# COMPLEMENTARITE CALCULS / ESSAIS EN AERODYNAMIQUE AUTOMOBILE

**Laurent ELENA et Xavier BOHINEUST**

PSA Peugeot Citroën
Direction de la Recherche et de l'Innovation Automobile
Recherche et Projets Avancés d'Innovation
2, route de Gisy – 78943 Vélizy-Villacoublay Cedex

**RESUME :**

Pour effectuer dans des délais réduits la conception de véhicules innovants et prendre en compte l'ensemble des contraintes mises en jeu par des phénomènes physiques d'origine aérodynamique, il faut disposer de méthodologies de plus en plus performantes. Les recherches effectuées en aérodynamique, tant sur le plan numérique qu'expérimental, rendent accessibles de nouveaux outils et de nouvelles méthodes qui bousculent les méthodes de conception traditionnelles en aérodynamique automobile qui s'appuient encore largement sur des méthodes expérimentales. Dans cet article, on effectue une présentation des principales évolutions qui sont en cours dans le domaine des outils numériques et des méthodes expérimentales en aérodynamique automobile. Il ne s'agit pas de promouvoir une approche « tout numérique » qui est hors de portée mais bien de définir comment des approches mixtes s'appuyant sur les complémentarités calculs/essais permettent et permettront de faire évoluer le processus de conception. Plusieurs exemples illustrent la pratique ou le potentiel de ces approches mixtes.

## 1 INTRODUCTION

L'amélioration du processus de conception-développement d'un véhicule est un enjeu important pour les constructeurs automobiles qui doivent être réactifs pour proposer, sur un marché très concurrentiel, des produits innovants et performants répondant aux besoins des clients qui évoluent également. Pour réduire le temps de développement et les coûts, il faut disposer de méthodologies de conception intégrées produit-processus, permettant d'évaluer un nombre important de solutions et d'optimiser de façon « robuste » les choix techniques. Les concepteurs doivent proposer un style, des architectures et des concepts innovants permettant de répondre aux cahiers des charges définissant les prestations qui doivent être fournies aux clients. Comme tout processus de conception, il faudra proposer et optimiser une solution respectant un cahier des charges sous contraintes. Les principaux paramètres actifs à optimiser sont habituellement des paramètres géométriques de formes des pièces utilisées, et des paramètres physiques associés aux caractéristiques des matériaux de ces pièces. Les contraintes nombreuses sont, par exemple, celles liées à la masse, aux coûts, et aux processus de fabrication. Les lois reliant ces paramètres sont dans de très nombreux cas celles des mécanismes physiques ou chimiques mis en jeu dans les conditions de fonctionnement et d'utilisation du véhicule correspondant aux prestations clients que l'on doit atteindre. Les domaines de la physique ou de la chimie concernés sont

nombreux et l'on est conduit à maîtriser des processus de conception mono et multi-domaines. D'autre part la conception et l'optimisation doivent se faire au niveau du véhicule, de l'organe et de la pièce. On est donc en présence d'un processus de conception multi-niveaux, multi-domaines, et multi-critères. Pour l'améliorer significativement, il faut pour chaque domaine de la physique concerné que les méthodologies de conception évoluent et soient compatibles avec les jalons des nouveaux plannings de développement. Nous rappellerons dans la deuxième partie de cet article que l'aérodynamique impacte directement le processus de conception d'un véhicule et indiquerons quelques limites de l'approche traditionnelle basée sur une approche expérimentale. Nous montrerons que l'intégration industrielle des nouvelles méthodes expérimentales et numériques permettra d'avoir un processus de conception aérodynamique nettement plus performant en exploitant pleinement les complémentarités essais-calcul. Dans une troisième partie nous illustrerons les structures des écoulements caractéristiques de l'aérodynamique automobile. Nous illustrerons également, par quelques résultats de recherches ou d'applications en aérodynamique externe automobile, les évolutions des méthodes de mesures (quatrième partie) et des méthodes de simulation numérique (cinquième partie). Dans la sixième partie nous indiquerons par quelques exemples comment ces nouveaux outils et nouvelles méthodes permettent d'introduire ou de renforcer des approches de conception mixtes calculs/essais. Nous conclurons en soulignant l'importance des synergies entre laboratoires de recherche et constructeurs pour permettre des avancées majeures dans le domaine de l'aérodynamique automobile.

## 2 L'AERODYNAMIQUE DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION DEVELOPPEMENT D'UN VEHICULE

Il y a peu de « prestations clients » qui soient directement impactées par l'aérodynamique automobile, et l'on pourrait se dire qu'en dehors du courant d'air du système de ventilation qu'il peut sentir sur ses mains ou son visage, ou de l'impact d'une bourrasque sur la carrosserie, le client ne perçoit pas les mécanismes physiques mis en jeu par l'aérodynamique automobile. Quand elle se combine à d'autres domaines (et la liste est longue) l'aérodynamique sera directement perçue par le client et intégrée au cahier des charges des prestations clients. En matière de coût d'utilisation, le poste consommation est directement lié au coefficient aérodynamique de traînée (Cx du véhicule) qui peut être responsable d'une différence de consommation de 0,5 à 1 ou plusieurs litres consommés au 100 km selon le style et la taille du véhicule. En matière de sécurité et de comportement routier, les caractéristiques aérodynamiques du véhicule ont une incidence qui peut être significative en matière de sensibilité au vent latéral, de tenue de route, de refroidissement des freins, d'encrassement des vitres et des feux, de désembuage des vitres. En terme d'agrément de conduite, les performances sont également impactées. En matière de confort le client sera sensible aux bruits externes d'origine aérodynamique et aux bruits liés au système de ventilation, aux odeurs diffusées dans l'habitacle, aux conditions aérothermiques de l'habitacle. Enfin les interactions entre style et aérodynamique auront un impact sur l'image du véhicule perçue par le client. De nombreuses étapes du processus de conception et de développement sont donc concernées par les méthodologies de dimensionnement aérodynamique du véhicule. Les modifications de la forme externe de la carrosserie, du dessin des trains et des passages de roue, de l'architecture du compartiment moteur et du sous plancher pourront affecter directement la structure des écoulements et les performances globales du véhicule. Certaines de ces modifications sont directement liées à des choix techniques, d'autres à des choix de style. Pour optimiser le processus

