baldwin-Lomax	192
A.2.6	Modification de Degani-Schiff	193
A.2.7	Le modèle de Spalart-Allmaras	194
A.3	Schéma numérique	195
A.3.1	Discrétisation des équations	195
A.3.2	Choix des flux	198
A.3.3	Conditions aux limites	201
B	Résolution exacte des équations de couches limites	203
B.1	Etablissement de l'équation différentielle	203
B.2	Résolution de l'équation différentielle	204
B.2.1	Première étape	204
B.2.2	Méthode de Newton	204
B.2.3	Intégration par Runge-Kutta	205
C	Garde au sol	207

Introduction

Une Formule 1 est un panneau publicitaire sous la forme d'une voiture de compétition. Comme tous les sports médiatiques les annonceurs se sont emparés des écuries de F1 qui, en plus du rayonnement international qui en découle, permettent aux marques d'associer leur nom aux valeurs de hautes technologies utilisées dans ce "sport". Cette symbiose entraîne un développement du budget des écuries qui sont tenues à des résultats sous peine de perdre leurs partenaires (et leur soutien financier). La compétition, qui est l'essence même de cette discipline, s'est donc de plus en plus déplacée sur la "matière grise" des écuries plutôt que sur les pilotes, qui restent leurs fers de lance. Même si la compétitivité d'une voiture est le résultat global de l'adéquation de plusieurs disciplines, le secteur qui est considéré comme étant primordial (à part les pneus qui sont du ressort des manufacturiers) est l'aérodynamique.

En Formule 1, l'aérodynamique conditionne les performances de la voiture, qu'il s'agisse de l'appui en virage, de la vitesse de pointe ou de la stabilité de la voiture. Cet aspect prend de plus en plus d'importance dans toutes les équipes du championnat. Jusque très récemment la soufflerie était le seul outil à la disposition des ingénieurs pour optimiser l'aérodynamique de leur voiture. L'apparition de la CFD (Computational Fluid Dynamics) dans le monde de la compétition automobile s'est faite très tardivement (il y a 4 ou 5 ans) et prend une importance sans cesse croissante dans la conception de la voiture en venant appuyer les essais en soufflerie.

L'aérodynamique de la partie avant d'une Formule 1 joue essentiellement sur deux points: premièrement elle définit l'appui à l'avant qui permet à la voiture de s'inscrire dans une courbe et, deuxièmement, conditionne l'écoulement sur tout le reste de la voiture.

En raison des clauses de confidentialité des équipes de F1, il est difficile d'obtenir les travaux antérieurs sur le sujet. Cependant, quelques résultats ont été publiés sur la roue, tant sur le plan expérimental (Fackrell, Cogotti...) que numérique (Basara, Merker, Skea...) défrichant ainsi les phénomènes physiques élémentaires que l'on peut rencontrer (pompage visqueux, vortex d'extrémités, présence éventuelle de phénomènes instationnaires...). L'aileron avant en présence du sol a été étudié très récemment de façon expérimentale par Zerihan. Par contre l'interaction des deux éléments (roue et aileron) n'a pas été traitée en détail dans la littérature ouverte.

Ainsi l'écoulement autour de la roue seule n'a pas été assez détaillé, notamment sur la forme de son sillage et la nature stationnaire ou instationnaire du phénomène. Les différents éléments composant l'aileron n'ont pas été étudiés de façon précise, ne permettant pas de déterminer leurs rôles respectifs. L'interaction roue/aileron n'a pas du tout été abordée de façon approfondie.

Ce mémoire va tenter de clarifier ces questions.

On s'intéresse donc à l'étude globale de l'avant d'une F1, en considérant l'interaction des deux éléments présents ainsi que l'influence du sol. Ce mémoire se scinde en deux parties.

Dans la première partie de la thèse on étudie tout d'abord la roue seule en mettant en évidence les phénomènes physiques décrits par les auteurs précédents. Une étude bidimensionnelle permet d'isoler certains aspects. Elle se poursuit par une étude numérique approfondie de l'influence de divers paramètres physiques ou numériques. On regarde ensuite comment, par une approche analytique, on peut représenter l'écoulement autour d'un cylindre posé sur le sol. On met au passage en évidence une nouvelle instabilité à l'occasion d'une étude schématique de la couche limite sur une paroi en translation. Enfin le phénomène de pompage visqueux, fondamental sur la roue, est, pour la première fois, décrit par résolution analytique.

