



<http://www.f1-forecast.com>

Les Dossiers Techniques de F1-Forecast



Auteur : Dominique Madier

Version 1.0



<http://www.f1-forecast.com>

En formule 1, chance et malchance n'existent pas. Cette dernière n'est autre que la somme d'éléments ou de situations que nous n'avons pas su ou pu prévoir

Enzo Ferrari



<http://www.f1-forecast.com>

Remerciements

Au département d'Aérodynamique de l'École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace (SUPAERO) de Toulouse.

Au département Génie Thermique et Energie de l'Institut Universitaire de Technologie de la Ville d'Avray.

Aux sites Internet www.f1-legend.com, The Cahier Archive (www.f1-photo.com) et www.statsf1.com qui grâce à leurs photos et dessins apportent beaucoup de clarté à ce document.



<http://www.f1-forecast.com>

Références bibliographiques

Formula 1 Technology

Peter Wright

Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 2001

Race Car Vehicle Dynamics

William F. Milliken and Douglas L. Milliken

Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1995

Aerodynamic Design Considerations of a Formula 1 Racing Car

Ben Agathangelou and Mike Gascoyne

SAE Paper N° 980399 - Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1998

Computational Fluid Dynamics in Formula 1 Design

Dr Saïf-Deen Akannis & Dr. Matthew Wheeler

Mechanical Engineering and Aeronautical Department & Computing Centre

City University, London, England, 1999

Vortices in Favourable Pressure Gradients

Assessment of Vortex behaviour in Formula 1 Underbody conditions

C.K. Van Steenberghe

Cranfield University, College of Aeronautics, November 2004

Numerical Simulation of the Flow Around a Formula 1 Racing Car

Mark L. Sawfley, EPFL - DGM - Fluid Mechanics Laboratory, November 1997

Roland Richter - Cray Research, Silicon Graphics Inc., Gland, November 1997

Low-Speed Wind Tunnel Testing

J.B. Barlow, W.H. Rae Jr., A. Pope

John Wiley & Sons Inc, Third Edition, 1999

Formula 1 2002 Technical Analysis

G. Piola

Giorgio Nada Editore S.r.l. 2003

2004 & 2005 Formula 1 Technical Regulations

Federation International de l'Automobile - <http://www.fia.com>, 2004 & 2005

Aéro Quoi ?

Patrick Camus, 1983

Des Marchands de Vent

Patrick Camus, 1983



Table des Matières

Références Bibliographiques ii

Première Partie

1	INTRODUCTION	1
2	LES ELEMENTS AERODYNAMIQUES D'UNE FORMULE 1	3
2.1	L'AILERON AVANT	3
2.2	LE MUSEAU (NOSE CONE)	7
2.3	L'AILERON ARRIERE	8
2.4	LES PONTONS	9
2.5	WINGLETS ET AILETTES	10
2.6	LES DEFLECTEURS	13
2.7	LE DIFFUSEUR	14
3	LE COMPORTEMENT AERODYNAMIQUE D'UNE FORMULE 1	16
3.1	LE PRINCIPE DES AILERONS	16
3.2	L'ANGLE D'ATTAQUE	20
3.3	LE FLAP GURNEY	21
3.4	L'EFFET DE SOL, QUELQUE CHOSE A PARTIR DE RIEN	22
3.5	LA DIFFERENCE ENTRE LE POIDS ET L'APPUI AERODYNAMIQUE	30
3.6	GEOMETRIE ET AERODYNAMIQUE D'UNE FORMULE 1	33
3.6.1	L'AILERON AVANT	33
3.6.2	L'AILERON ARRIERE	33
3.6.3	LES ROUES ET LES SUSPENSIONS	34
3.6.4	LA CARROSSERIE	34
3.6.5	L'UNDERBODY	35
3.6.6	INTERACTIONS	37



3.7	EFFET DE LA GARDE AU SOL SUR L'AERODYNAMIQUE	38
3.7.1	<i>FORTE GARDE AU SOL</i>	38
3.7.2	<i>GARDE AU SOL MOYENNE</i>	39
3.7.3	<i>PETITE GARDE AU SOL</i>	39
3.8	CONFIGURATIONS D'UNDERBODY	41
3.8.1	<i>ANALYSE DE LA GEOMETRIE DE L'UNDERBODY</i>	41
3.8.2	<i>DISTRIBUTION DE LA PRESSION SOUS L'UNDERBODY</i>	41
3.8.3	<i>CONFIGURATION DU FLUX DANS L'UNDERBODY</i>	42
4	LA SOUFFLERIE	44
4.1	LE PRINCIPE	45
4.2	EXEMPLE DE MESURES DANS UNE SOUFFLERIE HYDRODYNAMIQUE	53
5	SIMULER L'AERODYNAMIQUE D'UNE F1	60
5.1	LES ETAPES DE LA SIMULATION NUMERIQUE	60
5.2	LES EQUATIONS QUI GOUVERNENT LA CFD	66

Deuxième Partie

6	L'EVOLUTION DE L'AERODYNAMIQUE DES F1 DE 1950 A NOS JOURS	69
6.1	EVOLUTION DE LA PARTIE AVANT	70
6.1.1	<i>LES ANNEES 50</i>	70
6.1.2	<i>LES ANNEES 60</i>	72
6.1.3	<i>LES ANNEES 70</i>	75
6.1.4	<i>LES ANNEES 80</i>	81
6.1.5	<i>LES ANNEES 90</i>	84
6.1.6	<i>LES ANNEES 2000</i>	86
6.2	EVOLUTION DE LA PARTIE CENTRALE	93
6.2.1	<i>LES ANNEES 50</i>	93
6.2.2	<i>LES ANNEES 60</i>	95
6.2.3	<i>LES ANNEES 70</i>	99
6.2.4	<i>LES ANNEES 80</i>	104
6.2.5	<i>LES ANNEES 90</i>	110
6.2.6	<i>LES ANNEES 2000</i>	116



6.3	EVOLUTION DE LA PARTIE ARRIERE	121
6.3.1	<i>LES ANNEES 50</i>	121
6.3.2	<i>LES ANNEES 60</i>	128
6.3.3	<i>LES ANNEES 70</i>	136
6.3.4	<i>LES ANNEES 80</i>	141
6.3.5	<i>LES ANNEES 90</i>	146
6.3.6	<i>LES ANNEES 2000</i>	152
6.4	LE CDG SYSTEM (CENTRELINE DOWNWASH GENERATING)	160

ANNEXES

7	ANNEXE 1 : CONSIDERATIONS THEORIQUES	164
7.1	LA LOI DE BERNOULLI	164
7.2	LA COUCHE LIMITE	165
7.3	GRANDEURS FONDAMENTALES	166
7.4	METHODE GENERALE D'ETUDE ET DE LIMITATION	170
8	ANNEXE 2 : LEXIQUE	174
9	ANNEXE 3 : EFFET VISUEL DE L'EVOLUTION DES F1 DEPUIS 1950	178



1 Introduction

Ce document s'inscrit dans une série d'articles que F1-Forecast souhaite dédier aux technologies utilisées en F1. En effet, avant d'être un sport, la Formule 1 est avant tout un formidable défi technologique qui se construit dans les bureaux d'études, loin des pistes de courses. Les Grand Prix que nous regardons à la télévision ne sont que la concrétisation de longues heures de recherche et développement menées par les ingénieurs en secret et dans l'ombre.

Le premier sujet que je souhaite aborder dans « Les Dossiers Techniques de F1-Forecast » est un sujet très complexe mais qui me passionne, il s'agit de l'aérodynamique d'une F1. C'est un domaine très complexe mais fort intéressant et je souhaite vous le faire découvrir plus en détail. Mais ne vous inquiétez pas, je ne suis pas aérodynamicien, je vais donc aborder le sujet en néophyte. L'objet de cet article est juste de vous fournir les clés fondamentales de l'aérodynamique afin de vous permettre de comprendre les évolutions et nouveautés que vous pouvez voir apparaître sur les F1 chaque week-end de GP.

Comme je vous le disais, je ne suis pas aérodynamicien, je suis simplement un passionné de F1 qui cherche à comprendre le fonctionnement de ces formidables bolides de course. Ainsi, ce document est le travail d'un autodidacte et est le fruit de lectures de livres spécialisés, de publications, de recherches sur Internet et de discussions avec des aérodynamiciens. Mon objectif est de vulgariser au maximum un sujet qui de prime abord ne semble pas très abordable pour le grand public. Vous verrez finalement que cet a priori est complètement faux et que, sans faire appel aux équations très complexes qui gouvernent l'aérodynamique, on peut comprendre tous les phénomènes aérodynamiques qui se produisent autour d'une F1.



Depuis les toutes premières courses automobiles jusqu'à nos jours, les hommes impliqués ont toujours eu un but en commun : progresser sans cesse. Outre les pilotes repoussant toujours plus leurs limites, les "hommes de l'ombre" (ingénieurs, techniciens) travaillent sans relâche sur les voitures de compétition dans tous les domaines afin de les rendre plus performantes. L'aérodynamique est un de ces domaines de travail. Cette science, encore aujourd'hui à ses balbutiements selon les spécialistes, a émergé en même temps que l'aviation, dans le premier tiers du XX^{ème} siècle. Les premiers records de vitesse terrestres ont été établis dès les années 1930 avec des "engins" arborant des formes assez particulières issus de toutes nouvelles recherches en aérodynamiques.

Mais ce n'est que plus tard, vers les années 1950-60, que l'aérodynamique a été introduite en sport automobile. Une voiture de compétition a pour objectif de parcourir le plus vite possible un tracé. Pour cela,



non seulement elle doit être rapide en ligne droite, mais surtout dans les virages. Plus la voiture aura la capacité à être "colée à la route", plus elle passera vite en virage, ainsi l'aérodynamique en sport automobile consiste à la recherche de vitesse à travers la recherche d'appuis.

L'aérodynamique, dont l'étymologie évoque immédiatement l'action de l'air en mouvement, est la science qui étudie les différents aspects de cette action, notamment les forces, pressions et moments qui résultent du déplacement des corps dans l'atmosphère. L'aérodynamique joue un rôle d'importance variable dans le dessin des voitures rapides, dont elle détermine les réactions à un fluide. Sa naissance, comme science, peut être située au XVIII^{ème} siècle, en Europe, où furent développées les théories qui faisaient suite à un empirisme séculaire (Bernoulli en 1738, Euler en 1755). Mais ce n'est qu'un siècle plus tard que les lois fondamentales tenant compte des contraintes intérieures d'un milieu continu ont été formulées (Navier en 1827, Poisson en 1831, de Saint-Venant en 1843, Stokes en 1845). Devant l'impossibilité de résoudre ces équations extrêmement compliquées, les connaissances aérodynamiques n'ont pu se développer à l'époque que grâce à l'introduction d'hypothèses simplificatrices, basées sur l'expérience. Les étapes les plus importantes de ces travaux théoriques et expérimentaux sont marquées, entre autres, par l'introduction des coefficients de similitude (Mach en 1889, Reynolds en 1883), des notions de fluide parfait et de couche limite (Prandtl en 1904) dans le cas des écoulements à des vitesses modérées.

Afin de ne pas décourager le lecteur, j'ai décidé de ne pas aborder le sujet par les considérations théoriques usuelles et j'ai préféré les reléguer en annexe. Vous pouvez donc ignorer complètement l'aspect théorique, cela ne nuira en aucune façon à votre compréhension des phénomènes expliqués tout au long du document.

Je souhaite débiter notre exploration par une présentation des différents éléments aérodynamiques qui constituent une monoplace de type Formule 1 (Chapitre 2 : Les Eléments aérodynamiques d'une Formule 1). Ensuite, nous pourrons alors aborder leur comportement aérodynamique (Chapitre 3 : Le Comportement Aérodynamique d'une Formule 1). Comment parler d'aérodynamique sans aborder ces fabuleuses machines que sont les souffleries ? (Chapitre 4 : La Soufflerie). Le dernier chapitre de la première partie est consacré à la simulation numérique des phénomènes aérodynamiques (Chapitre 5 : Simuler l'aérodynamique d'une F1). Sur la base de ces connaissances nous partirons alors en voyage à travers le temps dans la deuxième partie en explorant les évolutions aérodynamiques depuis la naissance du championnat du monde de F1 (Chapitre 6 : L'Evolution de l'Aérodynamique des F2 de 1950 à Nos Jours). Nous découvrirons les évolutions de la partie avant, centrale et arrière des F1 pour chaque décennie puis je vous présenterai le projet d'aérodynamique CDG que la FIA souhaite mettre en place pour la saison 2008. Outre les considérations théoriques, les annexes font l'objet d'un indispensable lexique des termes de l'aérodynamique ainsi que d'un effet visuel de l'évolution des F1 dans le temps.

Bonne lecture à toutes et à tous.

Dominique Madier
Montréal, Canada
Le 22 août 2006



2 Les Eléments Aérodynamiques d'une Formule 1

2.1 L'Aileron Avant

Chaque aileron avant est fait d'une partie plane couvrant toute la largeur de la voiture et suspendu en dessous du museau. Ces ailerons sont faits en fibre de carbone.

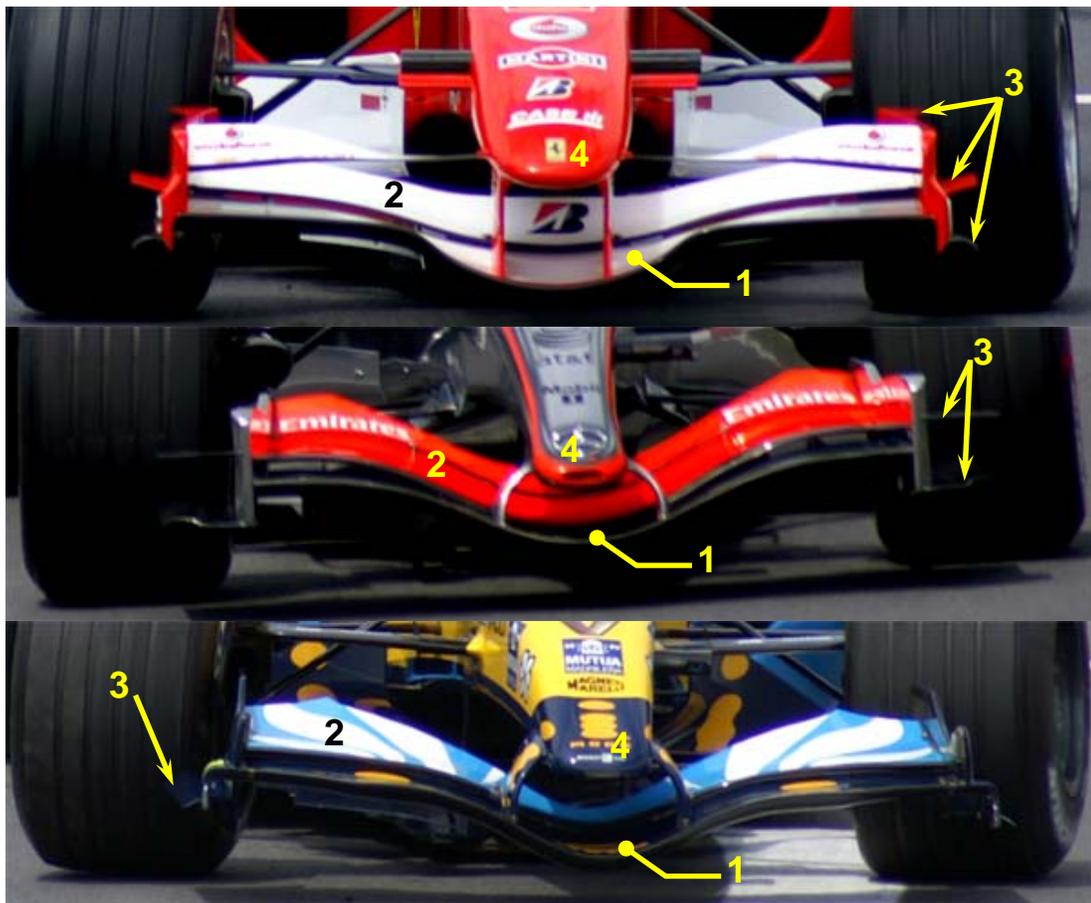


Figure 2-1 : Les éléments d'un aileron avant de F1 (Photos Auteur)

Chaque aileron avant est composé d'un grand profile (1) suspendu au museau (4). De chaque côté on retrouve un autre profile (2) réglable. Ce profile secondaire en plus de générer de l'appui aérodynamique va servir à diriger le flux d'air vers les pontons latéraux. De chaque côté du grand profile on a des petits profiles verticaux qui viennent s'attacher sur les end plates (3). Chaque extrémité de l'aileron permet le passage du flux d'air au-dessus et en dessous de l'aileron plutôt que tout autour. Ces dernières années, ces "extrémités" ont joué un rôle crucial en chassant l'écoulement de l'air "autour" des pneus avant, particulièrement depuis les changements important de règlement fin 1998. En effet le nouveau règlement a provoqué quelques problèmes pour les écuries en termes d'aérodynamique. La largeur maximale autorisée



fut réduite à 1m80 en 1998, les roues sont donc plus proches du châssis et les ailerons avant chevauchèrent alors les roues lorsque vous regardiez la voiture de face. Ce qui eut pour effet de produire des turbulences très handicapantes juste devant les roues, réduisant encore plus l'efficacité aérodynamique de l'aileron avant et générant un effort de traînée plus important et non désiré.

Pour résoudre ce problème, les top teams ont retravaillé le côté intérieur des "extrémités" de l'aileron avant pour diriger l'air vers le châssis et autour des roues (voir le dessin de gauche). Plus tard, beaucoup d'écuries firent le même raisonnement mais du côté extérieur des extrémités pour diriger l'air autour des roues avant mais vers l'extérieur. Solution rapidement adoptée par toutes les écuries pour réduire la largeur de l'aileron avant et ainsi redonner aux roues la même position par rapport à l'aileron qu'avant le changement de règlement (voir le dessin de droite).

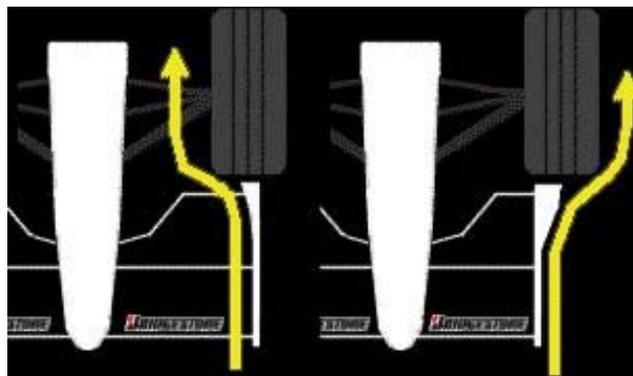


Figure 2-2 : Le flux aérodynamique de l'aileron avant en interaction avec la roue

Chaque constructeur a mis au point son propre aileron latéral. Les interactions entre les roues et l'aileron avant font qu'il est très difficile de trouver la solution miracle, et donc chaque écurie a son propre design.

Pour les derniers Grand Prix de l'année 2000, Ferrari utilisait un aileron très spécial qui fléchissait sous la charge aérodynamique. A mesure que la vitesse augmentait, l'aileron subissait une charge de plus en plus importante qui "pliait" l'aileron le plus près possible de la piste, ce qui améliorait le flux d'air dans les virages rapides. Les ailerons ne devaient pas être réglables sur la piste mais Ferrari en est venu à bout, profitant qu'il n'y ait encore aucune règle sur la rigidité des ailerons. Le règlement est aujourd'hui modifié et intègre ce nouveau paramètre. La FIA a réagi en introduisant l'article 3.17 a été ajouté au règlement technique (« un élément travaillant ne devra pas subir de déflexion supérieure à 5 mm verticalement lorsqu'une charge de 500 N est appliquée de part et d'autre de l'axe de la monoplace sur une largeur de 450 mm »).

De plus, depuis 2001, les ailerons avant doivent être surélevés de 50 mm, réduisant l'appui. Certaines écuries ont choisi de descendre la section centrale de l'aileron pour gagner de l'appui, mais en réduisant de ce fait la quantité d'air vers le dessous de la voiture. Nous verrons plus loin quel est l'effet de cet air qui circule sous la voiture.



L'aileron avant d'une F1 créé environ 25% de l'appui total dans les conditions idéales. Cependant lorsqu'une F1 roule derrière une autre à moins de 20 mètres, cet appui peut chuter de 30%. Bien que cela s'accompagne d'une réduction de la traînée et donc d'une meilleure vitesse de pointe en bout de ligne droite, cela pénalise fortement la voiture poursuivante car celle-ci ne pourra pas franchir le virage suivant à sa vitesse normale puisque qu'il y aura un déficit d'appui aérodynamique. Le phénomène est prépondérant dans les courbes rapides et est une des raisons majeures qui rend les dépassements aussi difficiles aujourd'hui en F1. C'est donc une lourde tâche que de faire fonctionner un aileron avant de manière optimale car la perturbation du flux dans cette partie de la monoplace aura un impact très important sur l'efficacité aérodynamique de toute la voiture.

Ainsi, au début de la saison 2001, le règlement sur les ailerons avant a changé en obligeant ceux-ci à se trouver au moins à 100 mm au dessus du plan de référence au lieu de 40 mm. La FIA introduisit cette mesure afin de limiter la vitesse des F1 en virage. L'idée était de diminuer l'effet de sol que génèrait l'aileron avant situé près du sol. Immédiatement après le début de la saison, Ferrari introduisit un aileron avant qui était courbé en son centre, dans l'axe de la voiture. Ce nouveau concept était une utilisation ingénieuse d'un trou dans le règlement technique. Ceci était le résultat d'une réflexion menée par les ingénieurs de chez Ferrari lorsqu'en 1994 la FIA imposa le sabot sous le fond plat qui peut sur toute sa largeur maximale, c'est-à-dire 50 cm, être placé aussi près du sol que l'on veut à condition qu'il ne s'use pas (épaisseur 10 mm +/- 1 mm). Comme le sabot faisait 50 cm de large, personne à la FIA n'avait pensé que l'aileron avant pouvait donc se trouver plus près du sol dans une plage de 25 cm de chaque côté de l'axe de la monoplace. Depuis son introduction par Ferrari, toutes les écuries ont adoptées ce concept.

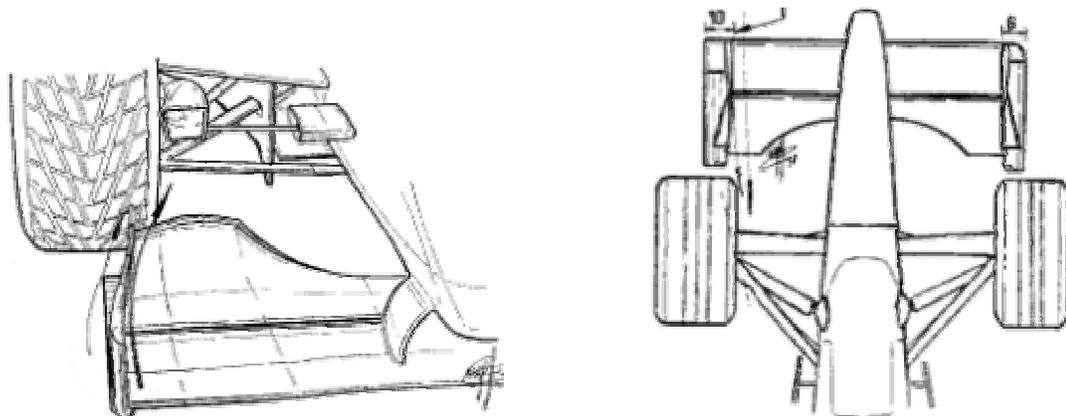


Figure 2-3 : Le fonctionnement des end plates

Comme une partie de l'air nécessaire à la génération de l'appui aérodynamique interfère avec l'air circulant autour des roues, les end plates ont été améliorées. Pour résoudre le problème majeur du flux turbulent autour des roues, McLaren puis plus tard Ferrari ont courbés les bords internes des end plates afin de diriger l'air vers l'intérieur des roues avant (c'était en 1998). Un an après, tous les teams adoptèrent cette technique afin d'avoir des ailerons avant plus efficaces. Certains teams optèrent pour une solution avec une largeur de plan principal plus petite entre les roues avant. Ceci laissa donc un espace pour des ailettes et des flaps, ce qui déclencha une recherche intensive sur les end plates.



Figure 2-4 : ailettes sur l'aileron avant de la Ferrari F248-F1 de 2006 (photo Auteur)



2.2 Le museau (Nose Cone)

Quand Tyrrell a introduit la première F1 avec un museau « haut » (la Tyrrell 019) en 1990, ce ne fût pas une grosse réussite et beaucoup de questions sur l'efficacité du concept se sont posées. C'était néanmoins un concept encore primitif puisque plusieurs points importants du design dit à nez haut n'avait pas été totalement exploré. Ainsi, alors que les années passaient, les éléments devenaient de plus en plus petits et les avantages du concept augmentaient. En 1997, toutes les monoplaces à nez bas disparurent au profit du nez haut. Mais penser au concept est une chose, l'optimiser en est une autre. Les dernières bonnes performances d'une F1 à nez bas datent de 1993 lorsque Alain Prost remporta le Championnat du Monde après son année sabbatique. La Williams de 1994 était bonne mais la Benetton était plus performante et donna son premier titre à Michael Schumacher. Prost peut alors être considéré comme le dernier pilote de l'histoire à avoir remporter un championnat avec une F1 à nez bas. Dès que Williams adopta le concept en 1995 sous la direction d'Adrian Newey, les FW deviendront imbattables. Les avantages majeurs d'un nez haut peuvent se comprendre lorsque l'on considère le fonctionnement aérodynamique d'une F1 dans sa globalité. A première vue le nez haut génère moins d'appui aéro puisqu'il pousse l'air vers le haut. Cependant en regardant de plus près, on voit que le nez n'a pas pour vocation de pousser l'air vers le haut mais permet au flux de passer dessous en ligne droite sans avoir besoin de le contourner.



Figure 2-5 : La Williams FW15 de 1993 - Concept à nez bas (Dessin F1-Legend.com)



Figure 2-6 : La Williams FW17 de 1995 - Concept à nez haut (Dessin F1-Legend.com)

Ce concept diminue ainsi la traînée de l'aileron avant car il est traversé par moins d'air. Ainsi la largeur de l'aileron avant peut être augmentée jusqu'à couvrir toute la largeur de la monoplace, permettant ainsi de générer plus d'appui aérodynamique sur l'avant. Tout l'air qui passe sous le nez haut est alors dirigé sous la voiture ou est séparé en deux de chaque côté par un splitter situé juste en amont des pontons. Ce flux d'air que les aérodynamiciens ont choisi de « précipiter » sous les F1 modernes va servir à alimenter le diffuseur qui se trouve à l'extrémité du stepped plane (voir § 3.6 - Géométrie et Aérodynamique d'une Formule 1). En effet, plus il y a d'air qui transite par le dessous de la monoplace (l'underbody), plus il peut être extrait rapidement par le diffuseur et plus l'appui aérodynamique généré est important. Dans ce cas l'appui est généré par l'underbody.



2.3 L'Aileron Arrière

Un tiers de la charge aérodynamique vient de l'aileron arrière. Ce dispositif amène dans certain cas un appui de 1000 Newtons (environ 100 Kg) pour une masse de 7 kg. L'aileron arrière est celui qui change le plus de course en course : il est façonné de manière à correspondre le plus aux caractéristiques du circuit. A Monza, circuit avec de longues lignes droites et peu de virages où le moteur est à pleine charge pendant 70% d'un tour, l'angle de l'aileron va être très faible et le nombre de plans horizontaux réduit (photo de gauche), favorisant la vitesse de pointe. Par contre à Monaco ou en Hongrie, circuits très lents et sinueux, une forte adhérence est souhaitée (photo de droite), les ailerons sont donc plus nombreux et fortement braqués.



Figure 2-7 : Deux configurations d'aileron arrière

Le dessin ci-dessous montre les différents éléments de l'aileron arrière : en haut l'élément principal (1) dont le nombre peut varier entre deux et trois et pour lesquels le pilote peut régler l'angle de braquage. L'élément du bas (2), lui, apporte en plus de l'appui une assistance au diffuseur pour extraire l'air de l'underbody. La réglementation de 2001 n'autorise plus que trois éléments maximum pour l'aileron arrière. Les côtés de l'aileron (3) permettent de tenir en place les éléments empêchent l'air de s'échapper sur les côtés, maximisant la zone de forte pression et donc l'adhérence.

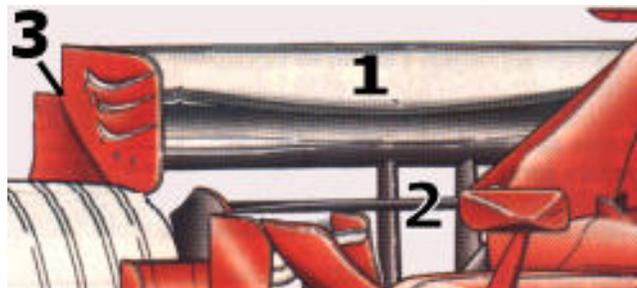


Figure 2-8 : Les éléments de l'aileron arrière



2.4 Les Pontons

Les pontons sont des ouvertures à l'entrée du moteur, situés après les déflecteurs et qui servent à faire varier la température du moteur selon l'angle d'ouverture. Ils mènent l'air vers les radiateurs qui s'occupent de refroidir le moteur. Leur influence sur le comportement aérodynamique global est importante. En effet, on voit apparaître parfois des ouïes dans les pontons afin d'améliorer la qualité du refroidissement en évacuant l'air chaud dissipé par les radiateurs.



Figure 2-9 : Les pontons plongeant en partie arrière sur la Renault R26 de 2006



Figure 2-10 : Les entrées d'air de pontons très travaillées sur la Renault R26 de 2006



Figure 2-11 : Les ouïes sur les pontons de la Renault R26 de 2006 (Photo Paul-Henri Cahier)



2.5 Winglets et ailettes

Ces éléments apparaissent et disparaissent au gré des Grand Prix et des besoins spécifiques à chaque circuit. On les voit « pousser » sur la carrosserie et sur le museau des F1. Ils ont pour vocation d'assainir le flux aérodynamique autour des monoplaces et de diriger l'air vers des endroits bien particuliers. Ils servent également à diminuer les phénomènes turbulents qui se produisent dans le flux d'air qui entoure les F1.



Figure 2-12 : Winglets et ailettes sur la Renault R26 de 2006 (Photos Auteur)



Figure 2-13 : Winglets et ailettes sur la McLaren MP4-21 de 2006 (Photos Auteur)



Figure 2-14 : Winglets et ailettes sur la Ferrari F248-F1 de 2006 (Photos Auteur)



2.6 Les Déflecteurs

Ces dispositifs sont apparus en 1993 (bien que les prémices datent de 1986 avec Lotus) et leur but est de diriger l'air autour de la voiture et vers les pontons. Ils sont montés juste devant les entrées d'air derrière les roues, mais sont parfois incrustées dans les suspensions. Depuis leur première utilisation, leur design a bien changé. Le dessin ci-dessous montre la McLaren MP4-8 avec la première version de ces déflecteurs. Il s'agissait juste de rectangles plats légèrement incurvés, mais maintenant ils prennent des formes de plus en plus complexes.



Figure 2-15 : Les premiers déflecteurs sur la McLaren MP4-8 (Dessin F1-Legend.com)

Le déflecteur est une pièce très importante située de chaque côté de la voiture, juste devant les entrées d'air de pontons (1). Ils permettent de diriger l'air vers les radiateurs et autour de la voiture. En améliorant l'aérodynamisme ils permettent l'augmentation de la vitesse mais peuvent réduire le volume d'air vers les radiateurs gênant le refroidissement du moteur. Ils sont généralement précédés par les "barge boards" (2) (genre de petits déflecteurs) qui servent à rediriger l'air vers l'extérieur et réduire ainsi la pression sur le bas du déflecteur principal. Des petites dérives (3) peuvent apparaître sur les déflecteurs qui servent à "calmer" le flux d'air ou à procurer de légers appuis.

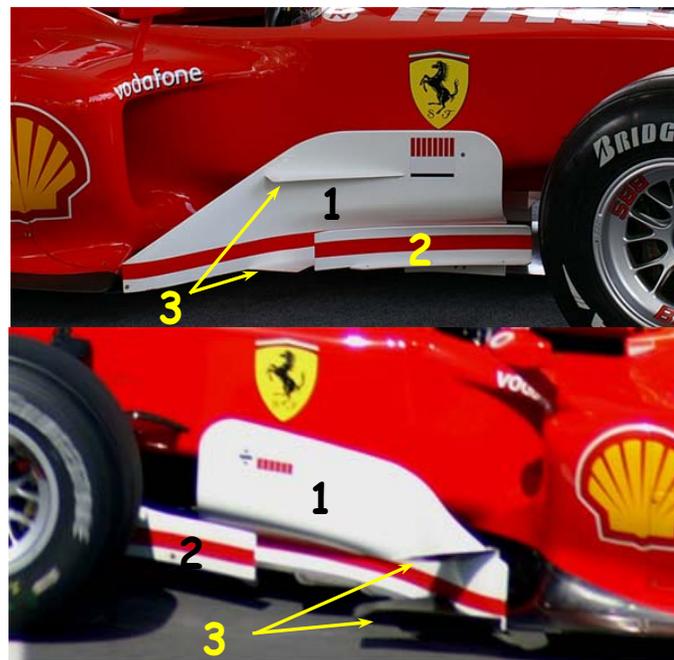


Figure 2-16 : Ensemble déflecteur-Barge Boards (Photos Auteur)



2.7 Le Diffuseur

Suite à l'interdiction d'utiliser l'effet de sol en 1982 par les autorités de réglementation techniques de la F1 (voir § 3.4 - L'effet de sol, quelque chose à partir de rien), de nouvelles recherches en soufflerie qui mettaient l'accent sur la mise au point de diffuseurs à l'arrière de la voiture se déclenchèrent.

Souvent invisible pour les spectateurs, le diffuseur est aujourd'hui un organe aérodynamique très important sur une Formule 1. Il est placé juste au-dessus de la piste, derrière l'axe des roues arrière. L'air passant sous la voiture et passant à travers le diffuseur crée un effet de succion qui colle la voiture à la piste. Le diffuseur consiste en plusieurs tunnels et séparations qui contrôlent le flux d'air afin de maximiser l'effet de succion. Chez certaines équipes, les échappements ressortaient directement au milieu du diffuseur. Si les gaz d'échappement étaient mal dirigés, l'équilibre de la voiture s'en trouvait changé à chaque fois que le pilote accélérât ou décélérât. Ferrari a judicieusement abordé le problème en installant les sorties d'échappement en partie haute, au dessus de la coque, permettant en même temps un fonctionnement plus efficace de l'aileron arrière. Aujourd'hui, toutes les écuries de F1 utilisent cette solution.

Le volume du diffuseur augmente en allant vers l'arrière. Lorsqu'une quantité donnée de molécules d'air remplit par exemple 1 dm³ sous la monoplace, il en remplira 2 dans le diffuseur. Cette chute de pression aspire la voiture vers le sol. En pilotant une voiture à 300 km/h, l'effet de sol pourrait être extrême si il n'y avait pas d'air sous la monoplace. Mais on sait que la FIA a interdit les monoplaces à jupes et à aile inversé sous l'underbody pour des raisons de sécurité.

Au lieu de lever l'arrière de la monoplace, le diffuseur aspire l'air à l'extérieur depuis le dessous grâce aux basses pressions. Il est placé sous l'aileron arrière et nettoie véritablement tout ce qui se trouve dans l'underbody. Il est composé de plusieurs tunnels et parois qui contrôlent proprement le flux d'air afin de maximiser l'effet de succion. Le design du dessous de la monoplace et du diffuseur devient alors extrêmement critique parce qu'il peut influencer le comportement de la F1 en virage. Encore plus important, les concepteurs doivent prendre garde à ce que le comportement de la monoplace soit bon en toutes circonstances et ce pour toutes les gardes au sol possibles. En effet, la perte de l'appui généré par le diffuseur au moment d'escalader un vibreur rendrait la F1 très nerveuse dans son comportement routier.

Il s'agit d'un élément aérodynamique dont le développement peut encore faire gagner beaucoup de secondes au tour, en partie en forçant encore plus d'air au travers du diffuseur. C'est ce que cherchent à optimiser les aérodynamiciens en utilisant la forme de bouteille de Coke.



Figure 2-17 : Le diffuseur



Figure 2-18 : La forme de bouteille de Coke (pointillé jaune)



3 Le Comportement Aérodynamique d'une Formule 1

3.1 *Le Principe des Ailerons*

Depuis leur apparition en 1968, les ailerons ont fortement évolué pour devenir de plus en plus complexe et de plus en plus robuste. Cependant, leur principe de fonctionnement demeure et demeurera toujours le même.



Figure 3-1 : A gauche, aileron type 1968, à droite type 2001

Les ailerons de F1 fonctionnent comme des ailes d'avions, à cela près que l'avion doit voler alors que la Formule 1 doit être plaquée au sol. L'analogie entre ces deux disciplines très voisines va jusqu'à la terminologie des efforts aérodynamiques exercés. Alors que les ailes d'avion doivent procurer de la portance pour élever l'avion, les ailerons d'une F1, au contraire, doivent produire de l'appui, la déportance. Le but est d'accroître la pression exercée sur les pneus pour les coller à la piste, c'est pourquoi on parle également de charge aérodynamique.

Le dessus et le dessous d'une aile d'avion ont des formes différentes qui font que le flux d'air s'écoule plus facilement, et donc plus rapidement, au-dessus. C'est cette différence entre l'écoulement de l'air, plus rapide sur la surface supérieure que sur la surface inférieure, qui provoque une différence de pression entre les deux surfaces, la dépression créée ainsi au dessus va "aspérer" l'aile vers le haut. Sur une voiture de course c'est l'effet inverse qui est recherché. Les ailerons sont inversés et sont dessinés pour que l'air s'écoule plus vite sous l'aileron et que la dépression se produise en dessous pour créer de l'appui aérodynamique.

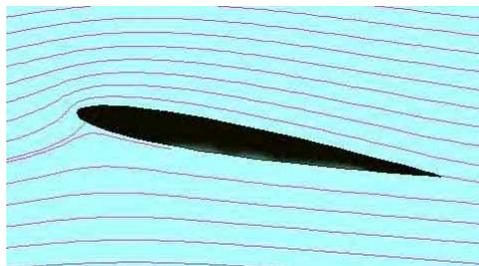


Figure 3-2 : Aile d'avion

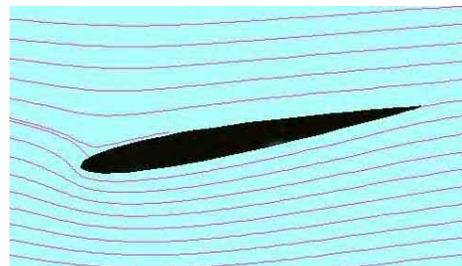


Figure 3-3 : Aileron de Formule 1



Sur les deux schémas ci-dessous, on a représenté deux molécules d'air, A et B qui se présentent ensemble devant une lame d'un aileron de la voiture. L'une, la A (flèche rouge), passe par en haut, et l'autre, la B (flèche bleue), passe par en dessous. Bien que le chemin de la molécule B soit plus long, les deux molécules se présentent ensemble à la sortie de l'aileron, ce qui prouve que la molécule B s'est déplacée plus vite que la A, créant ainsi une dépression qui aspire l'aileron vers le sol et qui génère de l'appui aérodynamique (c'est la loi de Bernoulli qui s'applique dans ce cas - Voir Annexe 1). L'appui progresse en fonction du carré de la vitesse, soit environ 150 kg à 100 km/h, 600 kg à 200 km/h et plus de 1,5 tonnes à 300 km/h. Cependant ce fonctionnement idéal s'accompagne d'un autre phénomène qui lui, aurait plutôt tendance à nuire à l'efficacité des Formule 1. En effet, le flux d'air qui entoure l'aileron est perturbé et provoque ainsi de la traînée.

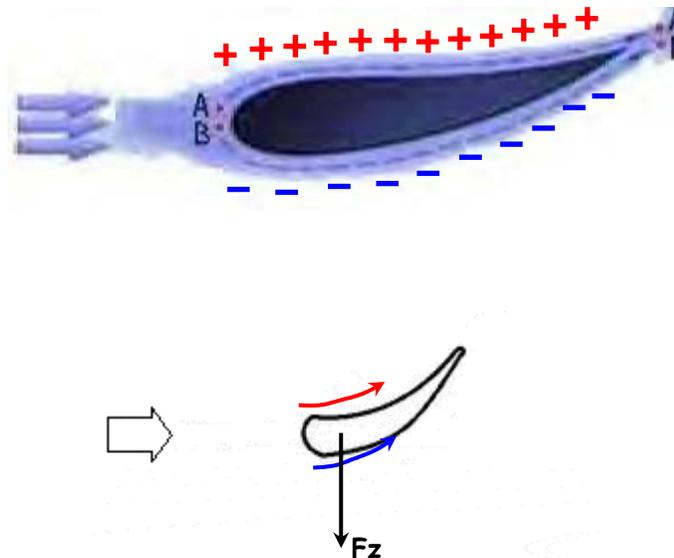


Figure 3-4 : La loi de Bernoulli appliquée à un aileron

Sur la figure suivante on a représenté la déportance en vert et la traînée en rouge pour deux incidences d'ailerons différentes. On remarque nettement que le braquage de l'aileron induit plus de charge aérodynamique, donc une meilleure tenue de route, mais également que la traînée, qui s'oppose au déplacement de la voiture, augmente considérablement et elle peut sérieusement limiter la vitesse maximum ou entraîner une surconsommation ; on dit que la voiture pénètre moins bien dans l'air. La traînée est donc un facteur important sur une Formule 1. Ainsi, le réglage aérodynamique d'une Formule 1 réside dans le compromis idéal à trouver entre l'appui aérodynamique (la tenue de route) et la traînée (la vitesse de pointe).

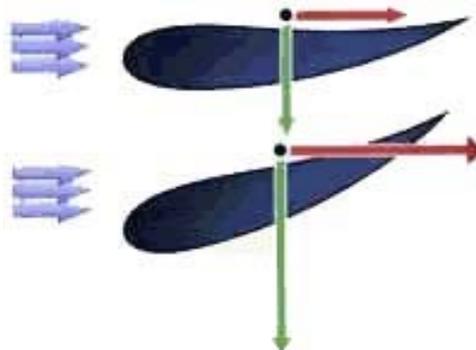


Figure 3-5 : Relation entre déportance et traînée

La portance que produit l'aile et la déportance générée par l'aileron sont proportionnelles aux surfaces qui les génèrent : plus la surface est grande et plus la portance générée sera grande. De plus, toutes les surfaces exposées au flux de l'air produisent leurs propres efforts de traînées. Les bras de suspension en sont un bon exemple. Ils ont souvent la forme "d'aile d'avion" mais leurs deux faces sont dessinées identiquement afin de ne pas créer de différences de pressions et obtenir un minimum de traînée, et le flux y est parfaitement dirigé et donc moins perturbé. On voit sur le dessin ci-dessous les différents C_x pour plusieurs formes géométriques. On voit qu'un bras de suspension de forme circulaire générera un $C_x = 0.47$ alors que le même bras de suspension de section alaire générera un $C_x = 0.04$, soit un gain de 91.5% sur la traînée.

Forme	Coeff de traînée
→ ○	0.47
→ ◐	0.42
→ ◓	0.50
→ ◻	1.05
→ ◊	0.80
→ ◻	0.82
→ ◻	1.15
→ ◐	0.04
→ ◐	0.09

Figure 3-6 : Quelques exemples de Coefficients de Traînées C_x pour diverses formes géométriques

Une Formule 1 possède un C_x dramatiquement haut (votre véhicule personnel possède un C_x bien meilleur que celui d'une F1) : $C_x = 0.624$. Pneus larges, à l'extérieur de la carrosserie, suspensions en plein écoulement, cockpit ouvert, radiateurs volumineux (traînée de refroidissement importante). Les



générateurs de traînée sur une F1 ne manquent pas.

La déportance (charge aérodynamique) a pour effet de plaquer la voiture au sol via les pneumatiques avec plus de force que le poids de la voiture elle-même. Le grip que les pneumatiques produisent sur la piste augmentent linéairement avec l'augmentation de la déportance. Cette augmentation de l'appui aérodynamique, et donc des efforts sur les pneumatiques, signifie que le grip que les pneus ont sur la piste augmente proportionnellement et donc permet aux pilotes d'aller plus vite en virage.

Deux ailerons ayant cette configuration sont utilisés : un à l'avant et un autre à l'arrière. Ainsi il n'y a pas plus de grip d'un côté ou de l'autre d'une Formule 1. En effet, dans le cas contraire ceci produirait des effets catastrophiques sur la voiture, notamment à hautes vitesses quand la voiture développe le maximum de sa déportance.

Lorsqu'une monoplace n'est pas en mouvement, l'air au dessus et dessous les ailerons n'a pas de pression dynamique et la pression statique est la même partout. Lorsque vous placez votre main par la fenêtre quand votre voiture se déplace, vous sentez la force de l'air lorsqu'elle rencontre votre main. Cette pression que vous sentez s'appelle la pression dynamique et elle augmente lorsque vous accélérez.

L'équation de l'effort de déportance F_z généré par un aileron de surface S évoluant à vitesse V dans un fluide est :

$$F_z = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_z$$

ρ : Masse volumique de l'air
 S : Surface totale de l'aileron
 V : Vitesse de l'air
 C_z : Coefficient de portance

Le coefficient de déportance C_z d'un aileron dépend de sa forme et de son incidence.



3.2 L'Angle d'Attaque

La différence entre la direction dans laquelle pointe l'aile et la direction du flux d'air s'appelle l'angle d'attaque. Ce paramètre possède une influence très importante sur le fonctionnement des ailerons.

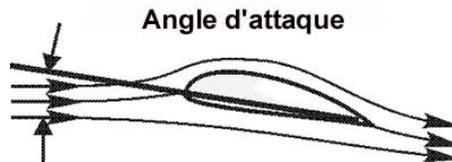


Figure 3-7 : L'angle d'attaque

Le graphique ci-dessous montre comment la portance et la traînée varient avec l'angle d'attaque pour une aile d'avion typique (pour un aileron de F1 il suffit de transposer la portance en déportance).

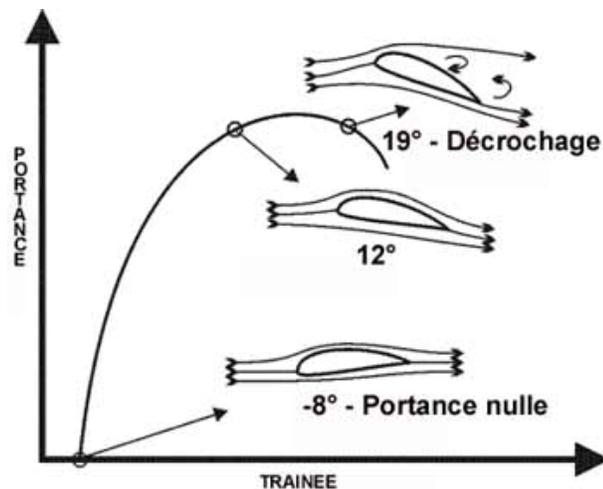


Figure 3-8 : Relation Portance-Traînée en fonction de l'angle d'attaque

A l'endroit où la courbe croise l'axe de la traînée, l'aile est généralement à portance nulle. Notons que l'angle d'attaque à ce point est négatif. Ceci signifie qu'une aile typique doit pointer vers le bas pour générer une portance nulle. Remarquez également qu'il y a de la traînée à portance nulle. Dès que le nez de l'aile pointe vers le haut, la portance augmente. La traînée augmente également mais pas aussi rapidement que la portance. Rappelez-vous la dernière fois que vous avez pris l'avion. Durant le décollage, un avion prend une certaine vitesse et alors le pilote met l'avion en rotation, c'est à dire qu'il manipule les commandes de telle sorte que le nez de l'avion pointe vers le haut et ainsi à un certain angle d'attaque, les ailes génèrent assez de portance pour vaincre le poids de l'avion et le soulever dans les airs. Puisque les ailes sont fixées sur le fuselage de l'avion, la totalité de ce dernier doit tourner pour augmenter l'angle d'attaque de la voilure.