de conception, il faudra donc disposer de méthodes et d'outils permettant rapidement d'évaluer qualitativement et quantitativement l'influence de ces modifications sur les performances aérodynamiques, aérothermiques et aéroacoustiques du véhicule ou de l'organe concerné. Par ailleurs, pour ne pas se contenter d'évaluer une solution technique mais proposer des orientations, en particulier aux stylistes et aux architectes, il faut être capable d'assurer le retour d'expérience et de capitaliser le savoir de l'entreprise sous forme de règles de conception et de recommandations. Pour cela, il faut être capable d'accéder à la compréhension fine des phénomènes physiques mis en jeu en établissant le lien entre forme du véhicule ou de l'organe, structure globale et locale de l'écoulement et performance aérodynamique (ou acoustique ou thermique) globale du véhicule.

Après un bref rappel des méthodologies de conception traditionnelles basées sur une approche aérodynamique expérimentale (§2.1), nous montrerons comment les approches hybrides calculs/essais constituent une alternative réaliste pour faire évoluer le processus de conception-développement (§2.2).

## 2.1 Méthodologie de conception aérodynamique traditionnelle

De nombreux paramètres d'environnement et de situations de conduite affectent l'aérodynamique du véhicule, et l'on peut citer à titre d'exemple:

- les conditions climatiques instables, vent, pluie, turbulence, température,
- les effets d'environnement, le relief, la nature du revêtement et la position de la chaussée (pont suspendu, tunnel, arbres, écrans, bâtiments, etc.),
- la vitesse et l'accélération du véhicule par rapport au sol, la rotation des roues,
- le suivi de trajectoire (ligne droite, virage, dépassement de véhicules,
- la garde au sol, le nombre d'occupants, la charge, le type de pneumatique,
- la présence d'un toit ouvrant ou de fenêtres ouvertes.

Confrontés à ces différentes situations de conduite et d'environnement ne permettant pas de faire des mesures répétables sur site, les aérodynamiciens se sont dotés de souffleries permettant l'analyse de quelques situations de façon répétable, à défaut d'être complètement reproductible (les comparaisons des résultats obtenus avec un même véhicule dans différentes souffleries présentent des écarts souvent non négligeables). Il est clair que la soufflerie qui permettrait de reproduire l'ensemble des situations de conduite et des effets d'environnement rencontrées dans la vie d'un véhicule n'est pas réalisable. Les souffleries les plus souvent utilisées permettent la mesure globale du torseur aérodynamique d'un véhicule soumis à un écoulement stable pour un angle de dérapage donné. On rencontre d'autres souffleries ou bancs dédiées à l'étude des phénomènes aérothermiques ou aéroacoustiques.

Pour étudier les différentes propositions techniques d'un projet véhicule et sélectionner la meilleure définition, les aérodynamiciens maquettent sur prototypes les variantes de formes. Ils évaluent de façon quantitative les grandeurs globales mesurables (torseur aérodynamique, niveau de bruit, température, etc.) caractérisant chacune des variantes et proposent parmi les solutions qui ont été testées celle qui est la plus performante. Les méthodes expérimentales traditionnelles utilisées en aérodynamique automobile pour visualiser les écoulements étaient souvent limitées à l'utilisation de fumée et à des mesures de pression statiques sur des maquettes. La connaissance des écoulements était de ce fait très imparfaite et difficilement capitalisable. Si bien que l'on privilégiait la multiplication des variantes à tester. Une telle approche si elle n'est pas complétée par une analyse fine de l'écoulement peut se répéter à chaque nouvelle définition de variante de forme, car comme de nombreux paramètres d'interaction forme/écoulement sont couplés les règles déduites pour une

configuration ne sont pas directement transposables à une autre configuration. Dans une telle approche on a difficilement accès à la compréhension des différentes interactions entre forme et écoulement, entre structure globale et structures locales de l'écoulement, entre grandeurs aérodynamiques moyennes et grandeurs fluctuantes. On est donc conduit dans cette approche traditionnelle à privilégier la réalisation de moyens d'essais permettant de tester en échelle 1 des véhicules dans des situations aussi proches que possible des conditions d'utilisation route; En effet la transposition entre des résultats d'essais partiels (et des définitions partielles du véhicule) et les conditions de fonctionnement réel n'est pas envisageable en l'absence de méthodologie et de modèles permettant de relier ces deux situations. Les délais et coûts d'étude deviennent alors difficilement compressibles et les interactions avec les autres domaines complexes à gérer.

### 2.2 Méthodologies de conception aérodynamique hybrides calculs/essais

Nous verrons à travers quelques exemples dans la partie 4 que les recherches en aérodynamique expérimentale ont permis de faire évoluer les techniques de mesure et de postraitement des données ouvrant de nombreuses possibilités d'analyse des mécanismes d'interaction forme/écoulement et permettent d'accéder au grandeurs nécessaires à la compréhension des phénomènes physiques et à la validation des modèles de calculs. Nous verrons également dans la partie 5 que la conception aérodynamique, (il en est de même pour l'aéroacoustique ou l'aérothermique) des véhicules basée sur des approches « tout numérique » est un mythe. Par contre les nouvelles méthodes expérimentales et numériques permettent d'établir le lien entre structure de l'écoulement, variation de forme et performance globale. Elles ouvrent ainsi des possibilités nouvelles de formaliser des règles de conception de plus en plus fiables capitalisant le savoir faire d'un constructeur.

