



Université  
de Toulouse

# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par l'Université Paul Sabatier, Toulouse III  
Discipline ou spécialité : Dynamique des Fluides

---

Présentée et soutenue par Benjamin LEVY  
Le 13 mai 2009

### *Analyse et contrôle de l'écoulement de montant de baie*

---

#### JURY

PROVANSAL Michel  
AIDER Jean Luc  
LUSSEYRAN François  
GIOVANNINI André  
BRANCHER Pierre  
NABETH Bruno

Professeur à l'Université de Marseille  
Directeur de Recherche ESPCI  
Chargé de Recherche CNRS  
Professeur UPS  
Maître de Conférence UPS  
Ingénieur Docteur

Président  
Rapporteur  
Rapporteur  
Directeur de Thèse  
Co-Directeur de Thèse  
Responsable industriel

---

**Ecole doctorale :** Mécanique, Energétique, Génie civil, Procédés  
**Unité de recherche :** Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT)



# Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier Monsieur Provansal d'avoir accepté de présider mon jury de thèse et d'avoir fait cela avec beaucoup de tact. Je souhaite aussi remercier Monsieur Aider et Monsieur Lusseyran d'avoir accepté d'être rapporteurs de mon manuscrit de thèse et de m'avoir suggéré un grand nombre de petites améliorations à apporter au manuscrit. Cela dit, cette thèse n'aurait pu avoir lieu sans l'accord et le soutien de Pierre Brancher et André Giovannini. Ils ont pris le temps (qui se compte en mois) de m'aider à mettre en place cette thèse CIFRE. A ce sujet là, je souhaite remercier Bruno Nabeth de Mecaplast Group qui a pris le risque de mettre en place une thèse aussi téméraire et d'avoir accepté de tester des prototypes aussi exotiques que les surfaces cilées, et cela au détriment de l'opinion générale au sein de Mecaplast.

A cela vient s'ajouter ToufTouf et BF : merci de m'avoir soutenu pendant ces longs mois d'attente et de doutes lors de l'élaboration du sujet de thèse et de la mise en place de la convention CIFRE. Toutes ces longues soirées passées à me faire réviser, ne laissant même pas le temps de grignoter quelque chose !

Ensuite il y a eu les gens du labo sans qui je n'aurais surement pas pu finir en temps et en heure : Xavier pour ses nombreuses tentatives de me rendre invalide (merci d'avoir toujours échoué) ; Sébastien et Emmanuel pour les heures passées à mes côtés à manger du DEHS pour mettre en place la PIV ; Jean-Marc & Co. pour avoir accepté mes plans gribouillés sur des timbres postes à usiner pour la veille et O'neil pour m'avoir tenu compagnie lors de la majorité des mes journées d'acquisition.

Toutefois, que serait un labo sans ses doctorants ? Nam-shin, grand maître des souffleries d'EMT2 ; Guillaume pour les nombreuses poses café-ciné ; Romain pour m'avoir obligé à déménager de mon bureau 6 mois avant la fin de ma thèse, ce qui m'a permis de mettre ma biblio au propre, et de m'avoir mis au défit de finir avant lui.. Je penserais à toi depuis les plages de Turquie ; Thibaut.. je compatis.

Enfin, Rémi, combien de fois avons nous fait le tour du monde autour d'une tasse de thé ou un magret ? Merci de m'avoir montré le chemin, de m'avoir initié au critère Q et à la POD, d'avoir fait semblant d'apprécier mes naans et de m'avoir soutenu de l'intérieur. Mon seul regret ? que tu n'ais jamais réussi à pointer sur ta map monde avec ta souris..

Et le meilleur pour la fin : Caro. Ça a été dur n'est ce pas ? Au final cette thèse tu dois la connaître presque aussi bien que moi et c'est un peu grâce à toi qu'elle à été finie dans les temps et cela sans que j'y perde trop de neurones. Merci.



# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>iii</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 L'aérodynamique automobile . . . . .	1
1.2 Ecoulement de contournement du montant de baie . . . . .	3
1.3 Objectifs . . . . .	7
1.4 Plan de la thèse . . . . .	8
<b>2 Dispositif expérimental et techniques de mesure</b>	<b>9</b>
2.1 La maquette . . . . .	9
2.2 La soufflerie . . . . .	10
2.3 Techniques de mesures . . . . .	11
2.3.1 Visualisation . . . . .	11
2.3.2 La Vélocimétrie par Image de Particules (PIV) . . . . .	12
2.3.3 Le fil chaud . . . . .	19
2.3.4 Mesure de la pression . . . . .	19
2.4 Techniques d'analyse . . . . .	21
2.4.1 Caractérisation des structures tourbillonnaires . . . . .	21
2.4.2 La Décomposition Orthogonale en modes Propres (POD) . . . . .	24
<b>3 Topologie de l'écoulement de montant de baie</b>	<b>27</b>
3.1 Introduction . . . . .	27
3.2 Ecoulement moyen . . . . .	28
3.2.1 Vélocimétrie par image de particules (basse fréquence) . . . . .	28
3.2.2 Pression pariétale stationnaire . . . . .	35
3.3 Fluctuations . . . . .	36
3.3.1 Vélocimétrie par image de particules (basse fréquence) . . . . .	36
3.3.2 Pression instationnaire . . . . .	39
3.3.3 Mesures fil chaud . . . . .	42
3.3.4 Vélocimétrie par image de particules (haute fréquence) . . . . .	43
3.4 Influence de la géométrie . . . . .	46
3.5 Conclusion . . . . .	48
<b>4 Contrôle</b>	<b>51</b>
4.1 Introduction . . . . .	51
4.2 Principe . . . . .	52
4.3 Contrôle passif . . . . .	52

4.3.1	Soufflage . . . . .	53
4.3.2	Géométrie modifiée . . . . .	62
4.4	Contrôle actif . . . . .	66
4.4.1	Soufflage . . . . .	66
4.5	Bilan . . . . .	69
<b>5</b>	<b>Prototypes pour Peugeot 1007</b>	<b>73</b>
5.1	Introduction . . . . .	73
5.2	Brevets existants . . . . .	74
5.2.1	Aspiration et/ou soufflage . . . . .	74
5.2.2	Générateurs de vortex . . . . .	76
5.2.3	Jets synthétiques . . . . .	77
5.3	Définition des essais . . . . .	77
5.3.1	Prototypes . . . . .	77
5.3.2	Véhicule . . . . .	79
5.3.3	Protocole d'essai . . . . .	80
5.4	Résultats préliminaires et analyse . . . . .	81
5.4.1	Prototypes "soufflage dessus", "soufflage côté" et "ouïes" . . . . .	82
5.4.2	Prototypes "dents de scie", "VG108" et "VG18" . . . . .	87
5.4.3	Prototypes "lamelle rigide" et "lamelle souple" . . . . .	89
5.4.4	Prototypes "gazon", "gazon gel" et "paillasson" . . . . .	89
5.5	Conclusions . . . . .	92
<b>6</b>	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>95</b>
6.1	Conclusions . . . . .	95
6.2	Perspectives . . . . .	97
6.2.1	Approche expérimentale . . . . .	97
6.2.2	Approche théorique . . . . .	97
6.2.3	Approche numérique . . . . .	98
<b>A</b>	<b>Mecaplast Group</b>	<b>101</b>
A.1	Les chiffres du Groupe . . . . .	101
A.2	Les moyens du Groupe . . . . .	102
A.3	Les innovations . . . . .	102
A.4	La culture qualité . . . . .	102
A.5	Les engagements du Groupe . . . . .	103
<b>B</b>	<b>Interaction fluide-structure</b>	<b>105</b>
B.1	Rappel du programme de recherche prévu . . . . .	105
B.2	Travail effectué . . . . .	105
B.2.1	Création d'un maillage . . . . .	105
B.2.2	Modes propres et fréquences propres . . . . .	106
B.2.3	Calcul et interprétation des résultats . . . . .	107
B.2.4	Conclusion . . . . .	109
B.3	Résultats complémentaires . . . . .	110
B.4	Conclusion . . . . .	111
<b>C</b>	<b>Etude de stabilité</b>	<b>113</b>

**D Résultats complémentaires**

**115**

**Bibliographie**

**121**



# Chapitre 1

## Introduction

### Sommaire

---

<b>1.1 L'aérodynamique automobile</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>1.2 Ecoulement de contournement du montant de baie</b> . . . . .	<b>3</b>
<b>1.3 Objectifs</b> . . . . .	<b>7</b>
<b>1.4 Plan de la thèse</b> . . . . .	<b>8</b>

---

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans la thématique de recherche aérodynamique automobile. Bien qu'à l'heure actuelle le secteur automobile se tourne principalement vers la réduction de traînée d'un véhicule pour répondre aux attentes du traité de Kyoto et au Grenelle de l'environnement, il existe d'autres secteurs de recherche en aérodynamique automobile. L'un d'eux est l'aéroacoustique, l'étude des phénomènes aérodynamiques susceptibles d'engendrer directement ou indirectement des perturbations acoustiques, c'est-à-dire du bruit. Ce thème de recherche est le pilier central de ce mémoire.

Dans un premier temps nous ferons une brève description de l'écoulement global autour d'un véhicule automobile. Ensuite, nous ferons un tour de l'état de l'art sur la thématique de l'écoulement de montant de baie. Les travaux passés y seront présentés, qu'ils soient à titre expérimental ou numérique, dans un but fondamental ou directement industriel.

### 1.1 L'aérodynamique automobile

Lorsqu'un corps se déplace dans l'air, tel un avion, une voiture, une moto, mais aussi une pomme, une boule de neige ou encore un chat, celui-ci est soumis à des contraintes exercées par l'écoulement du fluide qui l'entoure et qu'il traverse. Ces forces dites aérodynamiques peuvent se décomposer en une force de frottement, due aux contraintes visqueuses, et une force de pression due aux variations de pression associées aux décollements et aux structures tourbillonnaires qui apparaissent à la paroi.

Dans le cas d'un véhicule automobile, la force de pression contribue à près de 90% des actions aérodynamiques totales. C'est pour cette raison que la majeure partie des études dans ce domaine s'intéressent, en priorité, aux forces de pression générées sur le véhicule. Le champ de pression statique s'exprime à travers le coefficient de pression à la paroi :

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (1.1)$$

L'analyse d'une cartographie du coefficient de pression autour d'un véhicule permet d'identifier les principales régions de surpression [Elena (2001)] : le pare-choc, les rétroviseurs, le pare-brise ; ainsi que les régions de forte dépression : le culot, les montants de baie, le passage des roues (figure 1.1). La grande ligne de conduite pour réduire la traînée aérodynamique consiste à faire tendre le  $C_p$  autour du véhicule vers zéro.

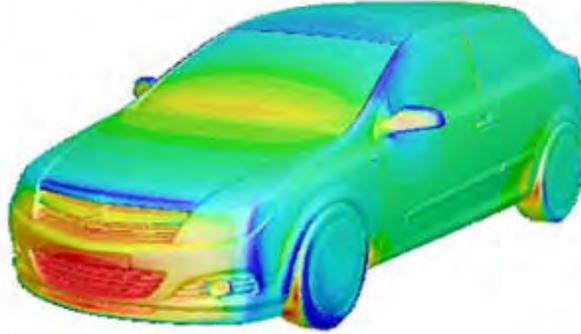


FIGURE 1.1 – Simulation numérique de la répartition de pression statique  $C_p$  autour d'une Opel Astra [Artiaga-Hahn *et al.* (NC)] ; les surpressions sont en rouge et les dépressions en bleu.

L'expression de la traînée aérodynamique est obtenue en effectuant un bilan intégral de quantité de mouvement autour du corps en déplacement, dans notre cas, autour d'un véhicule automobile. D'après Onorato *et al.* (1984), il est possible de décomposer le coefficient de traînée comme étant la somme de trois termes : la perte de vitesse longitudinale dans le sillage ; la traînée induite, fonction de la vorticité des structures tourbillonnaires émises dans le sillage ; les pertes d'énergie volumique ou pertes de pression totale. Or, toujours d'après Onorato *et al.* (1984), dans le cas d'un véhicule, le premier terme est négligeable devant les deux autres et il en résulte que le coefficient de traînée est principalement régi par la taille et l'intensité des structures tourbillonnaires et les pertes de pression [Drouin (2003)] :

$$F_x = \frac{\rho U_0^2}{2} \left[ - \int \int_{S_{sil}} \left(1 - \frac{U_x}{U_0}\right)^2 d\sigma + \int \int_{S_{sil}} \left(\frac{U_y^2}{U_0^2} + \frac{U_z^2}{U_0^2}\right) d\sigma \right] + \int \int_{S_{sil}} (p_{i_0} - p_{i_{sil}}) d\sigma \quad (1.2)$$

Du fait de leur importance sur la traînée totale d'une voiture, les tourbillons de culot sont les phénomènes aérodynamiques automobiles qui suscitent le plus de recherches. A cet effet, une forme géométrique dite *corps de Ahmed*, du nom de son "inventeur" [Ahmed *et al.* (1984)], a spécialement été conçue pour reproduire les principaux phénomènes physiques qui apparaissent sur la partie arrière d'un véhicule automobile tout en limitant les interactions parasites provenant d'éléments en amont du véhicule (figure 1.2).



FIGURE 1.2 – (a) Corps de Ahmed à l’échelle 1 dans la soufflerie S2A. L’avant, à gauche, est profilé pour minimiser les perturbations sur l’écoulement de culot à l’arrière (photo de l’auteur) ; (b) Simulation numérique de l’écoulement autour du corps de Ahmed [TUBerlin (NC)].

## 1.2 Ecoulement de contournement du montant de baie

Autour d’un véhicule automobile, le second type de structure tourbillonnaire observée provient de l’écoulement de montant baie (figure 1.5). Cette structure prend forme sur la partie avant du véhicule, au niveau des arêtes latérales du pare-brise dites “montant de baie”. Tout comme les tourbillons de culot, le tourbillon de montant de baie participe à la traînée du véhicule.

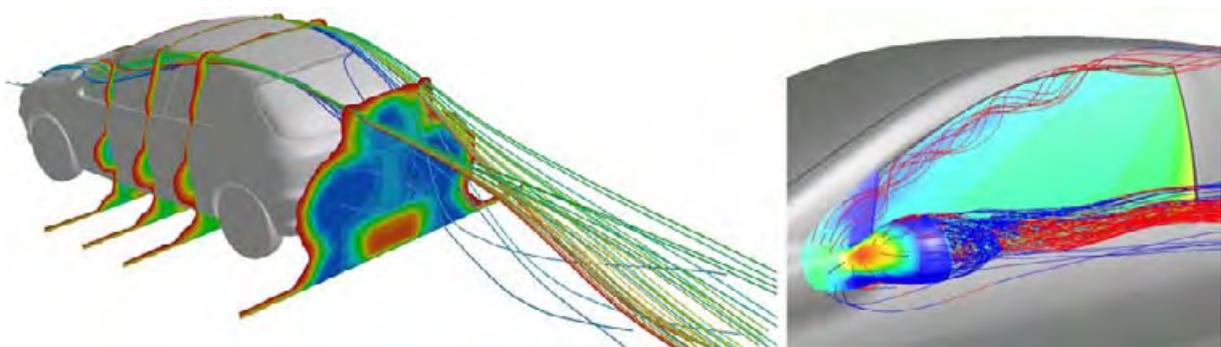


FIGURE 1.3 – Lignes de courants autour d’un véhicule en déplacement permettant de visualiser l’écoulement de montant de baie [Aider (2008)].

De plus, l’écoulement de montant de baie interagit fortement avec la vitre avant. Buchheim *et al.* (1982) ont montré qu’il existait une corrélation directe entre les fluctuations de pression à la paroi du véhicule et le bruit perçu à l’intérieur du véhicule. Effectivement, la plus forte nuisance sonore perçue dans l’habitacle par les passagers, lorsque le véhicule se déplace à plus de 80 km/h, provient de l’écoulement de montant de baie [Hucho (1998), Ono *et al.* (1999), Vaillant & Maillard (2003)]. Ceci est dû au fait que le bruit aérodynamique croît en  $U_0^6$ , avec  $U_0$  la vitesse infinie amont, alors que les autres bruits, comme le roulement ou le moteur croissent en  $U_0^1$  à  $U_0^3$ . Cependant, contrairement au phénomène précédent, il n’existe pas de géométrie générique de référence permettant de recréer cet écoulement. Néanmoins, comme nous le verrons par la suite, de plus en plus d’études se tournent vers l’utilisation d’un dièdre à 30°.

Les premières traces écrites d'un travail de recherche se rapprochant de près ou de loin de l'écoulement de montant de baie proviennent du brevet des néerlandais de la N.V. Instituut voor Aero-En Hydro-Dynamiek, déposé en 1925, visant à améliorer les performances des véhicules à l'aide de dispositifs d'aspiration et de soufflage [Bert (1925)]. Bien qu'aucun résultat n'y soit présenté, ce brevet était forcément le fruit d'une première réflexion vis-à-vis de l'écoulement de contournement de montant de baie. Il faudra cependant attendre les années 90 avant de trouver dans la littérature scientifique des études aérodynamiques traitant vraiment et spécifiquement du problème. L'un des premiers travaux de recherche est probablement celui de Watanabe *et al.* (1978), relaté à la *Society of Automotive Engineers* en 1978. Ils y analysent expérimentalement la topologie d'une structure tourbillonnaire de montant de baie à partir d'une géométrie simplifiée de la partie avant d'un véhicule automobile représenté par un dièdre à 48°. A l'aide de visualisations pariétales sur l'une des faces latérales de la maquette, ils réussirent à mettre en évidence l'existence de deux lignes de décollement et d'une ligne de rattachement, concluant sur l'existence de deux structures tourbillonnaires.

Zhu *et al.* (1993) publient l'une des premières simulations numériques du phénomène. Ces auteurs calculent les fluctuations de pression sur la vitre et en déduisent ainsi le bruit généré à l'aide d'une formulation simplifiée des équations de Lighthill-Curle :

$$p_f = \frac{1}{4\pi c L_0} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\partial\Omega} p(\xi, t) ds(\xi) \quad (1.3)$$

avec  $p_f$  la pression du son sur toute la surface de la vitre  $\partial\Omega$ ,  $p$  représente la pression instationnaire,  $c$  la vitesse du son,  $L_0$  la longueur caractéristique. Plusieurs configurations sont étudiées, et bien que la puissance de calcul de l'époque ne permette pas d'obtenir un maillage suffisamment fin pour capter toutes les structures qui forment l'écoulement, ils réussissent à établir des cartographies de  $C_p$  relativement détaillées. L'influence de l'angle du dièdre sur la topologie de l'écoulement y est mis en valeur avec des études à 30°, 45°, 60°, numériques et expérimentales.

Les chercheurs du *Nissan Research Center* [Ono *et al.* (1999)] ont, quant à eux, utilisé une approche numérique utilisant l'analogie acoustique de Lighthill-Curle pour prédire le bruit rayonné autour d'un véhicule :

$$p(\mathbf{x}, t) - p_0 = \frac{1}{4\pi x c} \frac{x_i}{x} \frac{\partial}{\partial t} \int_S p(\mathbf{y}, t - \frac{\mathbf{R}}{c}) n_i d\mathbf{y} \quad (1.4)$$

avec  $p(\mathbf{x}, t)$  la pression à la position  $\mathbf{x}$  de l'observateur,  $p_0$  représente la pression de référence,  $\mathbf{y}$  représente le vecteur position de la source sonore,  $\mathbf{R} = |\mathbf{x} - \mathbf{y}|$ ,  $x = |\mathbf{x}|$ ,  $c$  la vitesse du son et  $n_i$  la normale à la surface. Ils en concluent que cette méthode (expression 1.4) donne des résultats satisfaisants pour la prédiction de fluctuations de pression autour de formes complexes.

Plusieurs études numériques ont été effectuées par le biais de codes de calcul utilisant des méthodes de gaz sur réseau de type Lattice Boltzmann [Uchida & Okumura (1999), Vaillant & Maillard (2003), Gaylard (2007)]. Pour valider cette approche, Uchida & Okumura (1999) ont tout d'abord modélisé l'écoulement autour d'un dièdre et validé la pertinence des résultats à l'aide de visualisations pariétales expérimentales au fil de laine. Le niveau des fluctuations de pression est en accord avec les études précédentes. De même, Gaylard (2007) simule le spectre acoustique et le  $C_p$  à la paroi, mais autour d'une

géométrie réelle de véhicule automobile. Des profils de vitesse dans la couche limite en différents points sont comparés avec des mesures expérimentales. Ils concluent sur la non nécessité d'étudier les fluctuations de pression pour des fréquences supérieures à 2.5 kHz.

L'étude expérimentale de [Haruna \*et al.\* \(1990\)](#), sur un véhicule de série, définit une base solide quant à la compréhension du phénomène (figure 1.4). A partir de visualisations pariétales, ils confirment l'existence d'une zone de recollement et d'une zone de décollement sur la paroi. En étudiant la corrélation entre les structures tourbillonnaires de l'écoulement de montant de baie et la pression à la paroi, ils sont arrivés à la conclusion que la zone de décollement était plus apte à générer du bruit aérodynamique que la région de recollement.

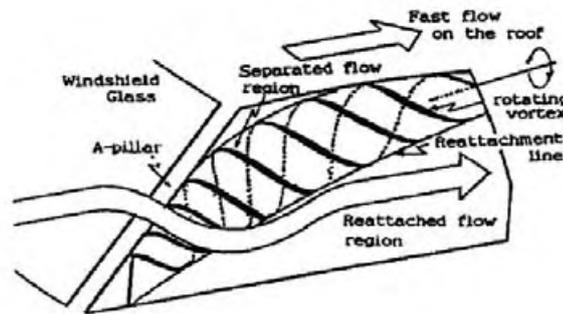


FIGURE 1.4 – Topologie de l'écoulement comme définie par [Haruna \*et al.\* \(1990\)](#)

A la fin des années 90 et au début des années 2000, le *Department of Mechanical and Manufacturing Engineering* du *Royal Melbourne Institute of Technology* a produit un grand nombre d'articles, majoritairement expérimentaux, sur le sujet. Une première série d'études a été faite sur la validité de procéder à des mesures en soufflerie pour recréer le contexte réel d'un véhicule se déplaçant sur route [[Peric \*et al.\* \(1997\)](#)]. Bien qu'arrivant à une conclusion mitigée, ils ont par la suite effectué un grand nombre d'études en soufflerie en parallèle de leurs campagnes de mesures sur route. Toutefois il faut faire attention car une différence d'un facteur deux entre les mesures sur route et les mesures en soufflerie apparaît dès lors que l'on se trouve en configuration de dérapage. Pour cela, des mesures ont été faites en soufflerie, sur un véhicule de série, et ont été comparées aux mesures enregistrées lors d'essais sur route (figure 1.5). Les résultats ont cependant montré une très bonne cohérence lors des mesures sans dérapage. De plus, nous savons aujourd'hui, grâce aux travaux de [Lawson \*et al.\* \(2008\)](#) sur l'effet de la turbulence naturelle sur les mesures de  $C_p$ , qu'il y a une très bonne concordance entre les mesures en soufflerie et les mesures sur route pour la configuration sans dérapage.

Une étude effectuée sur cinq maquettes de géométries variées (figure 1.6) a permis de mettre en évidence la faible dépendance de la pression moyenne et de la pression fluctuante vis-à-vis du nombre de Reynolds [[Alam \*et al.\* \(2003\)](#)]. Les grandes tendances de l'évolution du phénomène en fonction de l'angle de dérapage ont aussi été identifiées.

Toujours dans l'optique de définir les paramètres géométriques ayant une influence sur le bruit perçu dans l'habitacle, deux études ont été menées par [Watkins & Oswald \(1999\)](#) et [Zimmer \(2004\)](#). Ils concluent sur le fait que le rétroviseur a une influence notable sur la structure de l'écoulement de montant de baie, mais très peu d'influence vis-à-vis du bruit perçu dans l'habitacle.

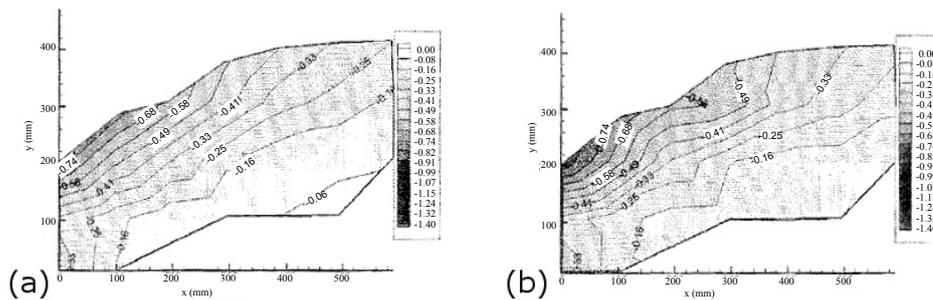


FIGURE 1.5 – Répartition de  $C_p$  sur la vitre avant dans la configuration avec un angle de dérapage de  $0^\circ$  ; (a) en soufflerie, (b) sur route.

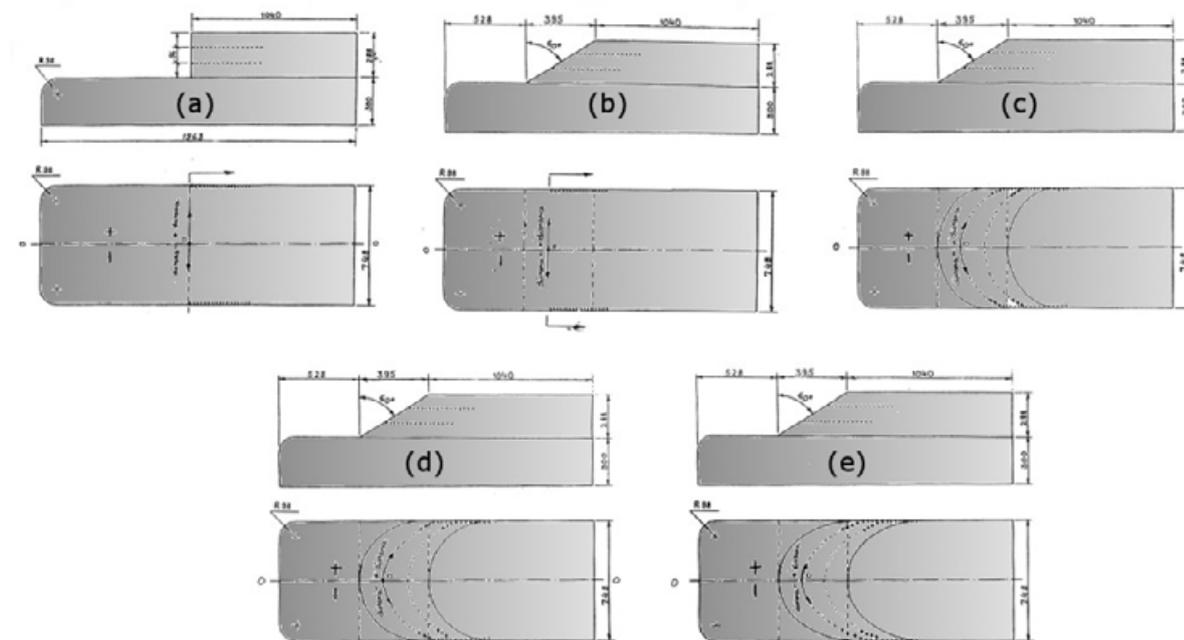


FIGURE 1.6 – Schéma des différentes maquettes utilisées par [Alam et al. \(2003\)](#) : (a) modèle avec pare-brise plat vertical ; (b) modèle avec pare-brise plat incliné à  $30^\circ$  ; (c, d, e) modèles avec pare-brise incliné à  $30^\circ$  et de différentes courbures.

Enfin, on citera aussi les articles de [Murad et al. \(2004a,b\)](#) sur la simulation de l'aérodynamique du montant de baie pour différents angles de dérapage et différents schémas de turbulence. Les résultats les plus en accord avec les mesures expérimentales sont ceux utilisant un schéma  $k - \varepsilon$  avancé au  $2^{nd}$  ordre.

Plus récemment, grâce à une évolution rapide des techniques de mesures, de nouvelles approches ont vu le jour. Tout d'abord le calcul des moments statistiques ainsi qu'une étude spectrale ont pu être faits en se basant sur des données expérimentales acquises par vélocimétrie laser tridimensionnelle [[Amiell et al. \(2006\)](#)]. Cela a permis, entre autre, de conclure sur la position du centre du tourbillon principal et sur le fait qu'il coïncide avec un maximum d'énergie cinétique des fluctuations. De plus, un dispositif permettant l'acquisition d'une cartographie de pression instationnaire, couplé à des mesures d'Ané-

mométrie Doppler Laser, a été mis en place lors des travaux de thèse de [Hoarau \(2006\)](#). Ses études ont permis de dégager certaines contributions physiques distinctes aux densités spectrales de puissance des spectres de pression :

- Une contribution à basse fréquence d'échelle de longueur équivalente au développement longitudinal de la structure le long de l'arête et advectée par la vitesse axiale au cœur du tourbillon.
- Une contribution à fréquences intermédiaires fortement corrélée dans la direction axiale, certainement associée à l'advection de perturbations cohérentes dans le tourbillon en développement. L'échelle de longueur de ces perturbations est plutôt de l'ordre de la largeur du tourbillon conique. Elle pourraient donc être associées à l'enroulement de la nappe décollée en analogie avec le lâcher tourbillonnaire des situations bidimensionnelles.

De plus, les résultats obtenus mettent en évidence l'absence de corrélation entre le signal de pression fluctuante et les vitesses longitudinales fluctuantes.

Pour finir, certains travaux se sont attelés depuis peu au contrôle des tourbillons de montant de baie afin de réduire la traînée [[Lehuteur & Gillieron \(2006\)](#)]. La configuration étudiée est celle d'une géométrie simplifiée en forme de dièdre. En appliquant un contrôle actif par soufflage ou par aspiration de long de l'arête, ils ont réussi à observer par voies expérimentale et numérique des modifications conséquentes sur la topologie de l'écoulement. De plus, par le biais des simulations numériques, ils ont accédé à la cartographie du  $C_p$  à la paroi (figure 1.7) dans les cas avec et sans contrôle [[Lehuteur \(2007\)](#)].

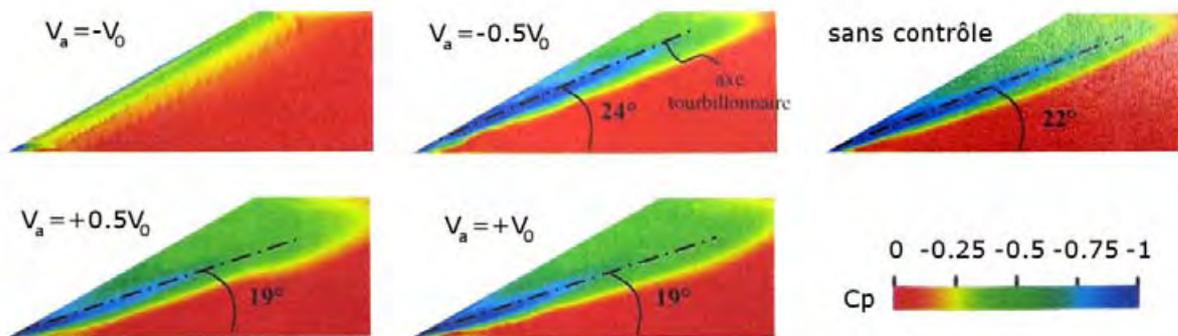


FIGURE 1.7 – Cartographie du  $C_p$  à la paroi pour des configurations de contrôle avec soufflage ou aspiration ; simulations numériques de [Lehuteur \(2007\)](#).

La bibliographie liée au contrôle sera abordée plus en détail dans le chapitre 4.

### 1.3 Objectifs

Ce tour d'horizon de la littérature se rapportant à l'écoulement de montant de baie montre qu'il y a encore beaucoup de choses à étudier pour comprendre réellement le fonctionnement de ce phénomène, qu'il est nécessaire de maîtriser afin de pouvoir réduire le bruit dans l'habitacle généré par les vibrations de la vitre induites par les fluctuations de pression pariétale dues à l'écoulement externe. C'est pour ces raisons que dans un premier temps nous allons nous concentrer sur l'étude du phénomène dans sa configuration la

plus épurées et faire une analyse fine de l'écoulement et de son influence sur la pression pariétale. Dans un second temps, nous essaierons de manipuler l'écoulement.

De plus, il existe très peu de visualisations du phénomène, que cela soit d'un point de vue moyenné ou instantané. C'est pourquoi une partie conséquente du travail de recherche va consister à essayer de mettre en évidence les différents aspects de la topologie du tourbillon de montant de baie, ou plus exactement des tourbillons de montant de baie.

## 1.4 Plan de la thèse

Dans le chapitre 2 nous aborderons les différents procédés expérimentaux mis en place pour étudier le phénomène, les techniques de mesure utilisées et les installations associées. De même, nous y présenterons de façon synthétique les différents outils d'analyse mis en place lors de ces travaux. Ce chapitre reprend donc toutes les connaissances nécessaires à la compréhension des travaux effectués par la suite.

Le chapitre 3 apporte une contribution à l'analyse physique du phénomène. L'écoulement de montant de baie y est étudié de façon expérimentale et exhaustive dans sa configuration la plus épurée. La quasi-totalité des variables physiques y sera mise en valeur. Dans ce chapitre, nous ne procéderons à aucune mesure acoustique.

Dans le chapitre 4, nous aborderons la thématique du contrôle et plus exactement des méthodes de modification d'écoulement. Ces concepts seront appliqués à la maquette épurée de sorte à mesurer de façon quantitative les modifications qu'il est ainsi possible d'apporter à l'écoulement de contournement de montant de baie.

Le chapitre 5 sortira un peu des chemins conventionnels de la recherche pour s'orienter vers des prototypes et des essais concrets sur un véhicule de série. Ainsi, le protocole d'essai et les mesures enregistrées seront radicalement différentes des mesures effectuées lors des deux chapitres précédents. Nous aborderons les concepts propres à l'acoustique et au ressenti, ces deux critères étant les plus appropriés pour définir l'apport ou la perte, en termes de confort acoustique dans l'habitacle du véhicule, engendrés par les prototypes.

Pour finir nous conclurons sur les résultats obtenus lors de ce travail de recherche. Nous résumerons ensuite les perspectives de recherche possibles et les études ou outils d'analyse en cours de réalisation et qui n'ont pu, faute de temps ou de budget, être mis en place intégralement dans le cadre du présent projet.

# Chapitre 2

## Dispositif expérimental et techniques de mesure

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>La maquette</b>	<b>9</b>
<b>2.2</b>	<b>La soufflerie</b>	<b>10</b>
<b>2.3</b>	<b>Techniques de mesures</b>	<b>11</b>
2.3.1	Visualisation	11
2.3.2	La Vélocimétrie par Image de Particules (PIV)	12
2.3.3	Le fil chaud	19
2.3.4	Mesure de la pression	19
<b>2.4</b>	<b>Techniques d'analyse</b>	<b>21</b>
2.4.1	Caractérisation des structures tourbillonnaires	21
2.4.2	La Décomposition Orthogonale en modes Propres (POD)	24

---

Ce chapitre a pour but de donner tous les éléments nécessaires à une bonne compréhension des travaux effectués et présentés dans ce manuscrit. Les différents dispositifs expérimentaux y sont présentés en détail ainsi que les techniques de mesure associées. La maquette ainsi que la soufflerie dans laquelle les mesures ont été effectuées sont présentées dans les paragraphes suivants. De plus, un outil mathématique complexe utilisé lors du post-traitement est succinctement présenté dans ce chapitre. Enfin, de sorte à mieux cerner le genre de problème physique qui va être abordé par la suite, une courte introduction aux phénomènes tourbillonnaires a été rédigée.

### 2.1 La maquette

L'écoulement autour d'un montant de baie étant un écoulement extrêmement complexe, il a été décidé que l'étude de l'écoulement autour d'une géométrie simplifiée présentant des caractéristiques similaires était nécessaire pour une meilleure compréhension du phénomène. Pour cela, la forme du dièdre a été choisie. La même approche a été employée par [Uchida & Okumura \(1999\)](#) lors de leur étude numérique du problème de bruit aérodynamique lié au montant de baie. [Lehuteur \(2007\)](#) a de même lors de ses travaux de thèse sur le contrôle des structures tourbillonnaires, privilégié une géométrie simplifiée, que cela soit pour la partie numérique ou pour la partie expérimentale. Enfin [Hoarau](#)

(2006) s'est aussi basé sur un dièdre en ajoutant toutefois une inclinaison aux parois latérales, de sorte à se rapprocher de la géométrie d'une automobile.

En tenant compte des études précédentes ainsi que l'angle réel mesuré sur des véhicules actuels, l'angle de  $30^\circ$  a été choisi pour la maquette. Ce dièdre a ensuite été fixé à l'emplacement du culot d'un corps d'Ahmed, qui a ensuite été retourné afin que l'avant du corps d'Ahmed représente, dans le cas de notre étude, le culot de la maquette (figure 2.1). La longueur caractéristique associée à la maquette est définie comme étant la racine carrée de la section apparente, soit  $L_0 = 0.336 \text{ m}$ . Par la suite, cette maquette sera référencée en tant que Demha30.

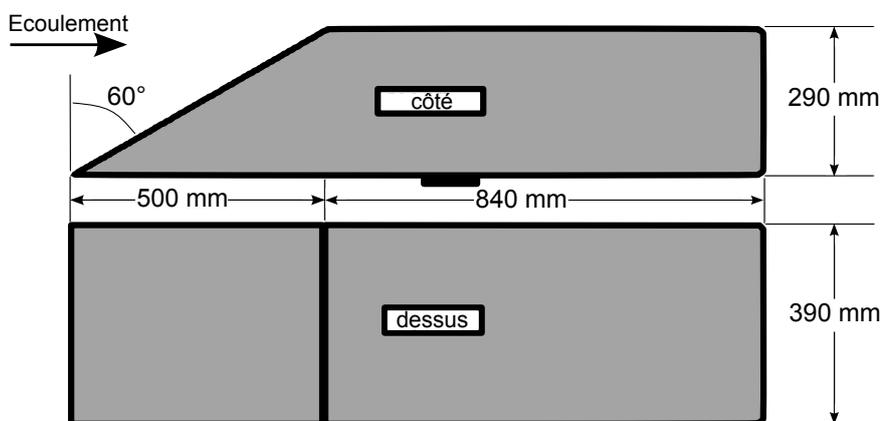


FIGURE 2.1 – Schéma et dimensions de la maquette Demha30

## 2.2 La soufflerie

La soufflerie utilisée pour faire l'intégralité des campagnes de mesures sur maquette est la soufflerie dite "S1" de l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse. La soufflerie S1 de type Eiffel, d'après son inventeur Alexandre Gustave Eiffel (1832-1923), a été mise en service en 1938. Elle est aujourd'hui classée monument historique mais elle est toujours en activité pour des études fondamentales ou contractuelles. La particularité de cette installation est d'être une soufflerie à veine libre avec l'aspiration et le retour dans un hall non caréné. La section utile circulaire est de 2.4 m de diamètre pour une longueur utile de 1.9 m (figure 2.2). Lors de sa mise en route, la soufflerie avait été conçue pour pouvoir atteindre une vitesse de 40 m/s. Toutefois, suite à l'explosion d'AZF en 2001, l'installation a été endommagée. Aujourd'hui, pour des raisons de sécurité, une vitesse maximale de 25 m/s est préconisée.

La régulation de la vitesse s'effectue avec une tolérance de  $\pm 2\%$ , et les gradients de vitesse longitudinal, transversal et vertical sont inférieurs à 1%, justifiant ainsi l'approximation d'une vitesse infinie amont constante. Le taux de turbulence est inférieure à 0.3%



FIGURE 2.2 – Schéma de la soufflerie, la maquette est posée sur un mât à mi-hauteur de la section.

## 2.3 Techniques de mesures

### 2.3.1 Visualisation

Il existe un grand nombre de méthodes pour visualiser un écoulement autour d'un obstacle. Dans les plus simples d'utilisation, on trouve le fumigène pour les écoulements d'air à très faible vitesse et le colorant pour les écoulements liquides non opaques. Cela dit, en raison de la diffusion ou de fortes instationnarités, ces deux méthodes s'avèrent peu appropriées pour les écoulements n'ayant pas lieu à très faibles vitesses ou bien pour faire des mesures quantitatives exactes. Toutefois, à l'aide de fumigène déployé en amont de la soufflerie, il nous a été possible d'obtenir une approximation des dimensions et de la géométrie de l'écoulement de contournement de montant de baie (figure 2.3). Ceci nous a permis de définir l'emplacement des plans PIV à effectuer.



FIGURE 2.3 – Visualisation par fumigène de l'écoulement de contournement de montant de baie. Les contours de la maquette sont représentés en rouge et l'axe approximatif du phénomène en bleu [Levy *et al.* (2008b)].

Une autre méthode très basique pour étudier les écoulements en proche paroi consiste à utiliser du fil de laine. Simple et peu onéreuse elle est utilisée depuis des décennies, mais

reste toutefois très approximative. Nous ne l'avons pas mise en œuvre dans le présent projet.

### 2.3.2 La Vélocimétrie par Image de Particules (PIV)

Il existe, depuis une vingtaine d'années et grâce aux travaux simultanés de [Barker & Fourny \(1977\)](#), [Dudderar & Simpkins \(1977\)](#), [Grousson & Mallick \(1977\)](#) et par la suite de [Meynart \(1979, 1980, 1982a,b, 1983a,c,b\)](#), une méthode non intrusive et extrêmement précise qui permet d'obtenir un champ de vecteurs déplacement dans deux, trois, voir même depuis peu dans quatre dimensions (le temps représentant la quatrième dimension) : la vélocimétrie par image de particules, plus généralement appelé PIV, Particle Image Velocimetry [[Adrian \(2005\)](#) ou encore [Romano & Tropea \(2008\)](#)]. Avec l'essor des nouvelles technologies et du matériel informatique, accompagné d'une baisse des prix du marché et d'une hausse des capacités de calcul, la PIV s'est démocratisée à tel point qu'elle est, de nos jours, la méthode la plus courante et la plus précise pour l'obtention de champs de déplacements et de toutes les informations physiques qui en découlent.

Son fonctionnement est, d'un point de vue théorique, relativement simple (figure 2.4) : l'écoulement estensemencé de micro-particules ; une nappe laser éclaire une partie de l'écoulementensemencé ; deux photos consécutives sont prises à un intervalle  $\Delta t = t' - t$  ; en suivant le déplacement des particules entre les deux instants on obtient un champ de vecteurs vitesses (figure 2.5).

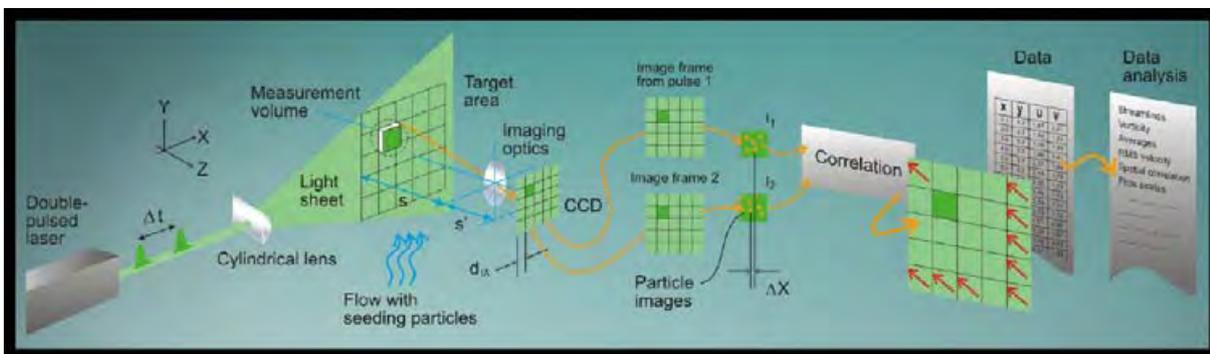


FIGURE 2.4 – Chaîne d'acquisition et de traitement PIV (Dantec Dynamics). Deux impulsions laser sont émises à un intervalle de temps  $\Delta t$ . À l'aide de lentilles, ces impulsions forment successivement une nappe laser qui éclaire la régionensemencé de l'écoulement étudiée. À chaque impulsion une image est enregistrée sur un capteur CCD. En faisant un suivi de particules, il est alors possible de mesurer les déplacements  $\Delta x$  et  $\Delta y$  des particules. On obtient ainsi un tableau contenant les vecteurs vitesses nous permettant par analyse d'accéder à différentes grandeurs physiques de l'écoulement.

D'un point de vue pratique, la mise en place d'une série de mesures par PIV s'avère être bien plus complexe. Tout d'abord il fautensemencé l'écoulement avec des micro-particules suffisamment petites pour que leur inertie soit négligeable et que l'on puisse considérer qu'elles n'interagissent pas avec l'écoulement. Ensuite, l'ensemencement doit être homogène, ce qui peut s'avérer compliqué lors de la manipulation de grands volumes de fluide. Dans le cas de notre étude, le produit utilisé est du di(éthyl-2 hexyle) sébaçate (DEHS) dont la distribution de la granulométrie est concentrée sur  $1 \mu m$ . Il est toutefois

possible d'utiliser de l'encens, de l'huile d'olive, de la rhodamine, des billes de verre, etc. selon l'application étudiée.

En ce qui concerne la nappe laser, un faisceau est généré à partir d'un laser de type double cavité Nd :YAG. La nappe laser nécessite du matériel optique de très haute précision afin d'être altérée pour former une nappe ayant les dimensions, largeur et épaisseur, souhaitées ainsi que l'orientation désirée tout en privilégiant les configurations dans lesquelles la nappe ne vient pas impacter la paroi. A cela s'ajoutent les contraintes liées au milieu environnant : une optique placée dans un écoulement ; les dépôts d'ensemencement sur les éléments optiques ; la réfraction du faisceau lors du passage à travers un milieu de densité différente de celle de l'air.

Enfin, une caméra et une optique de grande qualité sont nécessaires afin d'obtenir des images nettes et précises des particules. De plus, celles-ci doivent être placées sur des supports parfaitement immobiles et cela même si elles sont placées dans l'écoulement. Le choix du temps inter image,  $\Delta t$ , est aussi crucial : trop petit les particules n'ont pas le temps de se déplacer entre les deux acquisitions résultant en un champ de vitesse non significatif ; trop grand les particules sortent des fenêtres de corrélation résultant en des vecteurs faux. De façon plus théorique, les particules traceuses sont éclairées par les deux impulsions consécutives du laser donnant un doublet d'images. Il suffit alors de déterminer la distance parcourue par des couples de particules pour connaître le déplacement local du fluide. Ce déplacement est déterminé par une analyse statistique. Pour ce faire, comme mentionné précédemment, l'image est divisée en un grand nombre de fenêtres d'interrogation de petite dimension. Il faut ensuite analyser le déplacement d'ensemble des images des traceurs contenus dans chacune des fenêtres [Raffel *et al.* (1998), Rieithmuller (1999)].

Toutes ces contraintes rendent la phase de mise en place et d'acquisition d'une campagne PIV extrêmement longue et fastidieuse. Il s'ensuit une phase de post-traitement qui dépend en grande partie de la quantité de données enregistrées, souvent se comptant en centaines de giga-octets, voire même en téra-octets pour les campagnes de mesures à haute fréquence. C'est pourquoi un algorithme optimisé et plusieurs processeurs sont de rigueur pour un traitement dans une durée de temps acceptable.

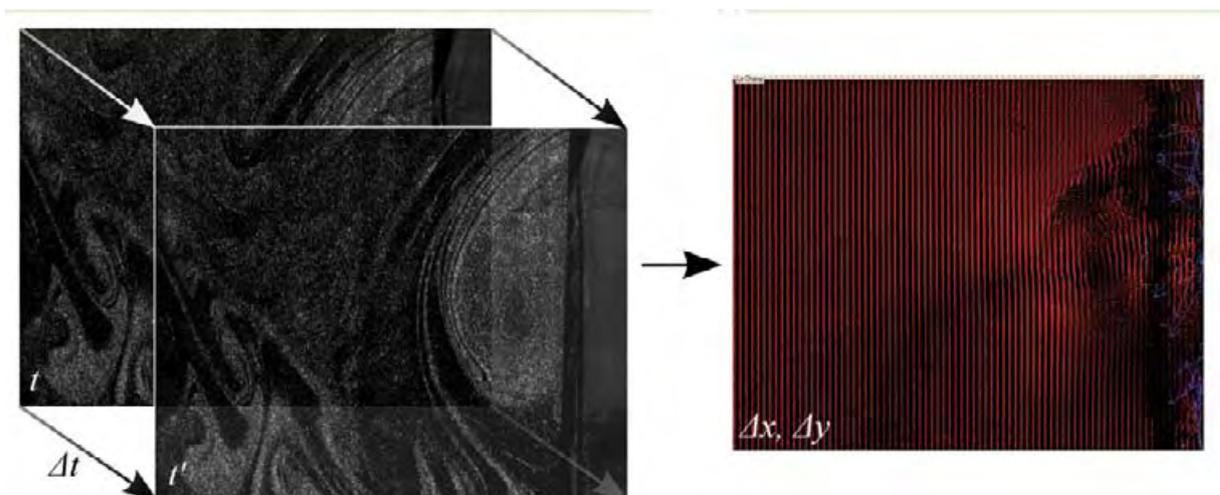


FIGURE 2.5 – Champ de vecteurs déplacements que l'on peut obtenir à partir de deux images brutes aux instants  $t$  et  $t'$ .

Dans le cas de notre travail, les différents logiciels utilisés pour l'acquisition des données brutes au format .tif et .im7 ont été CamWare, Fastcam viewer 2.4 de Photron et Davis 7.1 de LaVision. A cela vient s'ajouter les logiciels de post-traitement :

- Pivis 3.6, logiciel interne, a été utilisé pour le calcul des  $\Delta x$  et  $\Delta y$ . Deux algorithmes différents ont été utilisés : premièrement l'algorithme *itératif subpixel* consiste à décaler les mailles d'interpolation symétriquement sur chaque image à chaque itération afin de faire correspondre au mieux les motifs des particules. Le décalage des mailles est donné par le déplacement calculé à l'itération précédente. Les images sont interpolées afin de centrer le pic de corrélation au centre de la maille. Le détail de ce schéma peut être trouvé dans [Lecordier \(1997\)](#) ou [Maurel \(2001\)](#). Deuxièmement l'algorithme *déformation d'image* ajoute au décalage une déformation des images, déterminée à partir du champ de déplacement calculé à l'itération précédente interpolé sur chaque pixel. Cet algorithme a l'avantage de mieux prendre en compte le gradient de vitesse à l'intérieur de la maille. En contrepartie il nécessite un temps de calcul jusqu'à dix fois supérieur. Le détail de ce schéma peut être trouvé dans [Lecordier & Trinite \(2003\)](#)
- Une série de logiciels personnels a été développée lors de la thèse pour permettre les post-traitements souhaités et l'obtention des grandeurs physiques nécessaires. De plus, un filtre de type médian aux résidus normalisés, basé sur les travaux de [Westerweel & Scarano \(2005\)](#), a été appliqué aux données de sorte à éliminer les vecteurs vitesses instantanées erronés apparus lors de la première phase du post-traitement.

Lors des différentes étapes de l'étude, la PIV basse fréquence (PIVBF) ou la PIV haute fréquence (PIVHF) ont alternativement été utilisées. La première est résolue en espace mais pas en temps et permet à moindre coût d'accéder aux quantités physiques moyennées de l'écoulement. La seconde est résolue en espace et en temps. Elle permet ainsi d'avoir accès à la dynamique du phénomène observé dans les limites de la cadence de tir du laser et d'acquisition de la caméra. Cependant, sa mise en place et son post traitement est beaucoup plus lourd.

Dans le cas de la PIVBF, une question se pose donc sur le nombre de doublets d'images à enregistrer. Cela dépend de la vitesse de convergence des résultats. Pour cela on calcule l'écart-type suivant les deux composantes de la vitesse en différentes régions du domaine et on analyse les courbes d'évolution (figure 2.6). On s'aperçoit que dans le cadre de notre étude, 1000 doublets d'images, c'est-à-dire 1000 séries de vecteurs déplacement, sont suffisants pour avoir une bonne convergence statistique des résultats. Toutefois, dû aux capacités de stockage des différentes chaînes d'acquisition PIVBF, ces 1000 doublets d'images ne peuvent être pris en une seule série : il faut alors effectuer soit quatre séries de 216 doublets ou six séries de 136 doublets.

### Configuration 1 (PIVBF)

La première configuration PIV mise en place a permis de faire de la PIV basse fréquence à 4 Hz. Le laser utilisé est un laser Quantel CFR 200, 2x200 mJ, placé en dehors de la veine permettant à la nappe laser d'arriver par le dessous de la maquette. Pour cela un bras optique a été utilisé de sorte à positionner le miroir exactement en dessous de la maquette. La caméra mise en place était une Sensicam avec une résolution de 1280 pixels par 1024

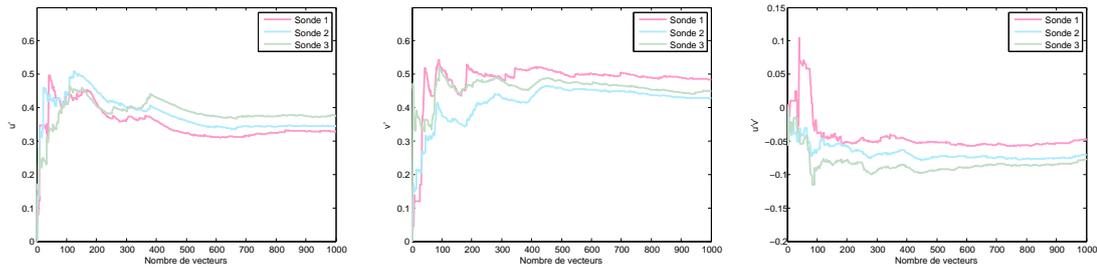


FIGURE 2.6 – Evolution des écarts-types de la vitesse et du tenseur de Reynolds en fonction du nombre de vecteurs (proportionnel au nombre de doublets ou snapshots).