Mais quelle est l'efficacité du phénomène ? Vous gagnez beaucoup de portance sans générer beaucoup de



traînée jusqu'à un angle d'attaque de l'ordre de 12° . A partir de cette valeur, vous générerez plus de traînée sans pour autant gagner beaucoup de portance. En effet, lorsque l'angle d'attaque augmente de 12° vers 19° il n'y a plus augmentation de la portance mais de plus en plus de traînée, c'est alors le décrochage. Les ailerons avant des Formule 1 sont fabriqués de telle manière que l'angle d'attaque est facilement ajustable afin de faire varier la déportance nécessaire à l'équilibre de la voiture. On voit de temps en temps au cours de certaines courses, les techniciens de piste modifier ces angles au cours des arrêts au stand. L'aileron arrière peut également être ajusté en changeant l'angle d'attaque mais cela prendrait trop de temps pendant un arrêt au stand, il faut donc trouver le réglage optimal avant la course.

3.3 Le flap Gurney

Le flap Gurney est un petit flap placé sur le bord de fuite de l'aileron et qui sert à ajuster la déportance générée par un aileron. Les avions utilisent ce type de flap pour augmenter la portance durant le décollage et l'atterrissage. Un flap Gurney augmente fortement les performances d'un aileron pour les angles d'attaque importants.

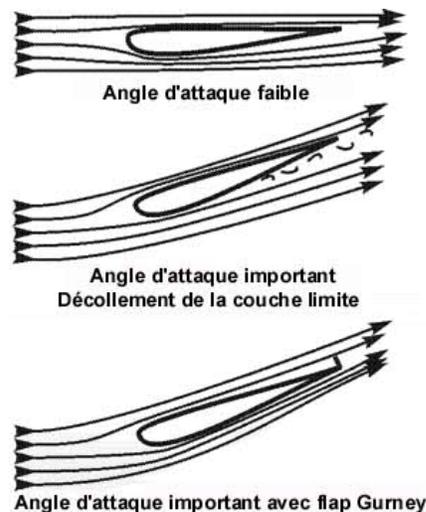


Figure 3-9 : Les effets du flap Gurney

Le premier dessin ci-dessus montre un aileron qui génère un efforts de déportance (ou de la portance négative) lorsqu'il se déplace dans l'air. Le second dessin est un aileron avec un fort angle d'attaque : l'air est incapable de suivre le contour de la surface inférieure de l'aileron et se détache, diminuant ainsi l'efficacité de l'aileron. Ce phénomène turbulent est connu sous le nom de décollement de la couche limite et le résultat est alors une diminution de la déportance et une augmentation de la traînée. Un petit flap sur le bord de fuite (dessin du bas) produit une dépression juste derrière celui-ci, ce qui provoque un effet de succion et ramène le flux d'air en contact avec l'intrados de l'aileron. Bien sûr, le flap Gurney produit sa propre traînée, mais l'aileron peut être braqué à des angles d'attaque plus importants, produisant alors plus d'appui aérodynamique.



3.4 L'effet de sol, quelque chose à partir de rien

L'effet de sol fut la plus belle réponse qu'un petit groupe d'ingénieurs trouva à la question « Que faire pour limiter le C_x et augmenter le C_z ? ». On sait aujourd'hui que Chapman et ses amis ont eu l'idée... pour rien.

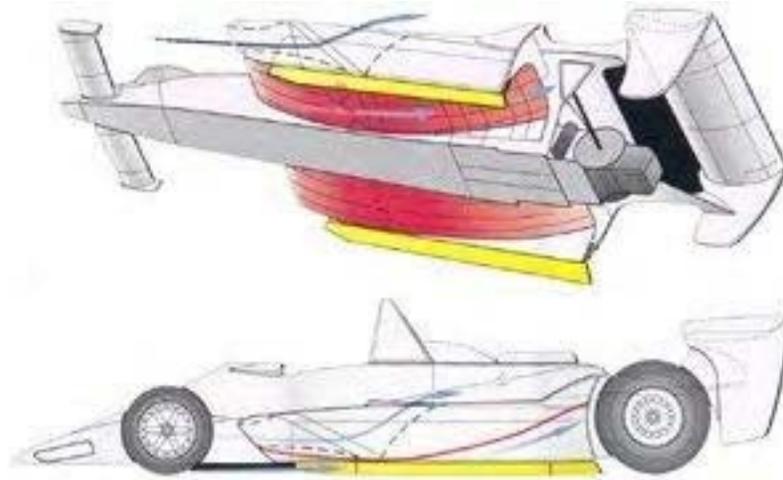


Figure 3-10 : Formule 1 à effet de sol

Cette innovation technologique que Colin Chapman aimait à décrire comme quelque chose à partir de rien, allait conférer aux voitures de l'écurie Lotus un gain de performance en 1977 plus important encore que l'aérodynamisme des radiateurs latéraux au début de la décennie. Ce dispositif de jupe à effet de sol fût interdit par la FISA en 1982 pour des raisons de sécurité. Cette interdiction va avoir une influence très importante sur l'évolution technologique de la Formule 1. En effet, la perte de ce phénomène obligea alors les constructeurs à équiper leurs monoplaces d'ailerons arrière surdimensionnés afin de tenter de reproduire cet effet de sol. Ceci favorisa le développement des moteurs turbocompressés qui étaient les seuls à pouvoir vaincre les forces de traînée phénoménales engendrées par ces énormes ailerons.

Grâce à l'effet de sol, les F1 avaient gagné 28 km/h de moyenne sur un tour, alors que leur vitesse de pointe restait la même. La belle invention ! Tout se passait pied au plancher en vertu d'une adhérence démoniaque. Par quel miracle en étions-nous arrivés là et sur quoi reposait-il ? Pour le découvrir je vous propose un petit retour en arrière.

Nous sommes dans la première moitié des années 70 et il faut bien reconnaître que les ingénieurs automobiles se trouvent confrontés à un problème épineux : est-ce la peine d'augmenter la puissance d'un moteur dans la mesure où la voiture ne permet pas de l'exploiter ? Accélérations, freinages, dérive... les pneus n'en peuvent plus de glisser et de transformer les chevaux vapeur en fumée bleutée. La question resta posée longtemps, et les monoplaces continuèrent à évoluer dans le cadre d'un compromis à cette époque favorable à la puissance que les pilotes avaient de plus en plus de mal à maîtriser. Jusqu'au jour où...



On savait qu'une automobile, à fortiori de course, était soumise à des forces verticales et transversales plus ou moins élevées, mais dont la plus néfaste était la "portance", cette force perpendiculaire au sens de la vitesse, dont la première conséquence était de déléster la voiture. La direction devient légère, la stabilité en ligne droite fait défaut et la plus petite bosse fait figure de dangereux tremplin. Que faire pour gagner en adhérence ? Augmenter les appuis. Pour cela, deux solutions : augmenter le poids de masse (châssis, moteur, lest...), ce qui est très gênant pour les performances, notamment en virage, ou augmenter le poids adhérent. Cette notion fut introduite par les ailerons, puis par les carrosseries en coin. Le résultat escompté était bien là, mais à quel prix ! Les 120 kg d'appui d'un aileron se payant par une traînée (le C_x) limitant la vitesse de pointe à une valeur ridiculement basse.

Au château de Ketteringham Hall, repère discret, mais non dépourvu d'allure des bureaux d'études Lotus, quelques cerveaux effervescents tentaient de résoudre le problème. Chapman, Southgate et Wright (en consultant extérieur) planchent sur un cahier des charges bien particulier et intitulé "Quelque chose pour rien". Peter Wright n'en est pas à son coup d'essai. Déjà, en 68/70, il avait imaginé la March 701 avec des structures inférieures capables d'augmenter les appuis, mais l'expérience n'était guère concluante. Pourtant, cette idée de réservoirs latéraux carrossés en aile d'avion inversée était la bonne... Il n'y manquait que les jupes pour rendre le travail de cette aile totalement indépendant de l'air extérieur.

Dans un premier temps, l'on borda le ponton de crin, puis de jupes en lexan pour en arriver aux vraies jupes rigides doublées de patins en tungstène. Avec sa Lotus 79, Chapman venait de créer la première des wing-cars. Une carrosserie fine, un carénage moteur-boîte, des suspensions à basculeurs, la 79 allait dominer la saison de la tête et des épaules. Désormais, à appui identique, il est possible de régler les ailerons avec moins d'incidence, diminuant d'autant la traînée et augmentant d'autant la vitesse de pointe.

"Quelque chose pour rien" disait Chapman. "Rien pour beaucoup" dirions-nous. De quelle façon Wright était-il venu à assimiler cette notion de déportance "gratuite" ? En observant une aile d'avion. Dès 200 km/h, une aile d'avion subit deux phénomènes aérodynamiques majeurs : sur sa face supérieure (l'extrados), l'air accélère et crée une dépression ; sur sa face inférieure (l'intrados), l'air ralentit et crée une surpression. Or, la force engendrée par la dépression est pratiquement double de celle engendrée par la surpression. Bilan : l'aile d'avion est aspirée à 75 % par la surface supérieure de ses ailes et portée à 25 % par la surface inférieure. Retournons cette aile. Les forces demeurent identiques mais s'inversent : l'extrados va aspirer l'avion vers le sol et plus l'on rapproche ce profil du sol plus le flux d'air inférieur accélère et plus la dépression s'accroît. Coupons donc une tranche d'aile et collons-la de part et d'autre d'un châssis. Oui mais voilà... 50 cm d'aile d'avion, ça ne sert strictement à rien sinon à créer d'énormes turbulences. Une aile d'avion n'a d'efficacité que grâce à sa grande longueur qui parvient à maintenir bien séparés la dépression du dessus et la pression du dessous. Au-delà de cette partie efficace c'est l'anarchie, le tourbillon marginal que l'on peut observer quelques fois lors du décollage d'un avion. Or, greffer un moignon d'aile inversée revient à ne conserver que la partie inefficace ! A moins de porter ces moignons d'aile à 4 mètres, il fallait donc trouver un système d'étanchéité et Chapman a parfaitement compris que sa tranche d'aile d'avion avait tout simplement besoin de deux plaques pour empêcher les dépressions inférieures d'être comblées par les surpressions supérieures. Le cloisonnement par les jupes était né.

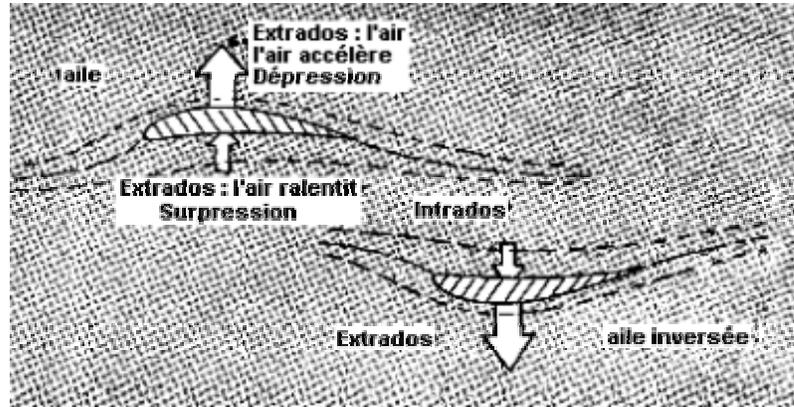
Dès lors, le phénomène allait être perfectionné, peaufiné et les dépressions capables d'entraîner un effet



de succion représentant 2 500 kg à 300 km/h. Le Cz passant de - 0.5 à - 1.7 à seulement 180 km/h. Plus qu'il n'en faut pour qu'un avion ne décolle !

"Et ceci compte tenu des variations d'assiette", rectifie Sylvain Crosnier. "Roulis, cabrage, plongée... entraînaient des cassures dans l'étanchéité et les valeurs de crêtes obtenues en conditions idéales pouvaient atteindre 3 000 kg." Soit, avec la voiture, l'essence et le pilote, une masse totale de 4 000 kg. De quoi rêver, mais aussi de quoi s'effrayer.

"Au début", poursuit Gilles Schaffer, "nous avons assisté à ce que j'appellerai des gags : direction qui se bloquait, couples de coques qui fissuraient, pontons qui s'affaissaient... Je me souviens d'un constructeur qui m'avait traité de plaisantin lorsque je lui ai annoncé 600 kg d'appui par profil de ponton. Cette année, nous en étions à 1 250 Kg ! Au fil des années, ils ont, malgré tout, compris, et prenaient conscience des véritables problèmes." Ces problèmes, c'étaient surtout les accélérations transversales subies par les pilotes. Des forces proches de 3 G. C'était des contraintes mécaniques multipliées par cinq sur des éléments de suspension dont le matériaux était resté le même qu'à l'époque des 600 kg d'appui. C'était également de brusques changements d'adhérence lorsque les conditions de roulage n'étaient pas excellentes. Un peu trop de roulis et la jupe intérieure se lève, perdant son rôle d'étanchéité. Dans ce cas, le Cz diminue de 5 à 10 % et la dérive prend des proportions inquiétantes. Qu'importe ! Course après course, séance de soufflerie après séance de soufflerie, les ingénieurs réussissaient à parfaire leur science à tel point que les bonnes F1 de 1982 avaient pratiquement perdu 70 % de leurs appuis extérieurs pour n'obtenir de tenue de route que par ce puissant effet de sol. Au bout du compte, la wing-car devenait quasi parfaite, le seul point noir restant les mouvements de caisse parasites. Jusqu'au jour où les forces verticales devinrent si importantes que les ingénieurs butèrent sur une nouvelle difficulté : le pompage. Soit du fait d'un léger accident de terrain, soit du fait de la croissance de la charge aérodynamique, les suspensions s'écrasent, fléchissent, entraînent les profils à fleur de bitume et le beau phénomène de succion se transforme en vilain tourbillon l'espace de quelques dixièmes de seconde. Les filets d'air inférieurs décrochent, soulagent la voiture de leurs contraintes et la caisse remonte de quelques centimètres. De là, la déportance reprend, les suspensions s'écrasent, ramenant l'aile trop près du bitume, d'où nouveau décrochage... La piste prenait des allures de tôle ondulée plus qu'inconfortable. Que faire ? Supprimer toute possibilité de variation de hauteur de caisse ; c'est l'apparition des suspensions en béton et des colonnes vertébrales en coton. Une solution techniquement peu élégante dans la mesure où elle engendre d'importantes fluctuations d'adhérence sur sol irrégulier. Pour sa part, Renault détenait peut-être le remède miracle en étudiant un correcteur d'assiette hydraulique fixant la garde au sol à environ 8 cm.

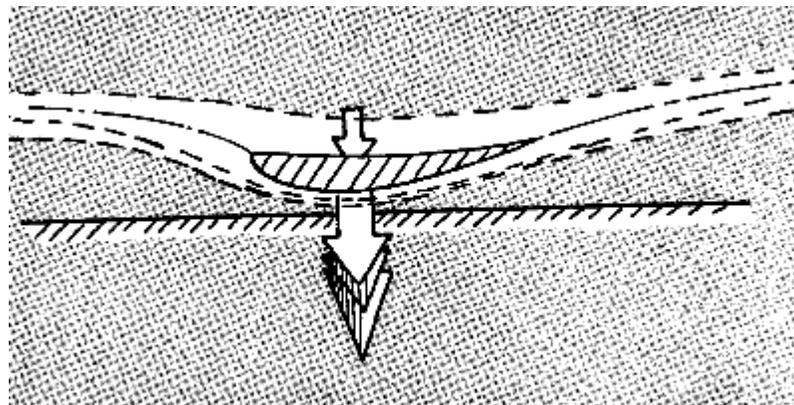


L'origine de la déportance, donc de l'effet de sol, et son fonctionnement, sont analogues à ceux d'une aile d'avion placée à l'envers.

Extrados = dépression = déportance

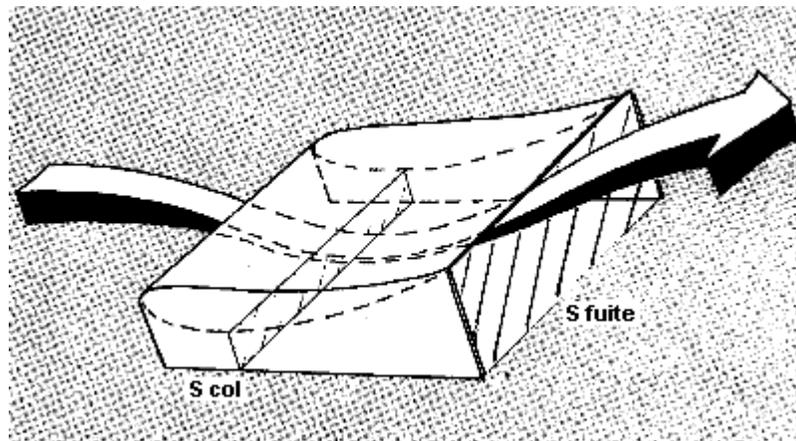
Intrados = surpression = portance

La dépression crée une force double de celle provoquée par la surpression. Un avion est donc aspiré dans l'air et non porté.

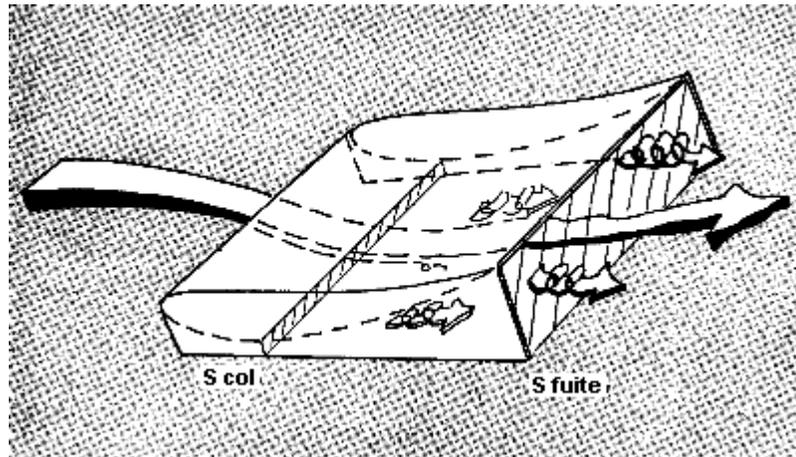


Rapprocher l'aile inversée du sol augmente l'accélération du flux d'air sur l'extrados et accroît la dépression.

La vitesse atteinte par l'air ainsi prisonnier peut dépasser les 500 km/h. Sur le schéma ci-dessous, l'air est canalisé par les jupes.



Mais attention ! Si l'aile est trop près du sol (suspensions trop souples s'écrasant sous la charge aérodynamique), le flux d'air décroche et entre en turbulences. L'effet de sol disparaît. La caisse remonte, redescend sous la charge et le phénomène recommence. C'est le pompage.



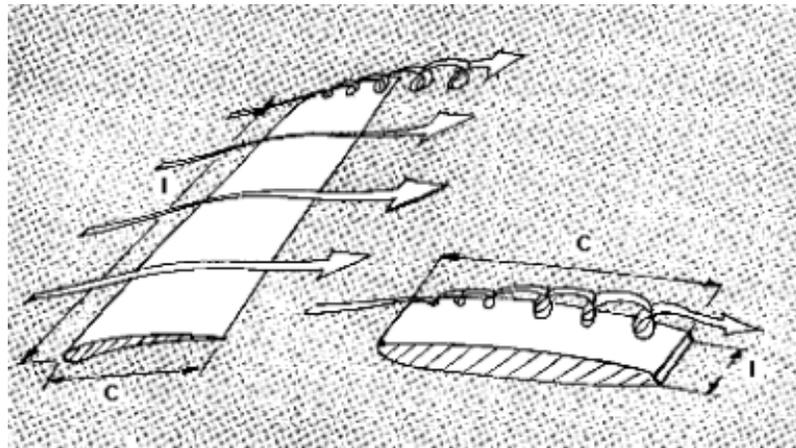
Pourquoi les jupes ? Parce que la surpression de l'intrados a la fâcheuse manie de vouloir combler la dépression de l'extrados.

Sur une aile d'avion le phénomène est limité grâce à la grande longueur du profil mais existe sur les bords extérieurs.

Une tranche d'aile de 45 cm fonctionnant comme ce bord, il a fallu séparer les trajectoires des deux flux.

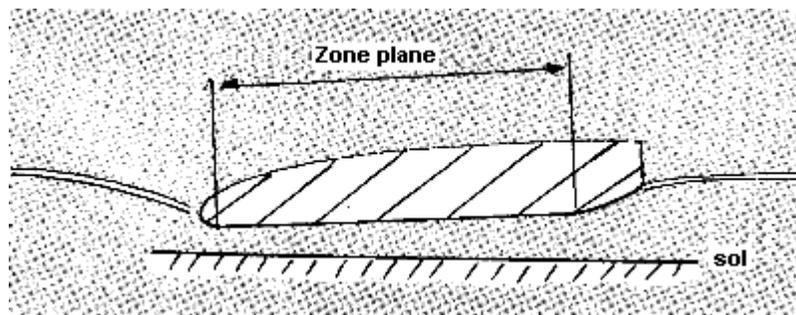
Ce que Chapman a réalisé avec les jupes. Sans elles, c'est l'anarchie et seulement 35 % d'effet de sol.

Le même système est appliqué sur l'aileron arrière dont les "tôles" latérales sont appelées fences.



Un fond plat à proximité du sol et isolé par des jupes est également déporteur si on le dispose en position "piqueuse" vers l'avant.

Sans jupe, le phénomène est amoindri dans une grande proportion.



Il faut noter que le ponton était plus haut juste devant les roues arrière qu'au niveau de l'entrée d'air, ce qui permettait d'accroître le phénomène d'effet de sol à cet endroit et également de diriger l'air au-dessus des roues arrière de manière à diminuer la traînée engendrée par ces éléments.

Pour créer l'effet de sol, il fallait absolument que l'air soit emprisonné. C'est pour cela que les pontons étaient aussi près que possible du sol. Ceci était possible grâce aux jupes aérodynamiques.

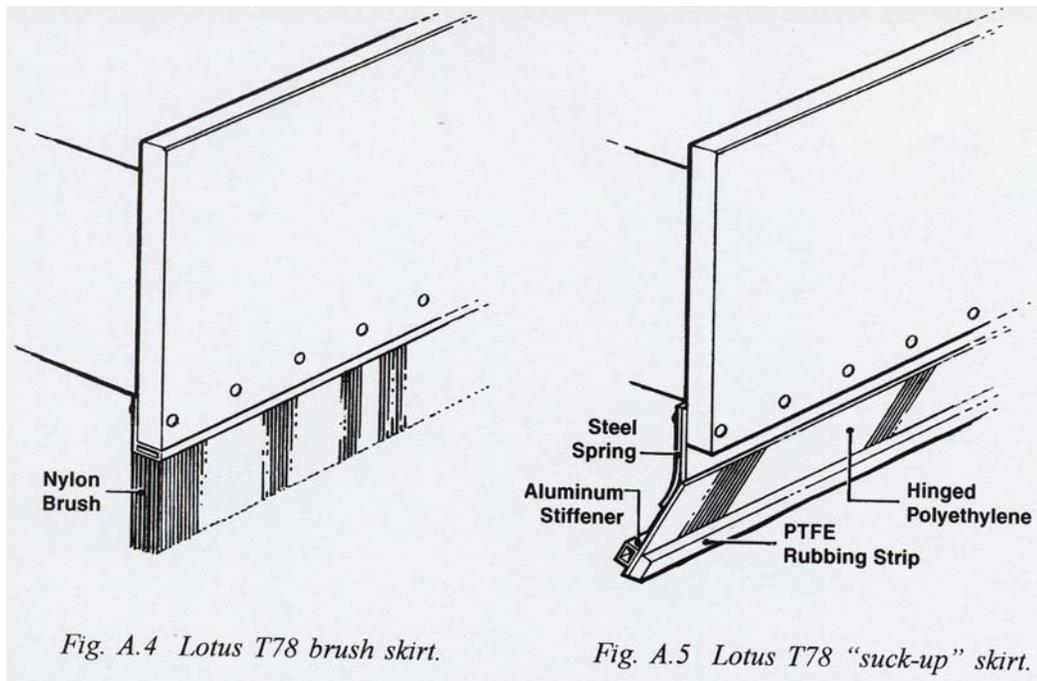


Figure 3-11 : Jupes aérodynamiques de la Lotus 78, 1978

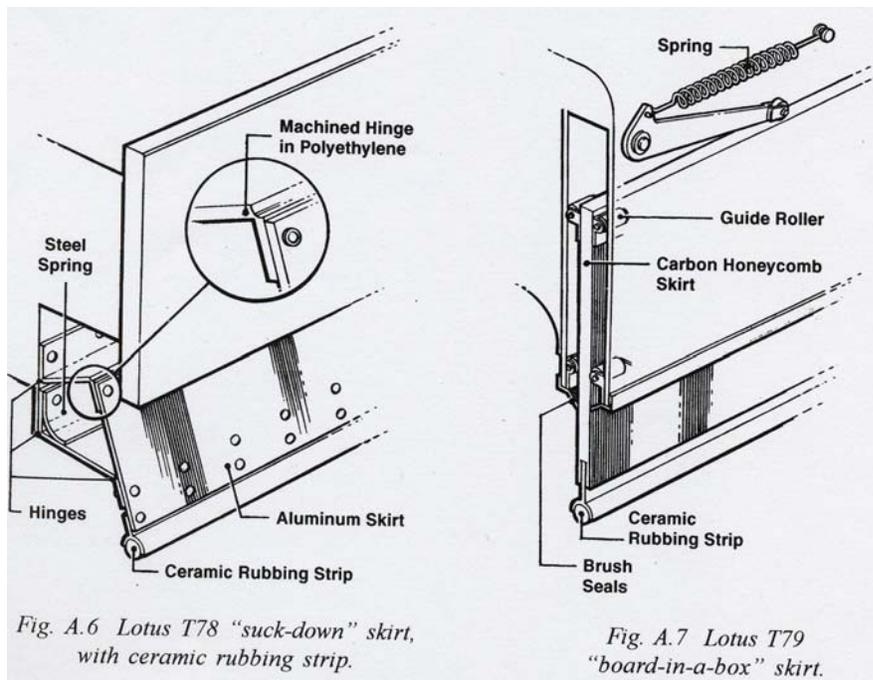


Figure 3-12 : Jupes aérodynamiques des Lotus 78 (1978) et Lotus 79 (1978/79)



La jupe était donc pourvue dans sa partie basse, en contact avec la piste, de "brosse en nylon" ce qui permettait de réduire les frictions avec le sol tout en limitant la fuite d'un flux d'air vers l'extérieur de la jupe. Les brosses furent dans un premier temps inclinées vers l'extérieur du ponton puis dans un second temps, vers l'intérieur. La jupe aérodynamique emprisonnait l'air ce qui produisait une succion tellement grande que même les forces G ne pouvaient décoller la voiture du sol. Ceci entraînait souvent des cassures qui pouvaient provoquer un grave accident. Et si la voiture décollait un peu du sol, elle se mettait à voler, ce qui était encore plus dangereux pour le pilote.

Lorsque les autorités ont décidé d'interdire les dispositifs à effets de sol en 1982, les ingénieurs ont été contraints de se remettre à chercher de nouvelles solutions pour compenser la perte de C_z .

Voici deux variantes légales que les aérodynamiciens de l'époque ont mis en œuvre pour récupérer une partie de la déportance disparue et diminuer le C_x causé par un gros aileron arrière. Dans les deux cas, l'effet venturi fonctionnera d'autant mieux que le plancher sera large, faute d'étanchéité latérale.

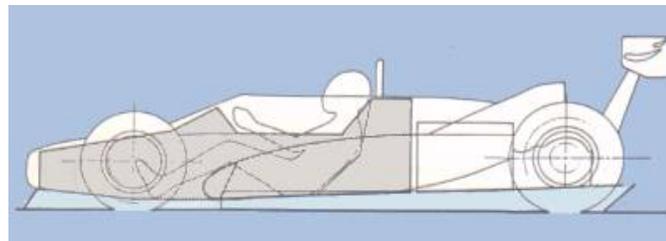


Figure 3-13 : Fond plat avec caisse en position "piqueuse"

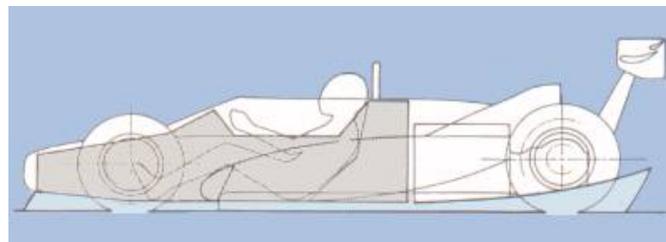


Figure 3-14 : Fond plat jusqu'à l'aplomb avant des roues arrière

Ensemble moteur-boîte relevé vers l'arrière avec carénage inférieur en aile inversée



3.5 La différence entre le poids et l'appui aérodynamique

On peut se demander pourquoi, étant donné que l'appui aérodynamique augmente la vitesse d'une Formule 1 en virage, une voiture plus légère va plus vite en virage ? Pourquoi la charge verticale fournie par l'aérodynamique est-elle différente de la charge verticale fournie par le poids ? Ce sont de bonnes questions. Nous allons commencer par y répondre en parlant dans un premier temps des phénomènes de frottement.

Le frottement alimente la résistance au glissement que nous expérimentons tous les jours. En effet, sans frottement nous ne pourrions pas marcher. Considérons un bloc fait d'un matériau quelconque, un cube de vingt centimètres de côtés. Il est posé sur une surface plane, disons une table. Ce bloc possède un poids propre dû à la gravité. Nous appellerons ce poids F_v , une force verticale qui pointe droit vers le bas. Si vous poussez ce bloc avec une force F parallèle à la table, vous le faites glisser sur la surface. Si vous donnez sur le bloc une petite impulsion, il glisse immédiatement sur la table. Si vous poussez dessus trop légèrement, il ne bouge pas. Intuitivement, vous sentez bien que sous une faible impulsion, un cube de bois glissera plus facilement qu'un morceau de gomme, de même qu'un bloc de bois sera plus aisé à bouger qu'un bloc de plomb. A quoi ceci est-il dû ?

L'effort nécessaire à vaincre le frottement est d'autant plus important que le bloc est lourd, mais il dépend également des propriétés des surfaces en contact, les fameux coefficients de frottements. L'équation qui décrit ce phénomène est :

$$F_f = C_f \cdot F_v$$

L'équation se lit de la manière suivante : l'effort de frottement est égal au produit de l'effort vertical F_v par le coefficient de frottement C_f . Vous remarquez alors que le frottement est d'autant plus fort que le coefficient C_f est important. En pratique, c'est à cause de C_f que vous devez pousser un bloc de gomme plus fort qu'un bloc de bois pour les déplacer. Ainsi, un bloc de gomme glissant sur une surface quelconque a un coefficient de frottement C_f plus important qu'un bloc de bois glissant sur la même surface. L'effort vertical F_v est la raison pour laquelle un effort plus important est nécessaire pour bouger un bloc de plomb qu'un bloc de bois de même taille.

Une gomme possède un coefficient de frottement relativement important quand on la teste sur de nombreuses surfaces. Disons que ce coefficient est de l'ordre de 0.8. Si un bloc de gomme pèse 1 kilo, alors l'effort vertical qui s'exerce sur elle est de 1 kilo et il faudra développer un effort de 0.8 kilo pour déplacer le bloc de gomme à vitesse constante ($C_f \cdot F_v = 0.8 \cdot 1 = 0.8$). Ajoutons un effort vertical sur le bloc en plaçant une aile inversée au sommet du bloc. L'aile est traversée par un flux d'air et produit un appui aérodynamique de 9 kilos. Maintenant F_v vaut 10 kilos (1 kilo de poids et 9 kilos d'appui aérodynamique) et il faut développer un effort de 8 kilos pour déplacer le bloc ($C_f \cdot F_v = 0.8 \cdot 10 = 8$). Ainsi, nous avons beaucoup plus d'appui généré par l'effet aérodynamique que par le poids et nous gagnons alors beaucoup d'efforts de frottement. Ceci montre que nous pouvons ajouter de l'appui aérodynamique sur une Formule 1 et



transmettre ainsi encore plus de frottement via les pneumatiques. Mais ceci ne répond pas à la question qui demandait pourquoi une voiture plus légère peut franchir un virage plus rapidement qu'une autre plus lourde. Nous allons y répondre maintenant.

Essayons de comprendre pourquoi une voiture plus lourde passe en virage plus lentement alors que l'appui aérodynamique aide une voiture à aller plus vite en courbe. La première partie de ce paragraphe expliquait que le frottement profite à la charge aérodynamique en permettant aux pneumatiques de générer plus de grip. Maintenant, voyons comment le poids, ou la masse, affecte la voiture en virage.

Sir Isaac Newton, (1642-1727), un mathématicien britannique, est célèbre pour avoir compris le phénomène de la gravitation. La petite histoire raconte qu'alors qu'il somnolait au pied d'un pommier, il fût réveillé par la chute d'une pomme sur la tête, réalisant par la même occasion qu'une force devait agir sur cette pomme pour la faire tomber. Que cette histoire soit vraie ou pas, Newton formula tout de même les relations élémentaires qui relient la masse aux efforts exercés et aux accélérations des corps, et qui furent alors les fondements des sciences de l'ingénierie. Newton fit l'extraordinaire observation qu'un corps immobile le reste à moins qu'un effort s'applique sur celui-ci. C'est la première loi du mouvement de Newton. Sa seconde loi du mouvement dit que le corps en question sera accéléré quand un effort s'appliquera sur lui. L'accélération sera d'autant plus importante que l'effort appliqué sera grand et d'autant plus petite que le corps est massif. La seconde loi du mouvement se traduit par l'équation :

$$F = M.a$$

F est la force exercée sur le corps, M est la masse du corps et a est l'accélération causée sur le corps par cette force F.

Mais revenons à la course automobile où en plus d'accélérer en ligne droite, les voitures abordent des virages. Les pneumatiques génèrent alors des efforts latéraux dirigés vers le centre du rayon de courbure du virage. Ainsi on sait bien que si la masse M se déplace sur un arc de cercle, on peut exprimer l'accélération 'a' tel que le carré de la vitesse divisé par le rayon de courbure R du virage. L'équation de la seconde loi de Newton devient :

$$F_c = \frac{M.V^2}{R}$$

La force Fc est communément appelée la force centrifuge. C'est l'effort qui garde une corde tendue lorsque vous la faite tourner au dessus de votre tête avec une masse accrochée au bout. L'effort sur la corde augmentera lorsque vous augmenterez la vitesse de rotation de la masse et il diminuera lorsque vous augmenterez la longueur de la corde.

Regardez bien l'équation et pensez à une Formule 1 franchissant un virage. Si la masse M devient plus importante, la force centrifuge Fc doit croître pour assurer l'égalité. Ceci signifie que plus une voiture est lourde, plus elle prend d'effort pour rester dans le virage. Pour le même rayon de courbure l'effort



centrifuge augmente avec la vitesse. Un virage tendu signifie une faible valeur de R, ce qui veut dire que F_c augmente si le virage est tendu.

Ceci est juste une équation de base pour décrire ce que vous savez déjà. Une voiture légère passera plus vite en virage et un rayon de courbure plus petit (virage tendu) est un virage plus lent. Vous avez déjà ressenti en voiture que plus vous allez vite en virage et plus vous prenez d'effort centrifuge. Notez tout de même que l'effort centrifuge est proportionnel au carré de la vitesse. Pour le même rayon de courbure, tourner à 50 km/h génère quatre fois plus d'effet centrifuge qu'à 25 km/h.

Ces deux équations $F_f = C_f \cdot F_v$ et $F = M \cdot a$ décrivent la dynamique d'une F1.

$F = M \cdot a$ ou bien son équivalent en virage, $F = M \cdot V^2/R$, expriment le fait que vous avez besoin d'une voiture légère en virage avec un moteur puissant.

$F_f = C_f \cdot F_v$ vous dit que vous avez besoin de pneumatiques avec beaucoup de grip, une bonne suspension (pour garder les pneus au contact avec la piste) et de tout l'appui aérodynamique que vous pourrez générer.



3.6 Géométrie et Aérodynamique d'une Formule 1

Ce paragraphe se focalise sur les facteurs qui influencent et qui interagissent avec le flux aérodynamique circulant autour d'une F1. Ce paragraphe va vous présenter une analyse de la proximité de l'underbody par rapport au sol ainsi qu'une analyse de différentes configurations aérodynamiques.

Prévoir le comportement exact du flux aérodynamique autour d'une Formule 1 est une tâche très complexe. Ceci est dû à la géométrie et à la nature tourbillonnaire des flux.

Une F1 moderne peut être divisée en composants aérodynamiques majeurs suivants :

- L'aileron avant
- L'aileron arrière
- Les roues et la suspension
- La carrosserie
- L'underbody

Leur interaction avec l'underbody sera discutée plus loin sur la base du règlement technique 2004 de la FIA.

3.6.1 L'Aileron Avant

L'aileron avant d'une formule 1 est une aile amovible multi-éléments qui fonctionne à proximité du sol (une hauteur minimale est définie par le règlement technique de la FIA). Comme la monoplace fonctionne dans le sillage de cet aileron avant, son design est constamment adapté afin d'obtenir les meilleures performances possibles. L'aileron avant doit pouvoir générer de l'appui aérodynamique et permettre un grand nombre de réglages différents. Son sillage influence beaucoup l'underbody qui donc devra s'adapter en conséquence puisque chaque réglage d'aileron avant possède son propre effet de sillage et donc différentes conditions de fonctionnement pour l'underbody.

L'aileron avant est fortement influencé par la rotation des roues avants, en particulier lorsque ces dernières ont un angle de braquage car il en résulte des turbulences puisque l'air est comprimée entre les end-plates de l'aileron avant et les roues. Les formes des end-plates très sophistiquées que l'on voit sur les ailerons avant des F1 modernes ont pour vocation de minimiser ces effets mais ils sont également générateurs de perturbations du flux aérodynamique.

3.6.2 L'Aileron arrière

L'aileron arrière est une aile à multi éléments sur deux étages et il fonctionne dans le flux aérodynamique complet d'une F1. Chaque étage possède sa propre fonction. L'étage supérieur est composé en général au maximum de deux plans et il se comporte comme une aile d'avion (inversée) en générant l'appui aérodynamique, à condition de l'alimenter avec un flux « propre ». L'étage inférieur lui est également composé de deux plans et est situé près de la sortie du diffuseur. En plus de générer de l'appui, la partie inférieure de l'aileron arrière améliore l'efficacité du diffuseur en accélérant le flux à travers celui-ci.



Résultat, le flux total de l'underbody est accéléré grâce à l'effet de succion provoqué par le plan inférieur, ce qui induit alors plus de déportance en provenance de l'underbody.

Ainsi, la partie basse de l'aileron arrière fonctionne de manière intime avec l'underbody en provoquant des gradients de pression favorables.

3.6.3 Les Roues et Les Suspensions

Les éléments responsables de la complexité du flux aérodynamique autour d'une F1 sont les roues qui produisent 40% de la traînée totale de la monoplace tout en générant une sustentation défavorable (le règlement technique de la FIA interdit le carrossage des roues d'une F1). De plus, le fait de donner un angle de braquage aux roues avant, la rotation des roues produit de puissants flux transverses générant de fortes perturbations. A cela, on peut ajouter l'influence de la suspension avant qui produit sa part de perturbations aérodynamiques dans le processus ainsi que l'influence des écopes de freins avant. La suspension arrière, elle, a peut d'influence sur le flux de l'underbody car elle est située au dessus des sorties de ce dernier.

3.6.4 La Carrosserie

La carrosserie en elle-même contribue peu à la génération de l'appui aérodynamique comparé aux ailerons et à l'underbody. Cependant, avec le resserrement des règles qui gouvernent l'aérodynamique d'une F1, la recherche pour intensifier la performance a conduit les ingénieurs à utiliser différentes voies pour augmenter l'efficacité des ailerons et de l'underbody tout en essayant de faire générer de l'appui à la carrosserie en utilisant des éléments additionnels. En effet, l'augmentation des performances des ailerons et de l'underbody est obtenue en optimisant la canalisation du flux aérodynamique. C'est ainsi que l'on a vu « pousser » sur les carrosseries des F1 modernes des éléments tels que les winglets et les ailettes.

Ces éléments sont relativement peu efficaces dans la génération d'appui aérodynamique comparativement à l'underbody et aux ailerons mais ont une très forte valeur ajoutée dans l'amélioration des performances d'une F1 (surtout depuis les sévères restrictions aérodynamiques des dernières années). En pratique, toute la carrosserie et les éléments additionnels qui se trouvent en amont de l'entrée de l'underbody influencent le flux d'air qui traversera ce dernier puisqu'il opère dans le sillage de ces éléments.

En résumé, le flux d'air pénétrant dans l'underbody est influencé en priorité par les supports de l'aileron avant, par la qualité du flux d'air en provenance de l'aileron avant (d'où la configuration « nez haut »), par les barges boards et les ailettes, canalisant ainsi le flux dans certaines régions spécifiques.



3.6.5 L'Underbody

J'utilise le terme d'underbody pour désigner la partie qui se trouve sous la monoplace plutôt que le terme fond plat car vous allez voir que les dernières modifications du règlement technique ont fait disparaître le fond plat pour une solution en escalier.

Les règlements de la FIA définissent "clairement" la forme de l'underbody d'une F1 (voir schéma ci-dessous)

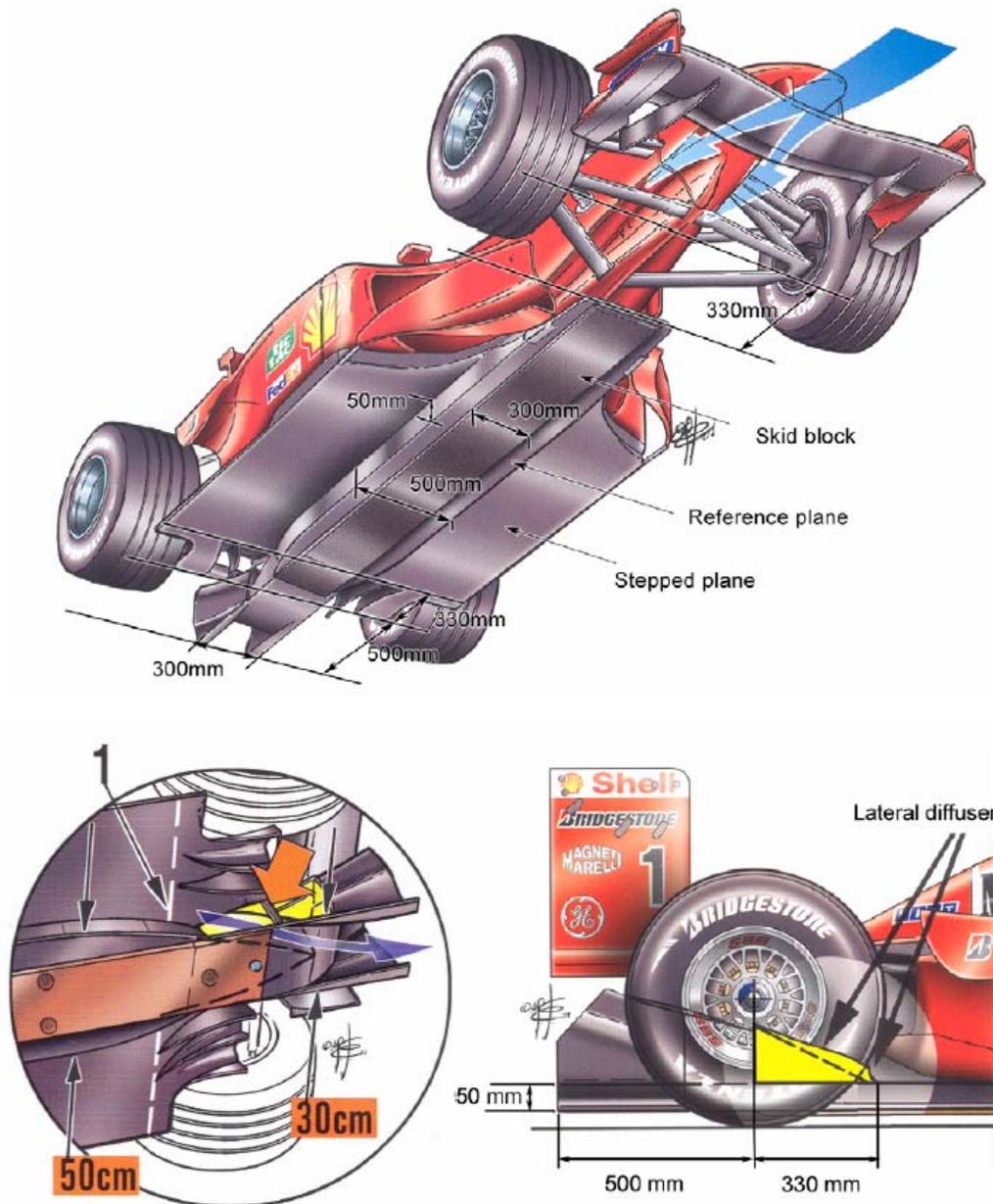


Figure 3-15 : Géométrie et dimensions de l'underbody et du diffuseur



L'underbody doit s'étendre depuis une ligne située 330 mm derrière l'axe des roues avant jusqu'à l'axe des roues arrière et doit former une surface plane appelée surface de référence. Cette surface de référence doit avoir une largeur minimale de 300 mm pour une largeur maximale de 500 mm. De plus, un stepped plane doit être aménagé à 50 mm au dessus du plan de référence et doit former une surface plane située dans une région se trouvant 330 mm derrière l'axe des roues avant et 330 mm en avant de l'axe des roues arrière. En arrière du plan de référence et du stepped plane, le règlement technique de la FIA autorise l'incorporation d'un diffuseur central d'une largeur et d'une hauteur maximales de 300 mm, ainsi que des diffuseurs latéraux qui ne peuvent pas être à moins de 50 mm verticalement par rapport au plan inférieur du diffuseur central. Le diffuseur central peut s'étendre jusque 500 mm derrière l'axe des roues arrière. De plus, un sabot rectangulaire (Skid pad) de 10 mm d'épaisseur et de 330 mm de large soit être fixé sous l'underbody.

Ce concept d'underbody a pour but de limiter sa proximité avec le sol et de diminuer ainsi drastiquement son niveau d'appui aérodynamique. Ce concept diminue (sur le papier) la génération d'appui de 40%. Le sabot limite la garde au sol optimale d'une F1 à 50 mm (une usure excessive du sabot conduit à une disqualification).

Cette géométrie en stepped plane génère des zones de turbulences le long des bords du plan de référence (voir dessin ci-dessous).

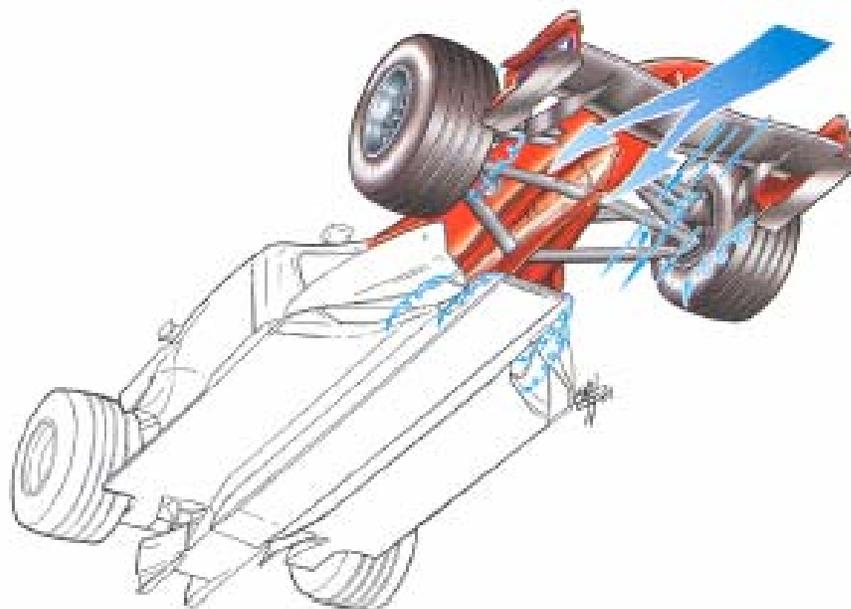


Figure 3-16 : Génération de vortex autour des end-plates de l'aileron avant et de l'underbody

L'underbody lui-même est gouverné par des règles strictes mais comme nous le mentionnions plus haut, son niveau de performance dépend de la qualité du flux d'air entrant.

Ainsi, le flux traversant l'underbody d'une F1 est très complexe, avec des zones à forte vitesse, à cause des interactions avec de nombreux éléments tels que les ailerons et les pneumatiques.



3.6.6 Interactions

La qualité du flux d'air et la performance aérodynamique d'une voiture de compétition à roues non carrossées telle qu'une Formule 1 dépendent fortement des interactions entre chaque élément de la monoplace. Il est un fait avéré que l'aileron avant influence au plus niveau la performance de l'underbody, mais la relation exacte derrière ce phénomène n'est pas complètement comprise (pour le moment).

