

**Zeitschrift:** Tracés : bulletin technique de la Suisse romande  
**Herausgeber:** Société suisse des ingénieurs et des architectes  
**Band:** 130 (2004)  
**Heft:** 07: Aérodynamique en F1

**Artikel:** La simulation numérique des fluides au service de la Formule 1  
**Autor:** Fiorucci, Stefano  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-99295>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 13.01.2026

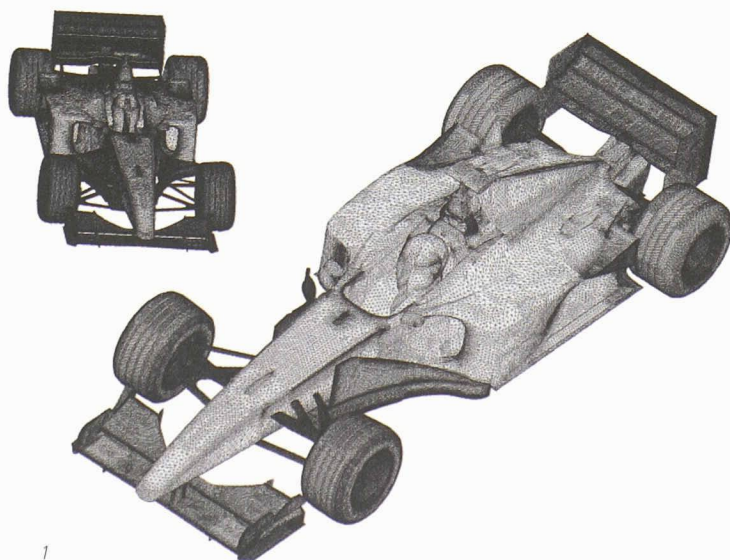
**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# La simulation numérique des fluides au service de la Formule 1

MOBILITÉ

Qui dit compétition automobile dit performance. L'ingénieur anglophone Colin Chapman résumait très bien le principal souci de tout aérodynamicien travaillant en Formule 1 : « If we reduce the whole car to an acceleration vector, then the first aim is to maintain it in the appropriate direction and at its highest value, on each path of the track »<sup>1</sup>. Cette phrase condense toutes les nécessités et implications touchant tant au développement de la mécanique qu'à l'aérodynamique de la voiture.

La présente contribution passe en revue les outils expérimentaux et numériques couramment utilisés en F1, ainsi que les principales difficultés et limitations relatives à chacun d'eux. Nul doute que les connaissances fondamentales en dynamique des fluides sont nécessaires à une approche la plus consistante possible de ce problème, tant pour les écuries de pointe que pour celles au budget plus limité. Il ne suffit en effet pas de produire d'impressionnantes quantités de résultats à traiter si l'on ne possède pas le recul nécessaire à la compréhension de ce que l'on a fait, en termes de physique de l'écoulement.



## Bases théoriques

L'aérodynamique est la branche de la mécanique des fluides qui décrit les lois régissant l'écoulement de l'air, son comportement, et les interactions avec le monde qui l'entoure. Nous sommes tous, à tout instant, plongés dans ce mélange gazeux visqueux, rotationnel, newtonien et compressible qu'est l'air ambiant. La viscosité de l'air, présente au niveau moléculaire, induit du frottement par adhérence sur la surface de l'objet et, par conséquent, l'apparition de couches limites à la surface de tout objet soumis à l'écoulement. La viscosité est en quelque sorte l' $\alpha$  et l' $\omega$  de la turbulence, puisqu'elle génère d'abord cette dernière, qui est transportée et modifiée au sein de l'écoulement, pour finalement la faire disparaître, dissipée en chaleur. La rotationnalité signifie que les molécules d'air peuvent tourner sur elles-mêmes, tel l'écoulement instable et turbulent de la fumée s'échappant d'une cigarette, par opposition au caractère laminaire de la première partie du filet de fumée. Le caractère newtonien indique que pour l'air - contrairement à certains polymères ou au fameux fromage fondant français qu'est la « Cancoillotte » - les relations liant les contraintes de cisaillement apparaissant à la surface de l'objet plongé dans l'écoulement sont linéairement proportionnelles aux gradients des vitesses de l'air sur l'objet. Enfin, la compressibilité de l'air n'est plus du tout négligeable dès que l'objet en mouvement acquiert une vitesse telle que les ondes de pression générées par sa présence dans l'écoulement n'ont plus le temps d'être uniformément transmises dans l'air. On peut comparer le phénomène aux vagues se propageant depuis le nez d'un bateau en mouvement sur la surface d'un lac calme : à partir d'une certaine vitesse, celles-ci sont comprimées à l'amont du bateau et rattrapées par ce dernier.