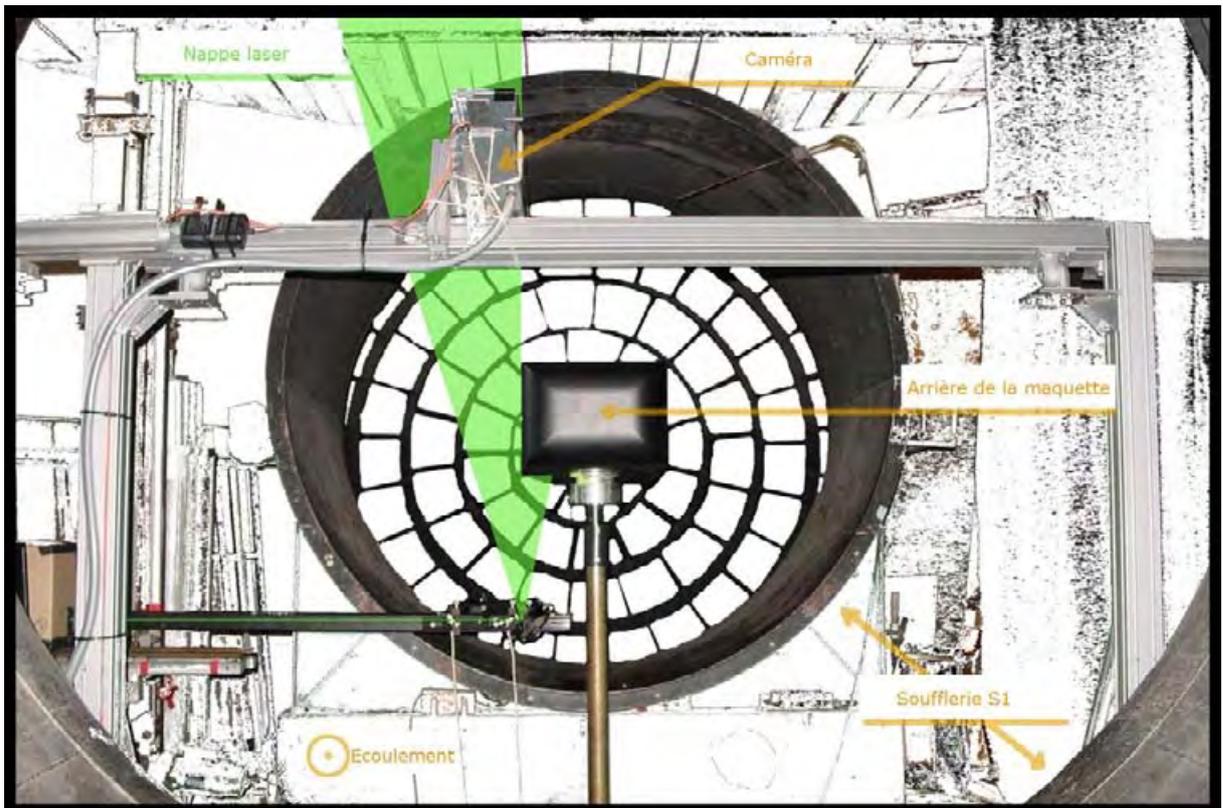


FIGURE 2.7 – Configuration 1 pour l'installation PIV (vue de l'arrière).

pixels. Elle était placée dans la veine, en aval de la maquette, dans le prolongement de l'axe de la structure tourbillonnaire (figure 2.7). Cette configuration a permis de faire huit plans distincts, tous perpendiculaires à la structure tourbillonnaire, c'est à dire à  $25^\circ$  par rapport à l'horizontale (figure 2.8). Les changements effectués entre chaque plan ont été une translation du laser et une modification de l'objectif de la caméra. Pour chaque configuration, la durée d'exposition, l'ouverture du diaphragme et l'objectif ont donc été modifiés (tableau 2.1).

Au total, pour chaque plan, quatre séries de 216 snapshots, c'est-à-dire de 216 doublets d'images, ont été prises. La fenêtre de corrélation a été ajustée en fonction de la zone d'étude pour diminuer le temps de post-traitement et la taille des fichiers générés. C'est pour cette raison que, par la suite, les dimensions de la fenêtre d'étude varient en fonction

Configuration	Optique	Ouverture du diaphragme	Delta t
1	170mm	f/8	30 $\mu$ s
2	170mm	f/8	30 $\mu$ s
3	110mm	f/11	50 $\mu$ s
4	85mm	f/8	65 $\mu$ s
5	85mm	f/8	65 $\mu$ s
6	55mm	f/8	100 $\mu$ s
7	55mm	f/8	110 $\mu$ s
8	55mm	f/8	100 $\mu$ s

TABLE 2.1 – Tableau résumant la configuration optique utilisée lors de l’acquisition des plans 1 à 8 de la configuration 1 (PIVBF).

du plan.

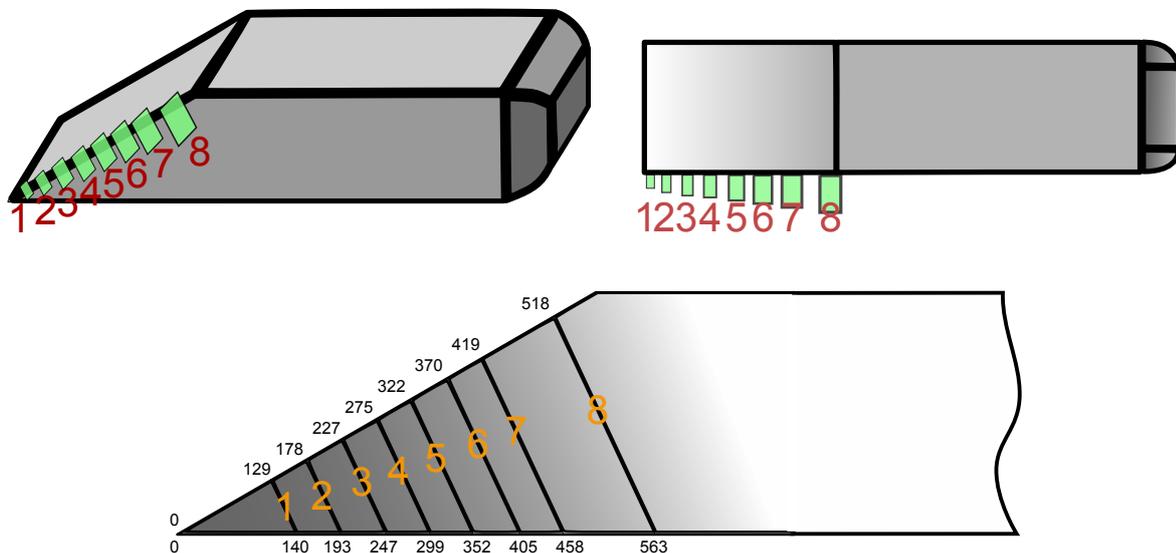


FIGURE 2.8 – Configuration 1 : vues de côté et de dessus des huit plans étudiés et coordonnées de la projection des plans sur la paroi (en mm).

### Configuration 2 (PIVBF)

La deuxième configuration reprend les mêmes matériels optique et laser que la configuration 1. Cette deuxième installation a pour but de permettre l’étude du phénomène dans sa longueur à partir de trois coupes du phénomène, chacune constituée de quatre plans (figure 2.10). La distance entre la paroi latérale de la maquette et le plan PIV est de 2 mm pour le plan A, 12 mm pour le plan B et de 25 mm pour le plan C.

Le laser a été placé sur le même support que lors des essais avec la configuration 1, et seul le bras optique a été allongé. La caméra a été placée en dehors de l’écoulement, à hauteur de la maquette et perpendiculairement à la paroi de côté (figure 2.9). L’optique utilisé est un objectif 55 mm avec une focale de f/5.6 et le temps inter image était de 80  $\mu$ s.

Au total, pour chaque plan, six séries de 136 snapshots, c’est à dire de 136 doublets d’images, ont été prises. Chaque coupe étant constituée de quatre plans, cela représente 3264 doublets par coupe.

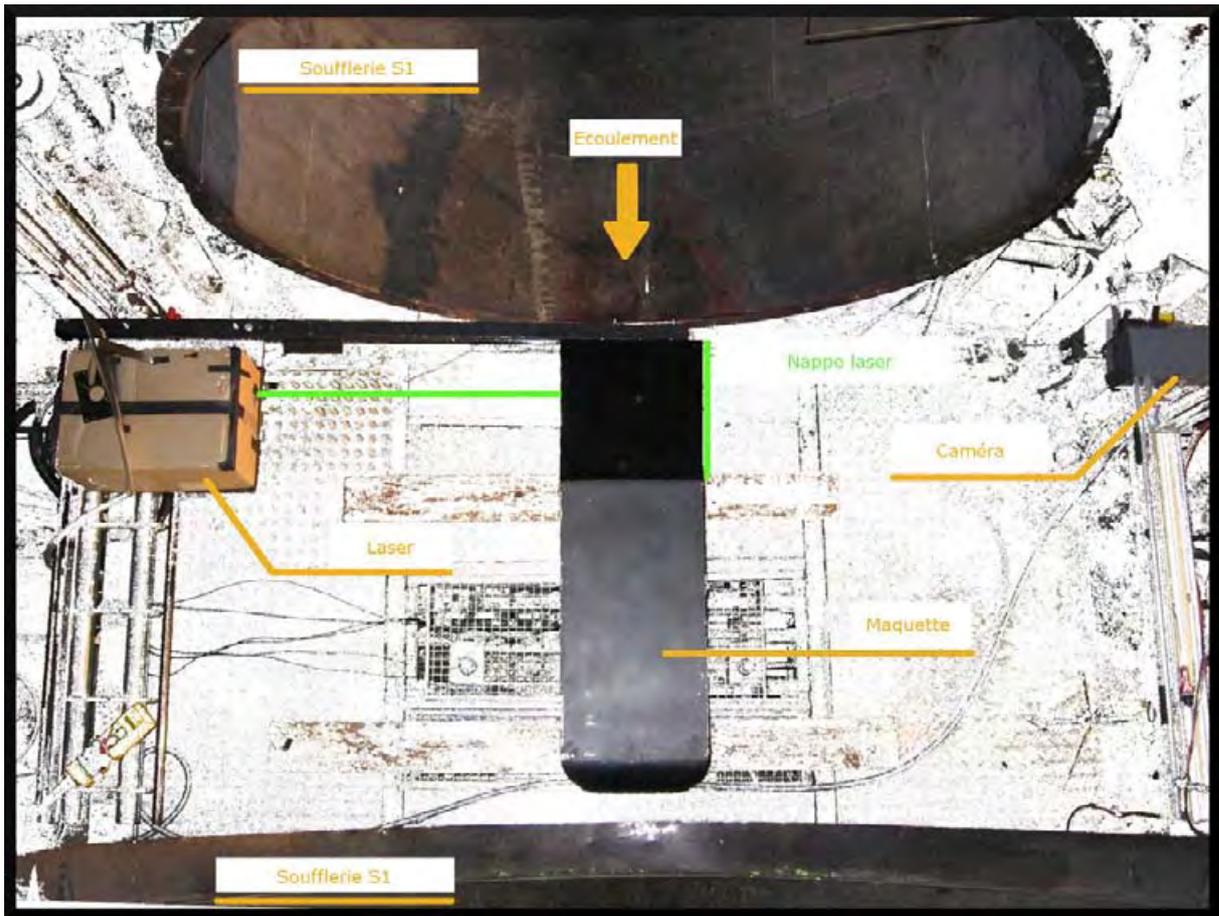


FIGURE 2.9 – Configuration 2 pour l'installation PIV (vue de dessus).

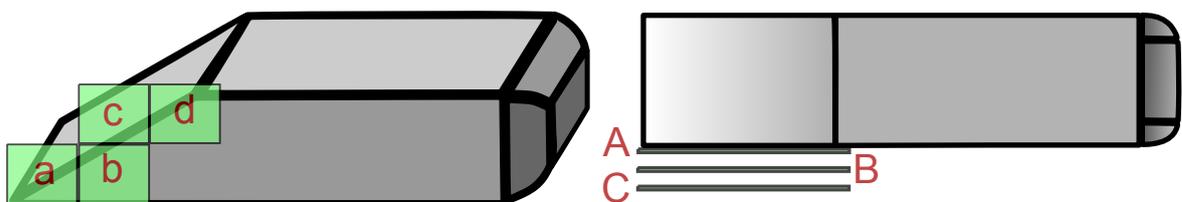


FIGURE 2.10 – Configuration 2 : vue de côté et de dessus des trois coupes du phénomène, chacune constituée de quatre plans.

### Configuration 3 (PIVHF)

La troisième configuration a été utilisée pour faire de la PIV haute fréquence. De fait, le matériel utilisé n'est donc pas le même que précédemment. Le laser utilisé est un Darwin Duo 2x20 mJ de Quantronix et la caméra une photron APX avec une résolution de 1024 pixels par 1024 pixels. L'objectif utilisé pour cette installation est un 135 mm à focal f/2 et le temps inter image est de 90  $\mu\text{s}$  ou de 120  $\mu\text{s}$  selon l'étude souhaitée. Chaque série enregistrée contient 3072 snapshots consécutifs.

La configuration dans laquelle le matériel est placé est similaire à la configuration 1 : le laser est placé sur le côté et la nappe laser arrive du dessous de la maquette avec un angle de 25°. La caméra est placée dans l'écoulement, en aval de la maquette, dans le prolongement

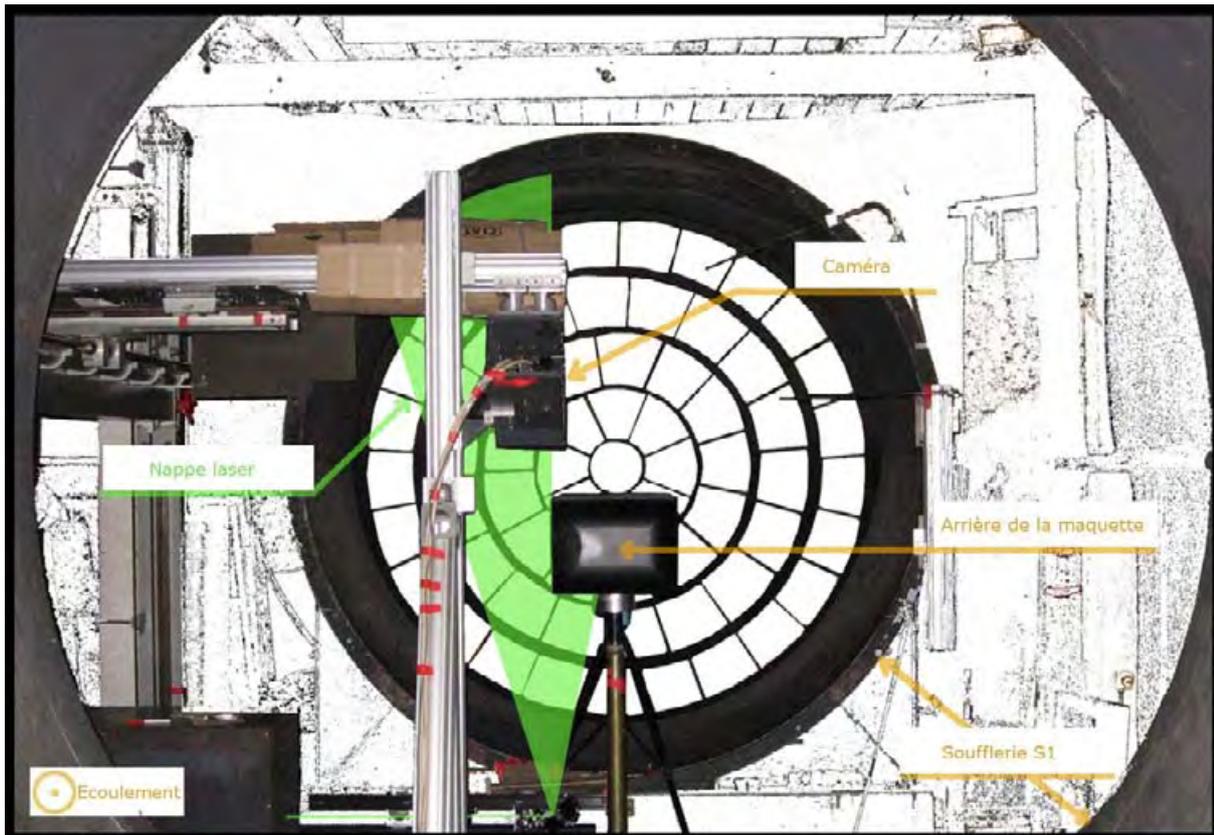


FIGURE 2.11 – Configuration 3 pour l’installation PIVHF (vue de derrière).

de l’axe de la structure tourbillonnaire ( $25^\circ$  par rapport à l’horizontale). Toutefois, la PIVHF nécessite une stabilité irréprochable car ce sont les champs instantanés qui sont étudiés et non les champs moyennés. Ainsi, la moindre vibration des structures portantes est enregistrée comme un déplacement du phénomène. C’est pour cette raison que la rigidité et l’aérodynamisme de l’installation ont été nettement améliorés par rapport à la configuration 1 (figure 2.11). Contrairement à la première configuration présentée, une seule coupe perpendiculaire à l’axe du phénomène a été étudiée (figure 2.12).

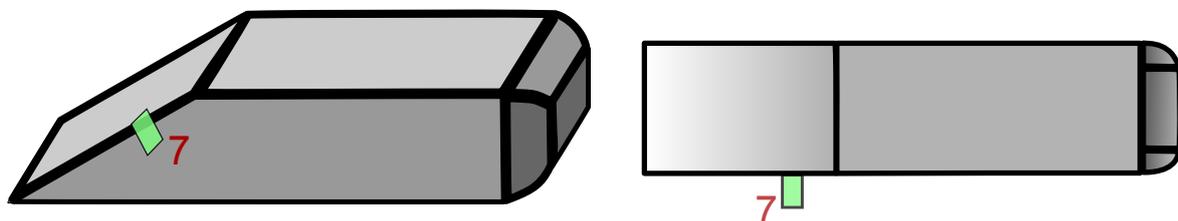


FIGURE 2.12 – Configuration 3 : vues de côté et de dessus du plan étudié.

Au total, plus de 110 000 doublets d’images PIV ont été enregistrés en utilisant l’une des trois configurations décrites précédemment. Cela représente, selon la méthode de calcul

utilisée pour obtenir les déplacements, jusqu'à 520 jours de calculs. Il faut ensuite effectuer les post-traitements souhaités.

### 2.3.3 Le fil chaud

Le fil chaud est un moyen de mesure qui permet d'avoir accès à la vitesse d'écoulement d'un fluide. Lorsque le fil est soumis à un écoulement, sa température varie, provoquant une variation de l'intensité du courant. Un tel dispositif permet de mesurer non seulement la vitesse de l'écoulement, mais aussi ses fluctuations (figure 2.13).

La chaîne d'acquisition utilisée lors de ce travail de recherche consiste en : une sonde droite à un fil de type DANTEC 55P11 ou une sonde coudée de type DANTEC 55P15 munie d'un fil en tungstène plaqué de platine, d'un diamètre de 5  $\mu\text{m}$  pour une longueur de 1.25 mm. La sonde est connectée à un anémomètre à température constante de type DISA 55M01 par l'intermédiaire d'un porte-sonde de type DANTEC 55H21 et un prolongateur. La longueur de câble BNC est 5 m [Jorgensen (2002)]. Cette longueur est recommandée par le fabricant de l'anémomètre afin d'obtenir une bande passante maximum tout en minimisant le bruit. Le signal issu de l'anémomètre est amplifié et filtré par un filtre de type passe-bas à 100 kHz. Il est ensuite numérisé sur un ordinateur via une carte d'acquisition 12 bits NI PCI6024E de National Instruments Corporation.

Le principe de fonctionnement du fil chaud est basé sur la convection forcée du fil. Selon l'étude de Collis & Williams (1959), le nombre de Nusselt d'un fil chauffé, placé perpendiculairement à la direction de l'écoulement, s'écrit lorsque la convection forcée est prédominante :

$$Nu\left(\frac{T_f}{T_\infty}\right)^{-0.17} = A + BRe^n \quad (2.1)$$

où  $A$ ,  $B$ , et  $n$  sont constants,  $T_f$  est la température du fil et  $T_\infty$  la température ambiante. L'effet de la convection naturelle se traduit par un écart à la variation du nombre de Nusselt près de l'extrémité inférieure de la gamme de nombres de Reynolds définie dans l'étude de Collis & Williams (1959). Cette augmentation de transfert de chaleur est due à la vitesse induite par la force de flottabilité de l'air chauffé adjacent au fil. Il existe alors un critère du nombre de Reynolds pour lequel la convection naturelle devient négligable vis-à-vis de la convection forcée. A partir de ce critère, on peut définir qu'à partir d'une vitesse d'écoulement supérieure à 0.064 m/s, la convection naturelle est négligable. Cette technique de mesure s'adapte donc très bien à notre étude, les vitesses observées étant bien supérieures.

De plus, des sondes plus complexes munies de deux ou trois fils permettent d'obtenir les informations concernant les fluctuations dans les trois directions de l'espace.

Dans le cas de notre étude, ce dispositif sera utilisé pour caractériser certains paramètres lors de la phase de contrôle. Seule la version mono-fil a été utilisée.

### 2.3.4 Mesure de la pression

En mécanique des fluides, les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles non-linéaires qui décrivent le mouvement des fluides dans l'approximation des milieux continus. Pour un fluide visqueux newtonien et lorsque l'écoulement est incompressible, c'est-à-dire pour un nombre de Mach  $Ma \leq 0.14$ , l'équation de l'énergie est

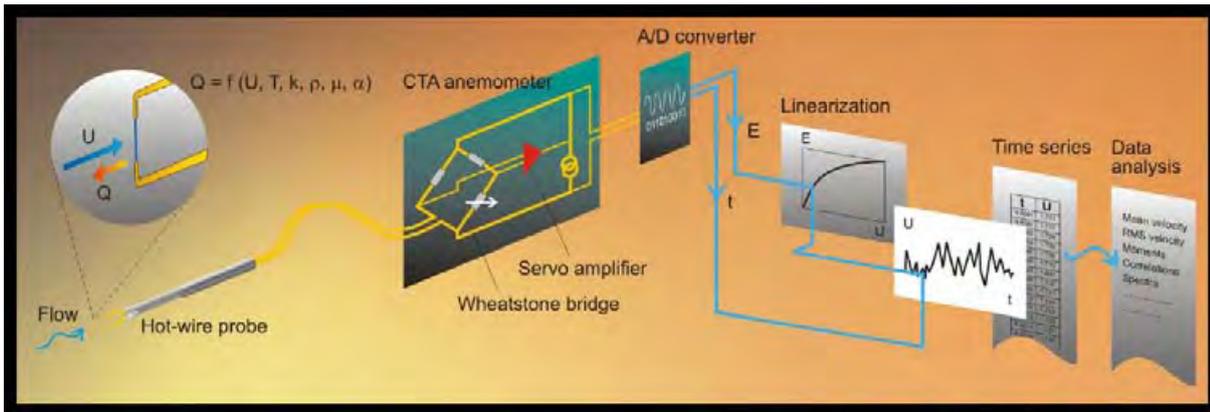


FIGURE 2.13 – Chaîne d’acquisition et de traitement pour des mesures de type fil chaud. Le fil chaud est relié à une sonde, elle-même reliée à un pont de Wheatstone, et chauffé par un courant. Un amplificateur permet de maintenir le système dans un état physique constant même sous l’effet des fluctuations de température auquel est soumis le fil. Le courant  $E$  est associé au transfert de chaleur et permet de remonter à la vitesse (Dantec Dynamics).

découplée des équations de continuité et de quantité de mouvement, c’est-à-dire que l’on peut déterminer la vitesse et la pression indépendamment de l’équation de l’énergie. L’expression des équations de continuité et de quantité de mouvement est considérablement simplifiée. L’écoulement est alors décrit par l’équation d’incompressibilité et l’équation bilan de quantité de mouvement :

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \operatorname{grad}) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \nu \Delta^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (2.3)$$

La pression apparaissant dans l’équation bilan de quantité de mouvement, il est donc nécessaire de la déterminer afin de connaître toutes les informations décrivant l’écoulement.

Il est en général délicat et compliqué de mesurer la pression au milieu d’un écoulement sans perturber celui-ci. Par contre, l’écoulement étudié se trouvant en proche paroi, il est possible de façon non intrusive de venir mesurer la pression à la paroi. Une mesure de la pression moyenne permet d’obtenir une cartographie du champ moyen à la paroi. De telles mesures ont d’ailleurs déjà été faites expérimentalement par [Haruna \*et al.\* \(1990\)](#) et [Lawson \*et al.\* \(2008\)](#) et numériquement par [Zhu \*et al.\* \(1993\)](#), [Uchida & Okumura \(1999\)](#) et [Gaylard \(2007\)](#).

Pour réaliser les cartographies de pression pariétale moyenne, nous avons utilisé un indicateur de pression différentielle de type Furness Controls - model FC318, d’une précision de  $\pm 0.25\%$  de la lecture. La paroi avant triangulaire de la maquette Dehma30 a été perforée de 36 trous de prise de pression répartis de façon homogène. Le diamètre extérieur est de dimension sub-millimétrique de sorte à ce que la paroi puisse être toujours considérée comme lisse et qu’aucune perturbation ne soit ainsi générée.

Toutefois, le phénomène étudié étant instationnaire, des mesures de pression instationnaire sont indispensables pour obtenir des informations vis-à-vis de la dynamique. La méthode expérimentale retenue pour faire ces mesures est celle utilisée par les acousticiens du laboratoire PHASE (Physique de l'Homme Appliquée à Son Environnement) de l'Université Paul Sabatier à Toulouse. Cette méthode consiste à insérer un microphone dans la paroi, côté intérieur, dans une cavité qui est reliée à l'extérieur par un trou submillimétrique plutôt que de le mettre affleurant à la paroi (figure 2.14).

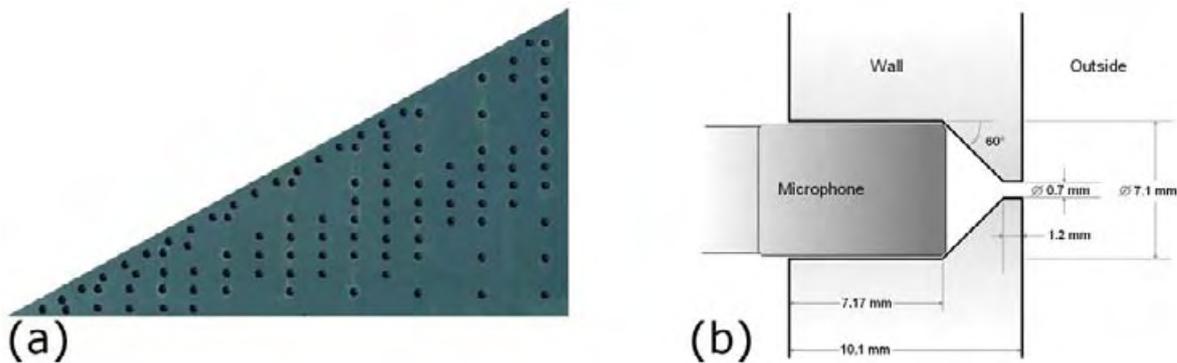


FIGURE 2.14 – (a) Vue intérieure de la maquette montrant les 105 trous de mesure de pression instationnaire; (b) Schéma d'un des trous de mesure de pression.

Cette méthode a l'avantage d'être non intrusive et de protéger les capteurs ou microphones. La seule contrainte se trouve lors de l'usinage des cavités et de la conduite ou du choix des microphones pour éviter le phénomène de résonateur de Helmholtz dont la fréquence est donnée par [Bernardot *et al.* (2002)] :

$$f_0 = \frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{LV}} \quad (2.4)$$

où  $C$ ,  $S$ ,  $L$  et  $V$  correspondent respectivement à la célérité du son, la surface d'entrée de la conduite, la longueur de la conduite et le volume de la cavité. Il en résulte une fréquence propre pour l'installation schématisée sur la figure 2.14(b) comprise entre 86 kHz et 116 kHz selon l'incertitude d'usinage, et donc largement supérieure aux fréquences caractéristiques mesurées dans l'écoulement. Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé des microphones Bruel & Kjaer 1/4" Type 4135. Leur plage de fréquence de fonctionnement est de 4 Hz à 70 kHz, pour une bande dynamique de 42 dB à 172 dB et une 1.6 mV/Pa.

La durée d'enregistrement pour les mesures de pression instationnaire est de 30 secondes.

## 2.4 Techniques d'analyse

### 2.4.1 Caractérisation des structures tourbillonnaires

Le thème de recherche de cette étude étant la structure tourbillonnaire de montant de baie, il est nécessaire d'avoir un aperçu de ce qu'est un tourbillon et de comment

l'identifier. L'exemple d'un tourbillon plus connu, et pourtant pas le plus courant, est le cyclone (du grec kuklos qui évoque l'enroulement du serpent) aussi connu sous le nom de typhon en Extrême Orient, de taï fong en Chine, de taï fu au Japon, de toofan en Inde, de tufan en Arabie, de baguio aux Philippines, badai en Indonésie, willy-willy en Australie ou encore de hu ra kan aux Caraïbes (ce dernier donna le terme anglais hurricane traduit en français comme ouragan, figure 2.15). Si cette structure tourbillonnaire est si connue, c'est à cause de son côté dévastateur pour l'homme : le 25 décembre 1974, Darwin, capitale des Territoires du Nord en Australie, a entièrement été rasée par le cyclone Tracy ; le 29 août 2005, l'ouragan Katrina frappait la Nouvelle-Orléans aux Etats-Unis (figure 2.15), devenant la catastrophe naturelle la plus coûteuse de l'histoire du pays. En plus, dû à sa taille, une telle structure n'est pas contrôlable, mais dans le meilleur des cas uniquement prévisible, d'où l'importance de comprendre ces phénomènes.



FIGURE 2.15 – Vue satellite de l'ouragan Katrina (2005) ; Vue depuis l'espace de l'ouragan Elena (1985) ; Vue depuis la terre de la tornade Elie au Canada (2007)

Mais nous ne sommes pas uniquement entourés de structures tourbillonnaires géantes et incontrôlables. Les hommes et les animaux savent générer eux-même de telles structures, comme par exemple les anneaux tourbillonnaires générés par les plongeurs, les dauphins et même les enfants (figure 2.16). Ou bien ils sont responsables consciemment ou inconsciemment de leur apparition comme les tourbillons de vidange de baignoire, les tourbillons de battements d'ailes ou les tourbillons de sillage de véhicule, comme par exemple les automobiles.

A cela viennent s'ajouter les structures tourbillonnaires de toutes petites tailles comme celles présentes dans la couche limite et que l'on retrouve à différentes échelles tout du long de la cascade énergétique de Kolmogorov [Kolmogorov (1958)].

Les structures tourbillonnaires sont donc nombreuses et variées. C'est pour cette raison qu'il nous faut les classer en deux catégories : les structures "solitaires" et les structures "attachées". Il faut aussi prendre en compte la diversité au niveau de la forme : cylindrique, conique, circulaire. Ainsi une tornade est donc une structure "solitaire conique", un tourbillon de marche descendante une structure "attachée cylindrique" et dans le cas qui nous intéresse, la structure tourbillonnaire de montant de baie est donc définie comme étant une structure "attachée conique". Ce type de phénomène tourbillonnaire est aussi visible en aéronautique autour d'ailes delta en incidence (figure 2.17) et autour de bâti-

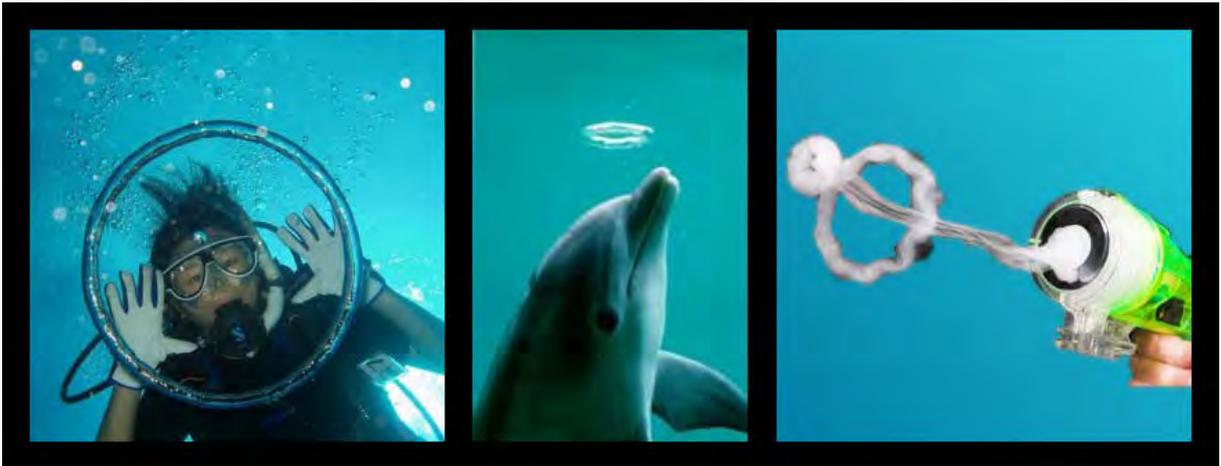


FIGURE 2.16 – Génération d'un anneau tourbillonnaire par un plongeur, un dauphin et un jouet grand public à titre purement distractif.

ments carrés soumis à un vent conséquent.

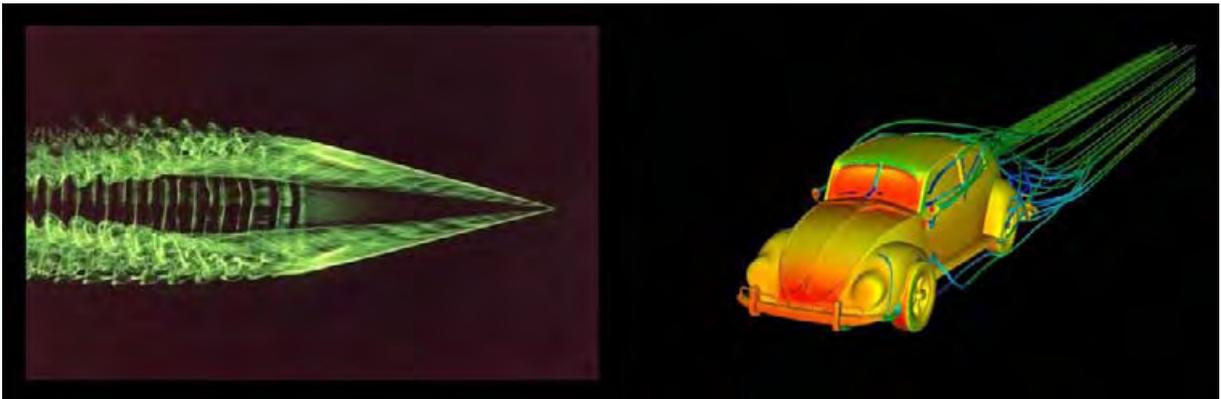


FIGURE 2.17 – Tourbillon conique autour d'une aile delta en incidence [Williamson & Miller (1995)]; Modélisation des structures tourbillonnaires autour d'une VW [Fluent&EnSight (NC)].

D'un point de vue mathématique, ce qui caractérise un tourbillon c'est le fait qu'une particule de fluide tourne sur elle-même. Un tourbillon peut alors être décrit par un champ de vecteur porté par l'axe de rotation dont l'intensité est égale à la vitesse de rotation. Lorsque l'on possède un champ de vitesse, il existe plusieurs méthodes pour localiser une structure tourbillonnaire. Dans le travail qui suit, deux méthodes basées sur les travaux de Jeong & Hussain (1995) seront utilisées :

1. par identification d'une zone de vorticité non nulle :

$$\boldsymbol{\omega} = \frac{1}{2} \text{rot}(\mathbf{u}) \neq \mathbf{0} \quad (2.5)$$

L'intensité de la vorticité est souvent utilisée pour identifier les structures cohérentes et le centre des tourbillons car sa valeur exprime la tendance qu'a un écoulement à

tourner en rotation pure autour d'un point. La vorticité est d'autant plus importante que l'on se rapproche du centre de la structure tourbillonnaire. Un maximum de vorticité est donc souvent associé à la position du centre. Cependant cette méthode a ses limites et ne donne pas de bons résultats dans les zones de cisaillement (figure 2.18).

2. par identification des zones où le critère  $Q$  est positif :

$$Q = \frac{1}{2}(\|\Omega\|^2 - \|S\|^2) \geq 0 \quad (2.6)$$

où  $\|S\|^2 = \text{tr}(SS^T)$  et  $\|\Omega\|^2 = \frac{1}{2}\omega^2$ . Le critère  $Q$  est construit à partir de la différence entre la partie symétrique ( $\Omega$ ) et la partie antisymétrique ( $S$ ) du tenseur des gradients de vitesse. Il représente l'équilibre locale entre le taux de rotation ( $Q \geq 0$ ) et le taux de déformation ( $Q \leq 0$ ). En proche paroi,  $Q = 0$ . De ce fait, le critère  $Q$  ne présente pas le défaut de la vorticité qui ne représente pas correctement le mouvement rotationnel en proche paroi. Malgré tout, ce critère présente aussi des limites d'utilisation, comme par exemple en présence d'une base de données très bruitée.

Bien que la recherche des structures tourbillonnaires se fasse dans de nombreux cas à l'aide du critère  $\lambda_2$ , nous ne pouvons pas l'appliquer à notre étude du fait de la bi-dimensionalité de notre base de données. Cependant, si nous faisons l'hypothèse que l'écoulement, dans les plans PIV 1 à 8, est quasiment plan, alors la définition du critère  $\lambda_2$  est équivalente à la définition du critère  $Q$  [Jeong & Hussain (1995)].

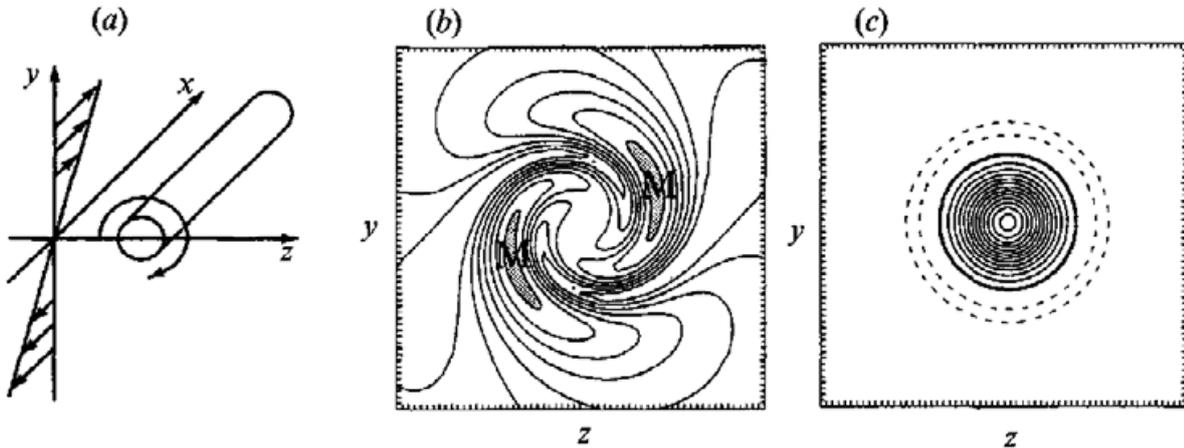


FIGURE 2.18 – (a) Schéma d'un tourbillon cylindrique dans un écoulement cisailé homogène ; (b) Contour de la vorticité,  $M$  représentant les extrema ; (c) Contour de  $-\lambda_2$  [Jeong & Hussain (1995)].

## 2.4.2 La Décomposition Orthogonale en modes Propres (POD)

La décomposition orthogonale en modes propres (POD) est bien plus qu'un simple outil. Entre les mathématiques et la physique, des centaines d'articles ont déjà été écrits

à son sujet. Historiquement, elle a été introduite par Lumley (1967) dans le but d'extraire les structures cohérentes d'un écoulement turbulent. Aujourd'hui, la POD est utilisée dès que l'on souhaite extraire les caractères dominants d'un ensemble de données, que cela soit dans le traitement de l'image [Kirby & Sirovich (1990)], l'étude de l'activité neuronale [Sornborger *et al.* (2003)], en analyse de signal [Algazi & Sakrison (1969)], en compression de données [Andrews *et al.* (1967)], en modèle réduit [Bourguet *et al.* (2007)] ou bien encore en contrôle [Favier & Kourta (2006)] pour ne citer que quelques exemples.

Dans le cadre de cette étude, la POD est utilisée comme un outil de filtrage de l'information. Pour cette raison, nous présenterons uniquement une description succincte de son fonctionnement. Pour plus de détails mathématiques et physiques nous invitons le lecteur à se reporter à des ouvrages entièrement dédiés à ce sujet tel que Cordier & Bergmann (2003). Nous exposons par la suite seulement le cheminement mathématique qui permet de décomposer un écoulement comme étant la somme de l'écoulement moyen plus la somme de l'information liée aux fluctuations :

$$U(x, t) \simeq U_m(x) + \sum_{k=1}^{N_{POD}} a_k(t) \phi_k(x) \quad (2.7)$$

L'utilisation de la POD se justifie lorsque l'on essaie d'approcher une fonction  $U$ , dépendante des variables d'espace  $x$  et de temps  $t$ , par une somme finie de termes s'écrivant comme un produit de fonctions à variables séparées :

$$U(x, t) \simeq U_m(x) + \sum_{k=1}^K a_k(t) \phi_k(x) \quad (2.8)$$

La relation 2.8 devient exacte lorsque  $K$  tend vers le nombre de snapshots. Si la mesure est d'une durée infinie,  $K$  doit alors tendre vers l'infini pour que la relation 2.8 devienne exacte. Cependant ce qui nous intéresse c'est de la rendre la plus précise possible pour une valeur de  $K$  donnée. Pour cela, on crée la matrice  $A$  telle que :

$$A = \begin{pmatrix} A_1 & \dots & A_{N_t} \end{pmatrix}; A_i = \begin{pmatrix} u'_{1,i} \\ \vdots \\ u'_{N_x,i} \\ v'_{1,i} \\ \vdots \\ v'_{N_x,i} \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

où  $u'$  et  $v'$  représentent les fluctuations de vitesse soit  $u - \bar{u}$  et  $v - \bar{v}$ ;  $N_t$  est égal au nombre de réalisations (ou snapshots) et  $N_x = 2N$  est le nombre total de données en espace à chaque instant. Dans notre cas,  $N_x$  est égal à deux fois le nombre de mailles d'un champ instantané. Si nous avions souhaité prendre en compte un autre paramètre, comme la vitesse  $w$  dans la troisième direction par exemple, la dimension  $N_x$  aurait alors été égale à trois fois le nombre de mailles du domaine. Il existe deux approches pour la POD : la *méthode classique* dont une des étapes consiste à résoudre un problème aux valeurs propres lié à la matrice de corrélation  $C_x = AA^T$  de dimension  $N_x^2$ ; la *méthode des snapshots* dont une étape consiste à résoudre un problème aux valeurs propres lié

à la matrice de corrélation  $C_t = A^T A$  de dimension  $N_t^2$ . Dans le cadre de l'analyse de données expérimentales issues de campagnes PIV, la dimension spatiale est généralement nettement plus grande que la dimension temporelle :  $N_x \gg N_t$ . Pour cette raison, lors de notre étude, nous appliquerons la *méthode des snapshots* qui s'avère alors plus rapide en temps de calcul. Cette méthode a été imaginée par Sirovich (1987a,b,c) et correspond au symétrique de la POD classique.

En appliquant le concept de la décomposition aux valeurs singulières à la matrice  $A$  (2.9) définie dans un espace de dimension  $N_x \times N_t$ , il est possible de déterminer une série de fonctions  $\phi_k$ ,  $k = 1 \dots K$ , qui définissent un sous-espace de dimension réduite  $K$  dans lequel seule l'information la plus pertinente de la matrice  $A$  est conservée.

On calcule les valeurs propres  $\lambda_k$  et vecteurs propres  $V_{\lambda_k}$  associés à la matrice de corrélation  $C$ . Ces vecteurs propres sont ensuite utilisés pour calculer les fonctions propres spatiales  $\phi_k$ , normalisées par leur valeur propre associée (2.10). Ces fonctions donnent une information sur les corrélations spatiales des différentes variables. De même, on calcule les modes propres temporels  $a_k$  (2.11) :

$$\phi_k = \frac{1}{\sqrt{\lambda_k}} A V_{\lambda_k} \quad (2.10)$$

$$a_k = A^T \phi_k = \frac{V_{\lambda_k}}{\sqrt{\lambda_k}} \quad (2.11)$$

Les relations (2.9), (2.10), (2.11) permettent donc de définir l'expression (2.8). Toutefois, on note que la matrice des snapshots  $A$  est construite à partir des valeurs fluctuantes de la vitesse. L'expression (2.8) doit donc s'écrire dans notre cas, comme la somme de la vitesse moyenne  $U_m$  et la somme des  $N_{POD}$  premiers modes de la décomposition. Ceci nous donne l'expression 2.7.

Cette technique permet donc de reconstituer une base de données ne contenant que le degré souhaité d'information. Cela peut être très utile lors de l'étude d'un phénomène fortement perturbé ou bien une base de données bruitée (figure 2.19).

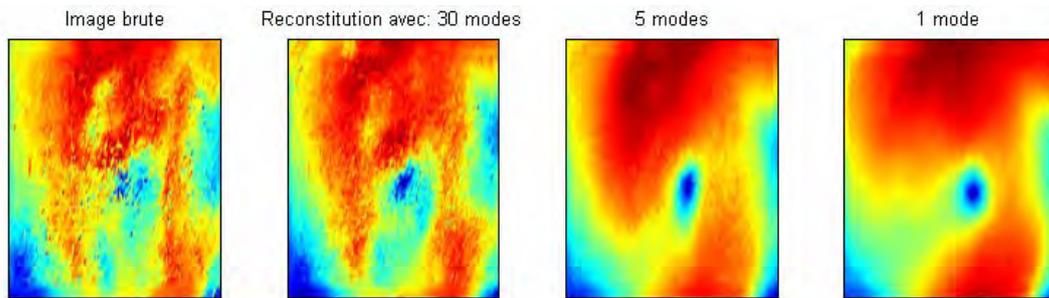


FIGURE 2.19 – Exemple de filtrage de l'information par la *méthode des snapshots* en gardant seulement 1 mode, 5 modes et 30 modes. L'image utilisée est un résultat expérimental d'un champ de vitesse au coeur d'une structure tourbillonnaire obtenu par PIV.

# Chapitre 3

## Topologie de l'écoulement de montant de baie

### Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>27</b>
<b>3.2</b>	<b>Écoulement moyen</b>	<b>28</b>
3.2.1	Vélocimétrie par image de particules (basse fréquence)	28
3.2.2	Pression pariétale stationnaire	35
<b>3.3</b>	<b>Fluctuations</b>	<b>36</b>
3.3.1	Vélocimétrie par image de particules (basse fréquence)	36
3.3.2	Pression instationnaire	39
3.3.3	Mesures fil chaud	42
3.3.4	Vélocimétrie par image de particules (haute fréquence)	43
<b>3.4</b>	<b>Influence de la géométrie</b>	<b>46</b>
<b>3.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>48</b>

---

### 3.1 Introduction

L'écoulement de contournement de montant de baie est un écoulement particulièrement complexe. Il réunit les problématiques d'un écoulement tourbillonnaire, tridimensionnel, instationnaire pour la partie aérodynamique ; viennent s'ajouter à cela les questions d'interaction fluide-structure lorsque l'on considère la mise en vibration de la vitre latérale. Il existe plusieurs approches pour étudier un tel problème. Nous avons privilégié l'approche expérimentale, étudiant le plus de paramètres possible tout en fixant le maximum de degrés de liberté. Pour cela, l'intégralité de l'étude a été faite à angle de dérapage nul, à vitesse constante identique (8 m/s, sauf indiqué contrairement) et dans la même installation.

Enfin, notons que les dimensions apparaissant sur les schémas sont données en millimètres, sauf mentionné contrairement, pour être en accord avec les nomenclatures utilisées dans l'industrie.

## 3.2 Écoulement moyen

### 3.2.1 Vélocimétrie par image de particules (basse fréquence)

A partir des visualisations par fumigène (figure 2.3) la forme de la structure tourbillonnaire de montant de baie a été identifiée. Afin de mieux comprendre la topologie de l'écoulement nous avons besoin d'informations spatiales plus détaillées. Pour cela, la PIV est l'outil le plus abouti. Les installations utilisées et les caractéristiques techniques du matériel utilisé pour obtenir les résultats présentés par la suite sont décrites dans le paragraphe 2.3.2.

Dans un premier temps, nous allons nous concentrer sur les résultats obtenus à partir de la *configuration 1*. Bien que la PIV mise en place soit bidimensionnelle, ayant fait plusieurs coupes du phénomène le long de l'arête de la maquette, il nous est possible d'obtenir des informations sur l'évolution spatiale du tourbillon de montant de baie. L'étude des champs de divergence permet de valider l'approximation d'écoulement bidimensionnel dans les plans de coupe (figure 3.1). En effet, en incompressible, la divergence est exprimée par :

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

Nous pouvons donc, à partir de nos données PIV bidimensionnelles  $(u,v)$ , avoir accès aux variations de vitesse dans la troisième direction :  $\frac{\partial w}{\partial z}$ . La figure 3.1 présente ce champ moyenné en temps dans deux plans de coupe. Ces deux champs moyens présentent des variations spatiales non significatives relevant des bruits de mesure. La répartition spatiale de  $\frac{\partial w}{\partial z}$  est trop aléatoires pour correspondre à la projection dans le plan  $(x,y)$  d'une structure tourbillonnaire cohérente. On en conclut que  $\frac{\partial w}{\partial z}$  est négligable : on a donc localement un écoulement approximativement bidimensionnel.

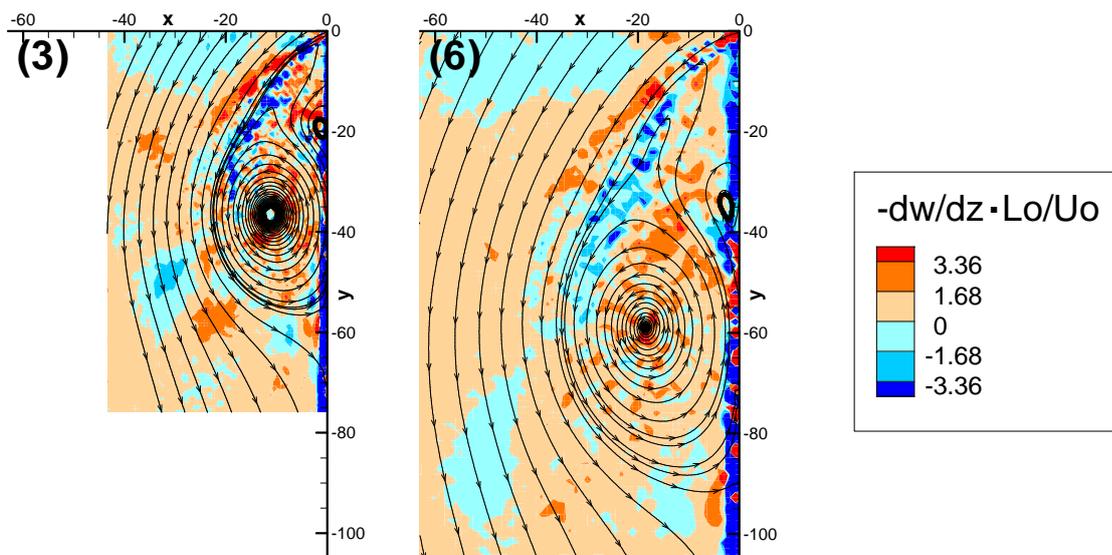


FIGURE 3.1 – Champs de la divergence adimensionalisé pour les plans (3) et (6). L'intégralité des coupes est représentée sur la figure D.6 en annexe.

La représentation du champ du module de la vitesse normalisée par  $U_0$ , la vitesse amont, associée aux lignes de courant permet d'avoir un bon aperçu de la topologie et de la dynamique interne du tourbillon de montant (figure 3.2).

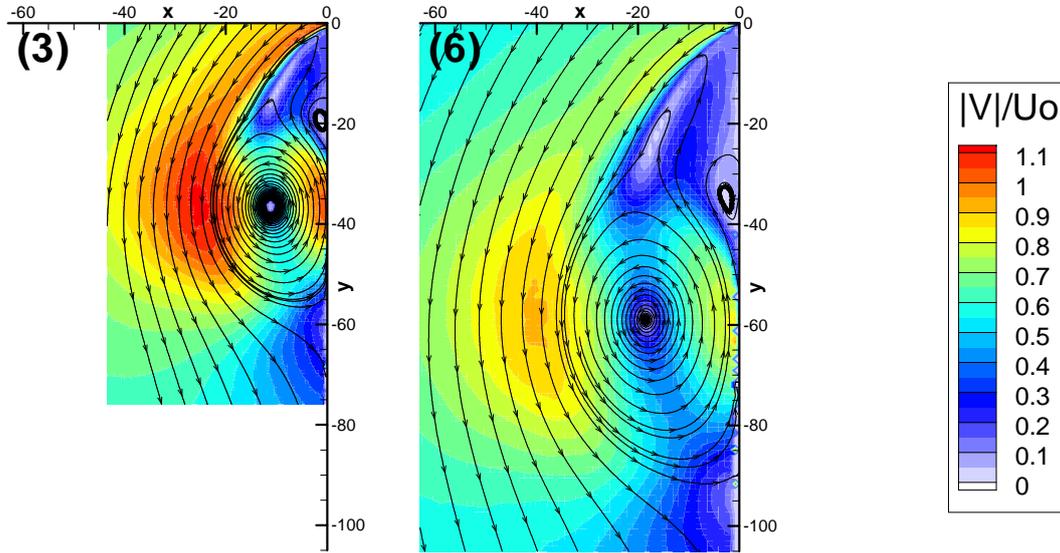


FIGURE 3.2 – Champs du module de la vitesse normalisée par  $U_0$  pour les plans (3) et (6). L'intégralité des coupes est représenté sur la figure D.2.

Soit  $\varepsilon$  le rapport d'aspect :

$$\varepsilon = \frac{a}{b} \quad (3.2)$$

où  $a$  représente le grand axe et  $b$  le petit axe. On s'aperçoit que le grand axe et le petit axe croissent linéairement (figure 3.3a) et que le rapport d'aspect tend vers 1 (figure 3.3b). Cela signifie que la structure tourbillonnaire principale devient circulaire. Si on calcule le rapport d'aspect pour l'enveloppe du phénomène, définie sur la figure D.2 à l'aide de la ligne de courant allant du coin de la maquette au point de recollement, on s'aperçoit que l'enveloppe du phénomène est très fortement ellipsoïde :  $\varepsilon \in [1.7 - 2.8]$ . La tendance est inversée par rapport à la structure tourbillonnaire principale.

A partir des lignes de courant, on retrouve bien le point de recollement (figure 3.3) mainte fois observé lors des simulations numériques dans les études précédentes [Ono *et al.* (1999), Uchida & Okumura (1999), Gaylard (2007)], ainsi que le point de décollement pas toujours présent dans les simulations numériques. A partir du module de la vitesse normalisée, on voit que l'écoulement de contournement est fortement accéléré sur le premier tiers de la maquette (figure 3.4) : jusqu'à +20% et cela bien que le plan observé soit incliné à 25° par rapport à l'écoulement non perturbé.