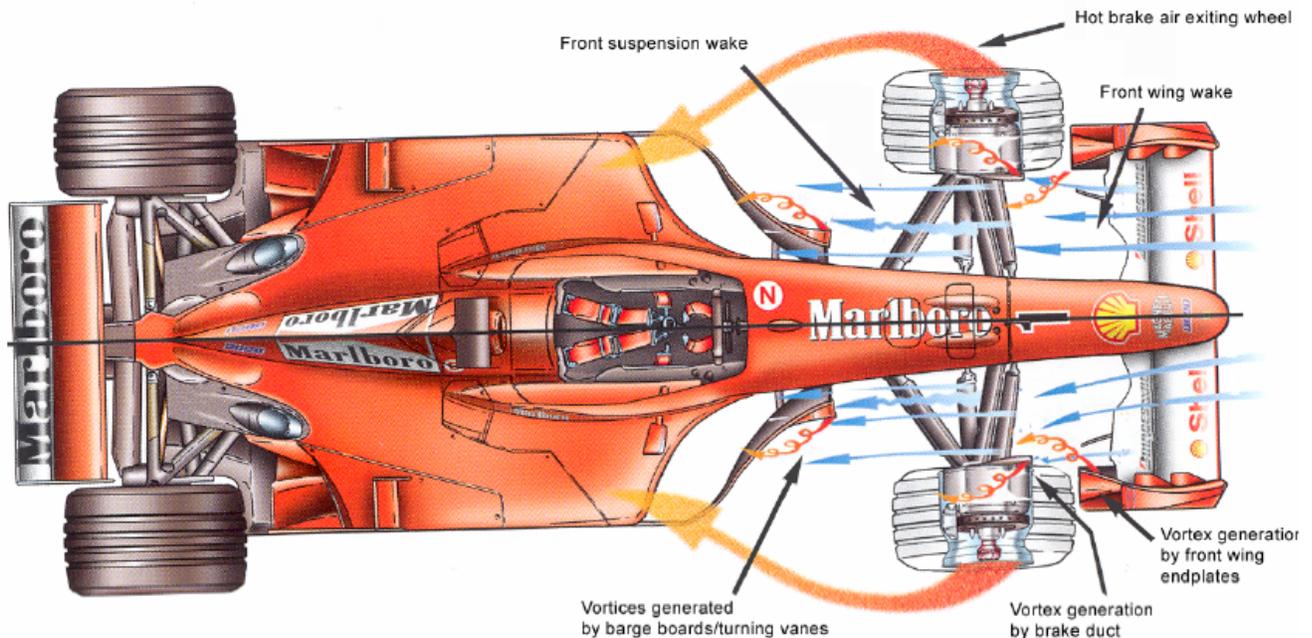


Figure 3-17 : Effets des éléments avants sur le flux aérodynamique entrant dans l'underbody



3.7 Effet de la garde au sol sur l'aérodynamique

Les effets aérodynamiques induits sur un corps qui se déplace à haute vitesse à proximité du sol sont examinés dans ce chapitre. L'interaction entre un corps en mouvement et une surface stationnaire, traditionnellement la piste, dépend fortement de la garde au sol.

Je vous propose d'examiner l'influence de la garde au sol (vulgairement appelée « hauteur de caisse » par certains commentateurs TV qui ignorent tout des subtilités de l'aérodynamique d'une F1) sur la déportance générée par l'underbody.

Les résultats des analyses présentées sont basés sur de la littérature publiée par Barlow et Wright.

3.7.1 Forte garde au sol

Dans le cas de forte garde au sol, il n'y a pas d'interaction entre le flux qui règne autour de la monoplace et le sol. C'est le cas par exemple des avions dans la plupart des cas, excepté dans les cas de décollage et d'atterrissage. C'est ce qui est illustré sur la figure ci-dessous. Les vitesses dans cette analyse sont prises par rapport au corps analysé qui se déplace à une vitesse U .

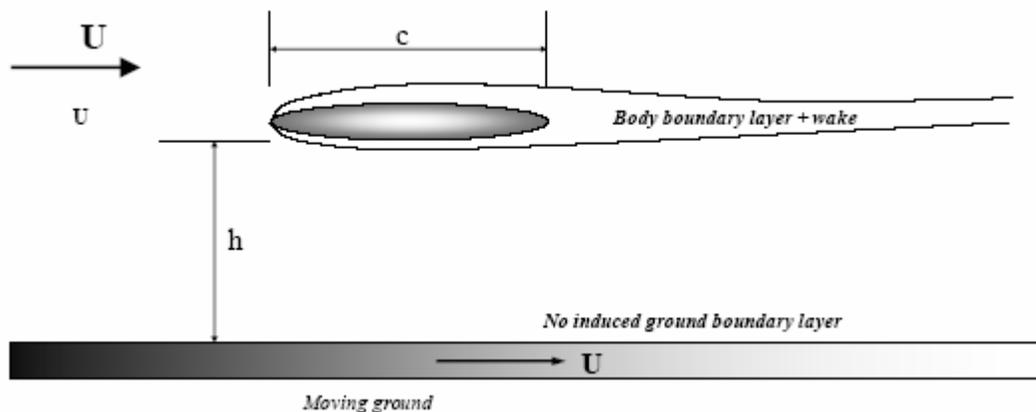


Figure 3-18 : Condition de forte garde au sol



3.7.2 Garde au sol moyenne

Dans le cas de garde au sol moyenne (approximativement $h/c = 0.03$), ce qui est un cas normal pour la voiture de tourisme de monsieur tout le monde, le flux accéléré sous le corps en mouvement interagira avec le sol fixe (ceci est illustré sur la figure suivante).

En plus de la déformation de la couche limite du corps, une couche limite de sol est générée à proximité du sol. Cette couche limite de sol possède une différence significative avec les autres couches limites : la vitesse locale à la base de la couche limite de sol sera égale à la vitesse U du flux libre, et non pas zéro comme c'est le cas pour une couche limite conventionnelle. Ceci est dû au fait que les vitesses sont prises par rapport au système d'axe du corps en mouvement. La forme de la couche limite du corps en mouvement change à cause de la présence de la couche limite de sol suivant un facteur de forme H .

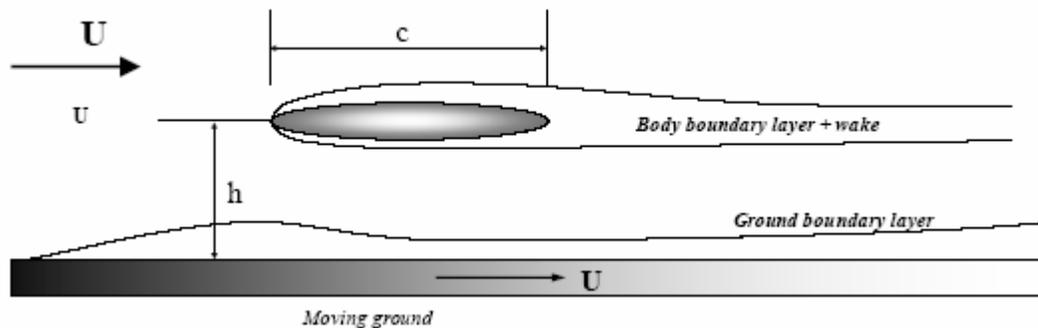


Figure 3-19 : Condition de garde au sol moyenne

3.7.3 Petite garde au sol

Pour une petite garde au sol, l'interaction entre les deux couches limites est très forte, avec une séparation très faible entre les deux. Cette situation est illustrée sur la figure suivante. Une Formule 1 fonctionne dans cette catégorie avec une garde au sol typique de $h/c = 0.01 - 0.015$.

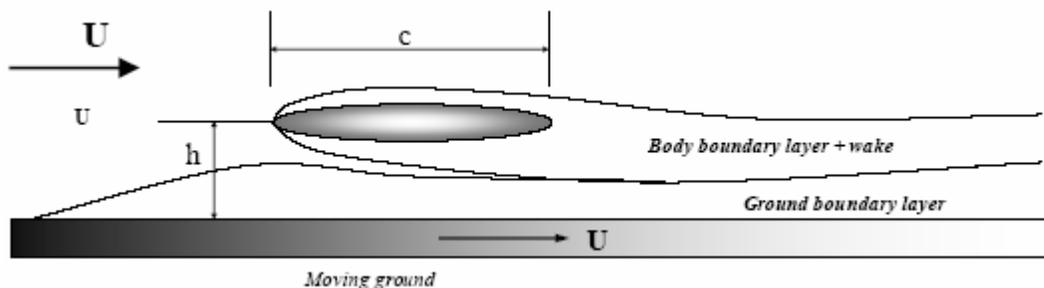


Figure 3-20 : Condition de petite garde au sol

Le fait de diminuer la garde au sol d'une F1 augmente la vitesse du flux d'air qui circule sous l'underbody, jusqu'à un certain point. A une hauteur donnée, qui dépend de la conception de l'underbody lui-même, la



séparation entre les deux couches limites devient nulle. Pour cette garde au sol optimale, ce qui est intéressant c'est que la vitesse dans cette couche limite combinée est maximale. A partir de ce stade, le fait de diminuer la garde au sol n'augmentera pas la vitesse dans la couche limite combinée. Ainsi, les pressions les plus faibles et les vitesses maximales dans la couche limite combinée sont obtenues pour la garde au sol optimale.

Pour les gardes au sol plus petites que la garde au sol optimale, le flux de l'underbody sera freiné par une nouvelle combinaison des couches limites sol/corps en mouvement. Ce blocage diminuera alors la vitesse maxi au travers de l'underbody induisant alors une perte d'appui aérodynamique.

De plus, le pic de déportance qui se produit en diminuant la garde au sol conduira à un gradient de pression fortement défavorable. Diminuer la garde au sol a également la fâcheuse tendance à augmenter la traînée puisque l'augmentation des vitesses du fluide (l'air) qui s'en suit ainsi que l'augmentation de l'épaisseur du profil des couches limites plus épais produisent un accroissement des frottements.

Comme on peut le voir sur l'illustration suivante l'abaissement de la garde au sol au-delà de la hauteur optimale mettra la couche limite du corps en contact avec le sol en mouvement, annulant par la même occasion la couche limite de sol. L'underbody générera alors un très faible effet de déportance.

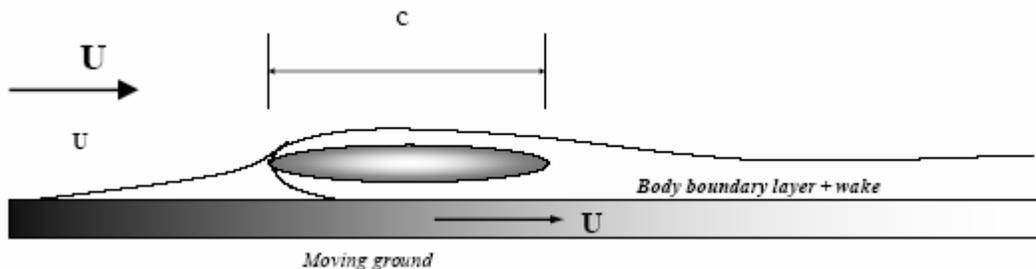


Figure 3-21 : Condition de très petite garde au sol

Cette limitation de valeur minimale de garde au sol est similaire à la limitation de l'angle de braquage d'un aileron (au-delà d'un certain angle optimal, l'aileron génère plus de traînée que d'appui).



3.8 Configurations d'Underbody

3.8.1 Analyse de la Géométrie de l'Underbody

La configuration en stepped plane de l'underbody des F1 actuelles a été introduite en 1995 dans le but de diminuer l'appui aérodynamique qu'il génère tout en le rendant moins sensible au tangage et à la variation de garde au sol. La hauteur optimale de cette garde au sol pour une Formule 1 équipée d'un underbody plat (on appelait ça un fond plat à l'époque) est approximativement de 40 à 50 mm. Cette garde au sol ne peut plus être atteinte de nos jours à cause de la géométrie en stepped plane imposée par la réglementation technique de la FIA. En effet, le stepped plane doit se situer au moins à 50 mm au-dessus du plan de référence et donc au moins 60 mm au-dessus du sol à cause du sabot de 10 mm d'épais. Les diffuseurs centraux et latéraux sont directement connectés au stepped plane plutôt que sur le plan de référence. Ce choix est justifié par le fait que le sabot empêche le plan de référence de générer un appui aérodynamique significatif (comparativement au stepped plane). Cette règle oblige les concepteurs de F1 à dessiner des diffuseurs pour le stepped plane avec des gardes au sol d'approximativement 80 mm. Une distance additionnelle par rapport au minimum est nécessaire afin de laisser passer la suspension ainsi que pour éviter une trop forte usure du sabot (motif de disqualification). Cette augmentation de la garde au sol a diminué la sensibilité des F1 modernes au tangage et à la garde au sol. Ceci est dû au fait que la garde au sol actuelle s'est éloignée de la garde au sol optimale.

3.8.2 Distribution de la Pression sous l'Underbody

Maintenant que vous connaissez la géométrie de l'underbody d'une F1 moderne, vous êtes certainement arrivé à la conclusion que les conditions ainsi que la distribution de pression au droit de l'underbody sont loin d'être uniformes aussi bien dans la direction du flux que perpendiculairement à celui-ci.

Le flux d'air qui traverse l'underbody peut être divisé en quatre catégories :

- Le flux situé au-dessus du plan de référence et du sabot
- Le flux situé au-dessus du stepped plane, directement accéléré par le diffuseur central
- Le flux situé au-dessus du stepped plane, directement accéléré par les diffuseurs latéraux
- Le flux externe au stepped plane, non directement accéléré par le diffuseur central ou les diffuseurs latéraux.

La catégorie qui concerne le flux externe s'intéresse au flux situé en bas du step directement en avant des roues arrière. Bien que non directement connectée au diffuseur, cette région présente une distribution de pression pilotée par l'accélération du flux dans la région adjacente du diffuseur latéral. Comme l'accélération du flux est indirecte, l'effet de succion est faible. Le flux situé au-dessus de la carrosserie, des ailerons et des roues peut interagir avec la zone externe à l'underbody en remplissant cette zone de basse pression. Ceci induit alors une diminution de l'effet de succion dans la région (cette effet se retrouve au bout des ailes d'un avion).

Les plus hautes vitesses de flux dans l'underbody sont obtenues dans la partie centrale du diffuseur car ce dernier, grâce à sa longueur, restitue les plus fortes pressions. La partie basse de l'aileron arrière va



accroître de manière significative la vitesse du flux à travers l'underbody (effet similaire aux flaps sur une aile d'avion).

Les diffuseurs latéraux restituent de plus basses pressions à cause de leurs plus faibles longueurs par rapport au diffuseur central. Les diffuseurs latéraux ne sont pas dessinés à la largeur maximale autorisée par le règlement à cause de l'effet néfaste de rotation des roues arrière qui nuit à la performance du diffuseur. Les diffuseurs latéraux sont équipés d'ailettes horizontales afin de minimiser l'effet de rotation des roues. Ces ailettes sont souvent équipées d'ailettes verticales supplémentaires afin d'empêcher les flux externes de pénétrer dans les diffuseurs latéraux.

Les diffuseurs latéraux et le diffuseur central que l'on peut voir sur la Ferrari F2004 (dessin ci-dessous) ont un design très incurvé afin d'augmenter le mélange du flux non visqueux et de la couche limite.



Figure 3-22 : Vue arrière de la Ferrari F2004 illustrant la conception très complexe du diffuseur

3.8.3 Configuration du Flux dans l'Underbody

Vous savez maintenant que l'underbody est conçu afin de faire face aux différentes configurations d'angle de tangage, de garde au sol, d'angles de lacet ainsi que des différentes configurations de l'aileron avant. Si une modification d'un de ces paramètres produit une soudaine baisse ou augmentation de l'appui aérodynamique ou un soudain changement de l'équilibre aérodynamique, le design doit être complètement réévalué. Lorsqu'une configuration provoque de grandes variations aérodynamiques, dépassant la plage normale d'exploitation pour chacun de ces facteurs, le design est considéré comme non pilotage. En effet, la monoplace doit avoir un comportement aérodynamique constant afin que le pilote se sente en confiance. Augmenter la rigidité des suspensions peut aider à limiter le tangage et la variation de la garde au sol. Cependant ce choix aura pour conséquence de rendre la monoplace moins pilotable sur les vibreurs ainsi que l'augmentation de l'usure des pneus. Il faudra au pilote trouver le compromis idéal en fonction de chaque



circuit.

La qualité du flux d'air entrant dans l'underbody à une importance vitale. L'underbody est une partie fondamentale d'une F1 et son niveau de performance dépend de pleins d'autres éléments qui composent la monoplace. Il devra fonctionner aussi bien sur toute la plage d'utilisation de la garde au sol avant et arrière qu'avec les différentes configurations d'ailerons avant. L'effet de la partie avant sur le fonctionnement de l'underbody est illustré sur la **Figure 3-17**. Le flux entrant sera alors turbulent, l'intensité et l'amplitude de la turbulence dépendant du design et du réglage des éléments amonts.



4 La Soufflerie

La soufflerie est un outil très utilisé par les aérodynamiciens de la Formule 1 moderne. L'aérodynamique a aujourd'hui pris une part considérable dans les performances des voitures. Mais le problème qui se pose est d'être en mesure d'évaluer et d'optimiser une configuration complète de monoplace ou encore un simple élément aérodynamique le plus rapidement possible. Ces installations sont de véritables bâtiments à elles seules.



Figure 4-1 : La soufflerie Ferrari à Maranello



4.1 Le Principe

Globalement, cela peut être assimilé à un énorme ventilateur enfermé dans un tunnel en boucle. D'ailleurs, les anglo-saxons nomment cet outil un "wind tunnel". L'élément à caractériser (voiture, élément aérodynamique ou simple maquette) est placé à l'intérieur de ce tunnel et est équipé de capteurs de pression, température, et autres appareils de mesure.

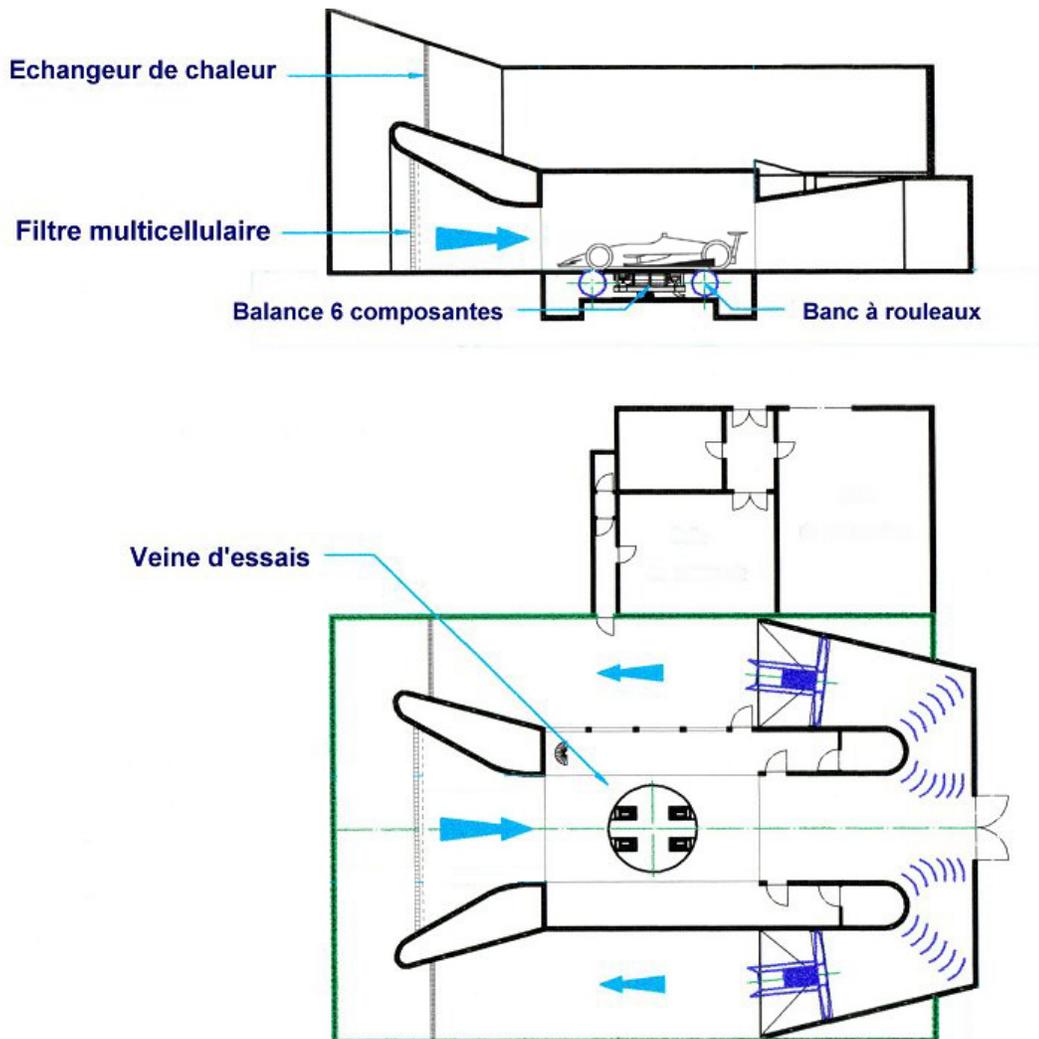


Figure 4-2 : Principe d'une soufflerie

Le circuit des souffleries subsoniques modernes ($Mach < 0.8$) comprend les éléments suivants, disposés successivement de l'amont vers l'aval :

- **Le collecteur** : Partie convergente dans laquelle l'écoulement est progressivement accéléré à partir



d'une vitesse faible jusqu'à la valeur recherchée en veine; ce collecteur est précédé de grillages et de filtres antiturbulents pour améliorer la qualité de l'écoulement

- **La veine d'essai** où est placée la maquette à l'étude
- **Le diffuseur divergent** où l'écoulement se recomprime tout en se ralentissant ;
- **Le ou les ventilateurs** qui compensent les pertes de charge subies par l'écoulement dans l'ensemble du circuit ;
- **Une canalisation de retour** et des **aubes directrices** qui équipent les coudes du circuit fermé ;
- **Un réfrigérant** servant à évacuer toute la puissance fournie par le ventilateur et permettant la régulation de la température de l'écoulement.

Cette disposition en circuit fermé, favorable au rendement énergétique de l'ensemble de l'installation, autorise par ailleurs le contrôle de la pression et du degré hygrométrique de l'air.

L'élément étudié est placé sur un plancher permettant la mesure de masse (ou poids) relative à la charge aérodynamique développée sur le modèle. Il est également fixé par des bras permettant de mesurer les efforts de traînée par exemple. Divers instruments de mesure et de caractérisation sont mis en place. On trouve des capteurs de pression et de température qui permettent de renseigner les ingénieurs sur les vitesses d'écoulement d'air. Les procédés de visualisation permettent, par l'observation directe de l'écoulement sur la maquette elle-même ou dans son voisinage, d'expliquer des phénomènes révélés par les mesures, notamment les décollements et la présence de tourbillons. La méthode la plus utilisée est celle consistant à visualiser les lignes de courant par des filets de fumée émis à l'amont de la maquette.

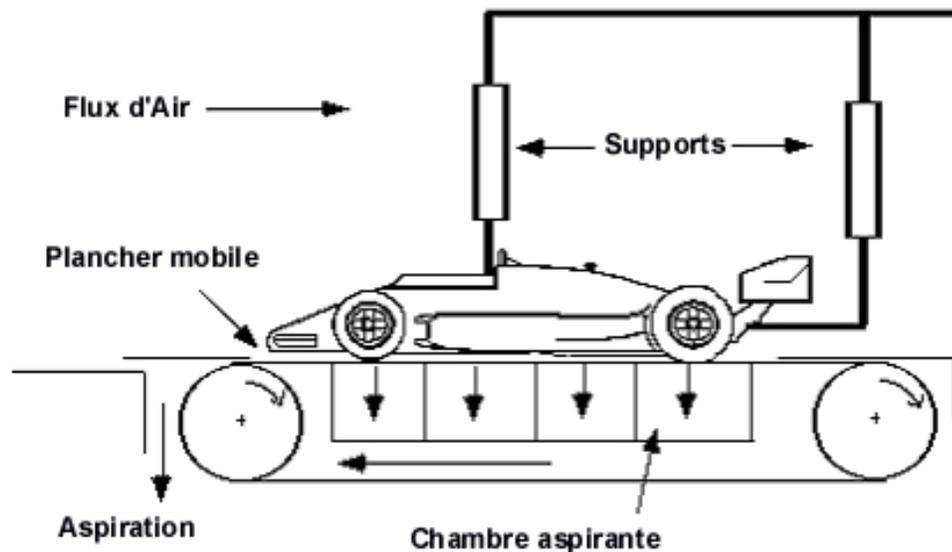


Figure 4-3 : Le plancher mobile

Les souffleries les plus modernes sont équipées d'un plancher mobile semblable à un tapis roulant. Cela



permet d'obtenir une simulation très proche de la réalité avec notamment le mouvement des roues du véhicule testé. Ce mouvement entraînant de nombreuses perturbations dans les écoulements d'air, l'avantage du tapis roulant est donc indéniable.

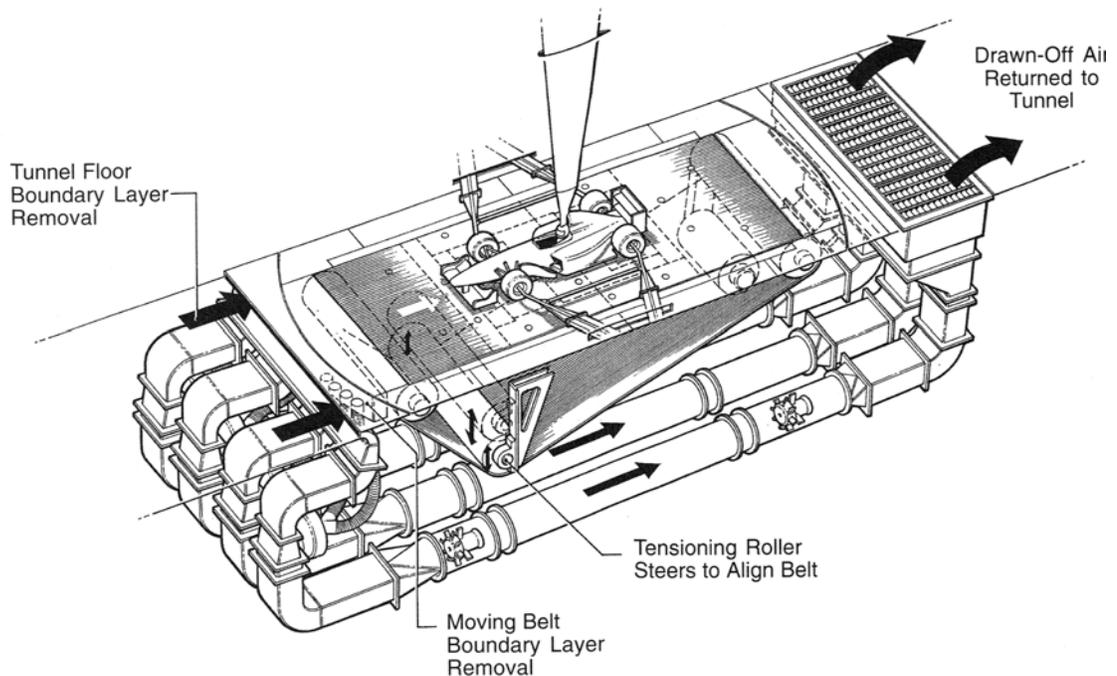
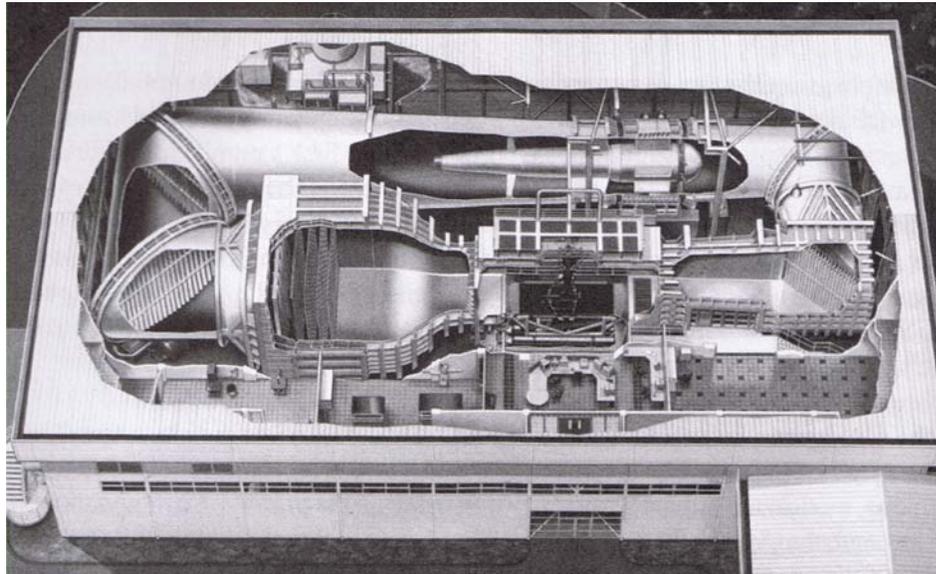


Figure 4-4 : La soufflerie Renault F1 (source : Formula 1 Technology - Peter Wright)



Les véhicules placés dans les souffleries sont des maquettes qui peuvent être à l'échelle 1/2 ou bien à l'échelle 1. Elles reprennent les moindres détails.

Les deux photos de la page suivante montrent une maquette en cours de test. On peut voir sur la photo du bas le flux d'air qui apparaît par projection d'un brouillard blanchâtre. Sur la photo du bas, vous pouvez apprécier la façon parfaite dont l'air est canalisé dans la bouche d'entrée du moteur située au dessus de la tête du pilote.

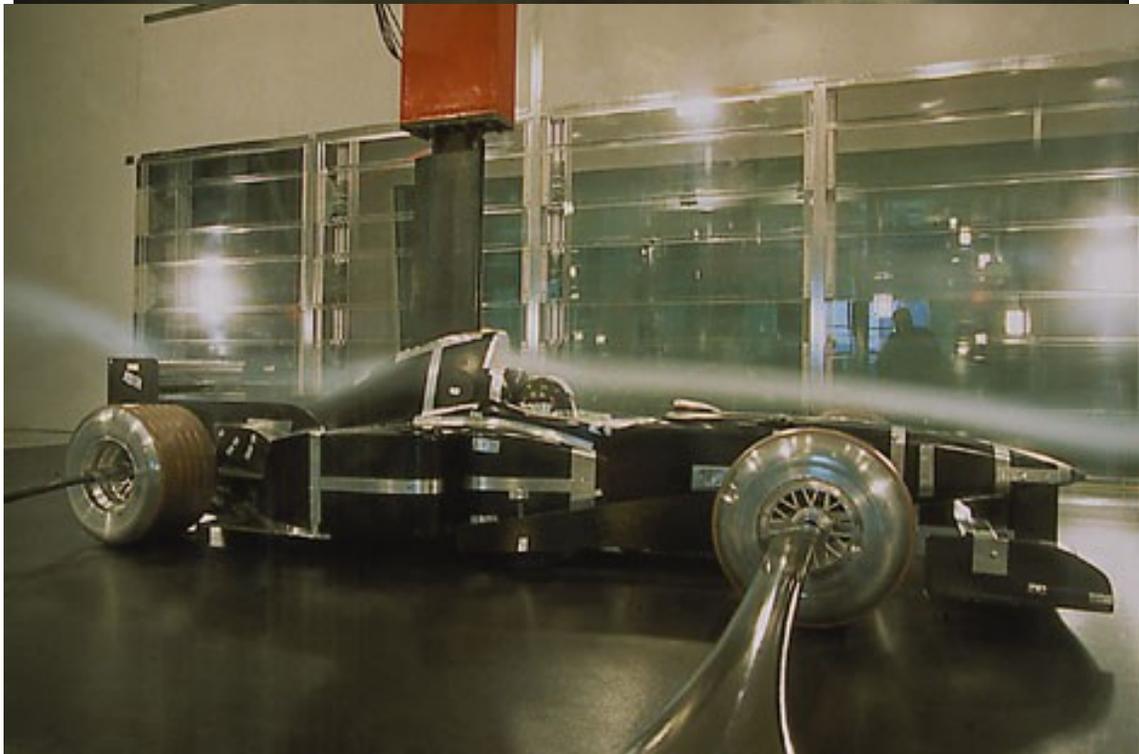
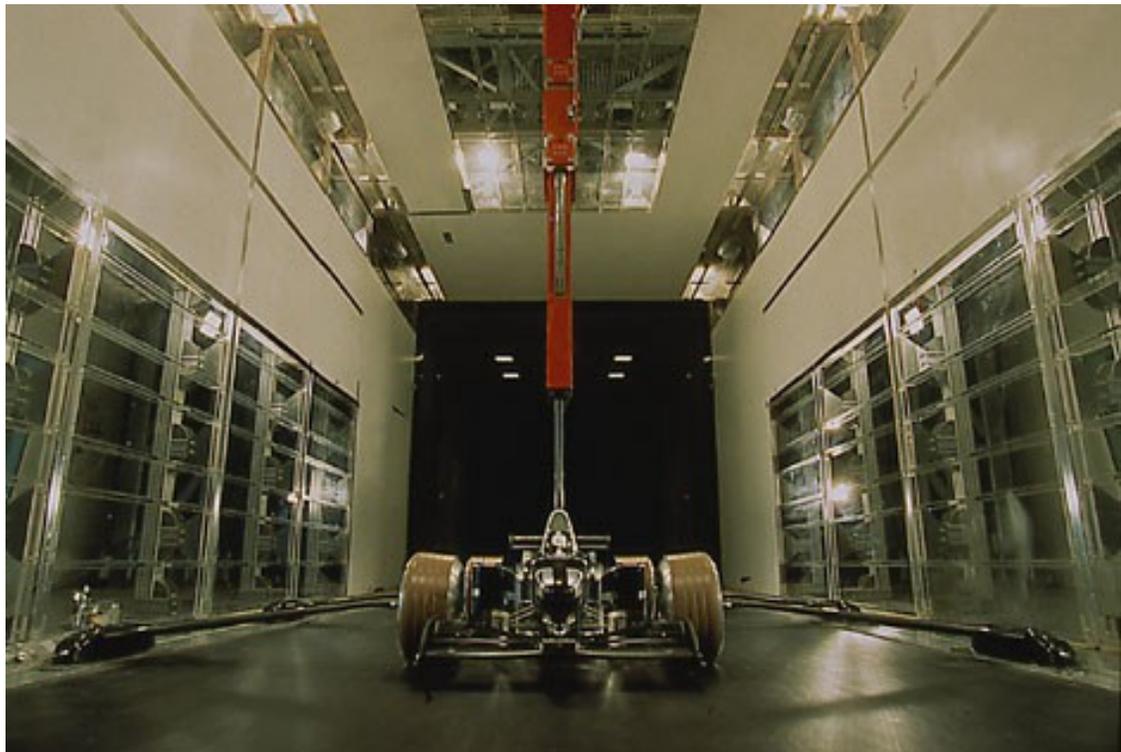


Figure 4-5 : Test réel en soufflerie



Les maquettes sont construites avec de nombreux éléments qui permettent aux ingénieurs de tester des modifications mineures à moindres frais. Ainsi, il est possible de modifier légèrement une entrée de ponton latéral sans avoir à mouler une carrosserie entière.

La philosophie d'utilisation actuelle des souffleries aérodynamiques est telle que, schématiquement, on tend de plus en plus vers deux types d'essais. Le premier type rassemble les essais de synthèse sur des maquettes de grande taille et dont la géométrie est très proche de la configuration finale (résultat de l'expérience des bureaux d'études et des calculs numériques) allant jusqu'à intégrer les moindres détails des systèmes aérodynamiques ou de la motorisation. Ces essais sont en général effectués dans les grandes souffleries. Le second type d'essais, de nature fondamentale, a pour objectif principal de constituer des banques de données extrêmement détaillées des grandeurs caractérisant le champ aérodynamique relatif à des configurations bien identifiées. Il s'agit cette fois d'élaborer ou de contrôler les différents modèles théoriques nécessaires à la réalisation des calculs numériques. Les souffleries de laboratoire, dont les dimensions sont le plus souvent modestes, conviennent très bien à ce type d'expérience. Il faut comprendre que le second type d'essais a pour vocation de servir à la calibration des modèles mathématiques ainsi qu'à leur validation. En effet, une fois cette tâche effectuée pour un certain nombre de configurations de bases, la simulation numérique remplace la soufflerie afin d'étudier plus en détail de nombreuses autres configurations à moindre coût, beaucoup plus rapidement et avec un degré de finesse largement supérieur à ce que la soufflerie peut fournir. Il n'en demeure pas moins que les souffleries sont aujourd'hui des outils indispensables au développement complet d'une F1, mais avec le développement exponentiel que connaît la simulation numérique (ce que l'on appelle la CFD - Voir Chapitre 5 : Simuler l'Aérodynamique d'une F1), l'aérodynamique des Formule 1 de demain sera peut-être entièrement résolu par la simulation numérique (ce phénomène de transfert des souffleries vers la CFD est déjà très avancé en aéronautique, or la F1 et l'aéronautique sont deux domaines qui suivent les mêmes évolutions depuis 1950).



Figure 4-6 : La soufflerie McLaren

Les grandeurs à mesurer dans l'expérimentation aérodynamique ne sont pas de nature fondamentalement différente de celles concernant les autres branches de la physique : forces, moments, pressions étaient effectivement mesurés dans les premières souffleries au moyen des balances, dynamomètres et manomètres. De plus les temps de réponse doivent être les plus courts possibles. L'enregistrement des mesures est à présent numérique, et les résultats des essais sont désormais traités par des ordinateurs reliés aux chaînes de mesures (conditionneurs des capteurs, amplificateurs, filtres, convertisseur analogique-numérique). Ces puissants moyens permettent un suivi en temps réel des principaux paramètres.

Finalement, les souffleries constituent l'outil indispensable à toute écurie de Formule 1. Les équipes travaillent dessus pour la conception de la monoplace. Mais elles continuent tout au long de la saison à réaliser des études qui permettent de voir apparaître sur les voitures de nouveaux éléments aérodynamiques pour les circuits spécifiques.

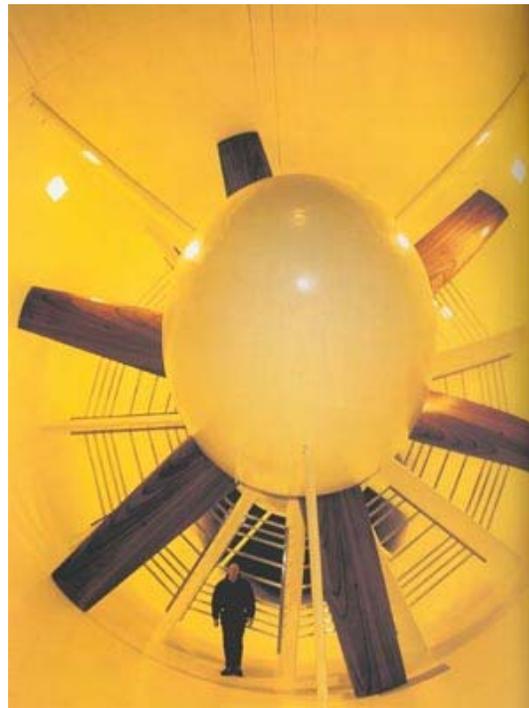


Figure 4-7 : Le fan principal



Figure 4-8 : Maquette F1 en soufflerie



4.2 Exemple de mesures dans une soufflerie hydrodynamique

Les résultats expérimentaux ainsi que les analyses présentées dans ce paragraphe sont issus d'études effectuées par le département aérodynamique de l'école SUPAERO de Toulouse ("Visualisation d'écoulement aérodynamique autour d'une Ferrari F310 par filets colorés - Photo réalisée dans le tunnel hydrodynamique de SUPAERO").

Les Pressions

Les maquettes utilisées dans les souffleries sont équipées de plusieurs dizaines de prises de pressions, ce sont des petits trous de 4/10 de mm réalisés perpendiculairement à la surface du fond plat. Un commutateur pneumatique "scanivalve" piloté par ordinateur, auquel sont connectées toutes les prises de pression va commuter une à une les prises issues du fond plat à un capteur de pression différentiel. Ce dernier délivre une tension électrique continue proportionnelle à la pression mesurée. Les mesures vont permettre de tracer la distribution des coefficients de pression C_p sous le fond plat.



Figure 4-9 : Mesure des C_p sous le fond plat

Le C_p est défini par :

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2}$$

La vitesse au point de C_p mesuré est définie par :

$$V = V_\infty \sqrt{1 - C_p}$$



Les Forces

Les coefficients aérodynamiques adimensionnés C_x , C_z , C_{mA} respectivement relatifs aux efforts de traînée, de portance et au moment de tangage exprimé au point A (axe des roues arrière) sont mesurés par une balance multi-composantes placée au dessus de la veine d'essai. Enfin, cette balance est montée sur un bâti permettant de déplacer la maquette en hauteur et en incidence. Deux balances internes « pèsent » les efforts en Z de l'aileron avant et arrière.

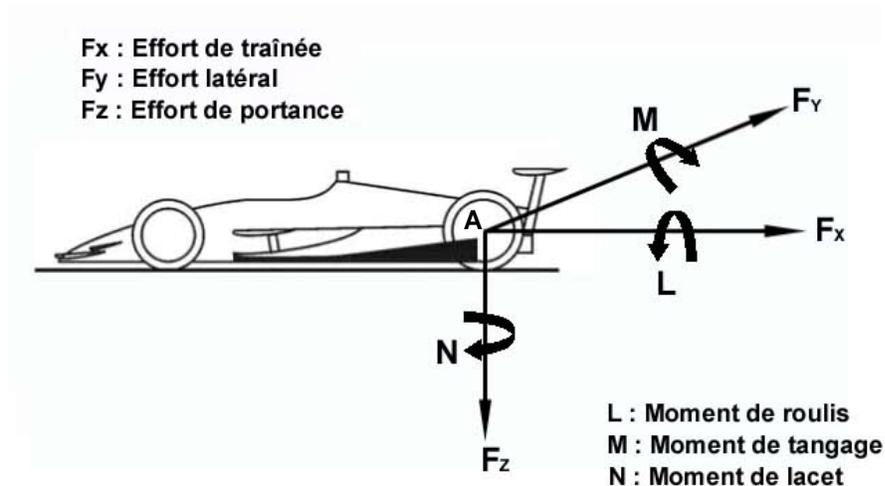


Figure 4-10 : Repère d'axes

Les coefficients d'efforts sont définis par :
$$C_{X/Z} = \frac{F_{X/Z}}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2 S_{ref}}$$

Le coefficient de moment de tangage C_{mA} au point A vaut :
$$C_{mA} = \frac{M_A}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2 S_{ref} L_{ref}}$$

Remarque : les longueurs et les surfaces de référence dépendent des dimensions de la maquette analysée. L'extrapolation aux dimensions réelles de la monoplace peut-être effectuée par le principe des similitudes.



Influence de la hauteur

Les résultats présentés à partir de maintenant sont donnés pour une maquette de soufflerie ayant une longueur de référence de 0.36 m et une surface de référence de 0.01 m². Les principes de similitudes permettent alors aux aérodynamiciens de transposer les résultats obtenus vers les dimensions réelles de la monoplace.

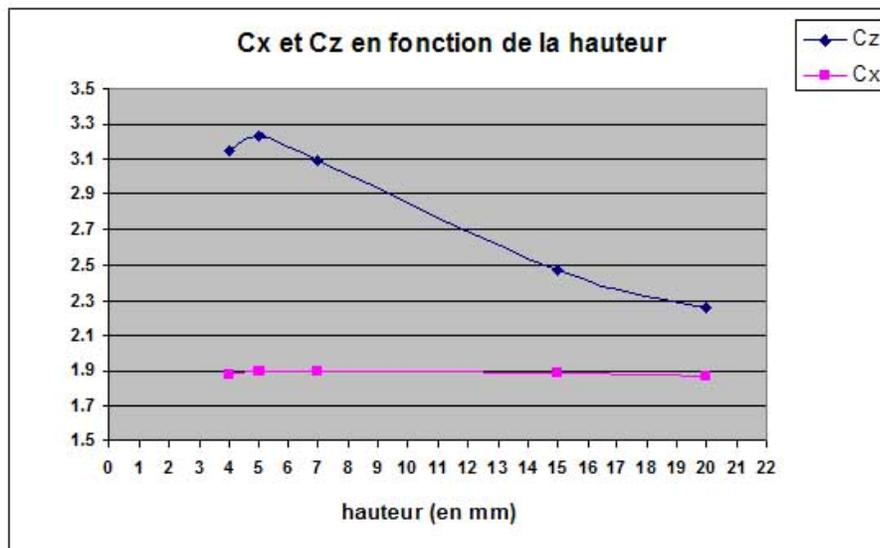


Figure 4-11 : Cx et Cz en fonction de la hauteur

Le fait de diminuer la garde au sol crée une augmentation de la déportance qui atteindra un maximum pour une altitude de 5 mm. Mais on constate une valeur de traînée constante.



Influence du tapis roulant

En soufflerie, où le véhicule est immobile et placé dans un vent de vitesse V_∞ , il est nécessaire de représenter le défilement du sol au moyen d'un tapis roulant à la même vitesse V_∞ . Lorsque le tapis est immobile, l'apparition d'effets visqueux se développant à la surface du tapis va diminuer le débit sous le fond plat, d'où l'insuffisance de l'effet de sol dans la simulation.

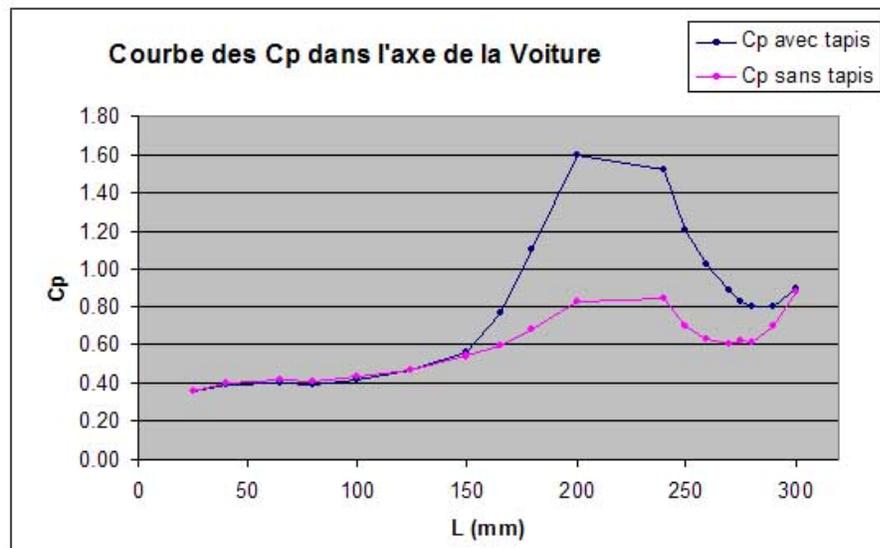


Figure 4-12 : Cp dans l'axe avec ou sans tapis roulant

L'utilisation d'un peigne constitué de plusieurs capillaires, placé parallèlement à l'écoulement sous le fond plat et à une abscisse $x=200$ mm dans notre analyse, mesure la pression d'arrêt P_{ix} en différentes hauteurs. La pression statique supposée indépendante de la hauteur est mesurée à la même abscisse x sur le fond plat. La vitesse locale est alors obtenue par :

$$P_{ix} - P_x = \frac{1}{2} \rho V_x^2$$

$$\frac{V_x}{V_\infty} = \sqrt{\frac{P_{ix} - P_x}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2}}$$

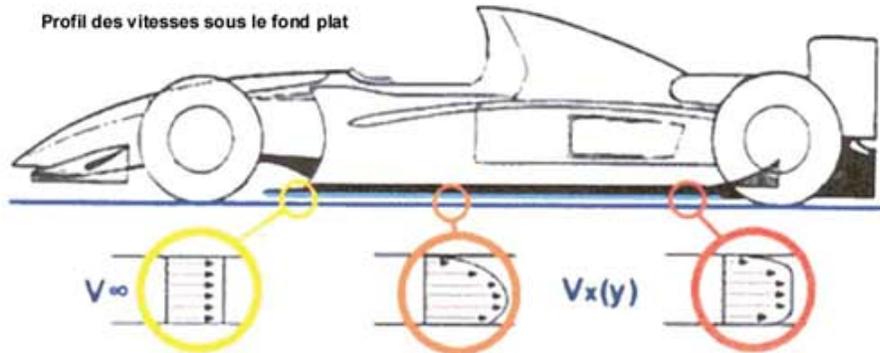


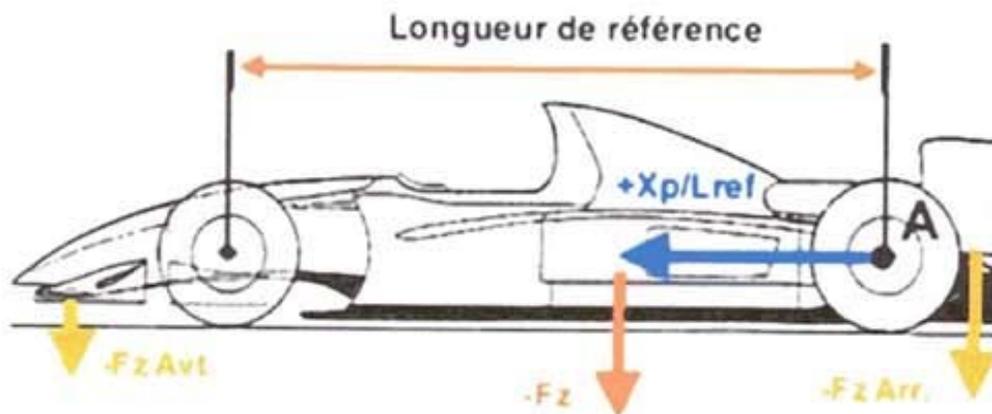
Figure 4-13 : Profil des vitesses sous le fond plat

Influence des ailerons

L'apport de déportance générée par les ailerons avant et arrière va créer, comme nous l'avons vu plus haut, une force supplémentaire dirigée vers le bas, dans le but d'améliorer la tenue de route. L'interaction de ces appendices aérodynamiques est un compromis difficile à mettre en oeuvre par les pilotes, car l'équilibre de la voiture en dépend. La résultante des forces de déportance va s'appliquer dans l'axe longitudinal de la voiture. Son point d'application, appelé centre de poussée X_p , va se situer en avant ou en arrière du centre de gravité de la voiture, en fonction des impératifs de réglage propre aux conditions d'adhérence de la piste.