L'actuel niveau de connaissances en mécanique des fluides telle qu'elle est enseignée à l'EPFL repose sur plus d'un siècle d'expérimentations, d'analyses mathématiques, d'essais, et d'observations. Remontant à une origine antérieure à

<sup>1</sup> « Si l'on réduit l'ensemble de la voiture à un vecteur d'accélération, l'objectif prioritaire consiste alors à maintenir celui-ci dans la direction appropriée et à sa valeur maximale sur chaque partie du circuit. »



Léonard de Vinci, ces travaux ont abouti, vers le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, aux équations dites de Navier-Stokes, du nom des chercheurs qui ont décrit de la manière la plus complète l'écoulement d'un fluide (voir encadré).

### Applications à la F1

Parmi les innombrables applications de la simulation numérique des fluides, on trouve la Formule 1. Si les standards y sont équivalents à ceux de l'aéronautique militaire en termes de qualité de conception, réalisation et développement et au niveau des exigences de performances, les durées de développement y sont en revanche beaucoup plus brèves. La méthodologie classique consiste donc à tester expérimentalement un modèle simplifié de la voiture - comportant principalement l'enveloppe externe de la carrosserie - pour répondre aux objectifs suivants :

- comparer et évaluer la performance aérodynamique des différentes géométries conçues ;
- déterminer le meilleur compromis en termes d'appui au sol pour une motricité maximale, associée à une traînée minimale afin de réduire les pertes ;
- vérifier la stabilité en situation non stationnaire de freinage, d'accélération ou, plus généralement, lors de tout changement d'appui.

Lors d'un test en soufflerie, le modèle est fixé par le haut sur une balance équipée de jauges de contrainte, puis soumis à l'écoulement d'air avec un tapis roulant sous les roues pour reproduire le mouvement du sol. A partir des forces et moments ainsi mesurés, on obtient les valeurs des coefficients aérodynamiques (portance, traînée, moments de plongée, de lacet et de roulis) en fonction de la hauteur au sol de la voiture ou de son inclinaison autour des trois axes, pour chaque configuration conçue et à différentes vitesses. On peut également visualiser l'écoulement de l'air autour de la voiture par des filets de gaz, des sections de laser ou d'autres méthodes plus modernes d'imagerie assistée par ordinateur. D'éventuels essais sur piste permettent de calibrer les jauges de mesure de la pression autour du véhicule ou sur ses surfaces générant l'appui, principalement les ailerons. Les tubes de Pitot<sup>2</sup> sont alors montés sur le modèle lui-même. A noter que l'on s'intéresse aussi aux intensités locales de turbulence, mais occasionnellement et uniquement lors d'études plus académiques, en vue de valider les modèles implémentés dans les logiciels de résolution utilisés.

<sup>2</sup> Le tube de Pitot permet de mesurer la pression totale en un point dans l'écoulement, par exemple juste devant les entrées d'air des radiateurs ou du moteur.

### Les équations de Navier-Stokes : un défi toujours d'actualité

Cet ensemble d'équations aux dérivées partielles non linéaires du second ordre, basées sur la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie - auquel s'ajoute la relation constitutive propre au type de fluide étudié - est encore aujourd'hui un problème analytiquement ouvert, autrement dit non résolu, en raison notamment des non-linéarités advectives des termes décrivant l'accélération du fluide. Diverses universités et associations offrent de constants prix à qui apportera une solution unique et exacte à ce système<sup>3</sup>. Une façon d'approcher la solution de ces équations pour déterminer l'écoulement autour d'une géométrie complexe<sup>4</sup> consiste à discrétiser le problème et à calculer une solution approximative d'une variante aussi proche que possible de ces équations, à l'aide d'ordinateurs. En pratique, cela revient à découper le problème en petites parties et à tenter de résoudre les équations pour chaque sous-ensemble du domaine composant la géométrie complète. Mais là encore, divers niveaux de modélisation sont nécessaires, qui impliquent chacun une part d'erreur par rapport à la réalité : la région où est simulé l'écoulement n'est pas résolue de façon continue, mais seulement en un nombre fini de points, selon un schéma compatible avec le langage binaire et non continu des ordinateurs, qui est bien différent de notre monde réel ! Les équations résolues ne sont donc pas exactement celles de Navier-Stokes, mais leur pendant informatique, obtenu au prix de divers niveaux de simplification pour traduire numériquement chaque terme les composant. Autrement dit, l'art de la simulation numérique des fluides consiste en un savant dosage d'expérience, de capacités mathématiques et de compréhension de la physique de l'écoulement.