Symétriquement par rapport au centre de la structure tourbillonnaire, on observe une deuxième zone de forte accélération en proche paroi. Au fur et à mesure que l'écoulement se développe, la vitesse de contournement diminue pour atteindre au niveau du plan 8 une vitesse inférieure de 18% à la vitesse amont (figure 3.4). Enfin, on observe une zone de très faible vitesse, présente sur toutes les coupes, située entre le point de décollement et l'arête de la maquette. Cette zone semble contenir une, voir deux autres structures

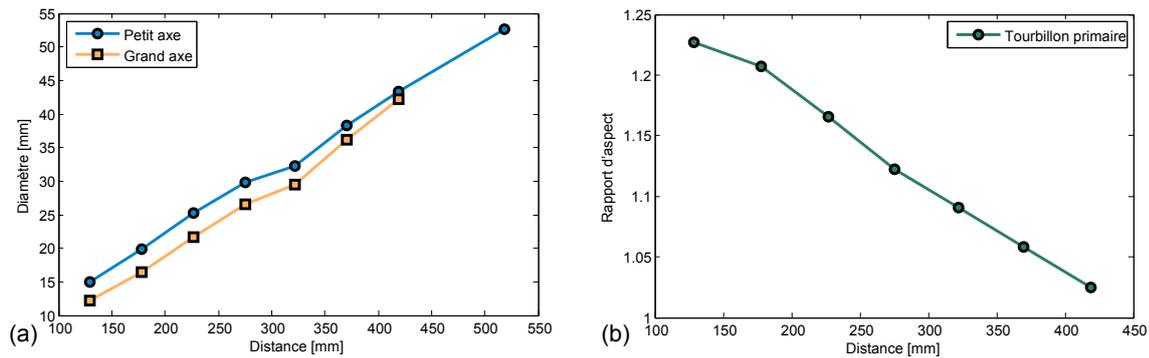


FIGURE 3.3 – (a) Evolution du petit axe et du grand axe, en mm, de la structure tourbillonnaire principale. (b) Rapport d'aspect de la structure tourbillonnaire principale.

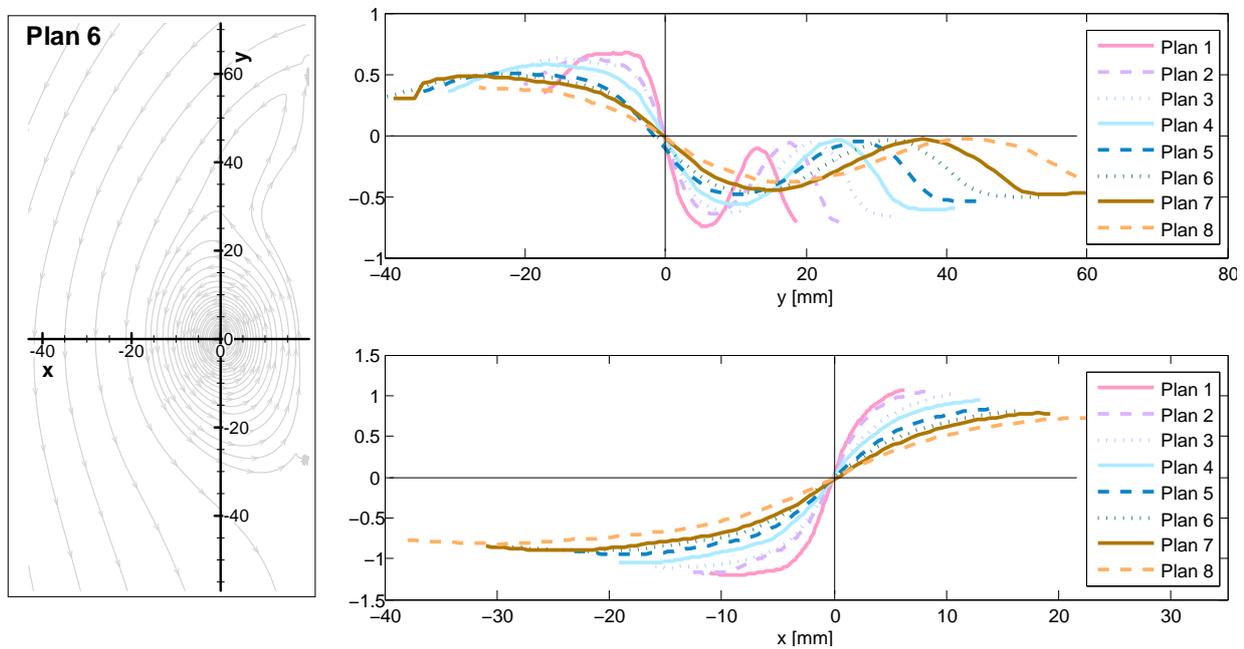


FIGURE 3.4 – Coupes de la vitesse suivant  $x$  et  $y$  normalisée par  $U_0$ , centrée au centre de la structure tourbillonnaire principale défini à l'aide des lignes de courant, pour les plans (1) à (8).

tourbillonnaires, de plus petite taille. Afin de définir plus exactement la physique des structures observées, on peut calculer le critère  $Q$  (figure 3.5).

A partir du critère  $Q$ , on distingue parfaitement la présence de deux structures tourbillonnaires distinctes. Nous les nommerons par la suite *tourbillon primaire* pour la plus grosse des deux, et *tourbillon secondaire* pour la deuxième structure, plus petite, située dans la zone de recirculation. A ce stade de l'étude, nous suggérons aussi la possibilité de l'existence d'une troisième structure tourbillonnaire, présente au niveau de la coupe (1), et située au dessus du tourbillon secondaire. Cette hypothétique troisième structure disparaît par la suite dans la couche de mélange générée par l'écoulement de contournement.

On distingue aussi une première zone de fort cisaillement localisée entre les deux tourbillons et la couche de mélange, ainsi qu'une deuxième zone de cisaillement de plus faible

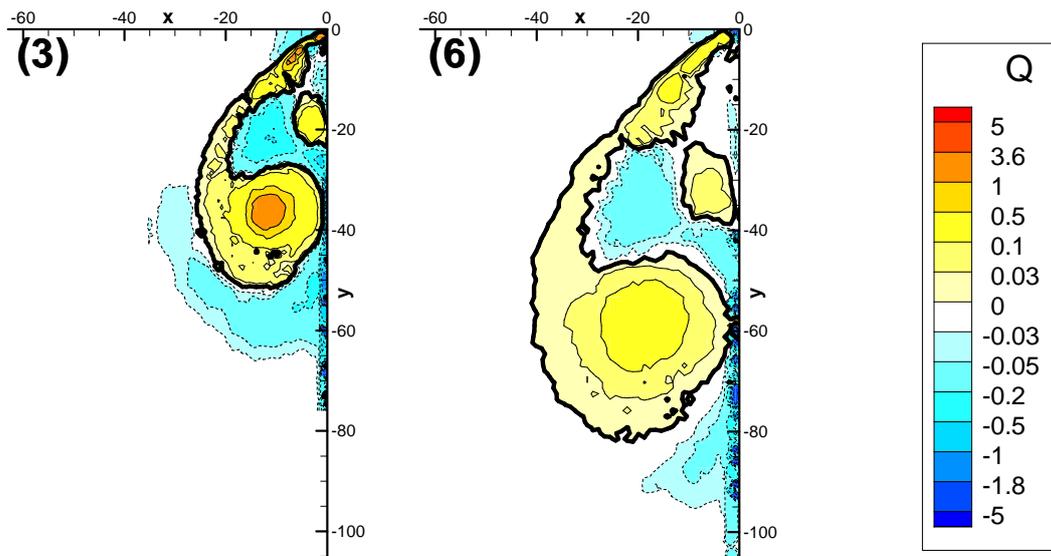


FIGURE 3.5 – Cartographies du critère  $Q$  pour les plans (3) et (6). L'intégralité des coupes est représenté sur la figure D.3 en annexe.

intensité dans la région du point de recollement. Nous définissons pour la suite de l'étude la nomenclature suivante : tourbillon primaire et secondaire, point de décollement primaire et secondaire, point de recollement primaire et secondaire, couche de mélange, séparatrice intérieure et séparatrice extérieure (figure 3.6).

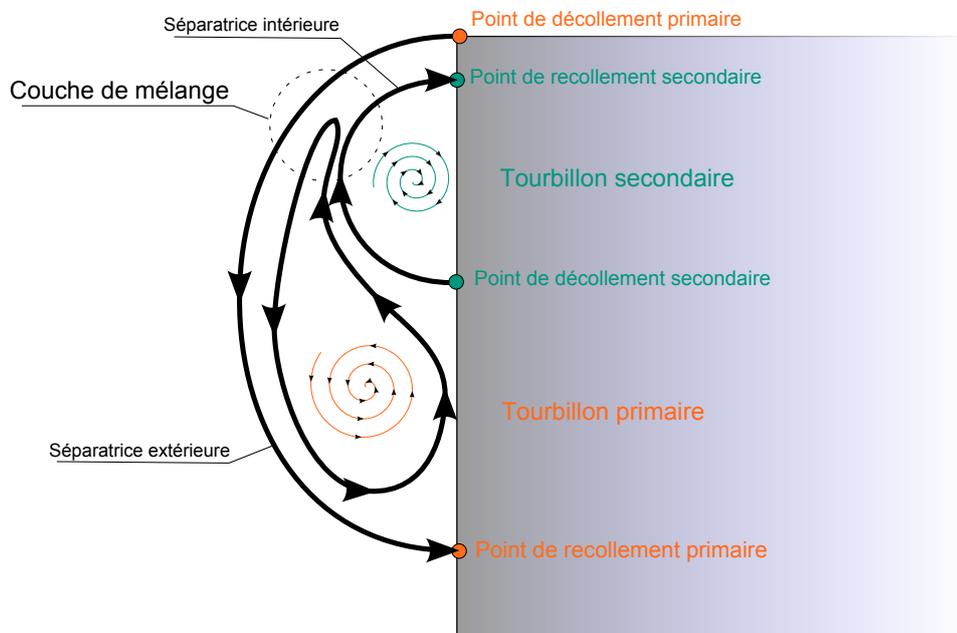


FIGURE 3.6 – Nomenclature de l'écoulement de contournement de montant de baie (vue en coupe).

L'étude des champs de vorticité (figure 3.7, échelle de dimension non constante) permet de renforcer les constatations faites précédemment : il existe bien deux structures tour-

billonnaires distinctes de signe opposé. Nous n'avons pas d'information nous permettant de définir clairement si oui ou non il y a présence d'une troisième structure tourbillonnaire au niveau de la coupe (1) (figure D.3 en annexe).

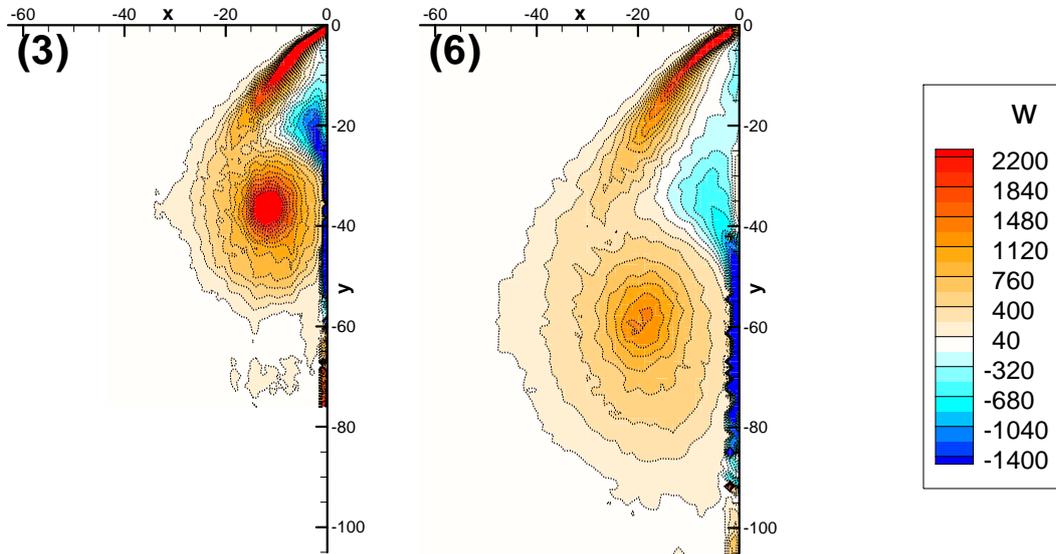


FIGURE 3.7 – Champs de vorticité pour le plan (3) et (6). L'intégralité des coupes est représenté sur la figure D.4.

Avec le développement spatial des structures tourbillonnaires le long de l'arête et la décroissance de leur intensité, on s'aperçoit qu'il y a une diffusion de la vorticité le long du montant de baie. Afin de mieux quantifier cette observation, il faut regarder des coupes suivant  $x$  et  $y$  (figure 3.8) :

- La dissipation au centre du tourbillon est plus importante qu'au niveau de la zone de cisaillement.
- Bien que l'intensité de la vorticité au centre du tourbillon primaire diminue, la circulation  $\Gamma$  dans le tourbillon primaire augmente jusqu'à doubler, où :

$$\Gamma = \int \int \omega dS \quad (3.3)$$

- Le calcul de la circulation a été effectué de la sorte : le critère  $Q = 0$  a été utilisé pour délimiter la zone d'intégration. Toutefois, pour le tourbillon primaire, on obtient ainsi une zone contenant la couche de mélange (figure 3.5). Un premier calcul a ainsi été fait, surévaluant la circulation (en trait plein sur la figure 3.8). Un deuxième calcul a été effectué en soustrayant la circulation de la couche mélange. Cependant, la limite entre ces deux zones étant définie de façon approximative, il est possible qu'une petite partie du tourbillon primaire ait été incluse dans la couche de mélange. C'est pourquoi ce deuxième calcul tend à légèrement sous-évaluer la circulation du tourbillon primaire (en pointillé sur la figure 3.8).

L'intensité de la vorticité au centre du tourbillon secondaire diminue avec le développement du phénomène. Cependant, la circulation du tourbillon secondaire reste constante de la coupe (2) à la coupe (8) (figure 3.9a). Il y a donc majoritairement

de la réorganisation dans la répartition de la vorticit      l'int  rieur de la structure.

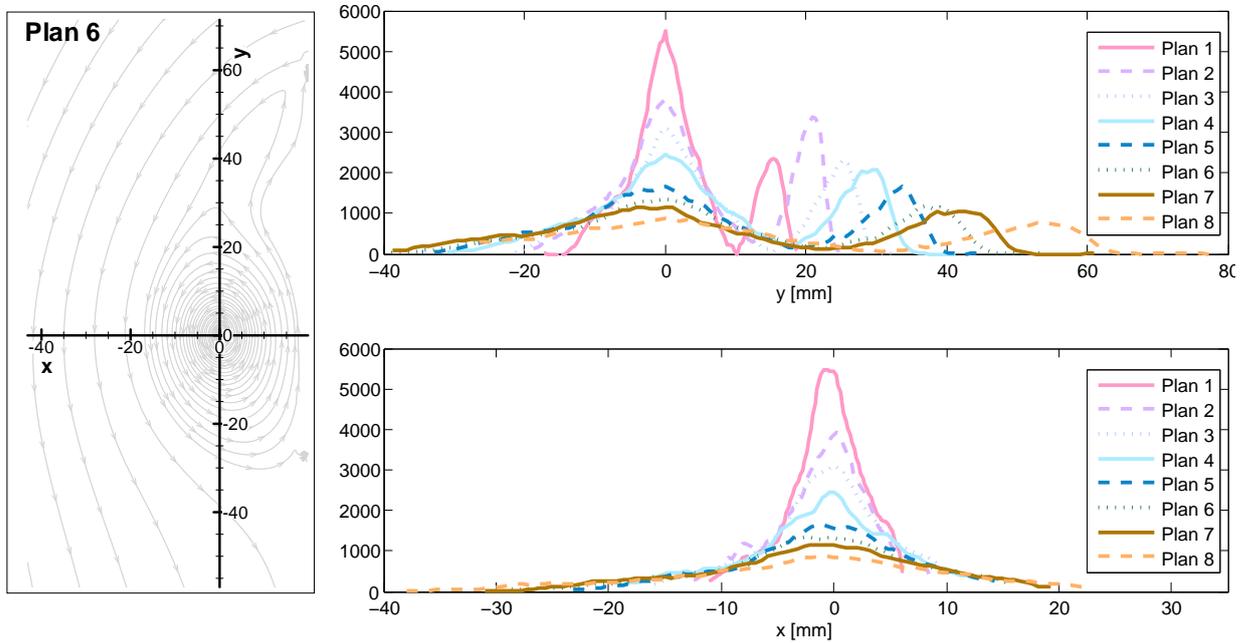


FIGURE 3.8 – Coupes de la vorticit   suivant  $x$  et  $y$ , centr  e au centre du tourbillon primaire, pour les plans (1)    (8).

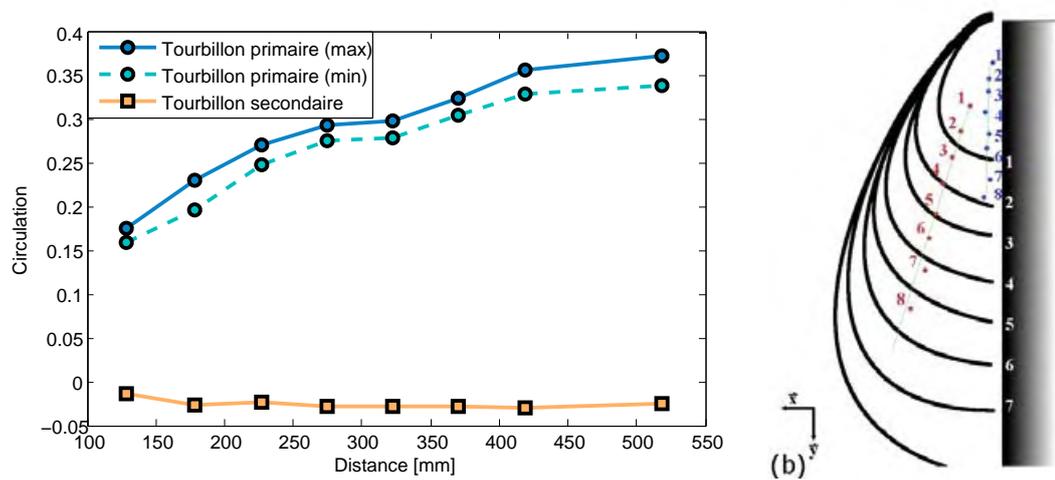


FIGURE 3.9 – (a) Circulation du tourbillon primaire, issue de deux m  thodes de calcul diff  rentes, et du tourbillon secondaire pour les coupes (1)    (8). (b) Evolution de la taille de la s  paratrice ext  rieure suivant les plans 1    8. Suivi spatial du centre du tourbillon primaire (rond rouge) et du tourbillon secondaire (rond bleu).

A partir de ces informations, il nous est possible de suivre l'  volution de la position moyenne des structures tourbillonnaires dans les plans  $(x,y)$  le long du montant de baie ainsi que l'  volution de la g  om  trie de l'  coulement de contournement (figure 3.9b). Il y a trois constatations importantes    faire : premi  rement le ph  nom  ne cro  t de fa  on

linéaire ; deuxièmement, le centre moyenné du tourbillon primaire s'éloigne de façon linéaire de la paroi ; troisièmement, le centre moyenné du tourbillon secondaire évolue de façon quasi-parallèlement à la paroi [Levy *et al.* (2008b)].

A partir des plans PIV effectués dans le plan parallèle à la paroi avec la *configuration 2* (paragraphe 2.3.2), il est possible d'avoir accès à des informations supplémentaires sur la topologie de l'écoulement. La cartographie du champ du module de vitesse normalisé par  $U_0$  (figure 3.10) permet de mettre en évidence une très forte accélération de l'écoulement (jusqu'à +50%). Cela permet aussi de mettre en évidence la forme conique du phénomène ainsi que l'angle de l'axe de la structure à  $25^\circ$ .

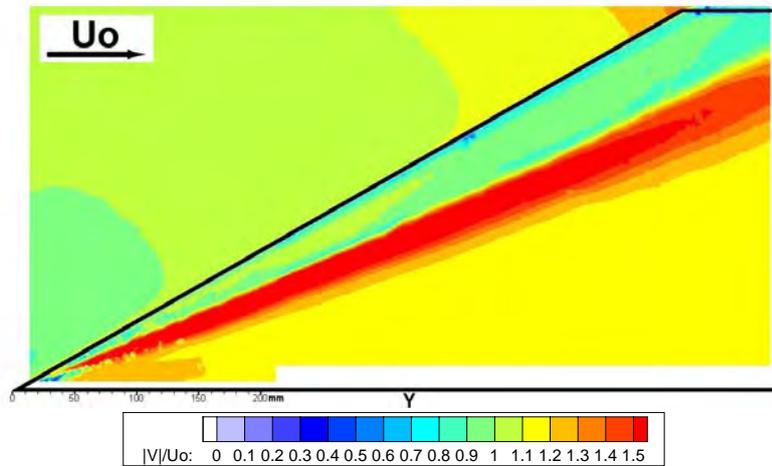


FIGURE 3.10 – Champs du module de la vitesse normalisée par  $U_0$  en proche paroi obtenue à partir de la *configuration 2* (plan A).

Le plan B passe par le centre du tourbillon primaire au niveau du plan 1. Il est donc possible d'avoir accès au nombre de swirl. Les expérimentations effectuées sur des jets tournants mettent en évidence l'influence du nombre de swirl dans l'éclatement tourbillonnaire [Billant *et al.* (1998)]. Ce paramètre, classiquement défini à partir du rapport entre les vitesses locales azimutale  $U_\theta$  et axial  $U_z$  est donné par :

$$S = \frac{U_{\theta_{max}}}{U_{z_{max}}} \quad (3.4)$$

Pour des structures tourbillonnaires non confinées l'éclatement tourbillonnaire peut être observé pour des valeurs de  $S$  supérieures à environ  $\sqrt{2}$  [Billant *et al.* (1998)]. Au niveau du plan 1, le tourbillon primaire a un swirl de  $S_1 = 0.97$ . Nous ne sommes donc pas, a priori, en présence d'un tourbillon susceptible d'éclater de lui-même.

Le même calcul peut être mené au niveau du plan 7, bien que dans ce cas nous ne coupons pas exactement le tourbillon primaire en son centre. Nous pouvons tout de même définir un swirl maximum  $S_7 \leq 0.85$ . A partir de ce second résultat, nous pouvons conclure sur la robustesse naturelle du tourbillon de montant de baie.

La représentation des lignes de courant en proche paroi (plan A), permet de mettre en évidence que le point de recollement primaire forme une ligne de recollement. Il en va de même pour le point de décollement secondaire. Ces résultats sont en parfait accord avec les études précédentes menées sur le sujet [Haruna *et al.* (1990), Gaylard (2007)].

Lorsque l'on s'éloigne de la paroi (plan B), la zone de recirculation contenant le tourbillon secondaire n'est plus visible (figure 3.11).

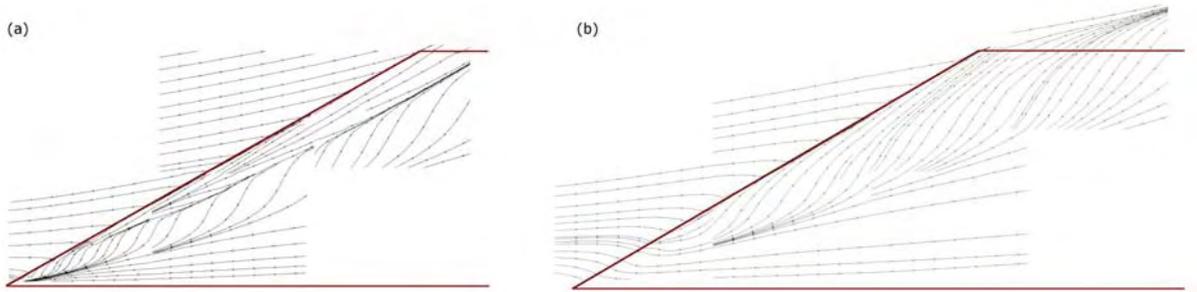


FIGURE 3.11 – Lignes de courant (a) plan A et (b) plan B.

### 3.2.2 Pression pariétale stationnaire

Soit le nombre de Reynolds (expression 3.5) défini par la vitesse amont  $U_0$ , la racine carrée de la section apparente  $L_0$  et la viscosité cinématique de l'air  $\nu_{air}$  :

$$Re = \frac{U_0 L_0}{\nu_{air}} \quad (3.5)$$

il nous est possible de le faire évoluer jusqu'à  $5.4 \cdot 10^5$  en faisant varier la vitesse de fonctionnement de la soufflerie. Toutefois, cela reste un ordre de grandeur inférieur au nombre de Reynolds typique d'un vrai véhicule. Cependant, l'étude reste légitime étant dans le cas d'un écoulement incompressible à très faible nombre de Mach.

Dans un premier temps, nous avons donc cherché à définir la vitesse minimale à partir de laquelle le phénomène était parfaitement développé et invariant. Pour cela, nous avons mesuré le coefficient de pression à la paroi  $C_p$  :

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \quad (3.6)$$

Lorsque le phénomène est établi, celui-ci doit être invariant avec les variations de vitesse. A partir de l'installation décrite dans le paragraphe 2.3.4 nous avons obtenu la cartographie du coefficient de pression à la paroi pour quatre vitesses distinctes : 5 m/s, 8 m/s, 10 m/s et 15 m/s (figure 3.12).

On observe une cartographie similaire dans les quatre cas d'étude. Toutefois, le coefficient de pression à la paroi devient invariant seulement à partir de 8 m/s (figure 3.13). Pour cette raison, toutes les études seront faites par la suite avec une vitesse amont  $U_0$  de 8 m/s. Le nombre de Reynolds pour notre étude est de  $Re = 1.7 \cdot 10^5$ .

Lorsque l'on étudie la cartographie du  $C_p$ , on s'aperçoit que : l'écoulement de montant de baie provoque une évolution de la pression uniquement sur la partie haute de la "vitre" ; que les minima de pression moyenne se trouvent proches de la pointe de la maquette ; que le phénomène ne semble pas se développer de façon tout à fait parallèle à la maquette mais avec un angle légèrement inférieur, soit approximativement  $25^\circ$ .

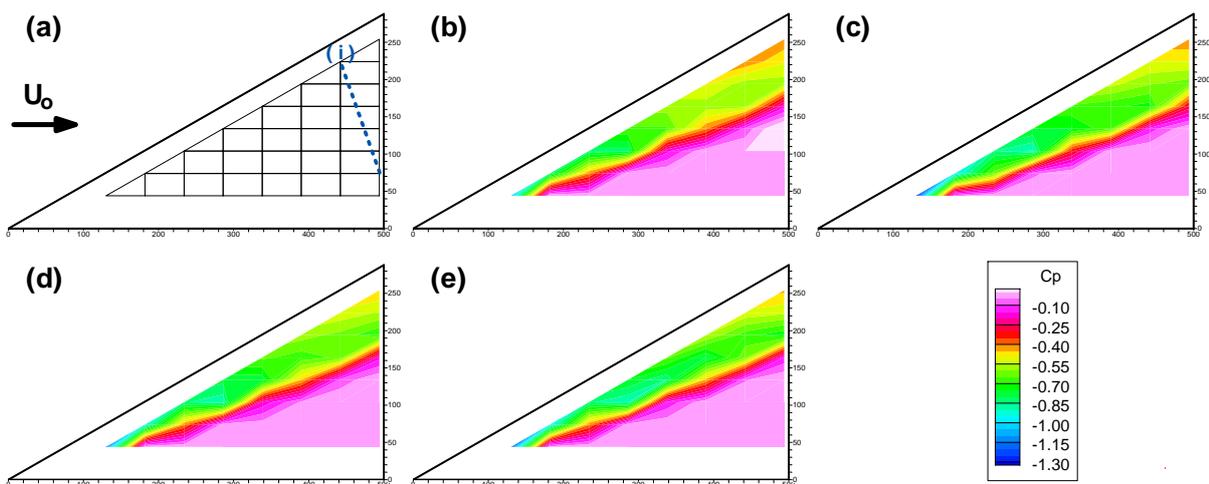


FIGURE 3.12 – (a) Maillage utilisé pour l'interpolation à partir des mesures effectuées en chaque nœud.  $C_p$  à la paroi pour quatre vitesses  $U_0$  différentes : (b) 5 m/s, (c) 8 m/s, (d) 10 m/s et (e) 15 m/s.

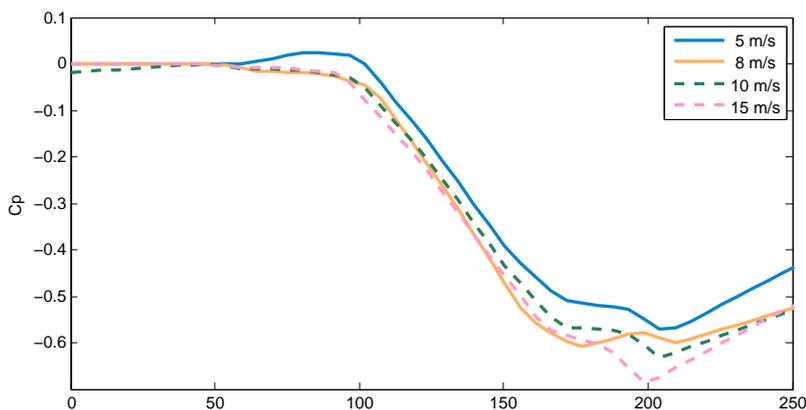


FIGURE 3.13 –  $C_p$  à la paroi pour quatre vitesses  $U_0$  différentes : (b) 5 m/s, (c) 8 m/s, (d) 10 m/s et (e) 15 m/s, le long de l'axe (i) défini sur la figure 3.2(a) et coupant perpendiculairement la structure tourbillonnaire.

### 3.3 Fluctuations

#### 3.3.1 Vélocimétrie par image de particules (basse fréquence)

La topologie moyenne de l'écoulement étant plus clairement définie, il faut maintenant s'intéresser à la dynamique de l'écoulement permettant de générer de fortes fluctuations de pression à la paroi, et donc d'exciter la vitre d'un véhicule automobile. L'énergie cinétique des fluctuations,  $E'_C$ , permet d'obtenir un bon aperçu des régions soumises à d'importantes instationnarités (figure 3.14, échelle de dimension non constante).

On identifie trois zones de très forte énergie cinétique des fluctuations :

1. le centre du tourbillon primaire. Cela signifie que celui-ci se déplace fortement autour de sa position moyenne ;

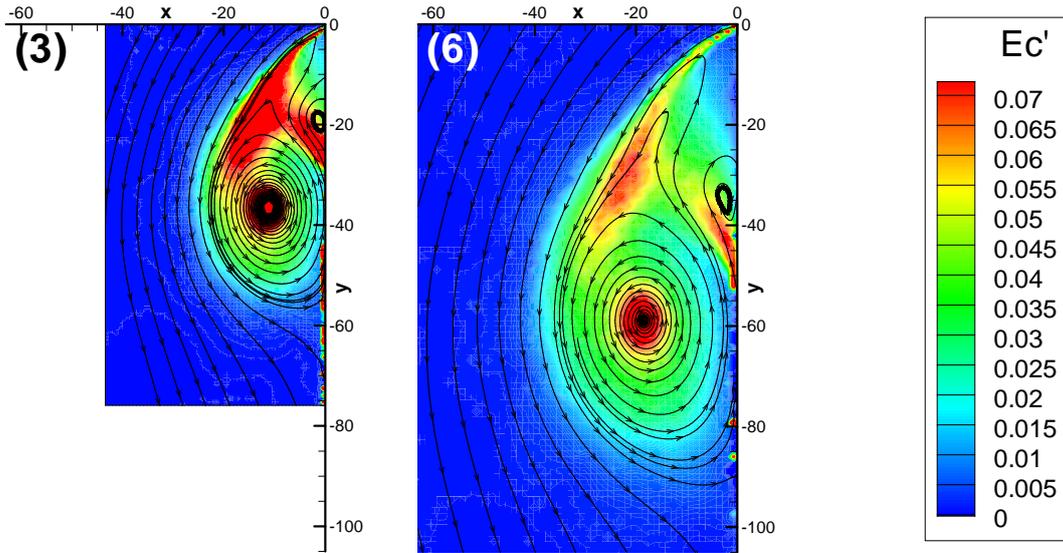


FIGURE 3.14 – Champs de l'énergie cinétique des fluctuations pour les plans (3) et (6). L'intégralité des coupes est représentée sur la figure D.5 en annexe.

2. la couche de mélange ;
3. le point de décollement secondaire, situé entre le tourbillon primaire et le tourbillon secondaire.

C'est ce troisième point qui attire tout particulièrement notre attention car il se trouve à proximité de la paroi. La zone de décollement est donc bien plus susceptible d'exciter la vitre d'un véhicule que n'importe quel autre élément de l'écoulement de contournement de montant de baie.

Comme précédemment avec la vorticité, il est possible de mieux quantifier ces observations en regardant des coupes suivant  $x$  et  $y$  (figure 3.15). Bien que  $E'_C$  au centre du tourbillon primaire décroisse, l'énergie cinétique totale des fluctuations dans le tourbillon primaire augmente tout au long du développement du tourbillon de montant de baie (figure 3.16). Le calcul a été effectué à partir du demi volume de l' llipso de : petit axe, grand axe,  $2 E'_{C_{max}}$ . Au niveau de la "vitre" de la maquette, la structure tourbillonnaire de montant de baie emmagasine donc plus d'énergie qu'elle n'en dissipe.

De même, lorsque l'on regarde l'évolution du maximum de l'énergie cinétique des fluctuations dans la couche de mélange et au niveau du point de décollement secondaire, on s'aperçoit que celle-ci décroit (figure 3.16). Notons qu'à ces trois emplacements distincts, le taux de décroissance est relativement identique.

Afin de mieux comprendre la topologie moyenne tridimensionnelle du phénomène nous avons effectué des plans PIV parallèles à la paroi de la maquette (*configuration 2* décrite dans le paragraphe 2.3.2). De plus cela permet d'identifier le rôle de chaque élément de l'écoulement de montant de baie sur les fluctuations d'énergie cinétique en proche paroi. Lorsque l'on regarde le plan A (figure 3.17), on identifie clairement une zone de très haute énergie cinétique de fluctuation (en rouge). Elle suit une zone rectiligne inclinée à  $24^\circ$  allant de la pointe de la maquette jusqu'au toit. De plus, cette zone délimite relativement bien deux régions : (1) une région de fluctuation, comprise entre l'arête de la maquette et la droite et (2) une région dans laquelle les fluctuations sont extrêmement faibles voir

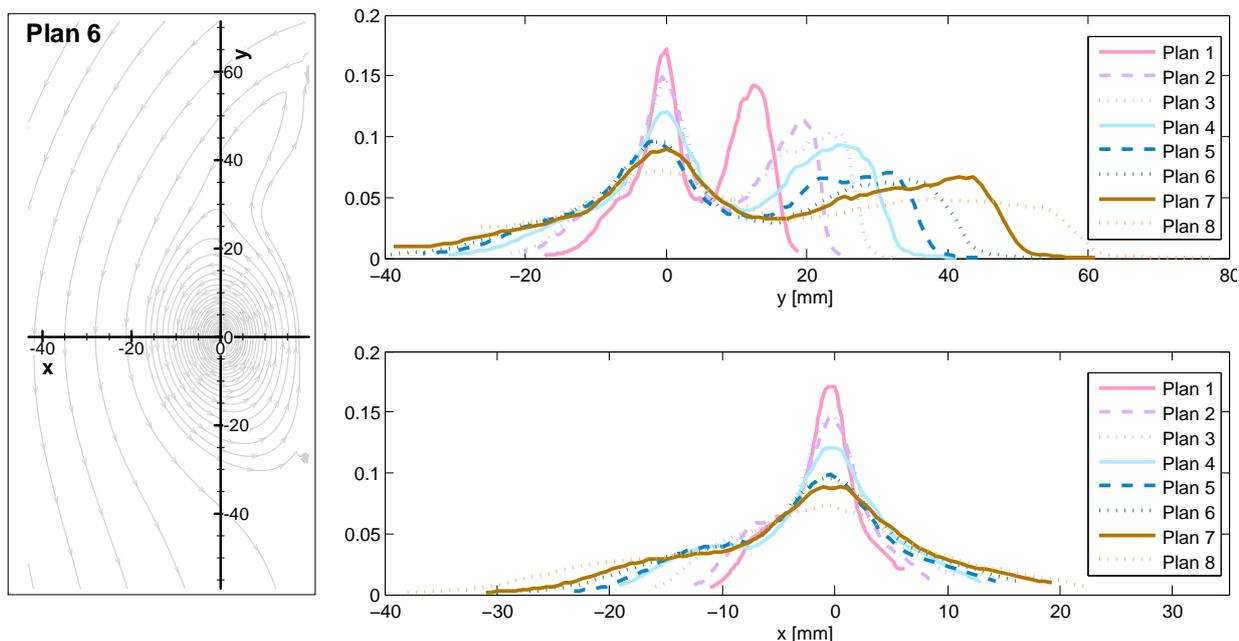


FIGURE 3.15 – Coupes de l'énergie cinétique des fluctuations suivant  $x$  et  $y$ , centré au centre du tourbillon primaire, pour les plans (1) à (8).

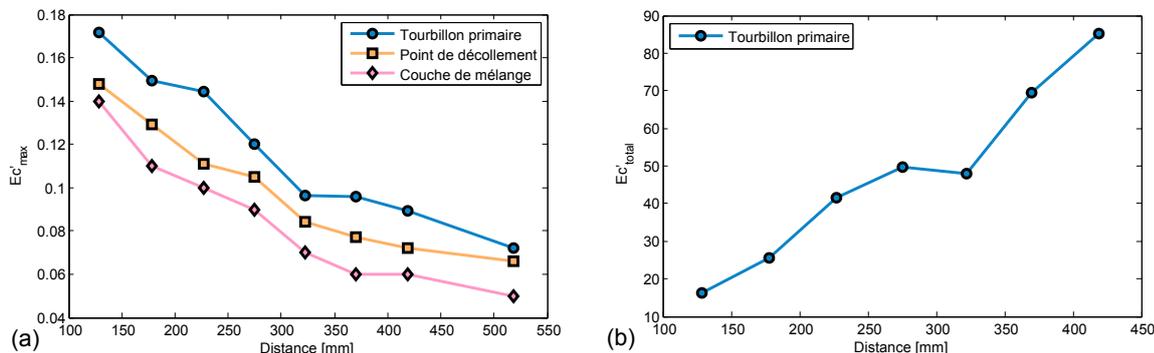


FIGURE 3.16 – (a) Evolution de la valeur maximale de l'énergie cinétique des fluctuations au centre du tourbillon primaire, au point de décollement secondaire et dans la couche de mélange, pour les plans (1) à (8). (b) Evolution de l'énergie cinétique totale des fluctuations dans le tourbillon primaire.

négligeables comprise entre la droite et le bas de la maquette. Lorsque l'on s'éloigne de la paroi, on a alors deux bandes d'énergie cinétique élevée, plus large que la bande observée sur le plan A. La première est inclinée à  $25^\circ$ , la seconde à  $20^\circ$ . Lorsque l'on s'éloigne encore plus de la paroi au niveau du plan C, l'énergie cinétique des fluctuations est non négligable uniquement sur la partie aval de la "vitre".

Le fait de reporter ces mêmes plans sur les plans 1, 4 et 7 permet d'identifier l'appartenance des traces de haute énergie cinétique des fluctuations (figure 3.17) : en très proche paroi (plan A), la bande de forte énergie cinétique est due au point de décollement, que nous appellerons dorénavant *ligne de décollement* ; lorsque l'on s'éloigne de la paroi, la double signature que l'on observe est due pour l'une au centre du tourbillon primaire et

pour l'autre à la zone de cisaillement.

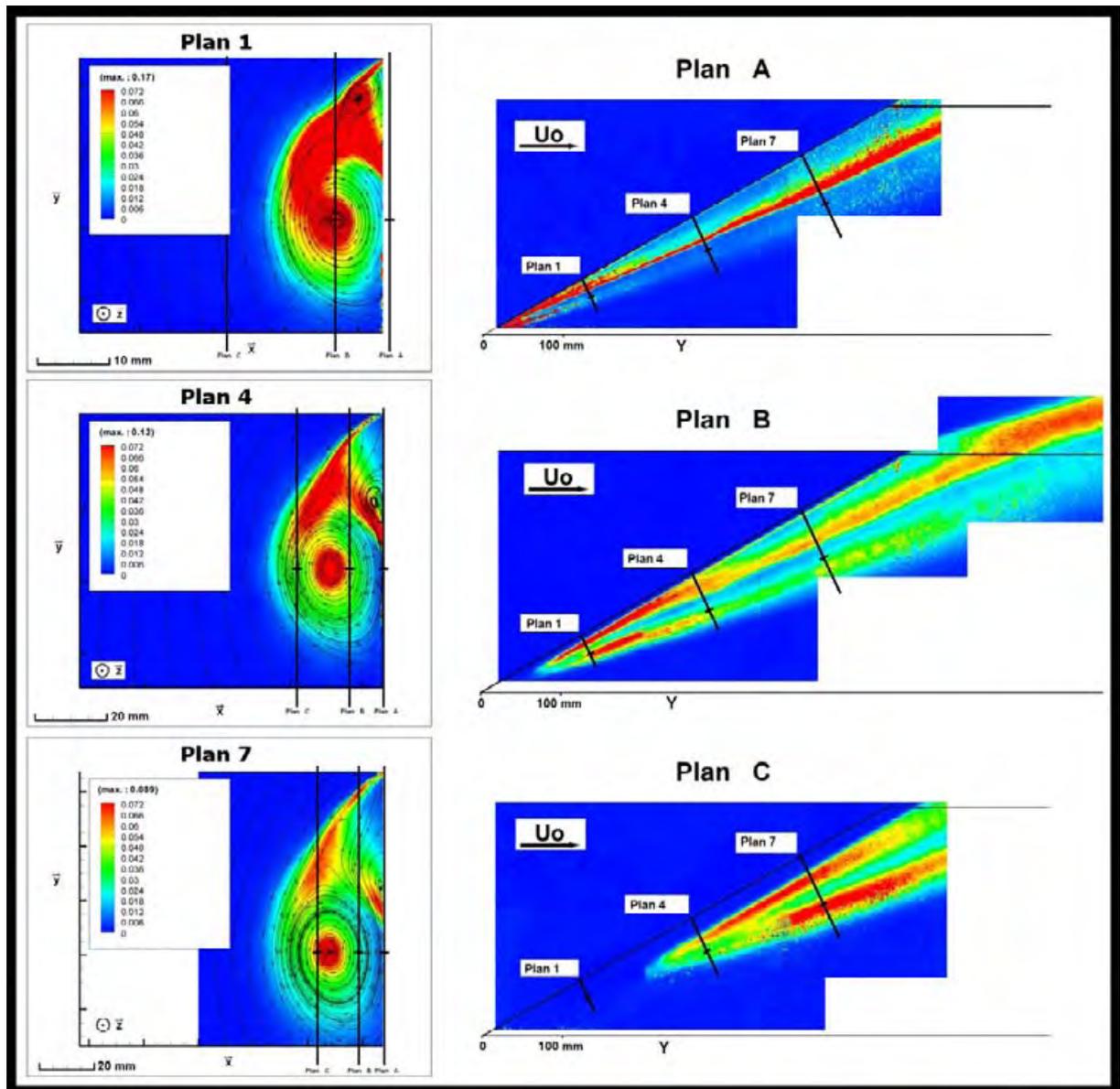


FIGURE 3.17 – Champs de l'énergie cinétique des fluctuations pour les plans 1, 4 et 7, ainsi que pour les plans A, B et, respectivement à 2 mm, 12 mm et 25 mm de la paroi. Les plans 1, 4 et 7 sont reportés sur les plans A, B et C par un trait noir, la croix marquant l'emplacement de la projection du centre du tourbillon primaire. Les plans 1, 4 et 7 sont reportés sur les plans A, B et C par un trait noir [Levy *et al.* (2007)].

### 3.3.2 Pression instationnaire

L'écoulement de contournement de montant de baie est un phénomène instationnaire. Il est donc nécessaire de procéder à des mesures de pression instationnaire afin d'obtenir plus d'informations sur la dynamique de l'écoulement. Pour cela nous avons utilisé l'installation décrite dans le paragraphe 2.3.4. Les mesures ayant été faites en série et non

en parallèle, il n'est pas possible de procéder à des corrélations spatiales. Nous pouvons toutefois faire une cartographie de la pression RMS (Root Mean Square, figure 3.18) ou encore étudier localement les spectres en fréquence où :

$$P_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2} \quad (3.7)$$

La cartographie de  $P_{RMS}$  à la paroi appuie les constatations faites précédemment : la structure tourbillonnaire de montant de baie interagit majoritairement avec la partie supérieure de la "vitre" et la pointe de la maquette est soumise aux plus fortes fluctuations de pression. On note aussi une zone de très fortes fluctuations au centre de la trace. L'interpolation génère une discontinuité due au maillage trop lâche dans cette région. Cependant on aperçoit que ces zones de fortes fluctuations s'alignent le long d'une droite ayant un angle de  $25^\circ$  par rapport à l'horizontale. On remarque qu'en comparaison, la zone de recollement présente des niveaux de  $P_{RMS}$  quatre fois plus faibles.

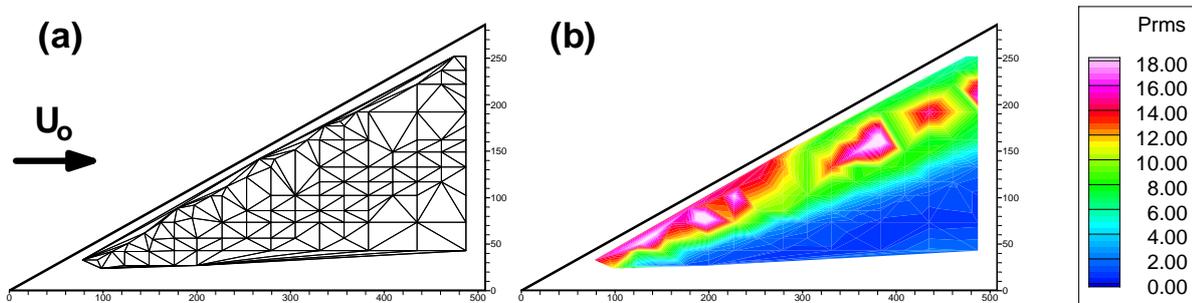


FIGURE 3.18 – (a) Maillage utilisé pour l'interpolation à partir des mesures effectuées en chaque nœud; (b) cartographie de  $P_{RMS}$  à la paroi.

L'analyse en transformée de Fourier des signaux enregistrés en différents points de la vitre permet de faire ressortir quelques fréquences spécifiques propres à l'emplacement de la mesure (figure 3.19). On trouve ainsi une très basse fréquence (environ 3 Hz) de faible intensité récurrente dans chaque spectre, même si parfois son intensité est d'un ordre de grandeur inférieur à la fréquence prédominante. D'une façon générale, le spectre est cantonné à une bande basse fréquence située entre 0 Hz et 3000 Hz.

Une analyse plus détaillée de chaque spectre est proposée ci-après. Toutefois, notons que la majorité des fréquences observées n'est pas clairement démarquée et les chiffres avancés par la suite sont donc des ordres de grandeur. De plus, nous avons pu vérifier que les fréquences caractéristiques clairement définies de 8 Hz, 299 Hz et 1500 Hz sont des fréquences parasites propres à la chaîne d'acquisition et non à l'écoulement.

- Mesure 01 : l'intensité du signal est relativement faible comparée aux autres mesures (d'un facteur cinq); on observe quatre bandes de fréquences autour de 3 Hz, 10 Hz, 45 Hz et 450 Hz.
- Mesure 12 : en se rapprochant de l'arête de la maquette, on observe une forte augmentation de l'intensité du signal; on enregistre une bande de fréquences énergétiques entre 20 Hz et 200 Hz.
- Mesure 36 : cette mesure se trouve au niveau de la zone de recollement de l'écoulement de contournement de montant de baie; l'intensité des fluctuations y est

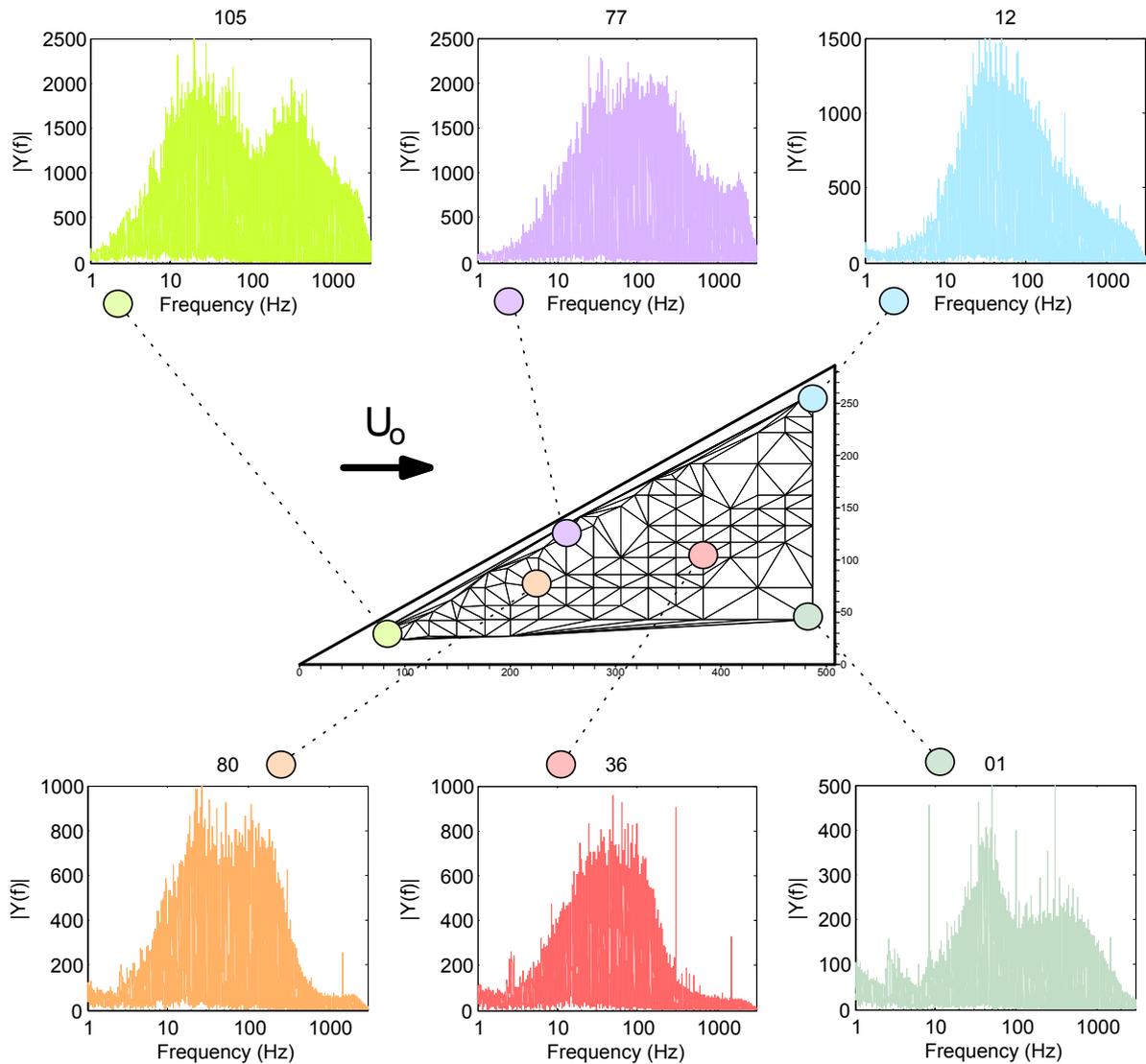


FIGURE 3.19 – Transformée de Fourier en six emplacements différents.

relativement faible (un facteur 2.5 comparé aux mesures de fortes intensités), on enregistre deux bandes : autour de 3 Hz et 50 Hz.

- Mesure 77 : le noeud 77 correspond à une zone de très fortes fluctuations de pression ; on y enregistre quatre plages de fréquences distinctes autour de : 3 Hz, 30 Hz, 100 Hz et 2000 Hz.
- Mesure 80 : bien que relativement en amont de l'écoulement, l'intensité des fluctuations est deux fois moins importante que pour la mesure précédente ; toutefois les bandes de fréquences observées sont du même ordre : approximativement 3 Hz, 20 Hz et 100 Hz.
- Mesure 105 : c'est la mesure la plus en amont de l'écoulement ; on y observe le spectre le plus large de toutes les mesures ; bien que très bruité, il semblerait qu'il y ait au moins six bandes de fréquences prédominantes autour de : 3 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 50 Hz, 400 Hz et 2000 Hz.

Les fréquences générées par le tourbillon de montant de baie sont de très basse fréquence, majoritairement entre 2 Hz et 100 Hz. Sont relativement récurrentes les fréquences de l'ordre de 20 Hz et de 50 Hz ce qui correspondrait à des nombres de Strouhal ( $St$ ) d'environ 0.84 à 2.1, avec :

$$St = \frac{fL_0}{U_0} \quad (3.8)$$

Sans mesures de pression instationnaire en parallèle, il reste toutefois difficile de faire des conclusion sur la propagation des ondes de pression.

Pour pouvoir définir exactement la corrélation entre l'énergie cinétique des fluctuations et les fluctuations de pression à la paroi, on peut superposer la cartographie de  $P_{RMS}$  sur la cartographie de d'énergie cinétique des fluctuations en proche paroi au niveau du plan A (figure 3.20).

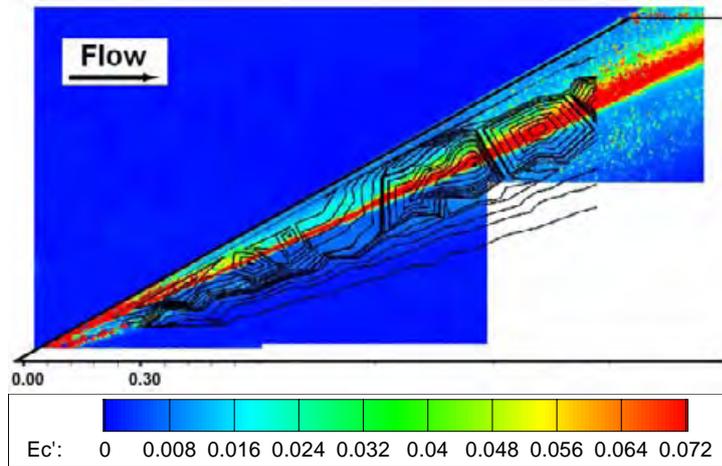


FIGURE 3.20 – Superposition de la cartographie de l'énergie cinétique des fluctuations en proche paroi (plan A) avec les iso-contours de  $P_{RMS}$ .