Comme pour tous les domaines de la physique les modèles analytiques et numériques rendent compte de la compréhension réelle des mécanismes physiques mis en jeux. Lorsque ces modèles permettent de calculer de façon fiable et rapide les grandeurs physiques qu'utilisent les concepteurs alors ils peuvent être utilisés directement comme outils de conception sans avoir recours à une approche empirique. Les modèles de calculs prévisionnels actuellement développés en aérodynamique ne permettent pas d'obtenir des valeurs globales suffisamment fiables pour se substituer au moyens d'essais. Mais les résultats des recherches conjugués avec des moyens de calculs de plus en plus puissants ont permis des avancées significatives dans le domaine du calcul des grandeurs moyennes aérodynamiques (§4.1.1). On peut ainsi accéder à des valeurs réalistes du torseur aérodynamique pour des formes de véhicule prenant déjà en compte un nombre important de détails géométriques. Les calculs de tendance deviennent possibles et permettent d'avoir accès à la structure globale et locale de l'écoulement. Les confrontations calculs/essais permettent alors d'une part de progresser dans la représentativité des modèles et d'autre part de construire des bases de données combinant des résultats d'essais et des données de calculs. On peut alors apprendre à identifier les couplages entre les différents paramètres, définir des typologies de formes de véhicule et d'accessoires, et les structures d'écoulements associés, identifier en fonction des variations des paramètres de conception, les domaines d'évolution progressive de structures d'écoulement et les domaines de bifurcation. On pourra alors en combinant plan d'expérience numérique et essais de recalage mettre au point des méthodologies destinées au différentes phases de la conception depuis l'étude des formes globales du véhicule, jusqu'à l'étude du dessin de détails de carrosserie ou d'accessoires. Le même type d'approche peut être pratiquée

pour l'étude des phénomènes aéroacoustiques faisant intervenir les grandeurs aérodynamiques fluctuantes (§4.1.2). Enfin il faut souligner que les méthodes numériques permettent de tester des conditions aux limites beaucoup plus nombreuses que celles que l'ont peut obtenir en soufflerie et permettent donc d'envisager l'étude de variantes de conditions d'environnement et de situations de vie potentiellement plus importantes.

## 3 ECOULEMENTS EN AERODYNAMIQUE AUTOMOBILE

La structure des écoulements en aérodynamique automobile est extrêmement complexe : écoulement fortement décollé (arrière du véhicule, passage de roue), sillage tridimensionnel, compétition entre tourbillons longitudinaux (issus des montants de baie, des montants de lunette ou du soubassement), interaction du sillage des roues et des rétroviseurs avec le sillage du véhicule, etc. La connaissance de cette structure est d'une importance capitale pour l'amélioration de la géométrie du véhicule. De nombreux travaux sont dédiés à cette étude (Ahmed, 1983 ; Han, 1989), mais la richesse des phénomènes physiques fait que leur recensement n'est que très partiel. Afin d'illustrer cette richesse, on donne sur la figure 1 trois écoulements caractéristiques de l'Aérodynamique automobile.

Le sillage du rétroviseur de Citroën XM met en évidence l'importance de l'étude de celui-ci. En effet, son sillage contribue de façon non négligeable à la traînée du véhicule. Les fluctuations de pression induite par la recirculation en aval de celui-ci sont par ailleurs d'importantes sources de bruit. Il faut préciser qu'il n'existe pas un « bon rétroviseur » utilisable sur tous les véhicules mais que la géométrie optimale dépend de l'ensemble de la face avant. Le second exemple met en évidence le tourbillon de montant de baie du à une forte dépression sur le coté du véhicule. Nous verrons par la suite l'importance de l'étude de cette zone. Le troisième exemple concerne le sillage d'un véhicule et souligne la forte tridimensionnalité de l'écoulement puisque les lignes de courant tracées ici sont toutes issues de deux lignes verticales proches du plan de symétrie

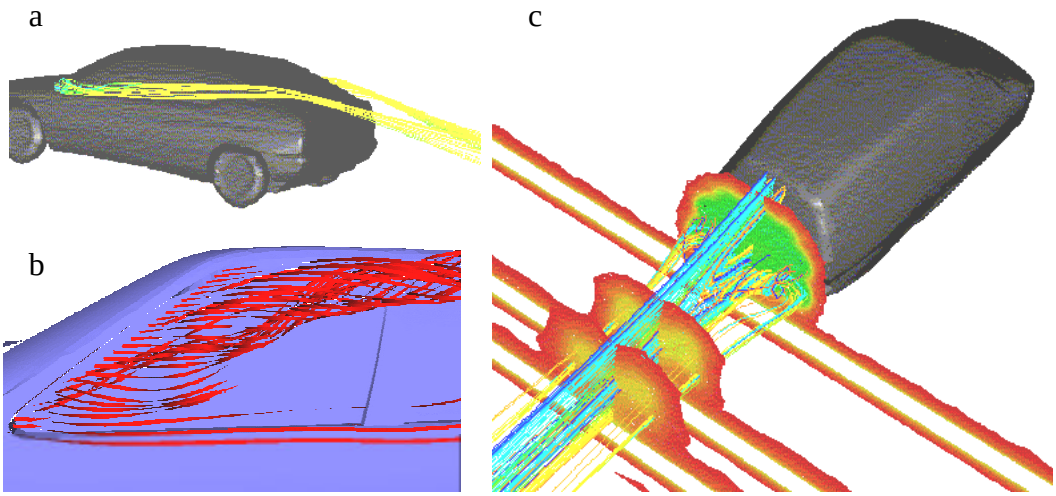



Figure 1 : Ecoulements caractéristiques en Aérodynamique automobile. (a) Sillage d'un rétroviseur, (b) tourbillon de montant de baie, (c) sillage du véhicule SA109.

## 4 LES EVOLUTIONS EN AERODYNAMIQUE EXPERIMENTALE

L'Aérodynamique automobile est traditionnellement expérimentale et durant des décennies, les ingénieurs ne se sont intéressés qu'aux coefficients aérodynamiques globaux. Depuis une dizaine d'années, les nécessités de qualifier les écoulements afin d'en déduire des règles de conception et de valider les calculs ont fait considérablement évoluer la notion d'essais. Comme nous l'avons vu dans le paragraphe 3, la structure des écoulements en Aérodynamique automobile est très complexe et l'ensemble des types de mesure (efforts globaux, pression à la paroi et champs de l'écoulement) est nécessaire pour bien qualifier un véhicule.