<sup>3</sup> <<http://www.lma.univ-bpclermont.fr/NSenet/>>

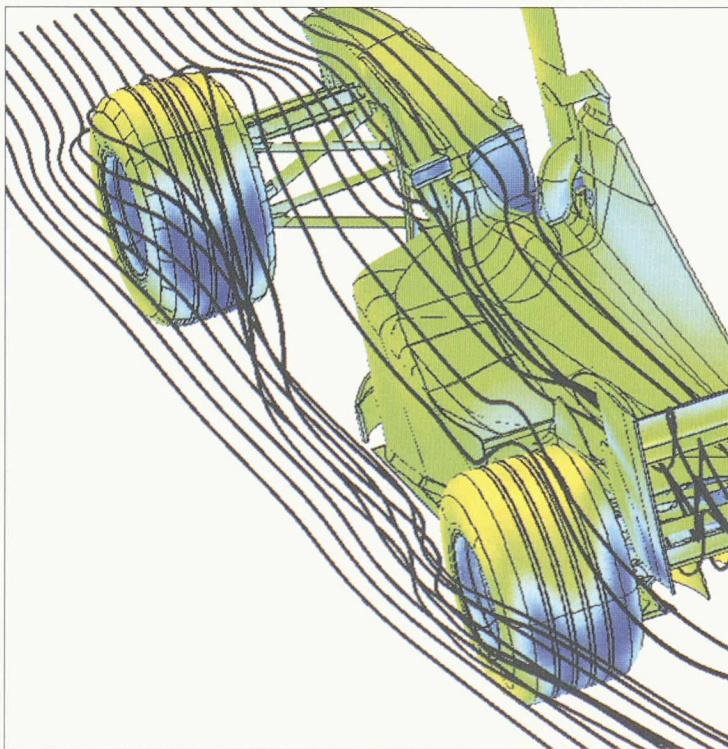
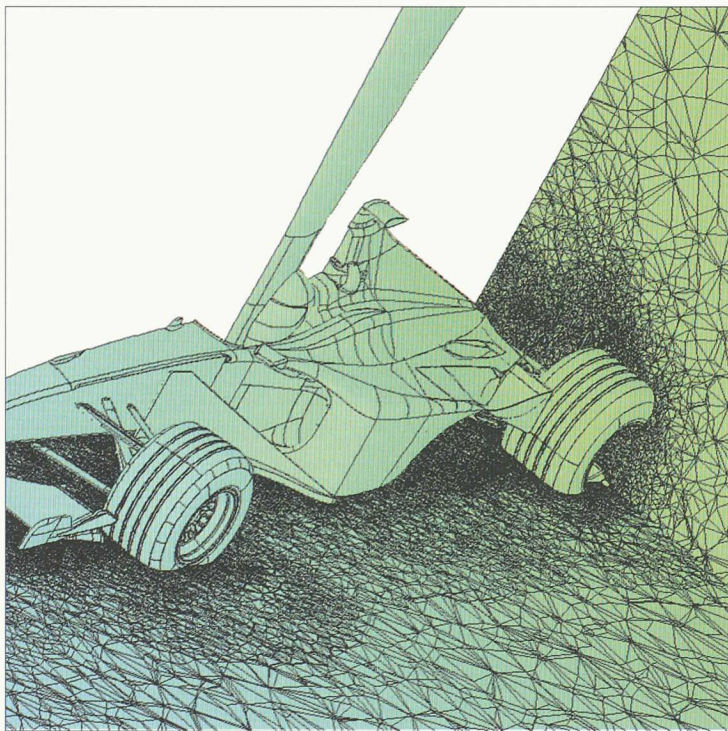
<sup>4</sup> Par complexe, il faut comprendre une forme autre qu'un simple cylindre bidimensionnel, qui est une des rares géométries très simples pour lesquelles on peut obtenir une solution analytique des équations de Navier-Stokes.