L'étude de la roue tridimensionnelle s'effectue autour de 3 types de roues, une roue simplifiée aux bords droits ou arrondis, une roue réelle (de type "Fackrell") sur laquelle on possède des résultats expérimentaux, et enfin la roue réelle présente sur les circuits. Ces différentes géométries sont comparées, de nombreux paramètres sont étudiés afin de comprendre la nature de l'écoulement autour d'une forme aussi peu aérodynamique. L'écoulement global autour d'une roue est ensuite déduit de ces différents résultats permettant d'en faire la synthèse. Les simulations ainsi obtenues à partir des équations RANS (Reynolds Average Navier Stokes) ont fait suspecter la nature instationnaire de l'écoulement. Cet aspect a donc été calculé en utilisant une approche MILES (Monotonic Integrated Large-Eddy Simulation) qui montre la nature instationnaire de l'écoulement autour d'une roue en rotation.

Dans une seconde partie on étudie l'avant corps (l'ensemble roue/aileron). On regarde tout d'abord l'aérodynamique de l'aileron avant seul. L'écoulement autour de cet élément est déjà plus conventionnel, par contre la géométrie complexe demande un réel effort de maillage. Afin de décrire en détail le rôle de chaque partie de l'aileron, on débute l'étude avec un aileron simplifié (où seuls subsistent les profils) que l'on a par la suite comparé à l'aileron complet. Parmi les éléments composant l'aileron qui ont été les moins étudiés dans le passé, la dérive va faire l'objet d'une attention particulière. L'effet de sol a également été mis en relief en faisant varier les gardes au sol (variation de la hauteur et de l'incidence des ailerons par rapport au sol). La configuration aileron + roue a été calculée pour une seule garde au sol en écoulement stationnaire (compte tenu des temps de calcul demandés). On met alors en évidence l'influence de l'aileron sur la roue et de la roue sur l'aileron.

Enfin les perspectives sont abordées dans la conclusion.

Conclusion et Perspectives

L'aérodynamique est le premier facteur de performance d'une Formule 1 après les pneus. De sa correcte estimation dépend la compétitivité de la voiture. La partie avant d'une monoplace joue un rôle important dans l'aérodynamique globale d'une F1, elle permet de procurer l'appui nécessaire pour inscrire la voiture en virage et conditionne l'écoulement sur tout le reste du corps. L'écoulement autour de la roue est un sujet qui a encore beaucoup de lacunes dans sa compréhension. La présente étude avait donc pour but de comprendre l'aérodynamique autour d'une roue en rotation, puis de déterminer le rôle des différentes parties de l'aileron avant et enfin d'établir l'interaction de la roue sur l'aileron et de l'aileron sur la roue. On a donc tout d'abord regardé indépendamment les écoulements autour d'une roue isolée et d'un aileron seul, puis de l'ensemble roue-aileron en interaction.

L'étude de l'aérodynamique de la roue isolée en rotation posée sur un plan (en translation ou non) n'a pas fait l'objet de nombreuses recherches publiées par le passé. Celles-ci sont le plus souvent d'ordre expérimental, mais les difficultés rencontrées sur cette configuration (il faut posséder une soufflerie à tapis roulant, faire des mesures avec une paroi en rotation) sont de nature à décourager les éventuels candidats. Cela explique que ce problème soit mal documenté.

On a donc débuté l'étude par une analyse dimensionnelle permettant de guider la compréhension. L'approche bidimensionnelle, d'abord numérique, de l'écoulement autour d'un cylindre infiniment long posé sur un plan, a permis de déterminer l'influence de certains paramètres physiques (rotation du cylindre, translation du sol, effet du nombre de Reynolds) et numériques (taille du domaine de maillage, raffinement du maillage au point de contact, modèle de turbulence utilisé).

Cette étude numérique a également servi de support pour une représentation analytique de l'écoulement autour d'un cylindre posé sur un plan, qui a été effectué par transformation conforme. Cette étude a montré que la majeure partie de la zone de recirculation aval est à vorticité constante. De plus on a remarqué que la forme de la ligne délimitant le sillage du flux extérieur influence beaucoup l'aspect global de l'écoulement.

La roue (ou le cylindre) en rotation développe sur sa partie amont haute une couche limite particulière sur une paroi en mouvement. Son étude simplifiée sur une plaque plane en translation contre le vent (représentant localement la roue en l'absence de gradient de pression) a révélé l'existence d'une nouvelle instabilité.