Le centre de poussée est défini par :
$$\frac{X_p}{L_{ref}} = \frac{C_{mA}}{C_z}$$

Dans notre analyse, $L_{ref} = 0.36$ m. C_{mA} est le moment de tangage au point A. Le centre de poussée $X_p > 0$ dirigé vers l'avant.





Après avoir enlevé les deux ailerons avant et arrière, on constate une diminution importante de la traînée C_x (le C_x passe de 1.90 avec ailerons à 1.16 sans ailerons dans notre analyse) et de la déportance C_z (le C_z passe de -3.23 avec ailerons à -1.22 sans ailerons). Afin d'améliorer l'adhérence des pneumatiques à la piste, l'utilisation des ailerons est un moyen efficace puisque le coefficient C_z est 2.5 fois plus important. L'augmentation de traînée qui en découle est pénalisante pour la vitesse de pointe. En effet, la force de résistance à l'avancement de la voiture est principalement la traînée aérodynamique, elle est vaincue par la puissance que peut fournir le moteur.

La relation de la puissance moteur est :

$$P_{\text{moteur}} = F_x \cdot V_{\infty}$$

$$P_{\text{moteur}} = \frac{1}{2} \rho \cdot S_{\text{ref}} \cdot C_x \cdot V_{\infty}^3$$

Remarque : dans ces relations la puissance est en Watt (1 cheval-vapeur = 736 Watts).

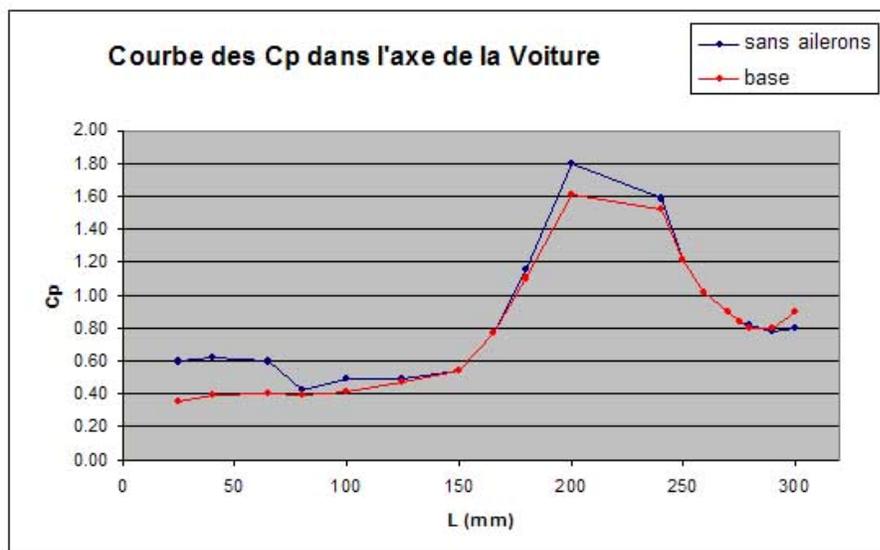


Figure 4-14 : Cp dans l'axe sans ailerons

La répartition de la pression sous le fond plat de la voiture indique des valeurs de Cp assez fortes en entrée pour atteindre au point le plus haut un maximum de vitesse. La recompression du fluide est réalisée dans la partie arrière du fond plat grâce au divergeant appelé diffuseur.

L'absence de l'aileron avant fait reculer le centre de poussée et le place légèrement en amont des roues arrière. La résultante des forces de déportance va favoriser l'adhérence du train arrière donc la motricité, au détriment de la directivité. La présence de l'aileron avant perturbe l'écoulement à son aval. Lorsqu'il est enlevé, il en résulte une augmentation de la distribution de pression à l'entrée du fond plat. L'absence de



l'aileron arrière provoque une baisse importante de C_z (-3.23 à -1.71) et C_x (de 1.90 à 1.32). L'avancement du centre de poussée va faciliter la directivité, mais la puissance du moteur sera difficilement transmise au sol. Par ailleurs, sans aileron arrière les C_p au niveau du diffuseur sont plus faibles. Malgré sa position élevée, la présence de l'aileron arrière augmente la vitesse de l'écoulement sous le fond plat.

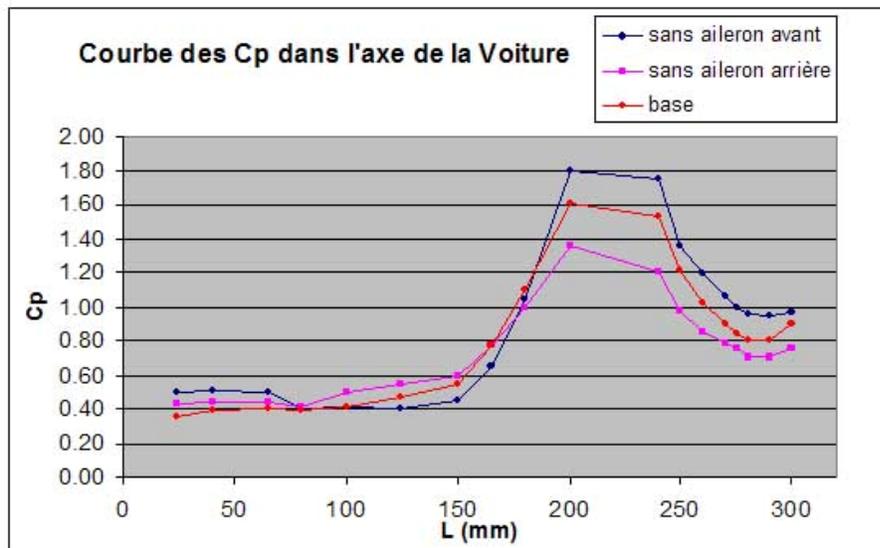


Figure 4-15 : C_p dans l'axe avec ou sans ailerons



5 Simuler l'Aérodynamique d'une F1

La simulation par ordinateur de l'écoulement des fluides autour d'une F1 (plus communément appelée par l'acronyme anglais CFD pour Computational Fluid Dynamics) améliore les capacités d'innovation des constructeurs car elle leur permet de tester beaucoup plus de configurations qu'auparavant au cours du cycle de développement.

5.1 *Les Etapes de la Simulation Numérique*

Depuis toujours, plus que toute autre industrie, la Formule 1 vit au rythme de révolutions technologiques. La CFD est une de ces technologies et elle date du début des années 90 lorsque la compagnie américaine FLUENT s'est alliée avec les écuries de F1 afin de leur offrir un outil ultra performant afin de simuler les complexes phénomènes aérodynamiques qui se produisent autour des monoplaces de F1. Depuis, l'outil a fait un tel bon en avant que les spécialistes de la discipline n'hésitent pas à le qualifier de « soufflerie dans un ordinateur ».

Cet outil mérite une description plus avancée car ses implications ont eu une importance encore plus grande à partir de 1995 lorsque la FIA a imposé son nouveau règlement destiné à diminuer les performances aérodynamiques des F1.

En effet, les récentes régulations techniques ont précipitées les écuries de F1 dans la course à la génération d'appui aérodynamique tout en minimisant le plus possible les effets destructeurs de la traînée par tous les moyens légaux. Dans ces circonstances, l'augmentation de l'utilisation de logiciels de CFD est devenu le point focal des recherches. La CFD a alors transformé les capacités des constructeurs dans le domaine de la recherche et développement en aérodynamique. Cet outil accroît cette capacité car il permet aux designers de tester un nombre incommensurable de configurations au cours du cycle de conception.

Afin de vous faire une idée de l'impact de la CFD, imaginez que vous avez la possibilité de mettre en œuvre un concept aérodynamique le plus évolué qui soit au travers un processus de test sans jamais avoir besoin de le construire en réalité. En terme de gain de temps (et d'argent...) les bénéfices sont tout simplement énormes !

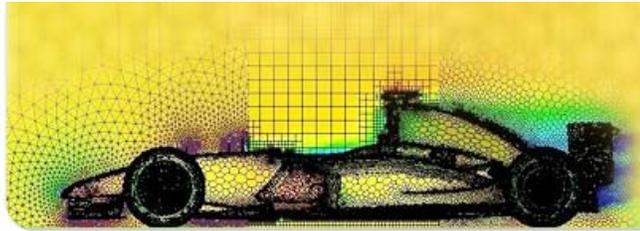
Depuis le concept jusqu'à l'analyse, avec la CFD, les étapes requises sont le design, le problème de la définition et de la simulation puis l'analyse des résultats. La voie traditionnelle qui est plutôt expérimentale, requière du temps de fabrication des composants ou bien de la maquette, l'installation puis la phase de test en soufflerie.

La CFD est une branche de la mécanique des fluides qui s'appuie sur une base mathématique très complexe. Ceci est dû au fait que les lois de la physique qui gouvernent les fluides peuvent être décrites par des équations mathématiques rigoureuses qui dans le cas de la CFD sont des équations dites différentielles.

Les familles d'équations différentielles qui décrivent la CFD et que les aérodynamiciens doivent résoudre sont au nombre de quatre : les équations de Navier-Stokes, l'équation de continuité, l'équation énergétique



et un modèle de turbulence. L'équation de continuité n'est pas directement résolue, elle est utilisée uniquement comme une condition limite afin de contraindre la solution. L'équation de Navier-Stokes quand à elle, a été (et est encore d'ailleurs) à l'origine de beaucoup de soucis pour la communauté de la dynamique des fluides à cause de la difficulté à trouver des solutions pour différents types de flux. L'addition du modèle de turbulences et de l'équation énergétique n'a pas amélioré la situation et ceci est d'ailleurs une des raisons pour lesquelles la communauté de la CFD est aussi petite.



Fluent est le leader mondial en CFD, logiciels et services. Les logiciels de Fluent sont utilisés pour la simulation, visualisation et l'analyse des fluides, transferts de masse et de chaleur et les réactions chimiques. C'est un domaine vital pour l'Ingénierie Assistée par Ordinateur (CAE - Computer Aided Engineering) pour de nombreuses sociétés dans le monde et dans tous les domaines industriels. FLUENT est très utilisé dans l'industrie mondiale de la Compétition Automobile par une grande majorité des écuries. Il aide les ingénieurs Recherche, Conception et Procédés, à construire des prototypes virtuels, simuler les performances de leurs modèles, en améliorant la qualité, réduisant ainsi coûts et mise en marché. Le siège du groupe Fluent est situé à Lebanon, New Hampshire, USA, et compte des filiales en Belgique, Angleterre, France, Allemagne, Inde, Italie, Japon et Suède. Ses logiciels sont aussi vendus à travers le monde grâce à des joint-ventures, des partenariats et des distributeurs en Corée, Australie, Brésil, Chine, Taïwan, République Tchèque, Moyen Orient et dans la plupart des pays européens. Parmi les produits phares de la compagnie Fluent on trouve les codes de CFD FLUENT, RAMPANT et NEKTON.

« La Formule 1 établit de nouveaux standards de nombreuses manières et Fluent est toujours désireux de travailler à la pointe de l'innovation technologique » dit Udo Weinmann, Directeur Général de Fluent Deutschland. *« Notre coopération avec les principales équipes de Formule 1 est d'une importance capitale pour le développement de nos logiciels et nous découvrons invariablement des applications CFD dont d'autres industries vont pouvoir bénéficier grâce aux progrès technologiques découlant de la Formule 1. Ceci a un impact direct sur les logiciels de CFD que nous fournissons à d'autres industries allant de la chimie et procédés chimiques, à l'énergie, l'environnement, l'aérospatiale et la climatisation en passant par les matériaux et même le domaine médical »* ajoute-t-il.

L'implémentation de la CFD dans le processus de conception débute par la phase de CAD (Computed Aided Design - Conception Assistée par Ordinateur) au cours de laquelle la géométrie est modélisée et est maillée.

La construction de maillages bien adaptés est un élément de plus en plus important pour la précision et l'efficacité du traitement numérique de problèmes complexes. Il est nécessaire de rechercher un compromis entre finesse de maillage, c'est-à-dire précision, et coût de calcul. Ce compromis sera d'autant



réussi que le maillage sera bien adapté aux caractéristiques de l'écoulement. Le maillage est un artefact numérique qui consiste à discrétiser l'entité à étudier en un nombre fini d'éléments (d'où le nom de théorie des éléments finis) sur lesquels on va appliquer les lois de comportement du phénomène à étudier. Les caractéristiques mathématiques de chaque élément (ce que l'on appelle la topologie) seront choisies par l'ingénieur en fonction du comportement du dit élément dans les conditions réelles du phénomène à simuler. Il en résultera des résolutions matricielles à très fortes dimensions que seuls des ordinateurs puissants pourront résoudre. En règle générale, plus le maillage sera choisi fin et plus les résultats seront précis mais attention il en résultera des tailles de matrices importantes et donc des temps de calcul plus long. Cependant, l'avantage de l'outil de simulation est de pouvoir tester virtuellement quasiment toutes les conditions dans lesquelles une Formule 1 aura à évoluer sans jamais avoir construit une seule machine. Tout n'est question que de puissance de calcul. On comprend alors pourquoi les écuries de F1 font parties des sociétés les mieux équipées au monde en ce concerne les ordinateurs dédiés au calcul scientifique.

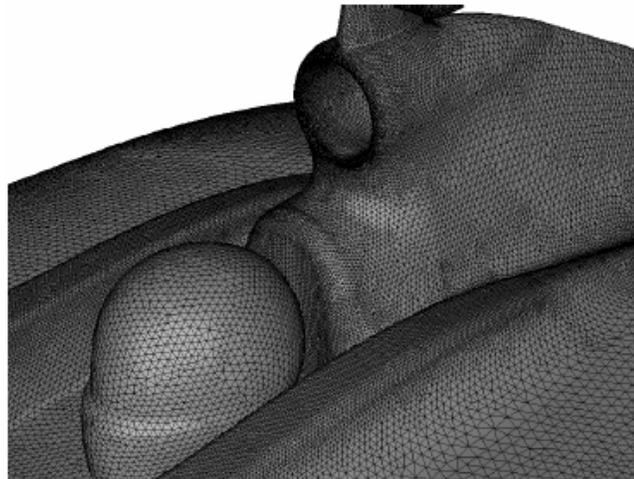


Figure 5-1 : Maillage d'une surface dans la zone du cockpit

L'étape suivante consiste à imposer les conditions du flux au modèle à l'aide du pré-processeur RAMPANT. Ces conditions sont définies en fonction de paramètres telles que la densité, la viscosité et les conditions limites (parois, surfaces fines, pression aux frontières et autres).

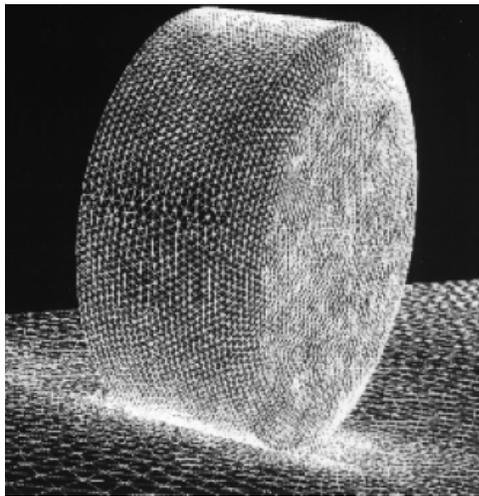


Figure 5-2 : Maillage de l'interface entre une roue avant et le sol

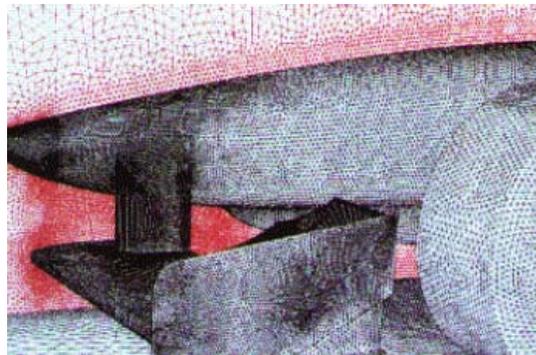


Figure 5-3 : L'avant d'une F1 modélisé par un maillage composé de 250 000 éléments

Les applications typiques mises en oeuvre par les aérodynamiciens sont très variées : analyse d'un ensemble d'aileron arrière, analyse du système de refroidissement, simulation d'une section avant et même dans certains cas l'étude de l'écoulement autour d'une F1 complète.

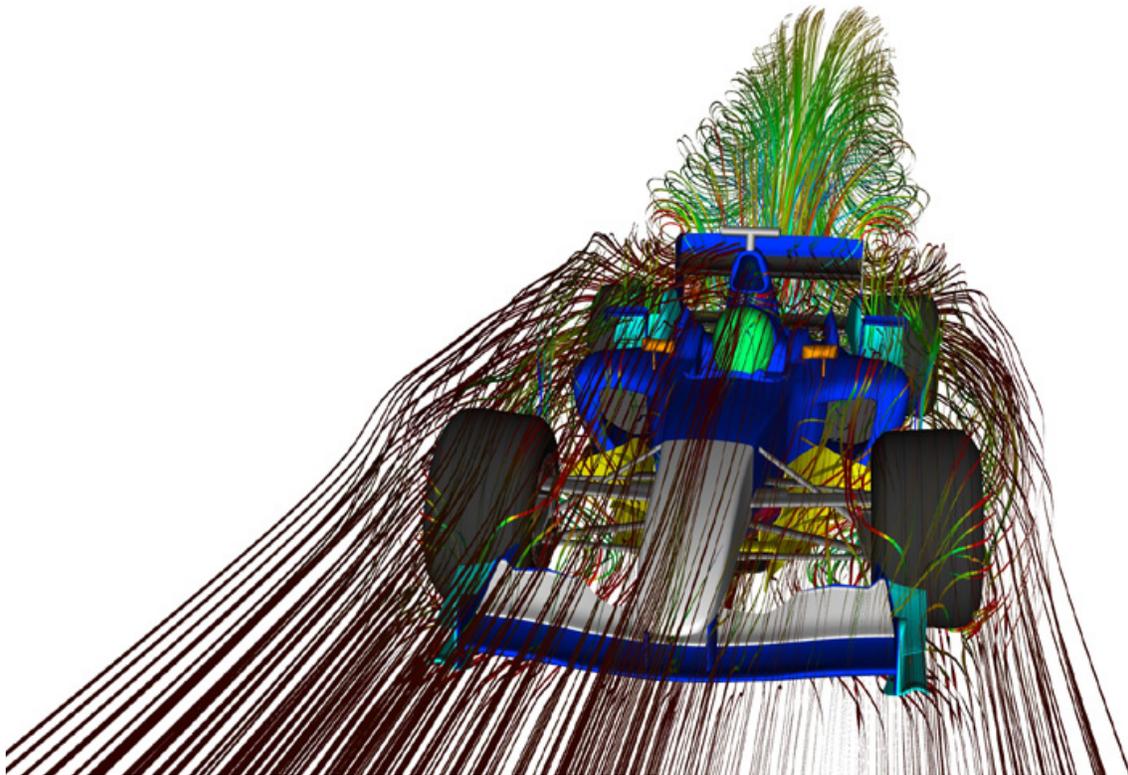


Figure 5-4 : Simulation du flux autour d'un modèle numérique complet de F1

Dans le cas de la simulation d'un écoulement tel que sur la *Figure 5-4*, le résolution numérique peut prendre plusieurs jours (voir même plusieurs semaines dans certains cas), en fonction d degré de complexité du problème et du nombre de degrés de libertés du modèle.

Ainsi, ne fois que le modèle géométrique de l'élément que l'on souhaite soumettre à la simulation est prêt, il faut le discrétiser. La discrétisation est ce que l'on appelle le maillage, c'est-à-dire que la surface du modèle est divisée en petits éléments qui s'interconnectent en des nœuds. La densité de ces nœuds doit être augmentée aux endroits de la surface où les gradients du fluide sont importants ainsi que dans les zones telles que les coins et les rayons de raccordement, mais aussi aux endroits de la surface du modèle où l'aérodynamicien souhaite obtenir des résultats plus précis. Ainsi, les géométries complexes que sont les éléments aérodynamiques d'une F1, demandent de longues journées de maillage aux ingénieurs car la qualité de ce dernier va très fortement influencer la réponse que fournira le modèle mathématique.

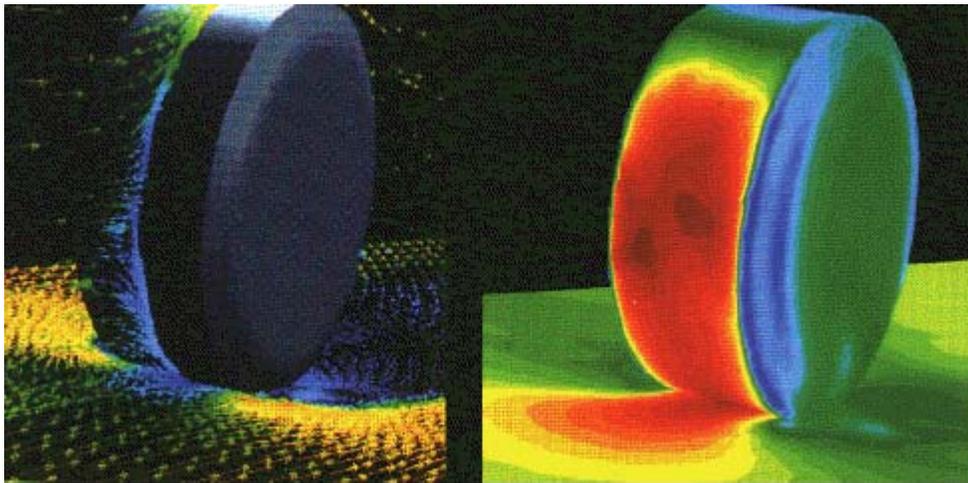


Figure 5-5 : modèle de roue avant : vecteurs vitesse et distribution de pression

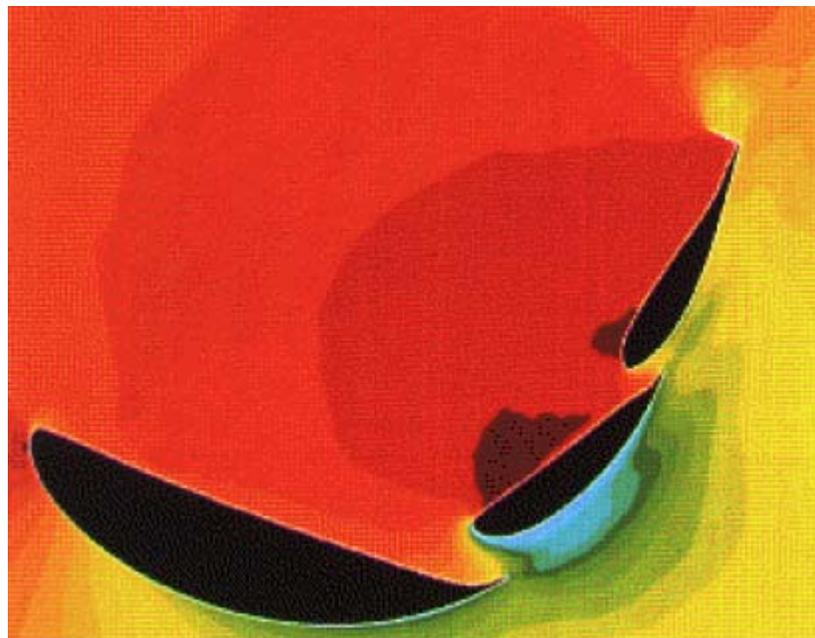


Figure 5-6 : Distribution de pression autour d'un élément supérieur d'aileron arrière

Ainsi, en utilisant des concepts mathématiques complexes, la CFD discrétise les équations de comportement - Navier-Stokes, Equations énergétique et de continuité - et implémente le modèle de turbulence qui est sans doute la partie la plus importante du calcul.

Une compréhension totale du problème est indispensable et la CFD réclame l'utilisation de ressources humaines très hautement qualifiées. En effet, si une écurie de F1 n'a pas à sa disposition des personnes qui comprennent très en détails les concepts que la CFD cherche à simuler alors le travail en soufflerie qui en découlera ne servira à rien. Une mauvaise utilisation de la CFD peut en effet avoir sur le développement



d'une F1 des effets aussi néfaste que de ne pas l'utiliser.

Lorsque la simulation est terminée, les résultats peuvent être visualisés avec un post-processeur tel que RAMPANT qui est capable d'assister l'aérodynamicien dans son analyse des flux de plusieurs façons. Cette aide à l'analyse comprend la visualisation de vecteurs vitesse et de lignes de flux sous forme de courbe ou de contours, l'affichage d'iso-surfaces et de graphes x-y.

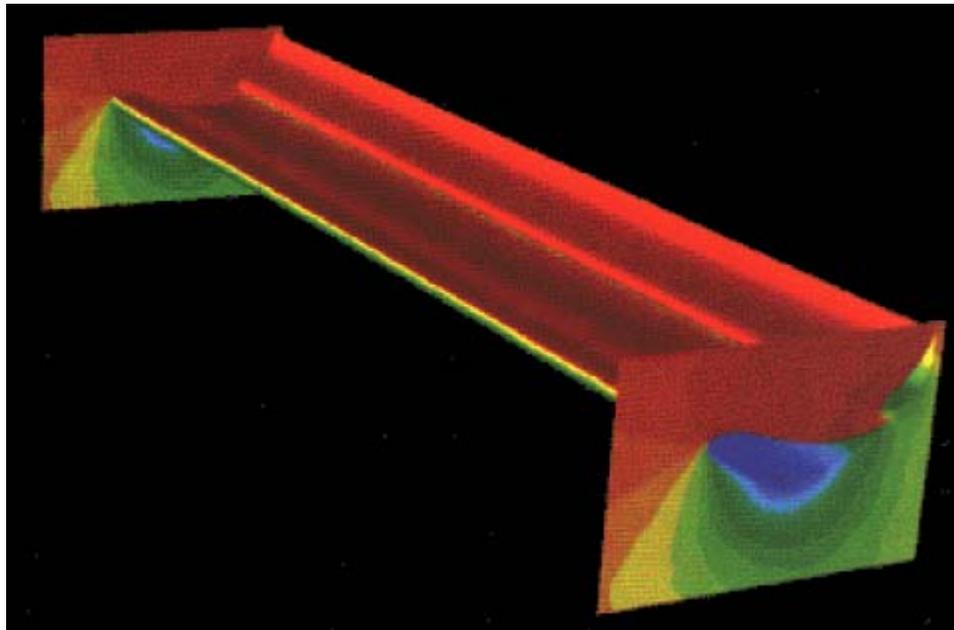


Figure 5-7 : Distribution de pression autour d'un élément d'aileron arrière

Les *Figure 5-5* à *Figure 5-8* montrent des résultats d'analyse visualisées avec un post-processeur tel que RAMPANT (pour des raisons de secret industriel les résultats significatifs et les spectres ont été supprimés).

Tous les résultats peuvent être visualisés sur des composants isolés car le maillage est conçu de telle manière que le logiciel peut faire la différence entre ces différents composants.

A l'issue de cette phase, les aérodynamiciens vont corréliser la simulation numérique avec des tests en soufflerie sur une maquette de F1. Une fois que la simulation aura été validée par les tests en soufflerie pour un certain nombre de configurations sensibles, le modèle mathématique pourra être utilisé à la place de la soufflerie afin de tester toutes les configurations que les aérodynamiciens inventeront.

5.2 Les équations qui gouvernent la CFD

Les équations majeures pour la résolution de la simulation de Navier-Stokes par la CFD sont les équations de Navier-Stokes elles-mêmes, l'équation de continuité et d'énergie ainsi qu'un modèle de turbulence. Les équations de Navier-Stokes décrivent la conservation de la vitesse linéaire, en trois dimensions. L'équation



de continuité nous enseigne essentiellement que la masse du flux contenu dans un volume spécifique doit être égale à la masse du flux situé à l'extérieur de ce volume. Ce principe permet d'être certain que le code ne crée pas un fluide virtuel à un endroit où il ne peut pas en avoir. L'équation d'énergie est utilisée afin de ne créer ni de détruire d'énergie dans le fluide en vertu du Troisième Principe de la Thermodynamique. En plus de ces trois importantes équations, il y en a trois autres que le post-processeur doit résoudre afin que le fluide soit complètement décrit. Ce sont : le tenseur des contraintes, l'équation d'état et l'équation constitutive.

Le rôle du tenseur de contrainte est de relier les contraintes au taux de cisaillement dans le flux. L'équation d'état sert à relier la densité du fluide à sa température et sa pression. Finalement, l'équation constitutive relie la chaleur à la température et à la pression.

Afin de résoudre ces équations, le post-processeur doit résoudre une représentation de chacune de ces équations pour chaque élément fini du maillage. Il résout les équations afin que celles-ci soient adaptées à l'analyse des fluides compressibles. Dans le monde de la dynamique des fluides, un flux compressible d'air est généralement considéré lorsque les vitesses atteignent au moins 30% de la vitesse du son ($Mach=0.3$ ou plus). $M=1$ est la vitesse du son qui au niveau de la mer et généralement considéré à 340 m/s (1224 km/h). En dessous de $M=0.3$, l'air est considéré comme incompressible, c'est-à-dire que sa densité n'est pas affectée par un changement de pression. Il y a sur une F1 des zones où la pression change et certaines de ces zones ont un nombre de Mach supérieur ou égal à 0.3.

Comme si ce matériel mathématique ne suffisait pas, il faut également considérer le modèle de turbulence. Ce dernier existe tout simplement parce que de nos jours la communauté scientifique est incapable de résoudre l'équation de Navier-Stokes directement en un temps raisonnable. En effet, une solution directe nécessiterait de rediscrétiser le domaine du flux de manière encore plus dense qu'au début du calcul. Maintenant, gardez en tête que l'ordre de grandeur de la taille d'une turbulence peut aller d'une taille microscopique à plusieurs mètres. Alors, imaginez le cauchemar que requière le remaillage (ainsi que le temps nécessaire) d'un composant autour duquel se produisent des phénomènes dont la taille varie de l'échelle microscopique à une échelle plus humaine. La densité de maillage pour un simple élément d'aileron arrière pourrait par exemple augmenter d'un facteur dix. Cependant, pour le moment, il n'y a aucun ordinateur assez puissant pour faire le calcul en un temps raisonnable.

Au travers ces théories physiques et mathématiques complexes, le modèle de turbulence fournit au post-processeur un point de départ pour plusieurs paramètres tels que la vitesse, la viscosité, le taux de dissipation des turbulences ...etc.... La base scientifique de ces modèles n'est pas entièrement calculable par ordinateur. Ils ont tous des bases qui proviennent de l'expérimentation.

Face à ce besoin en puissance de calcul, la compagnie Fluent Europe fournit aux écuries de F1 une version de son post-processeur RAMPANT qui est capable d'utiliser plusieurs processeurs afin de réaliser les simulations. Ce concept, appelé calcul parallèle, est très efficace pour résoudre les problèmes. Le réseau de stations de calcul peut aller de 10 à 30 stations de calcul dédiées.

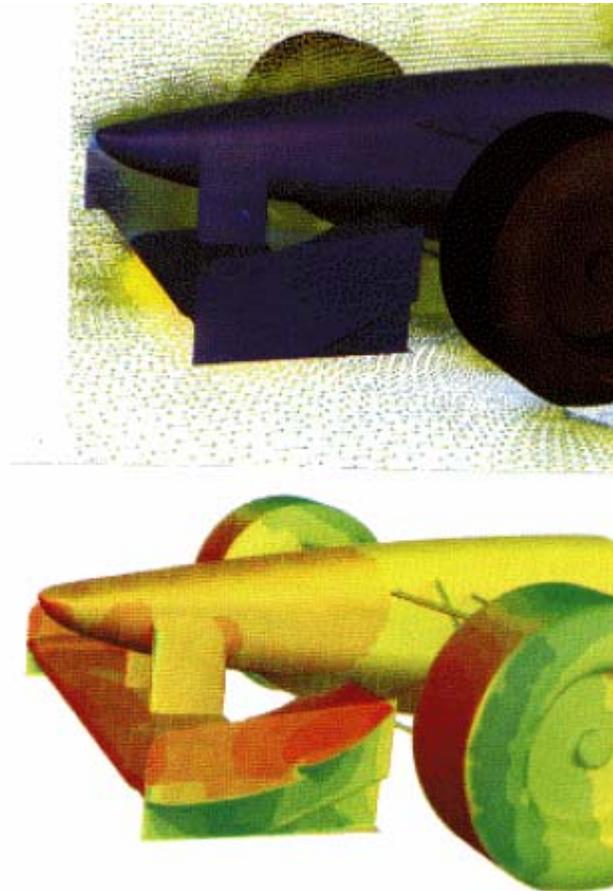


Figure 5-8 : Plot de vecteurs vitesses et des pressions statiques

L'efficacité de la résolution du calcul est mesurée en comparant le temps nécessaire à plusieurs processeurs en parallèle par rapport au temps nécessaire pour un seul processeur. Lorsque qu'un composant est parallèle au flux d'air, normalement le temps de calcul peut-être diminué en ne modélisant que la partie gauche ou la partie droite du composant.



6 L'Evolution de l'Aérodynamique des F1 de 1950 à nos Jours

La base de ce chapitre est due au splendide travail réalisé par des étudiants du département Génie Thermique et Energie de l'institut Universitaire de Technologie de la Ville d'Avray (France). Merci à eux. Je me suis néanmoins permis de modifier et d'ajouter des explications dans le texte ainsi que de nombreux changements en ce qui concerne les illustrations.

Les illustrations de ce chapitre proviennent de photos personnelles ainsi que de photos et dessins issus des sites Internet www.f1-legend.com, The Cahier Archive (www.f1-photo.com) et www.statsf1.com. Merci à leurs webmasters respectifs.

Les évolutions aérodynamiques sont explorées pour chaque décennie de 1950 à nos jours, et ce pour la partie avant, centrale et arrières des monoplaces de type F1.



6.1 Evolution de la Partie Avant

La partie avant d'une F1 comprend le museau, l'aileron avant ainsi les éléments jusqu'à l'axe des roues avant. Elle conditionne l'alimentation en flux des parties postérieures car on sait que toute la partie postérieure des monoplaces n'est pas conçue pour fonctionner en régime turbulent puisque ces dites turbulences ont des effets négatifs sur le bilan aérodynamique d'une F1. Actuellement, on estime la part de la partie avant dans la formation de déportance à 25-30%. Elle constitue également un point sensible au niveau du pilotage, puisqu'un aileron bien étudié permet d'endiguer un phénomène extrêmement néfaste appelé sous-virage, et qui caractérise une auto incapable de s'inscrire correctement en virage. Ainsi, on ne peut nier l'aspect prépondérant de cette partie.

6.1.1 Les années 50

Durant les années 1950, ni le niveau technique, ni les enjeux financiers n'étaient suffisants pour que les constructeurs s'intéressent à l'aérodynamique. Le seul but recherché était alors de concevoir les carrosseries les plus profilées possibles, les plus proches des organes mécaniques, afin de diminuer la traînée (formes ovoïdes se rapprochant de la goutte d'eau).



Figure 6-1 : Le GP d'Italie à Monza en 1953



Figure 6-2 : La Ferrari 625 de 1954 (Dessin F1-legend.com)

Ces monoplaces créaient de la portance qui tendait à éloigner la voiture de la piste. Cette portance n'était combattue que par le poids et par les capacités des pneumatiques, ce dernier domaine étant également



méconnu et sous-exploité à cette époque. Les parties non suspendues étaient aussi profilées pour une meilleure pénétration dans l'air et les freins à tambour étaient refroidis par des grilles ajourées au maximum dans leurs carters (Mercedes a apporté une innovation très intéressante sur sa W196, à savoir les freins in-boats). Bien évidemment la partie avant n'avait pour fonction que d'assurer la bonne alimentation des radiateurs même après le passage des moteurs à l'arrière (innovation apportée en 1958 par la marque Cooper).



Figure 6-3 : La Maserati A6 55G en 1953 (Photo Bernard Cahier)



Figure 6-4 : La Cooper T45 à Silverstone en 1958



6.1.2 Les années 60

Les années 1960 marquèrent un tournant en matière d'aérodynamique. Les recherches menées conjointement aux Etats-Unis par Chevrolet Researches and Development et Chapparral en soufflerie portèrent leurs fruits en Can-Am (championnat canadien et nord-américain de voitures d'endurance). Il s'en suivit une prise de conscience de l'incroyable source d'adhérence disponible en plus du poids et des pneumatiques, et ce, pour un surplus en poids très minime.



Figure 6-5 : La Lotus 21 en 1961 (Photo Bernard Cahier)



Figure 6-6 : La Lotus 43 de 1966 (Photo Bernard Cahier)



C'est ainsi qu'apparurent en 1968 sur les Lotus, toujours à la pointe de l'innovation, de simples plaques incurvées orientées vers le sol générant de cette façon une légère déportance. Le museau avait toujours pour fonction d'apporter un flux interne pour le refroidissement des divers organes mécaniques tels que les radiateurs d'eau et d'huile (plusieurs formes furent testées afin d'optimiser le refroidissement tout en limitant la création de traînée). Les freins et les suspensions étaient out-board (à l'extérieur de la coque) et donc sources de turbulences, mais déjà les tirant étaient profilés (profil ailaire). L'arrivée du principe des ailes d'avion inversées amena de tels avantages que certains ailerons furent fixés aux porte moyeux, technique autorisant des réglages de suspension tout entiers tournés vers l'efficacité et non pour contrer les forces déportantes. Cette solution garantissait une création d'appui au niveau des liaisons au sol, ainsi qu'une aérodynamique compensant les pertes de contact entre les pneumatiques et le sol.

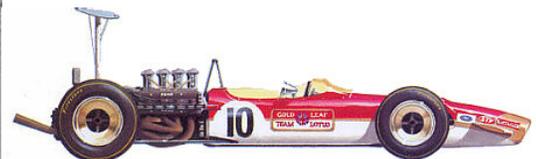


Figure 6-7 : La Lotus 49b de 1968 (Source : F1-legend.com)

Des ailerons à incidence variable furent également développés. Mais ils étaient aussi perchés très haut pour les maintenir éloignés de toutes sources perturbatrices et leur garantir une bonne alimentation en flux en toutes circonstances. Malheureusement ces expérimentations eurent pour conséquences de déconcerter les pouvoirs sportifs qui ne furent jamais en mesure de contrôler correctement cette frénésie. Il aura fallu le Grand Prix d'Espagne 1969 très mouvementé, où plusieurs voitures perdirent leurs ailerons pour qu'une législation plus sévère soit adoptée (les parties participant à la création de déportance ne devaient se trouver au delà d'une certaine hauteur, devaient être rigides et non fixés sur les masses non suspendues). Après cet épisode, les autos se virent greffer de classiques ailerons en profil d'aile d'avion inversée toujours avec les dérives latérales diminuant les turbulences. Toutefois ces appendices étaient bien loin d'offrir la complexité qui caractérise les moustaches actuelles puisque cette zone est particulièrement délicate à traiter en raison des turbulences engendrées par les roues qui sont particulièrement exposées aux hautes pressions et qui perturbent le flux en raison de leur rotation. Elles participent donc grandement à la traînée. Le but recherché étant de dévier le flux de ces zones sensibles.



Figure 6-8 : La McLaren M7 de 1968

L'illustration précédente met bien en évidence les solutions employées pour optimiser le refroidissement des parties mécaniques et thermiques disposées à l'avant. On observe des prises d'air NACA sur le côté, ainsi que deux bouches d'aération extrayant l'air chaud des radiateurs. On remarque également des suspensions peu profilées.



6.1.3 Les années 70

Après l'introduction des ailerons, les années 70 virent le développement de l'utilisation des souffleries soulignant une approche plus professionnelle que par le passé mais surtout une réelle considération de l'aérodynamique. Deux aspects furent marquants :

L'intégration totale de l'aérodynamique dans la conception comme en témoigne toute la génération de monoplaces issues de la Lotus 72, avec des formes en coin, des ailerons intégrés, des pontons abritant les radiateurs et même les prémices des autos à effet de sol avec des bavettes souples, créatrices de dépression situées en aval des roues avant.

L'autre aspect marquant fut évidemment l'apparition de l'effet de sol. La partie avant, de par les nouveaux règlements et surtout de par l'amélioration des connaissances va se voir opérer une mutation radicale. En effet, au niveau de la forme des ailerons, plusieurs nouvelles solutions (en sabot, forme elliptique comme sur la March 701) firent leur apparition. Mais suite à la naissance de la Lotus 72 et la migration des radiateurs, le rôle de la partie avant a pris une dimension prépondérante. Elle devait à la fois produire suffisamment d'appui pour garantir une bonne maniabilité, avec bien sûr, le moins de traînée possible et alimenter stratégiquement toute la voiture en flux le plus propre possible (dérives). Les ailerons étaient eux mêmes créateurs d'effet de sol en raison de la proximité du sol et de leur forme incurvée.



Figure 6-9 : La Lotus 72



La Lotus 72 fut la première à proposer une excellente intégration du système aérodynamique et cette architecture inspira toutes les Formule 1 dès lors. Dessinée par Maurice Philippe et Colin Chapman, elle présente des caractéristiques très originales. On peut observer des pontons abritant les radiateurs dans le but de dégager toute la partie frontale de l'auto et ainsi d'offrir une surface optimale d'appui. Autre avantage de ce nouveau positionnement des radiateurs, un surplus de confort pour le pilote avec la disparition du radiateur qui se trouvait en avant de ses pieds. Egalement présente, une prise d'air dorsale donnant directement sur les trompettes d'admission.



Figure 6-10 : La prise d'air dorsale de la Lotus 72

D'autres avancées techniques sont présentes. Elles suivent directement l'échec des F1 quatre roues motrices dont un des plus fervents défenseurs n'était autre que Colin Chapman. Dans cette optique d'optimisation de la motricité, la majeure partie du poids fut transférée à l'arrière (autre raison du positionnement des pontons). Malgré sa volonté, cette technique n'offrit aucunement les avantages de l'aérodynamique. La 72 est vraiment le symbole de cette nouvelle orientation ainsi que la réponse à tous ses détracteurs. Toute sa conception tourna autour d'une bonne intégration mécanique et aérodynamique. C'est incontestablement sa partie avant qui marque le tournant. Le museau, anguleux, bas et plat abrite les suspensions. Ce concept jette les bases d'une carrosserie à la fois profilée et également active dans la création d'appui (la forme de ce museau optimise la zone d'appui tout en étant orientée vers la piste).



Figure 6-11 : La Lotus 72D de 1972 (Dessin : F1-legend.com)



Figure 6-12 : La Lotus 72 de 1973 (Dessin : F1-legend.com)

L'aileron arrière fait lui aussi appelle à une conception tout entière tournée vers cette philosophie de moindre traînée et de création d'appui, avec son profil en aile d'avion inversée, biplan, et ses larges dérives latérales canalisant le flux et limitant les turbulences à ses extrémités.

On constate également la présence de freins in-board à l'arrière et à l'avant (l'évacuation de la chaleur issue des freins a été particulièrement soignée avec deux cheminées profilées), ce qui est représentatif de l'obsession des ingénieurs de limiter les masses non suspendues.

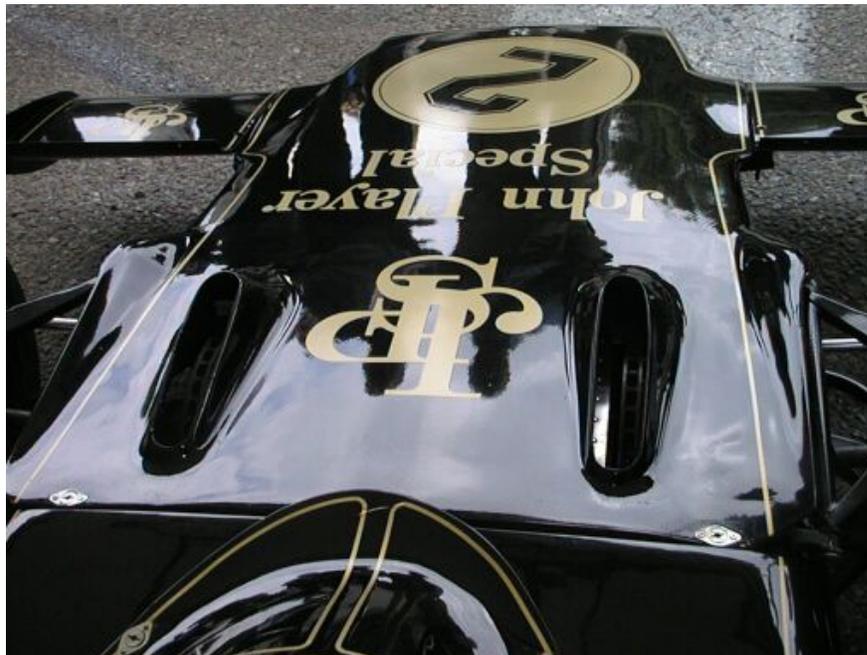




Figure 6-13 : Les cheminées de refroidissement de freins sur la Lotus 72

Tout ceci lui offrit un avantage considérable, avec à la clef, 17 victoires, avec notamment à son volant le prodige brésilien Emerson Fittipaldi.

Et même si certaines de ses innovations coûtèrent la vie au pilote autrichien Jochen Rindt en 1970 (seule pilote à avoir été Champion du Monde à titre posthume), elle restera dans toutes les mémoires comme la première d'une ère nouvelle, bien que la déportance créée ne soit due à aucun effet de sol, mais seulement à des appendices et à sa ligne en coin. On note malgré tout, des bavettes souples situées en amont des pontons et destinées à créer une légère dépression qui seconde la partie avant (ces bavettes forment un rétrécissement de section).



Figure 6-14 : La March 701 de 1970

L'intérêt de cette monoplace est d'avoir été la première ébauche de ce que sera la Formule 1 à effet de sol. On observe les réservoirs de carburant latéraux en profil d'aile d'avion inversée. L'avant comporte, comme les autres Formule 1 contemporaines, un aileron bien intégré, ainsi qu'une bouche de refroidissement secondée par des extracteurs d'air chaud, situés en amont de l'axe des roues. Des volets à l'incidence réglable sont également présents.



Figure 6-15 : La Tyrrell 001 de 1970

La Tyrrell 001 de 1970 représente un exemple parfait du souci d'intégration de la prise d'air principale et de l'aile avant. Toutefois, son efficacité est réduite comparativement aux monoplaces de la génération de la Lotus 72. En effet, en raison de la hauteur élevée de cet appendice, il génère moins d'effet de sol. On constate les " volets " réglables au niveau du bord de fuite. Elle présente aussi des suspensions avec des tirants au profil alaïre.