Nous pouvons conclure de cette analyse que la *ligne de décollement* est bien le phénomène en proche paroi susceptible de fortement exciter la paroi et donc la vitre d'un véhicule automobile ayant une topologie d'écoulement similaire. Lorsque nous superposons le plan A avec la cartographie de  $P_{RMS}$ , on trouve donc que la ligne de décollement est bien responsable des fortes fluctuations de pression à la paroi (figure 3.20).

### 3.3.3 Mesures fil chaud

La PIV basse fréquence ne permet pas d'avoir accès aux informations temporelles or le phénomène étudié semble avoir une dynamique interne relativement complexe. A partir de mesures par fil chaud, il est possible d'avoir accès ponctuellement aux variations de vitesse. Un certain nombre de mesures ont donc été effectuées en proche paroi pour différents plans (figure 3.21) et au centre du tourbillon primaire.

La première constatation que l'on peut faire est qu'à l'intérieur de la structure tourbillonnaire, il ne semble pas y avoir de fréquence prédominante. La deuxième constatation est que le tourbillon primaire semble être animé par des très basses fréquences ( $\leq 200Hz$ ).

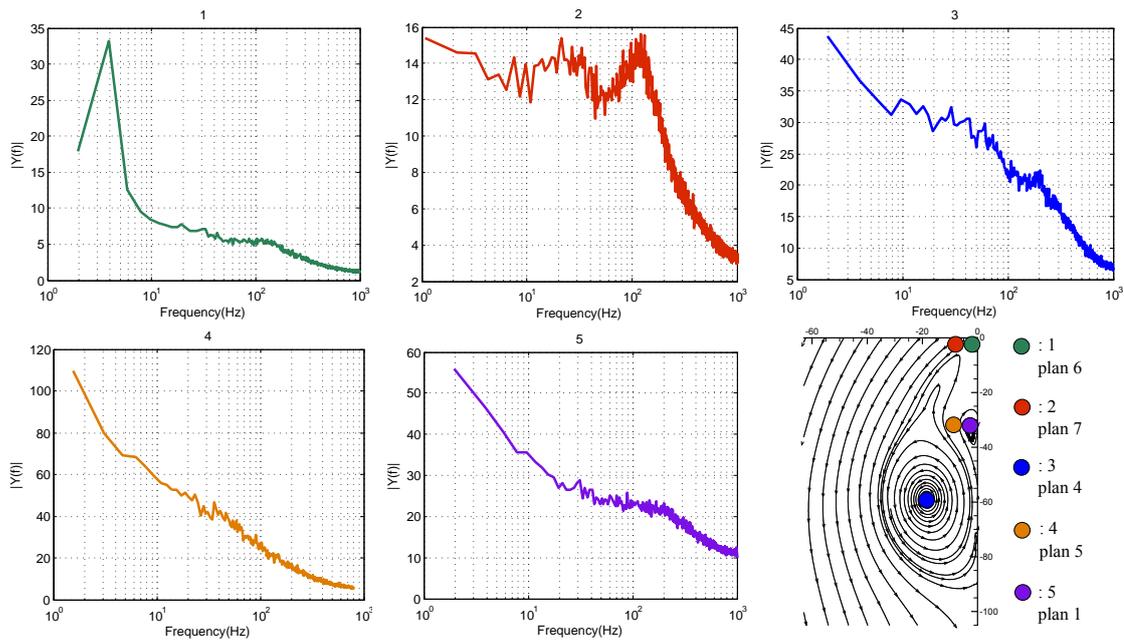


FIGURE 3.21 – Transformé de Fourier des fluctuations de vitesse en différents points de l'écoulement ; chaque mesure étant faites sur un plan différent (mesure 1 dans le plan 6, mesure 2 dans le plan 7, mesure 3 dans le plan 4, mesure 4 dans le plan 5, mesure 5 dans le plan 1, sa position est représentée sur une coupe générique.

La troisième constatation se rapporte aux fluctuations de vitesse mesurées au niveau de l'arête de la maquette. On observe trois fréquences distinctes selon l'emplacement : 121 Hz, 21 Hz et 4 Hz. La dernière fréquence pourrait avoir un lien avec la fréquence de 2.6Hz observée sur les spectres de fluctuation de pression en proche paroi.

### 3.3.4 Vélocimétrie par image de particules (haute fréquence)

Au vu de ces derniers résultats, on comprend que la mise en place de mesures par PIV haute fréquence (*configuration 3* décrite dans le paragraphe 2.3.2) est indispensable dans le but de mieux comprendre les mécanismes qui régissent la dynamique du phénomène. La PIVHF présente toutefois un problème majeur au niveau du post-traitement : la turbulence liée au fonctionnement de la soufflerie et au mouvement chaotique du tourbillon de montant de baie. Un doublet d'image brut donne donc une représentation bruitée du phénomène instantané. Cela a comme conséquence de cacher les structures caractéristiques du phénomène. Or, afin d'étudier la dynamique de l'écoulement de contournement de montant de baie, il est nécessaire de pouvoir identifier clairement le centre du tourbillon primaire ou bien du tourbillon secondaire. Nous avons donc utilisé un filtrage par modes POD (paragraphe 2.4.2). L'avantage d'un tel filtrage est de faire ressortir les structures cohérentes de l'écoulement [Levy *et al.* (2008a)]. On préconise en général de prendre autant de modes POD qu'il est nécessaire pour avoir 99% de l'information. Toutefois, dans le cas notre étude, on s'aperçoit qu'un très fort taux d'information est directement lié à la turbulence sans la moindre cohérence spatiale. Cela se traduit par une croissance quasi linéaire de l'information relative cumulée (figure 3.22). Nous avons choisi de garder uniquement 6 modes, soit 37% de l'information cumulée. Cela peut sembler peu, toutefois l'ajout de

modes POD ne fait qu'ajouter du "bruit" aux cartographies rendant la détermination du centre des structures tourbillonnaires quasiment impossible (figure 2.19). En outre, les variations de position d'un tourbillon sont à priori bien représentées par les tous premiers modes POD, les modes plus élevés correspondant plutôt aux modes de déformations de la structure ou aux fluctuations du reste de l'écoulement.

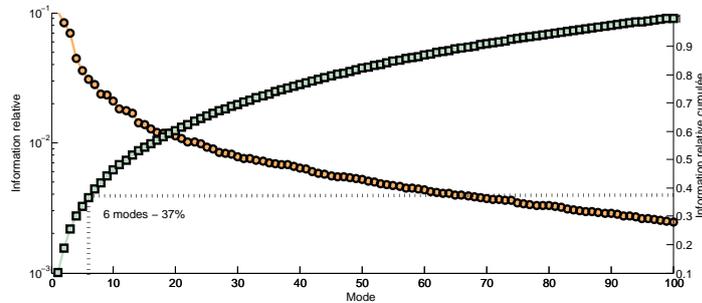


FIGURE 3.22 – Taux de croissance de l'information relative (ronds oranges) et de l'information relative cumulée (carrés verts) en fonction du nombre de modes POD.

La comparaison de cartographie de critère  $Q$  instantané sans filtrage POD et avec filtrage POD 6 modes, et la comparaison de cartographie de la vorticité  $\omega$  instantanée sans filtrage POD et avec filtrage POD 6 modes (figure 3.23) permet de se convaincre de la légitimité de cette troncature.

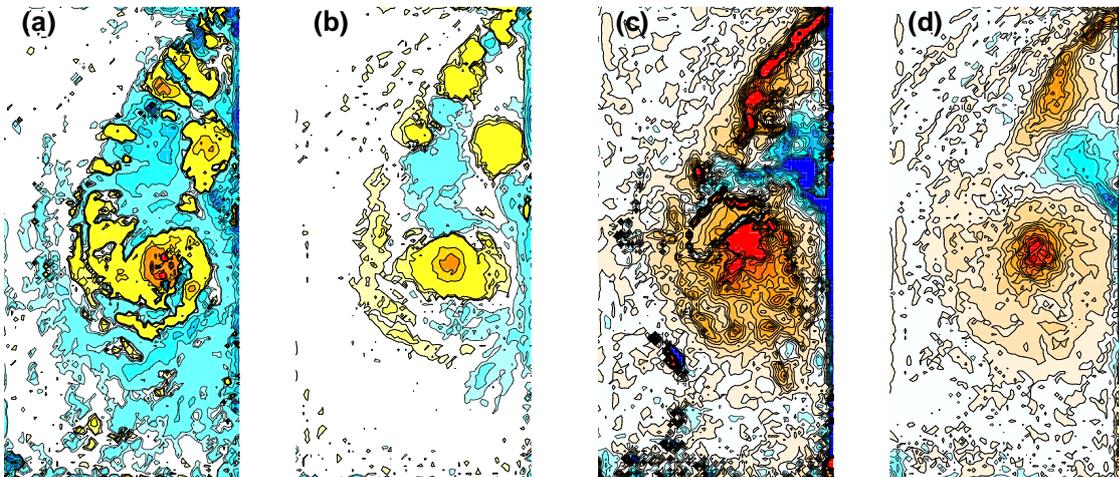


FIGURE 3.23 – Cartographie de critère  $Q$  instantané (a) sans filtrage POD, (b) avec filtrage POD 6 modes; Cartographie de la vorticité  $\omega$  instantanée (c) sans filtrage POD, (d) avec filtrage POD 6 modes.

Il est alors possible de suivre le déplacement spatiotemporel des structures tourbillonnaires. Du fait de sa taille et de son fort taux d'énergie cinétique de fluctuations, nous nous sommes intéressés au déplacement du tourbillon primaire. Les données brutes ont tout d'abord été filtrées à l'aide de la décomposition en modes POD. Ensuite, nous avons identifié, pour chaque snapshot, le centre probable de la structure tourbillonnaire. Pour ce faire, nous avons utilisé un calcul barycentrique basé sur la vorticité ou sur le critère  $Q$ .

Afin de s'affranchir des problèmes liés à la géométrie de la structure, on définit le domaine de calcul par  $Q \geq 0.5$ .

Les résultats obtenus avec la vorticité étant quasiment identiques à ceux obtenus avec le critère  $Q$ , nous présenterons par la suite uniquement les résultats obtenus à l'aide du critère  $Q$ . Les résultats obtenus avec la vorticité sont en annexe (figure D.1).

Lorsque l'on procède au suivi spatiotemporel du centre du tourbillon primaire dans un plan  $(x,y)$ , on s'aperçoit qu'il n'est soumis à aucune trajectoire bien définie, mais plutôt à un mouvement relativement chaotique dans une région restreinte de l'espace (figure 3.24). Néanmoins, lorsque l'on utilise un maillage de calcul un peu plus lâche, on peut ainsi filtrer une partie des petites perturbations. On s'aperçoit alors que le tourbillon primaire a un sens de rotation privilégié, le sens trigonométrique à hauteur de 70%.

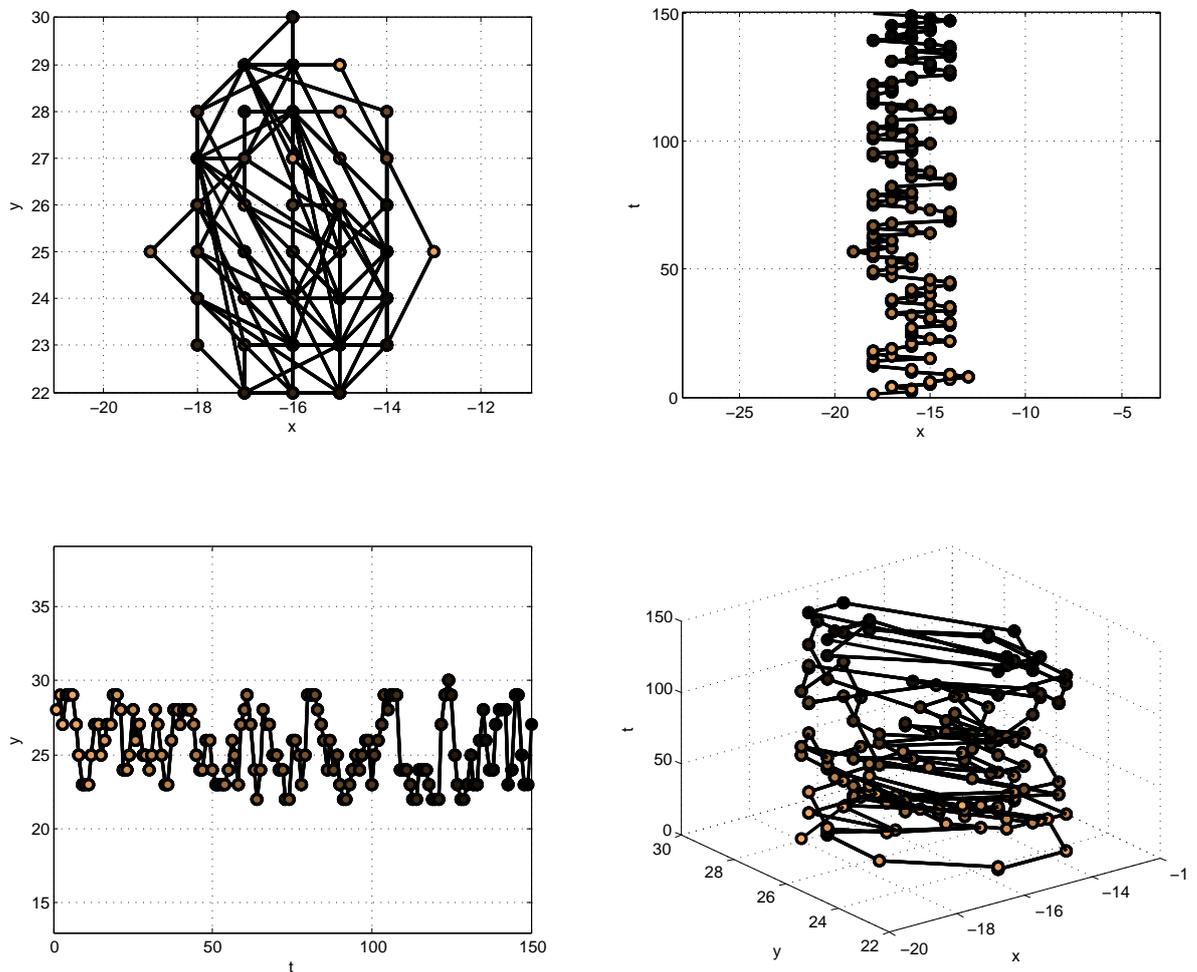


FIGURE 3.24 – Suivi temporel du déplacement du centre du tourbillon primaire dans le plan 7 pour 150 pas de temps; dans le plan  $(x,y)$ , le plan  $(x,t)$ , le plan  $(y,t)$  et dans le plan  $(x,y,t)$ . ( $t$  étant la dimension temporelle en nombre d'itérations et  $x,y$  étant les dimensions spatiales en nombres de mailles)

L'analyse en fréquence fait ressortir l'absence de fréquences caractéristiques dans les

hautes fréquences. Le phénomène semble plutôt être régi par de très faibles fréquences comprises entre 0Hz et 5Hz (figure 3.25).

L'analyse en densité de probabilité de présence du centre du tourbillon (figure 3.25) permet de mettre en évidence un décalage entre la position moyenne du phénomène et la position ayant le taux de présence le plus élevé. En effet, celui-ci est nettement décentré de la zone de déplacement du centre du tourbillon primaire.

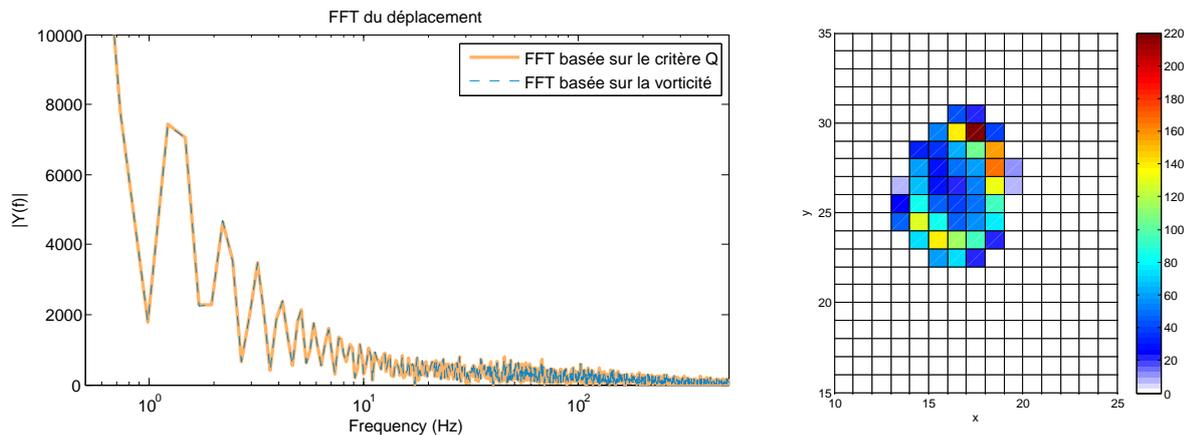


FIGURE 3.25 – Transformée de Fourier du déplacement du centre du tourbillon primaire (calcul basé sur le critère  $Q$ , en trait plein et sur la vorticité, en pointillés) et densité de probabilité du centre du tourbillon primaire (en maille du domaine de calcul) pour 3000 snapshots consécutifs.

D'une façon générale, le tourbillon primaire semble être animé par des phénomènes de très faibles fréquences. Cela est en accord avec les résultats précédents obtenus par pression pariétale et par fil chaud.

### 3.4 Influence de la géométrie

Au vue de la complexité de l'écoulement de contournement de montant de baie, les travaux de recherche ont été effectués sur une maquette présentant une géométrie extrêmement simplifiée, avec une arête vive à angle droit. Or, lorsque l'on regarde le montant de baie d'un véhicule réel on s'aperçoit qu'il présente une coupe comprenant des angles vifs ainsi que des arrondis. Nous avons donc essayé de définir l'importance de l'arête vive par rapport à la topologie du phénomène observé. Pour cela nous avons usiné une arête parfaitement circulaire, d'un rayon de courbure de 40 mm, ne présentant pas la moindre discontinuité avec la paroi latérale ou le "pare-brise" (figure 3.26). Nous avons espéré ainsi créer un montant de baie se situant de l'autre côté du spectre des montants usinables.

L'écoulement ainsi obtenu a été étudié à l'aide de mesures PIVHF à partir de la *configuration 3* (paragraphe 2.3.2). Nous disposons donc d'un seul plan, incliné à  $25^\circ$ , (plan 7). Cette inclinaison avait été définie en fonction de la topologie de l'écoulement de contournement d'un montant de baie à arête vive. Dans le cas d'un montant arrondi, n'ayant pas d'informations permettant de prédire la topologie de l'écoulement, nous avons gardé l'angle de  $25^\circ$  pour le plan PIV. Toutefois, dans le cas où l'écoulement serait fondamentalement différent cela pourrait engendrer une déformation ellipsoïdale de la coupe du

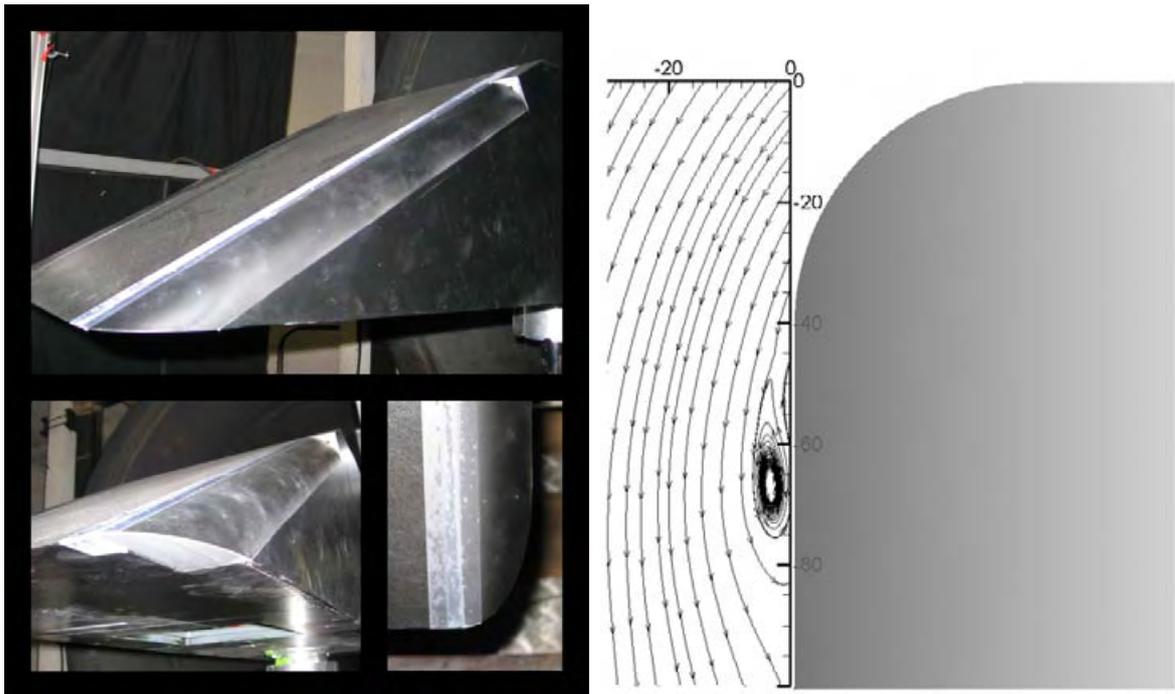


FIGURE 3.26 – Montant de baie circulaire de rayon de courbure égal à 40mm et ne présentant pas de discontinuités avec les parois. Lignes de courants moyennes dans le plan 7 obtenues à partir de résultats PIV en *configuration 3*.

phénomène. Comme précédemment, nous avons calculé le critère  $Q$ , la vorticité  $\omega$ , le module de la vitesse normalisée par rapport à la vitesse infinie amont et l'énergie cinétique des fluctuations  $E'_c$  (figure 3.27) en moyennant en temps. La première constatation que l'on peut faire en analysant les lignes de courant (figure 3.26) est que l'écoulement est très fortement modifié. Au niveau du plan 7, l'enveloppe de la structure de montant de baie est beaucoup plus restreinte en superficie : -74% suivant  $x$  et -33% suivant  $y$  et présente donc un rapport d'aspect beaucoup plus allongé : 9.6 au lieu de 2.8.

Avant toute chose, notons que le coin supérieur droit des images brutes n'était pas éclairé par la nappe laser. Il en résulte une petite zone ( $x \in [-2, 0]$  et  $y \in [-20, 0]$ ) non exploitable et présentant des résultats complètement erronés. On note tout d'abord à partir du critère  $Q$  et de la vorticité qu'il n'y a plus la présence des deux structures tourbillonnaires. Le taux de vorticité est uniquement de même signe et extrêmement faible comparé à la configuration de référence à angle droit. A partir des mesures instantanées il est possible de suivre l'évolution des fluctuations temporelles de la vorticité en un point donné (figure 3.28). On s'aperçoit qu'il y a un phénomène périodique associé à l'écoulement de montant de baie arrondi autour de 50 Hz. Enfin, cette remarque est appuyée par la représentation des modes POD suivant  $U_y$  qui sont caractéristiques d'une couche de mélange présentant le passage régulier de structures tourbillonnaires (figure 3.29).

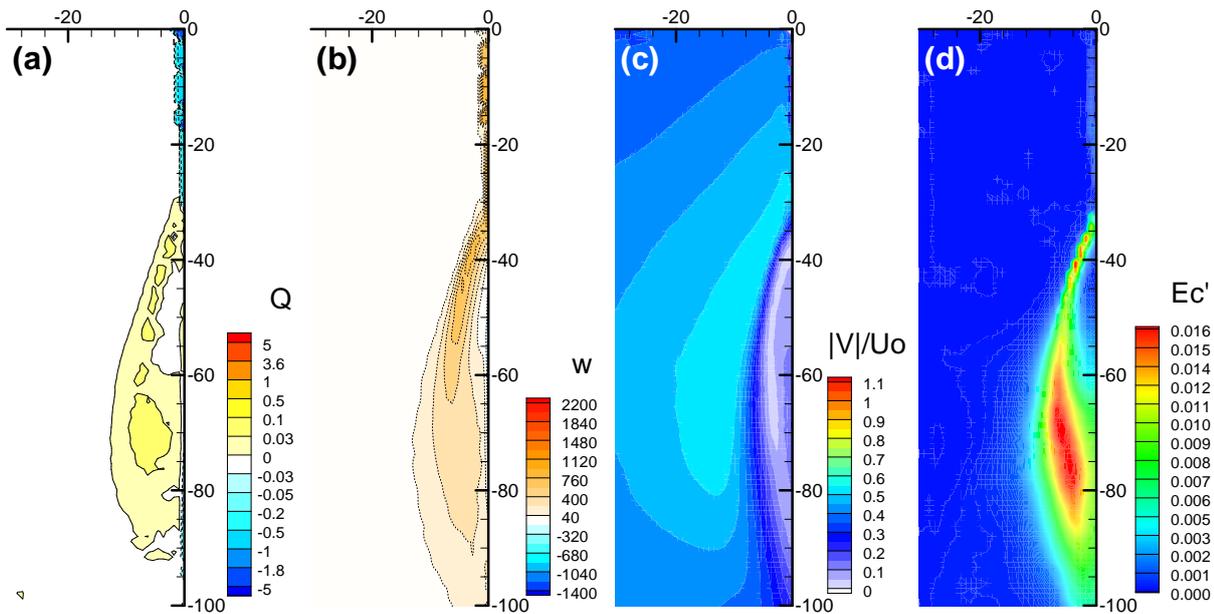


FIGURE 3.27 – Analyse de l'écoulement de contournement d'un montant arrondi : (a) critère  $Q$ ; (b) vorticité  $\omega$ ; (c) module de la vitesse normalisé par rapport à la vitesse infinie amont; (d) énergie cinétique des fluctuations  $E'_c$ .

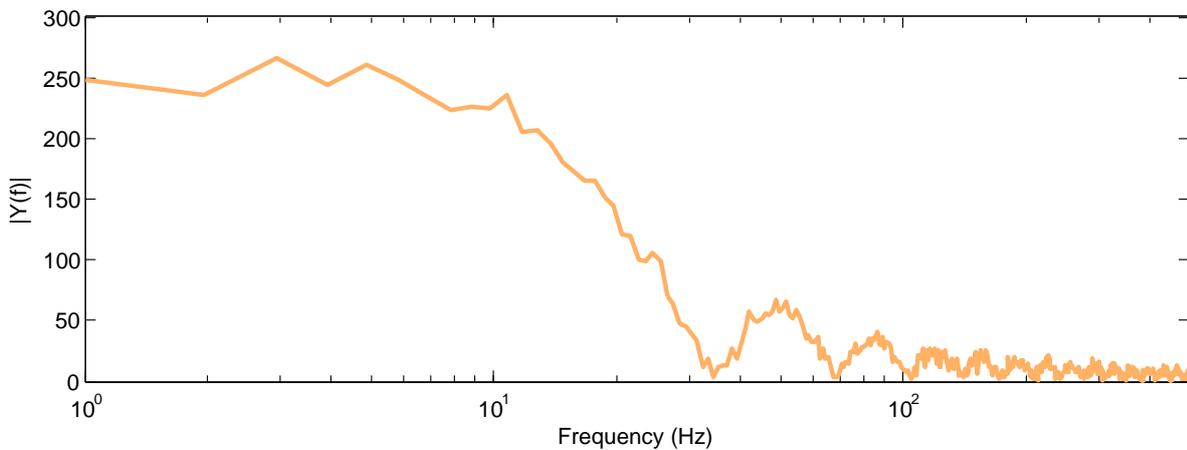


FIGURE 3.28 – Transformée de Fourier de l'évolution temporelle du taux de vorticité mesuré en un point de la couche de mélange du montant arrondi.

### 3.5 Conclusion

Lors de ce chapitre, nous avons étudié en détails la topologie de l'écoulement de montant de baie. Une fois vérifié que la cartographie de  $C_p$  était en accord avec les études précédentes et qu'elle était convergée pour la vitesse de notre étude, nous avons mis en place des mesures PIV pour obtenir des informations spatiotemporelles du phénomène. Nous avons démontré que dans le cas d'un montant de baie à angle droit, le phénomène était elliptique et constitué d'un tourbillon primaire et d'un tourbillon secondaire contra-rotatif de plus faibles intensité et dimensions. Le centre du tourbillon primaire s'éloigne

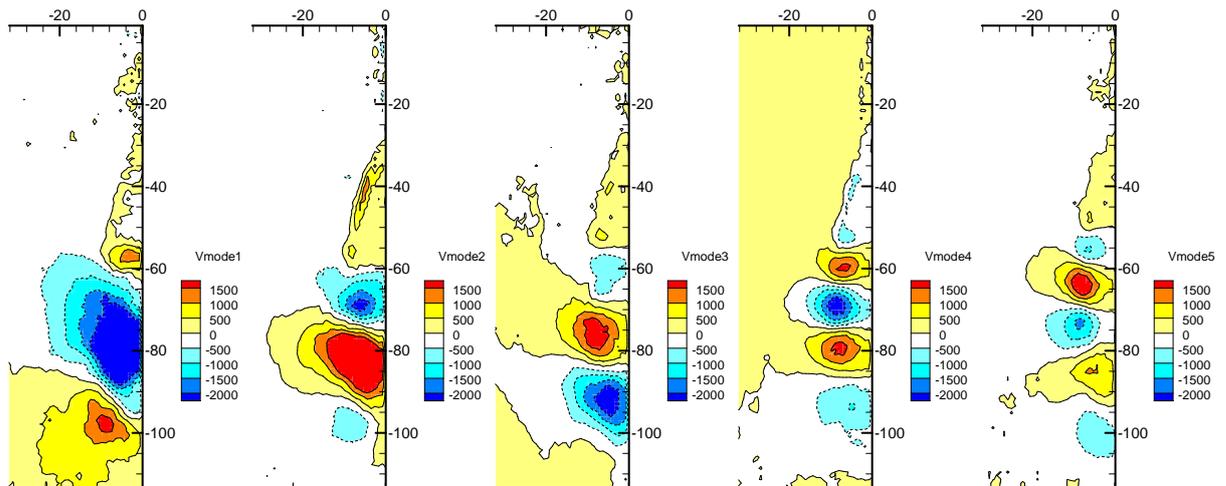


FIGURE 3.29 – Premiers modes POD associés à la composante  $U_y$  de la vitesse. Les lignes en pointillés représentent les valeurs négatives.

de la paroi alors qu'il se développe le long de l'arête alors que le tourbillon secondaire reste en proche paroi. La région de décollement entre le tourbillon primaire et le tourbillon secondaire a l'un des taux d'énergie de fluctuation le plus élevé du phénomène et se trouve être confondue avec la zone présentant les plus fortes fluctuations de pression à la paroi. Cela nous a permis de conclure que la zone de recollement était la zone la plus propice à l'excitation de la vitre.

L'étude instationnaire du phénomène a permis de mettre en avant la dynamique de déplacement du tourbillon primaire. Celui-ci présente des fréquences propres de l'ordre de la dizaine de Hertz mais son mouvement reste très aléatoire.

Enfin, afin de mieux définir l'importance de l'arête vive sur la topologie de l'écoulement, un montant arrondi a été usiné. La topologie de l'écoulement ainsi observée est fondamentalement différente et ne présente pas de tourbillon de montant de baie à proprement parler mais plutôt une couche de mélange soumise à des instabilités de type Kelvin-Helmholtz.



# Chapitre 4

## Contrôle

### Sommaire

---

<b>4.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>51</b>
<b>4.2</b>	<b>Principe</b>	<b>52</b>
<b>4.3</b>	<b>Contrôle passif</b>	<b>52</b>
4.3.1	Soufflage	53
4.3.2	Géométrie modifiée	62
<b>4.4</b>	<b>Contrôle actif</b>	<b>66</b>
4.4.1	Soufflage	66
<b>4.5</b>	<b>Bilan</b>	<b>69</b>

---

### 4.1 Introduction

Maintenant que la topologie de l'écoulement de montant de baie à été étudiée en détails (géométrie, dynamique, répartition énergétique), il devient possible d'envisager des techniques de contrôle des structures tourbillonnaires. Dire qu'un contrôle sera appliqué est cependant un abus de langage. N'ayant pas prévu de faire une vérification en temps réel de l'état de notre phénomène et encore moins d'implémenter une boucle rétroactive, ce qui va être fait par la suite devrait plutôt être considéré comme de la modification ou de la manipulation d'écoulement.

Dans les deux sections suivantes, les termes "contrôle passif" et "contrôle actif" seront néanmoins respectivement employés pour définir :

1. Une méthode de modification de l'écoulement sans aucun paramètre modifiable après conception du prototype. Plus précisément, dans le cadre de cette étude cela reviendra uniquement à l'usinage d'un montant de baie à la géométrie modifiée.
2. Une méthode de modification de l'écoulement ayant un paramètre modifiable lors des essais. Plus précisément, dans le cadre de cette étude cela consistera à modifier le débit sortant des prototypes de type "soufflage".

Si le projet c'est restreint à ces techniques, cela tient à la politique de recherche que Mecaplast Group avait mise en avant : un coût zéro ajouté au prix de la pièce pour

un apport en confort. L'implémentation d'un compresseur ou d'une pompe pour pouvoir faire du soufflage ou de l'aspiration [Bettridge *et al.* (2006)] en fonction de la vitesse de déplacement du véhicule n'était, à priori, pas envisageable. De même, l'installation de jets synthétiques [McCormick (2000)], de MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) [Lofdahl & Gad-El-Hak (1999)] ou d'actionneurs piézo-électriques [Gallas *et al.* (2003)], bien qu'en plein essor ne pouvait donc pas être envisagée pour des raisons de coût. Il en va de même pour le contrôle par plasma et champ magnétique.

## 4.2 Principe

En tout premier lieu, il faut avoir analysé la physique du phénomène que l'on souhaite contrôler étant donné que c'est celle-ci qui va guider la conception des actionneurs et leurs emplacements. Les techniques de contrôle consistent ensuite à modifier l'écoulement afin, par exemple, de retarder le décollement ou déplacer les points de décollement ou de recollement dans le contexte des écoulements en paroi. Ainsi, à titre d'exemple, le contrôle de la couche limite peut s'envisager de plusieurs façons : déformer le profil de vitesse, énergiser la couche limite ou encore diminuer la sensibilité de la couche limite au décollement.

1. Le fait de déformer le profil de vitesse permet, si appliqué correctement, d'éviter un écoulement de retour et donc la formation d'une couche limite décollée. Cela implique donc qu'une courbure négative du profil de vitesse à la paroi doit être une condition suffisante pour que la couche limite ne décolle pas [Gad-El-Hak (2000)]. Il est donc possible de contrôler le décollement en modifiant la courbure du profil de vitesse à la paroi. Autrement dit, le contrôle doit avoir pour effet de rendre le profil de vitesse le moins déficitaire possible. Pour arriver à de tels résultats, les techniques expérimentales de contrôle sont généralement : l'aspiration pariétale, l'application de paroi poreuse, la formation d'ondulation à la paroi ou encore le traitement de surface pour diminuer le frottement à la paroi.
2. La façon la plus simple d'énergiser une couche limite est d'injecter de la quantité de mouvement dans sa partie basse de sorte à drainer les zones de fluide lent. Pour ce faire, les deux méthodes classiques sont : l'aspiration de la zone de fluide mort ou défléchir l'écoulement de sorte à apporter du fluide riche en quantité de mouvement dans les régions plus pauvres de l'écoulement.
3. Pour rendre une couche limite plus résistante au décollement il suffit de la rendre turbulente. En effet, une couche limite turbulente est un excellent transporteur de quantité de mouvement et possède la propriété de mélanger le fluide ralenti près de la paroi au fluide rapide situé dans la région au-dessus. L'énergie cinétique des particules fluides de couche limite est alors suffisante pour supporter le gradient de pression défavorable sans subir de décollement de couche limite.

## 4.3 Contrôle passif

Dans un premier temps, nous allons nous concentrer sur le contrôle "passif", l'objectif initial de Mecaplast Group. Différents prototypes ont été conçus pour pouvoir être interchangeables sur le montant avant, coté droit, de la maquette Demha30 de sorte à pouvoir

étudier facilement un maximum de configurations. Cinq prototypes de type “soufflage” ont ainsi été maquetés par Mecaplast et deux de type “générateur de vortex”.

### 4.3.1 Soufflage

#### Caractérisation

L'idée principale qui se cache derrière ces prototypes vient du travail effectué par [Fu & Rockwell \(2005\)](#) sur le contrôle de l'écoulement de contournement d'un cylindre en eau peu profonde. L'idée est assez simple : un cylindre de diamètre  $D$  est placé dans un canal hydraulique de faible profondeur afin d'être dans la configuration d'un écoulement en eau peu profonde. Le cylindre plein est ensuite remplacé par un cylindre traversé de part et d'autre d'une fente de largeur variable et d'orientation modulable. Ce dispositif permet donc de collecter de la quantité de mouvement en amont du cylindre pour la redistribuer en aval de celui-ci comme le ferait un dispositif de soufflage. A l'aide de mesures par PIV, ils se sont aperçu que lorsque la fente devenait suffisamment large par rapport à  $D$ , il devenait possible de modifier de façon significative la traînée du cylindre.

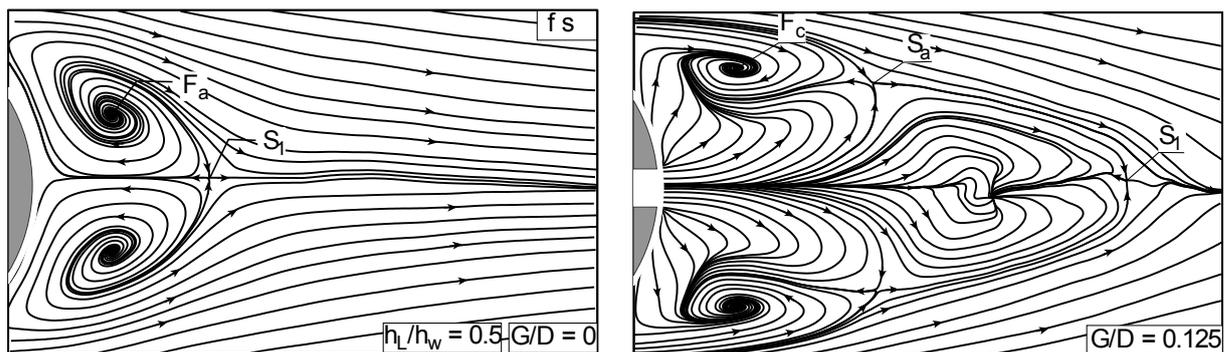


FIGURE 4.1 – Lignes de courant moyennes pour un écoulement autour d'un cylindre plein et d'un cylindre fendu pour laisser passer une partie de l'écoulement amont [[Fu & Rockwell \(2005\)](#)].

C'est le principe de ce procédé que nous appellerons par la suite “soufflage passif” qui a été implémenté sur la maquette Demha30. L'arête avant, côté droit, a été extrudée. Des conduites de section rectangulaire, avec les dimensions de  $500 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$  et de volume équivalent au volume extrudé ont été produites (figure 4.2). Chaque conduite a été équipée d'un collecteur à une extrémité et de fentes réparties sur toute la longueur. Ces cinq prototypes (figure 4.3) se différencient par trois critères : la forme du collecteur, l'emplacement des fentes et la direction dans laquelle l'air est soufflé. Les différences entre le collecteur dit de “type A” et le collecteur dit de “type B” se trouvent au niveau de la géométrie de la lamelle : dans le premier cas la lamelle fait  $825 \text{ mm}^2$  et forme un angle de  $42^\circ$  par rapport à la conduite ; dans le deuxième cas, elle fait  $425 \text{ mm}^2$  et forme un angle de  $65^\circ$  par rapport à la conduite. Etant donnée que la surface ouverte pour collecter l'air fait  $1075 \text{ mm}^2$ , les prototypes munis d'un collecteur type A ont une surface d'entrée apparente à l'écoulement de  $462 \text{ mm}^2$  et les prototypes munis d'un collecteur type B ont une surface d'entrée apparente de  $895 \text{ mm}^2$ .

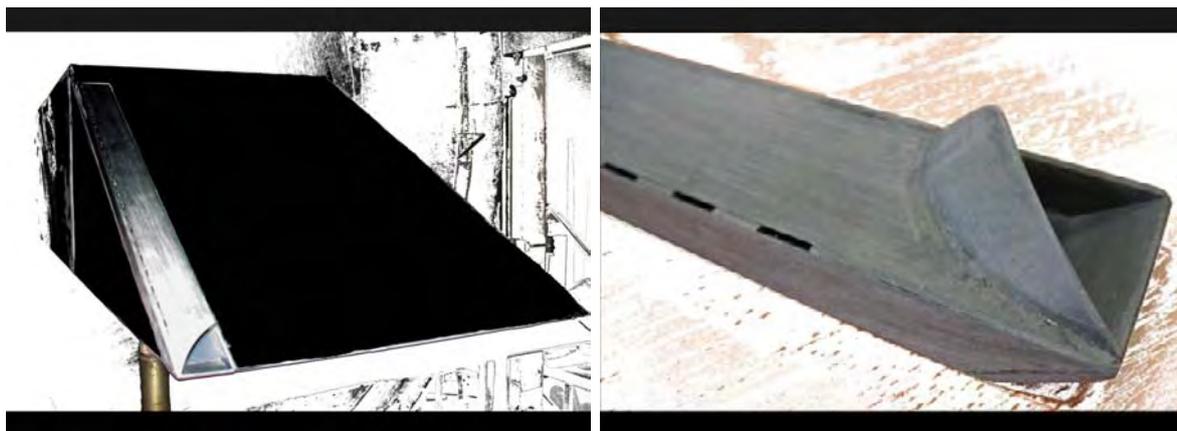


FIGURE 4.2 – Prototypes de soufflage passif “dessus45” montés sur la maquette Demha30. Gros plan sur le prototype “45” muni d’un collecteur de type A

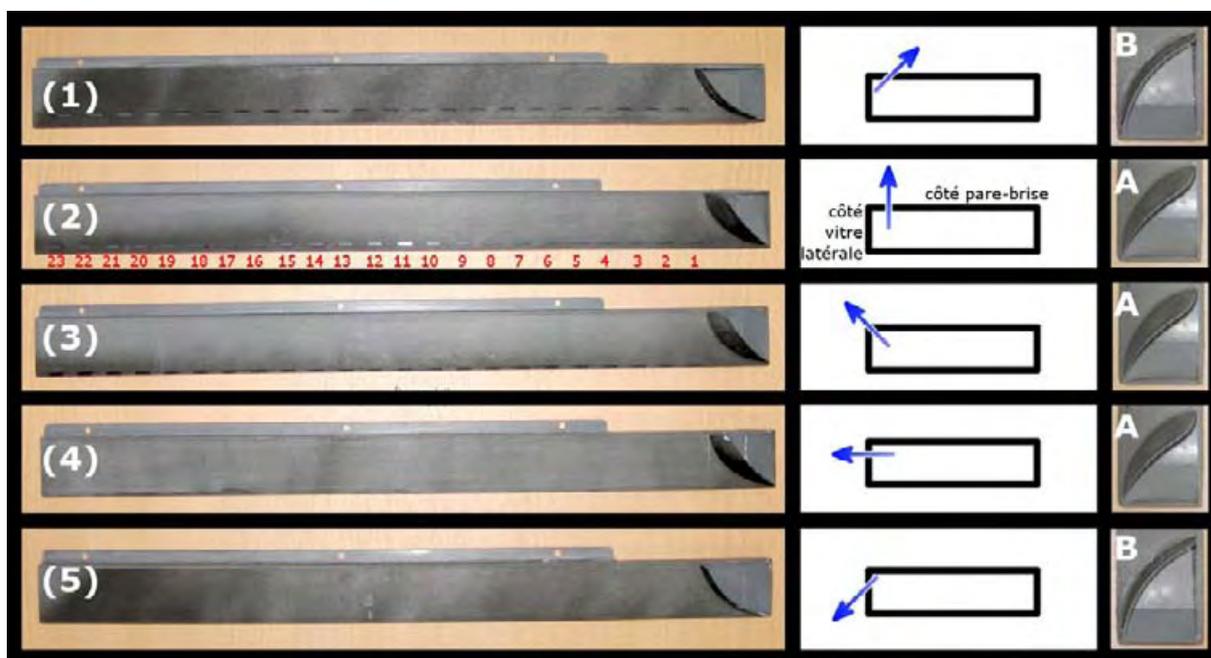


FIGURE 4.3 – Prototypes de soufflage “passif” usinés et testés sur Demha30 : (1) “dessus45”, (2) “dessus”, (3) “45”, (4) “côté”, (5) “côté45” ; coupe de la conduite avec orientation de soufflage et type de collecteur. La nomenclature utilisée par la suite pour repérer les fentes est celle reportée sur le prototype (2).

Les conduites sont munies de 23 fentes de  $1 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  chacune, espacées de 10 mm les unes des autres, et localisées à la même abscisse sur chaque prototype. De cette façon, 23 jets sont créés. La nomenclature utilisée pour les repérer par la suite est celle utilisée sur la figure 4.3(2). Les cinq prototypes usinés sont les suivants :

1. Le prototype “dessus45” a les fentes qui se trouvent sur la partie supérieure de la maquette, à 8 mm de l’arête, et dont le jet est orienté de  $45^\circ$  par rapport à la surface en direction du “pare-brise”. Le but de ce prototype est de contrarier l’écoulement le plus possible soufflant à l’encontre de celui-ci.

2. Le prototype “dessus” a les fentes qui se trouvent sur la partie supérieure de la maquette, à 4 mm de l’arête, et dont le jet est orienté perpendiculairement à la paroi. Ce prototype s’apparente à des générateurs de vortex fluidiques.
3. Le prototype “45” est muni de fentes se trouvant au niveau de l’arête, entre la partie frontale de la maquette et le côté de celle-ci, et orientées de 45° par rapport à ces deux surfaces. Un tel soufflage devrait permettre de lifter le tourbillon primaire.
4. Le prototypes “côté” est muni de fentes localisées sur le côté de la maquette, à 6 mm de l’arête, et orientées perpendiculairement à la paroi. Ce prototype a pour but de dynamiser la région du tourbillon secondaire.
5. Le prototypes “côté45” est muni de fentes localisées sur le côté de la maquette, à 7 mm de l’arête, orientées de 45° par rapport à la surface et dirigées vers le bas. Un tel soufflage devrait permettre de laminariser l’écoulement.

Lors de ses travaux de recherches sur les structures tourbillonnaires longitudinales autour d’une maquette similaire à Demha30, [Lehuteur \(2007\)](#) a observé de façon numérique et expérimentale l’éclatement tourbillonnaire des structures du montant de baie pour un soufflage continu, le long du montant, supérieur ou égal à la vitesse de l’écoulement amont. Dans le cas de notre étude, si on ne prend pas en compte les pertes de charges dans les conduites, la vitesse de soufflage pour les prototypes munis d’un collecteur A est de deux fois la vitesse amont et pour les prototypes de type B, cette vitesse est de 3.9 fois la vitesse amont. L’approximation d’un écoulement sans perte de charge n’est, bien évidemment, pas valable pour cette géométrie car l’écoulement dans les conduites est extrêmement complexe et mériterait à lui seul une étude approfondie. Cela dit, le rapport d’aspect entre l’entrée et les sorties des conduites est suffisamment important pour espérer une vitesse de soufflage d’au moins une fois la vitesse amont dans le cas où les pertes de charge seraient d’un ordre de grandeur allant jusqu’à 50%. Malheureusement, l’efficacité du collecteur reste une inconnue majeure de cette configuration : quelle quantité d’air est effectivement collectée dans le dispositif ? La caractérisation suivante essaie d’apporter des éléments de réponse. Toutefois nous ne disposons pas d’informations quantitatives sur la quantité d’air entrante dans la conduite par rapport à la quantité d’air contournant collecteur.

Une étude préliminaire sur un banc d’essai a été effectuée pour essayer de mieux appréhender l’écoulement dans les conduites et définir si, oui ou non, les dispositifs sont en mesure de souffler à des vitesses égales ou supérieures à la vitesse de l’écoulement amont. Pour cela, le dispositif suivant a été employé (figure 4.4) : le prototype est fixé sur une table ; une arrivée d’air à débit constant est orientée vers le collecteur, formant un angle de 30° avec le prototype, imposant la direction mais laissant la possibilité à l’air de contourner le collecteur de sorte à se rapprocher des conditions en soufflerie ; une paroi empêche l’air contournant le collecteur de venir interagir avec l’air soufflé par les fentes de sorte à ne pas perturber les mesures. Les profils de vitesse des jets sont caractérisés à l’aide de mesures par fil chaud.

### Caractérisation de l’écoulement interne

Dans cette section, les vitesses présentées ont été normalisée par la vitesse moyenne de soufflage dans l’arrivée d’air (figure 4.4(2)). Dans un premier temps, une série de mesures

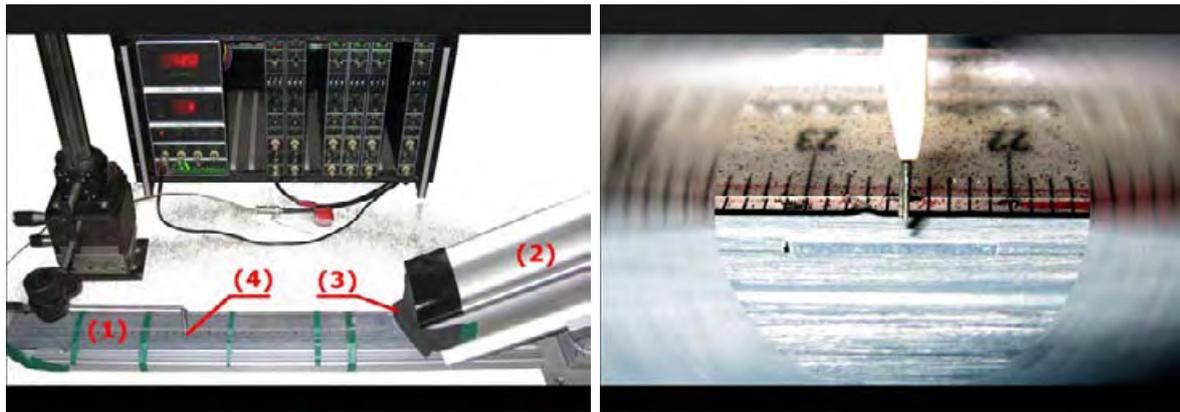


FIGURE 4.4 – Dispositif de caractérisation des jets : (1) prototype, (2) arrivée d'air, (3) paroi séparant l'arrivée d'air des jets, (4) sonde fil chaud. Gros plan sur la sonde fil chaud lors des mesures

a été effectuée au dessus de la septième fente du prototype “dessus” dans le but de tracer la cartographie de la répartition de la vitesse de sortie (figure 4.5). On observe une très forte inhomogénéité de la vitesse de soufflage : en amont de la fente la vitesse est quasi nulle ; une vitesse de soufflage normalisée  $\geq 1$  est obtenue sur la seconde moitié de la fente. Il y a en outre un très fort gradient de vitesse aux bords de la fente. Cette topographie n'est cependant pas surprenante car les fentes de ce prototype peuvent être partiellement considérées comme des marches descendantes [Armaly *et al.* (1983)] ou encore comme une conduite coudée à angle droit [Lichtarowicz & Markland (1963)] due à l'épaisseur de 3 mm des parois. Enfin, la longueur de 3 mm n'étant pas suffisante pour l'établissement d'un écoulement de type Poiseuille, cela explique pourquoi l'écoulement garde une telle dissymétrie.

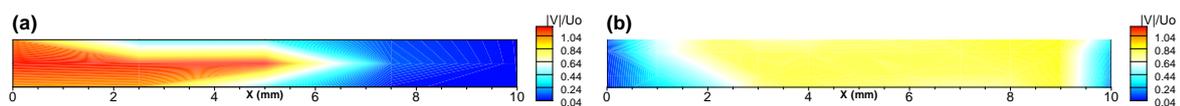


FIGURE 4.5 – Topographie de la vitesse de sortie normalisée à la fente numéro sept pour les prototypes “dessus” (a) et “côté45” (b) ; sens de l'écoulement de droite à gauche

Néanmoins, la position de la fente le long de la conduite (dessus ou côté) ainsi que son orientation (perpendiculaire à la paroi ou à  $45^\circ$ ) semble jouer un rôle important sur la topologie du jet. Lorsque l'on regarde l'écoulement de la septième fente du prototype “côté45” (figure 4.5) on observe une topologie complètement différente, avec une vitesse quasi nulle en amont et en aval de la fente, une vitesse de sortie relativement homogène sur les  $\frac{2}{3}$  de la longueur de la fente. On n'observe pas de fort gradient aux parois.

Ne trouvant pas de cas d'études à géométrie similaire dans la littérature, une étude propre à ce problème serait nécessaire pour expliquer une telle différence.

La deuxième étape dans le processus de caractérisation de ces prototypes a consisté à mesurer la distribution de la vitesse de soufflage le long des 23 fentes. Pour cela, une mesure a été faite à une position unique pour chaque fente, en son milieu. Le milieu a été choisi car d'après l'étude précédente, cela semblait être la position idéale pour mesurer la

vitesse maximale quelle que soit la configuration. Dans un premier temps on peut observer sur la figure 4.6 que dans le cas des prototypes “côté” et “côté45” la vitesse de soufflage est croissante lorsque l’on s’éloigne de l’entrée de la conduite et que dans le cas des prototypes “dessus” et “45” la tendance est inversée. A partir de ces résultats nous émettons les deux hypothèses suivantes.

Soit, à l’intérieur de la conduite, la couche limite est moins importante côté pare-brise que côté vitre latérale. Cela pourrait être due au confinement. Il s’ensuit, pour les conduites munies de fentes se trouvant sur le dessus, un transfert de quantité de mouvement vers l’extérieur plus importante dans la première moitié des conduites, engendrant une baisse de vitesse intérieure. Or d’après l’équation de Bernoulli le long d’une ligne de courant, si la vitesse décroît, la pression doit croître d’où une croissance mesurée.

Soit, dans le cas d’un soufflage situé sur le côté de la conduite, le transfert de quantité de mouvement vers l’extérieur est moins important dans la première moitié de la conduite, imposant des vitesses de soufflage croissantes.

Cependant ces hypothèses seraient à vérifier et à expliquer lors d’une étude approfondie de la topologie de l’écoulement à l’intérieur de la conduite.

Dans tous les cas la variation vis-à-vis de la vitesse moyenne de soufflage est de l’ordre de 10% le long des 23 fentes. La deuxième observation importante que l’on peut conclure de cette figure est que la vitesse normalisée de soufflage est, à l’exception de quelques jets sur le montant “dessus”, inférieure à 1. Hors d’après [Lehuteur \(2007\)](#), l’éclatement tourbillonnaire est observé pour une vitesse normalisée supérieure ou égale à 1 mais aucune hypothèse n’est formulée quant à sa stabilité pour une vitesse de soufflage inférieure à 1.