L'un des points les plus insolites de l'aérodynamique d'une roue est le phénomène dit de "pompage visqueux". Cette curiosité physique résultant de l'apport d'énergie par la rotation de la roue et qui autorise des coefficients de pression supérieurs à 1 au point de contact a été expliquée en se plaçant dans des conditions locales de bas nombre de Reynolds (ce qui est effectivement le cas dans la zone de contact).

L'étude de la roue s'est poursuivie par l'aspect tridimensionnel en considérant trois types de

roues différents: La roue dite "numérique" ayant la géométrie simplifiée d'un cylindre de largeur finie, la roue "Fackrell" de forme plus complexe mais sur laquelle on possède des données expérimentales, et enfin la roue "PGP" ayant la véritable géométrie des roues de Formule 1 actuelles. La première roue, simplifiée avec des bords droits, a été utilisée pour une étude paramétrique mettant en évidence les phénomènes liés à la rotation (extension de la zone de sillage, phénomène de pompage visqueux), à l'entraînement du tapis (accentuation du phénomène de pompage visqueux), au nombre de Reynolds (le nombre de Reynolds critique étant fonction de la géométrie de la roue), au maillage, à la dissipation numérique (plus elle diminue plus les phénomènes instationnaires sont mis en évidence) et enfin à la prise en compte de la turbulence (entraîne une diminution des efforts et un déplacement vers l'aval du point de décollement).

La confrontation des calculs avec les résultats expérimentaux de la roue "Fackrell" montre une bonne corrélation sauf pour l'estimation du point de décollement. La simulation numérique de l'écoulement instationnaire est mise en oeuvre au moyen d'une approche MILES qui a mis en évidence les phénomènes de lâchers tourbillonnaires au point de décollement ainsi que la difficulté de prévoir la nature des tourbillons générés par les bords de la roue.

Les calculs autour de la configuration réelle ont été effectués, ils servent de base pour l'estimation de l'interaction avec l'aileron.

L'aérodynamique générale d'une roue en rotation est déduite des résultats trouvés pour les 4 géométries de roue. L'observation de Merker et Berneburg voulant que le sens de rotation des tourbillons de bord change avec la nature droite ou arrondie de l'extrémité de la roue n'est pas pleinement vérifiée ici. Le problème paraît plus complexe compte tenu des phénomènes instationnaires et de la complexité des géométries. De plus les tourbillons au pied de la roue s'enroulent dans le sens contraire de celui trouvé par Cogotti.

L'étude de l'aileron avant est plus aisée car cette configuration se rapproche des systèmes hypersustentés rencontrés dans l'aéronautique. La géométrie complexe ainsi que la proximité du sol rendent cependant les maillages difficiles à réaliser. Néanmoins, le rôle des différentes parties de l'aileron a été mis en évidence en considérant tout d'abord un aileron simplifié que l'on a comparé à un aileron complet. Une attention particulière a été portée sur les dérives dont la finalité est mal définie, nous n'avons d'ailleurs pas trouvé de différences notables entre un aileron avec et sans dérives, probablement en raison du trop faible raffinement du maillage autour de celle-ci.

L'effet de sol dépend de la position de l'aileron par rapport au sol. Celle-ci est définie par les gardes au sol (réglage de la voiture) et la position de l'aileron par rapport à la voiture. Trois gardes au sol standard ont été représentées, les résultats diffèrent peu les uns des autres. En revanche, la surélévation de l'aileron de 2 cm (correspondant à un changement de règlement) entraîne une baisse de déportance notable.

L'importance de la modélisation du sol a été soulignée, le sol fixe ne peut être considéré comme une solution acceptable, contrairement à une condition de glissement qui est, dans ce cas, équivalente à une condition de translation.

Enfin la prise en compte de la turbulence entraîne une légère diminution des efforts.

Une fois connus les écoulements autour d'une roue isolée et d'un aileron seul, l'étude de l'interaction des deux éléments a pu débuter. Le maillage regroupant les deux éléments a été difficile à réaliser compte tenu de la complexité des géométries ainsi que de la proximité des deux éléments. Les calculs turbulents stationnaires effectués ont convergé plus vite que ceux autour de la roue seule ou de l'aileron seul.

L'ajout d'une roue derrière un aileron entraîne une baisse de déportance et de traînée de l'aileron.