Figure 6-16 : La Tyrrell 001B de 1971 (Photo Bernard Cahier)

Cette autre tentative de cohabitation de l'Aérodynamique et de la Thermique, a conduit à la création de cet aileron avant dit "sabot".



Le but recherché étant toujours d'atteindre la plus grande finesse possible. Sa hauteur diminuée, provoque un léger effet de sol, qui produit de la déportance sans trop affecter le sillage du flux d'air.



Figure 6-17 : La célèbre Ferrari 312T2 de 1976 et ses énormes prises d'air(Photo Bernard Cahier)



6.1.4 Les années 80

Durant les années 1980, les museaux restèrent assez massifs jusqu'à l'apparition de la Benetton B187 (œuvre de Rory Byrne, l'ingénieur vedette de Ferrari actuellement) et de son museau tout en finesse pour garantir une bonne pénétration dans l'air ainsi qu'une surface exploitable pour une création de déportance accrue. Durant ces années, un grand nombre de recherches eurent pour objet la bonne intégration des écopes de refroidissement des freins. Les ingénieurs firent preuve d'une telle roublardise en la matière que les instances dirigeantes décidèrent de réglementer ces organes essentiels. En effet les écopes devinrent un moment partie intégrante des ailerons, il en résulta un C_x très bas à ce niveau. Une autre innovation apparut également : les ailerons en aile de mouette qui introduisirent le travail sur la bonne alimentation du fond plat et ainsi l'optimisation de l'effet de sol (créé par le diffuseur) qui reste la méthode déportante la moins consommatrice de puissance moteur (la forte puissance des moteurs étant due au développement des forces aérodynamiques).



Figure 6-18 : La McLaren MP4-1 de 1981

On peut ici voir une monoplace typique du début des années 1980. Aileron avant retiré (rendu possible par le pouvoir déportant de l'effet de sol, utilisé ou non en fonction des circuits). On observe les suspensions parfaitement intégrées ainsi que la surface d'appui augmentée au maximum (support des triangles de suspension). Les écopes de refroidissement des freins sont parfaitement visibles.



La Williams FW09 de 1983 (photo ci-dessous), illustre parfaitement la transition occasionnée par le changement de réglementation de cette même année (interdiction des F1 à effet de sol). En effet l'aileron avant est nettement plus développé qu'auparavant, avec un bord d'attaque plus épais, gage de plus d'appui. Il est également positionné plus bas, d'où un effet de sol créé. Le nez affiné, augmente l'envergure de cet aileron et par conséquent sa surface disponible pour les hautes pressions. Des flaps Gurney en augmentent encore les capacités, et les dérives limitent la formation de turbulences (moins de dissipation en énergie thermique).



Figure 6-19 : La Williams FW09 de 1983



Figure 6-20 : La Williams FW11 de 1986 (Photo Paul-Henri Cahier)



Figure 6-21 : La Ferrari 312T4 de 1980 (Photo Paul-Henri Cahier)



6.1.5 Les années 90

Une évolution logique au niveau de l'avant des F1 fut l'introduction du nez haut en 1990 par l'aérodynamicien Jean Claude Migeot alors en activité chez Tyrrell. La modeste monoplace pilotée par le débutant Jean Alesi fit des merveilles malgré la faible puissance du moteur Ford client, ce qui démontra les bienfaits de ce concept fort générateur d'effet de sol au niveau du diffuseur. Toutes les équipes adoptèrent dès lors le concept du nez haut, bien que certaines mirent un certain temps avant de l'adapter à leurs monoplaces (les Tyrrell postérieures revinrent à des nez constitués d'un seul support d'aileron).

Ce qui nous permet d'ouvrir la parenthèse du concept de la « simple quille » vs "double quille" qui constitue le concept technique sensible de ces dernières années.

Le concept de la « double quille » consiste à répartir les attaches des tirants des triangles de suspension aux bords de la coque, ce qui libère le passage pour le flux se dirigeant vers l'underbody. Au contraire, le concept de la « simple quille » favorise la solution d'une seule attache située dans l'axe de la voiture sous le museau. Il constitue un obstacle au flux d'air qui passe sous la monoplace mais en revanche il a l'avantage d'être plus rigide.



Figure 6-22 : La Tyrrell 019 de 1990



Figure 6-23 : Le nez haut de la Benetton B183 en 1993 (Photo Paul-Henri Cahier)



Figure 6-24 : Le concept de simple quille sur la Benetton B183 en 1994 (Photo PH Cahier)



6.1.6 Les années 2000



Figure 6-25 : La Ferrari F2002

La Ferrari 2002, considérée comme une des meilleures F1 de tous les temps, présente une partie avant conventionnelle et soignée. Son museau haut et fin optimise l'alimentation de l'underbody tandis que son aileron répond à la réglementation de 2001, limitant sa garde au sol et donc l'effet de sol induit. Les dérives, quant à elles, sont très sophistiquées et ont pour objectif de mieux aborder la zone critique que représentent les roues.

Depuis, et excepté le concept de la double quille, seules des optimisations successives des concepts déjà en place furent effectuées. En effet, les techniques d'expérimentations actuelles permettent une meilleure compréhension des interactions entre les roues avant et leurs parties environnantes, ainsi qu'une meilleure analyse. On constate que les parties avant sont maintenant très complexes avec, des ailerons parfois triplans, des dérives extrêmement travaillées, des écopes variant de circuits en circuits (elles varient également entre les courses et les qualifications), mais surtout aux formes alambiquées. Bien sûr, la double quille ainsi que tous les éléments de direction et de suspension, sont eux aussi très étudiés. Les ailerons doivent répartir la charge le plus également possible sur leur corde, contrer le plus efficacement possible la création de turbulences en leurs extrémités (dérives) et engendrer un sillage le moins néfaste possible pour les parties suivantes. Une réglementation amoindrit l'effet de sol de l'aileron avant ainsi que l'effet canalisant de leurs dérives en relevant la hauteur minimale de celles-ci de 50 mm en 2001.

Les petites écuries, contrairement aux idées reçues, développent aussi des Formule 1 très prometteuses. Preuve en est avec le modèle 2002 présenté par Arrows : l'A23. Cette saison 2002 fut la pire qu'ait connue Tom Walkinshaw, propriétaire de l'écurie depuis 1996. Confronté à de graves problèmes financiers, l'écurie



Arrows ne put disputer que 10 grands prix sur les 17 organisés cette année-là. Le manque d'argent eut des conséquences sur la représentation écourtée de l'écurie mais également sur la présentation tardive de la monoplace, ce qui provoqua une conséquence grave : le manque de roulage et de développement dans des conditions réelles de course. En effet, ces derniers permettent de roder la monoplace, de déceler les faiblesses liées à la jeunesse de la Formule 1, de gagner en performance mais surtout en fiabilité. Car une voiture fiable lors des toutes premières manches est gage de bons résultats et ainsi de marquer les points qui sont utiles aux écuries habituées à se bagarrer en fond de grille. Si la fiabilité était clairement désignée comme coupable des contre-performances de l'écurie en début de saison (12 abandons sur 20 départs), l'Arrows présentait une aérodynamique surprenante mais efficace : en peu de temps, les ingénieurs et développeurs de chez Arrows avait réussi à doter l'A23 d'une aérodynamique très étudiée, sous l'impulsion de l'aérodynamicien Niccolò Petrucci.



Figure 6-26 : L'Arrows A23 à double quille de 2002 (cercle)

La principale caractéristique était une double quille (twin-keel) apparue pour la première fois sur la Sauber C20 de 2001, œuvre de Sergio Rinland. Cette double quille présente le double intérêt de permettre, combinée à un nez haut (mais d'une grande finesse en son extrémité), à l'air de s'engouffrer en grande quantité sous la voiture et de favoriser l'effet de sol. Elle favorise donc l'efficacité générale de la voiture et permet de créer un effet Venturi. Les flux sont ainsi parfaitement conduits et elle apporte un appui supérieur à l'avant. Cette double quille nécessite ainsi un nez haut : il est pratiquement situé à la hauteur de la partie supérieure des pontons, alors que toutes les monoplaces concurrentes de la saison 2002 ont un nez situé à mi-hauteur des pontons. Le nez de l'A23 est le plus haut des monoplaces de la saison 2002. On



remarque que la double quille est très visible, très avancée mais aussi parfaitement perpendiculaire au sol. Cette dernière caractéristique permet de différencier l'Arrows A23 des autres monoplaces équipées, lors des saisons suivantes, de double quilles (Sauber C21, McLaren MP4/18 et 19.....) qui ont, elles, des quilles inclinées mais également moins visibles et de taille plus réduite. Le concept de double quille est donc ici interprété de manière extrême, avec deux extensions ultra longues vers la partie basse du châssis à l'avant. La double quille implique un souci non négligeable au niveau de la rigidité du triangle inférieur de suspension. En effet, celui-ci est directement fixé à la quille ou à la double quille. Dans le cas d'une simple quille, ce triangle est rattaché en deux points très proches l'un de l'autre, séparés par l'épaisseur de la quille. Or dans le cas d'une double quille, ces deux points d'attache sont distants de l'espace entre les deux quilles plus les épaisseurs des deux quilles. Cette distance totale rend le triangle bien moins rigide. C'est pour cette raison qu'un nombre important d'écuries hésite encore à adopter le schéma de la double quille. Le triangle inférieur de l'A23 possède ainsi un renforcement central pour pouvoir supporter les forces exercées à cet endroit.



Figure 6-27 : L'Arrows A23

Sur la partie avant de l'A23 tout a été ainsi conçu pour permettre à un volume maximal d'air de s'engouffrer. La nécessité d'un volume d'air maximal, transitant entre ces deux quilles impose une flexion



de l'aileron avant en son centre. Cette flexion est également créée pour contourner le règlement de 2001 imposant que les deux extrémités de l'aileron avant soient à une hauteur définie du sol et ce qui n'est pas le cas de la partie centrale de l'aileron. D'où la flexion au centre de l'aileron. Les deux supports d'ailerons sont d'une extrême finesse, là encore, l'Arrows se démarquant de ses concurrentes par cette finesse. L'aérodynamique de la section frontale comprend également de grands déflecteurs situés en amont des pontons et derrière les roues avant.



Figure 6-28 : Le concept de simple quille mis en œuvre sur la Ferrari F2000 (Photo Paul-Henri Cahier)



Figure 6-29 : La McLaren MP4-15 de 2000 (Photo Paul-Henri Cahier)

Afin de diminuer les appuis aérodynamiques et ainsi limiter les vitesses de passage en courbe des F1 qui atteignent des valeurs inquiétantes pour la sécurité, la FIA décide en 2005 de rehausser la hauteur des ailerons avant de 10 à 15 cm par rapport au plan de référence sauf pour la partie centrale de 50 cm correspondant à la largeur du skid pad. La perte d'appui est estimée à 20%. Les ailerons avant vont donc devenir très ondulés et se doubler de petits profils inférieurs dans cette zone de 50 mm. Enfin, la FIA impose que les end plates ne se trouvent pas à moins de 10 cm du plan de référence.



Figure 6-30 : L'aileron avant de la Renault R26 de 2006



Figure 6-31 : L'aileron avant de la Ferrari 248F1 de 2006



Figure 6-32 : Ailettes sur le museau de la Renault R26 de 2006



6.2 Evolution de la Partie Centrale

6.2.1 Les années 50

La principale modification aérodynamique qui eut lieu durant les années 50, fut le passage du moteur de l'avant de la monoplace à l'arrière (à partir de 1957).

Celui-ci s'accompagna d'un amincissement très visible de la carrosserie de la monoplace. Ainsi la surface frontale fut nettement réduite, la place occupée jusqu'alors par le moteur se trouvant derrière le pilote. Mais dans le cas d'une monoplace à moteur avant (offrant donc une plus grande résistance à l'avancement qu'une monoplace à moteur arrière), les dimensions générales ne sont pas les seules sources de perturbations du flux d'air circulant autour de la carrosserie. Les ouïes servant au refroidissement du moteur et favorisant les échanges thermiques, les sangles maintenant le capot moteur en place étaient autant de sources de perturbations. De même que l'énorme saute vent pratiquement vertical et ses attaches placés devant le pilote dans le but de le protéger des turbulences du vent à haute vitesse ainsi que son casque non intégral nécessitant le port de lunettes sont autant de paramètres à prendre en compte. Sans oublier que le pilote était assis très en hauteur et que son casque était donc le point le plus haut de la monoplace et ceci est valable pour toutes les monoplaces de la décennie.



Figure 6-33 : La Ferrari 801 de 1957

Avec le moteur situé à l'avant, certaines écuries avaient décidé de faire sortir les gaz d'échappement à l'arrière de la monoplace ou du moins, au niveau du pilote. Deux solutions s'imposaient donc : soit le ou les tuyau(x) d'échappement courrai(en)t le long de la carrosserie (Cooper T24 de 1953, Maserati 250F de 1957, Ferrari 801 de 1957 et 246 de 1958...), ce qui représentait une forte source de perturbations aérodynamiques, soit le ou les tuyau(x) étai(en)t dans la carrosserie mais cela impliquait alors que cette dernière soit élargie pour permettre de créer un espace dédié au(x) tuyau(x). Dans ce dernier cas, cette solution permettait, en partie, de réduire les turbulences aérodynamiques.

Lors du Grand Prix d'Argentine 1958, la Cooper 45 fut la première Formule 1 à moteur arrière à remporter

une course. La saison suivante, la Cooper T51 fut la première Formule 1 à remporter le championnat du monde. Malgré cela, Enzo Ferrari refusa de reconnaître l'efficacité aérodynamique des monoplaces dont le moteur était situé derrière le pilote.



Figure 6-34 : La Cooper T51 de 1959

Les deux rétroviseurs extérieurs posés soit sur la carrosserie légèrement devant le pilote, soit sur le sautoir entourant le pilote, étaient dans les deux cas profilés de manière à faciliter leur pénétration dans l'air. La surface des rétroviseurs en contact avec le flux d'air était de forme conique.

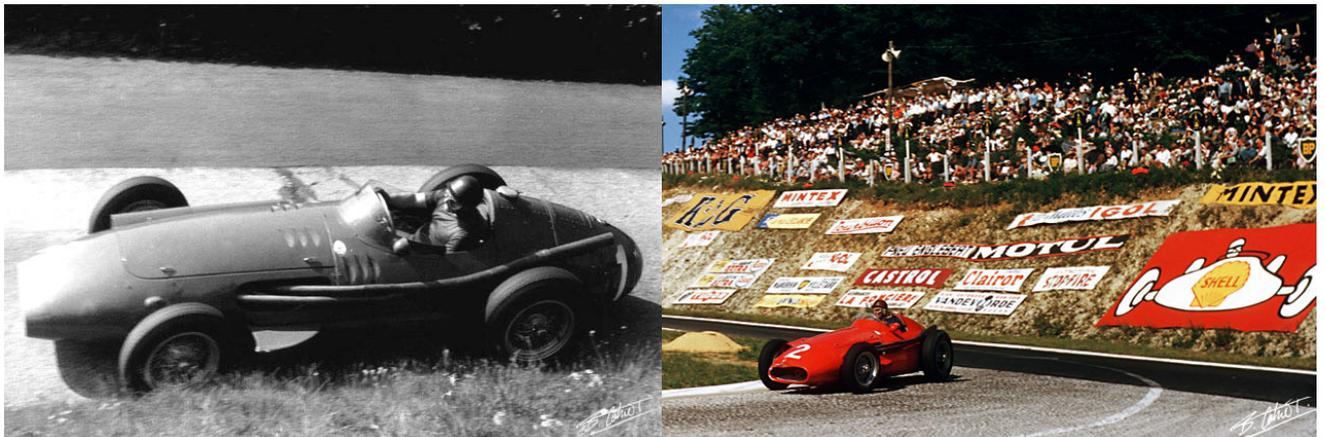


Figure 6-35 : La Maserati 250F de 1957 (Photos Bernard Cahier)



6.2.2 Les années 60

Le phénomène introduit par l'écurie Cooper (moteur derrière le pilote) s'amplifia au tout début des années 1960 lorsque d'autres écuries en firent de même.

Le Grand Prix de Monza qui se déroula en 1960 fut un tournant dans l'histoire de la Formule 1 : ce fut la dernière victoire d'une monoplace à moteur avant et également la seule de la décennie. Cet événement prouva que l'ère des moteurs à l'avant était bien révolue et qu'elle appartenait à la décennie précédente. En effet, la Ferrari 256 qui courra durant les Grands Prix des saisons 1958-59-60, fut la dernière des Formule 1 à en être équipée. Toutes les monoplaces qui se présentèrent au début de la saison 1961 avaient donc des moteurs arrière.

Cela permit de réduire le nombre d'éléments perturbateurs du flux d'air (sangles, grilles d'aération...), situés sur le dessus et à l'avant de la monoplace. Le passage du moteur de l'avant vers l'arrière s'accompagna d'un amincissement général de la ligne de la monoplace. Cet amincissement s'amplifia même encore plus au cours de l'intersaison 1960-61 que pendant celle de 1959-60. La Ferrari Dino 156 qui couru de 1961 à 1963 fut en effet la première à passer dans une soufflerie, de façon tout à fait artisanale.



Figure 6-36 : La Ferrari Dino 156 de 1962 (Photos Bernard Cahier)



Figure 6-37 : La Ferrari Dino 156 de 1962 (Dessin F1-Legend.com)

Mais cet amincissement général de la ligne de la monoplace, évidemment très profitable à l'efficacité aérodynamique de la monoplace grâce une surface frontale réduite, eu un effet négatif pour la sécurité du pilote. Le casque du pilote devint en effet le point le plus haut de la monoplace et l'on peut donc aisément imaginer les conséquences dramatiques sur le pilote en cas de retournement de sa Formule 1. C'est pour cette raison que certaines écuries telles que Lotus et Ferrari installèrent un arceau de sécurité sur le capot moteur, juste derrière le dos du pilote. L'écurie Porsche par exemple, attendit la saison 1962 pour en pourvoir ses monoplaces. Si l'arceau de sécurité est un élément perturbateur du flux d'air s'écoulant sur le dessus de la monoplace, il permet en revanche d'augmenter de façon importante la sécurité des pilotes de Grands Prix. Dans le cas de la Ferrari Dino 156, les ingénieurs avaient préféré sacrifier l'efficacité aérodynamique de la voiture au profit de la sécurité.

Les arceaux qui, dans un premier temps étaient disproportionnés, ont vu rapidement leurs dimensions diminuer afin de favoriser l'écoulement du flux d'air. En effet, leurs dimensions furent telles que les arceaux étaient à peine situés plus haut que les casques des pilotes.



Figure 6-38 : La Ferrari Dino 156 de 1961

Les ingénieurs avaient fourni un gros effort dès 1960 pour diminuer la surface frontale du saute vent tout en augmentant son efficacité. En effet celui-ci était très bien intégré à la carrosserie, également très incliné et ses attaches de grandes tailles avaient totalement disparu au profit de vis nettement moins perturbatrices du flux d'air circulant autour. Mais surtout il entourait désormais le pilote puisque qu'il arrivait, sur les côtés de la monoplace à son niveau et, sur certaines monoplaces, le saute vent courrait



jusqu'à la séparation entre le compartiment moteur et le dos du pilote. A la fin de la décennie, les dimensions du saute vent furent nettement réduites puisque celui-ci se situait devant le pilote et se poursuivait très légèrement sur les côtés tandis que sa hauteur était de l'ordre de quelques centimètres. Les rétroviseurs de toutes les monoplaces étaient dorénavant fixés non plus à la carrosserie, mais sur le saute vent même légèrement en avant du pilote. Les rétroviseurs arboraient une forme similaire à celle des rétroviseurs de la fin de la décennie précédente, à savoir qu'ils étaient coniques. On peut même noter que les rétroviseurs des Formule 1 étaient semblables à ceux des automobiles qui couraient dans d'autres épreuves sportives. Autre facteur de perturbations aérodynamiques, le casque du pilote n'était toujours pas intégral et était accompagné d'une paire de lunettes. De la même façon que la décennie précédente, la partie centrale en dessous des monoplaces n'était absolument pas lisse ou recouvert d'une quelconque planche. Les organes mécaniques apparents sous la voiture constituaient une source importante de la perturbation du flux d'air s'écoulant sous la monoplace.

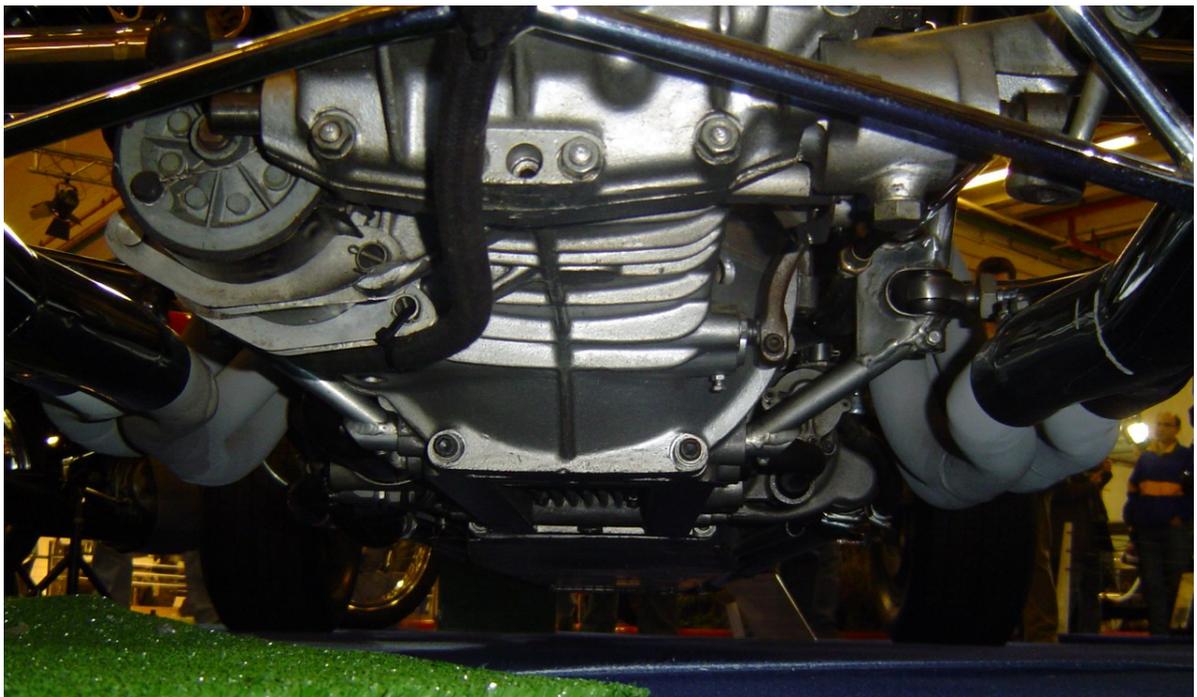


Figure 6-39 : Le dessous de la Lotus 49



© The Cahier Archive

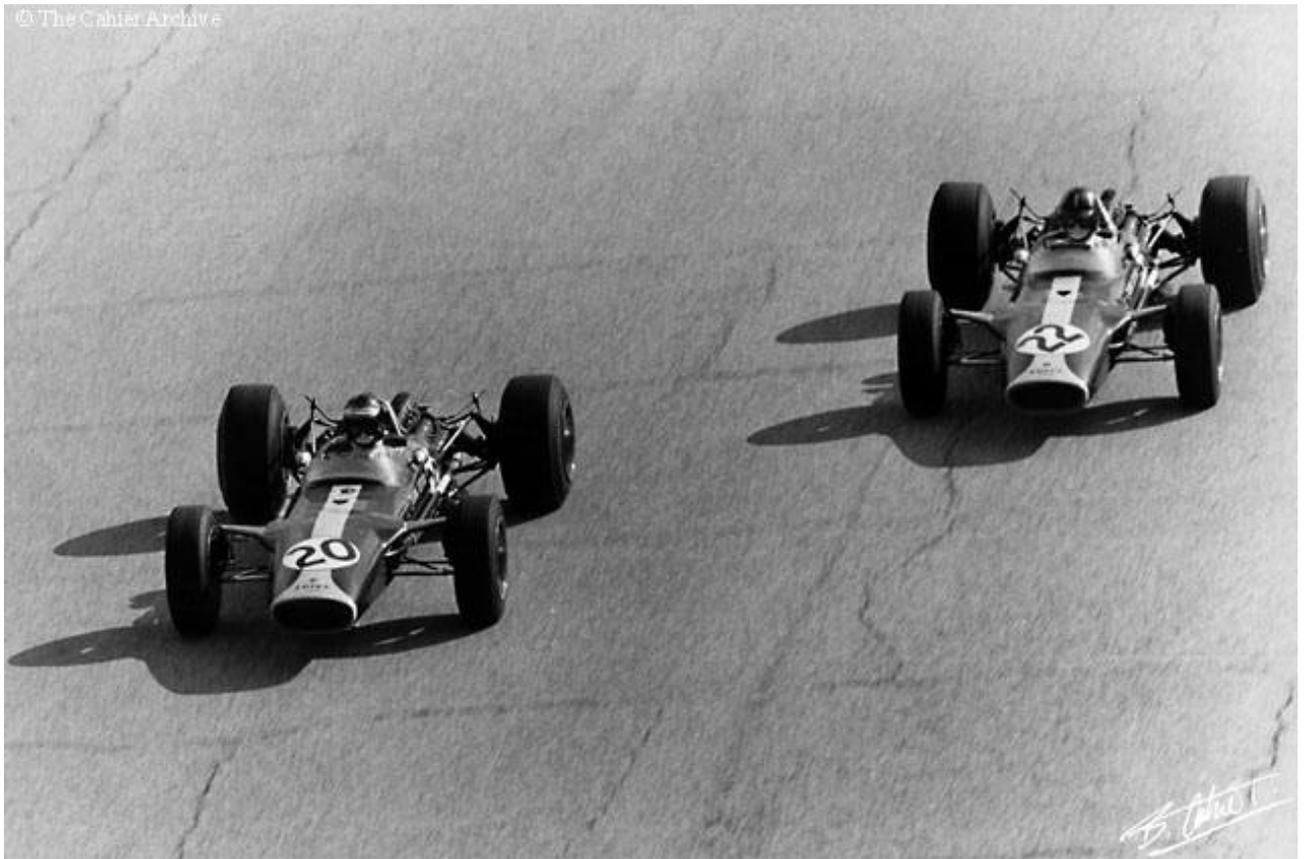


Figure 6-40 : La Lotus 49 de 1967 (Photo Bernard Cahier)



6.2.3 Les années 70

Dès le début de la décennie, pour des raisons de sécurité, l'ensemble des pilotes adopta le casque intégral. De plus, la traînée engendrée par ce type de casque était très nettement réduite comparée à celle engendrée par le couple casque non intégral/lunettes que devaient porter les pilotes jusqu'alors. Il est important de noter que le casque est une zone sensible du point de vue aérodynamique car il a un effet non négligeable sur son environnement, autour et derrière lui.

En 1970, les écuries Lotus et McLaren introduisirent un élément aérodynamique qui sera toujours utilisé 35 ans plus tard : la prise d'air moteur. Les deux solutions proposées sur les Lotus 72 et McLaren M19 étaient différentes l'une de l'autre. Sur la Lotus il y avait en effet deux petites prises d'air latérales qui étaient situées de part et d'autre de la boîte à air (pièce située dans le prolongement de la prise d'air).

Chez McLaren, il avait une unique prise d'air moteur directement posée sur la partie haute du moteur et située au-dessus du casque du pilote.



Figure 6-41 : La McLaren M19 de 1970

Dans ces deux cas différents, la fonction de la prise d'air moteur était évidemment la même : elle permettait, grâce à la boîte à air, de conduire l'air directement aux différentes trompettes d'admission, elles aussi situées, sur le dessus du moteur. Bien que source de perturbations aérodynamiques, cette prise d'air moteur permettait à ce dernier d'avoir de meilleures performances. A partir de cette date, la prise d'air moteur (élément le plus haut de la monoplace), intégra l'arceau de sécurité. Lors de la saison suivante, les écuries Brabham et Surtees présentèrent sur leur Brabham BT 34 et Surtees TS9, une évolution de la forme de la McLaren M19, c'est-à-dire une unique prise reliée directement aux trompettes du moteur. La prise d'air était très fine et ronde sur les deux monoplaces mais, tandis que la boîte à air de la Surtees était arrondie, celle de la Brabham présentait un angle droit de manière à être parfaitement perpendiculaire au-dessus des trompettes d'admission du moteur. Durant les saisons suivantes cette forme générale de la prise d'air moteur fut conservée mais la boîte à air devint bien plus volumineuse tandis que la prise d'air arborait une forme ovale.



Figure 6-42 : La Brabham BT34 de 1971



Figure 6-43 : La Surtees TS9 de 1971

Mais le concept alla encore plus loin dans "sa démesure" avec la Ligier JS5 de la saison 1976 : la boîte à air ainsi que la prise étaient de taille très importante, de dimensions bien supérieures à celles des concurrents. La prise d'air était située très haut et la boîte à air, très bombée, ne retombait pas immédiatement dans le prolongement de la prise d'air moteur. Cet élément très peu aérodynamique, fut très rapidement surnommé "bonnet phrygien", de par sa forme mais aussi du fait des origines françaises de l'écurie Ligier.



Figure 6-44 : La Ligier JS5 de 1976

Cette même année, McLaren proposa une solution totalement différente des standards de l'époque qui voulaient une boîte à air de grande taille : la prise d'air fut remplacée par deux prises d'air en forme de "demi-T" situées chacune en retrait du casque du pilote. Par la suite, la prise d'air moteur et la boîte à air furent d'abord nettement réduites puis la plupart des écuries les supprimèrent, le moteur n'étant pas totalement recouvert.



Figure 6-45 : La McLaren M23 de 1974



Figure 6-46 : La McLaren M23 de 1976

L'année 1972 fut le théâtre d'une révolution aérodynamique avec l'invention d'un élément qui fera partie désormais de la carrosserie de toute monoplace : le ponton. En effet, l'écurie Lotus avait déplacé les radiateurs servant au refroidissement du moteur, du nez de la voiture à l'arrière de la voiture (juste devant les roues arrière). Les pontons (un de chaque côté de la carrosserie), étaient donc destinés à accueillir



chacun un radiateur. Les pontons étaient alors d'une hauteur importante, minces, larges et surtout pourvus d'une surface servant à entrée de l'air de très grande taille (même surface frontale que celle du ponton). Toutes les écuries s'équipèrent par la suite de pontons. Les radiateurs étaient apparents sur la majorité des monoplaces des saisons suivantes et situés le long et à l'arrière des pontons.

L'année 1977 marqua un tournant décisif pour l'histoire de l'Aérodynamique et de la Formule 1 en générale : Colin Chapman et le directeur technique Peter Wright mirent au point la première voiture munie de pontons déporteurs à la forme d'aile d'avion inversée (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** - **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). En effet, l'air était accéléré sous la voiture du fait de la dépression créée. Cette forme pouvait générer un appui aérodynamique qui permettait de coller la monoplace au sol. Le revêtement de la piste était alors utilisé comme la partie inférieure d'un tunnel dans lequel l'air forcé par l'accélération dans les pontons latéraux engendrait le champ de dépression voulu. Cette accélération était rendue possible grâce à ce tunnel en forme de venturi situé sur un des côtés d'un châssis étroit. Il faut noter que le ponton était plus haut juste devant les roues arrière qu'au niveau de l'entrée d'air, ce qui permettait d'accroître le phénomène d'effet de sol à cet endroit et également de diriger l'air au-dessus des roues arrière de manière à diminuer la traînée engendrée par ces éléments. Pour créer l'effet de sol, il fallait absolument que l'air soit emprisonné. C'est pour cela que les pontons étaient aussi près que possible du sol. Ceci était possible grâce aux jupes aérodynamiques. En 1978, Wright introduisit les jupes latérales souples sur la Lotus 79. Colin Chapman lui avait d'ailleurs demandé de se consacrer uniquement à l'effet de sol. Peter Wright s'était en effet aperçu qu'en installant une jupe sous chaque ponton et amenant la voiture aussi près du sol que possible, on pouvait créer un vide partiel ce qui permettait à la monoplace d'avoir une adhérence phénoménale. La jupe était donc pourvue dans sa partie basse, en contact avec la piste, de "brosse en nylon" ce qui permettait de réduire les frictions avec le sol tout en limitant la fuite d'un flux d'air vers l'extérieur de la jupe. Les brosses furent dans un premier temps inclinées vers l'extérieur du ponton puis dans un second temps, vers l'intérieur. La jupe aérodynamique emprisonnait l'air ce qui produisait une succion tellement grande que même les forces G ne pouvaient décoller la voiture du sol. Ceci entraînait souvent des cassures qui pouvaient provoquer un grave accident. Et si la voiture décollait un peu du sol, elle se mettait à voler, ce qui était encore plus dangereux pour le pilote.



Figure 6-47 : La Lotus 79 de 1978 équipée de ses jupes latérales



Figure 6-48 : La Renault RS10 de 1979 équipée de ses jupes latérales



6.2.4 Les années 80

Le début de la décennie fut marqué par une continuité dans le développement de l'effet de sol et des jupes aérodynamiques. Il était évident à cette période qu'une Formule 1 prétendant au titre, devait être équipée d'un moteur turbocompressé et de jupes aérodynamiques.

Au début de la saison 1981, une première réglementation visa directement l'effet de sol généré par les jupes aérodynamiques : lorsque les Formule 1 passaient dans les stands (où elles pouvaient être contrôlées à tout moment), les jupes devaient être au minimum à 60 millimètres de la piste. Avec une garde au sol ainsi relevée, la section frontale sous la monoplace augmentait et la vitesse de l'air ralentissait. Ceci diminuait donc l'effet de sol. Mais les ingénieurs ne tardèrent pas à trouver une faille dans le règlement et ainsi contournèrent cette nouvelle mesure. Sachant que la garde au sol des monoplaces ne pouvait être contrôlée en piste, il suffisait donc de trouver une parade pour que les jupes furent à nouveau au ras du sol. Ceci fut rendu possible grâce à un système d'abaissement hydropneumatique qui réduisaient la garde au sol à un minimum absolu une fois la monoplace en piste. Au contraire, dans les stands, les jupes de la monoplace étaient bien aux 60 mm réglementaires du sol. Il est important de noter que les Formule 1 équipées de l'effet de sol pouvaient être le siège de réactions aussi soudaines que violentes aux conséquences dramatiques. C'est pour cela que les suspensions devaient être très dures afin d'éviter que les irrégularités de la piste ne se fassent trop sentir au volant.



Figure 6-49 : La Ferrari 312T4 de 1980 équipée de ses jupes latérales (Photo Pierre-Henri Cahier)



Les pilotes, unanimes, se plainèrent souvent de la difficulté à piloter de telles monoplaces. Ceci conjugué avec le tragique accident où le célèbre pilote Canadien Gilles Villeneuve perdit la vie, fit que les instances sportives interdissent l'effet de sol généré par les jupes aérodynamiques. Pour le début de la saison 1983, toutes les monoplaces devaient être équipées d'un fond plat, pièce qui permettait d'augmenter la garde au sol de la monoplace. Les Formule 1 devaient être équipées d'un moteur turbocompressé. Ce dernier, dont la puissance augmentait considérablement de saison en saison (notamment grâce à une augmentation de la pression du turbo) devait être très refroidi. Les moteurs V6 turbo pouvaient en effet atteindre pas loin de 1200 ch en qualification.



Figure 6-50 : La Lotus 98T de 1986

C'est pour cette raison, qu'en plus des traditionnels radiateurs de grande taille logés dans les pontons (voir photo précédente de la Lotus 98T de 1986), certaines Formule 1 furent équipées d'une prise d'air située sur le dessus de chaque ponton. Cette prise d'air, directement reliée à un turbo, permettait donc de le refroidir. Bien que cet élément perturbait le flux d'air s'écoulant sur le dessus du ponton et donc engendrait de la traînée, les ingénieurs aérodynamiciens avaient cédé aux ingénieurs motoristes qui voulaient un meilleur refroidissement, gage de fiabilité. La majorité des monoplaces en fut équipée jusqu'en 1988, année où les moteurs turbos furent interdits par les pouvoirs sportifs afin de les remplacer par des moteurs atmosphériques.

Cette décennie fut l'occasion de nombreuses modifications au niveau des pontons. Alors que les pontons devaient être de forme parallépipède et d'une longueur la plus grande possible (afin de bénéficier d'un plus important effet de sol), les dimensions générales des pontons furent nettement réduites dès 1983. Cette date correspondit, en effet, avec l'interdiction de l'effet de sol. A partir de cette date, et sur certaines monoplaces, les radiateurs étaient apparents afin de profiter d'un meilleur échange thermique



entre l'air chaud sortant des radiateurs et l'air ambiant, beaucoup plus frais. Ce fut le cas, par exemple, sur des monoplaces telles que les Ferrari de 1984 à 1988, sur la Renault RS60 de 1985, sur les Lotus 99T (1987) ainsi que 100T (1988). Sur la Brabham BT55 de 1986, il y avait même deux radiateurs apparents dans chaque ponton. Sur les Williams FW09, 10 et 11 (de 1984 à 1987), par exemple, les pontons étaient surmontés d'une sortie d'air chaud en provenance des radiateurs. Le flux d'air chaud perturbait l'écoulement de l'air plus froid et donc plus lourd passant sur le ponton mais permettait d'améliorer le refroidissement du moteur et ainsi assurer une meilleure fiabilité de la monoplace.

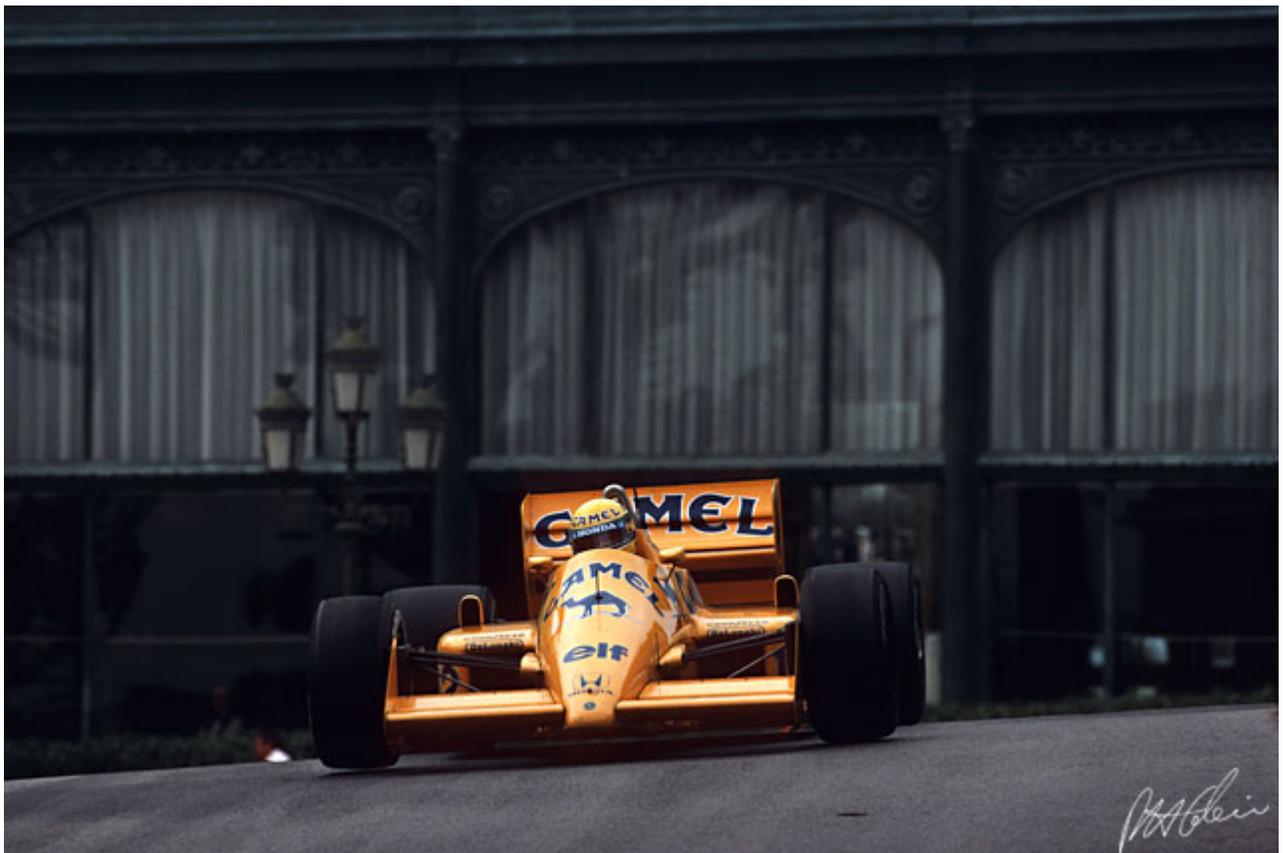


Figure 6-51 : La Lotus 99T de 1987



Figure 6-52 : La Prix BT55 de 1986 (Dessin F1-Legend)



Au début de la saison 1989, une forme particulière du ponton apparue : prise d'air haute en amont du ponton avec une surface frontale réduite, puis un élargissement en son centre (pour y loger les radiateurs) et enfin un rétrécissement à l'arrière du ponton. La Ferrari F640 de 1989 fut équipée de ce type de ponton.



Figure 6-53 : La Ferrari F640 de 1989

Alors que la décennie précédente avait été le théâtre de l'apparition de la prise d'air moteur, les monoplaces des premières saisons en furent dépourvues. On assistait donc à deux écoles différentes :

- soit un arceau de sécurité encastré dans la carrosserie de la monoplace au sommet du capot moteur (par exemple, toutes les McLaren de la décennie), derrière le casque du pilote
- soit un arceau de sécurité posé au sommet du capot moteur

Cette dernière solution fut la plus utilisée et on la retrouva, par exemple, sur les Williams FW07 à FW11, sur les Benetton F186 (1986) à F189 (1989) et sur les Lotus.



Figure 6-54 : La Williams FW11 de 1986



Figure 6-55 : La Benetton F186 de 1986

Il fallut attendre la saison 1987 et la Tyrrell O16 pour que la prise d'air moteur au-dessus de la tête du pilote fut réintroduite. La Williams FW12 de 1988, la Brabham BT58 (1989) et la Lotus 101 de 1989 furent parmi les monoplaces qui en furent équipées par la suite.

Lors de la saison 1989, la Ferrari F640 fut équipée de deux petites prises d'air moteur situées derrière le pilote, de chaque côté du capot moteur. Mais à la mi-saison, l'écurie revint à la solution plus classique d'une prise d'air au-dessus du capot moteur, juste au-dessus du casque du pilote, et ce pour une meilleure efficacité aérodynamique de la monoplace.



Figure 6-56 : La Williams FW12 de 1988

Enfin, un petit saute vent équipait le devant du cockpit du pilote et ce pour diriger l'air au-dessus de son casque et ainsi de lui éviter d'être trop perturbé par le flux d'air. Les dimensions très réduites furent conservées durant les premières saisons des années 1990.



6.2.5 Les années 90

Cette décennie a permis aux différentes monoplaces d'acquiescer au cours des différentes saisons une fluidité certaine dans leur ligne générale; ce qui les rapproche dans leur ligne des Formule 1 que nous connaissons actuellement. Là encore, cela est dû aux contraintes liées à l'aérodynamique, les écuries passant de plus en plus de temps à peaufiner leurs monoplaces dans des souffleries que les directeurs d'équipes ont fait construire au cours de cette décennie.

Il est important de noter que les Formule 1 de cette période (et cela se poursuivra lors de la décennie suivante) se ressemblèrent de plus en plus et que ce phénomène fut amplifié au cours des saisons. Il est cependant facile de trouver des explications : lorsqu'une écurie introduisait une nouveauté aérodynamique qui se révélait efficace, cette nouveauté était très rapidement adoptée tour à tour par les différentes écuries du plateau. Ce qui signifie que l'on ne retrouve plus comme cela était courant jusqu'à la précédente décennie, une ou plusieurs Formule 1 se démarquant sur le plan aérodynamique des autres monoplaces. Même des écuries telles que Jordan et Ferrari qui se démarquaient de façon visible des autres écuries rentrèrent dans le rang au début de la seconde moitié de la décennie.

En 1994 apparut une innovation majeure à laquelle les aérodynamiciens porteront un grand soin au cours des saisons suivantes : les déflecteurs situés devant les pontons. Leur but est de permettre au flux d'air de contourner les pontons (qui sont frontaux aux flux d'air), tout en conduisant une partie vers l'entrée de ces pontons. Là encore la difficulté réside dans le fait de trouver le bon compromis entre une limitation des perturbations aérodynamiques et de la traînée à cet endroit, mais également d'offrir un bon refroidissement moteur. Lors de l'introduction de ces déflecteurs en 1994, il y avait en réalité deux types majeurs de déflecteurs : dans le cas d'écuries comme Ferrari et Benetton, il y avait deux déflecteurs. L'un situé juste derrière les roues avant et les éléments de suspensions, l'autre devant les pontons : c'est le déflecteur principal. Au contraire, des écuries telles que Williams (championne du monde des constructeurs cette année-là), Tyrrell et Minardi utilisèrent un unique déflecteur situé juste devant le ponton et d'une plus grande taille que celui situé au même endroit dans le cas de deux déflecteurs. C'est d'ailleurs cette solution qui s'imposera finalement lors des saisons suivantes. L'écurie suisse Sauber, par exemple, dû attendre la saison 1995 pour équiper sa monoplace d'un déflecteur en amont de chaque ponton. Lors des saisons suivantes, la tendance générale adoptée par la majorité des écuries a été une surface agrandie des déflecteurs. Le déflecteur était très haut juste derrière la roue avant mais avait une hauteur diminuée près du ponton. Il était en effet moins haut juste devant le ponton pour permettre à un flux d'air canalisé de pénétrer dans le ponton et ainsi atteindre les radiateurs. Il est également de plus en plus courbé vers l'extérieur de la monoplace à mesure qu'il se rapproche du ponton, pour dévier une partie du flux d'air du ponton.



Figure 6-57 : La Ferrari 412TB1 de 1994



Figure 6-58 : La Benetton B194 de 1994



O McLaren MP4/8
de Ayrton Senna (1993)

Figure 6-59 : La McLaren MP4-8 de 1993

Avant l'arrivée des déflecteurs, les ingénieurs aérodynamiciens cherchèrent à réduire les dimensions des pontons à cause de la traînée et des perturbations aérodynamiques engendrées par la forme des pontons. Cela fut parfaitement visible sur la Ferrari F92A de 1992, fruit d'une grande recherche aérodynamique. Ses entrées d'air à l'extrémité avant des pontons étaient particulièrement hautes, étroites et ovales et ce alors que les pontons, eux aussi ovales, étaient parfaitement perpendiculaires au flux d'air. On retrouva une configuration semblable sur une autre Ferrari, celle de 1996, la F310 mais cette fois-ci les pontons étaient beaucoup plus larges et la distance séparant l'entrée d'air du cockpit était beaucoup plus importante sur la F310 que sur la F92A. Cette forme des pontons avait été créée uniquement pour que ces derniers produisent de la déportance. Mais cela ne fut pas très convaincant car les ingénieurs reconnurent que ces pontons créaient trop de résistance à l'avancement.



Figure 6-60 : La Ferrari F92A de 1992



Figure 6-61 : La Ferrari F310 de 1996

Comme nous venons de le voir, les pontons et les déflecteurs ont été des éléments de la partie centrale qui ont été particulièrement étudiés par les aérodynamiciens. Ce qui explique que lors de la saison 1999, l'ingénieur aérodynamicien de chez Jordan, Mike Gascoyne fit équiper les EJ199, de mini ailerons au niveau du fond plat juste devant les pontons afin de canaliser l'air allant sous le fond plat et d'en augmenter ainsi le rendement aérodynamique (voir flèche jaune sur la photo suivante).



Figure 6-62 : La Jordan EJ199 de 1999

La prise d'air moteur et la boîte à air (dans le prolongement de la prise d'air) au-dessus du pilote sont deux éléments très perturbateurs de l'écoulement du flux d'air à cet endroit de la monoplace et particulièrement réglementés de la part des pouvoirs sportifs du fait que la boîte à air abrite l'arceau de sécurité. Les aérodynamiciens ont donc eu très peu de liberté pour la forme générale de l'extrémité de la boîte à air, c'est-à-dire, la prise d'air moteur. La majorité des évolutions de la prise d'air, tout au long de la décennie, ont concerné sa forme. Certaines furent parfaitement rondes, d'autres ovales et certaines furent triangulaires. Concernant la boîte à air elle-même, elle ne fut pas le théâtre d'une grande évolution entre les saisons 1990 et 1999. On peut cependant remarquer, qu'au fur et à mesure des saisons, son extrémité située juste derrière de la prise d'air moteur, devint parfaitement horizontale ce qui permit d'y fixer aisément des caméras destinées à la retransmission d'images embarquées pour les télévisions du monde entier. La distance de cette partie horizontale est également le fruit d'un compromis entre un bon refroidissement (partie horizontale plus longue) et une amélioration du rendement aérodynamique de la caméra, le capot devint au cours des saisons parfaitement droit, lui qui était bombé de façon concave à la fin de la décennie précédente.