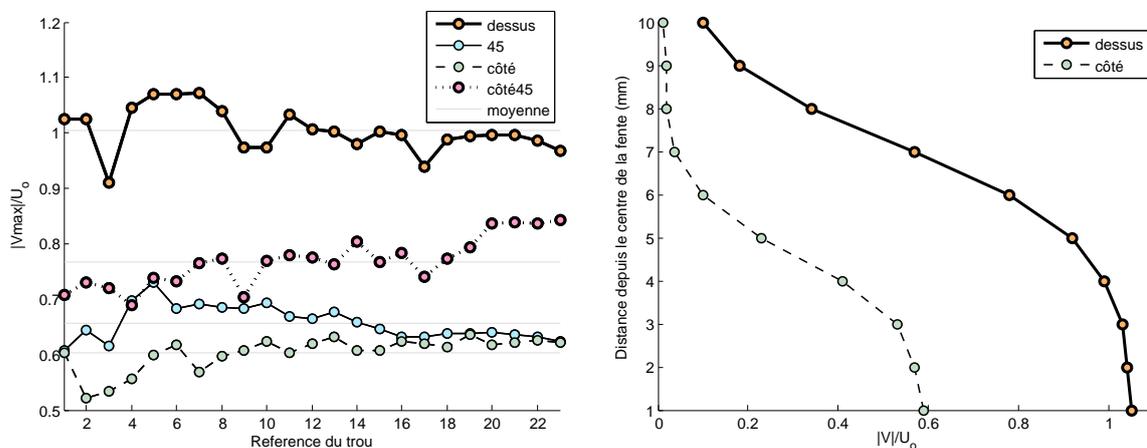


FIGURE 4.6 – Vitesse maximale de chaque jet normalisé, ainsi que la vitesse moyenne de soufflage pour chaque prototype (gauche). Profil de vitesse perpendiculaire à la septième fente, mesuré depuis le centre de celle-ci, pour les prototypes “dessus” et “côté” (droite).

L’objectif principal de ce travail de recherche n’est toutefois pas de réduire la traînée du véhicule mais de diminuer le niveau des nuisances sonores dans l’habitacle. Pour cela, il est important de modifier la structure des tourbillons du montant de baie mais leur “disparition” par éclatement n’est pas une obligation. Il est donc important de savoir si les dispositifs étudiés auront potentiellement de l’effet sur le phénomène et tout particulièrement sur la couche limite au niveau du montant de baie. Pour cela, les profils de

vitesse de deux des prototypes, “dessus” et “côté”, ont été mesurés (figure 4.6). Les mesures ont été faites depuis le centre de la septième fente, par pas de 1 mm en s'éloignant perpendiculairement de la fente. On s'aperçoit que la vitesse de soufflage est relativement homogène pour une distance  $\leq 4$  mm dans le cas du soufflage dessus et  $\leq 3$  mm dans le cas du soufflage côté. Or l'épaisseur de la couche limite  $\delta$  est définie comme étant proportionnelle à  $L_0\sqrt{Re}$ . Dans le cadre des essais effectués, cela représente une épaisseur d'environ 4 mm. On en conclut que le soufflage dessus agira de façon optimale dans l'intégralité de l'épaisseur de la couche limite, et que dans le cas d'un soufflage sur le côté, le soufflage sera optimisé uniquement dans les  $\frac{3}{4}$  de la couche limite.

## Optimisation

Lors de la caractérisation des prototypes de soufflage “passif”, nous avons observé des vitesses de jet inférieures à celles souhaitées. D'après la conservation du débit, si la section de sortie est réduite, la vitesse de l'écoulement doit augmenter de façon linéaire. L'étude d'optimisation a donc consisté à mesurer l'évolution du débit des jets qu'il était possible d'obtenir en fonction du nombre de fentes bouchées. Plus précisément, le débit à la fente numéro deux a été mesuré (figure 4.7). Si pour cette étude la fente numéro deux a été choisie au détriment de la fente numéro sept comme pour les études précédentes, c'est pour permettre l'étude la plus homogène possible et éviter d'obstruer des fentes avant et après la fente de référence.

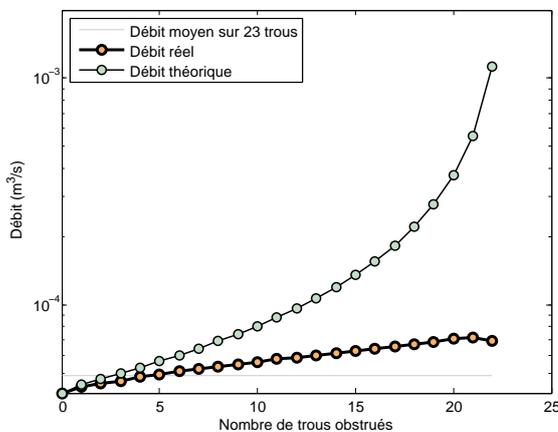


FIGURE 4.7 – Evolution théorique et mesurée du débit au niveau de la fente numéro deux en fonction du nombre de trou obstrués ; prototype utilisé : “côté”.

On observe une réponse mesurée nettement différente de la réponse théorique basée uniquement sur la conservation du débit. Le fait de boucher un certain nombre de fentes permet a priori d'augmenter le débit sur les fentes restantes, mais il apparaît que le débit entrant décroît en même temps. Cette méthode n'est donc pas efficace pour augmenter la vitesse des jets si on veut conserver la quantité de mouvement potentiellement injectable dans le phénomène. De plus, cela montre une fois de plus que la physique de l'écoulement à l'intérieur de la conduite est extrêmement complexe et nécessiterait une étude à part entière.

## Résultats

Les premiers résultats sur la maquette ont été obtenus par PIV, avec la configuration 2 (cf chapitre 2). Les lignes de courant ainsi obtenues permettent d’avoir des informations sur l’écoulement moyen (figure 4.8).

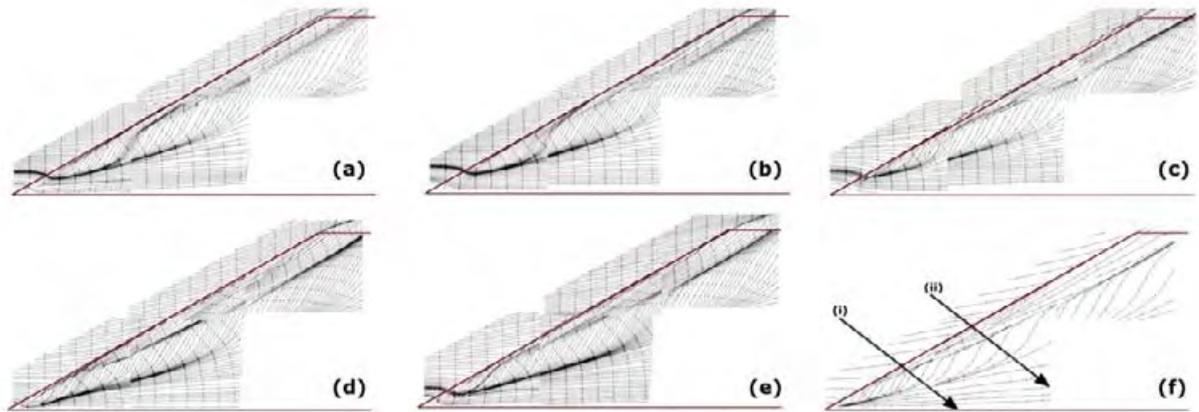


FIGURE 4.8 – Lignes de courant en proche paroi pour les prototypes : (a) “dessus45”, (b) “dessus”, (c) “45”, (d) “côté”, (e) “côté45”, (f) “référence”. Les droites (i) et (ii) désignent la position des coupes tracées sur la figure 4.11.

La première constatation que l’on peut faire est que l’écoulement est globalement peu modifié entre les six configurations ainsi étudiées : (a) “dessus45”, (b) “dessus”, (c) “45”, (d) “côté”, (e) “côté45”, (f) “référence”. On observe néanmoins une variation de l’écoulement moyen au niveau de la pointe de la maquette Demha30. Cela est dû au collecteur et semble avoir comme effet de légèrement retarder l’apparition des structures tourbillonnaires de montant de baie : au lieu d’apparaître à la pointe de la maquette ( $z=0$  mm), le tourbillon de montant de baie apparaît à  $z=55$  mm, soit une réduction de 10% de sa longueur.

Dans le cas du soufflage “45” et “côté” on voit apparaître des oscillations des lignes de courant proche de l’arrêt de la maquette. Le soufflage ainsi exercé génère donc un obstacle obligeant l’écoulement à le contourner.

Enfin, dans le cas du soufflage “dessus”, la zone dans laquelle évolue le tourbillon secondaire semble avoir été réduite : le point de décollement secondaire est rapproché du point de recollement secondaire.

Plus précisément, les prototypes qui soufflent sur le côté ralentissent le plus l’écoulement juste après l’arête du montant (équivalent à leurs zones d’action) à hauteur de -48% et -37% pour “côté” et -49% et -20% pour “côté45” respectivement pour les coupes (i) et (ii) (figure 4.9). Par contre, ce sont eux qui ont l’effet le plus faible, -5% et -20%, sur la vitesse de rotation du tourbillon primaire au niveau de la coupe (i). Si on regarde l’intégralité des courbes normalisées par la référence, on s’aperçoit que ce sont les prototypes munis d’un collecteur de type B qui génèrent le ralentissement le plus important : pour les montants (a) à (f) on obtient pour la coupe (i) une valeur RMS globale normalisée par la valeur RMS de référence respectivement de 0.92, 0.95, 0.94, 0.97, 0.92 et 1.00 et pour la coupe (ii) 0.96, 1.00, 0.99, 0.99, 0.96 et 1.00.

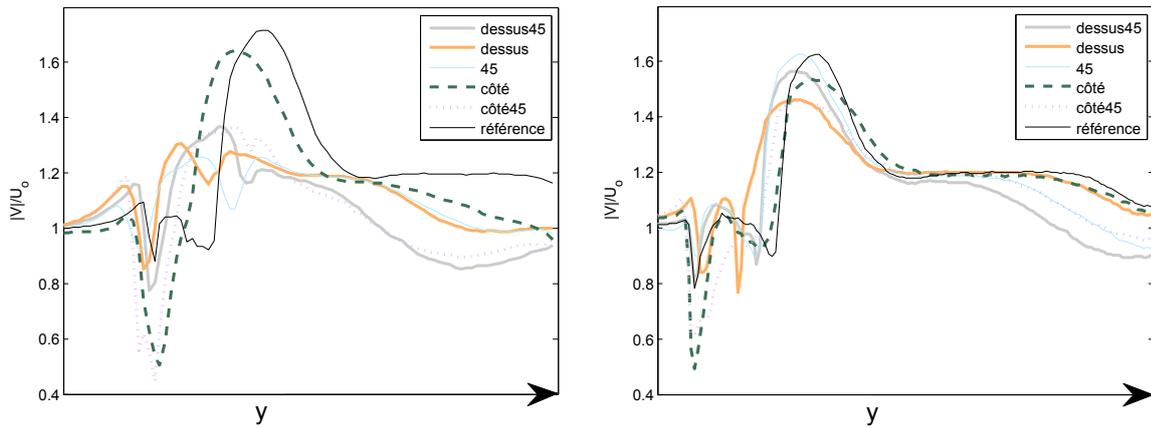


FIGURE 4.9 – Variations en proche paroi du vecteur vitesse normalisée par la vitesse amont le long de la coupe (i) à gauche et (ii) à droite, pour les prototypes : (a) “dessus45”, (b) “dessus”, (c) “45”, (d) “côté”, (e) “côté45”, (f) “référence”.

A partir des mesures PIV, il est possible d’obtenir les cartographies de l’énergie cinétique des fluctuations  $E'_c$ , en proche paroi, soit à 2 mm (figure 4.10).

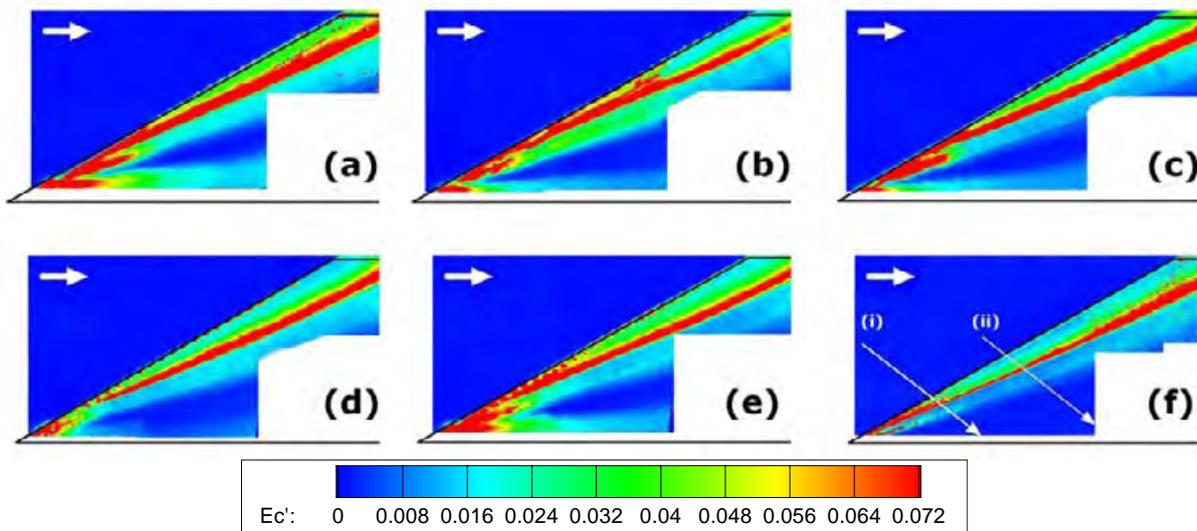


FIGURE 4.10 – Cartographie de l’énergie cinétique des fluctuations en proche paroi pour les prototypes : (a) “dessus45”, (b) “dessus”, (c) “45”, (d) “côté”, (e) “côté45”, (f) “référence”. Les droites (i) et (ii) désignent la position des coupes tracées sur la figure 4.11.

Comme précédemment lors de l’étude des lignes de courant, on s’aperçoit que l’écoulement est globalement peu modifié entre ces six configurations : (a) “dessus45”, (b) “dessus”, (c) “45”, (d) “côté”, (e) “côté45”, (f) “référence”. La ligne de décollement au niveau du tourbillon secondaire est toujours la source de la plus haute énergie de fluctuation, et celle-ci se développe avec un angle qui reste inchangé de  $\pm 1\%$  respectivement pour les configurations (a) à (e) alors que dans le cas de la configuration de référence cet angle mesure  $25^\circ$ . L’énergie des fluctuations est plus importante dans la zone se trouvant entre la ligne de décollement et l’arête du montant que dans la zone se trouvant en dessous de la ligne de décollement. Les différences majeures entre la référence et les prototypes testés dans

cette section sont les suivantes : le collecteur est source d'une très forte perturbation générant une structure énergétique qui se développe parallèlement au bas de la maquette ; cette perturbation est plus importante lors de l'utilisation du collecteur de type B que lors de l'utilisation du collecteur de type A ; les jets génèrent ponctuellement une forte perturbation de l'écoulement ; du fait de la présence du collecteur, le tourbillon de montant de baie se développe légèrement plus en aval du montant que dans le cas de référence.

D'une façon générale, les différences ne sont pas assez marquées pour être précisément quantifiables à partir des cartographies de l'énergie des fluctuations. C'est pour cette raison que deux coupes du phénomène [(i) et (ii) sur la figure 4.10(f)] ont été faites. Les courbes ainsi obtenues permettent de mieux identifier les variations de topologie (figure 4.11). Au niveau de la coupe (i) :

1. Selon les prototypes, il y a un, deux ou trois pics d'énergie de fluctuation.
2. Les plus fortes perturbations sont générées par les prototypes munis d'un collecteur de type B, soit "dessus45" et "côté45", dont le pic d'énergie des fluctuations est considérablement plus élevé que le pic de référence : +73% ; inversement, les prototypes "dessus" et "côté" diminuent ce pic respectivement de 27% et 54% ; seul le prototype "45" est muni d'un collecteur de type A et augmente le pic d'énergie des fluctuations : +45%.
3. La structure longitudinale générée par le collecteur crée, sur la partie basse de la paroi, une augmentation de l'énergie des fluctuations allant jusqu'à +1445% ; cette structure est nettement plus énergétique si elle est générée par un collecteur de type B.
4. Tous les prototypes sauf "côté" génèrent une dilatation du phénomène de l'ordre de +70% le long de la coupe (i), alors que "côté" génère seulement une translation du phénomène.

La coupe le long de l'axe (ii) permet d'avoir des informations vis-à-vis de l'évolution du phénomène :

1. Le prototype "côté" a, bien que plus énergétique, une signature similaire à celle du prototype de référence alors que les quatre autres prototypes augmentent considérablement l'énergie des fluctuations du phénomène, respectivement 1.55, 1.76, 1.46, 1.33, 1.43 et 1.00 pour les prototypes (a) à (f).
2. Le prototype "45" augmente le pic d'énergie des fluctuations de 14% mais contracte le phénomène de 9%.
3. Le prototype "côté45" diminue le pic principal d'énergie des fluctuations de 14% mais augmente le pic secondaire de 138%.
4. Le prototype "dessus" génère une forte énergie de fluctuation en dessous du point de décollement (équivalent au pic principal).

On peut donc conclure que, d'une façon générale, ces méthodes de contrôle de l'écoulement augmentent les fluctuations d'énergie cinétique en proche paroi de la maquette. Toutefois, si on augmente cette énergie c'est parce que les jets ralentissent considérablement l'écoulement de contournement de montant de baie comme on a pu le voir sur la figure 4.9.

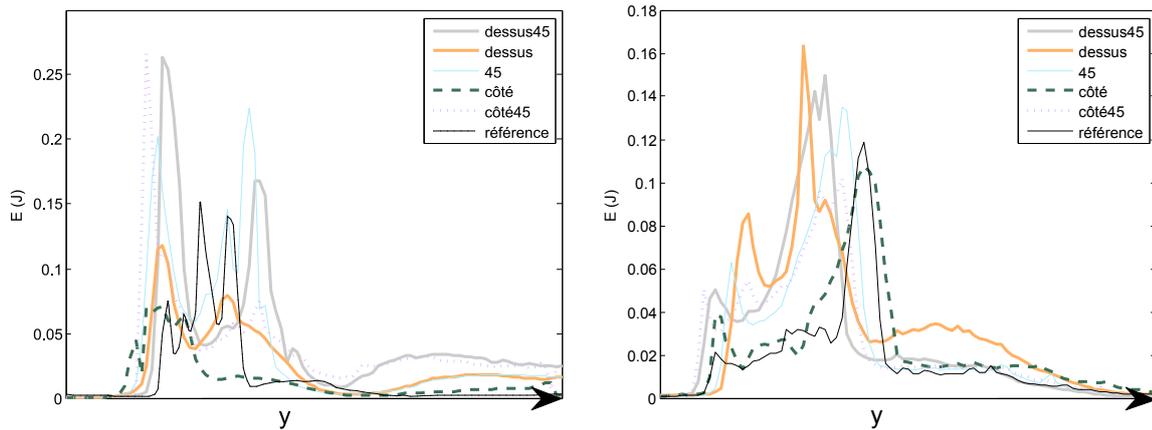


FIGURE 4.11 – Variations de l'énergie cinétique des fluctuations en proche paroi le long de la coupe (i) à gauche et (ii) à droite, pour les prototypes : (a) “dessus45”, (b) “dessus”, (c) “45”, (d) “côté”, (e) “côté45”, (f) “référence”.

### 4.3.2 Géométrie modifiée

#### Caractérisation

Le “contrôle” par générateurs de vortex (VG) a vu le jour au milieu du vingtième siècle dans le domaine aéronautique [Taylor (1948) et Taylor (1950)]. Le principe est, comme l'expliquent Schubauer & Spangenberg (1960), de forcer le mélange dans la couche limite de sorte à augmenter la quantité de mouvement de l'écoulement dans cette région et obtenir une couche limite turbulente plus résistante au décollement qu'une couche limite laminaire. Pour cela un obstacle, dit générateur de vortex, est placé dans l'écoulement (figure 4.12). Le gradient de pression ainsi créé génère des structures tourbillonnaires de faible taille en proche paroi ou de la turbulence qui redynamisent la couche limite en aval de l'écoulement. Par exemple Howard & Goodman (1988), lors de leurs travaux, ont réduit le décollement en plaçant des cannelures transversales à l'écoulement et des cannelures en formes de “V” disposées longitudinalement par rapport à l'écoulement.

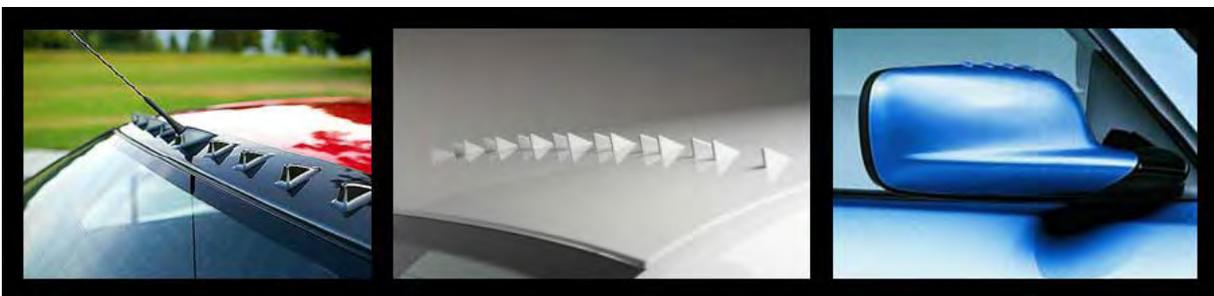


FIGURE 4.12 – Générateurs de vortex pour “contrôler” l'écoulement : (1) et (2) en aval d'une lunette arrière (Mitsubishi et Renault) ; (3) en aval d'un rétroviseur (BMW).

Bien évidemment, l'efficacité d'un tel dispositif dépend fortement du type d'écoulement étudié, du contrôle souhaité, de l'emplacement des générateurs de vortex et de leur géométrie. Pour cette raison, Smith (1994) a essayé de définir une théorie pour la prédiction

et la conception de générateurs de vortex en fonction de la couche limite turbulente. Toutefois, cette théorie est difficilement applicable à des géométries complexes et il en résulte que le choix de la forme et de l'emplacement des VG reste relativement empirique et se base majoritairement sur l'épaisseur de la couche limite. Il existe cependant, dans la littérature, des cas d'utilisation de VG dans des écoulements plus complexes [Zaman *et al.* (1994)] qui donnent des résultats extrêmement satisfaisants en terme de modification de la topologie de l'écoulement. Pour ces différentes raisons deux prototypes munis de VG ont été maquetés pour Demha30 (figure 4.13). Les dimensions ont été définies par l'épaisseur de la couche limite autour de la maquette :

1. Le premier prototype consiste en une rangée de cubes en PVC de dimension 4 mm  $\times$  4 mm de section pour une hauteur de 3 mm, espacés de 5 mm les uns des autres et situés tout le long de l'arête, côté pare brise, soit 55 VG.
2. Le deuxième prototype fonctionne de la façon inverse : des fentes, d'une profondeur de 2 mm pour une longueur de 15 mm et un angle d'ouverture de 16°, ont été taillées le long de l'arête afin de former des "marches descendantes" et permettre à l'écoulement amont de générer des structures tourbillonnaire.

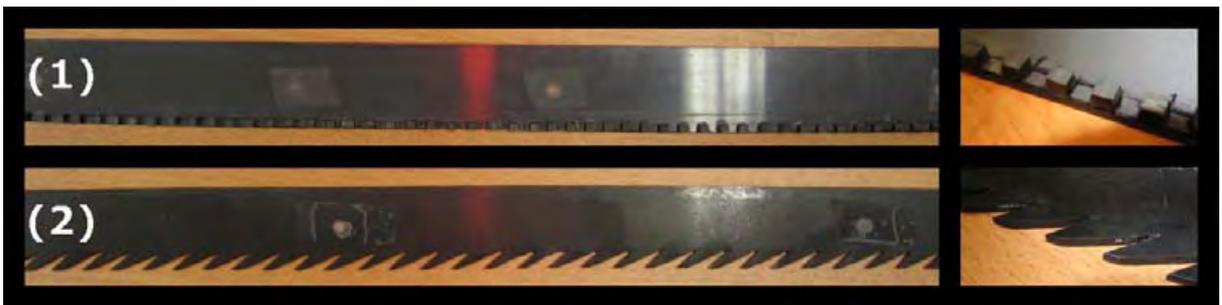


FIGURE 4.13 – Prototypes de contrôle “passif” par générateurs de vortex usinés et testés sur Demha30 : (1) VG et (2) fentes.

Les générateurs de vortex ainsi testés sont donc de taille légèrement inférieure à l'épaisseur de la couche limite et d'une grande densité. Les résultats qui suivent sont donc valables uniquement pour ces deux configurations et ne peuvent permettre d'extrapoler d'hypothétiques résultats pour des configurations géométriquement et dynamiquement différentes.

## Résultats

Comme précédemment, il a été possible d'obtenir par PIV, avec la configuration 2 (cf chapitre 2), les lignes de courant moyennes en proche paroi (figure 4.14), soit à 2 mm. La première constatation que l'on peut faire est que la signature en proche paroi n'est que très légèrement modifiée, permettant de conclure sur le maintien de la présence du phénomène.

Les coupes (i) et (ii) permettent d'obtenir des informations plus détaillées vis-à-vis des modifications apportées par ces deux méthodes de “contrôle” au niveau de la norme de la vitesse (figure 4.15).

Le prototype “fentes” permet le ralentissement du phénomène le plus important, de -26% et -17% pour les coupes (i) et (ii). Le prototype “VG” diminue aussi la vitesse mesurée, -10 % et -12%. Cependant, du fait de sa géométrie obstruant l'écoulement, il génère

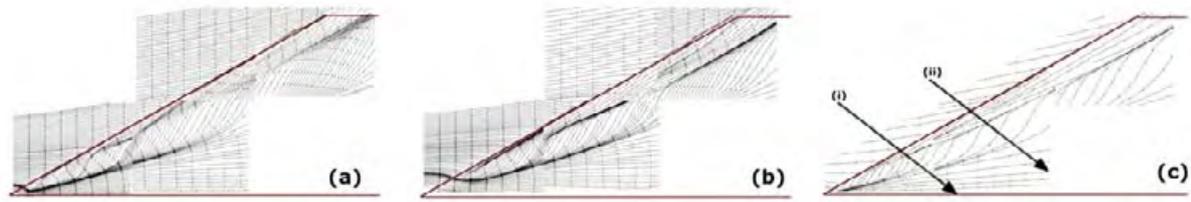


FIGURE 4.14 – Lignes de courant en proche paroi pour les prototypes : (a) “VG”, (b) “fentes”, (c) “référence”. Les droites (i) et (ii) désignent la position des coupes tracées sur la figure 4.15.

un très fort ralentissement juste en aval des obstacles (-39%), alors que le montant muni de fentes accélère légèrement l’écoulement dans cette même région (+5%). Néanmoins cette remarque est valable pour la coupe (i) uniquement, étant donné qu’au niveau de la coupe (ii), toujours au niveau de l’arête, ces deux prototypes ralentissent l’écoulement de 29%.

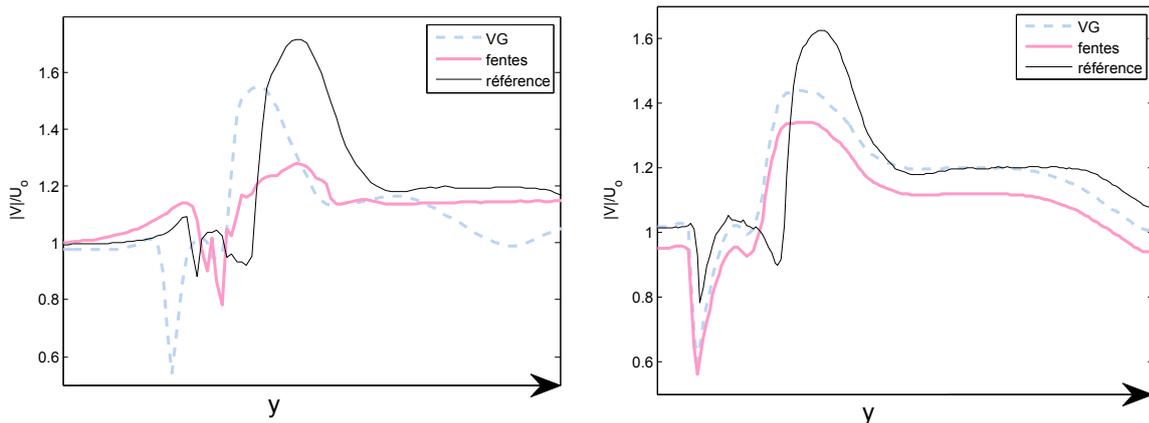


FIGURE 4.15 – Variations en proche paroi de la norme du vecteur vitesse normalisé par la vitesse amont le long de la coupe (i) à gauche et (ii) à droite, pour les prototypes : (a) “VG”, (b) “fentes”, (c) “référence”.

Les cartographies d’énergie cinétique des fluctuations  $E'_c$  en proche paroi (figure 4.16) permettent d’avoir accès à quelques informations supplémentaires. Le prototype “VG” permet de retarder l’apparition de la ligne de décollement et donc de fait, retarde l’apparition du tourbillon secondaire. Bien que son apparition soit retardée, l’angle que forme le tourbillon de montant de baie est toujours de  $25^\circ$ . Il en va de même pour le prototype “fentes”. Celui-ci ne retarde pas l’apparition du phénomène mais génère une forte perturbation à la pointe de la maquette. Cependant cette perturbation ne laisse pas de trace en proche paroi plus loin dans l’écoulement.

Comme précédemment, les coupes (i) et (ii) permettent d’obtenir des informations plus détaillées vis-à-vis des modifications en terme d’énergie des fluctuations apportées par ces deux méthodes de “contrôle” (figure 4.17).

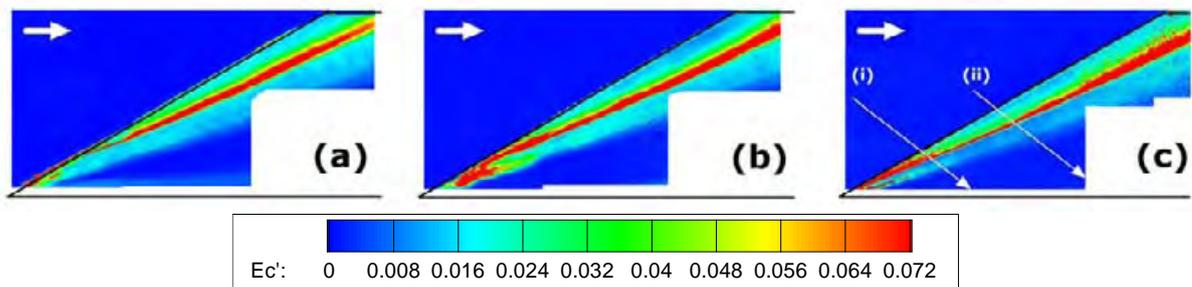


FIGURE 4.16 – Cartographie de l'énergie cinétique des fluctuations en proche paroi pour les prototypes : (a) “VG”, (b) “fentes”, (c) “référence”.

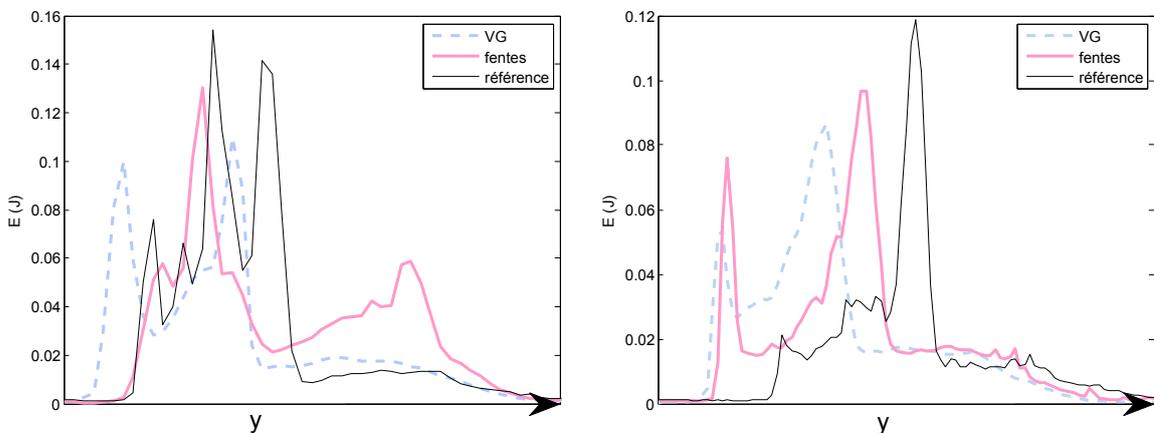


FIGURE 4.17 – Variations de l'énergie cinétique des fluctuations en proche paroi le long de la coupe (i) à gauche et (ii) à droite, pour les prototypes : (a) “VG”, (b) “fentes”, (c) “référence”.

La première constatation que l'on peut faire est que le phénomène est nettement translaté vers le haut pour le prototype “VG”. Pour le cas du prototype “fentes” on identifie la deuxième structure énergétique mentionnée précédemment. Ensuite, lorsque l'on regarde les amplitudes, on note une diminution de l'intensité de 29% et 16%, respectivement pour les prototypes (a) et (b) au niveau de la coupe (i) et de 28% et 18% au niveau de la coupe (ii). De plus, au niveau de la coupe (ii), le phénomène recouvre une surface inférieure de 21% dans le cas du montant “VG” que dans les deux autres cas. Enfin, on observe un pic d'énergie cinétique de fluctuation au niveau du contournement de l'arête, pic quasi inexistant dans le cas de référence. Ce pic est dû au fort ralentissement de l'écoulement généré par les générateurs de vortex (figure 4.15).

D'une façon plus générale, ces deux montants ralentissent la vitesse du phénomène. Toutefois, le “contrôle” par générateurs de vortex proprement dit est plus efficace lors de la formation du phénomène avec respectivement une valeur globale RMS normalisée de 0.95, 0.96 et 1.00 pour les montants (a), (b) et (c) au niveau de la coupe (i). Par la suite, cette tendance s'inverse avec respectivement 0.98, 0.91 et 1.00 au niveau de la coupe (ii).

## 4.4 Contrôle actif

Nous avons constaté lors de nos recherches avec des dispositifs de contrôle “passif”, que l’apport en énergie n’était pas suffisant pour observer une modification notable de l’écoulement ni l’éclatement des structures tourbillonnaires comme a pu le faire [Lehuteur \(2007\)](#). Nous avons donc décidé de modifier les prototypes “dessus45”, “dessus”, “45”, “côté” et “côté45” de sorte à pouvoir les relier à un compresseur. L’alimentation en air ne se faisait donc plus par le collecteur, bouché à l’occasion, mais par un tuyau se trouvant à la base du montant.

### 4.4.1 Soufflage

L’idée qui se trouve derrière le soufflage est celle d’accélérer l’intensité du tourbillon de montant de baie, augmentant ainsi son nombre de swirl et provoquant l’éclatement tourbillonnaire. Le nombre de swirl  $S$  est introduit pour caractériser le taux de rotation relatif et est défini par le rapport de la quantité de mouvement dans la direction azimutale sur la quantité de mouvement dans la direction axiale. Il représente l’intensité de la rotation par rapport à l’écoulement axial.

Le phénomène d’éclatement tourbillonnaire peut être caractérisé par l’apparition d’un point d’arrêt immédiatement en amont d’une zone de recirculation. [Hall \(1966\)](#) donne une interprétation cinématique des mécanismes physiques conduisant à l’apparition d’un point d’arrêt dans le cas d’un jet tournant stationnaire à circulation conservée en amont de l’éclatement. A l’état non éclaté, les échanges de quantité de mouvement au niveau de la zone de cisaillement, entre la structure tourbillonnaire et l’écoulement extérieur, entraîne son épanouissement. Il y a alors une augmentation de la pression statique sur l’axe tourbillonnaire par conservation de la circulation. Sous l’effet du gradient de pression adverse ainsi créé, le fluide décélère continûment sur l’axe tourbillonnaire jusqu’à l’apparition du point d’arrêt caractéristique de l’éclatement.

Dans la littérature, la plupart des études cherche à définir la vitesse de soufflage minimale pour arriver à un éclatement tourbillonnaire [[Billant \*et al.\* \(1998\)](#), [Lehuteur & Gilliéron \(2006\)](#)]. Nous avons abordé le problème différemment, en fixant la vitesse de soufflage à 30 m/s et en analysant les différents effets obtenus selon l’orientation du soufflage : (1) sur le dessus à 45° ; (2) sur dessus à 90° ; (3) sur l’arête à 45° ; (4) sur le côté à 90° ; (5) sur le côté à 45°.

Des mesures par PIVBF, dans la configuration 1, auraient dû nous permettre d’avoir accès aux grandeurs moyennes caractérisant l’écoulement. Toutefois, cette campagne de mesures n’a pu avoir lieu suite à des problèmes de planning. Les visualisations ont donc été faites par fumigène permettant uniquement une analyse qualitative et non quantitative (figure 4.18).

Le fumigène agissant de façon discontinue, la fumée arrivait par bouffées. De plus, un post-traitement sur les niveaux et sur la balance des couleurs a été appliqué de sorte à faire ressortir les caractéristiques de l’écoulement. La fréquence d’acquisition était de 500 Hz et seulement une image sur dix est représentée (figures 4.19 et 4.20) dans le but de faire ressortir la topologie de la structure.

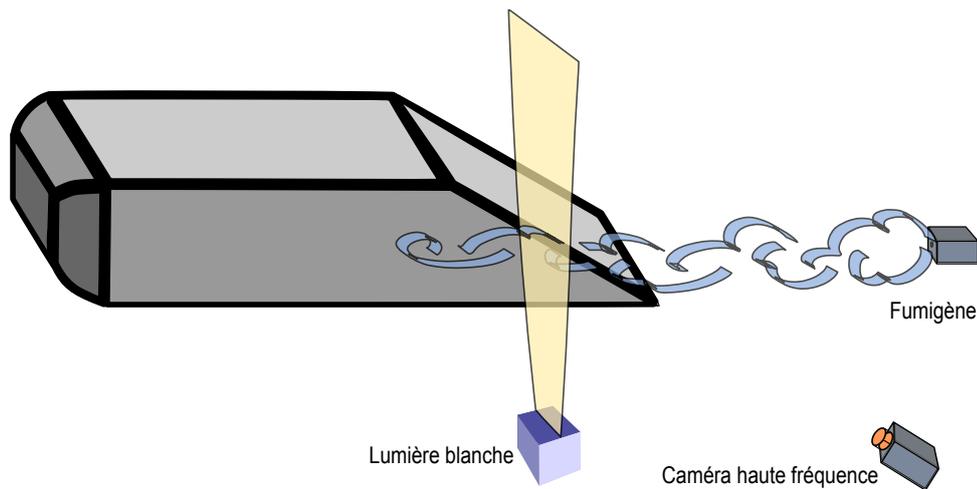


FIGURE 4.18 – Schéma de l’installation permettant les visualisations par fumigène des effets induits lors du contrôle “actif” par soufflage.

Lors des visualisations avec le montant de référence, on observe le tourbillon primaire et le tourbillon secondaire. On peut voir qu’une partie du fluide qui contourne le montant pour s’enrouler et former le tourbillon primaire est advectée dans le tourbillon secondaire suite à l’interaction avec la paroi. Comme observé dans le chapitre 3, la structure tourbillonnaire de montant de baie est aplatie contre la “vitre”, lui donnant ainsi une forme très elliptique.

Lorsque l’on compare la configuration “dessus45” (figure 4.19(b)) à la configuration de référence, on s’aperçoit que le contrôle ainsi appliqué a un effet notable sur la topologie de l’écoulement. Les tourbillons de montant de baie semblent être peu existants voir inexistantes. L’écoulement venant de face paraît se diriger vers le haut de la maquette au lieu de venir contourner le montant. Le soufflage génère une perturbation allant à l’encontre de l’écoulement qui semble avoir une très faible composante transverse.

Le prototype “dessus” semble avoir un effet similaire (figure 4.19(c)) à celui de “dessus45”. Toutefois, le soufflage n’allant pas exactement à l’encontre de l’écoulement, il ne fait que retarder l’apparition de la structure tourbillonnaire de montant de baie. On observe sur la quatrième image, que le tourbillon de montant de baie ainsi généré est plus circulaire et probablement plus petit que celui observé sur la configuration de référence.

Le prototype “45” (figure 4.20(d)) a un effet conséquent sur la topologie de l’écoulement. Au lieu de retarder ou annuler l’apparition des tourbillons de montant de baie, il fait au contraire grossir le tourbillon primaire. Celui-ci est plus large, presque circulaire et son centre est situé beaucoup plus haut que le centre du tourbillon primaire de l’écoulement de référence. Le fait de souffler à  $45^\circ$  dans le sens de l’écoulement donne un effet de *lift* au tourbillon primaire. Il en résulte que celui-ci est éloigné de la paroi, diminuant sa surface de contact avec la paroi. Le tourbillon secondaire n’est pas observable, toutefois nous ne pouvons qu’émettre l’hypothèse de sa disparition. Enfin, le dernier fait remarquable est que le soufflage ainsi exercé ne semble pas suffisant pour générer un éclatement tourbillonnaire.

La figure 4.20(e) représente la configuration de soufflage la plus classique. L’écoulement de contournement est moins *lifté* que dans le cas précédent et le tourbillon de montant de baie est observable. Bien que sur le quatrième instant la topologie de l’écoulement

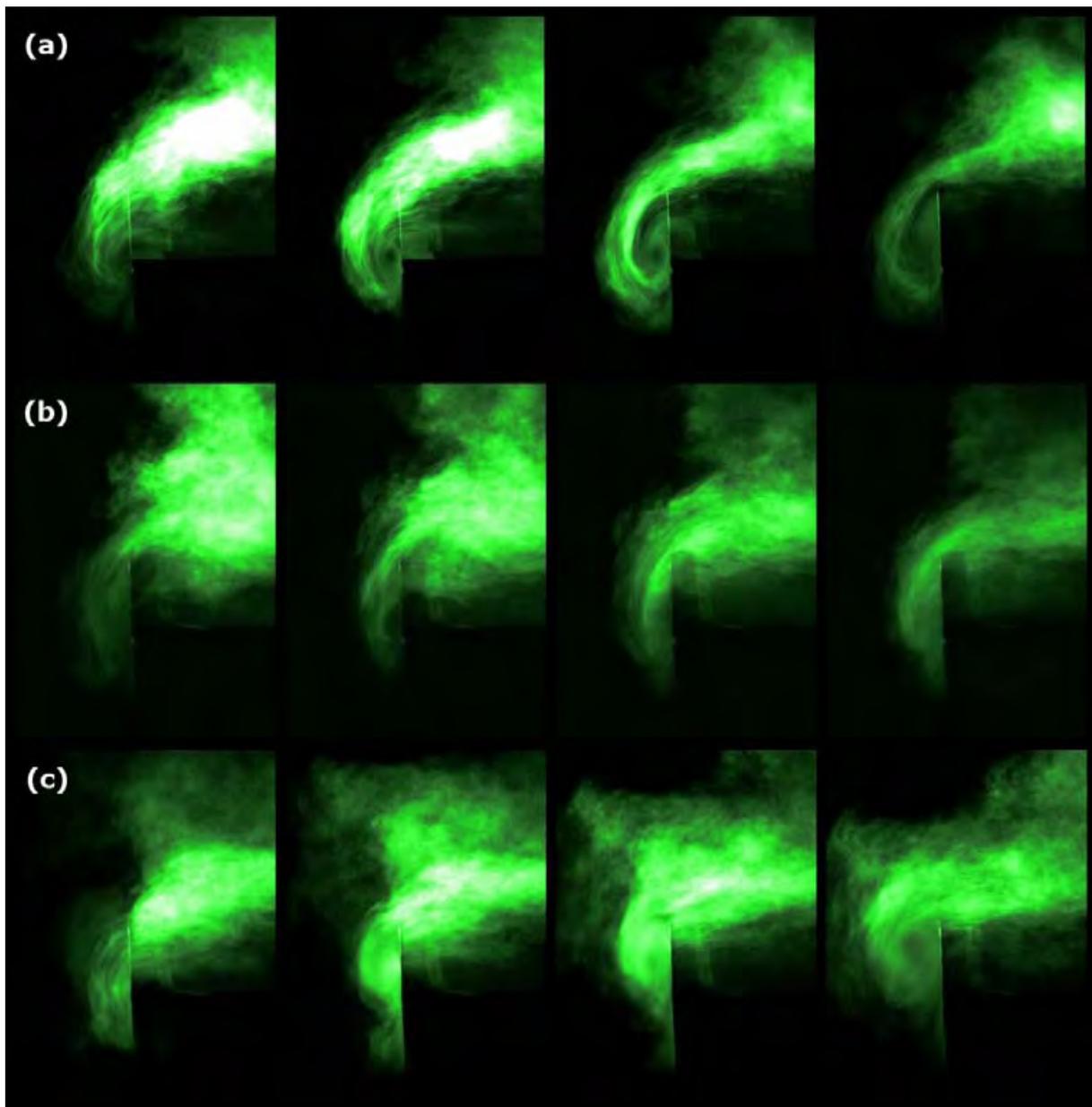


FIGURE 4.19 – Visualisation par fumigène de l’écoulement pour les configurations : (a) de référence, (b) “dessus45” avec soufflage actif, “dessus” avec soufflage actif; temps inter-image de 0.05 secondes,  $U_0 = 8$  m/s et  $U_{\text{soufflage}} = 30$  m/s.

à l’intérieur de l’enveloppe tourbillonnaire ne soit pas visible, il ne semble pas que le phénomène soit déstabilisé au point d’éclater.

Le dernier prototype de soufflage, “côté45”, donne d’excellents résultats en terme de modification de la topologie de l’écoulement. La structure tourbillonnaire de montant de baie a complètement disparu. Le fait de souffler plus ou moins parallèlement à la vitre empêche l’écoulement de contournement de s’enrouler pour former le tourbillon primaire, et de même pour former le tourbillon secondaire.

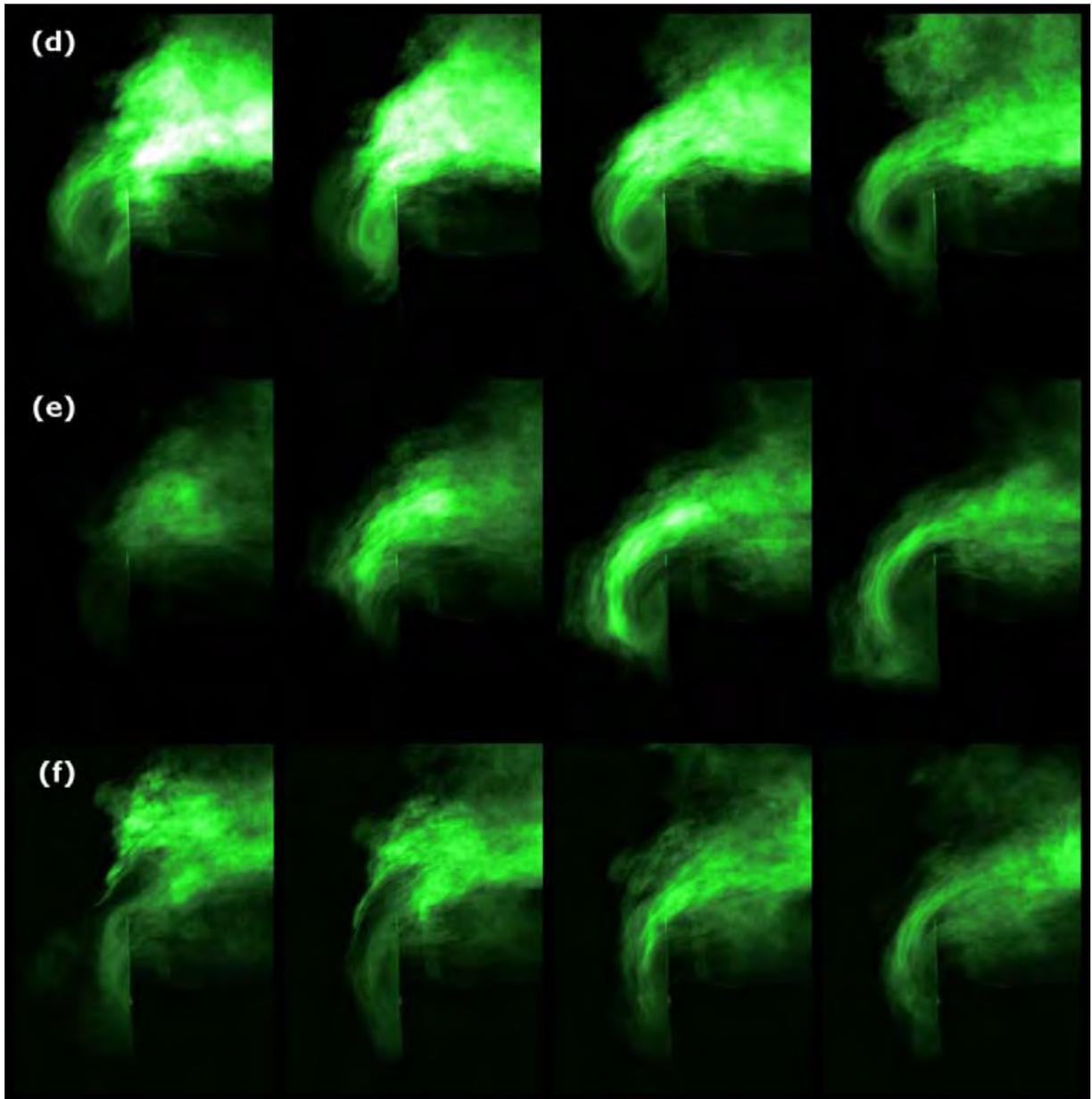


FIGURE 4.20 – Visualisation par fumigène de l’écoulement pour les configurations : (d) “45” avec soufflage actif; (e) “côté” avec soufflage actif; (f) “côté45” avec soufflage actif; temps inter-image de 0.05 secondes,  $U_0 = 8$  m/s et  $U_{\text{soufflage}} = 30$  m/s.

## 4.5 Bilan

Comme nous avons pu le voir à travers les résultats précédents, le contrôle “passif” ne permet pas de modifier de façon significative la topologie de l’écoulement de contournement de montant de baie. Toutefois, comme le démontrent les courbes des coupes (i) et (ii), de petites modifications, en termes de module de vitesse et d’énergie cinétique des fluctuations, sont observées. Or, nous savons que la majorité des fluctuations de pression à la paroi est générée exactement dans la zone de plus fortes modifications. Nous concluons donc sur la possibilité qu’un tel dispositif puisse malgré tout modifier le bruit ressenti dans l’habitacle.

Bien qu’aucune mesure de coefficient de traînée n’ait été faite, nous supposons que ces différents dispositifs de contrôle, en vue des faibles modifications apportées à la topologie de l’écoulement, ont une influence extrêmement faible sur le  $C_x$  du véhicule. L’apparition d’une petite structure turbulente supplémentaire due au collecteur, dans le cas du contrôle “dessus45”, “dessus”, “45”, “côté” et “côté45”, nous inciterait à prévoir une légère dégradation du  $C_x$ .

A la vue des résultats obtenus par soufflage “actif”, on peut donc conclure sur l’efficacité du soufflage “actif” sur le contrôle de l’écoulement de contournement de montant de baie. A partir de l’emplacement des jets et l’angle avec lequel on souffle, on peut obtenir des résultats très différents (de la disparition au grossissement de la structure tourbillonnaire) et cela avec une vitesse de soufflage identique. Il est toutefois difficile de prédire laquelle de ces techniques de contrôle aura le plus d’effet sur l’acoustique de l’habitacle. En effet, lorsque l’on regarde la cartographie de  $P_{RMS}$  à la paroi pour la configuration “côté45” (figure 4.21), on s’aperçoit que celle-ci est fortement modifiée mais que des zones de fortes fluctuations subsistent avec des valeurs même supérieures que sans contrôle.

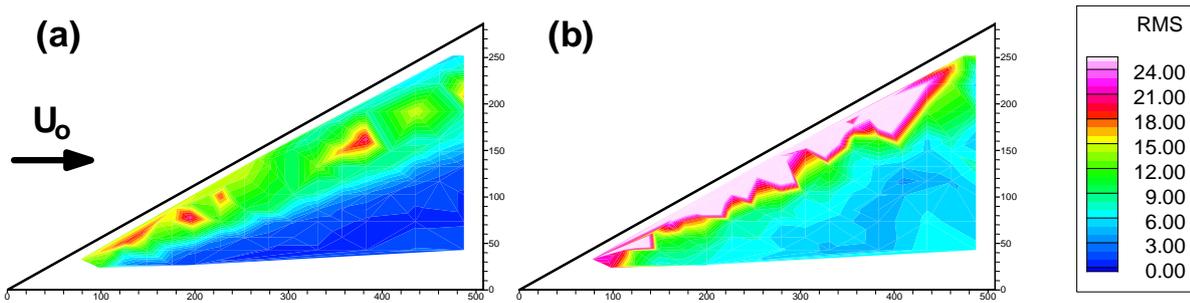


FIGURE 4.21 – Cartographie de  $P_{RMS}$  à la paroi pour les configurations : (a) “référence” et (b) “côté45” avec soufflage actif;  $V_0 = 8$  m/s.

Notons qu’en terme de réduction de la traînée, le soufflage “côté45” et “dessus45” semblent être les plus prometteurs car ils font disparaître la structure tourbillonnaire de montant de baie.

Nous pouvons donc conclure sur la faisabilité de contrôler l’écoulement de contournement de montant de baie à partir d’un dispositif de soufflage par fentes discontinues disposées le long de l’arête. En faisant varier l’orientation et l’emplacement des jets, on a démontré que ces paramètres avaient une influence sur le résultat.

En terme d’acoustique, il est impossible de conclure à partir de ces essais. Le soufflage “passif” génère uniquement de petites modifications, mais celles-ci sont localisées dans la région la plus importante de la vitre latérale. Le soufflage “actif” génère de telles modifications sur la topologie de l’écoulement qu’il doit forcément y avoir une évolution au niveau de l’acoustique. Il nous est cependant impossible de prédire si ces évolutions sont propices ou néfastes à l’acoustique dans l’habitacle du véhicule.

Au niveau de la traînée, le soufflage “passif” et le contrôle par générateur de vortex n’ont probablement que très peu d’influence alors que le soufflage “actif” fait, selon les cas, complètement disparaître les structures tourbillonnaires.