Fig. 2 : Plans de coupes dans le maillage volumique autour d'un modèle de soufflerie utilisé pour un calcul numérique de validation avec l'expérimental. On reconnaît le support vertical présent en soufflerie.

Fig. 3 : Exemple de solution calculée numériquement sur un modèle de soufflerie. Les lignes de courant mettent en évidence la re-circulation à l'aval de la voiture.

(Les documents illustrant cet article ont été fournis par Cambridge Flow Solutions Ltd, Vision Park, Compass House, Histon Cambridge, UK, <www.cambridgeflowsolutions.com>)



## Contraintes de la simulation numérique en F1

En Formule 1, la simulation numérique appliquée à l'aérodynamique a fait son apparition vers le milieu des années 80. Si elle a pu, dans un premier temps, être présentée comme une alternative aux tests en soufflerie - fort coûteux en temps et argent - la suite a quelque peu aplati les prévisions optimistes des numériciens, au grand plaisir des expérimentateurs qui ont encore de beaux jours devant eux. En effet, la soufflerie et la simulation sont aujourd'hui bien davantage complémentaires que concurrentes, et pas uniquement dans le monde de la compétition automobile.

La simulation numérique implique les étapes suivantes :

- la préparation de la géométrie, qui consiste à obtenir un modèle virtuel dont les principales surfaces prévues pour l'assemblage de la voiture ne comportent pas tous les détails d'assemblage (tels les trous et vis de fixation ou les espaces entre les éléments de carrosserie) bien que la tendance soit de prendre en considération un nombre toujours croissant de ces éléments ;
- la discrétisation du volume de calcul, qui déterminera le nombre et la position des points de calcul, en générant un maillage ;
- le calcul proprement dit, effectué à l'aide d'un logiciel approprié à la résolution des équations de Navier-Stokes<sup>5</sup> ;
- l'analyse des résultats, qui revient à fournir une observation quantitative et qualitative de l'écoulement autour de la voiture ;
- l'étape cruciale, enfin, qui réunit la description de l'écoulement autour de la voiture à partir de l'étude effectuée et l'extraction paramétrée de données susceptibles d'intéresser le groupe d'aérodynamiciens chargé de déterminer les versions successives du bolide.

La précision des résultats dépend aussi bien de la qualité du logiciel de résolution que de celle du maillage. Dans notre cas, ce dernier se compose principalement d'éléments tétraédriques et prismatiques pour la partie volumique de calcul, appliqués à une triangulation de la surface (fig. 1). Tous les nœuds représentent les points sur lesquels les équations dis-

<sup>5</sup> Il existe deux types de logiciels de résolution. Ceux de niveau académique sont extrêmement précis, mais mal adaptés à l'usage industriel, dans la mesure où ils sont mis au point, continuellement affinés et surtout maîtrisés par les théoriciens chargés du développement dans les universités ou les écoles polytechniques. Quant aux logiciels dits « commerciaux », ils sont robustes et pourvus d'une interface graphique qui en facilite l'utilisation, mais leur code source reste largement caché à l'utilisateur, qui paie l'utilisation du programme, pour pouvoir générer des résultats et les visualiser - un objectif qui demeure la principale préoccupation dans le monde industriel, à la différence du milieu académique où l'on privilégie la recherche de nouveaux modèles, toujours plus performants et proches de la réalité.



crêtes de Navier-Stokes sont résolues. Le domaine de calcul reprend les dimensions de la soufflerie avec, comme conditions aux limites, la rotation du sol sous la voiture - réplique de la piste qui défile - et les vitesses uniformes imposées dans la soufflerie, ce qui ne correspond pas exactement à la réalité dans la mesure où l'environnement autour de la voiture sur piste est libre, alors que le modèle installé dans la section de mesure de la soufflerie est à l'intérieur d'un bâtiment. Mais on veille à effectuer les tests en soufflerie en conditions de pression ambiante identiques à celles que l'on trouve à l'extérieur lors de la course. Il suffit ensuite de reprendre ces valeurs et de les imposer comme conditions aux limites lors de la simulation. Le domaine de calcul lors de la simulation devient alors une boîte rectangulaire avec une condition d'écoulement libre et uniforme à vitesse et pression choisies sur trois faces, tandis que la vitesse est imposée sur la face inférieure, sous la voiture, pour simuler le déplacement relatif du véhicule sur la piste. Ensuite le calcul démarre pour être arrêté dès que les forces aérodynamiques calculées sont à peu près stabilisées, bien que l'écoulement soit en réalité légèrement non stationnaire, ce qui peut prendre entre une nuit et quelques jours en utilisant un serveur multiprocesseurs.