La mesure des coefficients aérodynamiques est évidemment de première importance. Ce type de mesure est arrivé à maturité et si les mesures effectuées dans différentes souffleries ne sont pas toujours très proches, la raison de ces différences est plus à chercher au niveau des souffleries (blocage, déflection, taux de turbulence différent) qu'au niveau des balances elles-mêmes.

La mesure de la pression pariétale moyenne est capitale pour la validation des calculs et quantifier une évolution de forme. Cette technique est bien maîtrisée dans la plupart des souffleries et ne pose pas de problème majeur si ce n'est l'installation fastidieuse des centaines de prises nécessaires pour couvrir une maquette. La mesure du frottement pariétal n'est ici pas très importante dans la mesure où la traînée de frottement ne dépasse guère les 5% de la traînée totale.

Pour les mesures dans l'écoulement, deux questions se posent à l'ingénieur :

- Quelles sont les grandeurs à mesurer ?
- Dans quelles parties de l'écoulement faut-il les mesurer et quel est le volume de mesure nécessaire pour qualifier un écoulement et valider un calcul ?

Classiquement, les grandeurs moyennes (vitesse et pression) de l'écoulement suffisaient pour caractériser correctement les écoulements. Cela justifie l'engouement pour les sondes de pression multi-trous en Aérodynamique automobile. Aujourd'hui, des mesures plus fines sont nécessaires pour accroître notre connaissance des écoulements et pour valider les calculs. Si la mise en oeuvre de la vélocimétrie laser et de l'anémométrie fil chaud est plus complexe que celle des sondes de pression, la richesse des informations obtenues justifie cet effort.

Pour répondre à la seconde question, la connaissance de l'écoulement que l'on veut mesurer est nécessaire. La plupart des travaux récents se focalisent sur le sillage du véhicule. A cela, il y a deux bonnes raisons. D'une part, les phénomènes qui s'y produisent sont responsables de la plus grande partie de la traînée de forme. Et d'autre part, c'est évidemment la région la plus facile à mesurer avec des techniques classiques (fil chaud, sonde de pression). De nombreuses autres régions de l'écoulement (passage de roue avant, sous plancher, sous capot, …) méritent autant d'attention, mais l'écoulement est généralement fortement décollé et le taux de turbulence important. L'utilisation de méthodes optiques (LDV, PIV) s'avère alors nécessaire mais leur mise en œuvre demeure complexe dans un environnement véhicule.

Il est certain que la technique idéale devrait permettre à la fois de visualiser l'écoulement et de faire des mesures quantitatives. Dans cette optique, la PIV est certainement un outil d'avenir en Aérodynamique automobile.

Ces questions restent tout à fait théoriques si nous ne considérons pas en premier lieu l'élément central de toute mesure : la soufflerie. Afin de tirer le meilleur parti des mesures et de faciliter l'interprétation des résultats, il est souhaitable d'effectuer l'ensemble des mesures dans une seule et même soufflerie. En Europe, les souffleries échelle 1 adaptées à l'étude de véhicule routier (i.e. possédant une balance aérodynamique dans le plancher) et possédant des moyens de mesure modernes ne sont

pas nombreuses et les coûts souvent prohibitifs pour des essais de recherche. Les essais à échelle réduite, 1/5 ou 1/4 principalement, apparaissent comme une alternative séduisante même s'ils ne permettent pas l'étude des détails.

La figure 2 illustre le type de mesure que nous effectuons dans la soufflerie de la DRIA à La Ferté Vidame. Il s'agit des iso valeurs de vitesse longitudinale et ont été obtenues grâce à une sonde de pression 5 trous. Cette représentation permet déjà de bien qualifier l'écoulement dans le sillage et permet une première validation des calculs.

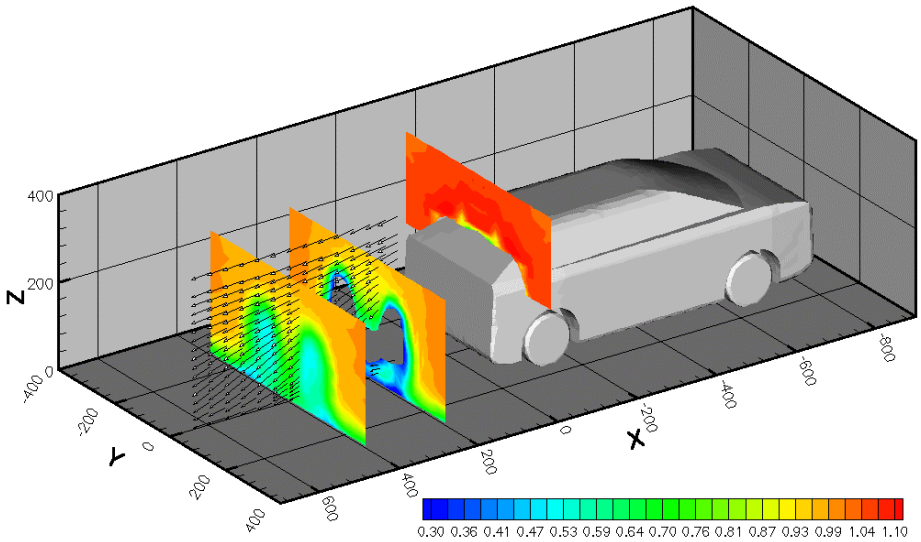



Figure 2 : Mesure par sonde de pression 5 trous du sillage du véhicule de recherche « Admunsen »

# 5 LES EVOLUTIONS DANS LE DOMAINE DU CALCUL

## 5.1 Les techniques de simulation

### *5.1.1 RANS*

L'approche moyennée des équations de Navier-Stokes fut la première à être utilisée en Aérodynamique automobile et est actuellement la seule à être employée durant le développement d'un nouveau véhicule. Malgré les nombreux travaux effectués dans ce domaine, le choix du modèle de turbulence et du type de maillage restent des problèmes ouverts. Pour une application industrielle, il s'agit de trouver le meilleur compromis entre qualité des résultats et rapidité d'une simulation (maillage et calcul).