La présence de l'aileron devant la roue crée une augmentation de portance de la roue pour la même traînée ainsi qu'une dissymétrisation de l'écoulement autour de celle-ci.

L'idée de diminuer la traînée de la roue en facilitant le contournement du fluide par l'intérieur grâce à la forme particulière du fence (extrémité de l'aileron) n'est pas renforcée. C'est sans doute pourquoi la plupart des ailerons sont dessinés maintenant pour dévier vers l'extérieur l'écoulement arrivant sur la roue.

Compte tenu du caractère novateur (du moins si on en croit la littérature ouverte) des travaux présentés ici, les perspectives sont nombreuses.

La représentation analytique de l'écoulement autour d'un cylindre est encore dépendante de la connaissance de la ligne de séparation. Un des moyens d'y remédier est de considérer la forme de cette ligne comme étant dépendante d'un nombre fini de paramètres (position du point de décollement, recollement) et de déterminer les valeurs de ces paramètres par optimisation.

Les instabilités découvertes sur une plaque plane en translation l'ont été en l'absence de gradients de pression longitudinaux. La prise en compte de ces derniers permettraient de généraliser ces phénomènes. Une confrontation expérimentale s'impose.

La prévision de la position du point de décollement autour d'une roue pourrait être améliorée en incorporant dans le modèle de Spalart-Allmaras des corrections prenant en compte la courbure et la rotation [51]. Cette correction entraînerait une diminution de la viscosité turbulente, et rendrait donc la couche limite moins robuste au décollement.

Les phénomènes instationnaires pourraient être mieux appréhendés par des calculs DES où la couche limite resterait résolue en RANS.

Les maillages des ailerons sont vite devenus très complexes à réaliser en utilisant des mailleurs structurés. Il est évident que le maillage non structuré est le seul choix logique pour le professionnel de la Formule 1 afin d'assurer un certain rendement dans le design des ailerons, cependant se pose le problème d'une validation des outils alors utilisés.

L'aérodynamique de l'ensemble roue-aileron peut encore gagner en réalisme en représentant le mouvement de l'aileron (de la voiture en fait) par rapport à la roue par le biais du jeu des suspensions (le mouvement étant dû aux irrégularités de la route). Deux solutions sont envisageables, la méthode ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) [59] et la méthode chimère [36]. L'optimisation de forme (et de position) des ailerons permettrait un gain de temps dans leur conception ainsi que l'obtention de solutions autorisant des performances accrues.

Bibliographie

- [1] BALDWIN B.S. and LOMAX H. Thin layer approximation of algebraic model for separated flows. *AIAA*, 78-0257, 1978.
- [2] BARBER T.J. and LEONARDI E. and ARCHER R.D. A technical note on the appropriate CFD boundary conditions for the prediction of ground effect aerodynamics. *The Aeronautical Journal*, 2463, November 1999.
- [3] BASARA B. and BEADER D. and PRZULJ V.P. Numerical simulation of the air flow around a rotating wheel. *S.A.E*, 2000.
- [4] BECHERT D.W. and MEYER R. and HAGE W. Drag reduction on Gurney flaps and divergent trailing edges. *CEAS/DragNet*, 19-21 June 2000.
- [5] BEN KHELIL S. *Simulation numérique d'écoulements turbulents autour de configurations complexes. Application au roulis induit des missiles*. PhD thesis, Université de Paris 13, 1998.
- [6] BUDKOWSKI M. *Effet de sol et aérodynamique d'une roue avant de Formule 1*. rapport de stage ENSAE, 1999.
- [7] COGOTTI A. Aerodynamic characteristics of car wheels. *Int. J. of Vehicle Design*, SP3 London:pp 173–196, 1983.
- [8] DARRACQ D. *Etude numérique des interactions choc/choc et choc/couche limite turbulente en régime hypersonique*. PhD thesis, Université de Poitiers, Septembre 1995.
- [9] DEBRUYNE M. and MERLEN A. Une approche critique de la méthode des relations intégrales: Cas des équations de Dorodnitsyn, problème de la convergence. *C.R. Académie des Sciences*, t.316, série 2:1269–1274, 1993.
- [10] DEGANI D. and SCHIFF L.B. Computation of supersonic viscous flows around pointed bodies at large incidence. *AIAA Paper*, 83-0034, 1983.
- [11] DOMINY R. Aerodynamics of Grand Prix cars. *Journal of Automobile Engineering*, 206:pp 267–274, 1992.
- [12] DORODNITZYN A.A. General method of integral relations and its application to boundary layer theory. *Advances in Aeronautical Sciences*, pages pp 207–216, 1962.
- [13] FACKRELL J.E. *The aerodynamics of an isolated wheel rotating in contact with the ground*. PhD thesis, Imperial College, 1974.