D'une façon plus générale, ces essais ayant eu lieu sur une géométrie simplifiée de partie avant d'une voiture, et n'ayant pas directement accès à des mesures acoustiques, il est indispensable de faire des essais sur véhicule réel. Le soufflage "actif côté45" et le prototype à "fentes" semblent être les deux montant les plus intéressants en terme de réduction du bruit, respectivement pour le contrôle "actif" et le contrôle "passif".

Il existe deux autres axes de contrôle que nous avons envisagés. Pour des raisons de calendrier, ils ont été directement testé sur le véhicule réel. Néanmoins, voici dans les grandes lignes leur modes de fonctionnement :

### Cils

Le contrôle du décollement et donc de l'écoulement à l'aide d'une paroi cillée est une thématique de recherche extrêmement récente. Les travaux les plus complets sur le sujet sont ceux de [Dauplain \*et al.\* \(2008\)](#) et [Favier \*et al.\* \(2009\)](#). Ce dernier a obtenu par simulation numérique des résultats très prometteurs sur la réduction de traînée derrière un cylindre cillé ainsi que sur la phase des allées de Karman (figure 4.22).

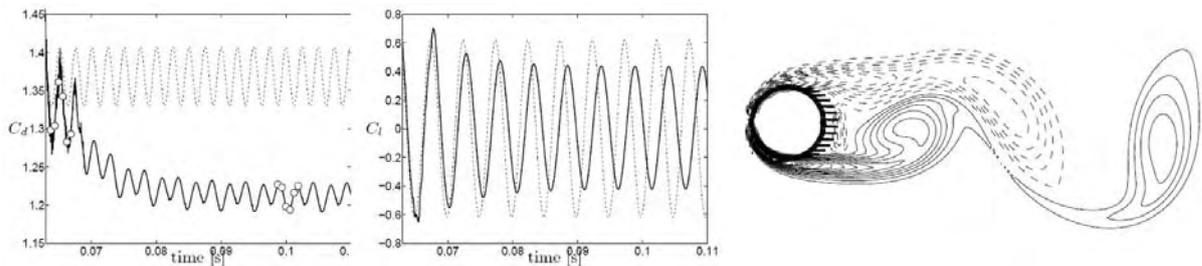


FIGURE 4.22 – Coefficient aérodynamique sans contrôle (pointillés) et avec contrôle (gras). Coefficient de traînée (gauche). Coefficient de portance (centre). Contour de la vorticité instantanée (positive en continu et négative en pointillés, à droite) [[Favier \*et al.\* \(2009\)](#)].

### Paroi compliant 

Les travaux de recherche sur les parois compliantes ont commencé avec les travaux de [Gray \(1936\)](#) dans lesquels il crédite la rapidité de déplacement des dauphins à leur peau souple. Depuis il y a eu beaucoup de publications sur le sujet [entre autres, [Kramer \(1957, 1960\)](#), [Gad-El-Hak \(2000\)](#), [Guaus & Bottaro \(2007\)](#), [Hoepffner \*et al.\* \(2009\)](#)] dans le but de comprendre cette instabilité et surtout d'arriver à la reproduire et à la modéliser (figure 4.23). Sous l'action de l'écoulement, des ondes sont générées à la paroi compliant  et se propagent le long de la structure (ou de la peau de dauphin, figure 4.23) retardant ainsi la transition vers la turbulence. Bien que ce procédé de contrôle ne s'applique pas directement à l'écoulement décollé autour d'une géométrie à arêtes vives comme c'est le cas sur la maquette Demha30, on peut imaginer l'appliquer à un montant de baie avec un rayon de courbure. Pour ces raisons, un prototype a été usiné pour les essais sur véhicule (cf chapitre 5) mais aucun prototype n'a été usiné pour Demha30.

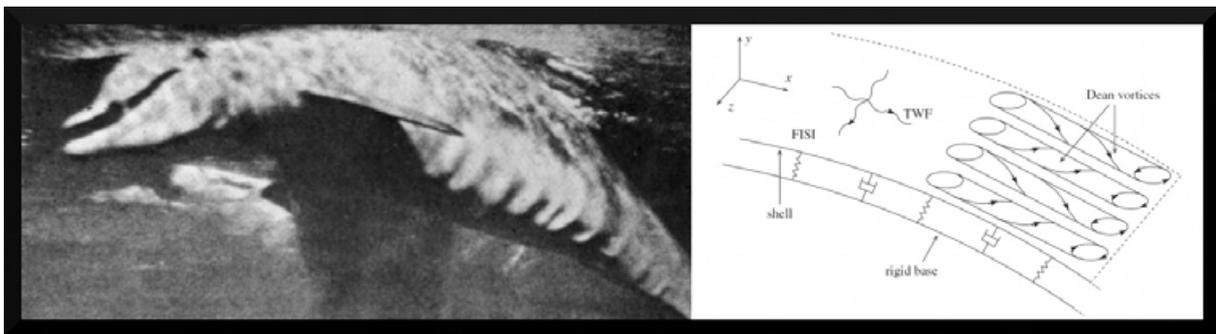


FIGURE 4.23 – Plis de forme sinusoïdale apparaissant sur le ventre du dauphin pendant la nage rapide [Aleyev (1977), à gauche]. Modélisation de la paroi compliante [Guaus & Bottaro (2007), à droite].

# Chapitre 5

## Prototypes pour Peugeot 1007

### Sommaire

---

<b>5.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>73</b>
<b>5.2</b>	<b>Brevets existants</b>	<b>74</b>
5.2.1	Aspiration et/ou soufflage	74
5.2.2	Générateurs de vortex	76
5.2.3	Jets synthétiques	77
<b>5.3</b>	<b>Définition des essais</b>	<b>77</b>
5.3.1	Prototypes	77
5.3.2	Véhicule	79
5.3.3	Protocole d'essai	80
<b>5.4</b>	<b>Résultats préliminaires et analyse</b>	<b>81</b>
5.4.1	Prototypes "soufflage dessus", "soufflage côté" et "ouïes"	82
5.4.2	Prototypes "dents de scie", "VG108" et "VG18"	87
5.4.3	Prototypes "lamelle rigide" et "lamelle souple"	89
5.4.4	Prototypes "gazon", "gazon gel" et "paillason"	89
<b>5.5</b>	<b>Conclusions</b>	<b>92</b>

---

### 5.1 Introduction

Le but de la thèse étant le développement de montants de baie nouvelle génération, des prototypes pour véhicule ont été réalisés sur la base des études faites en soufflerie sur la maquette. Les pré-requis pour ces nouveaux montants de baie étaient :

- modifier l'écoulement autour du montant de baie de sorte à améliorer le confort acoustique dans l'habitacle ;
- un faible coût de production ;
- une simplicité de production et d'installation ;
- le respect du design des véhicules ;
- ne pas être en conflit avec un brevet déjà existant sur le sujet.

Ce chapitre présente des résultats préliminaires obtenus sur des prototypes de montant de baie intégrant des dispositifs de contrôle de l'écoulement inspirés des tests sur maquette en soufflerie.

## 5.2 Brevets existants

Le domaine du contrôle de l'écoulement autour d'un véhicule a déjà été le sujet de nombreuses études industrielles et donc en conséquence de bien des brevets. En 1924, alors que l'automobile n'en est qu'à ses débuts, les néerlandais de la N.V. Instituut voor Aero-En Hydro-Dynamiek déposaient le premier brevet visant à améliorer les performances des véhicules à l'aide de dispositifs d'aspiration et de soufflage [Bert (1925)]. Bien que peu abouti, ce brevet met en évidence les premières tentatives d'augmentation des performances aérodynamiques par soufflage et aspiration dans le but de supprimer "la chute de vitesse" à la paroi.

Aujourd'hui il existe de nombreux brevets relatifs à l'aérodynamique externe automobile. Les applications ne concernent, bien évidemment, pas uniquement le contrôle de l'écoulement de montant de baie mais aussi le contrôle des tourbillons de sillage ou tout autre instabilité générée autour du véhicule. Les brevets ne présentent pas toujours l'emplacement où se trouvent les dispositifs mais parfois traitent uniquement de la méthode de contrôle employée. Le brevet GB9121455 de Rolls Royce PLC [Nelson *et al.* (1991)], par exemple, présente un contrôle en boucle fermée de la couche limite mais n'est cependant pas lié de façon spécifique à l'automobile. Toutes ces informations doivent donc être prises en compte lors de la veille, technologique et scientifique sur le sujet.

On trouve trois méthodes de contrôle privilégiées par les constructeurs automobiles et les organismes de recherche :

1. l'aspiration et/ou soufflage ;
2. les générateurs de vortex ;
3. les jets synthétiques.

Le principe physique derrière chacune de ces méthodes ayant été décrit dans le chapitre précédent, nous ne reviendrons donc pas dessus. Nous allons seulement nous intéresser aux différentes approches et mises en place de ces dispositifs.

### 5.2.1 Aspiration et/ou soufflage

Le dispositif d'aspiration/soufflage comprend un moyen mécanique permettant d'aspirer de l'air ou bien d'en souffler le long d'une fente ou d'un trou de sorte à recoller une partie de l'écoulement ou bien à localement accélérer celui-ci. Renault SA est même allé jusqu'à coupler ces deux méthodes dans une même application : l'air est aspiré le long de la ligne d'attachement et ensuite refoulé près des structures tourbillonnaires de sorte à les accélérer jusqu'à éclatement de celles-ci [Gilliéron & Lehugeur (2004)].

Un autre couplage que l'on retrouve dans plusieurs brevets [Cornacchia & Giusto (1989), Englar (1999), Takahashi (1983)] est le principe d'un collecteur passif en amont du véhicule générant ensuite un soufflage à l'emplacement désiré sur le véhicule. Cela dit, ils possèdent généralement une restriction qui les rend inapplicable à notre problème précis : le brevet IT8967817 de Fiat Auto SPA [Cornacchia & Giusto (1989)] ou bien encore le brevet US5863090 de Georgia Tech. Res. Inst. [Englar (1999)] sont cantonnés aux voitures de courses ; le brevet JP58026683 de Honda Motor Co. Ltd. [Takahashi (1983)]

est restreint à un collecteur se trouvant au niveau de la grille avant du véhicule.

Les brevets liés spécifiquement à l'automobile et mettant en jeu l'aspiration ou le soufflage sont souvent uniquement à l'état de concepts déposés et non de projet abouti. Un groupe de recherche américain de San Diego a proposé d'aspirer la couche limite tout autour d'un véhicule à partir de chambres vides maintenues au niveau désiré à l'aide d'un microprocesseur [Gazdzinski (2000)]. Ce type de contrôle en boucle fermée est plus efficace et moins gourmand en terme d'énergie. Cela dit, il est aussi nettement plus complexe à mettre en œuvre et aucune information à ce sujet n'apparaît dans le brevet. De même, le fait d'aspirer engendre un problème majeur, l'obstruction des sections d'aspiration. Pour remédier à ce problème, ils proposent d'utiliser des centrifugeuses permettant de séparer les particules et l'humidité de l'air. Ce brevet décrit en détail une idée avec sa mise en place et son fonctionnement, mais qui n'a dépendant jamais été réalisée sur véhicule et reste donc au stade de projet.

Enfin, le brevet qui est peut-être le plus abouti et en rapport direct avec le contrôle des tourbillons de montant de baie par soufflage dans le but de diminuer le bruit dans l'habitacle est celui de Fournier (1997). Les différentes sources de nuisance sonore y sont bien identifiées, et la dite invention a pour but de réduire le bruit d'origine aérodynamique et accessoirement la traînée. La physique du phénomène y est décrite dans ses grandes lignes : "l'écoulement relatif de l'air par rapport au véhicule décolle de la paroi, délimitant avec elle une bulle de décollement, puis recolte, du fait de la présence des parties saillantes ou rentrantes extérieures du véhicule ; il en résulte d'importantes variations de la pression pariétale dans les zones décollées et tourbillonnaires de l'écoulement, surtout au voisinage des lignes de recollement. Ces variations excitent la vibration des parois de l'habitacle, engendrant du bruit à l'intérieur de ce dernier". Les méthodes de contrôle proposées sont les suivantes :

1. soufflage en aval de la partie saillante du montant de baie dans le but d'éviter la formation de la structure tourbillonnaire ;
2. aspiration en amont de la partie saillante du montant pour aspirer la couche limite et éviter le décollement ;
3. aspiration en aval de la partie saillante afin d'aspirer la zone de recirculation (figure 5.1).

Bien que ce dernier brevet soit nettement abouti, allant même jusqu'à donner un ordre de grandeur du gain que l'on peut ainsi obtenir, il n'existe à l'heure actuelle aucun véhicule muni d'un tel dispositif.

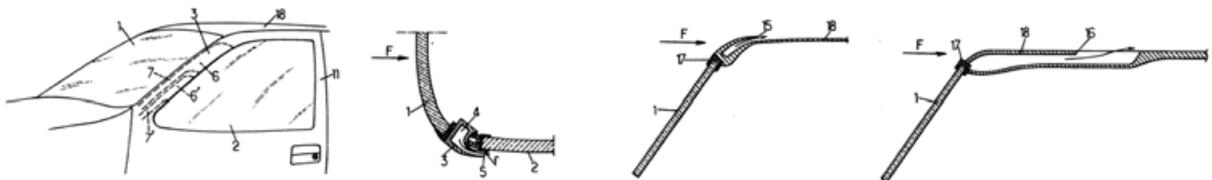


FIGURE 5.1 – Schéma théorique de montants de baie munis d'un système de soufflage, (brevet FR2744689).

### 5.2.2 Générateurs de vortex

Le contrôle par générateurs de vortex est une solution qui, du point de vue industriel, est relativement optimale car simple de production et peu onéreuse. C'est sûrement pour ces raisons que leur utilisation est devenue monnaie courante dans l'aéronautique. Cependant, on tarde à les voir apparaître dans le monde de l'automobile et cela est dû à plusieurs facteurs :

1. Les obligations vis-à-vis de la sécurité routière interdisent toutes formes saillantes ou potentiellement dangereuses pour les piétons de dépasser des côtés du véhicule.
2. Le souci du design empêche l'installation de générateurs de vortex tout autour du véhicule.

C'est sur ce deuxième point que Peugeot Citroën SA a trouvé une solution élégante : les générateurs de vortex de leur concept-car Citroën Airlounge se rétractent lorsque celui-ci est à l'arrêt ou se déplace à faible vitesse [Aider *et al.* (2004), Aider & Hillairet (2005), Selaquet *et al.* (2005), figure 5.2]. Dans les autres cas, les générateurs de vortex se présentent comme une rangée d'obstacles, généralement triangulaires, non rétractables, placés sur le toit ou le bécquet du véhicule, voire même sur les rétroviseurs comme sur certains modèles de BMW. On les trouve majoritairement sur des véhicules particuliers du type Logan 'Renault Eco<sup>2</sup>' Concept, Mitsubishi Lancer Evolution, etc.

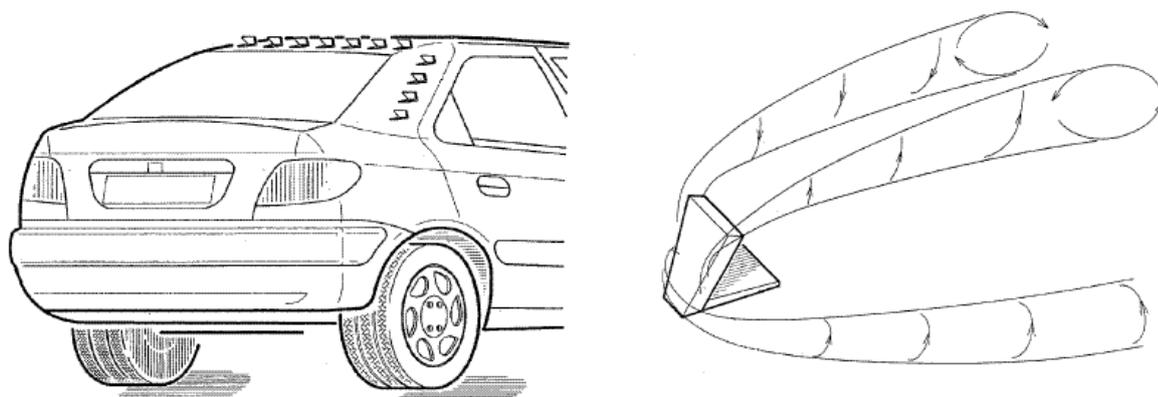


FIGURE 5.2 – Arrière de véhicule muni de générateurs de vortex et représentation schématique de leur principe physique de génération de tourbillon (brevet EP147739A1).

Néanmoins, le contrôle par générateur de vortex est habituellement appliqué dans le but de réduire la traînée et non d'améliorer les caractéristiques acoustiques du véhicule, et rare sont ceux qui s'attaquent au problème du tourbillon de montant de baie. Le brevet EP147739A1 [Aider *et al.* (2004)] mentionne la possibilité de venir disposer des petites pièces perturbatrices dans la zone du montant de baie mais ne mentionne rien au sujet du mécanisme physique qui permettrait de contrôler l'écoulement. Tandis que le brevet FR2848521 [Gilliéron (2002)] propose un dispositif susceptible de venir directement interférer avec le tourbillon de montant de baie, mais uniquement dans le but de diminuer la traînée. De plus, ce dernier dispositif présente un contrôle actif, s'adaptant aux conditions de l'écoulement. Ce dernier point est important étant donné qu'une configuration géométrique particulière peut donner d'excellents résultats dans un cas, et une dégradation des

performances du véhicule dans un autre cas.

Enfin, il existe un dernier type de générateur de vortex qui fonctionne sur le principe de cavités ou sillons, générant de la même façon que les obstacles, des structures tourbillonnaires qui viennent interagissent dans la couche limite ou avec des structures de l'écoulement [Wheeler (1982)].

### 5.2.3 Jets synthétiques

Le jet synthétique constitue la troisième grande famille de moyens de contrôle qui est de nos jours employée et étudiée. A mi-chemin entre l'aspiration/soufflage et les générateurs de vortex, il donne des meilleurs résultats à plus faible coût énergétique que l'aspiration/soufflage et ne présente pas les problèmes de design et de sécurité auxquels on peut être confronté avec les générateurs de vortex. Toutefois, ce type d'actionneur est relativement récent et c'est pourquoi il existe encore peu de brevets sur ce sujet.

Le brevet le plus abouti et le plus en accord avec notre sujet est probablement celui de C.R.F. Societa Consortile per Azioni [Casella & Tregnago (2005)] qui se rapporte directement au contrôle aérodynamique d'un véhicule motorisé utilisant des jets synthétiques. Il y est explicitement mentionné que le système permet de contrôler l'écoulement aérodynamique et donc en conséquence le bruit, et cela tout aussi bien sur la partie arrière du véhicule que sur les montants de baie. Cependant, cette étude reste relativement théorique et ce dispositif n'est présent sur aucun véhicule ou concept-car.

Il existe beaucoup d'autres brevets en rapport avec les jets synthétiques mais qui se rapportent soit à l'actionneur même, soit à une application complètement décorrélée de l'automobile.

Bien qu'il existe déjà de nombreux brevets sur le sujet, très peu sont aboutis ou ont donné suite à un prototypage. Il semblerait que seul le contrôle par générateurs de vortex commence à voir des applications concrètes dans l'automobile, et cela spécifiquement pour des problèmes de réduction de traînée liés aux tourbillons de culot.

## 5.3 Définition des essais

### 5.3.1 Prototypes

Mecaplast Group fait partie des équipementiers automobile qui produisent des montants de baie. L'un de leurs produits est le montant A pour Peugeot 1007 qui s'avère être un montant bi-composants avec un insert en polypropylène et tetraethoxypropane et une peau d'aspect en polypropylène, et qui a la particularité de se clipser à la main sur le véhicule. Ces deux caractéristiques en font un sujet d'étude idéal : le mécanisme de fixation peut rester inchangé et la peau en polypropylène est facilement usinable. Sur la base de montants déjà existants, onze prototypes de montant de baie côté passager ont été usinés, en s'appuyant sur les études faites au préalable en soufflerie sur la maquette et sur la recherche bibliographique. Ces prototypes intègrent les dispositifs suivants (figure 5.3) : soufflage dessus (1) ; soufflage côté (2) ; ouïes (3) ; dents de scie (4) ; 108 générateurs de vortex (VG108, 5) ; 18 générateurs de vortex (VG18, 6) ; lamelle rigide (7) ; lamelle

souple (8) ; gazon (9) ; gazon gel (10) ; paillason (11). Cette nomenclature sera utilisée par la suite pour faire référence aux différents prototypes.



FIGURE 5.3 – Prototypes usinés et testés pour Peugeot 1007 : (1) soufflage dessus ; (2) soufflage côté ; (3) ouïes ; (4) dents de scie ; (5) VG108 ; (6) VG18 ; (7) lamelle rigide ; (8) lamelle souple ; (9) gazon ; (10) gazon gel ; (11) paillason.

Les caractéristiques de ces prototypes sont les suivants :

- Le premier prototype, “soufflage dessus”, est la transposition directe du prototype pour la maquette “dessus”. Il est constitué d’un montant creux avec un collecteur à la base de celui-ci et de fentes à faible rapport d’aspect tout le long du montant et dirigées contre l’écoulement côté pare-brise. Le rapport de section entre l’entrée et la sortie doit, d’un point de vue théorique, permettre une accélération de l’écoulement de l’ordre de deux fois la vitesse d’entrée dans le collecteur.
- Le second prototype, “soufflage côté”, se rapproche du prototype maquette “coté 45”. Cependant la collecte d’air se fait différemment : au lieu d’un collecteur au pied du

montant comme sur le prototype “soufflage dessus”, l’air est récupéré et dévié tout le long du pare-brise pour pouvoir ensuite être soufflé de façon tangentielle à la vitre latérale par des fentes à grand rapport d’aspect. Comme précédemment, le rapport de section entrée/sortie doit permettre une accélération du fluide. Ce principe de contrôle d’écoulement est directement inspiré des travaux de [Fu & Rockwell \(2005\)](#).

- Le troisième prototype, “ouïes”, n’a pas d’équivalent sur la maquette. Il se compose d’un montant creux et d’une peau ayant quatre ouvertures en formes d’ouïes réparties de façon équidistante le long du montant. L’air ainsi récupéré par ces ouvertures est ensuite rejeté le long de la vitre par des fentes à grand rapport d’aspect.
- Le quatrième prototype, “dents de scie”, est la transposition du prototype maquette “dents de scie”. Une seconde peau d’aspect est découpée en dents de scie et collée sur la première.
- Le cinquième et le sixième prototype, “VG108” et “VG18”, sont tous les deux issus du même usinage : la peau du montant est fraisée de 108 trous de sorte à pouvoir y visser jusqu’à 108 générateurs de vortex cylindriques de 5 mm de diamètre, 20 mm de haut, espacés de 20 mm les uns des autres et cela le long de trois axes parallèles alignés avec le montant de baie.
- Le septième prototype, “lamelle rigide”, a pour principe de forcer l’apparition du tourbillon de montant de baie et d’imposer la position de la zone de décollement. Pour cela, une barrette de 20 mm de haut est placée le long du montant, côté pare-brise, et orientée face à l’écoulement, c’est-à-dire quasiment perpendiculairement à la peau d’aspect.
- Le huitième prototype, “lamelle souple”, ressemble au précédent sauf que la barrette est faite d’un matériau souple et que celle-ci est orientée vers la vitre et forme un angle d’à peu près  $45^\circ$  avec la peau d’aspect. Le principe est d’interagir avec l’écoulement avant la formation des structures tourbillonnaires, ici en laissant la lamelle libre de s’adapter à l’écoulement.
- Le neuvième et le dixième prototype, “gazon” et “gazon gel”, sont tous les deux inspirés par les travaux de [Dauplain \*et al.\* \(2008\)](#) sur le contrôle par battement de cils. Dans notre configuration, le gazon synthétique présentait les caractéristiques préconisées ; une couche de celui-ci a donc été collé sur le montant. La différence entre ces deux prototypes vient du fait que dans le deuxième cas, les cils ont été rigidifiés à l’aide de polymère. La géométrie des poils est la suivante :  $20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$ , pour une densité d’implantation de 0.064.
- Le onzième prototype, “paillason”, représente comme les deux prototypes précédents un contrôle par cils. Le paillason offre une densité d’implantation de 0.63 pour des fibres d’une géométrie de 20 mm de long et d’un diamètre de 0.5 mm. Une plaque de celui-ci a donc été collée sur un montant de baie.

### 5.3.2 Véhicule

Le véhicule utilisé pour les campagnes d’essais sur piste est une Peugeot 1007 (figure 5.4) à motorisation 1.6L essence, 16 soupapes atmo, 110 chevaux, boîte automatique et régulateur de vitesse, prêtée par Peugeot SA dans le cadre du contrat de suivi entre le GIE Renault/PSA et Mecaplast Group. Il a été équipé de la façon suivante :

- Le rétroviseur côté passager a été démonté et l’arceau ainsi mis à jour a été recouvert de pâte à modeler pour former un bulbe à la forme la plus aérodynamique possible.

- Les discontinuités de la carrosserie au niveau de la porte avant passager et de la partie droite du capot ont été recouvertes d'une couche de scotch à large bande pour éviter l'apparition d'instabilités et de nuisances sonores.
- Le toit ouvrant et les vitres arrières ont été calfeutrés avec de la mousse isolante.
- Quatre accéléromètres mono-axe axial PCB ont été collés sur les vitres avant droites (respectivement un au centre de la petite vitre (1) et trois, en haut à l'avant (2), en bas à l'avant (3) et au centre (4) de la grande vitre, figure 5.4).
- Deux microphones Brüel & Kjaer TEDS 200V 1/2" champ libre ont été attachés à l'appui tête avant côté passager.
- Le matériel électronique était relié à un frontal d'acquisition Müller BBM embarquable MKII qui fonctionne sous PAK Müller BBM 5.4 SR11 et le tout a été alimenté par un transformateur lui-même relié à la prise allume-cigare.

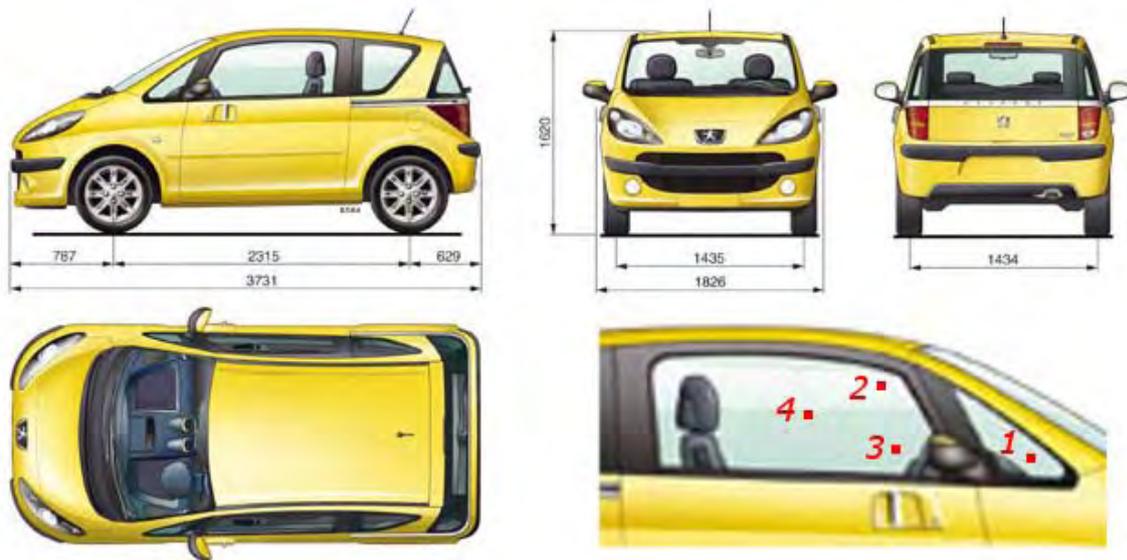


FIGURE 5.4 – Dimensions d'une Peugeot 1007 et emplacement des quatre accéléromètres sur la vitre avant coté passager (carrés rouges).

### 5.3.3 Protocole d'essai

Les essais ont eu lieu au CRITTM2A, Centre de Recherche d'Innovation Technique en Moteurs et Acoustique Automobile, qui se trouve au parc de la Porte Nord à Bruay-la-Buissière (62) et où Mecaplast possède une unité de recherche. En plus de la mise à disposition de matériel de mesures et d'une équipe spécialisée dans les mesures acoustiques, le centre dispose d'une piste de 800 mètres de long (figure 5.5) permettant de faire des mesures sur route, jusqu'à 130km/h, dans des conditions réelles d'utilisation du véhicule.

Les essais ont été étalés sur deux jours (J1 et J2) à trois mois d'intervalle l'un de l'autre. Ce type d'essais est très délicat sur piste car il faut prendre en compte de nombreux éléments extérieurs et la répétabilité est difficile à assurer. Il est important, par exemple, de

prendre en compte la direction et la vitesse du vent au moment des essais. Idéalement ce type de mesures acoustiques sont faites en soufflerie anéchoïde pour s'affranchir de ces problèmes. Cependant le protocole d'essais fut le même, ainsi que le matériel de mesure utilisé et l'emplacement des capteurs. Cela dit, une mesure de référence a été refaite lors du deuxième jour d'essai et chaque prototype est comparé à la mesure de référence de son jour d'essai respectif. Chaque mesure a été faite trois fois et présente une très bonne répétabilité à court terme ; les résultats présentés par la suite correspondent à la moyenne de ces trois mesures. Cependant, si on compare les mesures de référence des deux différents jours d'essais, on s'aperçoit qu'il y a une bonne répétabilité à long terme des spectres audio (seulement 3.6% de fluctuation) mais que ce n'est pas du tout le cas des spectres de vibration (plus de 100% de fluctuation). L'origine de ces variations n'a pu être isolée, faute de temps disponible. Il est cependant probable que les conditions d'installation des accéléromètres (température, quantité de colle, positionnement) puissent affecter la reproductibilité des mesures. Dans tous les cas, cela représente un premier résultat : on observe une décorrélation entre les variations du spectre de la vitre et le bruit perçu dans l'habitacle.

Le protocole d'essai était le suivant :

1. Même zone de mesure sur la piste et même direction (est-ouest).
2. Trois mesures à 90km/h et trois mesures à 130km/h.
3. Réglage et stabilisation de la vitesse du véhicule à l'aide du régulateur de vitesse digital.
4. Temps d'acquisition de 3 secondes.



FIGURE 5.5 – Vue aérienne du CRITTM2A et de sa piste de 800 mètres (distance entre les deux rond-points).

## 5.4 Résultats préliminaires et analyse

Lors des essais, les accéléromètres et les microphones ont enregistré un signal instationnaire permettant de suivre en temps réel les oscillations des deux vitres avant, coté droit, ainsi que le bruit dans l'habitacle. Le post-traitement des accéléromètres est assez classique : une simple transformée de Fourier permet d'obtenir le spectre en fréquence de la mesure, que l'on peut par la suite comparer à un autre spectre (par exemple la mesure

de référence). L'amplitude des oscillations et les fréquences respectives sont des grandeurs physiques objectives. Inversement, le bruit est quelque chose de beaucoup plus subjectif. La raison à cela est que le corps humain, et particulièrement l'oreille, agissent comme des filtres conduisant à une perception différente d'une personne à une autre. Lors de la comparaison de signaux sonores, il faut donc prendre en compte leur intensité mais surtout, dans le cadre d'une étude acoustique comme la nôtre, la sonie, c'est à dire la quantification de la perception du bruit chez l'être humain. Fletcher & Munson (1933) définissent la sonie comme "un terme psychologique utilisé pour décrire la magnitude d'une sensation audible et dépendant du nombre total de pulsations nerveuses qui atteignent le cerveau par seconde". Bien que ces auteurs aient essayé de mettre le problème sous forme d'équation, leur étude reste basée sur une méthode empirique fondée, du fait de sa complexité, sur le point de vue personnel et subjectif de participants volontaires à l'étude. Tout de même, les courbes isotoniques de Fletcher-Munson ont été utilisées comme référence jusqu'en 1956, date à laquelle Robinson & Dadson (1956a) redéterminèrent ces courbes en se basant sur des techniques de mesure plus modernes et un plus grand échantillon de volontaires (figure 5.6). Cette deuxième étude donna des résultats plus réguliers et ne fut révisée qu'en 2003 pour être remplacée par les courbes de la norme ISO 226 : 2003 qui se basent sur plusieurs études internationales (figure 5.6).

C'est pourquoi, lors de la comparaison des spectres audios en décibels, il est difficile de définir si oui ou non un prototype améliore les conditions sonores dans le véhicule. On peut certes comparer des plages du spectre les unes avec les autres mais donner une valeur globale du bruit rayonné ne permet pas de conclure sur le niveau de bruit perçu et le confort acoustique. Pour cela, il faut appliquer un filtre basé sur les courbes isotoniques (figure 5.6), permettant de réajuster le niveau de bruit mesuré à un niveau de bruit ressenti. Ce filtre n'est pas une fonction mathématique mais seulement un tableau de référence obtenu à partir des courbes isotoniques. Une fois ce filtre appliqué, on obtient la valeur du bruit perçu pour chaque fréquence ( $L$ ), et ce en décibels. Il est alors possible, via une somme logarithmique, d'obtenir une valeur globale du bruit ressenti dans l'habitacle ( $L_{tot}$ ) :

$$L_{tot} = 10 \log \left( \sum_{n=0}^{20kHz} 10^{L_n/10} \right) \quad (5.1)$$

valeur que l'on peut soustraire à la valeur de référence pour avoir l'évolution en décibels ( $\Delta L$ ) permettant ainsi de calculer le pourcentage d'évolution :

$$Evolution_{\%} = 10^{\Delta L/10} - 1 \quad (5.2)$$

Enfin, notons que tous les spectres d'accéléromètre présentés par la suite ont été filtrés à l'aide d'un filtre fenêtre centré où chaque valeur est moyennée sur neuf points, équivalent à une largeur de bande de 26 Hz. Cela permet une plus grande lisibilité des résultats pour une meilleure interprétation des courbes.

#### 5.4.1 Prototypes "soufflage dessus", "soufflage côté" et "ouïes"

Les trois prototypes "soufflage dessus", "soufflage côté" et "ouïes" peuvent être considérés comme faisant partie de la même famille. Bien qu'ayant un mécanisme physique différent les uns des autres, ils ont comme principe commun une collecte d'air passive et

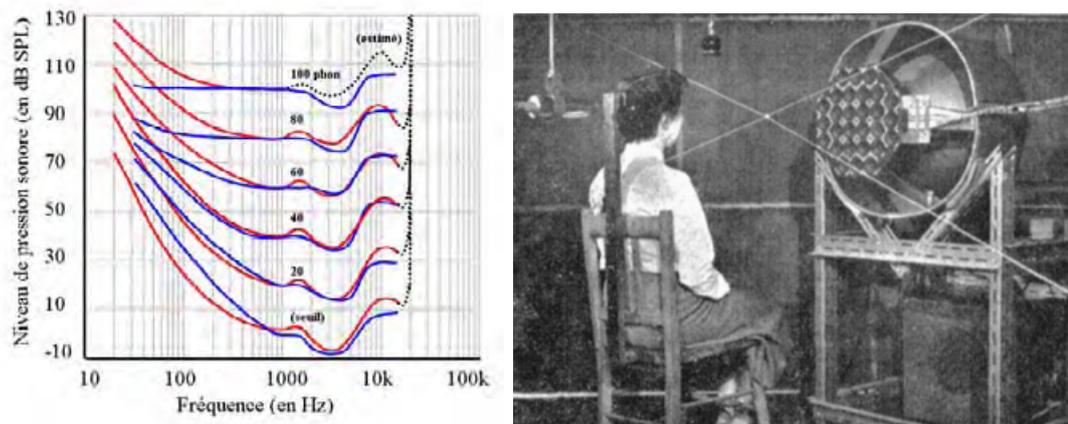


FIGURE 5.6 – (gauche) Lignes isononiques normales (rouge) suivant l’ISO 226 : 2003, courbes Fletcher-Munson (bleu) de 1933 ; (droite) Volontaire lors d’une série de mesures pour l’établissement des courbes de [Robinson & Dadson \(1956b\)](#)

un soufflage le long du montant de baie. Ils représentent une solution de contrôle passif innovante sans présenter de désaccords majeurs avec les normes de sécurité ou de design. Cependant, étant au stade du prototype, ils ne prennent pas en compte les problèmes d’encrassement, d’obstruction de la conduite ou des fentes, etc.

La première observation que l’on peut faire lorsque l’on analyse les spectres de vibration des vitres (petite, figure 5.7 ou grande, figure 5.9) obtenus à l’aide des accéléromètres pour une vitesse de 90 km/h, est qu’aucun des prototypes génère de modifications majeures (figure 5.7). Le “soufflage dessus” et les “ouïes” apportent une amélioration notable à trois fréquences spécifiques dans la plage 0 à 1000 Hz (50 Hz, 300 Hz et 540 Hz) mais aussi une forte dégradation vers 700 Hz. De façon plus globale, on constate en moyenne une légère dégradation dans les basses fréquences ( $\leq 1$  kHz), une dégradation de plus faible amplitude mais plus constante entre 1 kHz et 5.5 kHz et une amélioration sur les hautes fréquences (8 kHz à 14 kHz). Cependant les améliorations ont lieu dans une gamme du spectre ayant des amplitudes négligeables devant la partie basse du spectre (d’un facteur 100) et des amplitudes faibles devant le milieu du spectre (d’un facteur 10). Il en va de même pour le prototype “ouïes”, à l’exception d’une très forte amplification des vibrations autour de la fréquence de 350 Hz. Enfin, le prototype “soufflage côté” génère un spectre similaire dans les hautes fréquences ( $\geq 8$  kHz) mais amplifie les vibrations de façon plus notable et plus constante sur le bas et le milieu du spectre à l’exception d’une forte diminution vers 840Hz. Finalement le bilan global, d’un point de vue des amplitudes d’oscillation, est négatif : ces trois prototypes semblent exciter davantage la vitre.

Le problème de bruit dans l’habitacle est d’autant plus important quand la vitesse de déplacement du véhicule est grande. De plus, comme il a été mentionné dans l’introduction, le bruit engendré par l’écoulement de montant de baie devient prédominant lorsque l’on dépasse les 100 km/h. C’est pour cela que des mesures ont aussi été effectuées à 130 km/h. Lorsque l’on regarde les spectres ainsi obtenus (figure 5.8), on s’aperçoit, à quelques exceptions près, que les tendances sont les mêmes dans le milieu et le haut du spectre, mais amplifiées (jusqu’à un facteur 10), avec une dégradation soutenue entre 1 kHz et 9 kHz avec un pic autour de 4 kHz et une forte amélioration entre 9 kHz et 19

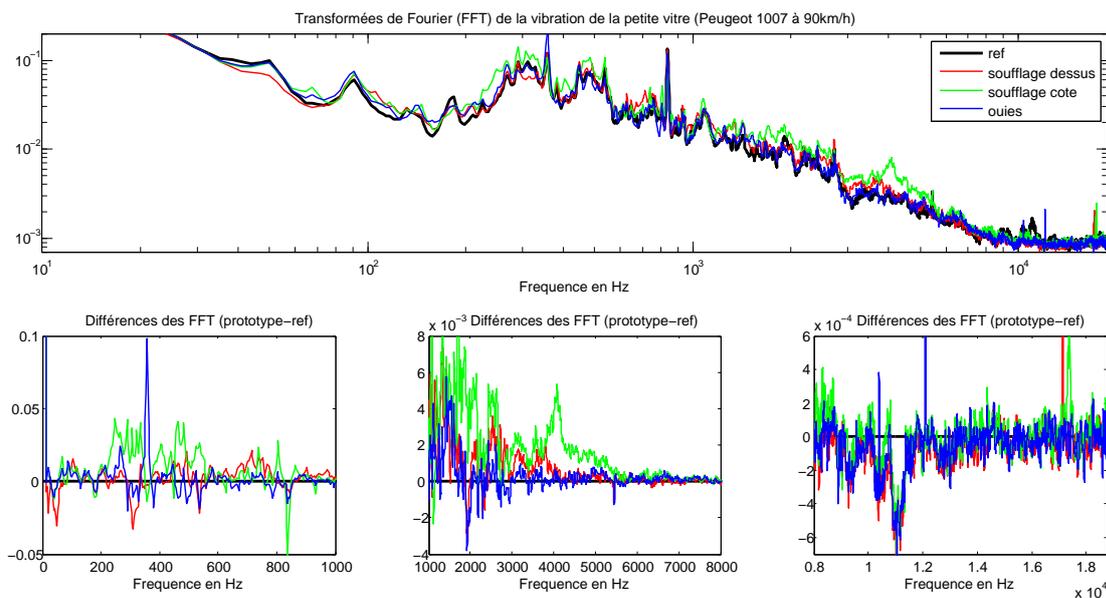


FIGURE 5.7 – Transformée de Fourier du signal enregistré par l’accéléromètre sur la petite vitre, à 90 km/h, pour les prototypes “soufflage dessus”, “soufflage côté” et “ouïes”; Evolution des spectres vis-à-vis du signal de référence pour trois bandes différentes du spectre.

kHz. La différence majeure entre les deux cas se situe au niveau des basses fréquences : la fréquence de 500 Hz présente les plus fortes atténuations ; les fréquences autour de 300 Hz présentent les plus fortes augmentations d’excitations. On peut donc conclure comme précédemment que ces trois prototypes excitent davantage la vitre.

Au vu des différences minimales entre les spectres obtenus à 90 km/h et à 130 km/h, la suite de l’étude vibratoire des vitres se restreindra aux mesures acquises à 90 km/h. Les mesures à 90 km/h ont été choisies au détriment des mesures à 130 km/h, à cause de leur plus grande fiabilité due à de meilleures conditions d’acquisition. En effet, la piste d’essai étant relativement courte, il était beaucoup plus facile d’atteindre les 90 km/h et de laisser le temps au régime moteur de se stabiliser.

Lors de l’étude des spectres de vibration de la grande vitre (figure 5.9), on arrive aux mêmes conclusions que précédemment : la tendance globale du spectre, entre la référence et les prototypes, est conservée et en moyenne, le spectre est légèrement dégradé, avec des pics à 30 Hz, 300 Hz, 70 Hz, 120 Hz, 620 Hz et 1300 Hz pour “ouïes” et 1700 Hz pour “soufflage dessus”. Cependant les vibrations sont atténuées autour de trois fréquences spécifiques, 60 Hz, 90 Hz et 950 Hz, et entre 700 et 1200 Hz. Globalement, les prototypes excitent plus la vitre. On note aussi que le spectre de la grande vitre est plus plat que celui de la petite vitre mais qu’en globalité il est plus énergétique.

On constate donc que les deux vitres ont une réponse similaire aux variations de l’écoulement engendrées par les prototypes, ce qui laisserait penser qu’aucune modification majeure n’est apportée à la topologie de l’écoulement. De plus, vu le peu d’informations supplémentaires obtenu par l’étude des spectres de la grande vitre, la suite de l’étude se fera uniquement sur la petite vitre (sauf cas d’une modification majeure du spectre de

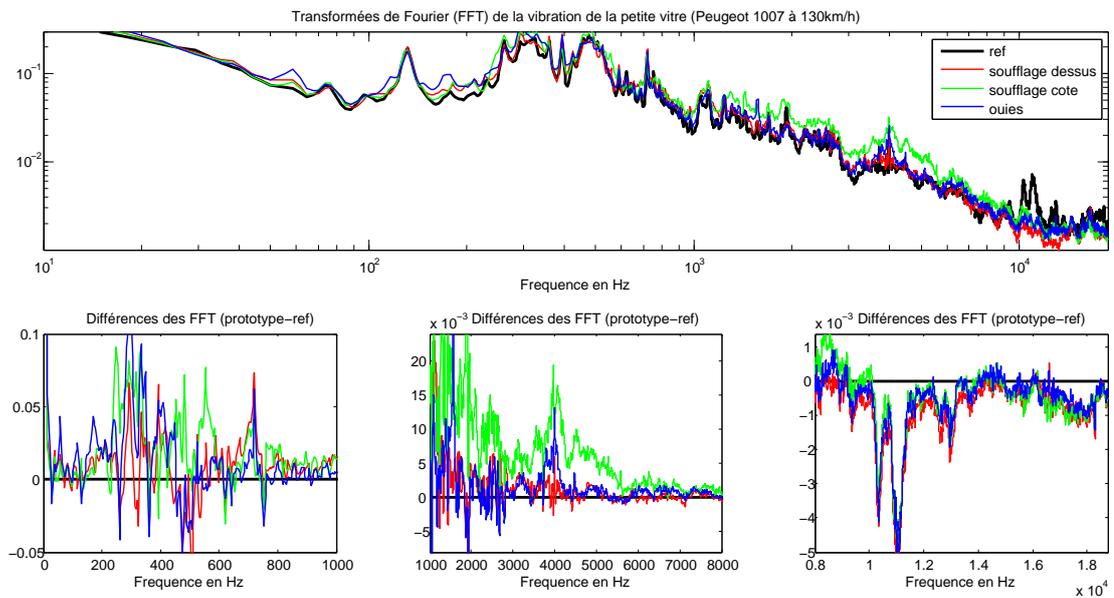


FIGURE 5.8 – Transformée de Fourier du signal enregistré par l’accéléromètre sur la petite vitre, à 130 km/h, pour les prototypes “soufflage dessus”, “soufflage côté” et “ouïes” ; Evolution des spectres vis-à-vis du signal de référence pour trois bandes différentes du spectre.

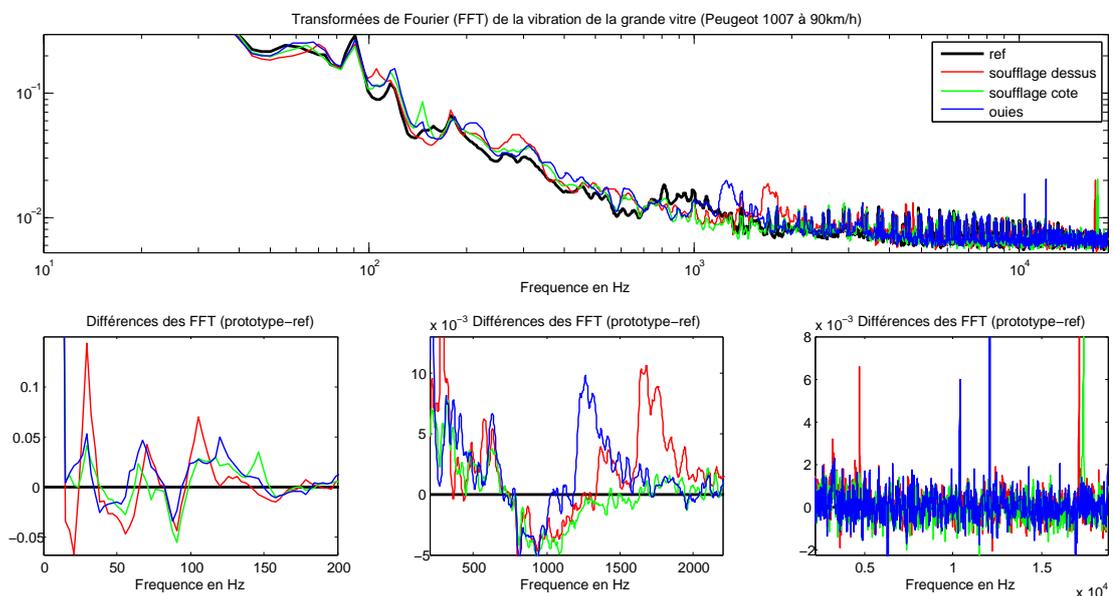


FIGURE 5.9 – Transformée de Fourier du signal enregistré par l’accéléromètre sur la grande vitre, à 90 km/h, pour les prototypes “soufflage dessus”, “soufflage côté” et “ouïes” ; Evolution des spectres vis-à-vis du signal de référence pour trois bandes différentes du spectre.

la vitre). Cette décision s’impose aussi lorsque l’on observe de plus près la géométrie du véhicule : si on extrapole la signature à la paroi du tourbillon de montant de baie, obtenue

lors des essais en soufflerie à la paroi de la Peugeot 1007, on s'aperçoit qu'elle recouvre majoritairement la petite vitre. On en conclut donc que celle-ci sera plus réceptive à de faibles modifications de l'écoulement que la grande vitre. Ceci explique pourquoi le spectre de la grande vitre est plus plat.

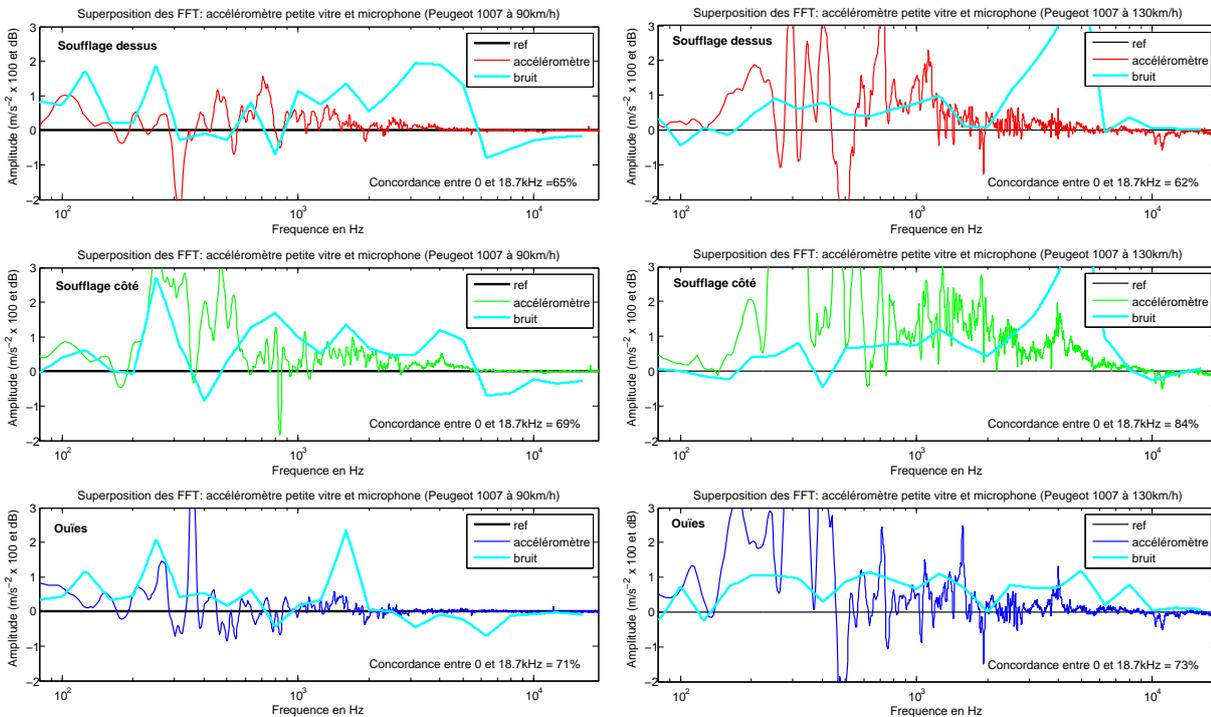


FIGURE 5.10 – Superposition des transformées de Fourier du signal enregistré par l'accéléromètre sur la petite vitre, à 90 km/h (gauche) et 130 km/h (droite) et du spectre sonore enregistré avec le microphone droit placé dans l'habitacle ; la concordance entre les deux spectres est calculée par rapport à la concordance des signes de ceux-ci.

Toutefois, le couplage entre l'excitation de la vitre et le bruit perçu dans l'habitacle est un problème physique extrêmement complexe. On ne peut pas conclure sur l'efficacité des prototypes sans :

1. Etudier la corrélation entre l'excitation des vitres et le bruit perçu.
2. Etudier les spectres de bruit enregistrés dans l'habitacle.

Pour cela nous avons superposé sur un même graphique la différence des transformées de Fourier des signaux d'accéléromètres à ceux des microphones (figure 5.10). S'il s'agit d'une relation directe voire linéaire, cela devrait apparaître lors de l'étude de la concordance des signes d'évolution. Ce calcul représente le pourcentage de fréquences pour lesquelles l'évolution du bruit et l'évolution de l'accélération de la vitre ont le même signe ; c'est à dire que ces deux paramètres sont soit tout les deux améliorés soit tout les deux dégradés. Alors que la concordance est très grande à 90 km/h pour les prototypes "soufflage côté" (90%), elle l'est nettement moins pour les prototypes "soufflage dessus" et "ouïes" (65%), voire très faible à 130 km/h (35%, 65%, 45%). Toutefois la concordance semble meilleure pour les moyennes et basses fréquences : si l'on prend en compte uniquement la plage de fréquences entre 0 et 10 kHz, on obtient les valeurs suivantes : 75%,

60%, 45% et 60%, 85%, 75% respectivement pour “soufflage dessus”, “soufflage côte” et “ouïes” pour des vitesses de 90 km/h puis de 130 km/h. Néanmoins, on s’aperçoit qu’il est nécessaire d’étudier directement le bruit perçu dans l’habitacle.

Comme on peut le constater sur la figure 5.10, il y a des fréquences auxquelles le bruit est diminué et des fréquences auxquelles le bruit est amplifié. Cependant, comme nous l’avons mentionné précédemment, la réponse de l’oreille aux fréquences audibles n’est pas linéaire. Du fait de la structure de l’oreille, les fréquences autour des 3kHz sont les mieux perçues et donc les plus gênantes, inversement un son de très faible fréquence sera ressenti comme de plus faible intensité que la valeur en décibels enregistrée par un appareil de mesure. Après application d’un filtre basé sur les courbes isosoniques, on obtient les niveaux de bruit ressentis par le passager avant (OD : oreille droite et OG : oreille gauche) reportés dans le tableau 5.1.

	90 km/h						130km/h					
	OD			OG			OD			OG		
	Bruit global dB	Gain dB	Evolution %									
Prototype:												
Référence mai	77,19		0	76,40		0	83,55		0	82,46		0
Soufflage coté	77,82	0,62	15	76,62	0,21	5	83,67	0,13	3	82,60	0,14	3
Soufflage dessus	77,99	0,79	20	76,72	0,32	8	83,80	0,25	6	82,48	0,02	0
Ouïes	77,92	0,72	18	76,88	0,47	11	84,19	0,64	16	83,09	0,63	16

TABLE 5.1 – Niveaux de bruit ressentis par le passager avant (OD : oreille droite et OG : oreille gauche), à des vitesses de 90km/h et 130km/h et le gain que cela représente en dB et en pourcentage par rapport à la mesure de référence.

On peut donc conclure qu’aucun de ces trois prototypes n’améliore le bruit ressenti dans l’habitacle. Cela est dû à différentes causes possibles : les fréquences auxquelles on amplifie l’excitation de la vitre sont des fréquences qui sont directement liées au bruit rayonné par celle-ci ; le soufflage génère lui-même du bruit ; la nouvelle géométrie des montants de baie amplifie l’intensité du tourbillon.