### Les développements en cours

Si la taille usuelle des maillages utilisés en F1 dépasse largement dix millions d'éléments, plus du triple sera atteint dans le courant de cette année, avec un modèle de voiture détaillant non seulement l'écoulement externe sur la carrosserie et l'intérieur des pontons de radiateurs, mais encore tous les écoulements internes. Cela va des interstices entre la carrosserie et le châssis, entre le moteur et la carrosserie, à l'intérieur des moyeux de roues, depuis les écopes de refroidissement des freins en passant autour des écrous et entre les espaces de jonction des panneaux de carrosserie, jusqu'à l'interaction entre les gaz chauds sortant des échappements avec le flux extérieur passant autour des tubulures.

En parallèle à cette méthodologie globale, des maillages et calculs sont effectués localement sur des composantes de la voiture pour éviter de recalculer tout le champ et pouvoir concentrer ainsi la taille du problème, donc le nombre maximal de noeuds sur une zone d'intérêt particulière. Les conditions aux frontières sont alors extraites de la solution globale et utilisées comme conditions aux limites, comme par exemple les champs de vitesse ou de pression sur un plan à l'amont de la partie à étudier. Toutes ces analyses sont validées par rapport à des solutions globales, afin de minimiser la perte d'information provenant du remplacement du calcul global par l'extraction locale de la solution globale. Encore

confidentielles, d'autres méthodes avancées de traitement et d'analyse des résultats fournissent des paramètres de corrélation entre l'avant et l'arrière de la voiture, qui dispensent d'avoir à recalculer chaque fois toute la géométrie détaillée.

De cette manière, on peut par exemple extrapoler la modification d'appui sur l'essieu arrière - qui est générée par le décrochement et la re-circulation dans le diffuseur sous l'aileron arrière - en induisant un changement des plaques verticales aux extrémités de l'aileron avant. S'il est intuitivement très difficile d'imaginer exactement l'interaction entre les différentes composantes de la voiture, quelques années d'expérience permettent d'anticiper une tendance en exploitant conjointement la simulation numérique, les données de soufflerie et celles issues de cas tests académiques (fig. 2 et 3).

### Avantages et inconvénients de la soufflerie et de la simulation

La simulation permet une représentation de l'écoulement bien plus complète que la soufflerie et l'on peut sans autre affirmer que les principales limitations de visualisation numérique de l'écoulement ne tiennent qu'à celles bridant l'imagination des développeurs. La simulation numérique n'impliquant pas la construction physique des différentes formes d'ailerons, de pontons, etc., toutes les incertitudes de précision liées au montage de ces éléments disparaissent. Il faut en effet savoir que le niveau de précision des mesures dans la soufflerie dépend beaucoup de la qualité du modèle ou du savoir-faire du spécialiste responsable de son assemblage en carbone et du lissage des jonctions entre les différentes surfaces, des opérations qui peuvent impliquer jusqu'à 20% de variation des forces mesurées sur un même modèle. Tandis que la différence entre les valeurs globales des coefficients aérodynamiques calculés numériquement et les résultats expérimentaux est aujourd'hui inférieure à 5% et décroît avec l'expérience acquise. Cela étant, la précision d'une simulation numérique dépend encore beaucoup de la taille des ordinateurs à disposition et la procédure de simulation demeure passablement longue. Même si l'on a réduit le temps de calcul en faisant notamment appel à des clusters d'une centaine de processeurs, le gain en temps n'apparaît pas directement, car la complexité de modélisation augmente en parallèle - on garde de plus en plus de détails de la voiture - ce qui accroît la charge que représente la création du modèle virtuel détaillé, puis sa discrétisation avant la simulation proprement dite.

Stefano Fiorucci, ing. dipl. EPFL & HES  
F1 Computational Fluid Dynamicist, 102 Cambridge Street  
Wolverton, Milton Keynes, MK12 5AH