- [14] FACKRELL J.E. and HARVEY J.H. The flow-field and pressure distribution of an isolated road wheel. *BHRA Advances in Road Vehicle Aerodynamics*, 1973.
- [15] FUREBY C. and GRINSTEIN F.F. Monotonically integrated large eddy simulation of free shear flows. *AIAA*, 00-2410, June 2000.
- [16] GARNIER E. *Simulation des grandes échelles en régime transsonique*. PhD thesis, Université de Paris sud, 2000.
- [17] GIGUERE P. and LEMAY J. and DUMAS G. Gurney flap effect and scaling for low-speed airfoils. *A.I.A.A. Journal*, 95-1881-CP:pp 966–976, 1995.
- [18] HARTEN A. High resolution schemes for hyperbolic conservation laws. *J. Comput. Phys*, 49:357–393, 1983.
- [19] HOERNER S.F. Fluid-dynamics drag. *Hoerner fluid dynamics*, 1957.
- [20] JANG C.S. and ROSS J.C. and CUMMINGS R.M. Computational evaluation of an airfoil with a Gurney flap. *A.I.A.A.*, 92-2708:pp 801–809, 1992.
- [21] JASINSKI W.J. and SELIG M.S. Experimental study of open-wheel race-car front wings. *S.A.E*, Publication 983042:pp 95–103, 1998.
- [22] JEFFREY D. and ALPERIN M. Aspects of the aerodynamics of year-2000 formula-one racing cars. *S.A.E*, 2000.
- [23] JEFFREY R.M. and ZHANG X. and HURST D.W. A wind-tunnel investigation of aerofoils fitted with Gurney flaps. *S.A.E*, 1996.
- [24] JEFFREY R.M. and ZHANG X. and HURST D.W. Some aspects of the time-averaged and unsteady aerodynamics of Gurney flaps. *S.A.E*, 1998.
- [25] KATZ J. *New Directions in Race Car Aerodynamics, designing for speed*. Robert Bentley Publishers, 1995.
- [26] KATZ J. and DYKSTRA L. Effect of wing/body interaction on the aerodynamics of two generic racing cars. *S.A.E*, 1992.
- [27] KATZ J. and LUO H. and MESTREAU E. and BAUM J. and LOHNER R. Viscous-flow simulation of an open-wheel race car. *S.A.E*, 1998.
- [28] KNOWLES K. and DONAHUE K. and FINNIS M. A study of wings in ground effect. *R.A.C, Conference on Vehicules Aerodynamics*, 1994.
- [29] LIEBECK R.H. Design of subsonic airfoils for high lift. *Journal of aircraft*, 15:pp 547–561, September 1978.
- [30] MERCKER E. and BERNEBURG H. On the simulation of road driving of a passenger car in a wind tunnel using a moving belt and rotating wheels. In *3rd. Int. Conf. Innovation and Reliability*, Florence, April 1992.
- [31] MONTIGNY-RANNOU F. and JACQUOTTE O.P. Mesh3d: Un outil pour la construction de maillages tridimensionnels. *AAAF-29 ème colloque d’Aérodynamique Appliqué*, 1992.