#### 5.4.2 Prototypes “dents de scie”, “VG108” et “VG18”

Les trois prototypes “dents de scie”, “VG108” et “VG18” ont comme principe de générer des tourbillons en proche paroi. C’est pour cette raison qu’ils sont comparés entre eux. Cependant il faut noter que le prototype “dent de scie” n’a pas été testé durant la même campagne de mesures que les deux autres prototypes. Il est donc comparé à la mesure de référence enregistrée lors de la campagne de mai et non de juillet.

Ce que l’on peut observer (figure 5.11) sur les spectres de vibrations de la petite vitre pour une vitesse de 90 km/h, est que :

1. Le prototype “dents de scie” génère bien plus de perturbations que les deux autres prototypes, l’amplitude des modifications étant bien plus importante que pour les montants de baie “VG108” et “VG18”.
2. Dans les basses fréquences, entre 0 et 2000 Hz, le prototype “dent de scie” a tendance à diminuer l’amplitude des vibrations (dans les gammes 500-1000 Hz et 1600-2000 Hz) alors que “VG18” la diminue de façon notable uniquement autour de la fréquence de 300 Hz et “VG108” à la fréquence de 30 Hz, mais l’amplifie considérablement autour de 300 Hz et 800 Hz.

3. Dans le milieu du spectre, les montants “VG” amplifient les vibrations de la vitre de façon significative entre 2440 et 3300 Hz et le montant “dents de scie” entre 4200 et 5600 Hz mais avec une intensité quatre fois supérieure aux deux autres prototypes.
4. Dans les hautes fréquences, “VG18” amplifie plus les vibrations que “VG108”, cependant “dents de scie” reste nettement plus perturbateur (d’un facteur 10) avec une forte diminution des vibrations entre 8600 et 12600 Hz.

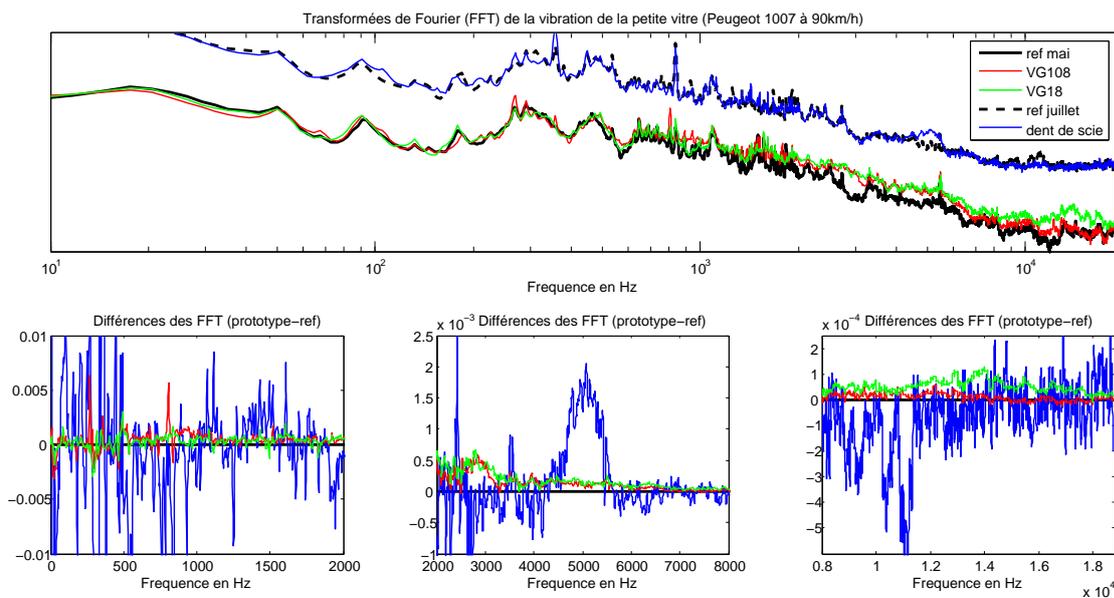


FIGURE 5.11 – Transformée de Fourier du signal enregistré par l’accéléromètre sur la grande vitre, à 90 km/h, pour les prototypes “dent de scie”, “VG108” et “VG18” ; Evolution des spectres vis-à-vis du signal de référence pour trois bandes différentes du spectre.

De manière plus globale, ces trois prototypes engendrent tous une augmentation de l’excitation de la vitre. Comme précédemment, ces spectres ne permettent pas de définir si les prototypes améliorent ou non le confort sonore dans le véhicule. Pour cela, il faut calculer le bruit ressenti dans le véhicule (tableau 5.2).

	90 km/h						130km/h					
	OD			OG			OD			OG		
	Bruit global dB	Gain dB	Evolution %									
Prototype:												
Référence mai	77,19		0	76,40		0	83,55		0	82,46		0
Dent de scie	77,36	0,16	4	76,38	-0,02	-1	83,71	0,16	4	82,48	0,02	0
Référence juillet	78,19		0	77,05		0	84,41		0	82,99		0
VG18	77,88	-0,30	-7	76,46	-0,58	-13	84,15	-0,26	-6	83,12	0,13	3
VG108	78,17	-0,01	0	76,79	-0,26	-6	83,91	-0,50	-11	82,61	-0,37	-8

TABLE 5.2 – Niveaux de bruit ressentis par le passager avant (OD : oreille droite et OG : oreille gauche), à des vitesses de 90 km/h et 130 km/h et gain en dB et en pourcentage par rapport à la mesure de référence.

Le prototype “dents de scie” augmente très légèrement le niveau de bruit ressenti dans l’habitacle. Par contre, les deux autres prototypes diminuent de quelques dixièmes de

décibels ce bruit, jusqu'à  $-0.58$  dB pour l'oreille gauche du passager avant à 90 km/h avec le prototype "VG18". Les meilleurs résultats globaux sont d'ailleurs obtenus par cette configuration. Cependant cette amélioration est nettement dégradée à 130 km/h. A cette vitesse-là, le montant de baie "VG108" procure une plus grande atténuation du bruit.

De façon plus générale, on constate qu'il est possible d'obtenir une diminution du bruit intérieur, et cela malgré une augmentation de l'excitation de la vitre ; cela prouve bien une fois de plus de la complexité du couplage élasto-acoustique dans ce problème.

### 5.4.3 Prototypes "lamelle rigide" et "lamelle souple"

Les deux prototypes "lamelle rigide" et "lamelle souple" sont fondés sur la même idée qui consiste à fixer la ligne de décollement de l'écoulement de sorte à imposer la zone d'interaction entre le tourbillon de montant de baie et le véhicule. Dans le cas de la lamelle rigide, celle-ci est placée très près du pare-brise. Elle mesure 20 mm de haut pour 3 mm d'épaisseur et fait toute la longueur du montant. Physiquement, le tourbillon se retrouve alors à interagir fortement avec le montant avant d'interagir avec la vitre.

Le principe de la lamelle souple est similaire sauf que cette fois-ci, elle est placée tangentielllement au montant et non perpendiculairement à lui, éloignant le tourbillon de la vitre et générant une petite cavité. De plus, le choix d'une lamelle souple devait permettre à la lamelle de s'adapter à l'écoulement de sorte à produire le maximum de modifications par rapport à l'écoulement non perturbé.

Ce que l'on observe sur le spectre des accéléromètres (figure 5.12) est, qu'en dépit des modifications apportées à l'écoulement, la vitre est tout de même plus excitée en configuration prototype qu'en configuration de référence. Il y a très peu de fréquences pour lesquelles l'amplitude est diminuée. Cependant les spectres sont bien moins "chaotiques" que précédemment. On observe d'ailleurs quelques fréquences distinctes d'augmentation de l'amplitude : 310, 470, 2600, 5350, 7500 et 14500 Hz pour "lamelle rigide" et 270, 840, 2700, 3650, 4350 et 13500 Hz pour "lamelle souple" ; et une diminution globale sur la plage de 0 à 50 Hz pour les deux configurations testées.

Ces dispositifs semblent donner de très bons résultats de diminution de bruit ressenti pour une vitesse de déplacement de 90 km/h. Cette tendance est cependant atténuée lorsque l'on roule à 130 km/h avec même une dégradation du ressenti de l'oreille gauche dans le cas de la lamelle rigide. On observe aussi que la tendance s'inverse entre 90 km/h et 130 km/h : le prototype "lamelle rigide" est plus efficace dans le premier cas et l'est moins dans le second cas (tableau 5.3).

### 5.4.4 Prototypes "gazon", "gazon gel" et "paillasson"

Les trois derniers prototypes "gazon", "gazon gel" et "paillasson" sont inspirés des travaux récents de Dauplain *et al.* (2008) et proposent une solution innovante bien qu'inapplicable au monde automobile, au moins à court terme, pour des raisons de design et d'entretien. Cela dit, il a été démontré qu'une paroi avec cils pouvait avoir des effets notables sur l'écoulement autour d'un cylindre ou d'un profil d'aile. Basés sur ces résultats, trois prototypes ont été créés avec les caractéristiques de cils suivantes :

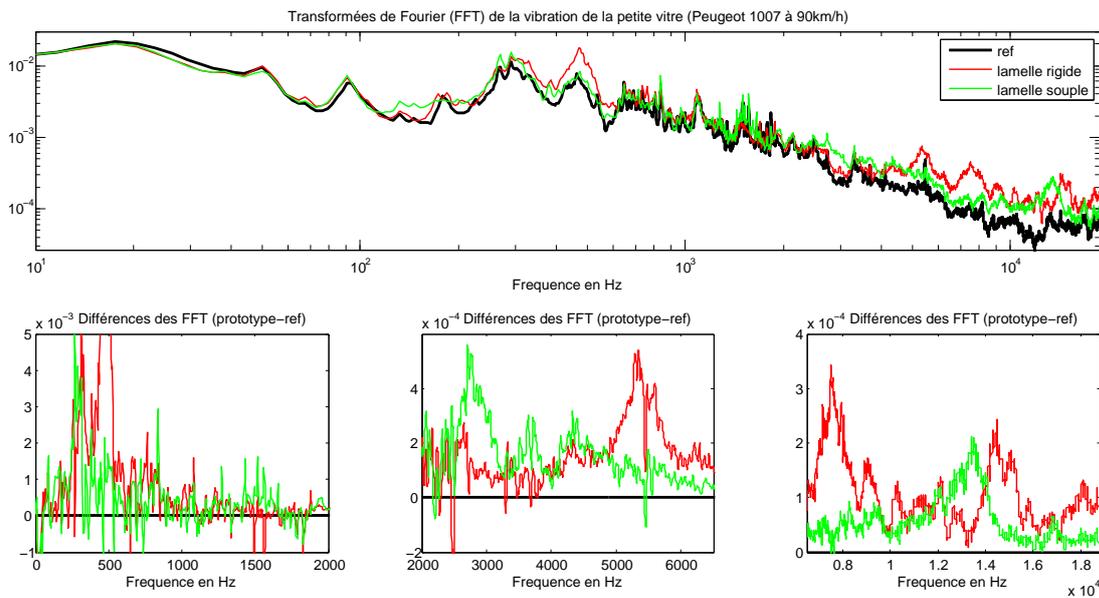


FIGURE 5.12 – Transformée de Fourier du signal enregistré par l’accéléromètre sur la grande vitre, à 90 km/h, pour les prototypes “lamelle rigide” et “lamelle souple” ; Evolution des spectres vis-à-vis du signal de référence pour trois bandes différentes du spectre.

	90 km/h						130km/h					
	OD			OG			OD			OG		
	Bruit global dB	Gain dB	Evolution %									
Prototype: Référence juillet	78,19		0	77,05		0	84,41		0	82,99		0
Lamelle rigide	77,25	-0,93	-19	75,55	-1,50	-29	84,35	-0,06	-1	83,02	0,03	1
Lamelle souple	77,51	-0,68	-14	76,20	-0,85	-18	84,09	-0,31	-7	82,76	-0,23	-5

TABLE 5.3 – Niveaux de bruit ressentis par le passager avant (OD : oreille droite et OG : oreille gauche), à des vitesses de 90 km/h et 130 km/h et gain en dB et en pourcentage par rapport à la mesure de référence.

1. “gazon” est fabriqué à partir de lamelles de PVC de 1 mm × 0.4 mm de section pour une longueur de 20 mm et une densité de 16 cils/cm<sup>2</sup> ; le densité d’implantation pour ce prototype est de 0.064.
2. “gazon gel” a les mêmes caractéristiques que le prototype précédent, à l’exception de la rigidité des cils qui a été augmentée à l’aide d’un agent fixant.
3. Les cils du prototype “paillason” sont obtenus à partir de paille, les rendant extrêmement inhomogènes mais d’un diamètre moyen de 0.5 mm et d’une longueur moyenne de 20 mm ; une densité approximative de 300 cils/cm<sup>2</sup> a été mesurée conduisant à une densité d’implantation de 0.60.

L’étude des spectres obtenus par accéléromètre (figure 5.13) donne des résultats similaires aux précédents. Aucune modification majeure n’est apportée. Il y a une diminution notable entre 0 et 50 Hz, ainsi qu’à 300 Hz et de façon plus globale les fréquences auxquelles l’amplitude est diminuée se trouvent uniquement entre 0 et 3800 Hz. Une forte augmentation de l’excitation est observée entre 4 et 6 kHz et, de plus, pour le prototype

“gazon” à 8, 11 et 14 kHz.

On peut cependant faire certaines remarques vis-à-vis de l’effet de la rigidité des poils : plus les poils sont rigides, moins l’excitation de la vitre est augmentée et plus on se trouve dans les hautes fréquences, plus cette tendance est marquée.

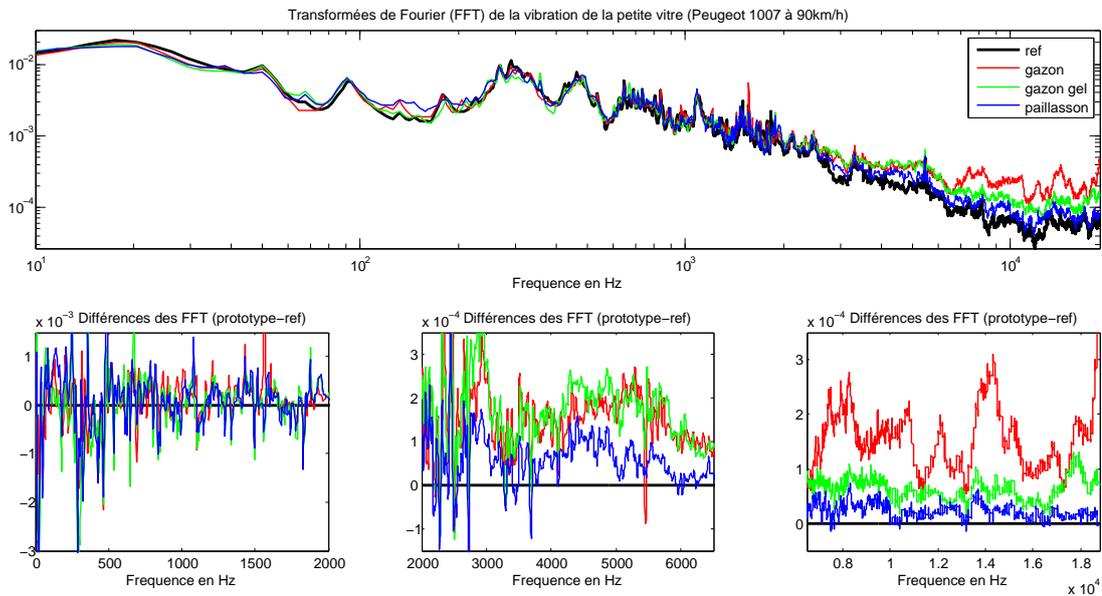


FIGURE 5.13 – Transformée de Fourier du signal enregistré par l’accéléromètre sur la grande vitre, à 90 km/h, pour les prototypes “lamelle rigide” et “lamelle souple” ; Evolution des spectres vis-à-vis du signal de référence pour trois bandes différentes du spectre.

Comme lors de l’étude des prototypes précédents, on peut difficilement conclure sans l’étude du bruit global perçu dans le véhicule. Malheureusement, en raison de problèmes techniques le jour des essais, ces données sont incomplètes et seuls les enregistrements à 90 km/h sont disponibles. On observe tout de même une nette amélioration du niveau sonore perçu dans l’habitacle, amélioration croissante avec la rigidité des cils (tableau 5.4).

	90 km/h						130km/h					
	OD			OG			OD			OG		
	Bruit global dB	Gain dB	Evolution %									
Prototype:												
Référence juillet	78,19		0	77,05		0	84,41		0	82,99		0
Gazon	77,20	-0,98	-20	76,13	-0,91	-19	NA		NA	NA		NA
Gazon gel	76,97	-1,21	-24	75,91	-1,13	-23	NA		NA	NA		NA
Paillason	76,87	-1,32	-26	75,73	-1,32	-26	NA		NA	NA		NA

TABLE 5.4 – Niveaux de bruit ressentis par le passager avant (OD : oreille droite et OG : oreille gauche), à des vitesses de 90 km/h et 130 km/h et gain en dB et en pourcentage par rapport à la mesure de référence.

Cependant, comme nous l’avons constaté précédemment, certains prototypes peuvent, à 90 km/h, diminuer le bruit ressenti mais à 130 km/h augmenter celui-ci. Il est donc impossible, sur la base de nos connaissances, d’extrapoler le bruit global à 130 km/h.

## 5.5 Conclusions

Les résultats préliminaires obtenus lors de ces essais montrent deux tendances. Tout d’abord, les montants munis d’un système de soufflage par collecteur, c’est-à-dire “soufflage côté”, “soufflage dessus” et “ouies” augmentent globalement le niveau de bruit ressenti dans le véhicule. Néanmoins leurs performances augmentent avec l’augmentation de la vitesse du véhicule. D’autre part, les prototypes de montants ne mettant pas en jeu un système de soufflage semblent améliorer le niveau de bruit ressenti dans le véhicule ; toutefois, leurs performances diminuent, voire s’annulent, avec l’augmentation de la vitesse (tableau 5.5).

	90 km/h						130km/h					
	OD			OG			OD			OG		
	Bruit global dB	Gain dB	Evolution %									
Prototype:												
Référence mai	77,19		0	76,40		0	83,55		0	82,46		0
Soufflage côté	77,82	0,62	15	76,62	0,21	5	83,67	0,13	3	82,60	0,14	3
Soufflage dessus	77,99	0,79	20	76,72	0,32	8	83,80	0,25	6	82,48	0,02	0
Ouies	77,92	0,72	18	76,88	0,47	11	84,19	0,64	16	83,09	0,63	16
Dent de scie	77,36	0,16	4	76,38	-0,02	-1	83,71	0,16	4	82,48	0,02	0
Référence juillet	78,19		0	77,05		0	84,41		0	82,99		0
Lamelle rigide	77,25	-0,93	-19	75,55	-1,50	-29	84,35	-0,06	-1	83,02	0,03	1
Lamelle souple	77,51	-0,68	-14	76,20	-0,85	-18	84,09	-0,31	-7	82,76	-0,23	-5
VG18	77,88	-0,30	-7	76,46	-0,58	-13	84,15	-0,26	-6	83,12	0,13	3
VG108	78,17	-0,01	0	76,79	-0,26	-6	83,91	-0,50	-11	82,61	-0,37	-8
Gazon	77,20	-0,98	-20	76,13	-0,91	-19	NA		NA	NA		NA
Gazon gel	76,97	-1,21	-24	75,91	-1,13	-23	NA		NA	NA		NA
Paillasson	76,87	-1,32	-26	75,73	-1,32	-26	NA		NA	NA		NA

TABLE 5.5 – Résumé du niveau de bruit ressenti par le passager avant (OD : oreille droite et OG : oreille gauche), à des vitesses de 90 km/h et 130 km/h et gain en dB et en pourcentage par rapport à la mesure de référence pour les onze prototypes testés.

D’une façon générale, les prototypes donnant les résultats les plus prometteurs sont les montants à cils (“gazon”, “gazon gel” et “paillasson” dans l’ordre croissant des performances). Cependant, ces prototypes semblent difficilement adaptables aux applications industrielles grand public. Pour cette raison, les prototypes présentant le meilleur rapport performances/contraintes industrielles sont “lamelle rigide” et “lamelle souple”. On observe enfin que le soufflage passif ne semble pas être une bonne approche pour les véhicules à faible vitesse de déplacement.

On a aussi observé une forte décorrélation entre le bruit perçu dans l’habitacle et l’excitation des vitres avant. Dans la majorité des cas étudiés, on observe une forte augmentation de l’excitation sur la majorité du spectre et tout de même une diminution du niveau de bruit ressenti. Cependant, en regardant les spectres de plus près, on s’aperçoit qu’il y a une amélioration quasi systématique dans les très basses fréquences, entre 0 et 200 Hz. Or, en appliquant la règle classique d’acoustique stipulant que “seules les fréquences se trouvant entre -0 dB et -10 dB de la fréquence maximale sont entendues et ressenties”, on s’aperçoit que seules les fréquences inférieures à 300 Hz jouent un rôle important dans le ressenti acoustique global. On en conclut donc sur l’importance de contrôler les phénomènes à basse fréquence et nous pouvons faire l’hypothèse suivante : une réduction de l’excitation des vitres dans les très basses fréquences est susceptible de générer une forte amélioration du bruit ressenti, et ce même si l’excitation de la vitre dans les moyennes et hautes fréquences est augmentée.

Bien que ces résultats soient potentiellement intéressants, ils ont été obtenus lors de seulement deux campagnes de mesures distinctes avec des conditions extérieures variables, des problèmes techniques au cours des mesures, et des prototypes différents à chaque campagne. Tout cela engendre des incertitudes quant à la répétabilité des observations faites, répétabilité non observée au niveau de la mesure de référence. C'est pour ces raisons qu'une troisième campagne de mesures, plus exhaustive en termes de d'essais et de temps serait préconisée pour pouvoir valider ou remettre en question ces résultats de façon définitive.

Cela dit, les résultats préliminaires présentés dans ce chapitre sont des résultats relatifs à une mesure de référence propre à la journée d'essai. C'est leur répétabilité qui est remise en cause et non leur validité. Idéalement, une validation par essais en soufflerie industrielle, du type M2A, permettrait l'obtention d'une base de données irréfutable.



# Chapitre 6

## Conclusions et perspectives

### Sommaire

---

<b>6.1</b>	<b>Conclusions</b>	<b>95</b>
<b>6.2</b>	<b>Perspectives</b>	<b>97</b>
6.2.1	Approche expérimentale	97
6.2.2	Approche théorique	97
6.2.3	Approche numérique	98

---

### 6.1 Conclusions

L'écoulement de contournement de montant de baie présente un grand nombre de particularités physiques associées à son caractère tridimensionnel, instationnaire et tourbillonnaire. C'est un écoulement extrêmement complexe et finalement relativement peu étudié par le passé. Nous avons donc trois objectifs lors de ce travail de recherche :

1. Caractériser la topologie de l'écoulement de façon exhaustive.
2. Adapter des méthodes de contrôle passif à une telle géométrie.
3. Réaliser un montant de baie nouvelle génération à coût minime pour un véhicule réel.

La présente étude a été menée de façon expérimentale, sur un modèle de véhicule extrêmement simplifié et sur un véhicule réel.

Un important travail de mise en place de mesures expérimentales a donc été fait (PIV basse fréquence, PIV haute fréquence, fil chaud, pression stationnaire et instationnaire, mesures acoustiques). De même, un important travail de développement d'outils d'analyse de données expérimentales a été effectué (traitement PIV, traitement du signal, filtrage POD).

A partir de ces bases, il nous a été possible d'étudier en détail la topologie de l'écoulement de montant de baie. La cartographie de  $C_p$  nous a permis de calibrer notre configuration expérimentale. Les mesures PIV nous ont permis d'obtenir des informations spatio-temporelles du phénomène. Nous avons montré que dans le cas d'un montant de baie à angle droit, le phénomène était de section elliptique et constitué de deux structures

tourbillonnaires distinctes : un tourbillon primaire et un tourbillon secondaire contrarotatif de plus faibles intensité et dimensions.

A partir de l'énergie cinétique des fluctuations, nous avons défini que la zone de recollement située entre le tourbillon primaire et le tourbillon secondaire était la zone la plus propice à l'excitation de la vitre.

L'étude instationnaire du phénomène a permis de mettre en avant la dynamique du tourbillon primaire, ses fréquences d'excitation et ses déplacements.

Enfin, afin de mieux définir l'importance de l'arête vive sur la topologie de l'écoulement, un montant arrondi a été testé. La topologie de l'écoulement ainsi observée est fondamentalement différente et ne présente pas de structure tourbillonnaire à proprement parler mais une couche de cisaillement soumise à des instabilités de type Kelvin-Helmholtz.

L'écoulement de contournement de montant de baie a ensuite été contrôlé à l'aide de dispositifs de soufflage par fentes discontinues disposées le long de l'arête. Le contrôle par soufflage "passif" n'a que peu d'influence sur la topologie de l'écoulement tellement celui-ci est robuste. Nous avons néanmoins démontré à l'aide d'un soufflage "actif" que l'orientation et l'emplacement des jets avaient une influence sur l'écoulement.

Les résultats ont ensuite été transposés sur véhicule réel donnant lieu à onze prototypes de montants de baie nouvelle génération. Deux grandes tendances ont ainsi été observées : les montants munis d'un système de soufflage "passif" dégradent le niveau de bruit ressenti dans le véhicule ; les prototypes de montants ne mettant pas en jeu un système de soufflage améliorent légèrement le niveau de bruit ressenti dans le véhicule.

D'une façon plus globale, les prototypes donnant les résultats les plus prometteurs en terme d'acoustique sont les montants à cils. Les prototypes présentant le meilleur rapport performances/contraintes industrielles sont les prototypes munis de lamelle. Une *enveloppe Soleau* reprenant ces deux concepts de montant de baie nouvelle génération a été déposée.

## 6.2 Perspectives

Bien que beaucoup de travail ait été effectué pour définir la topologie et la dynamique de l'écoulement de montant de baie, le sujet est tellement complexe qu'il offre encore beaucoup de pistes à étudier. Nous avons entamé trois approches différentes ou complémentaires permettant d'approfondir nos connaissances sur le sujet : l'approche expérimentale, l'approche théorique et l'approche numérique.

### 6.2.1 Approche expérimentale

Afin de pouvoir faire un lien direct entre les mesures faites en soufflerie sur la maquette Demha30 et les mesures faites sur véhicule (Peugeot 1007 dans notre cas), une série de mesures de pressions pariétales instationnaires est nécessaire. Les mesures permettraient de s'assurer que la cartographie de pression RMS est similaire et de définir si, à partir de mesures faites sur la maquette, il est possible de prédire les répercussions dans le cas d'un véhicule réel. Il est cependant extrêmement difficile d'avoir accès aux fluctuations de pression en proche paroi, et cela sans interagir avec l'écoulement. Nous avons donc prévu de procéder de la même façon que sur la maquette ; à partir de micro B&K placés dans des cavités de la vitre. Cela reste la méthode la moins intrusive que nous ayons à notre disposition. Le problème est que le verre se perce difficilement surtout lorsque l'on veut une précision sub millimétrique. Nous avons donc usiné une vitre avant côté passager en aluminium. Le choix de l'aluminium s'est imposé pour ses facilités d'usinage et ses caractéristiques physiques proches du verre (figure 6.1). Une série de 21 trous devait permettre de valider la méthode avant d'usiner l'intégralité de la vitre. Toutefois, pour des raisons de planning liées à des problèmes budgétaires, les essais n'ont pu être réalisés.



FIGURE 6.1 – Vitre en aluminium permettant de faire des mesures de pression pariétale non intrusives lors d'essais sur Peugeot 1007.

### 6.2.2 Approche théorique

Nous avons observé grâce à la PIV haute fréquence les instationnarités du tourbillon primaire. Cependant nous sommes encore loin de bien les comprendre. Nous avons vu

que la structure tourbillonnaire se déplaçait de façon relativement chaotique autour de sa position d'équilibre. Une étude théorique de la stabilité de l'écoulement permettrait d'apporter des réponses quant à la dynamique intrinsèque du phénomène. Pour cela on peut procéder à une transformation conforme de l'écoulement de montant de baie afin de se placer dans le cas d'un écoulement en proche paroi infini (figure 6.2). En modélisant les tourbillons primaire et secondaire par des tourbillons ponctuels associés à des tourbillons images, il est possible d'étudier la stabilité du système ainsi reproduit (cf. Annexe C).

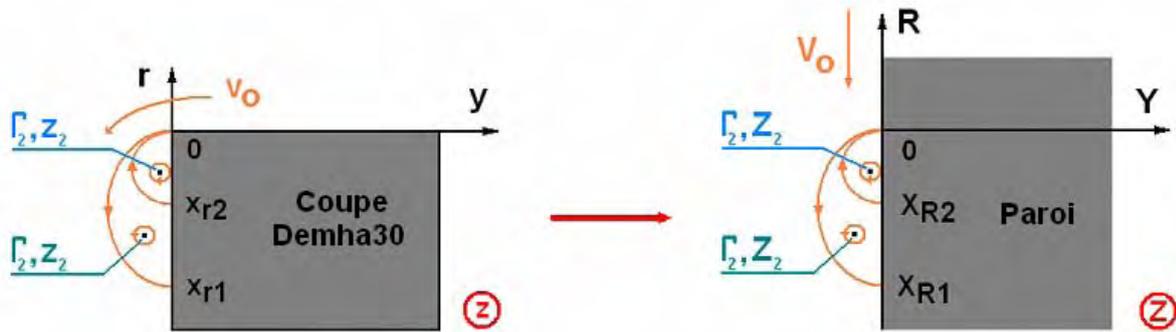


FIGURE 6.2 – Transformation conforme permettant de passer de la configuration d'un écoulement de contournement à celui d'un écoulement le long d'une paroi.

### 6.2.3 Approche numérique

A partir des connaissances acquises lors du travail de thèse, il est possible de calibrer une étude numérique dans le cas d'une géométrie similaire. Un tel procédé permettrait par la suite de faire des simulations d'écoulements contrôlés directement à partir du modèle numérique. Ce domaine a très peu été abordé vu l'ampleur des travaux expérimentaux qu'il y avait à mettre en place. Un autre aspect numérique a toutefois été évoqué, l'interaction fluide-structure. Nous avons commencé à développer un outil permettant à partir de mesures de pression instationnaire de calculer la déformation temporelle de la paroi (figure 6.3) et donc d'en définir ses fréquences de vibrations. Ces fréquences sont directement liées au bruit perçu dans l'habitacle. L'outil a donc été testé avec des mesures de pression faites en séries et non en parallèles comme il serait nécessaire pour capter les interactions spatio-temporelles. Toutefois, la méthode a été testée et donne des résultats prometteurs (cf. Annexe B).

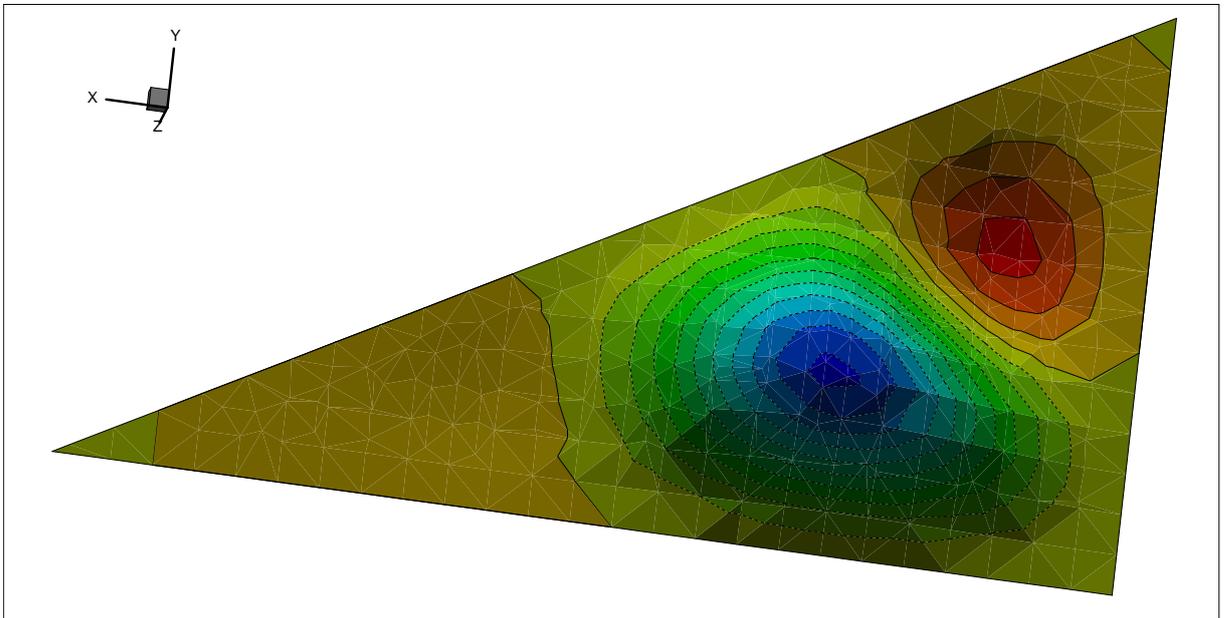


FIGURE 6.3 – Déformation de la paroi à un instant donné sous la contrainte de fluctuations de pression instationnaires.



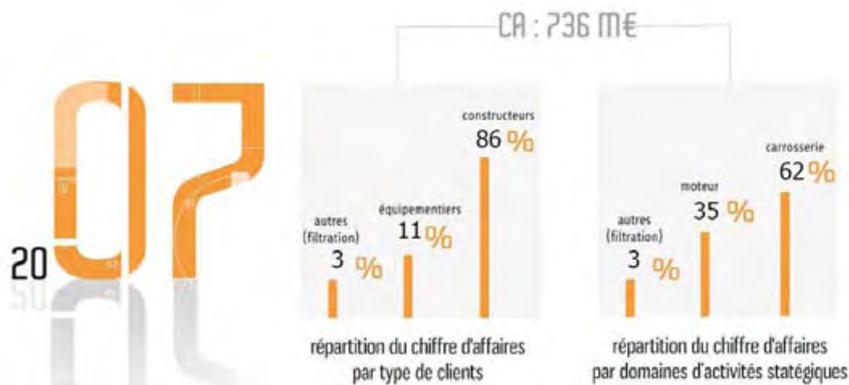
# Annexe A

## Mecaplast Group



MECAPLAST Group est un des leaders européens de l'équipement automobile. Créé en 1955 par Charles Manni, le groupe conçoit, développe et fabrique des pièces et systèmes complets pour la carrosserie et le moteur des véhicules. Il est aujourd'hui dirigé par Thierry Manni et réalise un chiffre d'affaires de 759 millions d'euros dont 736 millions d'euros pour l'activité automobile. Les 6200 collaborateurs sont implantés dans 17 pays afin de servir les marchés automobiles à travers le monde.

### A.1 Les chiffres du Groupe



## A.2 Les moyens du Groupe

- En terme de moyens humains, le Groupe dispose de 730 ingénieurs et techniciens travaillant en ingénierie simultanée avec les clients dans le monde entier.
- En terme de moyens d'essais et de validation, MECAPLAST Group dispose de 9 centres d'essais et de validation, 1 centre acoustique et 1 piste d'essais. Ces bureaux d'études sont entièrement voués au développement des pièces et à la conception d'outillages. Le studio de design intégré permet de proposer aux clients des concepts innovants.
- En terme de moyens industriels, outre l'injection plastique, le Groupe maîtrise de nombreuses technologies de transformation, d'assemblage et de décoration des plastiques, métaux et textiles.

MECAPLAST Group développe des solutions innovantes par leur prix, poids, performance et adéquation aux attentes de leurs clients. Le groupe veille à l'optimisation des moyens de production dans une démarche de qualité et de progrès permanent.

## A.3 Les innovations

- Soudure infrarouge Freeweld  
Atouts : grande liberté de conception/respect des exigences de propreté  
Applications : pièces moteur, etc.
- Injection assistée par gaz  
Atouts : intégration de fonctions  
Applications : tuyaux d'eau, couvre-culasse, etc.
- Thermocompression de matières fibreuses à base de fibres de verre, végétales ou de déchets  
Atouts : réduction de l'utilisation de matières fossiles  
Applications : tablettes arrières, coques de sièges, insonorisation habitacle et moteur, etc.
- Insonorisant écologique FiLLEAS  
Atouts : fabrication d'insonorisants écologiques à base de déchets automobiles et industriels  
Applications : insonorisants moteur, tapis, tabliers et pièces moteur
- Intégration d'éclairage d'ambiance  
Atouts : proposer une décoration nocturne de l'habitacle pour assurer un confort optimal de l'utilisateur  
Applications : boîtes à gant, intérieur de Truck, ébénisteries, etc.

## A.4 La culture qualité

La qualité pour MECAPLAST Group c'est avant tout une gestion de leur capital humain basée sur le développement des compétences et des savoir-faires. Le Groupe anime et encourage ses collaborateurs à travailler ensemble à partir de référentiels et de standards pour obtenir des résultats conformes aux attentes de leurs clients. En outre, le Groupe a mis en place le plan de progrès PACK (Partager pour Accroître la Compétitivité par le Kaizen) pour diffuser dans leurs équipes la culture de l'amélioration continue. Chaque

équipe est chargée de définir ses indicateurs de performance, de mesurer les résultats pour mettre en place des plans d'actions nécessaires à la recherche de l'excellence.

## A.5 Les engagements du Groupe

Mecaplast Group s'engage pour :

- Assurer la sécurité des hommes en anticipant les risques au niveau des produits et des processus
- Respecter les exigences réglementaires et légales, le non recours au travail des enfants et au travail forcé
- Satisfaire ces clients et développer des produits et des process innovants
- Travailler ensemble à partir de son référentiel commun (Système de Management Intégré) et faire de l'amélioration continue la dynamique du Groupe
- Supprimer les gaspillages et les pertes
- Intégrer ses partenaires fournisseurs dans ces engagements
- Pérenniser l'entreprise

De plus, au-delà des normes et règlements, MECAPLAST Group assure à ses collaborateurs une sécurité et santé optimales, au plus près de leur poste de travail, et étant une entreprise responsable et citoyenne, le Groupe a adhéré, entre autres, au Pacte Mondial des Nations Unies. Il est mobilisé autour du respect des droits fondamentaux de la personne et des exigences réglementaires et légales.



# Annexe B

## Interaction fluide-structure



Dans le cadre des échanges de recherche inter-universitaires (ATUPS), un cours séjour a été organisé pendant la thèse à la *School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering* (MACE), à l'université de Manchester 1824 (Grande-Bretagne), afin d'étudier l'interaction fluide structure à partir des mesures de pression instationnaire enregistrées sur la maquette Demha30. Le correspondant sur place était le Dr G. Dimitriadis.

### B.1 Rappel du programme de recherche prévu

Le but du séjour au MACE était de définir la topographie de la vibration de la vitre à partir de la base de données de pression pariétale instationnaire acquise lors de la première année de thèse. La méthode envisagée était une méthode par éléments finis. Ce projet devait permettre de mieux comprendre le mécanisme reliant le tourbillon à la vibration de la vitre, dans le but de mieux cibler les méthodes de contrôle à appliquer [Levy *et al.* (2008c)]. Enfin les connaissances acquises sur place devaient être suffisantes pour permettre, par la suite, de définir l'influence du contrôle de l'écoulement sur la vibration de la vitre.

### B.2 Travail effectué

#### B.2.1 Création d'un maillage

Pour pouvoir appliquer une méthode de résolution par éléments finis, il faut tout d'abord discrétiser le domaine étudié. Dans notre cas, cela consistait à modéliser la paroi avant droite de la maquette. Le maillage avait comme condition d'avoir des nœuds situés là où nous avons mesuré la pression. Nous avons donc 105 nœuds prédéfinis à l'intérieur de notre domaine, plus les trois sommets du dièdre. A partir de là, il a fallu générer un maillage le plus régulier possible et définir quelle finesse utiliser pour une optimisation

des résultats. Un programme a donc été écrit permettant de générer des maillages avec la finesse désirée (figure B.1).

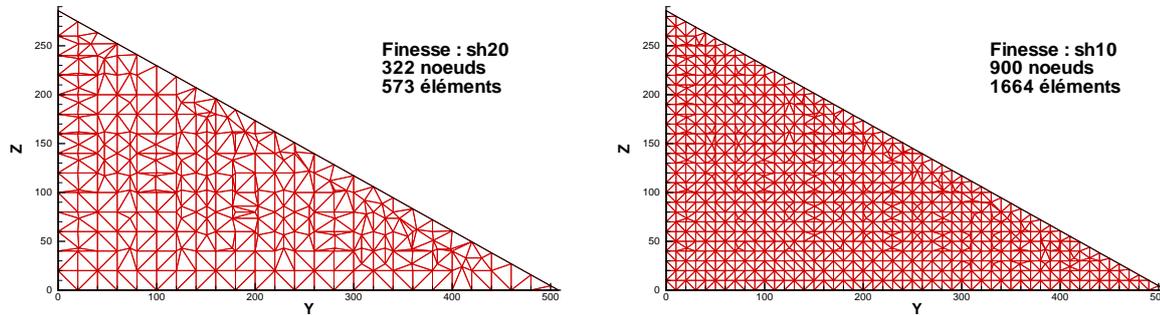


FIGURE B.1 – Différentes modélisations du dièdre par éléments finis (sh20 à gauche et sh10 à droite).

Les conditions limites pour le calcul sont de type “encastrement” pour tous les nœuds se trouvant sur les arêtes du domaine et “libres” pour les autres. Les mesures de pressions sont appliquées aux nœuds 1 à 105 sous forme de force  $F(t)$ . On observe un déplacement quasi similaire avec les deux configurations précédentes (figure B.2). Cela permet de conclure sur la validité de l’utilisation du modèle sh20.

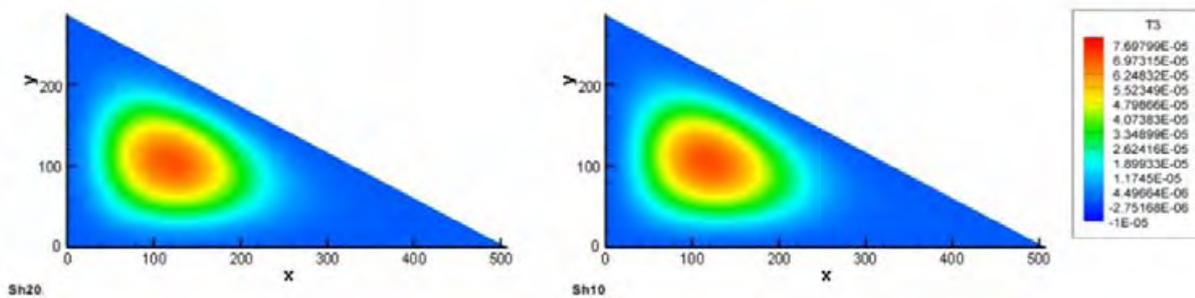


FIGURE B.2 – Comparaison du déplacement maximum du aux fluctuations de pression dans le cas sh20 et sh10 .

A partir de là, on peut étudier l’évolution temporelle de la déformation ainsi que la réponse de la plaque en fonction du signal. De plus, les différents modes de déformations du système ainsi que les fréquences propres d’oscillation de la plaque peuvent être calculés à partir de la modélisation choisie.

## B.2.2 Modes propres et fréquences propres

Les modes propres représentent les différentes déformations possibles que peut prendre le système (figure B.3). Toute oscillation libre est une somme de tous les modes propres correspondants, chacun des modes propres possède une fréquence propre, c’est-à-dire une fréquence qui peut permettre au système de rentrer en résonance. On remarque que le déplacement maximum observé précédemment du aux fluctuations de pressions est le même que celui du premier mode.

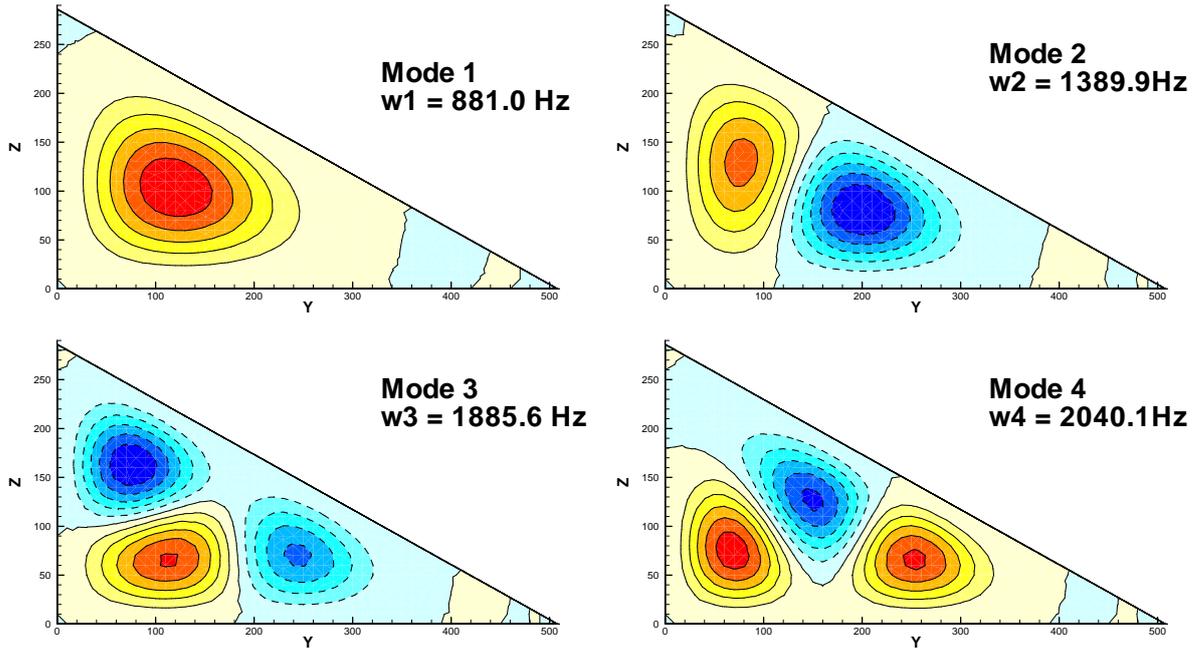


FIGURE B.3 – Représentation des 4 premiers modes de déformation du système avec leurs fréquences propres associées (déformation positive en trait continu et négative en pointillés).

### B.2.3 Calcul et interprétation des résultats

La méthode utilisée pour résoudre le problème numérique est de type “direct transient response analysis”. Cette méthode résout les équations par intégration numérique directe. Elle peut être appliquée à ce problème car nous avons un pas de temps d’intégration constant. L’équation dynamique du mouvement (B.1) est résolue en appliquant un schéma centré pour la vitesse et l’accélération (expressions B.2 et B.3).

$$[\mathbf{M}]\ddot{u}(t) + [\mathbf{B}]\dot{u}(t) + [\mathbf{K}]u(t) = P(t) \quad (\text{B.1})$$

$$\dot{u}_n = \frac{1}{2\Delta t}(u_{n+1} - u_{n-1}) \quad (\text{B.2})$$

$$\ddot{u}_n = \frac{1}{\Delta t^2}(u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}) \quad (\text{B.3})$$

avec  $[\mathbf{M}]$  la matrice de masse,  $[\mathbf{B}]$  la matrice d’amortissement,  $[\mathbf{K}]$  la matrice de raideur et  $P(t)$  la pression dynamique. De plus, nous avons utilisé une forme simplifiée de l’équation dynamique du mouvement qui ne prend pas en compte la matrice d’amortissement  $[\mathbf{B}]$ .

Tous les calculs suivants ont été effectués avec le maillage sh20 (cf. figure B.1) sauf mentionné différemment. Si on suit un point du maillage dans le temps, on s’aperçoit qu’après un certain nombre d’itérations, le système se met à osciller de façon régulière (figure B.4).

Pour s’assurer que ceci n’était pas une coïncidence due à notre maillage, le même calcul a été effectué avec le maillage sh10. On peut donc comparer l’évolution de la déformation du système en plusieurs points du domaine (figure B.5).

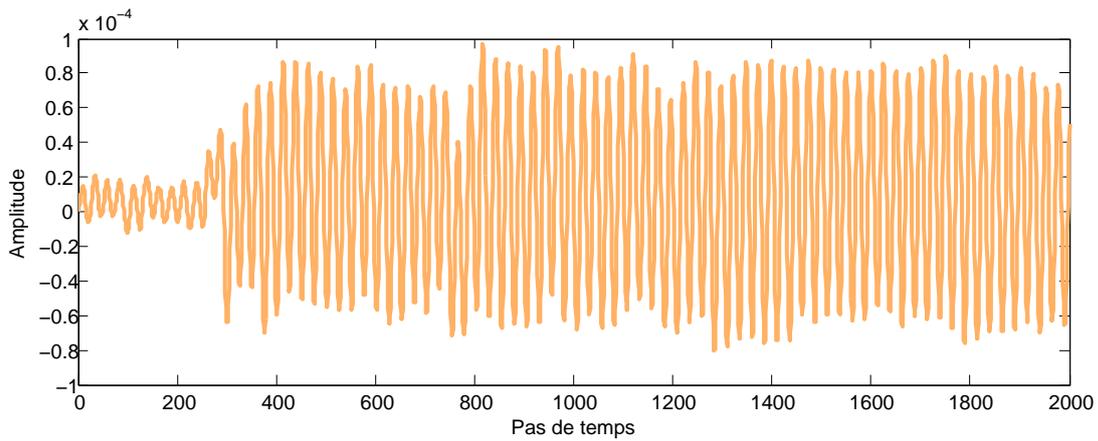


FIGURE B.4 – Amplitude de la déformation de la structure au noeud 36 pendant 2000 itérations.

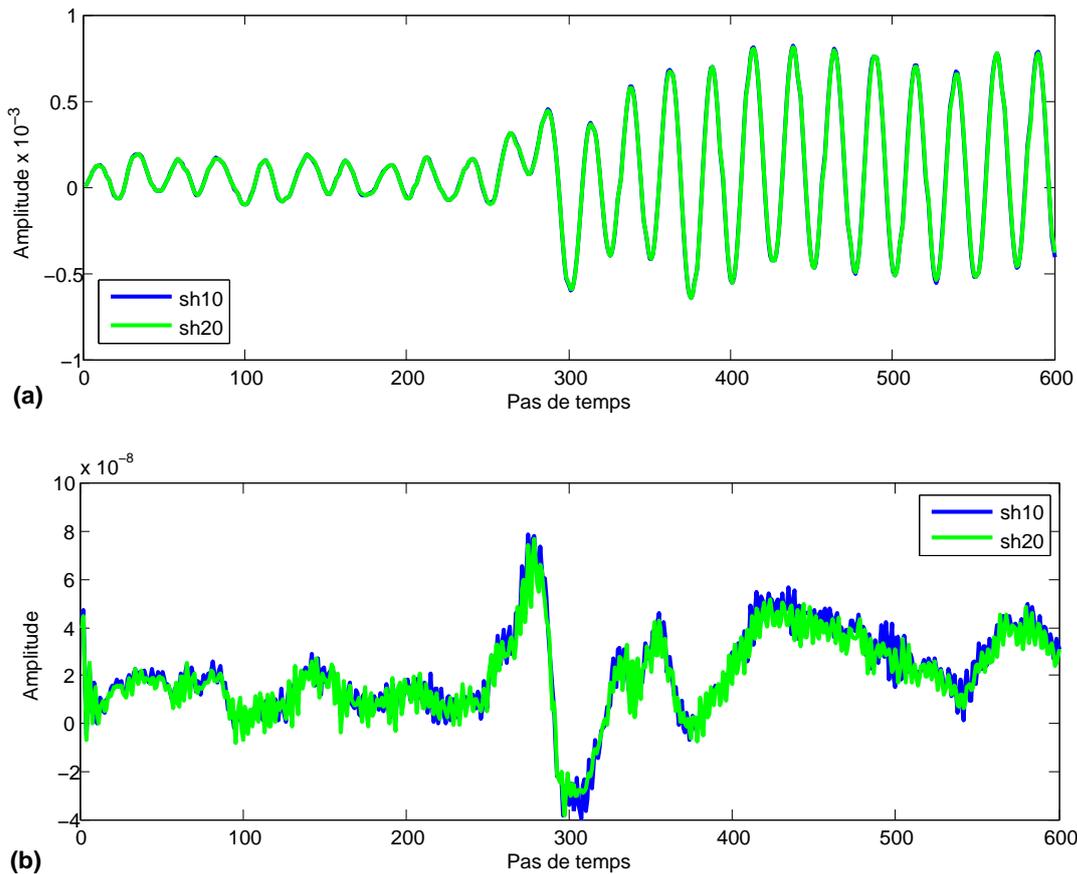


FIGURE B.5 – Comparaison de la déformation temporelle de la structure pour les maillages sh10 et sh20 aux noeuds 36 (a) et 105 (b).

On note que dans les deux cas, la structure se déforme de la même façon avec la même fréquence d'oscillation et la même amplitude. Comme on peut voir sur la figure B.5, même dans les zones de très faibles déplacements les deux systèmes évoluent de la même façon

(le nœud 105 se trouve au niveau de la pointe, près de nœuds encastrés). On peut alors faire une transformée de Fourier (FFT) du signal (figure B.6) pour trouver la fréquence d'oscillation du système. Celle-ci est de 872.9 Hz, c'est à dire la fréquence propre du 1er mode à 0.6 % près.

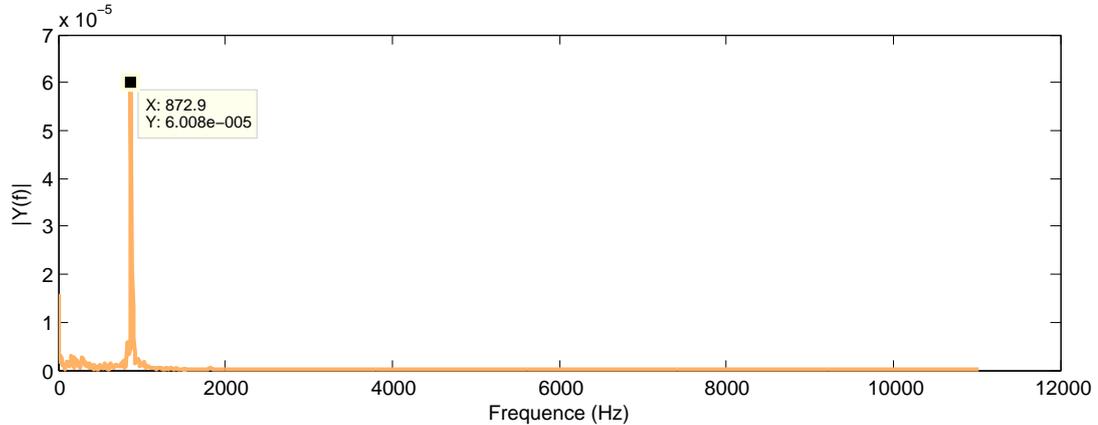


FIGURE B.6 – FFT du déplacement de la structure au nœud 36 suite aux variations de pression.