Mais l'une des modifications les plus importantes concernant la prise d'air moteur est celle apparue à la suite de l'accident de d'Alexander Wurz lors du Grand Prix du Canada en 1998. La FIA décida alors de modifier le règlement technique pour la saison 1999 après cet accident plus spectaculaire que grave. Elle imposa en effet un arceau de sécurité relevé, la distance minimale entre le sommet du casque du pilote et le haut de l'arceau de sécurité passant de 50 à 70 mm. L'arceau de sécurité étant situé au sommet de la prise d'air moteur au-dessus du pilote (au niveau de la boîte à air), cela eut comme conséquence immédiate pour les monoplaces, une augmentation de la traînée à cet endroit.

De manière à diminuer l'efficacité de la monoplace au niveau du fond plat, la FIA imposa au début de la



saison 1994 une planche en bois placée au centre de ce fond plat. Cette planche en bois de 10 mm d'épaisseur obligeait alors les monoplaces à être 10 mm plus haut ce qui réduisait ainsi l'efficacité de la monoplace et donna naissance aux underbody en forme de stepped plane. De plus, cela augmentait la section sous la F1 et donc diminuait la vitesse du flux passant sous la voiture. Grâce à l'utilisation du bois pour ce nouvel élément, la FIA pouvait aisément contrôler que la monoplace n'était pas trop basse ce qui signifiait qu'elle profitait d'une meilleure adhérence. Le bois permettait de savoir si la voiture avait frotté contre le sol et ce en laissant des traces visibles, ce qui aurait été impossible avec un autre matériau. De plus, si la hauteur de cette planche était par endroits réduite de plus de 10% (c'est-à-dire de plus d'1 mm), alors le concurrent était purement et simplement disqualifié.

Lors du Grand Prix d'Argentine 1997 sur le circuit de Buenos-Aires, l'écurie Tyrrell innova sur le plan aérodynamique en utilisant un petit aileron haut placé sur chaque ponton dont le but est de rajouter de l'appui afin de compenser l'appui perdu à cause des restrictions du règlement technique imposé par la FIA en début de saison. Ces ailerons furent interdits lors du 5ème Grand Prix pour des raisons de sécurité, la FIA craignant des ruptures au niveau des supports de ces ailerons.



Figure 6-63 : La Tyrrell 025 de 1997

Autre élément source de perturbations aérodynamiques, les rétroviseurs n'ont pas évolué durant la décennie. Leurs dimensions imposées sont restées les mêmes, seuls les supports de rétroviseurs, les reliant à la carrosserie, étaient de formes différentes (inclinés, verticaux, avec un angle.....).

A la fin de la décennie, on retrouve plusieurs tendances adoptées par toutes les écuries :

- l'entrée des pontons est avancée
- les pontons sont accolés sur toute leur longueur à la carrosserie pour éviter le passage d'un flux d'air entre le début du ponton et la carrosserie
- la partie supérieure de l'entrée d'air du ponton est avancée, ce qui n'est pas possible avec la partie inférieure qui viendrait dans ce cas buter contre la partie inférieure du déflecteur



6.2.6 Les années 2000

Durant les quatre premières saisons qui se sont déroulées entre 2000 et 2003, le travail des aérodynamiciens sur la partie centrale, a porté sur quelques éléments précis :

- ponton et déflecteur
- recherche d'appui
- extraction de l'air chaud en provenance du moteur

En 2000, la McLaren MP4/15 innova en ayant des pontons surmontés d'une pièce appelée cheminée qui jouait le rôle d'extracteur d'air chaud en provenance du moteur. De longues cheminées (comme sur la Ferrari F2002 de 2002) sont le signe d'une bonne extraction d'air chaud mais dans ce cas il faut chercher à les affiner au maximum dans le but de réduire leur surface frontale et de diminuer les frottements de l'air. Les ingénieurs ont donc préféré réduire quelque peu l'efficacité aérodynamique de la monoplace au profit d'un meilleur refroidissement gage d'une meilleure fiabilité mécanique.

En 2001, l'écurie Jordan reprit les cheminées d'extraction d'air chaud. De son côté l'écurie McLaren fit évoluer ses cheminées. Celles de la MP4/16 de 2001 se différenciaient de celles de la MP4/15 de la saison précédente par leur coupe en V sur l'arrière, plus ou moins accentuée selon les circonstances (type de circuit, température extérieure, qualification ou course). En effet, pendant les qualifications où la performance pure prime, les cheminées étaient de très petite taille afin de diminuer leur résistance aérodynamique ainsi que leur traînée. La saison suivante, Ferrari recouvrit les "échappements hauts" de la F2002 par des cheminées semblables par leur forme à celle de la McLaren MP4/16. A la différence de la McLaren MP4/16, ces cheminées ne surmontaient donc pas uniquement les pontons mais également les échappements.



Figure 6-64 : La McLaren MP4-15 de 2000



Lors du grand prix des Etats-Unis 2002, l'équipe Toyota équipa sa TF02 de deux nouveaux appendices aérodynamiques. Le déflecteur placé devant le ponton fut ainsi remplacé par trois petits déflecteurs sensés canaliser le flux d'air sous la voiture. De plus une petite ailette, très semblable à celle introduite sur la Jordan J199 en 1999, fut placée devant le ponton. Cette ailette avait pour but de mieux diriger le flux d'air vers l'entrée du ponton.



Figure 6-65 : La Toyota TF102 de 2002

L'écurie Williams avait procédé de même avec la FW22 de la saison 2000 et la FW23 de 2001. Cette dernière apporta même une nouveauté : lors du Grand Prix d'Europe sur le circuit du Nürburgring, ce déflecteur avait une forme en "T", le "T" étant perpendiculaire au flux d'air et rattaché à la carrosserie par sa partie la moins large. Cette solution permettait encore d'accroître sa capacité à canaliser le flux d'air vers l'entrée du ponton et ainsi améliorer le rendement des radiateurs.

En 2002, afin de réduire la hauteur des pontons de la Ferrari F2002, les ingénieurs de la Scuderia Ferrari inclinèrent les radiateurs situés dans les pontons vers l'avant. Ceci permettait de réduire la surface frontale de ces pontons sans toutefois nuire aux qualités de refroidissement de ces derniers.

Le règlement concernant l'underbody étant très strict et les libertés des ingénieurs très limitées, les seules évolutions ont concerné le bord d'attaque de l'underbody (pièce située entre l'underbody et la partie avancé de la planche de bois). Lors de la saison 2001, l'équipe BAR (British American Racing) ajouta un mini aileron de chaque côté de l'élément servant de bord d'attaque à l'underbody. Cette solution inédite fut utilisée afin de mieux diriger le flux d'air sous la monoplace.



La Ferrari F2003 championne du monde des constructeurs en 2003 reçue deux innovations importantes au niveau de ses déflecteurs et de ses pontons :

- une forme inédite de ses pontons qui étaient biseautés au niveau du bord inférieur de l'entrée d'air. Ceci a été rendu possible par le fait de basculer les radiateurs des pontons sur le côté extérieur.
- des barges boards ont été placés au niveau de la partie inférieure des déflecteurs. Ils permettent de dévier l'air du bas de ces déflecteurs et ainsi de diminuer la pression à cet endroit.



Figure 6-66 : Les pontons biseautés de la Ferrari F2003-GA de 2003



Figure 6-67 : Le concept de double déflecteur de la Ferrari F2003-GA de 2003

Pour des raisons de sécurité, le règlement établi lors de l'hiver 2001-2002, imposa à toutes les écuries d'augmenter la taille des rétroviseurs de 20%, alors que les dimensions n'avaient pas évoluées depuis de longues années. Cette augmentation de surface augmenta donc la surface frontale et de la sorte la traînée au niveau des rétroviseurs.

L'entrée d'air va devenir également une zone dans laquelle les aérodynamiciens vont chercher à améliorer le flux d'air en vue d'alimenter l'aileron arrière avec un flux plus propre. Ferrari proposa en 2004 une solution qui sera adoptée par la concurrence. Le concept consiste à installer un petit aileron au niveau de l'entrée d'air supérieure. Cet aileron changera de taille en fonction des circuits. Certaines équipes iront même jusqu'à en mettre deux l'un derrière l'autre. McLaren en 2005 puis BMW en 2006 poussent le concept encore plus loin en transformant le petit aileron en corne.



Figure 6-68 : Le concept d'aileron supérieur sur la Ferrari F2004 (Photo PH Cahier)



Figure 6-69 : Les cornes de la McLaren MP4-20 de 2005 (Photo PH Cahier)



6.3 Evolution de la Partie Arrière

6.3.1 Les années 50

Les moteurs étant à cette époque situés à l'avant, l'arrière des monoplaces était très court. Deux tendances se côtoyaient alors : soit l'arrière retombait immédiatement pour finir en pointe comme sur la BRM V16, soit il était de forme bombée comme sur la Vanwall VW10 de 1958. L'arrière ne contenait dans les années 1950 que le réservoir, les suspensions arrière et l'arbre de transmission. Aucun appendice aérodynamique n'y figurait.

Cependant, en 1958, une première révolution eut lieu : la première monoplace à moteur central arrière fit son apparition en course. La Cooper T45, alignée par John Cooper en championnat du Monde, s'imposa rapidement et devint ainsi l'initiatrice d'une toute nouvelle architecture en F1. Terminés les longs capots avant et les parties arrière courtes. Le moteur de cette Cooper était situé juste derrière le pilote et devant les suspensions arrière. Les réservoirs étaient alors déplacés sur les flancs de la monoplace. La forme des Formule 1 allait commencer à changer, cependant aucun appendice aérodynamique ne fit son apparition.



Figure 6-70 : BRM V16 et Vanwall



Deux formes arrière typiques des années 1950 apparaissent sur la photo précédente : la forme en pointe de la BRM V16 au premier plan et celle bombée qui équipait, entre autres, les Vanwall.



Figure 6-71 : L'arrière de la Cooper T45 de 1958

La photo ci-dessus montre la Formule 1 qui a révolutionné la structure et donc l'aérodynamisme des monoplaces. La position centrale arrière du moteur a dès lors complètement changé la forme des Formule 1.

Néanmoins, la Formule 1 des années 50 fut incontestablement la célèbre flèche d'argent Mercedes W196.

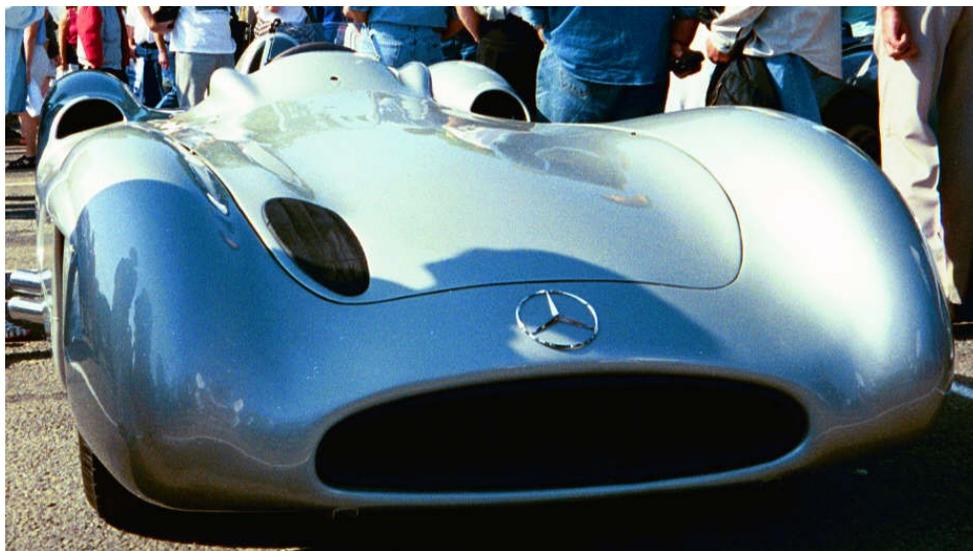


Figure 6-72 : La Mercedes W196 de 1954

Après la Seconde Guerre Mondiale dont elle était sortie très affaiblie, l'Allemagne mit du temps à revenir dans le sport automobile dans lequel elle était tant impliquée avant la guerre. Ainsi, ce n'est qu'en 1952, lorsque l'économie fut plus favorable et les usines reconstruites, que le constructeur Mercedes décida de préparer son entrée dans le championnat du monde de Formule 1, créé en 1950. Les principaux dirigeants du projet furent Rudolf Uhlenhaut, ingénieur chef du bureau d'études, et Fritz Nallinger, directeur technique. Ils avaient pour objectif de faire revenir avec succès Mercedes au plus haut niveau de la course automobile



mondiale. La monoplace, dessinée en 1952, était directement inspirée de la Mercedes " W125 Avus " entièrement carrossée de 1938 qui avait battu un record de vitesse à quatre cent trente deux kilomètres par heure. D'où l'appellation qui fut donnée à la nouvelle monoplace : Mercedes W196 " Stromlinien ", qui signifie " profilée " en Allemand.

L'intérêt d'étudier cette monoplace réside dans le fait que ce fut la première Formule 1 conçue avec des préoccupations d'ordre aérodynamiques et étudiée en soufflerie. Seule une très grande firme, comme Mercedes, pouvait se permettre de disposer d'un tel outil de travail : la Mercedes W196 Stromlinien fut ainsi développée et mise au point en soufflerie en 1953. Les essais sur piste se multiplièrent, Rudolf Uhlenhaut effectuant lui-même quelques essais avec succès en Avril 1954. La firme décida de faire son retour en compétition quarante ans après son triplé historique à Lyon, en 1914. Trois Mercedes Stromlinien prirent ainsi le départ du Grand Prix de France de Formule 1 à Reims le 4 Juillet 1954 : deux d'entre elles terminèrent aux deux premières places avec une grande aisance.



Figure 6-73 : La Mercedes W196 au GP de France à Reims en 1954

La principale caractéristique aérodynamique de la Mercedes Stromlinien était sa carrosserie très enveloppante qui passait au-dessus des roues (à l'époque le carénage des roues des F1 était autorisé par le règlement technique). L'objectif était de diminuer fortement la traînée et la portance créées par la rotation des roues lorsqu'elles étaient exposées au flux d'air. L'influence des roues, qui participaient à plus de la moitié de la traînée totale de la monoplace, était prépondérante dans la valeur du coefficient de



pénétration dans l'air qui devait être le plus petit possible. Pour dévier l'air au-dessus des passages de roues avant où se formaient des turbulences, les ingénieurs disposèrent une dérive sur chaque aile avant de la monoplace.

La Mercedes était fortement inspirée des travaux de Paul Jaray (1889-1974), un des premiers ingénieurs à avoir étudié l'influence de la forme de la carrosserie sur la traînée d'un véhicule. En effet, la Mercedes W196 Stromlinien était longue et basse (sa hauteur totale n'était que de 1,04 mètres) ; les travaux de Jaray avaient démontré la diminution de traînée engendrée par ces caractéristiques. De plus, Jaray avait démontré dans ses études le rôle primordial de la forme de la carrosserie à l'arrière d'un véhicule. Dans l'idéal, le flux devait quitter le véhicule sans turbulences. Inspirée des formes de carrosserie brevetées par Jaray en 1923, la carrosserie de la Mercedes se terminait en une forme pointue mais légèrement arrondie. Ce dernier point était révélateur de la ligne générale de la monoplace : elle était dépourvue de tout angle vif.



Figure 6-74 : Les Mercedes W196

Afin d'installer le pilote dans la position la plus basse possible et améliorer ainsi la pénétration dans l'air et la tenue de route, le moteur huit cylindres en ligne de la Mercedes était incliné de 53 degrés vers la droite. Cela permettait de placer le siège du pilote à côté des organes de transmission et non plus sur ces organes comme les autres concurrents. Mais l'inclinaison du moteur permettait également d'obtenir un capot plongeant vers l'avant. Le capot même devenait ainsi générateur de déportance du fait de son inclinaison particulière face au flux d'air. Vue de face, la Mercedes W196 Stromlinien disposait alors d'une partie centrale basse par rapport aux côtés gauche et droit où se situaient les roues. La surface frontale, aussi appelée maître couple, était ainsi réduite ce qui diminuait le coefficient de pénétration dans l'air (le C_x) qui



était, en partie, proportionnel à cette surface. Le tableau de bord et le volant étaient situés au-dessus de cette ligne avant très basse ; afin d'éviter ces irrégularités, un carénage muni d'un petit saute vent en verre était situé à l'avant de l'habitacle et était de même largeur que ce dernier. Ainsi, le flux d'air était dévié de part et d'autre de l'ouverture de l'habitacle génératrice de turbulences, et également par-dessus cette ouverture. Par conséquent, les turbulences provoquées par l'habitacle et le pilote étaient diminuées et le confort de ce dernier fut amélioré, ce qui constituait également un facteur important. De plus, ce carénage comportait des rétroviseurs profilés dont l'avantage était de diminuer la traînée par rapport à des rétroviseurs non profilés. Cependant, la carrosserie très fluide de la Mercedes W196 Stromlinien comportait plusieurs prises d'air nécessaires pour le bon fonctionnement de la monoplace, mais qui étaient sources de perturbations déjà très préoccupantes pour les ingénieurs de l'époque.



Figure 6-75 : Les prises d'air de la W196

- La grille située à l'avant, destinée au fonctionnement du convecteur du moteur où circule le liquide de refroidissement.
- Une autre grille, située au-dessus et à droite de la précédente. L'air qui était admis par cette grille circulait ensuite dans la " chambre de tranquillisation " située sous la carrosserie. La présence de cette chambre de tranquillisation, qui était un conduit d'admission d'air pour les huit cylindres du moteur, était également la cause du léger renflement de la carrosserie sur le côté droit du capot moteur.
- Les deux extracteurs de l'air chaud provenant du moteur. Ils étaient situés sur les deux flancs de la monoplace et les tubulures d'échappement sortaient du côté droit par ces extracteurs.
- la prise d'air devant le pilote destinée à refroidir l'habitacle. Elle a été remplacée après les premières courses par un autre système qui générait moins de turbulences.
- les deux prises d'air situées de part et d'autre du pilote destinées à refroidir les freins.
- Quatre autres prises d'air étaient situées derrière le pilote ; elles étaient destinées au refroidissement des freins et de l'huile de la boîte de vitesses, située à l'arrière de la monoplace.



Figure 6-76 : Les prises d'air à l'arrière de la W196

L'expansion en hauteur de la carrosserie juste derrière le pilote n'atteignait pas le haut de son casque mais contribuait tout de même à réduire les turbulences derrière sa tête. Cette expansion, qui n'affectait pas le flux d'air frappant la monoplace de face, contenait une partie du réservoir d'essence. Afin de réduire les tourbillons d'air dus aux irrégularités sous la monoplace, le soubassement était constitué d'un fond plat. Il participait à la bonne tenue de route de la Mercedes et incliné vers le haut dans sa partie supérieure, ce fond plat jouait également le rôle d'extracteur d'air.

Mais la visibilité aux trois quarts avants de la Mercedes profilée était faible du fait de sa carrosserie ; cette faiblesse fut révélée dès sa deuxième course, sur un circuit sinueux, où elle fut battue par ses concurrentes plus classiques. Elle éprouvait de plus des difficultés dans les enchaînements de virages serrés à cause de sa carrosserie encombrante. C'est pour cela qu'elle ne fût employée que sur les circuits très rapides, introduisant donc un processus nouveau : le changement de configuration aérodynamique d'une monoplace de Formule 1 selon le circuit où elle est engagée.

Destinée aux circuits de basses et moyennes vitesses, une version plus conventionnelle, sans carrosserie enveloppante (voir photo ci-dessous), fit ainsi son apparition dès le troisième grand prix des Mercedes W196. Les Mercedes W196, dans leurs deux versions, remportèrent neuf des douze courses auxquelles elles participèrent et permirent à Juan-Manuel Fangio de devenir deux fois champion du monde en 1954 et 1955.



Figure 6-77 : La Mercedes W196 dans une version sans carrosserie enveloppante (Photo B. Cahier)



6.3.2 Les années 60

L'architecture à moteur central arrière allait réellement prendre place au début des années 1960. Dominés par les Cooper, tous les constructeurs se mirent à fabriquer des monoplaces basses, conséquence de la position du moteur à l'arrière. Toute la boîte de vitesses était située dans le prolongement du moteur, alors qu'avec les moteurs avant, une partie de la transmission passait sous le pilote d'où une hauteur totale plus importante.

Les monoplaces étant plus basses, l'air était désormais moins détourné qu'auparavant. Les voitures avaient donc une plus faible résistance à l'air à affronter. Le moteur en position centrale arrière était recouvert d'un capot moteur ou était laissé à l'air libre, selon les équipes. Dans ce dernier cas, des turbulences supplémentaires venaient s'ajouter autour de la partie arrière : les trompettes d'admission dirigées verticalement, les collecteurs d'échappements, les grosses durits ou les fils d'allumage étaient autant d'éléments perturbateurs du flux d'air, donc du comportement de la monoplace lorsqu'ils n'étaient pas recouverts. La plupart des moteurs étaient laissés à l'air libre tout simplement pour favoriser les échanges thermiques avec l'air frais et ainsi éviter toute surchauffe, mais aussi pour une question de poids et pour intervenir plus rapidement sur les moteurs. Cependant, qu'il y ait un capot moteur ou non, certains éléments perturbaient le flux d'air : les extrémités très longues des échappements, la boîte de vitesses, donc l'arbre moteur et surtout les suspensions qui étaient situées en plein passage de l'air. Amortisseurs, barres antiroulis, triangles et également système de freinage étaient sources de turbulences à côté de chacune des roues non carénées. Rappelons que ces dernières sont le principal élément perturbateur du flux d'air autour d'une Formule 1.



Figure 6-78 : L'arrière de la Lotus 25 de 1962-63



On remarque sur la photo précédente tous les éléments laissés à l'air libre : les suspensions, les échappements et la boîte de vitesses. La carrosserie était limitée au strict minimum ; la légèreté primait avant tout.



Figure 6-79 : Les arrières typiques des F1 en 1966 (Photo Bernard Cahier)

Afin d'améliorer la stabilité et l'adhérence des roues arrière motrices, certaines Formule 1 furent équipées d'un aileron arrière en 1968. Celui-ci, placé à l'arrière du véhicule, exerçait une charge aérodynamique (force verticale dirigée vers le sol) si importante qu'il déséquilibrait le véhicule.

En 1967 et 1968, les constructeurs de Formule 1 ont testé cette innovation sur leurs monoplaces. Afin de diminuer le déséquilibre de la monoplace, les constructeurs ajoutèrent de petits ailerons à l'avant des monoplaces. Cela permettait de compenser en partie l'énorme appui à l'arrière. L'aileron arrière en Formule 1 est depuis sa création un profil d'aile d'avion inversé. De ce fait, la pression est plus élevée au-dessus de l'aileron que sous celui-ci. La dépression ainsi créée sous l'aileron est à l'origine d'une force déportante, qui a donc tendance à plaquer le véhicule au sol (au contraire de la portance d'un avion qui le fait s'élever).

Dans le but de recevoir un flux d'air accompagné du moins de turbulences possible, l'aileron arrière était surélevé par rapport à la monoplace. Il était soit fixé sur le moteur, juste derrière le pilote, soit relié aux suspensions arrières par l'intermédiaire de deux barres.



Figure 6-80 : McLaren M7/A de 1968

On peut voir ci-dessus un des deux types d'aileron de la fin des années 1960 : le pilote pouvait le régler par un levier depuis son habitacle. L'écurie Ferrari, équipée du même type d'aileron, faisait varier son incidence en fonction du régime moteur.



Figure 6-81 : Lotus 49-B de 1968-69

La photo ci-dessus illustre une Formule 1 dont l'aileron arrière était fixé sur les suspensions. Cette dernière solution permettait de contourner un problème d'ordre général important : plus d'appui est ajouté sur une voiture de course, plus ses ressorts de suspensions doivent être durcis pour que la caisse n'oscille pas en hauteur. Or, un durcissement des ressorts pénalisait la motricité (capacité de passer la puissance au sol par le biais des pneumatiques) et occasionnait des pertes d'adhérence sur les pistes



bosselées. Mais avec ce montage, le problème était ainsi effacé. L'inclinaison de l'aileron variait selon que la monoplace était en ligne droite ou négociait un virage. Le montage était ajusté pour que l'aileron fournisse très peu d'appui dans les lignes droites, ce qui annulait alors la variation de la garde au sol de la monoplace. De plus, cela permettait une meilleure vitesse de pointe en ligne droite, puisque l'aileron à ce moment très peu incliné diminuait la résistance à l'air. Les ressorts n'avaient plus besoin d'être durcis. Par un montage astucieux, les ingénieurs ont réussi à faire varier l'incidence de l'aileron du côté de la roue qui remontait par rapport au corps de la voiture dans un virage : par la suite, cette roue, au lieu de se décoller du sol, était contrainte à rester plaquée au sol et redescendait donc par rapport au corps de la monoplace. Ainsi, l'adhérence de cette roue était beaucoup plus élevée que celle d'une monoplace étant dépourvue de ce système. La motricité et la vitesse de passage en virage étaient donc meilleures. Mais à la suite d'un grave accident, dû à ce montage, survenu sur le circuit de Barcelone en 1969, le système de l'aileron haut placé fut interdit.

Afin de synthétiser ce que les années 60 ont apporté à l'aérodynamique des F1 laissez moi vous présenter en détail la Lotus 49 car je pense qu'elle illustre bien ce qui s'est passé au cours de cette décennie.



Figure 6-82 : L'arrière de la Lotus 49 de 1967 (Photo Bernard Cahier)



La Lotus 49 fut créée par Colin Chapman et son ingénieur Maurice Philippe en 1967. Ces deux hommes jouèrent un rôle déterminant dans l'aérodynamisme en Formule 1 dans le sens où :

- ils furent les premiers à équiper une monoplace de grands prix d'appendices aérodynamiques ; ils montrèrent la voie à suivre aux autres concurrents qui montèrent à leur tour des appendices, différents les uns des autres, sur les monoplaces
- ils apportèrent de nouveaux principes dans les années 1970 concernant l'intégration de l'aérodynamisme dans la conception d'une Formule 1
- ils furent ceux qui poussèrent le plus loin les innovations aérodynamiques

La silhouette de la Lotus 49 était typique de celle des monoplaces des années 1960. La 49B, une évolution de la 49, fut la première à avoir été équipée d'un aileron, d'où l'intérêt de l'étude de cette Formule 1.

Légère grâce à sa carrosserie en alliage léger et très efficace dès les premiers roulages d'après ses pilotes, la Lotus 49 s'imposa dès son premier grand prix en Hollande. Du fait de son moteur placé derrière le pilote et fixé directement à la coque (ce qui était un concept alors nouveau), la Lotus 49 était très basse, tout comme ses concurrentes ; cette faible hauteur (moins d'un mètre) conférait aux monoplaces des années 1960 une pénétration dans l'air théoriquement meilleure que dans les années 1950 (moteur à l'avant). Seules les roues diminuaient la performance aérodynamique, puisque le carénage de celles-ci était interdit depuis 1961. De plus, les grands débattements de suspension qui étaient nécessaires à l'époque du fait des performances limitées des pneumatiques ordonnaient aux concepteurs une garde au sol qui n'a rien à voir avec les standards actuels. L'effet de sol, étudié dès 1975 par Colin Chapman, était encore inconnu du monde de la Formule 1. Cependant, le soubassement de la Lotus 49 était déjà plat, mais seulement à l'avant. La disposition du moteur empêchait l'adjonction d'un fond plat à l'arrière. Mais les concepteurs s'étaient attachés à ne rien faire passer sous l'avant de la monoplace afin de ne pas perturber encore plus le flux d'air à cet endroit.

Les principales caractéristiques de la carrosserie de la Lotus 49 étaient :

- son museau constitué d'une grande prise d'air grillagée et par conséquent peu aérodynamique, la prise d'air étant source de turbulences. Cette prise d'air était destinée au fonctionnement du convecteur du moteur, convecteur placé devant les pieds du pilote et dans lequel circulait le liquide de refroidissement
- une petite prise d'air située au-dessus des jambes du pilote, destinée à diminuer la température très élevée de l'habitacle, ce qui était un des principaux défauts de la Lotus 49
- un profilage de la carrosserie devant et derrière la fixation du bras supérieur de la suspension avant. Cette caractéristique est indiquée par les flèches rouges sur la photo ci-dessous
- une bulle profilée particulière entourant le pilote ; les Lotus en étaient équipées depuis 1963. Comme la photographie le montre, cette bulle était conçue de telle façon à canaliser l'air et à le transformer, via un passage rétréci, en un jet d'air puissant qui se formait verticalement devant la figure du pilote. Le courant d'air principal horizontal était alors dévié au-dessus de l'habitacle, ainsi que la poussière qu'il pouvait porter. Le confort du pilote était donc amélioré et le pare-brise pouvait être abaissé : la circulation du flux d'air servait de pare-brise virtuel et la visibilité du pilote s'en trouvait améliorée



- les éléments de suspension ainsi que le système de freinage qui étaient situés, à l'avant comme à l'arrière, en plein passage du flux d'air. Cependant, les concepteurs logèrent les amortisseurs avant dans la coque, ce qui perturbait moins l'air par rapport à des monoplaces à amortisseurs externes
- le moteur complètement découvert et par conséquent source de turbulences



Figure 6-83 : Lotus 49

Mais la concurrence, notamment de la part des monoplaces Matra-Ford, était de plus en plus pressante et Colin Chapman apporta une nouvelle innovation, d'ordre aérodynamique ; un capot moteur qui intégrait en sa partie terminale un déflecteur d'air fit son apparition au Grand Prix de Monaco. Le but était de créer un appui puisque le flux d'air qui rencontrait cette partie relevée avait tendance à plaquer la voiture vers le sol. L'objectif final était d'améliorer le passage de la puissance au sol et la tenue de route du train arrière. Dans le même objectif de créer un appui, des profils d'aile d'avion inversée étaient placés de chaque côté du museau. Ce dernier était abaissé par rapport à la Lotus 49 originelle ; toutes ces innovations caractérisaient la version B de la Lotus 49.



Figure 6-84 : Lotus 49-B (Photo Bernard Cahier)

Mais le système à l'arrière ne créa pas suffisamment d'appui. Par conséquent, une nouvelle solution devait être trouvée ; la Lotus 49 fut à nouveau métamorphosée avec l'ajout d'un profil d'aile d'avion inversée à l'arrière de la monoplace. Afin de recevoir un flux le moins turbulent possible et ainsi fournir une meilleure déportance, l'aileron arrière fut placé très haut. De plus, afin d'éviter des variations de garde au sol importantes, l'aileron était fixé sur les porte moyeux des roues arrières par l'intermédiaire de deux barres et travaillait ainsi en accord avec les suspensions. Les concepteurs, par cette fixation, évitaient le phénomène suivant qui intervient si l'aileron arrière n'est pas relié aux suspensions :

- l'appui aérodynamique croît avec le carré de la vitesse. Ainsi, lorsque la monoplace accélérât, sa hauteur arrière par rapport au sol diminuait car la charge aérodynamique provoquée par l'aileron augmentait
- la hauteur à l'arrière devenait tellement faible que le débit d'air sous la monoplace était fortement diminué. Le débit était tellement diminué que la vitesse de l'écoulement sous la monoplace commença également à chuter
- l'application du théorème de Bernoulli entre le sol et le soubassement de la monoplace aboutit au phénomène suivant : si la vitesse de l'écoulement était diminuée, alors la pression sous la monoplace augmentait
- par conséquent, le fond de la monoplace se relevait, ce qui était contraire au phénomène recherché à l'origine : plaquer la monoplace au sol.



Les ingénieurs confrontés à ce problème durcissaient les ressorts de la monoplace afin que celle-ci n'oscille plus. Mais la monoplace n'était pas conçue à l'origine pour fonctionner avec des ressorts durs et sa tenue de route s'en trouvait affectée. Cependant, avec le montage de l'aileron sur les porte moyeux, l'incidence du profil d'aile variait continuellement (voir pages précédentes) et les ressorts n'avaient plus besoin d'être durcis.



Figure 6-85 : Lotus 49-B avec aileron surélevé à l'avant - 1969

Dès 1969, un aileron surélevé à l'avant et relié aux suspensions apparut également avec les objectifs d'équilibrer l'avant de la monoplace par rapport à l'arrière et d'éviter les mouvements d'oscillation (photo ci-dessus). Mais la rupture de ces ailerons au Grand Prix d'Espagne 1969 sur les deux Lotus 49 B de l'équipe officielle entraîna leur interdiction ; les calculs des ingénieurs démontrèrent que les suspensions des Lotus 49 B avaient dû supporter l'équivalent de 350 kg supplémentaires apportés par les ailerons.



Figure 6-86 : Lotus 49-B - 1969



6.3.3 Les années 70

Après l'interdiction des ailerons surélevés en 1969, les ingénieurs ont dû se baser sur de nouvelles règles pour concevoir les monoplaces. L'importance prouvée de l'aérodynamique a conduit les techniciens dans une nouvelle direction. En effet, dès le début des années 1970, l'approche globale de la conception d'une Formule 1 a été fondée sur l'aérodynamique. Alors que dans les années 1960, les appendices étaient ajoutés à une structure préexistante, les monoplaces des années 1970 ont été dès les premières esquisses conçues autour de l'aérodynamique. Par conséquent, les innovations ont été nombreuses, notamment au niveau de la partie arrière.

Durant cette décennie, l'aileron arrière a été soumis à trois tendances :

Tout d'abord, jusqu'en 1972-1973, les monoplaces ont été équipées des stabilisateurs apparus en 1969. Ces appendices aérodynamiques, accolés au moteur, sont dans le même plan horizontal que le casque du pilote et sont situés entre les roues arrière. Pour un meilleur ajustement et une meilleure gestion des appuis, ces stabilisateurs étaient souvent multi plans. Cette nouvelle structure permettait surtout de fournir trois fois plus d'appui aérodynamique à la monoplace par rapport à un aileron surélevé.



Figure 6-87 : La Tyrrell 003 de 1971



L'aileron arrière biplan, soit le stabilisateur, qui équipe la monoplace de la photographie précédente était typique du début des années 1970 ; on remarque également l'absence de carrosserie à l'arrière.

Mais les études sur l'aérodynamique progressaient et dès 1972, l'aileron arrière a été de plus en plus isolé derrière le moteur. Les analyses des ingénieurs ont démontré que l'aileron, placé derrière les roues arrière et relié à la monoplace par des supports, fournissait un meilleur appui aérodynamique qu'auparavant. Afin de diminuer le nombre d'éléments perturbateurs du flux d'air et pour une question de légèreté, certaines monoplaces étaient équipées d'un unique pilier central supportant tout l'aileron. D'autres innovations apparurent : afin d'augmenter la surface génératrice de déportance, les plans de l'aileron furent dessinés en forme de V. Dans l'objectif de mieux lutter contre les tourbillons se formant aux extrémités gauche et droite des plans de l'aileron, les dérives latérales encadrant l'aileron évoluèrent également ; elles furent agrandies et leurs formes étaient diverses.



Figure 6-88 : La McLaren M23 de 1976

On voit clairement sur cette photo la forme particulière de la carrosserie devant les roues arrière que nous allons expliquer ci-après.

Avec l'avènement de l'effet de sol en 1978, les dérives latérales ont pris de telles proportions qu'un nouveau type d'aileron a fait son apparition. Afin de continuer à canaliser l'air précédemment aspiré sous la partie centrale (effet de sol), les dérives latérales ont été prolongées vers le bas et vers l'arrière (voir dessin de la Lotus 79 ci-dessous). Cette forme d'aileron a été avant-gardiste dans le sens où les ailerons



actuels s'en approchent beaucoup.

Au fur et à mesure que les études en soufflerie ont progressé, de plus en plus de monoplaces ont été munies de carrosseries assurant différentes fonctions. Avec l'avènement de l'effet de sol (ailes d'avion inversées dans le soubassement de la monoplace), c'est également la carrosserie toute entière qui a joué un rôle dans l'appui généré par les monoplaces. Les organes arrière tels le moteur et les suspensions ont été "cachés" par rapport au flux d'air par une carrosserie très enveloppante. Cette fonction de la carrosserie a diminué les turbulences et par là même la traînée générale de la monoplace. De plus, la carrosserie étant légèrement inclinée, elle avait un rôle déporteur. La partie terminale de la carrosserie, juste devant les roues arrière, a confirmé cette recherche de la déportance et donc de vitesses plus élevées en virage. Cette forme de la carrosserie très incurvée vers le haut, sur laquelle venait s'appuyer l'air, permettait également au flux d'éviter une partie des roues arrière génératrices de perturbations.



Figure 6-89 : La Lotus 79 de 1978

Sur cette monoplace à effet de sol, deux caractéristiques importantes de la partie arrière apparaissent: la forme relevée de la carrosserie devant les roues arrière et le nouveau type de dérives latérales de l'aileron arrière, beaucoup plus grandes, mais pas adoptées par la majorité des équipes.



Figure 6-90 : Aileron arrière monté sur pilier central - Ferrari 312T3 de 1978 (Photo Bernard Cahier)



Figure 6-91 : Aileron arrière surdimensionné sur la Renault RS01 de 1977



Figure 6-92 : Aileron arrière de la Tyrrell 006 de 1973 (Photo Paul-Henri Cahier)

On ne peut évoquer les évolutions aérodynamiques des années 70 sans parler de la célèbre Brabham BT46B que la presse anglophone avait baptisé « the fan-car ». De toutes les voitures ayant triomphé en F1, la Brabham BT46B est celle qui a eu la carrière la plus courte. Elle ne fut présente qu'une seule fois en championnat ! Sur cette monoplace, Gordon Murray avait adapté une turbine qui créait un effet de sol plus important que celui de la Lotus de Colin Chapman. La voiture était comme clouée au sol, et Niki Lauda avait dû repenser sa manière de piloter dans les virages, car en accélérant, il se retrouvait comme sur des rails. Lors du GP de Suède, Lauda et Watson se qualifièrent respectivement 3ème et 2ème derrière la Lotus d'Andretti. En course, Lauda dépassa Andretti au 39ème tour, et s'imposa avec plus d'une demi-minute d'avance, avec au passage le meilleur tour en course. Seulement voilà, la Brabham BT46B transgressait le point du règlement sur la mobilité des éléments aérodynamiques. La victoire fut laissée à Lauda, mais la monoplace ne fut plus jamais autorisée à apparaître en course.



Figure 6-93 : La Brabham BT46B



6.3.4 Les années 80

La fin des années 1970 a été marquée par l'écrasante domination des Lotus 78/79 à effet de sol dont se sont inspirés d'autres constructeurs.

Les performances ont atteint un tel niveau grâce à l'accroissement d'adhérence que le règlement a imposé dès 1983 des corrections interdisant les jupes aérodynamiques afin de limiter l'effet de sol. Pour compenser les pertes dues à ces corrections, les constructeurs ont cherché des gains de performance à tous les niveaux.

Le fond de la voiture : Dans le but de créer une dépression à l'arrière de la monoplace, la forme en aile d'avion inversée a été conservée seulement à l'arrière. Il faut rappeler que cette forme a désormais été interdite dans la partie centrale de la monoplace, ainsi que les jupes latérales : les pontons latéraux déporteurs ont définitivement disparu à partir de 1983 laissant place au fond plat. La forme relevée du soubassement de la monoplace était désormais située à l'extrémité arrière de la Formule 1, et non plus devant les roues arrière et cachée sous la carrosserie comme c'était le cas à la fin des années 1970. Les constructeurs commencèrent à fixer des lamelles verticales à ce soubassement afin de mieux diriger et d'accélérer l'air. La dépression engendrée était cependant beaucoup moins élevée qu'avec les voitures à effet de sol autorisées jusqu'à fin 1982. Les ingénieurs allaient donc se concentrer sur d'autres éléments de la monoplace.

Carrosserie à l'arrière de la monoplace : Au début des années 80, la plupart des monoplaces conservent une carrosserie très enveloppante à l'arrière, lorsque l'effet de sol était encore autorisé. Cette surface génératrice d'appui avait l'avantage de cacher le moteur, les collecteurs d'échappement et les suspensions face aux flux d'air, soit autant d'éléments perturbateurs du flux d'air en moins. Cependant, certaines monoplaces ne possédaient pas de carrosserie arrière, par souci de légèreté et de "respiration" du moteur. Dès 1983 et l'interdiction de l'effet de sol, la forme de la carrosserie arrière a été changée. L'ère des pontons latéraux déporteurs étant révolue, de nouvelles formes ont alors pu être introduites. Les études menées en soufflerie ont alors démontré que le rendement aérodynamique de la monoplace était amélioré grâce à une carrosserie très étroite à l'arrière. Ainsi, comme on le voit sur la photo ci-dessous, l'air pouvait dorénavant circuler entre les roues arrière et la carrosserie, dans un premier temps sur le soubassement puis sur la partie relevée du fond plat à l'extrême arrière de la monoplace. Cela engendrait un appui supplémentaire, malgré les perturbations dues aux triangles de suspension et le travail aérodynamique de l'aileron arrière était également amélioré.



Figure 6-94 : La McLaren MP4-2 de 1984

Nous pouvons observer sur cette illustration l'étroitesse de la carrosserie à l'arrière de la monoplace.

L'aileron arrière : Dans les premières années de cette décennie, l'aileron arrière tenu par un pilier central équipait la majorité des monoplaces. Cet aileron était équipé de petites dérives latérales et apparaissait fin lorsqu'il était vu de face. Puisque l'effet de sol, encore autorisé, fournissait énormément d'appui, la charge aérodynamique procurée par l'aileron arrière pouvait être diminuée. Cet appendice ne servait plus qu'à équilibrer la monoplace et son très faible angle d'attaque diminuait la traînée et favorisait donc les vitesses de pointe.



Figure 6-95 : Ferrari 126C2 de 1982 (Photo Paul-Henri Cahier)



Dès 1983, l'effet de sol étant interdit, l'appui aérodynamique perdu devait être rattrapé sur d'autres éléments de la monoplace. De plus, les Formule 1 étaient de plus en plus équipées par un moteur turbocompressé. Le problème de toutes les voitures propulsées par un moteur Turbo consistait à transférer leur énorme puissance sur la piste avec le moins de patinage possible. Une solution était d'accroître l'appui sur les roues arrière. Ainsi, les plans de l'aileron, dont le nombre pouvait s'élever à trois, étaient redressés par rapport à leurs prédécesseurs. L'air qui provenait sur l'aileron était alors plus détourné par rapport à la période où les plans étaient peu inclinés (début des années 1980). La déportance ainsi créée était accrue et la monoplace disposait alors d'une meilleure adhérence. D'autre part, un appendice aérodynamique était ajouté à l'extérieur de chaque dérive latérale. Composé de plusieurs volets, il permettait d'accroître encore la déportance sur les roues arrière motrices pour lutter contre le patinage (voir photo ci-dessous).



Figure 6-96 : La Williams FW09 de 1984

Les dérives latérales encadrant les plans de l'aileron furent agrandies en hauteur et en longueur sur la totalité des monoplaces. Les buts de cette modification étaient :

- de préserver des turbulences provenant des roues arrière le flux d'air qui était extrait du soubassement de la monoplace. La tenue de route était en partie conditionnée par la qualité de ce flux ;
- d'améliorer le travail de l'aileron arrière en diminuant les tourbillons d'air formés autour de celui-ci.

Afin d'améliorer le flux d'air dans la partie centrale de l'aileron, le support d'aileron qui liait le corps de la monoplace à l'aileron a subi d'importantes modifications dès 1984. Le pilier central disparut sur certaines monoplaces au profit d'un support horizontal de forme cylindrique ou plane. Cependant, les équipes de pointe restèrent conservatrices et gardèrent le pilier central vertical en tant que support d'aileron, tout en testant les autres solutions en soufflerie.



Figure 6-97 : La McLaren MP4-2 de 1984 (Photo Paul-Henri Cahier)



Figure 6-98 : La Lotus 98T de 1986 (Photo Paul-Henri Cahier)



Figure 6-99 : La Ferrari 640 de 1989 (Photo Paul-Henri Cahier)



6.3.5 Les années 90

A la fin des années 1980, les performances des monoplaces ont atteint un tel niveau que la fédération a décidé d'interdire les moteurs turbocompressés en 1989. Cependant, les ingénieurs ont toujours cherché à rendre leurs monoplaces plus performantes ; par conséquent, les années 1990 ont été animées par les nombreuses modifications du règlement qui visaient à limiter les nombreuses innovations, aérodynamiques entre autres.

Le soubassement de la monoplace : Dans la continuité de la décennie précédente, le soubassement a été conservé incliné vers le haut. A cette forme, destinée à extraire l'air du dessous de la monoplace, ont été ajoutées des lamelles perpendiculaires au sol. Ces dernières ont eu pour but de créer des "couloirs Venturi" (voir photo ci-dessous) sur toute la largeur du soubassement arrière. L'air qui provenait de la partie centrale de la monoplace était accéléré dans ces couloirs (d'après l'équation de continuité) ; ainsi, d'après le théorème de Bernoulli, l'accélération de l'écoulement entraînait une dépression. Par conséquent, l'arrière de la monoplace était comme plaqué au sol à partir d'une certaine vitesse. L'adhérence au niveau des roues arrière motrices a été améliorée grâce à ce dispositif appelé extracteur ou encore diffuseur. A la fin des années 1990, toutes les monoplaces étaient équipées d'un couloir central disposé en retrait des roues arrière et de plusieurs couloirs latéraux au niveau des roues arrière.



Figure 6-100 : La Williams FW13 de 1991



On peut observer sur cette photo l'extracteur arrière composé de trois " couloirs Venturi " et le plan horizontal profilé (portant la mention Canon) qui faisait également office de support d'aileron.

L'aileron arrière : Les grandes dérives latérales utilisées sur toutes les Formule 1 à la fin des années 1980 ont permis deux évolutions majeures durant les années 1990.

Le support d'aileron horizontal, montré sur la photo précédente, a été préféré au pilier central pour deux raisons :

- le pilier central vertical soumettait l'air à des turbulences dans la partie centrale de l'aileron
- le support horizontal constituait en lui-même un élément aérodynamique puisqu'il était profilé

La forme de ce support variait selon les tests en soufflerie effectués par chaque écurie. Sur les circuits lents nécessitant beaucoup d'appui, la grande hauteur des dérives latérales a également permis de placer plusieurs plans profilés sur toute la hauteur de l'aileron. Ainsi, l'aileron arrière pouvait comporter jusqu'à sept ou huit plans profilés dont l'inclinaison était réglable pour modifier l'appui aérodynamique sur les roues arrière.

En 1993, la largeur des pneus a été diminuée avec deux objectifs :

- rendre les F1 plus glissantes et ainsi les courses plus spectaculaires
- diminuer les vitesses de passage en virage, donc améliorer la sécurité

Le manque de motricité qui a été une des conséquences de ce changement a amené les ingénieurs à accroître l'appui à l'arrière de la monoplace. La solution la plus employée a été l'ajout d'un plan profilé surélevé et avancé par rapport à l'aileron arrière. Cette solution a été interdite courant 1995, de même que l'anti-patinage ; les pilotes ont eu encore plus de mal à passer la puissance au sol et ont dû réduire leur vitesse en courbe. Mais les aérodynamiciens ont immédiatement réagi en exploitant à leur avantage une imprécision du règlement. Les dérives verticales ont été cette fois-ci prolongées dans la partie inférieure de l'aileron (voir encerclé rouge sur la photo ci-dessous).