Le développement de modèles de turbulence adaptés à l'Aérodynamique automobile constitue une des voies incontestables de progrès. Si le développement a proprement parlé de modèles de turbulence reste du ressort des laboratoires universitaires, il n'en demeure pas moins que ce travail ne peut se faire qu'en partenariat. En effet, seul l'utilisateur final est à même d'indiquer aux chercheurs les faiblesses des modèles actuels pour son type de problème et ses contraintes d'utilisation. De même, le nouveau modèle ne pourra être complètement validé que s'il est appliqué dans des conditions réelles. Le travail que mène PSA Peugeot Citroën et ses partenaires (Université de Delft, UMIST, Université d'Erlangen/LSTM, EDF/LNH, AVL) dans le projet BRITE EURAM « MOVA » est basé sur ce principe.

Le développement des logiciels de maillage a permis de réduire à moins d'une semaine le temps nécessaire pour réaliser un maillage d'un véhicule complet (à partir d'une CAO « propre »), opération qui demandait plusieurs semaines avant l'apparition des mailleurs automatiques. De même, l'utilisation de maillage hybride (prismes +

tétraèdres) permet d'obtenir des résultats équivalents à ceux obtenus avec un maillage structuré (hexaèdres) en utilisant 30% de points en moins (Elena et al., 1997).

### *5.1.2 La simulation des grandes échelles (LES)*

Même si la simulation des grandes échelles n'est pas à moyen terme applicable à des véhicules complets, elle suscite de plus en plus d'intérêt chez les constructeurs automobile. Cette approche se justifie pleinement pour la compréhension et la prédétermination des phénomènes turbulents responsables des bruits d'origine aérodynamique. En effet, la réduction des autres sources de bruit (moteur, roulement) a replacé les bruits aérodynamiques dans le peloton de tête, au moins pour les hautes vitesses. Si la LES n'est pas applicable pour un véhicule complet, elle n'en demeure pas moins très séduisante pour étudier les singularités (rétroviseur, joint, essuie-glace …) en limitant le calcul à des sous-zones. Cette technique contribuera ainsi à :

- améliorer la compréhension physique des phénomènes responsables du bruit, dresser le portrait robot des formes « les plus bruyantes » et relier la structure de l'écoulement dans des sous-zones à des spectres de bruit. Tout cela avec l'idée de créer un cahier de préconisation géométrique des singularités automobiles.
- développer une méthodologie de calcul du bruit aérodynamique à partir de données instationnaires calculées. Cette perspective est séduisante et constitue l'objectif du projet PREDIT auquel participent SNCF, PSA Peugeot Citroën, EDF et l'ECL.

Si la validité de la théorie ne fait aucun doute, l'application est toutefois délicate pour les écoulements qui nous intéressent. L'application de la LES à des écoulements à très forts nombres de Reynolds et pour des géométries complexes pose des problèmes tant au niveau numérique qu'informatique. Le projet ARPEGES (Action de Recherche pour la Prédiction des Ecoulements par les Grandes Echelles Simulées, constitué de PSA Peugeot Citroën, de la SNCF et d'ALSTOM Transport) s'est donné comme objectif d'évaluer les limites et performances d'approches LES et de méthodes expérimentales adaptées à la caractérisation des grandeurs fluctuantes d'écoulements génériques dans le domaine du transport terrestre.

### *5.1.3 Gaz sur réseaux*

Dans cette approche, le fluide est modélisé par un ensemble de particules fictives (il ne s'agit pas de représenter le mouvement moléculaire) et toutes identiques. Ces particules sont contraintes à se déplacer sur un réseau en sautant de site en site avec des vitesses entières et en nombre fini. Si le réseau et les lois de comportement des particules (propagation et collision) sont bien choisis, il est alors possible de retrouver les équations de Navier-Stokes.

Cette théorie est apparue dans le début des années 70 (Hardy et al., 1973) suivie de nombreuses améliorations du modèle initial (Frisch et al., 1986 ; d'Humière et al., 1986). Plusieurs applications de la méthode ont été réalisées, particulièrement en hydrodynamique (Frisch et al., 1987) et pour les problèmes de changement de phase (Rothman et Zaleski, 1994). Les ressources informatiques nécessaires et les difficultés pour adapter cette méthode à des écoulements à forts nombres de Reynolds ont limité l'utilisation de cette méthode.

Cette approche est redevenue d'actualité depuis peu avec l'apparition d'un code industriel : PowerFlow (Teixeira, 1995 ; Chen et al., 1997,). Dans ce code, l'opérateur de collision est pondéré par un facteur permettant ainsi de moduler la viscosité. De plus, le traitement de la paroi est analogue à une fonction de paroi classique. Ces deux astuces permettent de simuler des écoulements à fort nombre de Reynolds. Malgré certaines questions théoriques qui restent en suspend, ce code présente plusieurs aspects

séduisants pour l'Aérodynamique automobile. En premier lieu, il n'y a pas à proprement parler de notion de maillage et le réseau cartésien est généré automatiquement à partir de la CAO. Cette particularité permet un gain de temps important par rapport à l'approche classique et limite le travail fastidieux de maillage des géométries complexes. De plus, la simulation est intrinsèquement instationnaire et, comme nous l'avons déjà souligné pour la LES, le développement d'outils de prédétermination du bruit aérodynamique est un enjeu majeur. Si nos travaux pour valider cet aspect en sont encore à leur début, les premiers résultats montrent une aptitude certaine pour décrire les structures cohérentes des écoulements turbulents. A titre d'exemple, on donne sur la figure 3, une vue instantanée du champ de vorticité en aval d'une marche, mettant en évidence des tourbillons en Λ.