- [32] MORELLI A. Aerodynamic effect on the car wheel. *ATA Review*, June 1969.
- [33] MYOSE R. and PAPADAKIS M. and HERON I. Gurney flap experiments on airfoils, wings and reflection plane model. *Journal of aircraft*, 35:pp 206–211, March-April 1998.
- [34] NEUHART D.H. and PENDERGRAFT O.C. A water tunnel study of Gurney flaps. volume TM401. NASA, 1988.
- [35] OLSON L.E. and JAMES W.D. Theoretical and experimental study of the drag of multielement airfoils. *AIAA*, 78-1223, July 1978.
- [36] PAVSIC S. *Calcul d'écoulement autour de corps multiples, application à la séparation de charge - Méthode chimère*. PhD thesis, Université de Paris Nord, 1994.
- [37] PICCIONI C.F. and CIANETTI F. and PAOLOTTI A. Numerical investigation on the fender of a motorcycle. *S.A.E*, 1997.
- [38] RADAU. Etude sur les formules d'approximation qui servent à calculer la valeur d'une intégrale définie. *J. Math Pures Appl.*, 1980.
- [39] RANZENBACH R. and BARLOW J.B. Two-dimensional airfoil in ground effect, an experimental and computational study. *S.A.E Publication*, 942509, 1994.
- [40] RANZENBACH R. and BARLOW J.B. Cambered airfoil in ground effect, wind tunnel and road conditions. *AIAA*, 95-1909, 1995.
- [41] RANZENBACH R. and BARLOW J.B. Cambered airfoil in ground effect, an experimental and computational study. *S.A.E Publication*, 960909, 1996.
- [42] RANZENBACH R. and BARLOW J.B. and DIAZ R.D. Multi-element airfoil in ground effect - an experimental and computational study. *AIAA Journal*, 2238, 1997.
- [43] RAYNER D.P. Aircraft design: A conceptual approach. *AIAA Education Series*, 1989.
- [44] ROE P.L. Approximate riemann solvers, parameter vectors and difference schemes. *J. Comput. Phys*, 43, 1981.
- [45] ROSS J.C. and STORM B.L. and CARRANNANTO P.G. Lift-enhancing tabs on multi-element airfoils. *AIAA*, 93-3504, 1993.
- [46] SARDOU M. Moyens d'essais aérodynamiques et effet de sol de la compétition à la grande série. *SIA*, 1980.
- [47] SARDOU M. Pourquoi utiliser une soufflerie à tapis roulant pour les vehicules. In *Commission d'aérodynamique*. A.A.A.F., Mars 1984.
- [48] SARDOU M. The sensitivity of wind-tunnel data t a high-speed moving ground for different types of road vehicles. *SAE*, 880246, March 1988.
- [49] SAWLEY M.L. and RICHTER R. Numerical simulation of the flow around a formula 1 racing car. *Supercomputing review*, EPFL-SCR No 9, November 1997.
- [50] SCHUBERT G. Vicious flow near a suspect corner. *J. Fluid Mechanics*, 27:647–656, 1967.

- [51] SHUR M. and STRELETS M. and TRAVIN A. and SPALART P.R. Turbulence modeling in rotating and curved channels: assessment of the spalart-shur correction term. *AIAA*, 98-0325, 1998.
- [52] SKEA A.F. and BULLEN P.R. and QIAO J. The use of CFD to predict the air flow around a rotating wheel. In *2nd MIRA Conference on Vehicle Aerodynamics*, October 1998.
- [53] SMITH A.M.O. High-lift aerodynamics. *Journal of Aircraft*, 12, No.6, June 1975.
- [54] SPALART P.R. and ALLMARAS S.R. A one equation turbulent model for aerodynamic flows. *AIAA*, 92-0439, January 1992.
- [55] STAPLEFORD W.R. and CARR G.W. Aerodynamic characteristics of exposed rotating wheels. *The Motor Industry Research Association*, Report No 1970/2, 1969.
- [56] STORM B.L. and JANG C.S. Lift-enhancing of a airfoil using a Gurney flap and vortex generators. *AIAA*, 93-0647-CP, January 1993.
- [57] STORM B.L. and ROSS J.C. An experimental study of lift-enhancing tabs on a two-element airfoil. *AIAA*, 94-1868-CP, 1994.
- [58] STORM B.L. and ROSS J.C. Aerodynamic effects of flap-tip treatments on an unswept wing. *AIAA*, 96-2372-CP, 1996.
- [59] THIERRY G. *Simulation d'écoulement de fluide parfait autour de corps déformable, application à l'aéroélasticité des lanceurs*. PhD thesis, Université de Paris nord, 1998.
- [60] VAN LEER B. Toward the ultimate conservative difference scheme V. a second order sequel to Godunov's method. *J. Comput. Phys* 32, 357-393, 1979.
- [61] WILDI J. Wind tunnel testing of racing cars, the importance of the road simulation technique.
- [62] ZERIHAN J. and ZHANG X. Aerodynamics of a single element wing in ground effect. *AIAA*, 38th Aerospace Sciences Meeting, January 11-13 2000.
- [63] ZERIHAN J. and ZHANG X. An experimental study of a single element wing in ground effect. *S.A.E*, 2000.