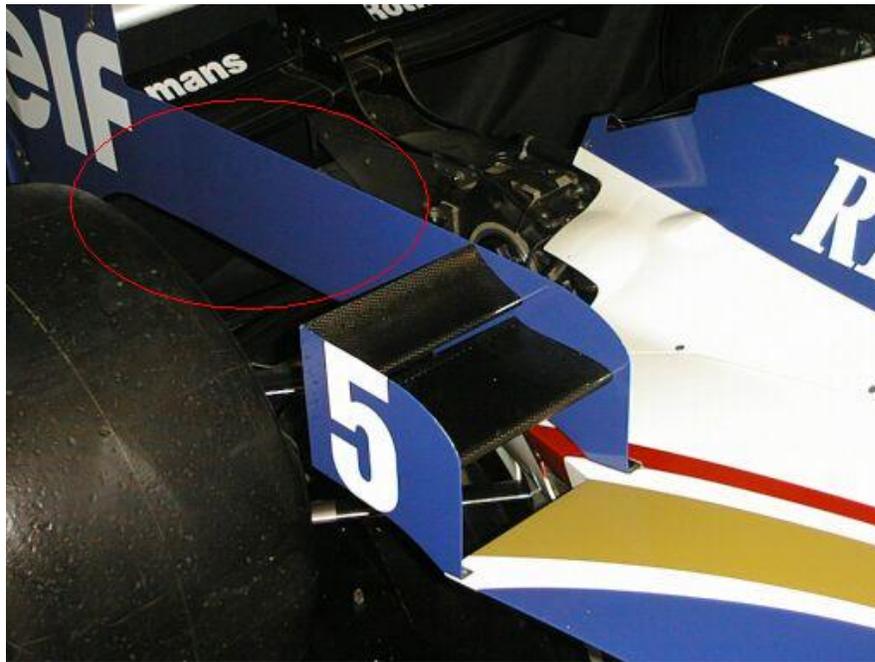


Figure 6-101 : La Williams FW18 de 1996

Cette photo illustre l'exemple typique d'un mini aileron situé devant la roue arrière en 1996. Il est important de noter que la partie encadrée ne comportait plus cet appendice générateur de déportance, alors qu'en 1995, un mini aileron était aussi placé à côté de la roue arrière.

La solution illustrée sur la photo précédente a été retenue par les équipes de pointe durant plusieurs saisons. Mais en 1999, seules deux écuries sur douze ont conservé ce dispositif car le règlement était devenu très restrictif à ce niveau. Les aérodynamiciens se sont alors concentrés sur la carrosserie arrière.

La carrosserie arrière : Afin d'éloigner le flux d'air qui s'écoule sur la carrosserie le plus possible des perturbations des roues, les aérodynamiciens ont conçu des carrosseries arrière de plus en plus étroites. Les moteurs qui gagnaient sans cesse en compacité ont permis cette évolution.

Dans l'objectif de remédier aux perturbations dues aux gaz d'échappement qui étaient éjectés au niveau du diffuseur, l'écurie Ferrari a innové en 1999 en faisant déboucher ses tubulures d'échappement sur le capot moteur. Sans que les tubulures ne sortent de la carrosserie, les gaz d'échappement étaient ainsi éjectés juste devant l'aileron arrière ; toutes les autres écuries, sauf une, ont alors copié ce système après l'avoir testé en soufflerie.



Figure 6-102 : La Ferrari F399 de 1999 (Photo Paul-Henri Cahier)



Les deux illustrations précédentes mettent en relief trois points importants :

- les déflecteurs des roues arrière, typiques des monoplaces de la fin des années 1990 et destinés à dévier le flux d'air des roues
- le resserrement de la carrosserie amorcé très tôt, visible sous les déflecteurs
- les échappements dits " périscopiques " débouchant sur le capot moteur, entre les déflecteurs
- le diffuseur central, à l'extrême arrière de la monoplace



Figure 6-103 : La Benetton B194 de 1994 (Photo Paul-Henri Cahier)



Figure 6-104 : Un aileron arrière à trois plans sur la Jordan 191 de 1991 (Photo Paul-Henri Cahier)



6.3.6 Les années 2000

La partie arrière des F1 de cette décennie a fait l'objet d'un travail important de la part des aérodynamiciens. Nous avons déjà vu que les roues étaient les ennemies de l'efficacité aérodynamique d'une monoplace. Il faut donc conduire l'air au-dessus des roues. Ceci explique la présence de dérives et d'un flap, tous deux en amont de chaque roue arrière. De plus, à l'instar d'écuries comme Ferrari, McLaren, Renault, Toyota..., chaque dérive présente une bordure latérale dans un souci de canaliser le flux d'air. Egalement à l'arrière, on a vu la présence des sorties d'échappement sur la partie supérieure ("échappements hauts"). Ce principe, inventé par Ferrari et utilisé pour la première fois sur la F399 de 1999, permet de libérer une section de passage (occupée par les tuyaux d'échappement) pour l'air qui s'échappe du diffuseur et ainsi d'améliorer son fonctionnement.

Enfin, de petits déflecteurs situés de chaque côté de la prise moteur au niveau de la boîte à air sont apparus. Le but de ceux-ci est de canaliser le flux d'air à cet endroit.





Figure 6-105 : Les flaps et dérives de la Renault R26 de 2006 (Photo Auteur)



Figure 6-106 : L'échappement haut de la Ferrari F2003 (Photo Paul-Henri Cahier)



Figure 6-107 : L'échappement haut de la Honda RA106 de 2006 (Photo Paul-Henri Cahier)



Le soubassement de la monoplace : Le diffuseur central et les couloirs Venturi situés légèrement en retrait n'ont pas subi de changements majeurs depuis la fin des années 1990. Les ingénieurs n'ont cessé en réalité d'améliorer leur efficacité par très petites touches, tellement infimes qu'il est parfois difficile de les remarquer tout de suite. Ainsi, le dessin ci-dessous montre :

- en jaune et indiqué par une flèche, le contour vertical des couloirs Venturi qui, placé face au flux d'air, engendre un léger appui supplémentaire
- entourée en rouge, la forme très travaillée du bord d'un des couloirs Venturi
- le passage de l'air d'un des couloirs Venturi jusqu'au diffuseur central, passage permis par une ouverture sur le flanc du diffuseur central. Ainsi de l'air déjà accéléré est admis dans ce diffuseur, ce qui contribue à augmenter la dépression qu'il crée

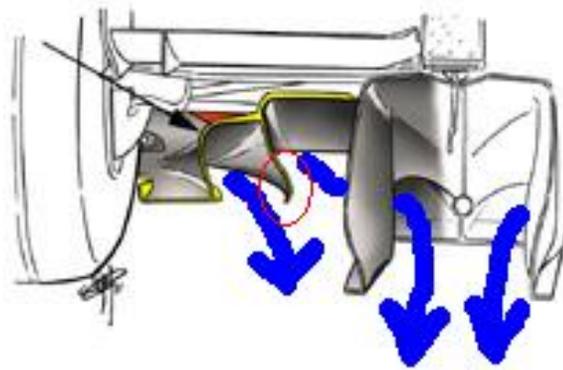


Figure 6-108 : Le diffuseur de la Ferrari F2001 de 2001

Certaines équipes ont testé l'effet d'échappements soufflant dans la partie centrale du diffuseur : l'énergie cinétique des gaz, en pleine accélération, était utilisée pour augmenter la vitesse du flux d'air passant dans le diffuseur et ainsi augmenter la dépression créée. Mais dès que la monoplace était en phase de décélération, le train arrière devenait plus vif car il perdait de l'appui aérodynamique procuré par ce système en phase d'accélération ; cette disposition de l'échappement a alors disparu dès 2002 puisqu'elle rendait la monoplace délicate à maîtriser.

L'aileron arrière : Afin de rendre les monoplaces moins rapides en courbes et améliorer ainsi la sécurité des pilotes, la F.I.A a imposé dès 2001 des changements concernant les ailerons des monoplaces. Certaines de ces nouvelles règles ont concerné l'aileron arrière, avec pour objectif de diminuer la déportance créée par celui-ci. Le nombre des plans profilés générateurs de déportance a alors été limité à quatre : trois dans la partie supérieure de l'aileron et un dans la partie inférieure servant aussi de support d'aileron. Les solutions extrêmes (jusqu'à huit plans profilés) qui apparaissaient avant 2001 sur les circuits lents nécessitant beaucoup d'appui en virages ont dorénavant disparu. Puisque la réglementation figeait globalement la déportance créée par l'aileron, les principaux travaux des ingénieurs ont consisté à :

- faire varier la corde (c'est-à-dire la longueur) des trois plans supérieurs de l'aileron ainsi que leurs



- positions les uns par rapport aux autres
- modifier la forme et le profilage du support horizontal de l'aileron. Ce plan inférieur de l'aileron est très important puisque le travail effectué par le diffuseur et les couloirs Venturi est lié en partie au flux d'air provenant de la partie basse de l'aileron
 - réduire la traînée induite créée par le déplacement de l'aileron dans l'air, qui participe de 25 à 30 % à la traînée totale de la monoplace. Différentes formes de dérives latérales ont ainsi été testées et les extrémités des plans profilés ont été très travaillées afin de minimiser les tourbillons d'air néfastes pour le comportement de la monoplace et pour la traînée

L'aileron arrière d'une Formule 1 datant de 2002, à titre d'exemple, fournissait 32,3% de l'appui total de la monoplace à pleine vitesse sur le circuit de Monaco, ce qui correspondait à 650 kilogrammes de charge aérodynamique sur le train arrière.

En 2005, la FIA impose aux constructeurs d'avancer l'aileron arrière de 15 cm vers l'axe des roues afin de lui faire perdre 10% de son efficacité tandis que les tunnels latéraux du diffuseur ne doivent plus dépasser l'axe des roues arrière et ne peuvent pas faire plus de 12.5 cm de hauteur.



Figure 6-109 : Aileron arrière de la Ferrari 248F1 de 2006

La carrosserie arrière : La compacité toujours plus grande des moteurs ainsi que des travaux en soufflerie très nombreux permirent à la carrosserie arrière de progresser grandement dans sa finesse et dans la qualité des flux qu'elle fournit par la suite à l'aileron arrière. Pour améliorer le rendement aérodynamique,



la carrosserie arrière d'une monoplace de Formule 1 a rétréci en largeur chaque année, dans la continuité de la démarche entamée à la fin des années 1990. En conséquence de ce rétrécissement plus important, les déflecteurs intégrés aux flancs de la carrosserie arrière ont été plus larges. Cependant, la largeur de la carrosserie, déflecteurs compris, doit rester constante d'après le règlement qui interdit le carénage des roues dans toute leur largeur. Ainsi, ces déflecteurs plus larges ont l'avantage de dévier l'air par-dessus les côtés intérieurs des roues arrière. Comme la photographie ci-dessous le montre, les aérodynamiciens ont même exploité le règlement à la limite en adjoignant au déflecteur une cloison interne aux roues (indiquée par une flèche bleue). Cette cloison permet au flux d'air central de la monoplace circulant vers l'aileron arrière de comporter moins de turbulences provenant de la roue, ces turbulences étant déviées par la cloison vers l'extérieur du véhicule. Cette photographie montre également le petit aileron générateur de déportance qui s'est généralisé en 2002 (flèche jaune), ainsi que la nouvelle sortie des échappements qui sert d'extracteur de l'air chaud du moteur (flèche verte).

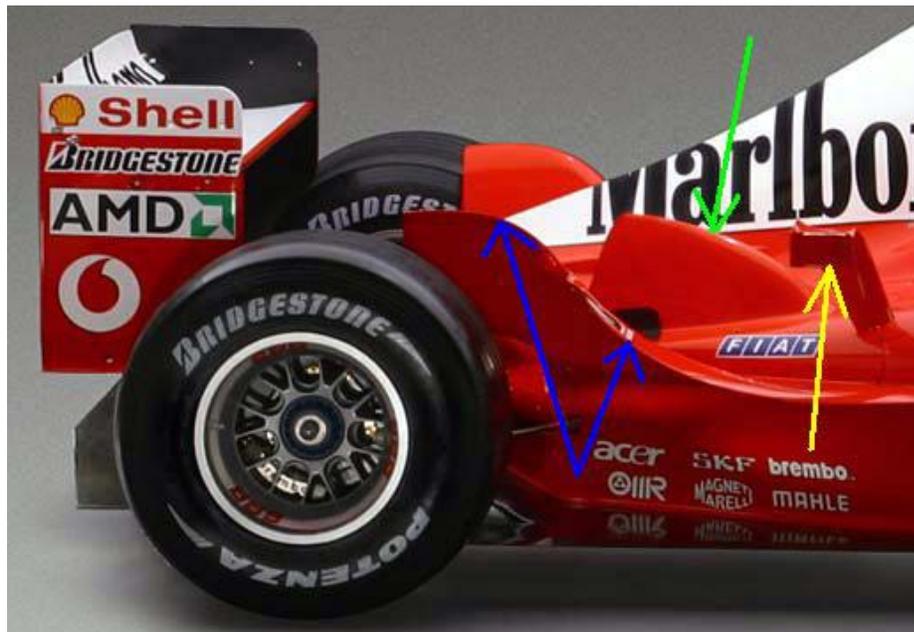


Figure 6-110 : La Ferrari F2003-GA de 2003

Au cours de la saison 2006, la recherche en aérodynamique a accouchée d'un concept nouveau et qui sera sans aucun doute une des évolutions majeures de cette décennie : l'underbody à mémoire de forme. Ce concept consiste à permettre à l'underbody de prendre une forme optimale en fonction de la vitesse des F1. Le concept repose sur la propriété de posséder certains matériaux en carbone. Ces matériaux peuvent se déformer lorsqu'ils sont soumis aux effets aérodynamiques puis revenir à leur forme initiale lorsque la monoplace se retrouve à l'arrêt. C'est le même concept que les ailerons flexibles sauf que l'avantage c'est que ça ne se voit pas au niveau de l'underbody.

Pour conclure sur la décennie 2006, regardez les trois photos suivantes. Il s'agit des trois concepts les plus aboutis de la saison 2006.



Figure 6-111 : La Ferrari 248F1 de 2006



Figure 6-112 : La Renault R26 de 2006



Figure 6-113 : La McLaren MP4-21 de 2006



6.4 Le CDG System (Centreline Downwash Generating)

Après une enquête réalisée par la FIA sur l'avenir de la Formule 1 une grande majorité du public, 94%, a déclaré souhaiter voir des GP plus attractifs où les dépassements seraient plus nombreux.

La FIA a donc lancé, en collaboration avec la compagnie AMD, un programme de recherche qui vise à améliorer les performances aérodynamiques des monoplaces afin que leur équilibre ne soit plus perturbé par le sillage des voitures situées devant elle.

En effet, lorsqu'une voiture en suit une autre de très près, les performances aérodynamiques de la monoplace suiveuse se réduisent de manière significative et toute manœuvre de dépassement devient difficile.

L'objectif de ce programme est de créer des règlements pour que la forme aérodynamique des voitures limite cet effet de sillage et contribue ainsi à faciliter les dépassements, redonnant à la voiture située derrière le maximum d'appuis. Avec l'aide technologique de AMD qui fut chargé de réaliser des simulations numériques pour la FIA, l'équipe de recherche de la FIA a tiré des conclusions préliminaires : L'aileron CDG (Centreline Downwash Generating wing) a été officiellement présentée lors de la réunion de la Commission de la F1 le 24 octobre 2005 à Londres.

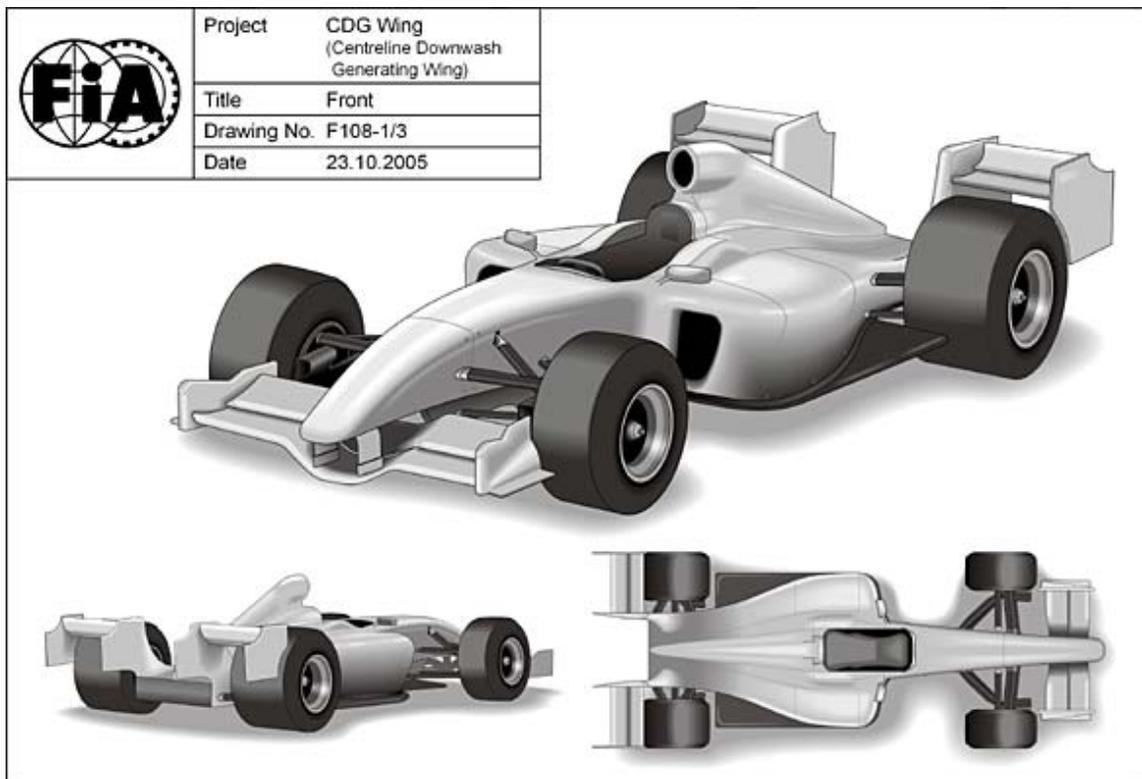


Figure 6-114 : Le Centreline Downwash Generating System

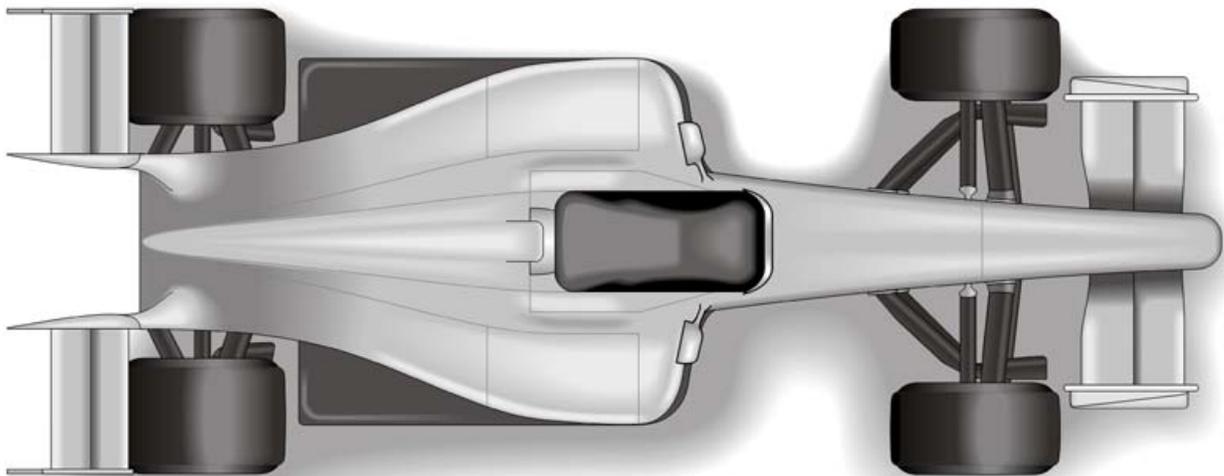


L'aileron CDG, ainsi que des roues plus larges et des pneus lisses et non plus rainurés comme c'est le cas actuellement, feront partie des règlements techniques de la F1 en 2008.

« Cette nouvelle recherche est importante pour le futur de la F1. En présentant l'aileron CDG, nous pouvons donner aux supporters de sport automobile exactement ce qu'ils ont demandé, des courses roues contre roues avec de nombreux dépassements » déclarait Max Mosley, président de la FIA. « Nous espérons que les équipes collaboreront avec nous pour l'optimisation de cette nouvelle idée radicale - de sorte que les avantages aérodynamiques puissent être présentés en F1 en 2008 ».

L'invention est baptisée CDG Wing (Centerline Downwash Generating Wing), et consiste à changer complètement la forme de l'aileron arrière actuel en le divisant en deux ailerons situés au dessus des roues arrière. Cette nouvelle aérodynamique pourrait favoriser les dépassements en réduisant les turbulences créées par le véhicule, des turbulences qui perturbent la Formule 1 qui suit.

Avec des pneus plus larges et lisse, l'adhérence de la voiture serait sensiblement la même mais la stabilité au freinage serait nettement plus importante.





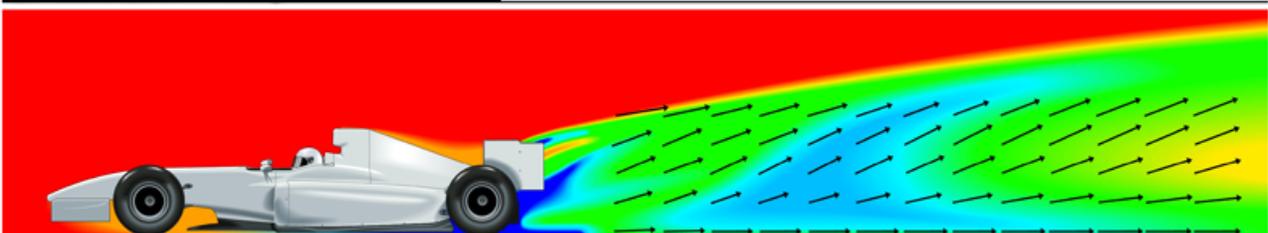
Les simulations réalisées par AMD montrent des résultats très intéressants. On voit sur les schémas suivants le flux d'air généré par l'aileron arrière d'une F1 pour les deux types d'aileron arrière :

- En haut l'aileron conventionnel
- En bas l'aileron CDG

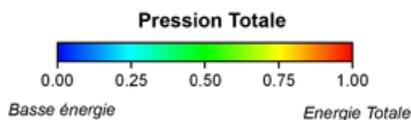
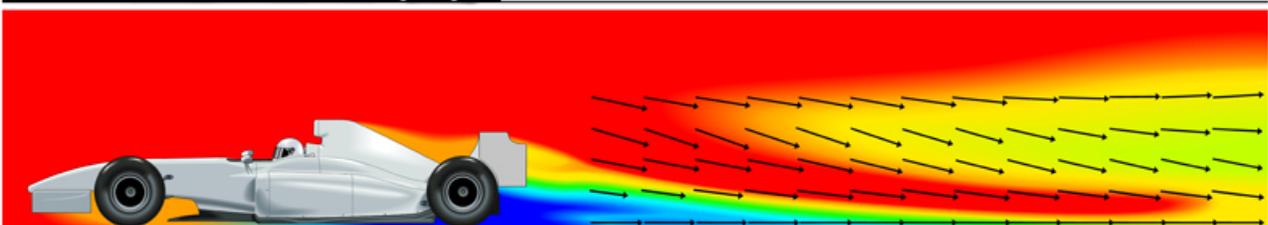
Les couleurs représentent l'énergie totale de pression du flux d'air. La pression totale a une valeur de 1. Le rouge montre les plus fortes valeurs et donc l'énergie totale. Le bleu et le rouge représentent les basses énergies.

Les flèches indiquent le sens et la direction de déplacement du flux.

Flux d'air - Aileron Conventionnel



Flux d'air - Centreline Downwash Generating Wing



AMD is the Official
Technology Partner of the FIA



Figure 6-115 : Une simulation du CDG par AMD

On voit nettement que la zone de dépression (basse énergie) que génère un aileron conventionnel dans son sillage disparaît au profit d'une zone de haute pression avec le CDG. La conséquence directe est que la monoplace suiveuse s'en trouve stabilisée puisqu'elle est plaquée au sol au lieu d'être en sustentation. Elle peut donc suivre sans problème la monoplace qui la précède et ainsi se positionner plus facilement afin d'engager une manœuvre de dépassement.

La FIA a enfin compris que la solution des pneus rainurés étroits était l'idée technique la plus stupide de



l'histoire de la F1. Le retour aux pneus slicks larges va apporter une plus forte stabilité au freinage et va ainsi permettre une plus forte maniabilité des monoplaces dans les délicates phases de dépassement.

Vivement 2008 mesdames, messieurs !!



7 ANNEXE 1 : Considérations Théoriques

Je me contenterai dans ce chapitre de vous exposer brièvement les principes et grandeurs fondamentales qui régissent les phénomènes aérodynamiques qui peuvent se produire autour d'une monoplace de type Formule 1.

Afin de ne pas trop alourdir l'exposé, j'omettrai les longues démonstrations et je vous présenterai directement les principes et grandeurs sans vous expliquer en détail d'où ils proviennent. Si ça vous intéresse de rentrer dans les détails théoriques, vous trouverez sans problème tout ce que vous voulez sur Internet.

7.1 La loi de Bernoulli

En 1738, Daniel Bernoulli, un physicien Suisse, observa et mesura le comportement d'un fluide en mouvement, ce qui l'amena à conclure que sa pression diminue lorsque sa vitesse augmente.

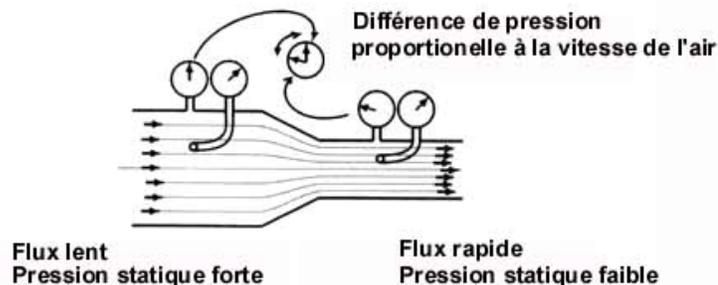


Figure 7-1 : La loi de Bernoulli

Le dessin ci-dessus montre un fluide se déplaçant dans une canalisation dont la section se réduit. Pour le même volume de fluide, le flux doit accélérer dans la petite canalisation. Des jauges mesurent la pression statique (à 90° par rapport au flux) et la pression totale (parallèlement au flux). Quand la vitesse du fluide augmente, la pression totale reste constante alors que la pression statique diminue. A travers cette expérience, Bernoulli montra que cette différence de pression augmente avec le carré de la vitesse du fluide. Ceci signifie que la perte de pression est multipliée par quatre lorsque la vitesse double. Si vous pouviez mesurer très précisément la différence entre ces deux pressions, vous trouveriez alors de combien la vitesse du fluide a augmenté.

Cette loi physique joue un rôle fondamental dans le fonctionnement des surfaces aérodynamiques utilisées en Formule 1. Elle est exprimée par une équation appelée l'équation de Bernoulli. Cette équation décrit que pour un volume de fluide donné, la quantité d'énergie mis en jeu reste constante. Ceci est dû au principe de conservation de l'énergie qui s'applique de manière immuable. Quand un fluide est en mouvement, son énergie se divise en trois parties et la somme des trois reste toujours constante pour des conditions externes données. Les trois parties de l'énergie totale du fluide en mouvement sont :

1 - L'énergie due à la pression régnant à l'intérieur du fluide



- 2 - L'énergie cinétique du fluide en mouvement due à sa vitesse
- 3 - L'énergie potentielle du fluide due à sa hauteur

L'équation de Bernoulli s'écrit : $p + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gh = \text{constante}$

avec :
p : pression du fluide
 ρ : densité du fluide
V : vitesse du fluide
g : accélération gravitationnelle
h : hauteur du fluide par rapport à un point de référence

Il est cependant évident que les variations de hauteur autour d'une monoplace sont négligeables et que ainsi l'énergie potentielle de l'air ne varie pas. On peut alors éliminer l'énergie potentielle de l'équation sans en changer sa validité.

L'équation de Bernoulli devient donc : $p + \frac{1}{2}\rho V^2 = \text{constante}$

Ainsi, si la pression dynamique augmente alors la pression statique doit diminuer d'autant et vice-versa. Ceci veut dire que si on accélère un fluide, alors sa pression diminue.

7.2 La Couche Limite

Les flux d'air ont des comportements très simples si vous vous déplacez à la vitesse d'un être humain ou même à la vitesse d'un cheval au galop. Mais si vous décidez de concevoir un véhicule motorisé de course, alors là l'air devient un vrai challenge pour vous. Une des caractéristiques les plus difficiles à dompter sera inmanquablement la couche limite.

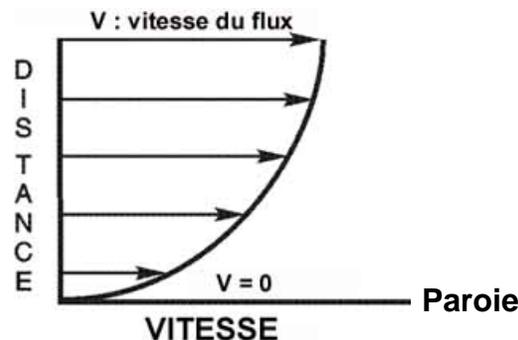


Figure 7-2 : Vitesse de l'air dans la couche limite

En soit, la couche limite est un concept très simple - Lorsqu'un flux s'approche d'une surface fixe, les



frottements ralentissent les molécules d'air qui sont proches de cette surface. Si vous mesurez la vitesse de l'air au droit de cette surface, vous trouverez que sa vitesse est nulle, tel que le montre le dessin ci-dessus. Si vous mesurez la vitesse en vous éloignant de la surface fixe, vous verrez la vitesse augmenter jusqu'à ce qu'elle atteigne la vitesse maxi, que l'on appelle la vitesse du flux libre. Une différence de vitesse à travers un flux signifie qu'il y a du cisaillement dans celui-ci (dû aux différences de vitesses entre les parties adjacentes du courant). Si le fluide est visqueux, comme la majorité des fluides réels d'ailleurs, alors le cisaillement induit des pertes par frottement dans le flux et par conséquent le décollement de la couche limite. Ce décollement génère des turbulences qui seront destructives pour la déportance tout en alimentant la traînée.

7.3 Grandeurs fondamentales

Mis à part quelques cas particuliers, comme celui de la très haute atmosphère, où les phénomènes dus à la raréfaction deviennent très importants, on peut considérer qu'un gaz est un milieu continu, dont le mouvement est décrit par les célèbres équations de Navier-Stokes.

Aux faibles vitesses (de 0 à 300 km/h), on peut en général considérer l'air comme un fluide homogène et incompressible, pour lequel la masse volumique :

$$\rho_{\text{air}} = \text{constante [Unité : Kg/m}^3\text{]}.$$

A des vitesses plus grandes (de 300 à 2 000 km/h), les effets de la compressibilité deviennent importants, et l'air se comporte sensiblement comme un gaz parfait pour lequel :

$$P = \rho RT$$

avec : P : Pression du fluide [Bar]

R : La constante des gaz parfaits - R = 8.31 J/Kmol

Les conditions aux limites sont :

- écoulement donné à l'infini, en général uniforme
- vitesse nulle sur le corps traduisant l'hypothèse de l'adhérence du fluide à la paroi

Le problème ainsi posé doit permettre d'accéder aux champs des vitesses, pressions, frottements, températures, etc. dans tout le fluide.

En fait, d'un point de vue pratique, on cherche à déterminer ces grandeurs sur la paroi en vue d'en déduire notamment la traînée F_x et la déportance F_z de l'obstacle, qui sont respectivement les composantes de la résultante aérodynamique F :

- Traînée F_x : dans la direction de la vitesse U_d à l'infini. Cet effort a un effet négatif sur une F1 dans le sens où il s'oppose à l'avancée de celle-ci.



- Déportance F_z : dans le plan perpendiculaire à U_d . Cet effort qui agit du haut vers le bas pour une F1 est très bénéfique puisque c'est lui qui plaque le véhicule au sol. Plus la déportance sera forte, plus la F1 sera stable et plus le châssis aura de la capacité à transmettre la puissance du moteur à la piste via les pneumatiques.

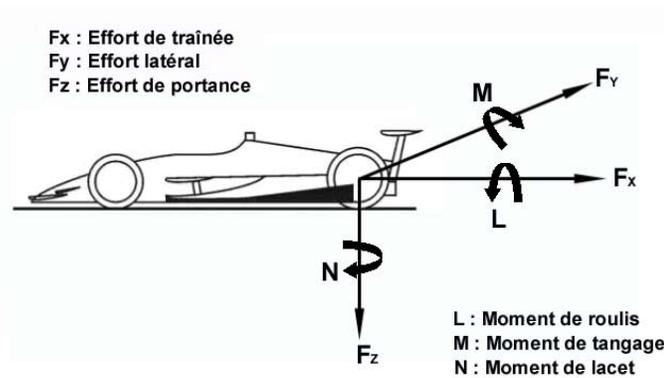


Figure 7-3 : Les composantes de la résultante aérodynamique

Ces grandeurs sont réduites en coefficients sans dimension. On définit ainsi les coefficients de traînée et de (dé)portance par les relations suivantes :

Le Coefficient de Traînée :
$$C_X = \frac{F_X}{\frac{1}{2} \rho_\infty U_\infty^2 S}$$

Le Coefficient de (Dé)portance :
$$C_Z = \frac{F_Z}{\frac{1}{2} \rho_\infty U_\infty^2 S}$$

avec ρ_∞ : la masse volumique du fluide à l'infini amont

U_∞ : Vitesse à l'infini amont

S : Surface caractéristique du corps en mouvement dans le fluide

Ces équations nous enseignent que pour un corps donné en mouvement dans un fluide donné, plus la vitesse du corps augmente plus il sera soumis à une forte déportance. Hélas pour les aérodynamiciens, on voit que la traînée varie de la même façon. A priori donc, impossible d'augmenter la déportance (grandeur favorable) sans augmenter la traînée (grandeur défavorable). De même, on voit dans ces équations que pour une vitesse de déplacement donnée, la surface caractéristique du corps influence la déportance et la traînée. Cependant, dans les équations, la surface apparaît à l'ordre un et la vitesse à l'ordre deux. En doublant la surface on doublera la traînée et la déportance alors qu'en doublant la vitesse on les quadruplera.



On définit de façon analogue divers coefficients de moment ainsi que des coefficients locaux tels que ceux de flux de chaleur, de pression k_p et de frottement C_f :

$$\text{Coefficient de pression : } k_p = p - \frac{P_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty U_\infty^2}$$

$$\text{Coefficient de frottement : } C_f = \frac{\tau_f}{\frac{1}{2} \rho_\infty U_\infty^2} \text{ avec } \tau_f : \text{ tension de frottement du fluide sur la paroi.}$$

Essentiellement en raison de la non linéarité des équations du mouvement, dont on ne connaît que très peu de solutions, la détermination de ces quantités est un problème mathématique très complexe. En pratique, on est donc amené soit à utiliser des méthodes numériques en utilisant de puissants ordinateurs, soit à rechercher, par voie théorique, des solutions approchées.

Lorsqu'on écrit les équations sous forme adimensionnelle en choisissant pour grandeurs de référence les conditions à l'infini, on voit apparaître plusieurs nombres sans dimension et on peut simplifier le problème si ces paramètres ont des valeurs très grandes ou très petites. Les principaux parmi ces paramètres de similitude sont :

Le nombre de Reynolds (noté Re) qui nous renseigne sur l'intensité de la turbulence. Il s'agit du rapport entre le temps visqueux (temps nécessaire à la viscosité pour amortir une perturbation) et le temps cinétique (temps caractéristique de déplacement des particules fluides).

Ainsi par exemple l'écoulement sur une plaque plane sera considéré comme laminaire jusqu'à $Re = 5e^5$, les éventuelles instabilités étant immédiatement amorties par la viscosité. Au-delà un régime de transition vers la turbulence se met en place, puis rapidement l'écoulement devient le siège de fortes instabilités.

Dans les applications industrielles, notamment en aéronautique, le nombre de Reynolds Re est souvent très grand, si bien que les effets dus à la viscosité sont négligeables en première approximation : c'est ce que l'on nomme l'approximation de fluide parfait. En fait, cela reste vrai partout où il n'existe pas de gradients de vitesse trop importants. Ce qui est le cas dans la majeure partie de l'écoulement, sauf au voisinage des parois ou dans les problèmes de mélange de jets, où la viscosité devient essentielle; c'est elle qui donne lieu en particulier au phénomène de couche limite.

$$\text{Le nombre de Mach } M : M = \frac{U_\infty}{a_\infty} \quad \text{avec } a_\infty : \text{ Vitesse du son dans le fluide à l'infini}$$

Le nombre de Mach joue un rôle très important : lorsqu'il est inférieur à 0,3, on peut considérer que le fluide est incompressible.



Le nombre de Prandtl Pr : $Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k}$

avec μ : Viscosité dynamique du fluide

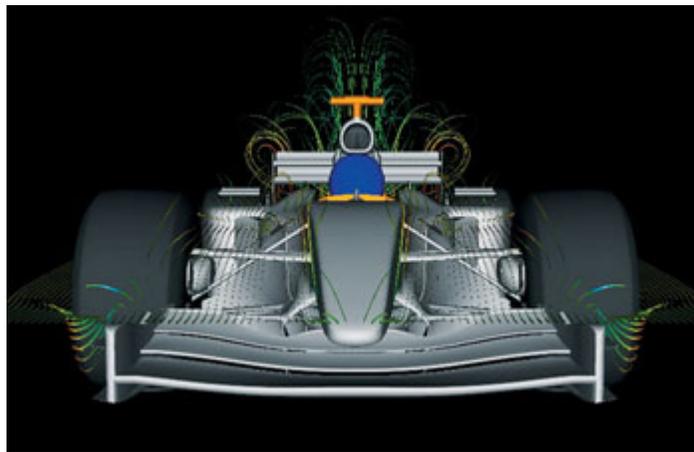
k : Conductivité thermique du fluide

C_p : Chaleur spécifique du fluide



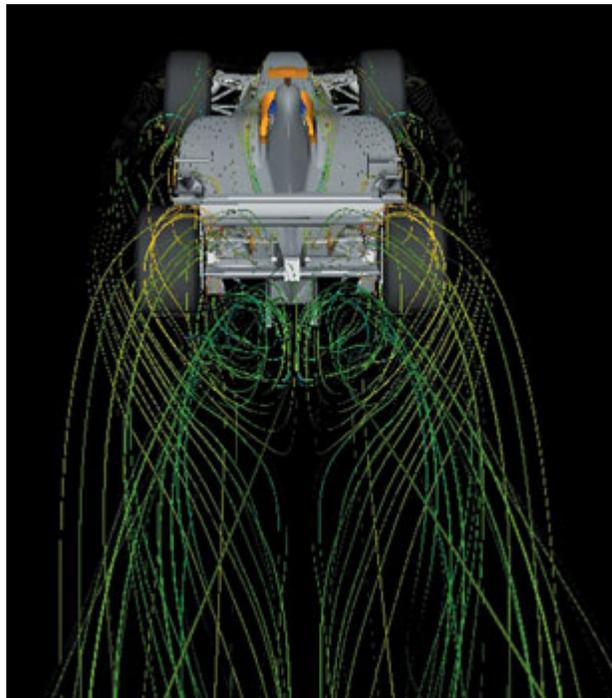
7.4 Méthode Générale d'étude et de Limitation

On commence par négliger complètement les effets de la viscosité. Cette étude, en fluide parfait, permet de définir une première approximation du coefficient de portance C_z et du coefficient de traînée C_x . Celui-ci apparaît ainsi comme la somme d'une "traînée induite" due à la portance (en écoulement supersonique, d'une "traînée d'onde", ce qui n'est bien sûr pas le cas sur une Formule 1). On corrige ensuite l'écoulement obtenu en tenant compte de la viscosité, ce qui conduit, en particulier, à la très importante théorie de la couche limite, qui permet le calcul de la traînée de frottement, et du flux de chaleur à la paroi.



La viscosité d'un fluide, qui n'est jamais strictement nulle, peut modifier considérablement l'écoulement que la théorie du fluide parfait avait laissé prévoir. La viscosité est responsable de phénomènes aussi importants que le frottement à la paroi, l'échauffement cinétique, le décollement, la création de la circulation nécessaire à la déportance, etc. Elle joue, par ailleurs, un rôle très important dans l'étude des sillages.

Dans un écoulement, le nombre de Reynolds caractérise le rapport des forces d'inertie sur les forces de viscosité. Or, en Aérodynamique, ce nombre est très grand devant l'unité. On pourrait en conclure que les forces de viscosité sont négligeables. C'est vrai presque partout mais il existe des régions, comme la couche limite, où les effets visqueux restent significatifs. De fait, la couche limite est définie comme étant le lieu où les effets visqueux sont du même ordre que les effets d'inertie. Alors, une analyse d'ordre de grandeur montre que l'épaisseur d de la couche limite est d'ordre L/Re , où L représente la longueur de développement de la couche limite, et Re le nombre de Reynolds associé.



Dans la plupart des cas pratiques, l'écoulement n'est pas partout laminaire. Après une phase dite de transition, il devient turbulent. Une véritable théorie de la turbulence n'existe pas et constitue l'un des défis de la physique moderne. Pour déterminer les effets de la turbulence, des techniques sont mises en jeu dans lesquelles des informations expérimentales sont introduites. Ces informations sont aussi extraites des méthodes de simulation de la turbulence : il s'agit de solutions numériques aux équations de Navier-Stokes instationnaires.

Toutefois, il est loin d'être le seul paramètre qui gouverne la transition. Un gradient de pression positif, la rugosité de la paroi et la pré-turbulence de l'écoulement ont tendance à produire la transition à un nombre de Reynolds plus faible. La compressibilité, la température de la paroi ont aussi des rôles importants. En tridimensionnel, sur une aile d'avion en flèche par exemple, les phénomènes sont plus complexes. En particulier, l'écoulement secondaire créé dans la couche limite peut conduire à des instabilités lorsque l'écoulement est accéléré, même au voisinage du bord d'attaque. En outre, la couche limite turbulente se développant sur le fuselage peut perturber la couche limite qui s'écoule le long du bord d'attaque; elle devient turbulente et contamine toute la couche limite de l'aile. Ces mêmes effets de perturbation de la couche limite entrent en jeu lorsque l'on parle de l'efficacité aérodynamique d'une F1.

Le développement extraordinaire de l'informatique a entraîné pour les sciences de l'ingénieur, et particulièrement pour l'Aérodynamique, une révolution dans les méthodes d'étude théorique. Cette révolution, que l'on peut faire remonter au début des années soixante, a conduit à l'émergence d'une nouvelle discipline, l'Aérodynamique numérique ou CFD, qui joue un rôle de plus en plus important dans la conception et l'optimisation des véhicules ou engins aériens.

Le développement de l'informatique et des méthodes numériques en Aérodynamique a eu deux sortes de



conséquences. D'une part, des théories simplifiées (théories linéarisées, théories asymptotiques comme celle de la couche limite). D'autre part, des problèmes, jusque-là inaccessibles à cause de leur complexité mathématique ont pu être résolus numériquement à l'aide de nouvelles méthodes.

La détermination théorique des écoulements autour de véhicules et plus généralement autour d'obstacles, se heurte à des difficultés variées qui tiennent aussi bien aux caractéristiques des équations à résoudre (équations non linéaires, fortement couplées, de type mathématique variable) qu'à la complexité même des écoulements auxquels on a affaire (complexité géométrique des obstacles, diversité des conditions aux limites parfois délicates à définir. En particulier, la très faible viscosité des fluides usuels tels que l'air et l'eau (qui se traduit par de très grandes valeurs du nombre de Reynolds) conduit à l'existence de couches visqueuses minces, comparées aux dimensions de l'obstacle, et de surfaces de quasi-discontinuité des propriétés de l'écoulement (les ondes de choc).

En conséquence de la complexité mathématique des problèmes, l'existence et l'unicité de la solution ne peuvent être démontrées qu'avec des hypothèses restrictives peu applicables à des problèmes réels d'aérodynamique. Une connaissance expérimentale préalable du problème est toujours indispensable à sa formulation mathématique.



Parmi les facteurs qui contribuent à la complexité des écoulements, il convient de faire une place à part à la turbulence, présente dans la plupart des problèmes d'aérodynamique. En effet, bien que les équations de Navier-Stokes soient valables pour décrire la turbulence, la prise en compte de toutes les échelles des fluctuations turbulentes exige une discrétisation spatio-temporelle tellement fine que le calcul complet d'un écoulement turbulent réel n'est possible que dans des situations physiques très simplifiées et au prix de centaines d'heures de calcul sur des ordinateurs puissants. La modélisation de la turbulence reste un



problème ouvert, d'une grande importance pratique, dont dépend la fiabilité des prévisions numériques.

Le code de calcul Fluent 6.1 CFD (Computational Fluid Dynamics, Simulation informatique d'écoulement des fluides) est utilisé en complément des essais en soufflerie et des essais sur pistes. Ce code permet de résoudre les équations de Navier-Stokes et permet ainsi aux aérodynamiciens de visualiser, par exemple, l'écoulement du flux d'air autour d'un composant de la carrosserie (ce qui n'est pas toujours le cas avec des méthodes classiques). Il doit être complété par un logiciel de modélisation en 3 dimensions tel que CATIA (Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive) développé conjointement par Dassault Systèmes et IBM.

Les méthodes numériques permettent également la prise en compte détaillée des effets visqueux (turbulence incluse) dans le calcul de l'écoulement autour d'une configuration complexe mais bien entendu la précision des solutions numériques reste tributaire de la validité des modèles de turbulence.



8 ANNEXE 2 : Lexique

AERODYNAMIQUE : branche de la dynamique des fluides qui porte sur la compréhension et l'analyse des écoulements d'air, ainsi qu'éventuellement sur leurs effets sur des éléments solides qu'ils environnent. Le champ d'études peut se subdiviser en aérodynamique incompressible et compressible en fonction du nombre de Mach auquel on se place. L'aérodynamique incompressible concerne les écoulements pour lesquels le nombre de Mach est inférieur à 0.2 environ, et se placer dans cette classe d'écoulements permet de prendre certaines hypothèses simplificatrices lors de l'étude de ces écoulements. L'aérodynamique compressible quant à elle se subdivise en aérodynamique subsonique, transsonique, supersonique et hypersonique. L'étude de l'aérodynamique s'applique aux aéronefs, aux véhicules automobiles, aux trains, mais aussi à nombre d'applications industrielles qui nécessitent l'étude d'écoulements d'air.

AILERON : élément aérodynamique complexe d'une F1 possédant des surfaces en forme d'aile d'avion inversées afin de générer de l'appui aérodynamique à l'avant et à l'arrière de la monoplace.

ALAIRE : qualifie un élément aérodynamique qui possède une section capable de générer de la déportance.

ANGLE D'ATTAQUE : différence entre la direction dans laquelle pointe un aileron et la direction du flux d'air

APPUI AERODYNAMIQUE (ou CHARGE AERODYNAMIQUE) : Force qui plaque une voiture au sol par le mouvement de l'air sur les ailerons. Plus les ailerons sont braqués, plus la charge aérodynamique est importante.

BARGE BOARDS : pièce située devant le ponton qui permet à la fois à l'air de contourner le ponton et à le conduire vers les radiateurs. Ils réduisent cependant le volume d'air vers les radiateurs gênant au refroidissement du moteur mais améliorent l'aérodynamisme et ainsi augmentent la vitesse. Il faut donc faire un compromis entre les deux.

C.F.D. : acronyme anglais pour Computational Fluid Dynamics. Simulation par ordinateur de l'écoulement des fluides autour d'une F1

CHEMINEE : Appendice aérodynamique situé en général sur les pontons des F1 afin de faciliter l'extraction de l'air chaud.

COUCHE LIMITE : zone située au voisinage d'un corps immergé dans un fluide en mouvement en dehors de laquelle on peut négliger les effets de la viscosité.

DECROCHAGE : phénomène au cours duquel un appendice aérodynamique arrête de générer de la déportance.

DEFLECTEUR : petite pièce située en amont de chaque roue arrière dans le but de conduire l'air au dessus des roues. Sa forme convexe (en aile d'avion inversée) permet également de créer localement une petite déportance.

DECOLLEMENT DE LA COUCHE LIMITE : rupture de l'adhérence de la couche limite sur un élément aérodynamique qui provoque une chute de la déportance et une augmentation de la traînée, ce qui correspond à une baisse notable des performances aérodynamiques.

DEPORTANCE : Force verticale dirigée vers le sol, qui a pour effet de plaquer l'objet au sol.

DIFFUSEUR (ou EXTRACTEUR) : il est situé derrière l'axe des roues arrière, presque collé à la piste. Son rôle est de créer un effet de sol lorsque l'air passant sous la voiture traverse cet appendice. Il consiste en plusieurs tunnels et séparations qui contrôlent le flux d'air afin de maximiser l'effet de succion. Il sert aussi à diriger les gaz d'échappement qui passent la plupart du temps à cet endroit.



ECOPE DE FREIN : pièce située à côté de la roue et devant les triangles de suspension, servant à l'admission de l'air afin de refroidir le disque de frein.