Cette technique étant basée sur le déplacement et la collision de particules, il n'y a pas de discrétisation d'EDP et donc pas de diffusion numérique. Ce point est particulièrement intéressant en Aérodynamique automobile où les sillages présentent de forts gradients (l'écoulement supérieur et l'écoulement sous plancher sont très différents, tant au niveau de l'écoulement moyen que des grandeurs turbulentes) et où les approches classiques ont la fâcheuse tendance à lisser les brusques variations.

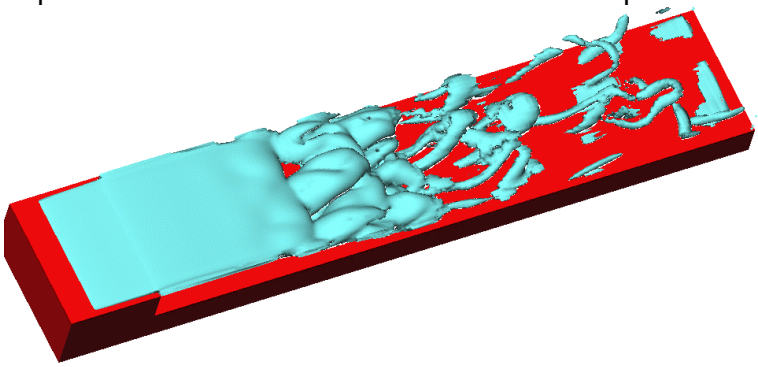
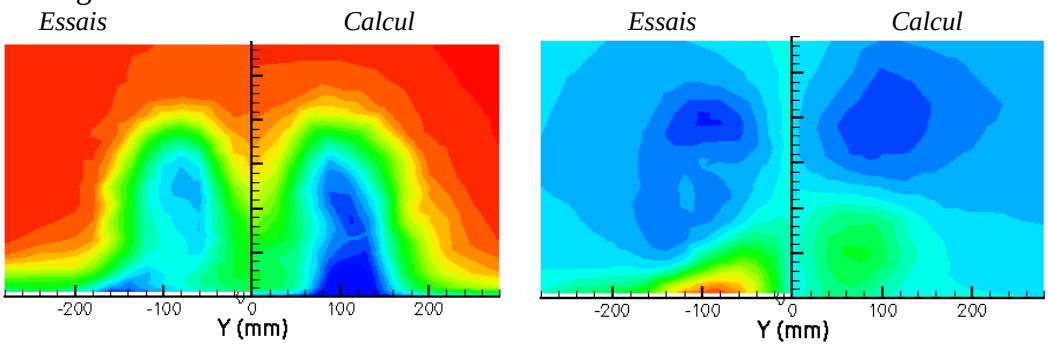


Figure 3 : Surface d'iso vorticité en aval d'une marche descendante (Re=5100).

### 5.2 Validation des modèles et bases de données

Les grands codes industriels sont aujourd'hui d'une utilisation relativement facile et une formation de quelques jours suffit pour obtenir des résultats. Toutefois, un travail très important est nécessaire afin de valider ces codes pour nos applications, de définir les règles de maillage et de raffinement ainsi que de délimiter leur domaine de validité. La constitution de bases de données expérimentales et la comparaison avec des résultats de calcul constituent ainsi un des axes importants de travail.

On donne sur la figure 4, les iso valeurs de la vitesse longitudinale et transversale dans le sillage du véhicule « Admunsen ».




Vitesse longitudinale Vitesse transversale

Figure 4 : Méthode RANS. Comparaison avec l'expérience dans le sillage d' « Admunsen »

On peut constater que, même si certains points sont encore à améliorer, par exemple le sillage des roues, l'accord général entre calcul (FLUENT, modèle k-ε avec loi de paroi) et essais (sonde 5 trous) est satisfaisant. En particulier, les deux importants tourbillons longitudinaux visibles sur la vitesse transversale sont bien captés par le calcul. Quand le sillage est simulé avec cette précision, le torseur aérodynamique peut être approché de façon satisfaisante (la différence entre calcul et essais est ici de 4%).

Pour illustrer le potentiel du code PowerFlow (gaz sur réseau), on donne sur la figure 5, les iso valeurs de la vitesse longitudinale et du coefficient de pression pour le sillage du véhicule SA109. Les valeurs son comparées à des mesures obtenues par sonde de pression. Il apparaît que, malgré le scepticisme général et les nombreux points encore obscurs de la méthode, la physique de l'écoulement est bien prise en compte par cette approche.

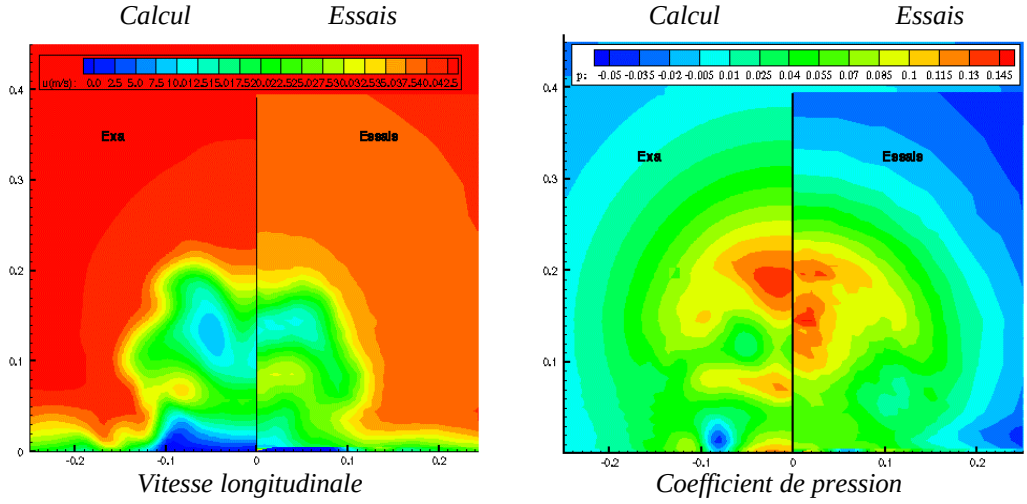



Figure 5 : Méthode de gaz sur réseaux. Comparaison avec l'expérience dans le sillage de SA109

## 6 LES APPROCHES HYBRIDES

Si le développement aérodynamique d'un véhicule par le 100% numérique demeure un mythe, le 100% essais à fait long feu. En effet, seules des méthodes de conception hybride, utilisant de façon astucieuse calculs et essais, permettront de réduire encore les délais de développement des nouveaux véhicules. Nous donnons dans les paragraphes suivants quelques exemples des travaux entrepris à la Direction de la Recherche et de l'Innovation Automobile de PSA.