ÉCOULEMENT LAMINAIRE : Un écoulement laminaire est un écoulement régulier d'un fluide, où toutes les couches suivent des trajectoires parallèles, diminuant ainsi les résistances. C'est le contraire d'un écoulement turbulent.

ÉCOULEMENT TURBULENT : écoulement ayant un état qui conduit à la naissance de turbulences.

EFFET DE SOL : phénomène qui permet à l'air de sortir d'un passage plus vite qu'il n'y est entré, ce qui crée une dépression sous la voiture (due à l'accélération de l'air) lui permettant alors de coller à la piste. Il faut pour cela que le fond de la monoplace soit parfaitement plat ou en forme d'aile d'avion inversée, et que le châssis soit assez proche de la route.

END PLATE : partie verticale d'un aileron située aux extrémités de celui-ci.

EQUATIONS DE NAVIER-STOKES : équations aux dérivées partielles non-linéaires qui décrivent le mouvement des fluides. Elles gouvernent par exemple les mouvements de l'air de l'atmosphère, les courants océaniques, l'écoulement de l'eau dans un tuyau, et de nombreux autres phénomènes d'écoulement de fluides. Elles sont nommées d'après deux physiciens du XIXe siècle, Claude Navier et George Stokes.

EXTRADOS : face supérieure d'une aile d'avion. L'air doit parcourir une distance plus grande au niveau de l'extrados que de l'intrados, ce qui provoque une accélération de l'air et donc une dépression, ce qui permet à l'avion de voler.

FLAP : petit aileron ajouté à la carrosserie pour ajouter de l'appui.

FLAP GURNEY : petit flap placé sur le bord de fuite de l'aileron et qui sert à ajuster la déportance générée par un aileron pour des angles d'attaque importants.

FLUX AERODYNAMIQUE : autre nom donné au flux d'air qui règne autour d'une F1.

FOND PLAT : ancien nom donné à l'underbody avant la réglementation imposant le stepped plane.

GARDE AU SOL : distance entre la route et l'underbody de la Formule 1.

GRADIENT : grandeur vectorielle qui indique comment une grandeur physique varie en fonction de ses différents paramètres.

INCIDENCE : angle donné à un aileron par rapport à la direction du flux aérodynamique.

INTRADOS : face inférieure d'une aile d'avion.

JUPES AERODYNAMIQUES : grands appendices situés à la fois sous la voiture et sur les côtés qui emprisonnent l'air et qui produisent une succion tellement grande que même les forces G ne peuvent décoller la voiture du sol. Elles contribuent à la naissance de l'effet de sol.

LOI DE BERNOULLI : stipule que dans le flux d'un fluide, une augmentation de vitesse se produit simultanément avec la diminution de la pression. Ce principe est une simplification de l'équation de Bernoulli qui déclare que la somme de toutes les formes d'énergie dans un fluide coulant le long d'un chemin inclus est identique à deux points quelconques dans ce chemin.

MUSEAU (ou NEZ) : partie située en amont des roues avant d'une F1 qui supporte l'aileron avant.

NOMBRE DE MACH : nombre sans dimension, noté Ma , qui exprime le rapport de la vitesse locale d'un fluide sur la vitesse du son dans ce même fluide. Par extension, lorsqu'un objet solide est en mouvement par rapport à un fluide, on peut associer à cet objet un nombre de Mach en considérant la vitesse relative de l'écoulement autour de l'objet. On dit ainsi d'un avion qu'il vole à Mach 1 si sa vitesse est égale à celle du son, à Mach 2 si sa vitesse correspond à deux fois la vitesse du son, et ainsi de suite. Il est nommé en l'honneur du physicien et philosophe autrichien Ernst Mach.



NOMBRE DE REYNOLDS : Grandeur sans dimension qui caractérise un écoulement. En particulier la nature du régime (laminaire, transitoire, turbulent etc. ...). Il représente le rapport entre forces d'inertie et forces visqueuses ou le rapport (qualitatif) du transfert par convection par le transfert par diffusion de la quantité de mouvement. Il est le plus important nombre sans dimension en dynamique des fluides. Il a été mis en évidence en 1883 par Osborne Reynolds.

ONDE : propagation d'une perturbation, qui produit sur son passage une variation réversible de propriétés physiques locales. Comme on peut modéliser l'intensité de la perturbation par l'énergie, on peut dire qu'une onde est un transport d'énergie sans transport de matière. Illustrons la notion de « transport d'énergie sans transport de matière ». Dans le cas d'une onde mécanique, on observe de petits déplacements locaux et éphémères des éléments du milieu qui supportent cette onde, mais pas de transport global de ces éléments. Il en est ainsi pour une vague marine qui correspond aux oscillations verticales de molécules d'eau qui agitent le bateau en mer. Dans ce contexte, un déplacement horizontal de matière est un courant ; or, on peut avoir une vague sans courant, voir même une vague allant à contre-courant. La vague transporte horizontalement l'énergie du vent qui lui a donné naissance au large, et ce indépendamment du transport global de l'eau.

ONDE DE CHOC : type d'onde, mécanique ou d'une autre nature, associé à l'idée d'une transition brutale. Elle peut prendre la forme d'une vague de haute pression, et elle est alors souvent créée par une explosion ou un choc de forte intensité.

PONTON : partie de la carrosserie située sur le côté d'une Formule 1 et dont le rôle est de conduire l'air vers les radiateurs. Sa forme étant source de perturbations aérodynamiques, un déflecteur est placé devant le ponton dans le but de dévier une partie de l'air.

PORTANCE : force perpendiculaire à la direction de la vitesse, dirigée vers le haut et qui permet à l'objet de voler.

SIMULATION NUMERIQUE : calcul réalisé par ordinateur afin de prévoir le comportement d'une F1 face à un phénomène physique complexe.

STEPPED PLANE : surface de l'underbody située de part et d'autre du skid pad à 50 mm au dessus du plan de référence.

TRAINÉE : force aérodynamique qui s'oppose à l'avancement d'un mobile dans l'air.

TURBULENCE : La turbulence désigne l'état d'un fluide, liquide ou gaz, dans lequel la vitesse présente en tout point un caractère tourbillonnaire : tourbillons dont la taille, la localisation et l'orientation varient constamment. Les écoulements turbulents se caractérisent donc par une apparence très désordonnée, un comportement non prévisible et l'existence de nombreuses échelles spatiales et temporelles. De tels écoulements apparaissent lorsque la source d'énergie cinétique qui met le fluide en mouvement est relativement intense devant les forces de viscosité que le fluide oppose pour se déplacer.

SKID PAD (ou SKID BLOCK ou SABOT) : pièce en bois rectangulaire de 10 mm d'épaisseur et de 330 mm de large fixé sous l'underbody dans l'axe de la monoplace. Le sabot limite la garde au sol optimale d'une F1 à 50 mm (une usure excessive du sabot conduit à une disqualification).

SOUFFLERIE : appareil permettant d'effectuer des tests aérodynamiques.

TURBULENCE : désigne l'état d'un fluide, liquide ou gaz, dans lequel la vitesse présente en tout point un caractère tourbillonnaire : tourbillons dont la taille, la localisation et l'orientation varient constamment. Les écoulements turbulents se caractérisent donc par une apparence très désordonnée, un comportement non prévisible et l'existence de nombreuses échelles spatiales et temporelles. De tels écoulements apparaissent lorsque la source d'énergie cinétique qui met le fluide en mouvement est relativement intense devant les



forces de viscosité que le fluide oppose pour se déplacer.

UNDERBODY : partie inférieure de l'une F1 qui fait face à la piste. Parfois appelé fond plat en référence à sa forme avant l'introduction du skid pad.

VISCOSITE : désigne la capacité d'un fluide à s'écouler. Lorsque la viscosité augmente, la capacité du fluide à s'écouler diminue. La viscosité tend à diminuer lorsque la température augmente. Par contre, on pourrait croire que la viscosité d'un fluide s'accroît avec sa densité mais ce n'est pas nécessairement le cas.

VENTURI : tube comportant un rétrécissement de sa section. Le débit d'air étant constant, l'air est accéléré après ce rétrécissement.

VORTEX : dans un écoulement à surface libre, un vortex est un tourbillon d'axe vertical muni d'une dépression plus ou moins importante sur cet axe.

WINGLET : élément aérodynamique généralement intégré à la carrosserie des F1 modernes dans le but d'assainir et de canaliser certaines portions du flux d'air afin d'améliorer l'efficacité aérodynamique.



9 ANNEXE 3 : Effet Visuel de l'Evolution des F1 depuis 1950

Au travers de cette annexe je vous propose un effet visuel de l'évolution des Formule 1.

Les tableaux donnent les informations suivantes de gauche à droite :

- Année de conception
- Année(s) d'utilisation en Grand Prix
- Nom du modèle
- Moteur
- Pneus
- Concepteur(s)



Le symbole  sous le nom du modèle indique que ce dernier a contribué à ce que la marque remporte le championnat du monde des pilotes et/ou des constructeurs.



9.1 Ferrari

1950	1950 à 1952	125	Dunlop Pirelli	Ferrari 1.5L V12	Giocchino Colombo	
1950	1950 à 1953	166	Pirelli	Ferrari 1.5L V12	Aurelio Lampredi	
1950	1950	275	Pirelli	Ferrari 3.3L V12	Aurelio Lampredi	
1950	1950 1951	375	Pirelli	Ferrari 4.5L V12	Aurelio Lampredi	



1951	1951 1952	212	Pirelli	?	Aurelio Lampredi	
1951	1951	375TW	Pirelli	Ferrari 4.5L V12	Aurelio Lampredi	
1952	1952 à 1957	500  1952 1953	Pirelli Englebert Dunlop Avon	Ferrari 2.0L 4EL	Aurelio Lampredi	
1953	1953 1954	553	Pirelli	Ferrari 2.0L 4EL	Aurelio Lampredi	
1954	1954 1955	625	Pirelli Englebert	Ferrari 2.5L 4EL	Aurelio Lampredi	



1955	1955 1956	555	Englebert Firestone	Ferrari 2.5L 4EL	Aurelio Lampredi	
1956	1956	D50 	Pirelli Englebert	Lancia- Ferrari	Vittorio Jano	
1957	1957	801	Pirelli Englebert	Lancia- Ferrari	Vittorio Jano	
1958	1958 à 1960	D246  1958	Englebert Dunlop	Ferrari 2.5L V6	Vittorio Jano & Carlo Chiti	
1961	1961 à 1964	156  1961	Dunlop	Ferrari 1.5L V6	Vittorio Jano & Carlo Chiti	



1964	1964 1965	158  1964	Dunlop	Ferrari 1.5L V6	Mauro Forghieri	
1964	1964 1965	1512	Dunlop	Ferrari 1.5L V6	Mauro Forghieri	
1966	1966	246	Firestone	Ferrari 1.5L V8	Mauro Forghieri	
1966	1966 à 1969	312	Firestone	Ferrari 3.0L V12	Mauro Forghieri	
1970	1970 à 1972	312B	Firestone	Ferrari 3.0L FLAT12	Mauro Forghieri	



1971	1971 à 1973	312B2	Firestone Goodyear	Ferrari 3.0L FLAT12	Mauro Forghieri	
1973	1973 à 1975	312B3	Goodyear	Ferrari 3.0L FLAT12	Mauro Forghieri & Franco Rocchi	
1975	1975 1976	312T  1975 1976	Goodyear	Ferrari 3.0L FLAT12	Mauro Forghieri & Franco Rocchi	
1976	1976 à 1978	312T2  1976 1977	Goodyear Michelin en 1978	Ferrari 3.0L FLAT12	Mauro Forghieri & Franco Rocchi	
1978	1978 1979	312T3	Michelin	Ferrari 3.0L FLAT12	Mauro Forghieri	



1979	1979	312T4 	Michelin	Ferrari 3.0L FLAT12	Mauro Forghieri	
1980	1980	312T5	Michelin	Ferrari 3.0L FLAT12	Mauro Forghieri	
1981	1981	126CK	Michelin	Ferrari 1.5L V6 Turbo	Mauro Forghieri & Antonio Tomaini	
1982	1982	126C2 	Goodyear	Ferrari 1.5L V6 Turbo	Harvey Postlethwaite & Mauro Forghieri	
1983	1983	126C2B 	Goodyear	Ferrari 1.5L V6 Turbo	Harvey Postlethwaite & Mauro Forghieri	



1983	1983	126C3 	Goodyear	Ferrari 1.5L V6 Turbo	Harvey Postlethwaite & Mauro Forghieri	
1984	1984	126C4	Goodyear	Ferrari 1.5L V6 Turbo	Harvey Postlethwaite & Mauro Forghieri	
1985	1985	156/85	Goodyear	Ferrari 1.5L V6 Turbo	Harvey Postlethwaite & Jean-Claude Migeot	
1986	1986	F186	Goodyear	Ferrari 1.5L V6 Turbo	Harvey Postlethwaite & Jean-Claude Migeot	
1987	1987	F187	Goodyear	Ferrari 1.5L V6 Turbo	John Barnard & Gustav Brunner	
1988	1988	F187/88C	Goodyear	Ferrari 1.5L V6 Turbo	John Barnard & Gustav Brunner	



1989	1989	640	Goodyear	Ferrari 3.5L V12 Atmo.	John Barnard & Gordon Kimball	
1990	1990	641	Goodyear	Ferrari 3.5L V12 Atmo.	John Barnard & Enrique Scalobroni	
1991	1991	642	Goodyear	Ferrari 3.5L V12 Atmo.	Steve Nichols & Jean-Claude Migeot	
1991	1991	643	Goodyear	Ferrari 3.5L V12 Atmo.	Steve Nichols & Jean-Claude Migeot	
1992	1992	F92A	Goodyear	Ferrari 3.5L V12 Atmo.	Steve Nichols & Jean-Claude Migeot	
1992	1992	F92AT	Goodyear	Ferrari 3.5L V12 Atmo.	Steve Nichols & Jean-Claude Migeot	



1993	1993	F93A	Goodyear	Ferrari 3.5L V12 Atmo.	Steve Nichols & Jean-Claude Migeot	
1994	1994	412T1	Goodyear	Ferrari 3.5L V12 Atmo.	John Barnard & Gustav Brunner	
1994	1994	412T1B	Goodyear	Ferrari 3.5L V12 Atmo.	John Barnard & Gustav Brunner	
1995	1995	412T2	Goodyear	Ferrari 3.0L V12 Atmo.	John Barnard & Gustav Brunner	
1996	1996	F310	Goodyear	Ferrari 3.0L V10 Atmo.	John Barnard & Rory Byrne	
1997	1997	F310B	Goodyear	Ferrari 3.0L V10 Atmo.	John Barnard & Rory Byrne	



1998	1998	F300	Goodyear	Ferrari 3.0L V10 Atmo.	Ross Brawn & Rory Byrne	
1999	1999	F399 	Bridgestone	Ferrari 3.0L V10 Atmo.	Rory Byrne & Ross Brawn	
2000	2000	F1-2000 	Bridgestone	Ferrari 3.0L V10 Atmo.	Rory Byrne & Ross Brawn	
2001	2001 2002	F2001  2001 2002	Bridgestone	Ferrari 3.0L V10 Atmo.	Rory Byrne & Ross Brawn	
2002	2002 2003	F2002 	Bridgestone	Ferrari 3.0L V10 Atmo.	Rory Byrne & Ross Brawn	



2003	2003	F2003-GA 	Bridgestone	Ferrari 3.0L V10 Atmo.	Rory Byrne & Ross Brawn	
2004	2004	F2004 	Bridgestone	Ferrari 3.0L V10 Atmo.	Rory Byrne & Ross Brawn	
2005	2005	F2004M	Bridgestone	Ferrari 3.0L V10 Atmo.	Rory Byrne & Ross Brawn	
2005	2005	F2005	Bridgestone	Ferrari 3.0L V10 Atmo.	Aldo Costa	
2006	2006	248F1	Bridgestone	Ferrari 2.4L V8 Atmo.	Aldo Costa & Rory Byrne & Ross Brawn	



9.2 McLaren

1966	1966 à 1968	M2B	Firestone	Climax 2.7L 4EL Ford 3.0L V8	Robin Herd	
1967	1967	M4B	Goodyear	BRM 2.0L V8	Robin Herd	
1967	1967 1968	M5A	Goodyear	BRM 2.0L V8	Robin Herd	
1968	1968 à 1970	M7A	Goodyear Dunlop Firestone	Ford- Cosworth 3.0L V8	Robin vent	
1969	1969 à 1971	M7C	Goodyear Firestone	Ford- Cosworth 3.0L V8	Robin Herd	



1970	1970 à 1971	M14A	Goodyear	Ford- Cosworth 3.0L V8	Jo Marquart	
1970	1970	M14D	Goodyear	Alfa- Romeo 3.0L V8 Ford- Cosworth 3.0L V8	Jo Marquart	
1971	1971 1972	M19A	Goodyear	Ford- Cosworth 3.0L V8	Ralph Bellamy	
1972	1972 1973	M19C	Goodyear	Ford- Cosworth 3.0L V8	Ralph Bellamy	
1973	1973 à 1978	M23  1974 1976	Goodyear	Ford- Cosworth 3.0L V8	Gordon Coppuck	



						
1977	1977 à 1979	M26	Goodyear	Ford-Cosworth 3.0L V8	Gordon Coppuck	
1979	1979	M28	Goodyear	Ford-Cosworth 3.0L V8	Gordon Coppuck	
1979	1979 1980	M29	Goodyear	Ford-Cosworth 3.0L V8	Gordon Coppuck	
1980	1980	M30	Goodyear	Ford-Cosworth 3.0L V8	Gordon Coppuck	
1981	1981	M29F	Michelin	Ford-Cosworth 3.0L V8	Gordon Coppuck	



1981	1981 à 1982	MP4-1	Michelin	Ford-Cosworth 3.0L V8	John Barnard	
1981	1982	MP4-1B	Michelin	Ford-Cosworth 3.0L V8	John Barnard	
1983	1983	MP4-1C	Michelin	Ford-Cosworth 3.0L V8	John Barnard	
1983	1983	MP4-1E	Michelin	TAG Porsche 1.5L V6 Turbo	John Barnard	
1984	1984	MP4-2 	Michelin Goodyear	TAG Porsche 1.5L V6 Turbo	John Barnard	



1984	1985	MP4-2B 	Goodyear	TAG Porsche 1.5L V6 Turbo	John Barnard	
1986	1986	MP4-2C 	Goodyear	TAG Porsche 1.5L V6 Turbo	John Barnard	
1987	1987	MP4-3	Goodyear	TAG Porsche 1.5L V6 Turbo	Steve Nichols	
1988	1988	MP4-4 	Goodyear	Honda 1.5L V6 Turbo	Steve Nichols & Gordon Murray	
1989	1989	MP4-5 	Goodyear	Honda 3.5L V10 Atmo.	Neil Oatley	



1990	1990	<p>MP4-5B</p> 	Goodyear	Honda 3.5L V10 Atmo.	Neil Oatley	
1991	1991	<p>MP4-6</p> 	Goodyear	Honda 3.5L V12 Atmo.	Neil Oatley	
1992	1992	MP4-6B	Goodyear	Honda 3.5L V12 Atmo.	Neil Oatley	
1992	1992	MP4-7A	Goodyear	Honda 3.5L V12 Atmo.	Neil Oatley	
1993	1993	MP4-8	Goodyear	Ford- Cosworth 3.5L V8 Atmo.	Neil Oatley	
1994	1994	MP4-9	Goodyear	Peugeot 3.5L V10 Atmo.	Neil Oatley	



1995	1995	MP4-10	Goodyear	Mercedes 3.0L V10 Atmo.	Neil Oatley	
1995	1995	MP4-10B	Goodyear	Mercedes 3.0L V10 Atmo.	Neil Oatley	
1995	1995	MP4-10C	Goodyear	Mercedes 3.0L V10 Atmo.	Neil Oatley	
1996	1996	MP4-11	Goodyear	Mercedes 3.0L V10 Atmo.	Neil Oatley & Henri Durand	
1997	1997	MP4-12	Goodyear	Mercedes 3.0L V10 Atmo.	Neil Oatley & Henri Durand	
1998	1998	MP4-13 	Bridgestone	Mercedes 3.0L V10 Atmo.	Adrian Newey & Neil Oatley	



1999	1999	MP4-14 	Bridgestone	Mercedes 3.0L V10 Atmo.	Adrian Newey & Neil Oatley	
2000	2000	MP4-15	Bridgestone	Mercedes 3.0L V10 Atmo.	Adrian Newey & Neil Oatley	
2001	2001	MP4-16	Bridgestone	Mercedes 3.0L V10 Atmo.	Adrian Newey & Neil Oatley	
2002	2002	MP4-17	Michelin	Mercedes 3.0L V10 Atmo.	Adrian Newey & Neil Oatley	



2003	2003	MP4-17D	Michelin	Mercedes 3.0L V10 Atmo.	Adrian Newey & Neil Oatley	
2004	2004	MP4-19	Michelin	Mercedes 3.0L V10 Atmo.	Adrian Newey & Mike Coughlan	
2004	2004	MP4-19B	Michelin	Mercedes 3.0L V10 Atmo.	Adrian Newey & Mike Coughlan	
2005	2005	MP4-20	Michelin	Mercedes 3.0L V10 Atmo.	Adrian Newey	
2006	2006	MP4-21	Michelin	Mercedes 2.4L V8 Atmo.	Paddy Lowe & Tim Goss	



9.3 Williams

1975	1975 1976	FW	Goodyear	Ford-Cosworth 3.0L V8	John Clarke	
1975	1875 1976	FW04	Goodyear	Ford-Cosworth 3.0L V8	Ray Stokoe	
1976	1976	FW05	Goodyear	Ford-Cosworth 3.0L V8	Harvey Postlethwaite	
1978	1978 à 1979	FW06	Goodyear	Ford-Cosworth 3.0L V8	Patrick Head & Neil Oatley	
1979	1979 à 1981	FW07  1980	Goodyear Michelin	Ford-Cosworth 3.0L V8	Patrick Head & Neil Oatley	
1980	1980	FW07B  1980	Goodyear Michelin	Ford-Cosworth 3.0L V8	Patrick Head & Neil Oatley	



1981	1981	FW07C 	Goodyear Michelin	Ford- Cosworth 3.0L V8	Patrick Head & Neil Oatley	
1982	1982	FW08 	Goodyear	Ford- Cosworth 3.0L V8	Patrick Head & Neil Oatley	
1983	1983	FW08C	Goodyear	Ford- Cosworth 3.0L V8	Patrick Head & Neil Oatley	
1983	1983 1984	FW09	Goodyear	Honda 1.5L V6 Turbo	Patrick Head & Neil Oatley	
1984	1984	FW09B	Goodyear	Honda 1.5L V6 Turbo	Patrick Head & Neil Oatley	
1985	1985	FW10	Goodyear	Honda 1.5L V6 Turbo	Patrick Head & Neil Oatley	



1986	1986	FW11 	Goodyear	Honda 1.5L V6 Turbo	Patrick Head & Sergio Rinland	
1987	1987	FW11B 	Goodyear	Honda 1.5L V6 Turbo	Patrick Head & Sergio Rinland	
1988	1988	FW12	Goodyear	Judd 3.5L V8 Atmo.	Patrick Head & Enrique Scalabroni	
1989	1989	FW12C	Goodyear	Renault 3.5L V10 Atmo.	Patrick Head & Enrique Scalabroni	
1989	1989	FW13	Goodyear	Renault 3.5L V10 Atmo.	Patrick Head & Enrique Scalabroni	



1990	1990	FW13B	Goodyear	Renault 3.5L V10 Atmo.	Patrick Head & Enrique Scalabrini	
1991	1991	FW14	Goodyear	Renault 3.5L V10 Atmo.	Patrick Head & Adrian Newey	
1992	1992	FW14B 	Goodyear	Renault 3.5L V10 Atmo.	Patrick Head & Adrian Newey	
1993	1993	FW15C 	Goodyear	Renault 3.5L V10 Atmo.	Patrick Head & Adrian Newey	
1994	1994	FW16 	Goodyear	Renault 3.5L V10 Atmo.	Patrick Head & Adrian Newey	



1994	1994	FW16B 	Goodyear	Renault 3.5L V10 Atmo.	Patrick Head & Adrian Newey	
1995	1995	FW17	Goodyear	Renault 3.0L V10 Atmo.	Patrick Head & Adrian Newey	
1995	1995	FW17B	Goodyear	Renault 3.0L V10 Atmo.	Patrick Head & Adrian Newey	
1996	1996	FW18 	Goodyear	Renault 3.0L V10 Atmo.	Patrick Head & Adrian Newey	
1997	1997	FW19 	Goodyear	Renault 3.0L V10 Atmo.	Patrick Head & Adrian Newey	
1998	1998	FW20	Goodyear	Mecachrome 3.0L V10 Atmo.	Patrick Head & aileron Fisher	



1999	1999	FW21	Bridgestone	Supertec 3.0L V10 Atmo.	Patrick Head & aileron Fisher	
2000	2000	FW22	Bridgestone	BMW 3.0L V10 Atmo.	Patrick Head & aileron Fisher	
2001	2001	FW23	Michelin	BMW 3.0L V10 Atmo.	Patrick Head & aileron Fisher	
2002	2002	FW24	Michelin	BMW 3.0L V10 Atmo.	Patrick Head & aileron Fisher	
2003	2003	FW25	Michelin	BMW 3.0L V10 Atmo.	Patrick Head & aileron Fisher	



2004	2004	FW26	Michelin	BMW 3.0L V10 Atmo.	Patrick Head & aileron Fisher	
2005	2005	FW27	Michelin	BMW 3.0L V10 Atmo.	Sam Michael	
2006	2006	FW28	Bridgestone	Cosworth 2.4L V8 Atmo.	Sam Michael & Loïc Bigeois & Joërg Zander	



9.4 Lotus

1958	1958 1959	12	Dunlop	Climax 2.0L 4EL	Colin Chapman	
1958	1958 à 1960	16	Dunlop	Climax 2.0L 4EL	Colin Chapman	
1960	1960 à 1963	18	Dunlop	Europe Climax Maserati 2.5L 4EL	Colin Chapman	
1961	1961 à 1965	21	Dunlop	Climax 1.5L V8	Colin Chapman	
1962	1962 à 1965	24	Dunlop	BRM Climax 1.5L V8	Colin Chapman	
1962	1962 à 1967	25 	Dunlop	BRM Climax 1.5L V8	Colin Chapman	



1964	1964 à 1967	33  1965	Dunlop Firestone	BRM Climax 1.5L V8	Colin Chapman	
1966	1966 1967	43	Firestone	BRM 2.0L V8	Colin Chapman & Maurice Philippe	
1967	1967 à 1970	49  1968	Dunlop Firestone	Ford- Cosworth 3.0L V8	Colin Chapman & Maurice Philippe	
1968	1968 à 1970	49B  1968	Firestone	Ford- Cosworth 3.0L V8	Colin Chapman & Maurice Philippe	
1969	1969	63	Firestone	Ford- Cosworth 3.0L V8	Colin Chapman & Maurice Philippe	
1970	1970	49C	Firestone	Ford- Cosworth 3.0L V8	Colin Chapman & Maurice Philippe	



1970	1970 à 1975	72A	Firestone Goodyear	Ford-Cosworth 3.0L V8	Colin Chapman & Maurice Philippe	
1970	1970	72B	Firestone	Ford-Cosworth 3.0L V8	Colin Chapman & Maurice Philippe	
1970	1970 1971	72C  1970	Firestone	Ford-Cosworth 3.0L V8	Colin Chapman & Maurice Philippe	
1971	1971 à 1973	72D  1972 1973	Firestone Goodyear	Ford-Cosworth 3.0L V8	Colin Chapman & Maurice Philippe	
1971	1971	56B	Firestone	Pratt & Whitney Turbine	Colin Chapman & Maurice Philippe	
1973	1973 à 1975	72E  1973	Firestone	Ford-Cosworth 3.0L V8	Colin Chapman & Maurice Philippe	



1974	1974	76	Goodyear	Ford-Cosworth 3.0L V8	Colin Chapman & Ralf Bellamy	
1975	1975	72F	Goodyear	Ford-Cosworth 3.0L V8	Colin Chapman & Maurice Philippe	
1976	1976	77	Goodyear	Ford-Cosworth 3.0L V8	Colin Chapman Geoff Aldridge Martin Ogilvie	
1977	1977 1978	78  1978	Goodyear	Ford-Cosworth 3.0L V8	Colin Chapman Geoff Aldridge Martin Ogilvie	
1978	1978 1979	79  1978	Goodyear	Ford-Cosworth 3.0L V8	Colin Chapman Geoff Aldridge Martin Ogilvie Peter Wriight	



1979	1979	80	Goodyear	Ford-Cosworth 3.0L V8	Colin Chapman & Geoff Aldridge & Martin Ogilvie	
1980	1980	81	Goodyear	Ford-Cosworth 3.0L V8	Colin Chapman & Martin Ogilvie	
1980	1980 1981	81B	Goodyear Michelin	Ford-Cosworth 3.0L V8	Colin Chapman & Martin Ogilvie	
1981	1981	88	Michelin	Ford-Cosworth 3.0L V8	Colin Chapman & Martin Ogilvie	
1981	1981	87	Goodyear Michelin	Ford-Cosworth 3.0L V8	Colin Chapman & Martin Ogilvie	



1982	1982	87B	Goodyear	Ford-Cosworth 3.0L V8	Colin Chapman & Martin Ogilvie	
1982	1982 1983	91	Goodyear Pirelli	Ford-Cosworth 3.0L V8	Colin Chapman & Martin Ogilvie	
1983	1983	92	Pirelli	Ford-Cosworth 3.0L V8	Colin Chapman & Martin Ogilvie	
1983	1983	93T	Pirelli	Renault 1.5L V6 Turbo	Colin Chapman & Martin Ogilvie	



1983	1983	94T	Pirelli	Renault 1.5L V6 Turbo	Gérard Ducarouge & Martin Ogilvie	
1984	1984	95T	Goodyear	Renault 1.5L V6 Turbo	Gérard Ducarouge & Martin Ogilvie	
1985	1985	97T	Goodyear	Renault 1.5L V6 Turbo	Gérard Ducarouge & Martin Ogilvie	
1986	1986	98T	Goodyear	Renault 1.5L V6 Turbo	Gérard Ducarouge & Martin Ogilvie	
1987	1987	99T	Goodyear	Honda 1.5L V6 Turbo	Gérard Ducarouge & Martin Ogilvie	



1988	1988	100T	Goodyear	Honda 1.5L V6 Turbo	Gérard Ducarouge & Martin Ogilvie	
1989	1989	101	Goodyear	Judd 3.5L V8 Atmo.	Frank Dernie & Mike Coughlan	
1990	1990	102	Goodyear	Lamborghini 3.5L V12 Atmo.	Frank Dernie & Mike Coughlan	
1991	1991	102B	Goodyear	Judd 3.5L V8 Atmo.	Enrique Scalabrini & Frank Coppuck	
1992	1992	102D	Goodyear	Ford- Cosworth 3.5L V8 Atmo.	Enrique Scalabrini & Frank Coppuck	



1992	1992	107	Goodyear	Ford-Cosworth 3.5L V8 Atmo.	Peter Wright & Chris Murphy	
1993	1993	107B	Goodyear	Ford-Cosworth 3.5L V8 Atmo.	Peter Wright & Chris Murphy	
1994	1994	107C	Goodyear	Mugen-Honda 3.5L V8 Atmo.	Peter Wright & Chris Murphy	
1994	1994	109	Goodyear	Mugen-Honda 3.5L V8 Atmo.	Peter Wright & Chris Murphy	



9.5 BRM

1951	1951	P15	Dunlop	BRM 1.5L V16	Peter Berthon	
1956	1956 à 1960	P25	Dunlop	BRM 2.5L 4EL	Peter Berthon	
1960	1960	P48	Dunlop	BRM 2.5L 4EL	Tony Rudd	
1961	1961 1962	P48/57	Dunlop	BRM Climax 2.5L 4EL	Tony Rudd	
1961	1961 à 1965	P57  1962	Dunlop	BRM Climax 1.5L V8	Tony Rudd	



1963	1963 à 1966	P61	Dunlop	BRM 1.5L V8	Tony Rudd	
1964	1964 à 1968	P261	Dunlop Firestone Goodyear	BRM 1.5L V8	Tony Rudd	
1966	1966 1967	P83	Dunlop Firestone Goodyear	BRM 2.0L V8	Tony Rudd	
1967	1967 1968	P115	Goodyear	BRM 2.0L V8	Tony Rudd	
1968	1968 1969	P126	Dunlop Goodyear	BRM 3.0L V12	Len terry	



1968	1968 1969	P133	Dunlop Goodyear	BRM 3.0L V12	Len terry	
1968	1968 1969	P138	Dunlop	BRM 3.0L V12	Len terry	
1969	1969 1970	P139	Dunlop Goodyear	BRM 3.0L V12	Len terry	
1970	1970	P153	Dunlop Firestone	BRM 3.0L V12	Tony Southgate	



1971	1970 à 1972	P160	Firestone	BRM 3.0L V12	Tony Southgate	
1972	1972	P160B	Firestone	BRM 3.0L V12	Tony Southgate	
1972	1972	P180	Firestone	BRM 3.0L V12	Tony Southgate	
1972	1972	P153B	Firestone	BRM 3.0L V12	Tony Southgate	
1972	1972 1973	P160C	Firestone	BRM 3.0L V12	Tony Southgate	
1973	1973	P160D	Firestone	BRM 3.0L V12	Tony Southgate	



1973	1973 à 1974	P160E	Firestone	BRM 3.0L V12	Tony Southgate	
1974	1974 1975	P201	Firestone Goodyear	BRM 3.0L V12	Mike Pilbeam	
1976	1976 1977	P201B	Goodyear	BRM 3.0L V12	Mike Pilbeam	
1977	1977	P207	Goodyear	BRM 3.0L V12	Len terry	



9.6 Cooper

1952	1952 1953	T20	Dunlop	Bristol 2.0L 6EL	Owen Maddock	
1953	1953 1954	T24	Dunlop	Alta 2.0L 4EL	Owen Maddock	
1955	1955	T40	Dunlop	Bristol 2.2L 6EL	Owen Maddock & Jack Europe	
1957	1957 à 1960	T43	Avon Continental Dunlop	Climax 1.5L 4EL & 2.0L 4EL	Owen Maddock	



1957	1957 à 1958	T44	Dunlop	Bristol 2.2L 6EL Climax 2.0L 4EL	Owen Maddock	
1958	1958 à 1961	T45	Dunlop	Castelloti Climax Maserati 2.0L 4EL	Owen Maddock	
1959	1959 à 1965	T51  1959	Dunlop	Alfa Borgward Castellotti Climax Maserati 2.0L 4EL	Owen Maddock	
1960	1960 à 1963	T53  1960	Dunlop	Alfa Romeo 1.5L V8 Climax 2.0L 4EL	Owen Maddock	



1961	1961 à 1968	T55	Dunlop Firestone	Climax 1.5L V8	Owen Maddock	
1961	1961	T58	Dunlop	Climax 1.5L V8	Owen Maddock	
1962	1962 à 1965	T60	Dunlop	Climax 1.5L V8	Owen Maddock	
1963	1963 à 1964	T66	Dunlop	Climax 1.5L V8	Owen Maddock	
1964	1964 à 1966	T73	Dunlop	Climax 1.5L V8	Eddie Strait	



1965	1965 à 1967	T77	Dunlop	Climax 1.5L V8	Eddie Strait	
1966	1966 à 1968	T81	Dunlop Firestone Goodyear	Maserati 3.0L V12	Derrick White	
1967	1967 1968	T81B	Firestone	Maserati 3.0L V12	Derrick White	
1967	1967 1968	T86	Firestone Goodyear	BRM 2.0L V8 Maserati 3.0L V12	Derrick White	
1968	1968 1969	T86B	Goodyear	BRM 2.0L V8 Maserati 3.0L V12	Derrick White	



9.7 Brabham

1962	1962 à 1965	BT3	Dunlop	BRM Climax 1.5L V8	Ron Tauranac	
1964	1963 à 1967	BT7	Dunlop Firestone Goodyear	Climax 1.5L V8	Ron Tauranac	
1964	1964 à 1968	BT11	Dunlop Firestone Goodyear	BRM Climax 1.5L V8 Repcro 3.0L V8	Ron Tauranac	
1964	1964 1965	BT10	Dunlop	Ford 1.4L 4EL	Ron Tauranac	
1966	1966	BT22	Firestone Goodyear	Climax 2.1L 4EL	Ron Tauranac	



1966	1966 1967	BT19  1966	Goodyear	Repco 3.0L V8	Ron Tauranac	
1966	1966 à 1969	B20	Dunlop Firestone Goodyear	Repco 3.0L V8	Ron Tauranac	
1967	1967 à 1969	BT24  1967	Dunlop Firestone Goodyear	Ford- Cosworth Repco 3.0L V8	Ron Tauranac	
1968	1968 1969	BT26	Goodyear	Ford- Cosworth Repco 3.0L V8	Ron Tauranac	
1969	1967 à 1969	BT26A	Goodyear	aileron 3.0L V8	Ron Tauranac	



1970	1970 à 1972	BT33	Firestone Goodyear	aileron 3.0L V8	Ron Tauranac	
1971	1971 à 1972	BT34	Goodyear	aileron 3.0L V8	Ron Tauranac	
1972	1972 à 1973	BT37	Goodyear	aileron 3.0L V8	Ralf Bellamy	
1973	1973 à 1974	BT42	Firestone Goodyear	aileron 3.0L V8	Gordon Murray	
1974	1974 à 1976	BT44	Firestone Goodyear	aileron 3.0L V8	Gordon Murray	



1976	1976 à 1977	BT45	Goodyear	Alfa-Romeo 3.0L V12 Ford-Cosworth 3.0L V8	Gordon Murray	
1977	1977	BT45B	Goodyear	Alfa-Romeo 3.0L V12	Gordon Murray	
1978	1978	BT46A	Goodyear	Alfa-Romeo 3.0L V12	Gordon Murray	
1978	1978	BT46B	Goodyear	Alfa-Romeo 3.0L V12	Gordon Murray	
1979	1979	BT48	Goodyear	Alfa-Romeo 3.0L V12	Gordon Murray & David North	



1979	1979 à 1980	BT49	Goodyear	Ford- Cosworth 3.0L V8	Gordon Murray & David North	
1981	1981 1982	BT49C  1981	Goodyear Michelin	Ford- Cosworth 3.0L V8	Gordon Murray & David North	
1982	1982	BT49D	Goodyear	Ford- Cosworth 3.0L V8	Gordon Murray & David North	
1982	1982	BT50	Goodyear	BMW 1.5L 4EL Turbo	Gordon Murray & David North	
1983	1983	BT52 	Michelin	BMW 1.5L 4EL Turbo	Gordon Murray & David North	
1983	1983	BT52B 	Michelin	BMW 1.5L 4EL Turbo	Gordon Murray & David North	



1984	1984	BT53	Michelin	BMW 1.5L 4EL Turbo	Gordon Murray & David North	
1985	1985 1986	BT54	Pirelli	BMW 1.5L 4EL Turbo	Gordon Murray & David North	
1986	1986	BT55	Pirelli	BMW 1.5L 4EL Turbo	Gordon Murray & David North	
1987	1987	BT56	Goodyear	BMW 1.5L 4EL Turbo	John Balwin & Sergio Rinland	
1989	1989 1990	BT58	Pirelli	Judd 3.5L V8 Atmo.	John Balwin & Sergio Rinland	



1990	1990	BT59	Pirelli	Judd 3.5L V8 Atmo.	Sergio Rinland	
1991	1991	BT59Y	Pirelli	Yamaha 3.5L V12 Atmo.	Sergio Rinland	
1991	1991	BT60Y	Pirelli	Yamaha 3.5L V12 Atmo.	Sergio Rinland & Tim Densham	
1992	1992	BT60B	Goodyear	Judd 3.5L V10 Atmo.	Sergio Rinland & Tim Densham	



9.8 Tyrrell

1970	1970 1971	001	Dunlop Goodyear	Ford- Cosworth 3.0L V8	Derek Gardner	
1971	1971 1972	002	Goodyear	Ford- Cosworth 3.0L V8	Derek Gardner	
1971	1971 1972	003  1971	Goodyear	Ford- Cosworth 3.0L V8	Derek Gardner	
1972	1972 à 1974	004	Firestone Goodyear	Ford- Cosworth 3.0L V8	Derek Gardner	
1972	1972 à 1974	005	Goodyear	Ford- Cosworth 3.0L V8	Derek Gardner	



1972	1972 à 1974	006  1973	Goodyear	Ford- Cosworth 3.0L V8	Derek Gardner	
1974	1974 à 1977	007	Bridgestone Dunlop Goodyear	Ford- Cosworth 3.0L V8	Derek Gardner	
1976	1976 1977	P34	Goodyear	Ford- Cosworth 3.0L V8	Derek Gardner	
1978	1978	008	Goodyear	Ford- Cosworth 3.0L V8	Maurice Philippe	
1979	1979 1980	009	Goodyear	Ford- Cosworth 3.0L V8	Maurice Philippe	



1980	1980 1981	010	Avon Goodyear Michelin	Ford- Cosworth 3.0L V8	Maurice Philippe	
1981	1981 à 1983	011	Avon Goodyear	Ford- Cosworth 3.0L V8	Maurice Philippe & Brian Lises	
1983	1983 à 1985	012	Goodyear	Ford- Cosworth 3.0L V8	Maurice Philippe & Brian Lises	
1985	1985 1986	014	Goodyear	Renault	Maurice Philippe & Brian Lises	
1986	1986	015	Goodyear	Renault	Maurice Philippe & Brian Lises	
1987	1987	D6016	Goodyear	Ford- Cosworth 1.5L V6 Turbo	Maurice Philippe & Brian Lises	
1988	1988	017	Goodyear	Ford- Cosworth 3.5L V8 Atmo.	Maurice Philippe & Brian Lises	



1989	1989	017B	Goodyear	Ford-Cosworth 3.5L V8 Atmo	Maurice Philippe & Brian Lisle	
1989	1989 1990	018	Goodyear Pirelli	Ford-Cosworth 3.5L V8 Atmo	Harvey Postlethwaite & Jean-Claude Migeot	
1990	1990	019	Pirelli	Ford-Cosworth 3.5L V8 Atmo	Harvey Postlethwaite & Jean-Claude Migeot	
1991	1991	020	Pirelli	Honda 3.5L V10 Atmo	Harvey Postlethwaite & Georges Ryton	
1992	1992	020B	Goodyear	Illmor 3.5L V10 Atmo	Georges Ryton & Mike Coughlan	



1993	1993	020C	Goodyear	Yamaha 3.5L V10 Atmo	Georges Ryton & Mike Coughlan	
1993	1993	021	Goodyear	Yamaha 3.5L V10 Atmo	Mike Coughlan	
1994	1994	022	Goodyear	Yamaha 3.5L V10 Atmo	Harvey Postlethwaite & Mike Gascoyne	
1995	1995	023	Goodyear	Yamaha 3.0L V10 Atmo	Harvey Postlethwaite & Mike Gascoyne	
1996	1996	024	Goodyear	Yamaha 3.0L V10 Atmo	Harvey Postlethwaite & Mike Gascoyne	



1997	1997	025	Goodyear	Ford-Cosworth 3.0L V8 Atmo	Harvey Postlethwaite & Mike Gascoyne	
1998	1998	026	Goodyear	Ford-Cosworth 3.0L V8 Atmo	Harvey Postlethwaite & Mike Gascoyne	



9.9 Benetton

1986	1986	B186	Pirelli	BMW 1.5L 4EL Turbo	Rory PRIX	
1987	1987	B187	Goodyear	Ford- Cosworth 3.5L V8 Atmo	Rory PRIX	
1988	1988	B188	Goodyear	Ford- Cosworth 3.5L V8 Atmo	Rory PRIX	
1989	1989	B189	Goodyear	Ford- Cosworth 3.5L V8 Atmo	Rory PRIX	
1990	1990	B190	Goodyear	Ford- Cosworth 3.5L V8 Atmo	Rory PRIX John Barnard	



1991	1991	B191	Pirelli	Ford-Cosworth 3.5L V8 Atmo	Rory Byrne John Barnard Gordon Kimball Ross Europe	
1992	1992	B192	Goodyear	Ford-Cosworth	Ross Europe	
1993	1993	B193	Goodyear	Ford-Cosworth	Ross Europe	
1994	1994	B194 	Goodyear	Ford-Cosworth 3.5L V8 Atmo	Ross Europe	
1995	1995	B195 	Goodyear	Renault 3.0L V10 Atmo	Ross Europe	
1996	1996	B196	Goodyear	Renault 3.0L V10 Atmo	Ross Europe	



1997	1997	B197	Goodyear	Renault 3.0L V10 Atmo	Ross Europe	
1998	1998	B198	Bridgestone	Mecachrome 3.0L V10 Atmo	Nick Wirth	
1999	1999	B199	Bridgestone	Supertec 3.0L V10 Atmo	Nick Wirth	
2000	2000	B200	Bridgestone	Supertec 3.0L V10 Atmo	Nick Wirth	
2001	2001	B201	Michelin	Renault 3.0L V10 Atmo	Nick Wirth	



9.10 Renault

1977	1977 à 1979	RS01	Michelin	Renault 1.5L V6 Turbo	André de Cortanze & placé Castaing	
1979	1979	RS10	Michelin	Renault 1.5L V6 Turbo	placé Castaing & Michel Tétu	
1980	1980	RE20	Michelin	Renault 1.5L V6 Turbo	placé Castaing & Michel Tétu	
1981	1981	RE20B	Michelin	Renault 1.5L V6 Turbo	placé Castaing & Michel Tétu	
1981	1981	RE30	Michelin	Renault 1.5L V6 Turbo	placé Castaing & Michel Tétu	
1982	1982	RE30B	Michelin	Renault 1.5L V6 Turbo	placé Castaing & Michel Tétu	



1983	1983	RE30C	Michelin	Renault 1.5L V6 Turbo	placé Castaing & Michel Tétu	
1983	1983	RE40	Michelin	Renault 1.5L V6 Turbo	Bernard Dudot & Michel Tétu	
1984	1984	RE50	Michelin	Renault 1.5L V6 Turbo	Bernard Dudot & Michel Tétu	
1985	1985	RE60	Goodyear	Renault 1.5L V6 Turbo	Bernard Dudot & Jean-Claude Migeot	
1985	1985	RE60B	Goodyear	Renault 1.5L V6 Turbo	Bernard Dudot & Jean-Claude Migeot	



2002	2002	R202	Michelin	Renault 3.0L V10 Atmo	Mike Gascoyne & Mark Smith	
2003	2003	R23	Michelin	Renault 3.0L V10 Atmo	Mike Gascoyne & Tim Densham	
2004	2004	R24	Michelin	Renault 3.0L V10 Atmo	Robert Bell & Mark Smith	
2005	2005	R25 	Michelin	Renault 3.0L V10 Atmo	Robert Bell & Mark Smith	
2006	2006	R26 	Michelin	Renault 2.4L V8 Atmo	Robert Bell	



9.11 Sauber

1993	1993	C12	Goodyear	Illmor 3.5L V10 Atmo	Harvey Postlethwaite & Leo Ress	
1994	1994	C13	Goodyear	Mercedes 3.5L V10 Atmo	André De Cortanze & Leo Ress	
1995	1995	C14	Goodyear	Ford- Cosworth 3.0L V10 Atmo	André De Cortanze & Leo Ress	
1996	1996	C15	Goodyear	Ford- Cosworth 3.0L V10 Atmo	Leo Ress	
1997	1997	C16	Goodyear	Petronas (Ferrari) 3.0L V10 Atmo	Leo Ress	



1998	1998	C17	Goodyear	Petronas (Ferrari) 3.0L V10 Atmo	Leo Ress	
1999	1999	C18	Bridgestone	Petronas (Ferrari) 3.0L V10 Atmo	Leo Ress & Sergio Rinland	
2000	2000	C19	Bridgestone	Petronas (Ferrari) 3.0L V10 Atmo	Willy Rampf	
2001	2001	C20	Bridgestone	Petronas (Ferrari) 3.0L V10 Atmo	Willy Rampf	
2002	2002	C21	Bridgestone	Petronas (Ferrari) 3.0L V10 Atmo	Willy Rampf	



2003	2003	C22	Bridgestone	Petronas (Ferrari) 3.0L V10 Atmo	Willy Rampf	
2004	2004	C23	Bridgestone	Petronas (Ferrari) 3.0L V10 Atmo	Willy Rampf	
2005	2005	C24	Michelin	Petronas (Ferrari) 3.0L V10 Atmo	Willy Rampf	
2006	2006	F1.06	Michelin	BMW 2.4L V8 Atmo	Willy Rampf	