### 6.1 Retour d'expérience, règles de conception et compréhension physique

Il est possible de mesurer en soufflerie le torseur aérodynamique d'une cinquantaine de variantes d'un véhicule chaque jour. Il est évident qu'à cette cadence seules quelques visualisations par fumée sont possibles excluant toute forme de mesure. Avec cette méthode, il est évidemment possible d'améliorer de façon significative la forme définie par le styliste. Toutefois, la variation des efforts demeure inexpliquée faute de pouvoir faire le lien entre l'écoulement et les efforts globaux. Ainsi peu d'enseignements peuvent être tirés de ces campagnes de mesure.

Par la richesse des informations fournies, et parce qu'elle peut être réalisée en parallèle des essais, la simulation numérique apparaît comme le complément indispensable des essais d'optimisation de forme. Avant la campagne d'essais, elle permet de déterminer les parties du véhicule où l'attention doit se porter et d'éliminer certaines configurations vouées à l'échec. Durant la campagne, elle peut orienter les

modifications de forme à tester. Enfin pendant la période d'analyse, elle aidera à mieux interpréter les essais et à capitaliser l'expérience en faisant le lien entre paramètres géométriques, efforts globaux et structure de l'écoulement.

Tout cela peut être réalisé dès aujourd'hui, sans attendre que la précision des calculs atteigne le %.

### 6.2 Calculs partiels

Nous considérons comme « calculs partiels » les calculs pour lesquels les détails de la CAO sont conservés pour une région du véhicule (sur laquelle se porte l'étude) tandis que le reste du véhicule a une définition moins fine et sert uniquement à respecter les conditions aux limites. Cette approche a pour intérêt de limiter les ressources nécessaires au calcul et de réduire les temps de réponse. Nous donnons ci-dessous un exemple d'utilisation de cette approche.

Les efforts sur ouvrants constituent un domaine important de l'Aérodynamique automobile. Pour les vitres avants par exemple, la forte dépression induite par le contournement des montants de baie a tendance à écarter les vitres. Pour les portes sans encadrement (Peugeot Coupé 406 ou Citroën DS pour les nostalgiques), cela peut avoir des conséquences dramatiques : difficultés voire impossibilité de refermer les vitres, fuite, bruit provenant de l'extérieur…

Il est tout à fait possible de mesurer l'effort aérodynamique sur une vitre (Elena et al., 1996), mais cela nécessite environ 300 prises de pression réparties sur une fausse vitre. Cette opération longue et coûteuse est évidemment nécessaire dans un premier temps, mais la simulation peut ensuite la remplacer afin de réduire les temps de développement. Les règles de maillage et de calcul ayant été mises au point sur cette expérience, nous les avons appliquées à différentes formes de pare-brise. Des modifications astucieuses de la forme du pare-brise permettent de réduire de façon importante la dépression à l'avant de la vitre et par la même les efforts (table 1).

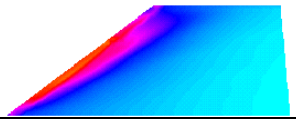
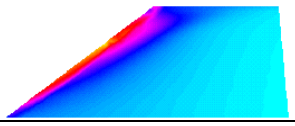
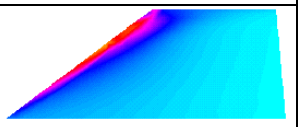
| | Pare-brise re référence | Modification 1 | Modification 2 |
|---|---|---|---|
| Répartition du coefficient de pression |  |  |  |
| Variation de Cy / configuration de référence | - | -11% | -22% |
| Variation de Cl / configuration de référence | - | -9% | -17% |

Table 1 : Efforts sur une vitre avant en fonction de la forme du pare-brise

La complémentarité entre essais et calcul est bien mise en évidence : essais pour avoir des ordres de grandeurs et pour valider la méthodologie de calcul. Simulation pour effectuer des études paramétriques à moindre coût, et combinaison des deux approches pour établir des règles de conception et de dimensionnement.

### 6.3 Plan d'expérience numérique

La simulation numérique permet d'étudier un nombre important de géométries à moindre coût. Ceci est particulièrement vrai lorsque l'on ne modifie qu'une région du véhicule puisqu'on peut alors conserver la majeure partie du maillage.

Après une mise au point du calcul sur un nombre limité de configurations mesurées en soufflerie, nous avons fait varier l'angle de lunette et l'angle de rétreint

arrière d'un véhicule simplifié (figure 6). Les résultats font apparaître l'existence d'un angle critique pour lequel de coefficient de traînée est maximum. Ceci est en accord avec les travaux expérimentaux d'Ahmed (1984) qui avait considéré une géométrie beaucoup plus simple.

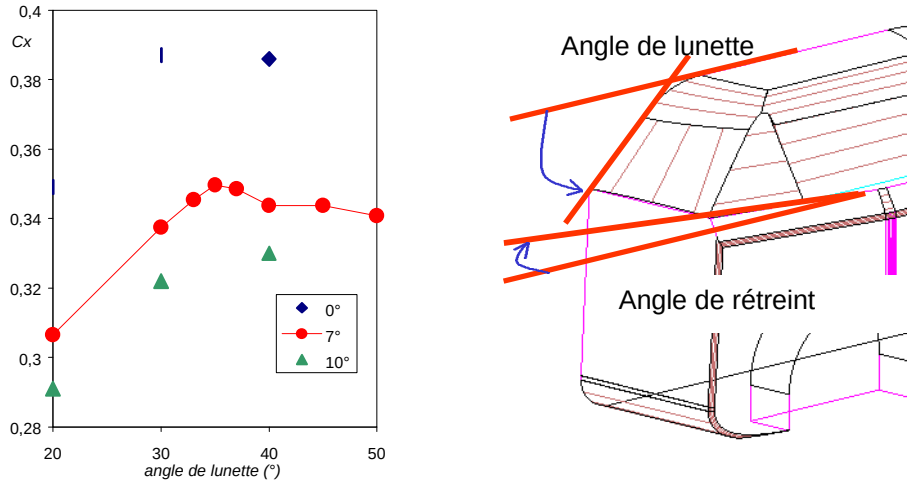



Figure 6 : Variation du Cx d'un véhicule pour différents angles de lunette et de rétreint arrière

Le potentiel d'un véhicule étant fixé par le style extérieur du véhicule, ce type de résultats est très important afin de pouvoir donner des préconisations aux stylistes dès le lancement d'un projet.

## 7 CONCLUSION

Nous avons montré que les méthodologies de conception du véhicule en aérodynamique, qui sont encore dominées par l'étude expérimentale de prototypes en soufflerie, évoluaient vers des approches hybrides calculs/essais seules capables de concilier optimisation des solutions techniques et réduction des coûts et délais. Plusieurs exemples ont permis d'illustrer quelques applications industrielles. Si la mise au point de ces nouvelles méthodologies est de la responsabilité des constructeurs puisqu'elles interfèrent directement avec leur processus de conception par essence multi-domaines, multi-niveaux et multi-critères, il est évident que le développement rapide des modèles numériques et des méthodes expérimentales doit s'appuyer sur les travaux de recherche amont. La complexité des phénomènes physiques mis en jeux nécessite d'associer à cet effort de recherche, tant sur le plan numérique qu'expérimental, les laboratoires de recherche du CNRS, et d'Universités pour qu'ils orientent un nombre plus important de leur recherches vers l'analyse des écoulements subsoniques décollés à forts nombre de Reynolds caractéristiques de l'aérodynamique automobile. Les collaborations déjà engagées avec plusieurs laboratoires de recherche du CNRS, d'Universités mais également d'industriels du secteur transport ont déjà permis de créer des synergies et de faire évoluer les programmes de recherches en amplifiant les actions et en minimisant les doublons. L'évolution rapide de ces méthodologies hybrides calculs/essais dépendra bien sûr de la volonté des constructeurs automobile de les développer, de les industrialiser et de les mettre en œuvre, mais également de la capacité des acteurs de la recherche en aérodynamique automobile de se mobiliser pour améliorer les performances des méthodes et outils qu'elles utilisent.

Le travail présenté dans cet article est basé sur les actions de recherche réalisées à la direction de la « Recherche et Projet Avancés d'Innovation » de la Direction « Recherche et Innovation Automobile » du groupe PSA Peugeot Citroën dans le contexte de programmes de recherche sur les nouvelles méthodologies et outils aérodynamiques.

Les exemples présentés illustrent une partie des pratiques de PSA Peugeot Citroën. Ils ont été choisis en collaboration avec Renault SA pour donner une vision commune du savoir-faire en Aérodynamique automobile.

**REFERENCES**

AHMED S.R., 1983, Influence of base slant on the wake structure and drag of road vehicles, J. Fluid Engineering, vol. 105, pp. 429-434.

AHMED S.R., RAMM G., FALTIN G., 1984, Some salient features of the time-average ground vehicle wake, SAE paper n°840300.

CHEN H., TEIXEIRA C., MOLVIG K., Digital physics approach to computationnal fluid dynamics : some basic theorical features - Int. Jour. of Mod. Phys., Vol 8, N°4 - 11 Février 1997.

D'HUMIERE D., LALLEMAND P., FRISCH U., 1986, Lattice gas models for 3D hydrodynamics, Europhys. Lett 2, pp 291-297.

ELENA L., MAISTRET E., GLEIZE V., 1997, Analyse et développement de techniques de maillage pour l'Aérodynamique automobile, 33ème Colloque d'Aérodynamique Appliquée de l'AAAF, Poitiers, 24-26 mars 1997.

ELENA L., MAISTRET E., BOHINEUST X., 1996, Développement et mise en œuvre des techniques de validation de modèles numériques en aérodynamique, Journées d'Etude de la SIA : Aérodynamique, Aéroacoustique Aérothermique Automobile et Ferroviaire, 5-6 nov. 1996, Courbevoie.

HAN T., 1989, Computational analysis of three-dimensionnal turbulent flow around a bluff body in ground proximity, AIAA J ., vol. 27, n°9, pp. 1213-1219.

HARDY J., POMMEAU Y., DE PAZZIS O., 1973, Time evolution of a 2D model system. I. Invariant states and time correlation functions, J. Math. Phys, 14, pp 1746-1759.

FRISCH U., HASSLACHER B., POMEAU Y., 1986, Lattice gas for the Navier-Stokes equation, Phys. Rev. Lett. 56.

FRISCH U., D'HUMIERE D., HASSLACHER B., LALLEMAND P., POMEAU Y., RIVET J.P., 1987, Lattice gas hydrodynamics in two and three dimensions - Complex System 1, pp 649-707.

ROTHMAN D.H., ZALESKI S., 1994, Lattice-gas models of phase separation : interface, phase transitions and multiphase flow, Rev. Mod. Phys., vol. 66, n°4, p 1417.

TEIXEIRA C., 1995, Theoritical foundations and simulation validations of Digital Physics, NIST Tutorial –Workshop on Lattice Gas – Boltzman Methods, Gettysburg, Maryland.