Il ne reste alors plus qu'une chose à vérifier pour valider notre modèle et les résultats obtenus, la dépendance temporelle. Ne possédant qu'un seul capteur de pression B&K, les 105 mesures de pressions instationnaires avaient été faites les unes après les autres. Ce procédé a comme défaut de faire perdre toute information sur l'évolution spatiale du signal. Un autre calcul a donc été fait en transposant les mesures de pression  $P(t)$  de sorte que :  $P_j(t) = P_j(t + 10j)$ ; avec  $t \in [1 - 800]$  pour  $j \in [1 - 105]$  ( $j$  est l'indice du trou de prise de pression). Cela permet d'introduire un déphasage des mesures de pression par rapport aux calculs précédents. Le résultat obtenu (figure B.7) est le même que précédemment, le système tend vers un état d'oscillations régulières. En faisant une FFT du signal on trouve que la fréquence d'oscillation du système est identique à 0.9% près.

## B.2.4 Conclusion

La méthode mise en place lors de ce séjour nous a donc permis de trouver que la structure vibre selon le premier mode de déformation et à la première fréquence propre. Ce résultat est potentiellement intéressant car il peut permettre de prouver que la fréquence d'oscillation du tourbillon de montant de baie n'est pas la même que la fréquence d'oscillation de la vitre (une FFT des mesures de pression ne fait apparaître aucune fréquence distincte autour des 880 HZ). Des mesures quantitatives sur le tourbillon de montant de baie ne sont donc pas suffisantes pour définir l'efficacité d'une méthode de contrôle du phénomène. Ce même résultat avait été trouvé par Alam *et al.* lors de leurs recherches au RMIT de Melbourne entre 1997 et 2004. Ceux-ci n'avaient cependant pas proposé de méthode permettant de résoudre ce problème.

La technique d'analyse mise en place lors de ce séjour au MACE permettra de mesurer concrètement l'influence du tourbillon de montant de baie sur le bruit rayonné dans l'habitacle du véhicule. Elle permettra donc, lors de l'application de moyens de contrôls,

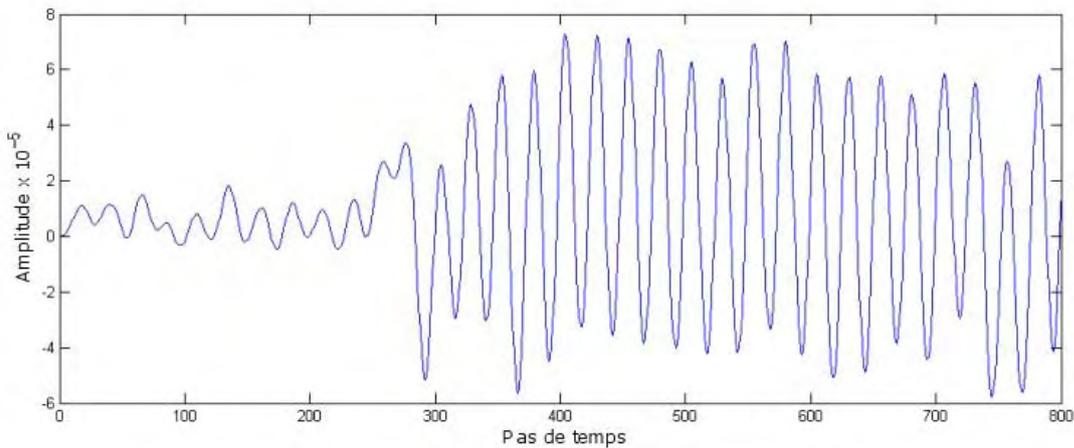


FIGURE B.7 – Amplitude de la déformation de la structure au nœud 36 sous l’influence d’un signal transposé.

de définir de façon quantitative l’efficacité de ceux-ci dans le but de réduire le bruit perçu dans un véhicule.

### B.3 Résultats complémentaires

Suite à ces premiers résultats, la méthode a été testée dans une configuration de contrôle actif. Le soufflage actif “côté45” ayant un réel effet sur les tourbillons de montant de baie, une série de mesures de pression instationnaire a été effectuée et utilisée pour le calcul de la déformation dynamique de la vitre. On observe alors une réponse différente (figure B.8). L’amplitude des déformations est nettement supérieure dans le cas avec contrôle. Ce résultat est en accord avec les observations faites au niveau de la cartographie de pression RMS en proche paroi (figure 4.21) : les fluctuations de pression à la paroi sont plus importantes dans la configuration avec contrôle actif.

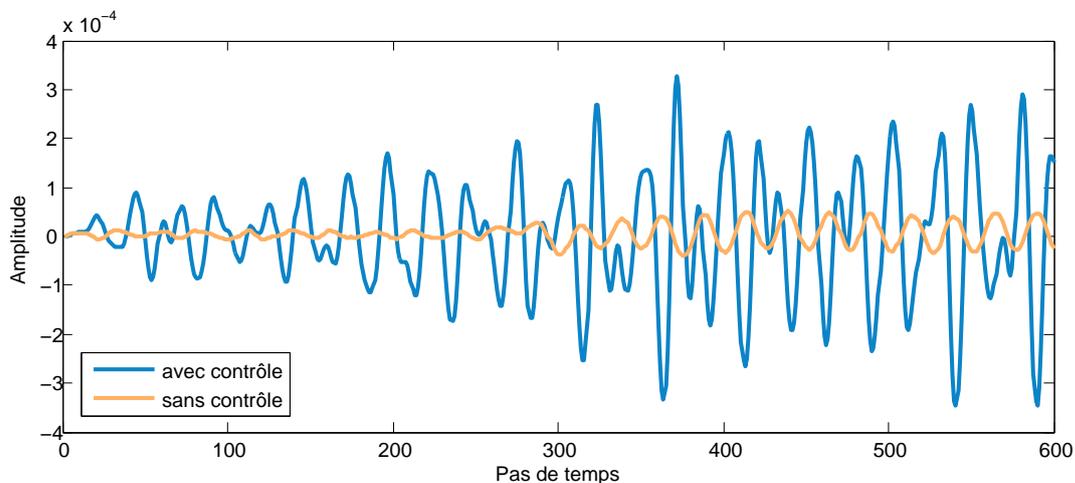


FIGURE B.8 – Amplitude de la déformation de la structure au nœud 25 pendant 600 itérations dans le cas avec contrôle “côté45” actif et dans le cas de référence sans contrôle.

La transformée de Fourier du signal fait ressortir deux fréquences propres, 1726 Hz et 2718 Hz (figure B.9), différente, de la fréquence propre observée dans le cas de l'écoulement de référence.

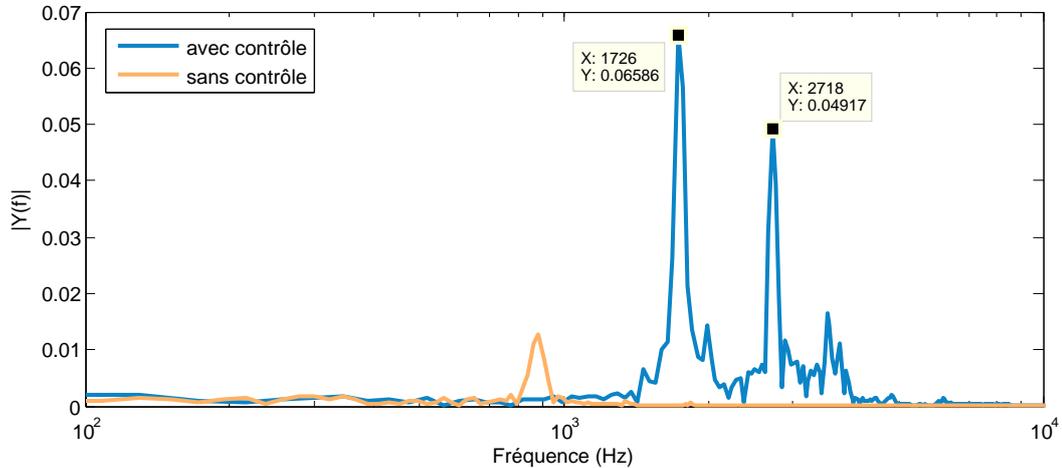


FIGURE B.9 – FFT du déplacement de la structure au nœud 36 suite aux variations de pression dans le cas avec contrôle “côté45” actif et dans le cas de référence sans contrôle.

## B.4 Conclusion

La méthode de calcul et d'analyse développée semble très prometteuse. On arrive à partir de mesures de pression instationnaire à prédire la déformation de la paroi. Toutefois, il y a deux améliorations nécessaires avant de pouvoir utiliser ce programme pour prédire la déformation réelle de la paroi. Tout d'abord, les mesures de pression doivent être faites en parallèle et non en série pour s'assurer de capter la dimension spatiale des mesures de pression instationnaire. Ensuite, la densité de mesure doit être plus importante de sorte à ne pas perdre les très courtes longueurs d'onde.

On remarquera que ces deux améliorations sont d'ordre technique lors de l'acquisition des mesures de pression et non lors du post-traitement. Une fois ces problèmes résolus, cette analyse pourrait permettre une autre approche pour traiter le problème aéro-acoustique de montant de baie dans son intégralité.



# Annexe C

## Etude de stabilité

Pour cette étude de stabilité, nous supposons que l'écoulement étudié est bidimensionnel.

Soit  $z = Z^{\frac{3}{2}}$  la transformation conforme permettant de passer de l'écoulement de contournement d'un angle droit à celui d'un écoulement plan en proche paroi, on peut obtenir par dérivations successives les expressions suivantes :

$$\frac{dz}{dZ} = \frac{3}{2} Z^{\frac{1}{2}} \quad (\text{C.1})$$

$$\frac{d^2z}{dZ^2} = \frac{3}{4} Z^{-\frac{1}{2}} \quad (\text{C.2})$$

On définit dans le plan physique le point d'arrêt de coordonnées  $(0, 0)$ , le point de recollement de coordonnées  $(0, x_r)$ , et les tourbillons primaire et secondaire respectivement de circulation et de position  $(\Gamma_1, z_1)$  et  $(\Gamma_2, z_2)$ , ainsi que l'écoulement de contournement  $U_0$ .

Dans le plan transformé nous avons alors le point d'arrêt de coordonnées  $(0, 0)$ , l'écoulement infini amont  $U_0$  parallèle à la paroi, le point de recollement de coordonnées  $(0, X_r)$ , et les tourbillons primaire et secondaire respectivement de circulation et de position  $(\Gamma_1, Z_1)$  et  $(\Gamma_2, Z_2)$ .

La vitesse des tourbillons est définie par l'expression (C.3) pour  $j = 1, 2$ , et la vitesse dans le champ par l'expression (C.4) :

$$u_j - iv_j = \frac{d}{dZ} [F(z) + \frac{i\Gamma_j}{2\pi} \ln(Z - Z_j)]_{z=z_j} \frac{dZ}{dz} \Big|_{z=z_j} + U_0 \frac{dZ}{dz} \Big|_{z=z_j} - \frac{i\Gamma_j}{4\pi} \frac{\frac{d^2Z}{dZ^2}}{\frac{dz}{dZ}} \Big|_{z=z_j} \quad (\text{C.3})$$

$$u - iv = \frac{dF(Z)}{dZ} \frac{dZ}{dz} + U_0 \frac{dZ}{dz} \quad \forall Z \quad (\text{C.4})$$

$$\text{avec } F(Z) = -\frac{i\Gamma_1}{2\pi} \ln(Z - Z_1) + \frac{i\Gamma_1}{2\pi} \ln(Z - \bar{Z}_1) - \frac{i\Gamma_2}{2\pi} \ln(Z - Z_2) + \frac{i\Gamma_2}{2\pi} \ln(Z - \bar{Z}_2) + U_0 Z \quad (\text{C.5})$$

On obtient alors les conditions d'équilibre suivantes pour le tourbillon primaire (expressions C.6 et C.7)

$$V_0 + \frac{\Gamma_1}{4\pi y_1} - \frac{\Gamma_2}{2\pi} \frac{y_1 - y_2}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} + \frac{\Gamma_2}{2\pi} \frac{y_1 + y_2}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 + y_2)^2} + \frac{\Gamma_1}{8\pi} \frac{y_1}{(x_1^2 + y_1^2)} = 0 \quad (\text{C.6})$$

$$V \frac{\Gamma_2}{2\pi} \frac{x_1 - x_2}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} - \frac{\Gamma_2}{2\pi} \frac{x_1 + x_2}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 + y_2)^2} - \frac{\Gamma_1}{8\pi} \frac{x_1}{(x_1^2 + y_1^2)} = 0 \quad (\text{C.7})$$

et les conditions d'équilibre suivantes pour le tourbillon secondaire (expressions C.8 et C.9)

$$V_0 + \frac{\Gamma_2}{4\pi y_2} - \frac{\Gamma_1}{2\pi} \frac{y_2 - y_1}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} + \frac{\Gamma_1}{2\pi} \frac{y_1 + y_2}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 + y_2)^2} + \frac{\Gamma_2}{8\pi} \frac{y_2}{(x_1^2 + y_1^2)} = 0 \quad (\text{C.8})$$

$$V \frac{\Gamma_1}{2\pi} \frac{x_2 - x_1}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} - \frac{\Gamma_1}{2\pi} \frac{x_2 + x_1}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 + y_2)^2} - \frac{\Gamma_2}{8\pi} \frac{x_1}{(x_1^2 + y_1^2)} = 0 \quad (\text{C.9})$$

Enfin, pour le point d'arrêt et le point de décollement on obtient les expressions (C.10) et (C.11) :

$$\frac{\Gamma_1 y_1}{x_1^2 + y_1^2} + \frac{\Gamma_2 y_2}{x_2^2 + y_2^2} + \pi U_0 = 0 \quad (\text{C.10})$$

$$\frac{\Gamma_1 y_1}{(x_1 - x_r)^2 + y_1^2} + \frac{\Gamma_2 y_2}{x_2 - x_r^2 + y_2^2} + \pi U_0 = 0 \quad (\text{C.11})$$

A partir de ce système de six équations (expressions C.6 à C.11), il est possible de déterminer les configurations d'équilibre dont la stabilité peut être étudiée dans un deuxième temps. Cette dernière étape permettra d'identifier les fréquences propres du système.

# Annexe D

## Résultats complémentaires

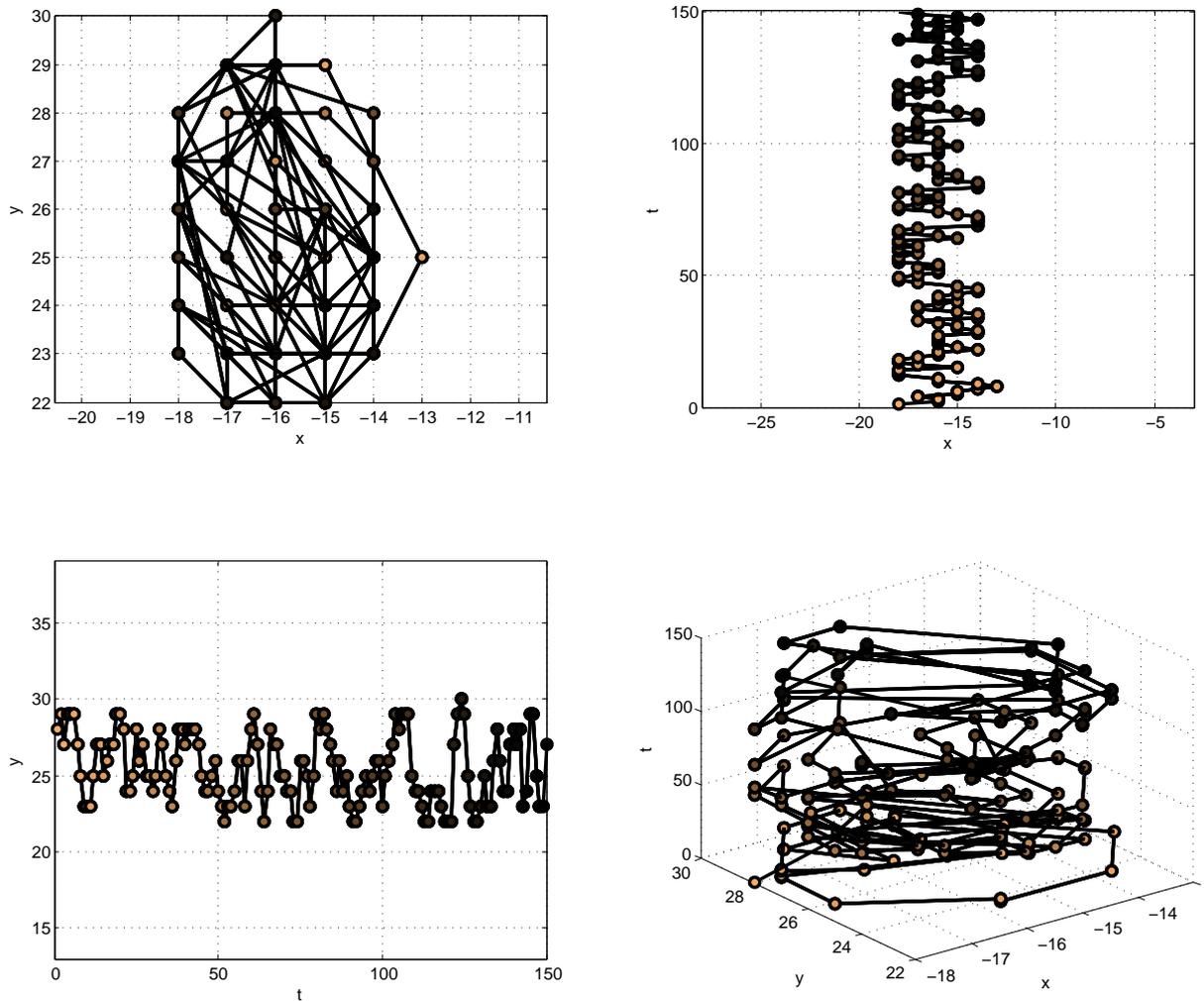


FIGURE D.1 – Suivi temporel du déplacement du centre du tourbillon primaire, défini à l'aide de la vorticité, dans le plan  $(x,y)$  pour 150 pas de temps; dans le plan  $(x,t)$ , le plan  $(y,t)$  et dans le plan  $(x,y,t)$ . ( $t$  étant la dimension temporelle en nombre d'itérations et  $x,y$  étant les dimensions spatiales en nombres de mailles)

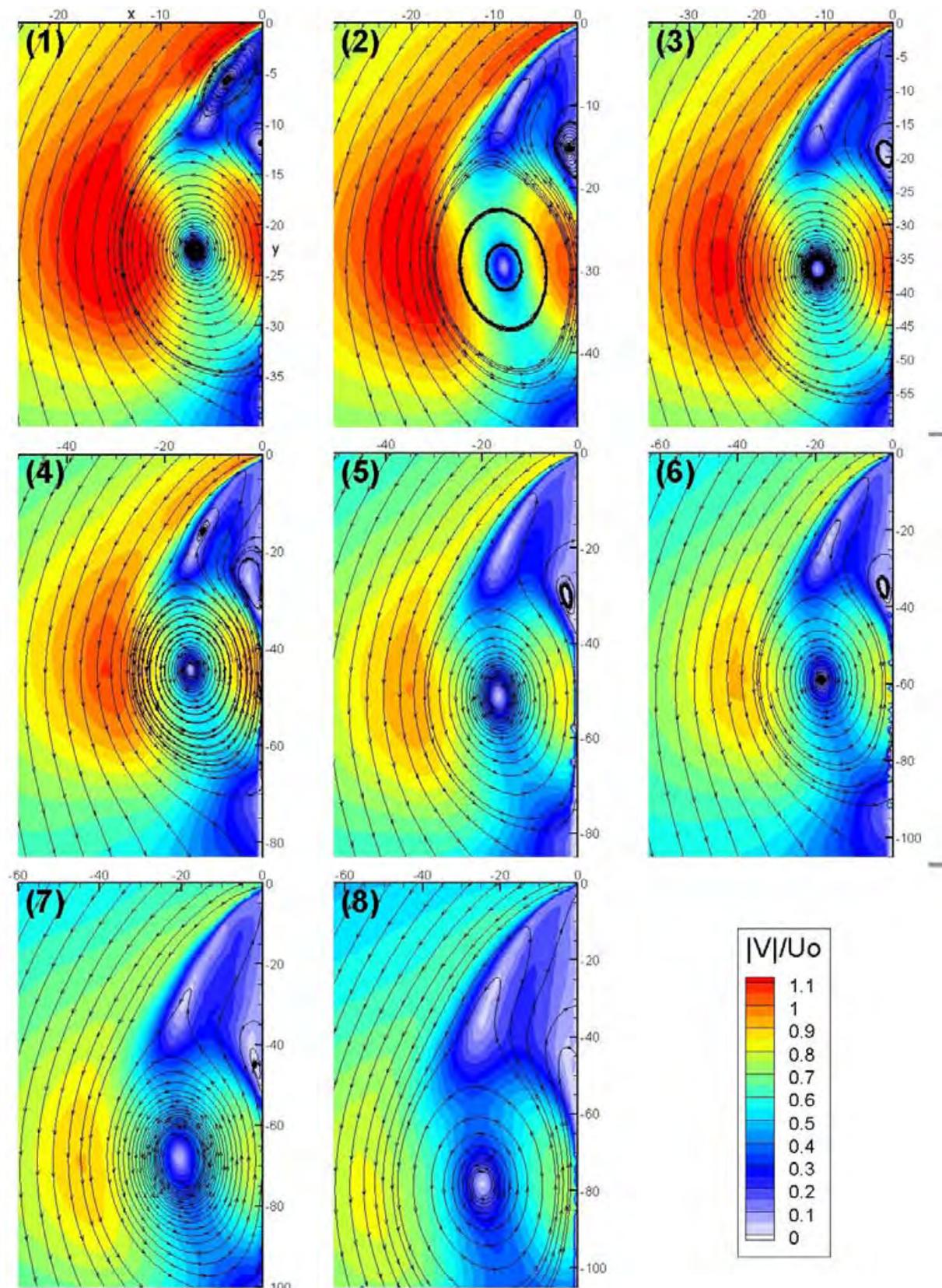


FIGURE D.2 – Champs du module de la vitesse normalisée par  $U_0$  pour les plans successifs (1) à (8); notons que l'échelle de dimension n'est pas constante.

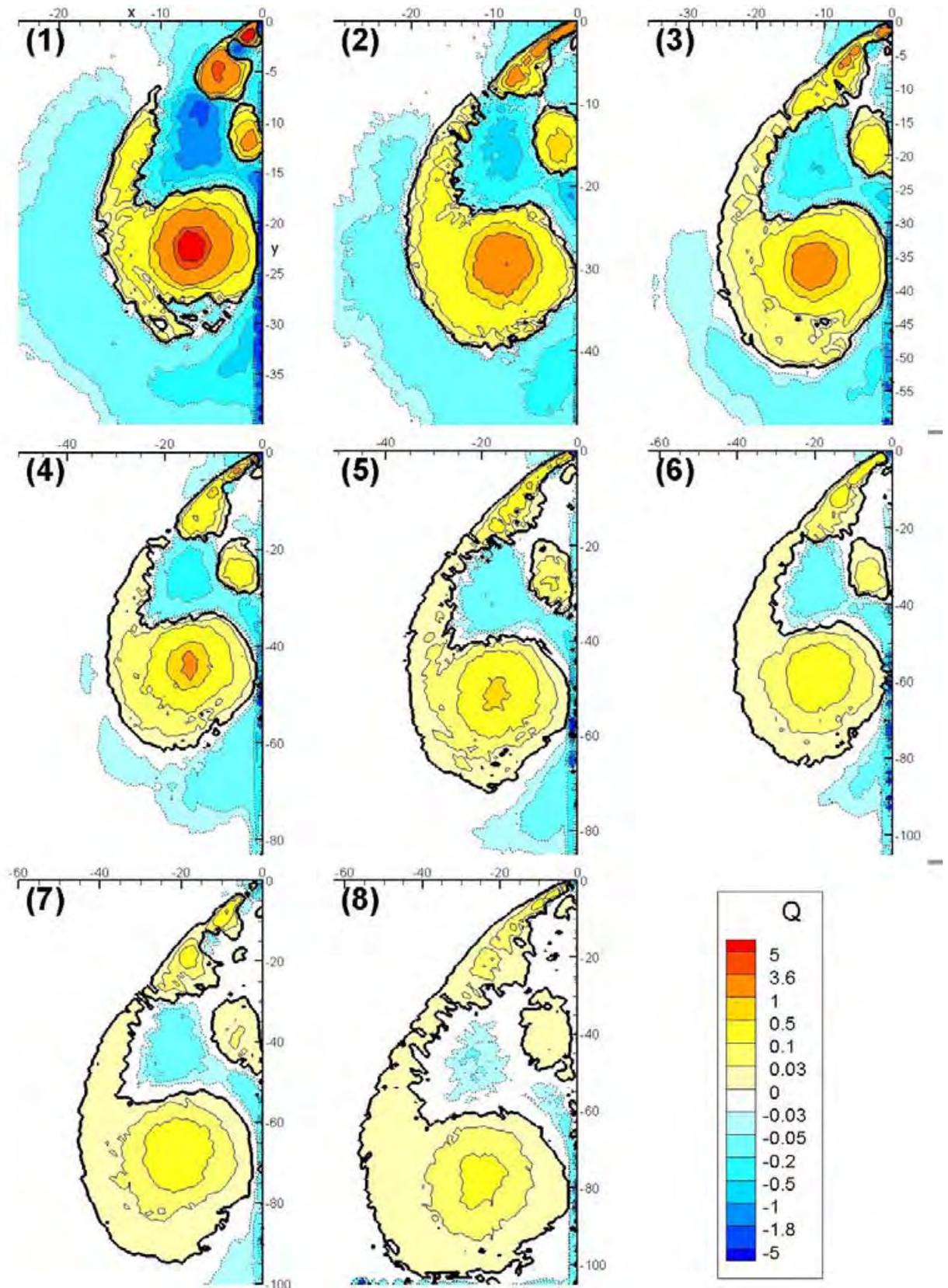


FIGURE D.3 – Cartographie du critère  $Q$  pour les plans successifs (1) à (8), le contour  $Q = 0$  est tracé en trait épais; notons que l'échelle de dimension n'est pas constante.

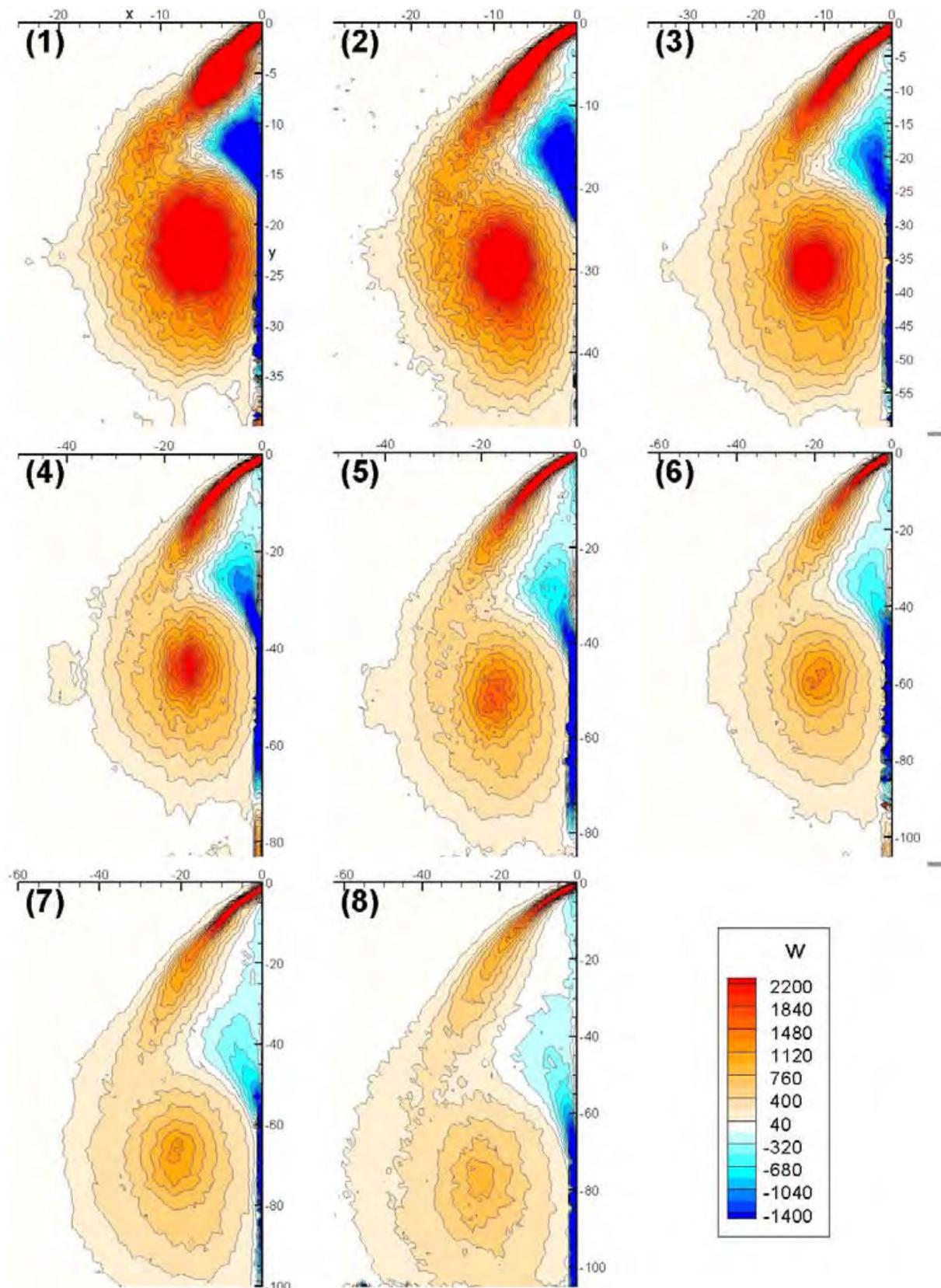


FIGURE D.4 – Champs de vorticité pour les plans successifs (1) à (8) ; notons que l'échelle de dimension n'est pas constante.

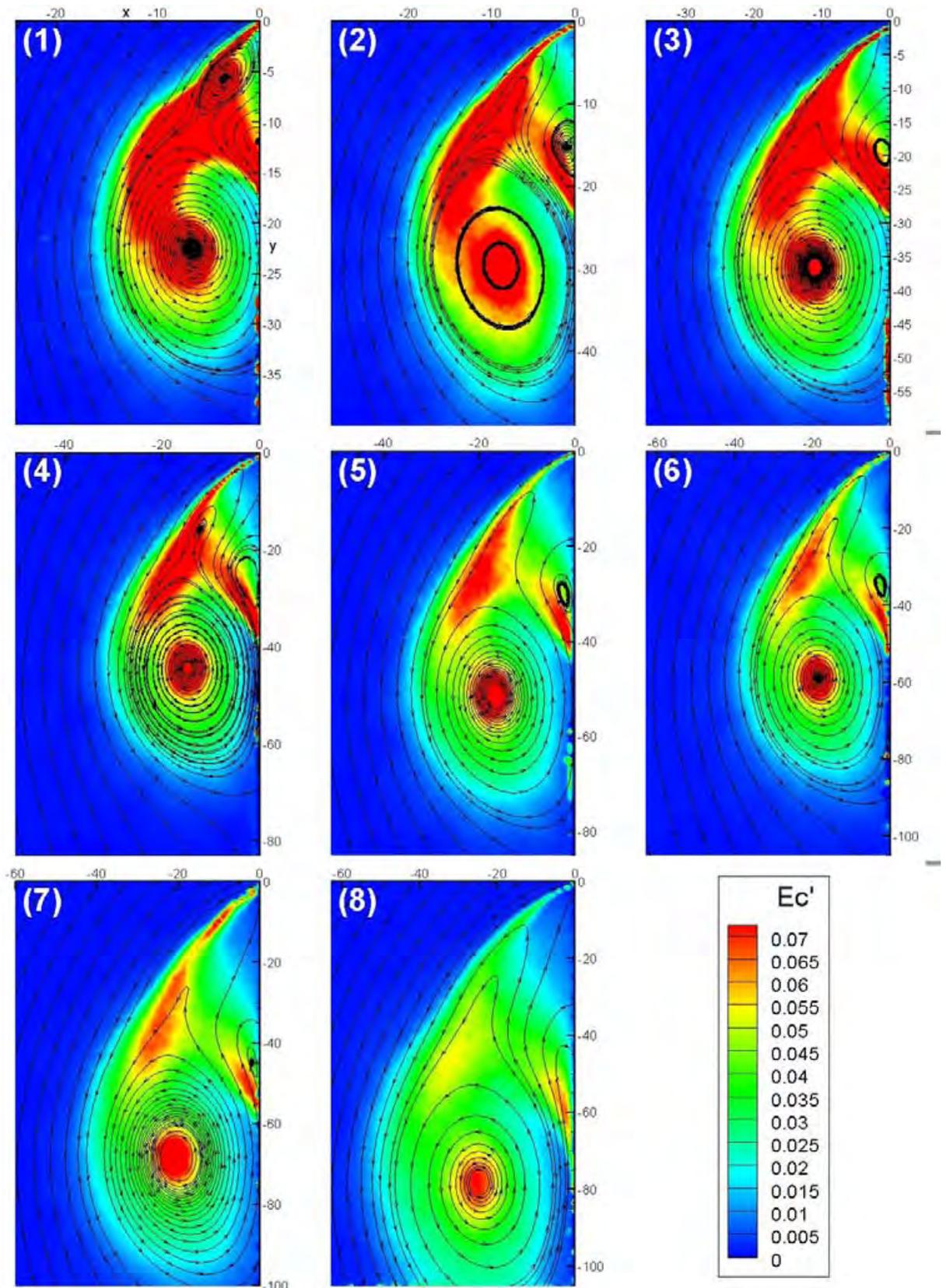


FIGURE D.5 – Champs de l'énergie cinétique des fluctuations pour les plans successifs (1) à (8); notons que l'échelle de dimension n'est pas constante.

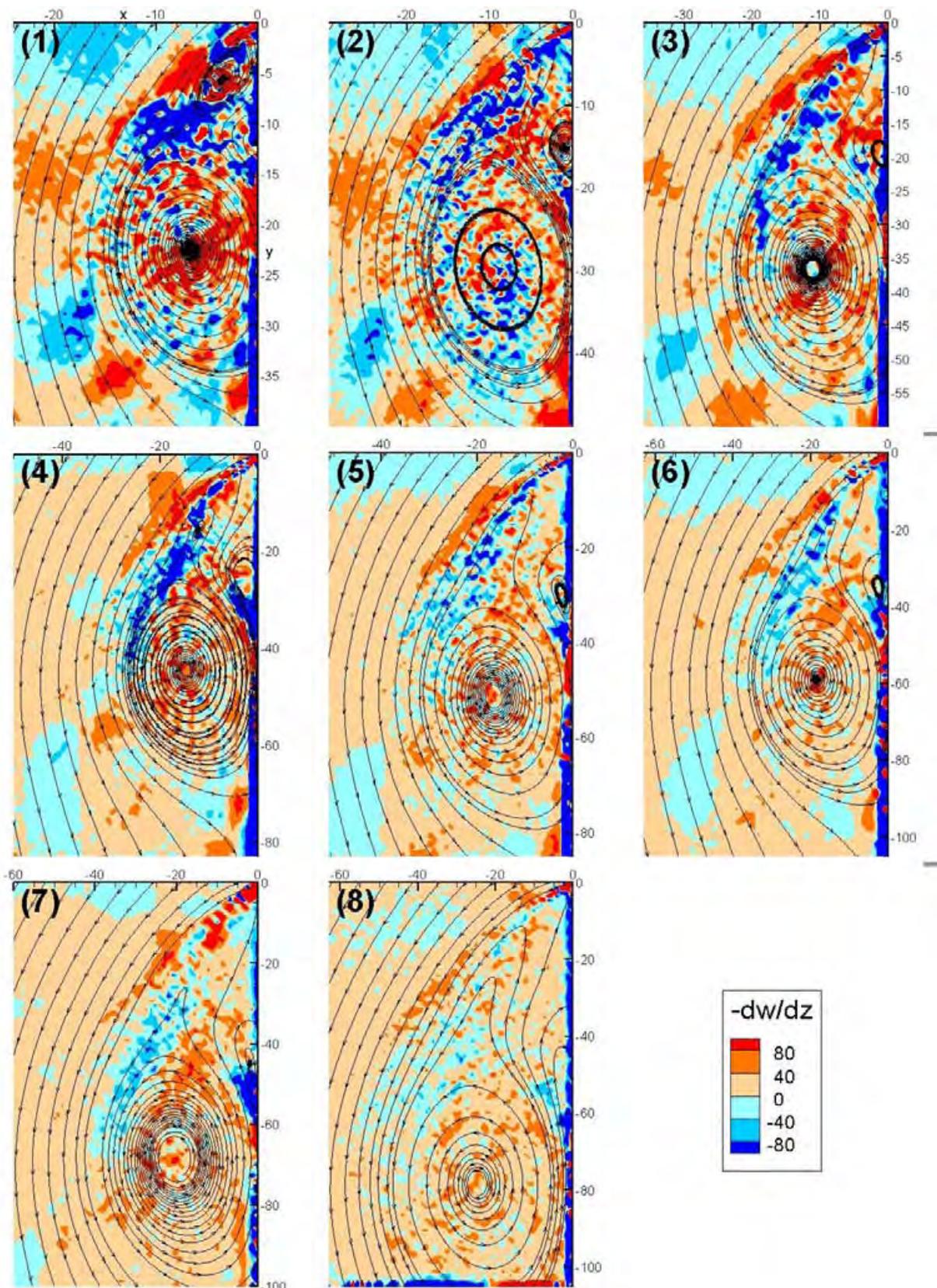


FIGURE D.6 – Champs de divergence pour les plans successifs (1) à (8); notons que l'échelle de dimension n'est pas constante.

# Bibliographie

- Adrian, R.J. 2005 Twenty years of particle image velocimetry. *Exp. in Fluids* **39**, 159–169. [12](#)
- Ahmed, S.R., Ramm, R. & Falting, G. 1984 Some salient features of the time averaged ground vehicle wake. *SAE tech. paper series* p. 840300. [2](#)
- Aider, J.L. 2008 Contrôle d'écoulements décollés et aérodynamique automobile. *Habilitation à Diriger des Recherches* . [3](#)
- Aider, J.L. & Hillairet, B. 2005 Aerodynamic device for a vehicle ; vehicle equipped with such a device. *Rapport Tech.* EP1506910. Peugeot Citroen Automobiles SA. [76](#)
- Aider, J.L., Lasserre, J.J. & Herbert, V. 2004 Aerodynamic device for motor vehicle. *Rapport Tech.* EP1477394A1. Peugeot Citroen Automobiles SA. [76](#)
- Alam, F., Watkins, S. & Zimmer, G. 2003 Mean and time-varying flow measurements on the surface of a family of idealised road vehicles. *Exp. Th. Fluid Science* **27**, 639–654. [5](#), [6](#)
- Aleyev, Y. 1977 Nekton. Dr. W. .Junk b.v. Publishers, The Hague, The Netherlands. [72](#)
- Algazi, V.R. & Sakrison, D.J. 1969 On the optimality of the karhunen-loève expansion. *IEEE Trans. Inform. Theory* **15**. [25](#)
- Amiellh, M., Anselmet, F., Vergne, S., Perot, F. & Lasserre, J.J. 2006 Caractérisation de l'aérodynamique en proche paroi d'un véhicule par vélocimétrie laser doppler tridimensionnelle embarquée. In *Congrès francophone de techniques laser, CFTL 2006*. [6](#)
- Andrews, C.A., Davies, J.M. & Schwartz, G.R. 1967 Adaptive data compression. *Proc. IEEE* **55**. [25](#)
- Armaly, B.F., Durst, F., Pereira, J.C.F. & Schönung, B. 1983 Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow. *J. Fluid Mech.* **127**, 473–496. [56](#)
- Artiaga-Hahn, S., Kruse, N. & Werner, F. NC Speeding up aerodynamic vehicle development. *Rapport Tech.. OVAL*. [2](#)
- Barker, D.B. & Fournay, M.E. 1977 Measuring fluid velocities with speckle patterns. *Opt. Lett.* **1**, 135–137. [12](#)

- Bernardot, F., Bruneaux, J. & Matricon, J. 2002 Un archétype d'oscillateur : le résonateur acoustique de helmholtz. *Bulletin de l'Union des Physiciens* **96**, 1055–1075. [21](#)
- Bert, E. 1925 Disposition pour constructions qui sont mobiles par rapport à un milieu. *Rapport Tech.* 586.613. N.V. Instituut voor Aero-En Hydro-Dynamiek. [4](#), [74](#)
- Bettridge, M.W., Smith, B.L. & Spall, R.E. 2006 Aerodynamic jet steering using steady blowing and suction. *Exp. in Fluids* **40**, 776–785. [52](#)
- Billant, P., Chomaz, J.M. & Huerre, P. 1998 Experimental study of vortex breakdown in swirling jets. *J. Fluid Mech.* **376**, 183–219. [34](#), [66](#)
- Bourguet, R., Braza, M. & Dervieux, A. 2007 Reduced-order modeling for unsteady transonic flows around an airfoil. *Phys. Fluids* **19** :111701, 1–4. [25](#)
- Buchheim, R., Dobrzynski, W., Mankau, H. & Schwabe, D. 1982 Vehicle interior noise related to external aerodynamics. *Int. J. Vehicle Design* **3**, 398–410. [3](#)
- Casella, M. & Tregnago, R. 2005 A motor vehicle with a device for controlling aerodynamic flow using synthetic jets. *Rapport Tech.* EP1544089A1. C.R.F. Societa Consortile per Azioni. [77](#)
- Collis, D.C. & Williams, M.J. 1959 Two dimensional convection from heated wires at low reynolds numbers. *J. Fluid Mech.* **6**, 357–384. [19](#)
- Cordier, L. & Bergmann, M. 2003 Proper orthogonal decomposition : an overview. *Von Karman Institute for Fluid Dynamics lecture series 2003-04*. [25](#)
- Cornacchia, F. & Giusto, N. Di 1989 A system for reducing slipstream drag for high-performance motor cars. [74](#)
- Dauplain, A., Favier, J. & Bottaro, A. 2008 Hydrodynamics of beating cilia. *J. Fluid and Struct.* . [71](#), [79](#), [89](#)
- Drouin, V. 2003 Contribution à l'étude, à l'analyse et au contrôle des écoulements décollés en aérodynamique automobile. *Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse* . [2](#)
- Dudderar, T.D. & Simpkins, P.G. 1977 Laser speckle photography in a fluid medium. *Nature* **270**, 45–47. [12](#)
- Elena, L. 2001 Aérodynamique automobile. *Mec. Ind.* **2**, 199–210. [2](#)
- Englar, R.J. 1999 Pneumatic aerodynamic force-augmentation, control and drag-reduction devices for racing cars and high-performance sport cars. *Rapport Tech.* US5863090. Georgia Tech Res Inst. [74](#)
- Favier, J., Dauplain, A., Basso, D. & Bottaro, A. 2009 Passive separation control using a self-adaptive hairy coating. *J. Fluid Mech.* . [71](#)
- Favier, J. & Kourta, A. 2006 Etude du contrôle du décollement sur un profil d'aile par mesures piv et analyse pod. *C.R. Mécanique* **334**, 272–278. [25](#)

- Fletcher, H. & Munson, W.A. 1933 Loudness, its definition, measurement and calculation. *J.A.S.A.* **V**, 82–107. [82](#)
- Fluent&EnSight NC Fluent results courtesy fluent inc. and sharec ltd. [Http :/ /legacy.ensight.com/products/fluent.html](http://legacy.ensight.com/products/fluent.html). [23](#)
- Fournier, G. 1997 Device for reducing aerodynamic noise of motor vehicle bodywork. *Rapport Tech.* FR2744689. Onera. [75](#)
- Fu, H. & Rockwell, D. 2005 Shallow flow past a cylinder : control of the near wake. *J. Fluid Mech.* **539**, 1–14. [53](#), [79](#)
- Gad-El-Hak, M. 2000 *Flow Control, Passive, Active and Reactive Management*. Cambridge University Press. [52](#), [71](#)
- Gallas, Q., Mathew, J., Kaysap, A., Holman, R., Carroll, B., Nishida, T., Sheplak, M. & Cattafesta, L. 2003 Lumped element modeling of piezoelectric-driven synthetic jet actuators. *AIAA Journal* **41**, 240–247. [52](#)
- Gaylard, A.P. 2007 Cfd simulation of side glass surface noise spectra for a bluff suv. *SAE Transaction* **115**, 99–115. [4](#), [20](#), [29](#), [34](#)
- Gazdzinski, R. 2000 Vehicular boundary layer control system and method. *Rapport Tech.* US6068328. Gazdzinski & Assoc. [75](#)
- Gilliéron, P. 2002 Dispositif générateur de vortex pour la reduction de trainee aérodynamique d'un véhicule terrestre et véhicule ainsi obtenu. *Rapport Tech.* FR2848521. Renault SAS. [76](#)
- Gilliéron, P. & Lehugeur, P. 2004 Eddy structures controlling method for motor vehicle, involves sucking air by connection zone, and discharging air through replacement zone to accelerate rotational speed of air in motion and to break eddy structures. *Rapport Tech.* DE102005050381. Renault SA. [74](#)
- Gray, J. 1936 Studies in animal locomotion. vi. the propulsive power of dolphins. *J. Exp. Biol.* **13**, 192–199. [71](#)
- Grousson, R. & Mallick, S. 1977 Study of the flow pattern in a fluid by scattered laser light. *Appl. Opt.* **16**, 2334–2336. [12](#)
- Guaus, A. & Bottaro, A. 2007 Instabilities of the flow in a curved channel with compliant walls. *Proc. R. Soc. A* **463**, 2201–2222. [71](#), [72](#)
- Hall, M. 1966 The structure of concentrated vortex cores. *Prog. Aerospace Sci.* **7**, 53–110. [66](#)
- Haruna, S., Nouzawa, T. & Kamimoto, I. 1990 An experimental analysis and estimation of aerodynamic noise using a production vehicle. *SAE Transaction* (900316), 667–680. [5](#), [20](#), [34](#)
- Hoarau, C. 2006 Mesures multipoints pression - vitesse pour l'analyse de l'aérodynamique d'écoulements décollés instationnaire - application aux véhicules terrestres. *Thèse de Doctorat, Université de Poitiers* . [7](#), [9](#)

- Hoepffner, J., Bottaro, A. & Favier, J. 2009 Mechanisms of non-modal energy amplification in channel flow between compliant walls. *J. Fluid Mech.* . 71
- Howard, F.G. & Goodman, W.L. 1988 Axisymmetric bluff-body drag reduction through geometrical modification. *J. Aircraft* **22**, 516–522. 62
- Hucho, W.H. 1998 *Aerodynamics of road vehicles*, 4th edn. SAE. 3
- Jeong, J. & Hussain, F. 1995 On the identification of a vortex. *J. Fluid Mech.* **285**, 69–94. 23, 24
- Jorgensen, F.E. 2002 *How to measure turbulence with hot-wire anemometers - practical guide*. Dantec Dynamics. 19
- Kirby, M. & Sirovich, L. 1990 Application of the kl procedure for the characterization of human faces. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* **12**, 103–108. 25
- Kolmogorov, A.N. 1958 Dissipation of energy in a locally isotropic turbulence. *American Mathematical Society Translations* **8**, 87. 22
- Kramer, M.O. 1957 Boundary-layer stabilization by distributed damping. *J. Aerosp. Sci.* **24**, 459–460. 71
- Kramer, M.O. 1960 Boundary-layer stabilization by distributed damping. *J. Am. Soc. Navig; Eng.* **72**, 25–33. 71
- Lawson, A.A., Sims-Williams, D.B. & Dominy, R.G. 2008 Effects of on-road turbulence on vehicle surface pressures in the a-pillar region. *SAE Paper* **0474**. 5, 20
- Lecordier, B. 1997 Etude de l'interaction de la propagation d'une flamme prémélangée avec le champ aérodynamique, par association de la tomographie laser et de la vélocimétrie par images de particules. *Thèse de Doctorat, Université de Rouen* . 14
- Lecordier, B. & Trinite, M. 2003 Advanced piv algorithms with image distortion - validation and comparison from synthetic images of turbulent flows. In *PIV03 Symposium*. 14
- Lehuteur, B. 2007 Caractérisation et contrôle des structures tourbillonnaires longitudinales en aérodynamique automobile. *Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie* . 7, 9, 55, 57, 66
- Lehuteur, B. & Gilliéron, P. 2006 Drag reduction by active control of a-pillar vortex breakdown on a simplified car geometry. In *European Drag Reduction and Flow Control Meeting*. 7, 66
- Levy, B., Brancher, P. & Giovannini, A. 2007 Topology of the flow around a vehicle a-pillar : an experimental characterization. In *BBVIV5*. 39
- Levy, B., Brancher, P. & Giovannini, A. 2008a Experimental analysis of the a-pillar vortex fluctuations. In *ICTAM 2008, XXII International Congress of Theoretical and Applied Mechanics*. 43

- Levy, B., Brancher, P. & Giovannini, A. 2008*b* Experimental characterization of the flow topology around a vehicle a-pillar using piv and fluctuating wall pressure. In *ETMM7, 7th International Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements*. **11**, 34
- Levy, B., Brancher, P. & Giovannini, A. 2008*c* Experimental characterization of the velocity and wall pressure fields of an a-pillar vortex. In *14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (29th AIAA Aeroacoustics Conference)*. 105
- Lichtarowicz, A. & Markland, E. 1963 Calculation of potential flow with separation in a right-angled eldow unequal branches. *J. Fluid Mech.* **17**, 596–606. 56
- Lofdahl, L. & Gad-El-Hak, M. 1999 Mems applications in turbulence and flow control. *Progress in aerospace sciences* **35-2**, 101–203. 52
- Lumley, J.L. 1967 Atmospheric turbulence and wave propagation. the structure of inhomogeneous turbulence. *A.M. Yaglom and V.I. Tatarski* pp. 166–178. 25
- Maurel, S. 2001 Etude par imagerie laser de la génération et de la rupture d'un écoulement tourbillonnaire compressé. situation modèle pour la validation de la simulation aux grandes échelles dans les moteurs. *Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse* . 14
- McCormick, D.C. 2000 Boundary layer separation control with directed synthetic jets. *AIAA* pp. 2000–0519. 52
- Meynard, R. 1979 Flow velocity measurement by speckle method. In *Proceedings of the 2nd European congress on optics applied to metrology, Strasbourg, France, November 1979*, , vol. 210, pp. 25–28. 12
- Meynard, R. 1980 Equal velocity fringes in a rayleigh-benard flow by speckle method. *Appl. Opt.* **19**, 1385–1386. 12
- Meynard, R. 1982*a* Convective flow field measurement by speckle velocimetry. *Rev. Phys. Appl.* **197**, 301–305. 12
- Meynard, R. 1982*b* Digital image processing for speckle flow velocimetry. *Res. Sci. Instrum.* **153**, 110–111. 12
- Meynard, R. 1983*a* Instantaneous velocity field measurement in unsteady gas flow by speckle velocimetry. *Appl. Opt.* **22**, 540. 12
- Meynard, R. 1983*b* Speckle velocimetry : an application of image analysis techniques to the measurement of instantaneous velocity fields in unsteady flow. In *Proceedings of the international congress on instrumentation in aerospace simulation facilities (ICIASF'83), Haut-Rhin, France, Septembre 1983*, pp. 30–36. IEEE record. 12
- Meynard, R. 1983*c* Speckle velocimetry study of vortex pairing ina low-re unexcited jet. *Phys. Fluids* **26**, 2074–2079. 12
- Murad, N.M., Naser, J., Alam, F. & Watkins, S. 2004*a* Simulation of vehicle a-pillar aerodynamics using various turbulence models. *SAE Paper* **0231**, 55–70. 6

- Murad, N.M., Naser, J., Alam, F. & Watkins, S. 2004*b* Simulation of vehicule a-pillar aerodynamics of various yaw angles. In *15th Australasian Fluid Mechanics Conference*. The university of Sydney. 6
- Nelson, P.A., Fisher, M.J. & Rioual, J.L. 1991 Control of boundary layer flow. *Rapport Tech.* GB9121455. Rolls Royce PLC. 74
- Ono, K., Himeno, R. & Fukushima, T. 1999 Prediction of wind noise radiated from passenger cars and its evaluation based on auralization. *J. Wind Eng. and Ind. Aerodyn.* **81**, 403–419. 3, 4, 29
- Onorato, M., Costelli, A. & Garonne, A 1984 Drag measurement trough wake analysis. *SAE tech. paper* pp. SP-569. 2
- Peric, C., Watkins, S. & Lindqvist, E. 1997 Wind turbulence effects on aerodynamic noise with relevance to road vehicle interior noise. *J. Wind Eng. and Ind. Aerodyn.* **69-71**, 423–435. 5
- Raffel, M., Willert, C.E. & Kompenhaus, J. 1998 *Particle Image Velocimetry - A practical guide*. Springer. 13
- Rieithmuller, M.M. 1999 *La Velocimetrie par Image de Particules*. A.F.V.L. 13
- Robinson, D.W. & Dadson, R.S. 1956*a* A re-determination of the equal-loudness relation for pure tones. *Br. J. Appl. Physics* **7**, 166–181. 82
- Robinson, D.W. & Dadson, R.S. 1956*b* A re-determination of the equal-loudness relations for pure tones. *Br. J. Appl. Physics* **7**, 166–180. 83
- Romano, G. & Tropea, C. 2008 Selected papers from the 7th international symposium on particle image velocimetry, roma, italy, 11-14 september 2007. *Exp. in Fluids* **45**, 547–656. 12
- Schubauer, G.B. & Spangenberg, W.G. 1960 Forced mixing in boundary layers. *J. Fluid Mech.* **8**, 10–32. 62
- Selaquet, D., Aider, J.L., Hillairet, B., Villadier, B. & Leroux, C. 2005 Streamlined device for a motor vehicle and motor vehicle equipped with same. *Rapport Tech.* WO2005105555. Peugeot Citroen Automobiles SA. 76
- Sirovich, L. 1987*a* Turbulence and the dynamics of coherent structures. part 1 : Coherent structures. *Quarterly of Applied Mathematics* **XLV(3)**, 561–571. 26
- Sirovich, L. 1987*b* Turbulence and the dynamics of coherent structures. part 2 : Symmetries and transformations. *Quarterly of Applied Mathematics* **XLV(3)**, 573–582. 26
- Sirovich, L. 1987*c* Turbulence and the dynamics of coherent structures. part 3 : Dynamics and scaling. *Quarterly of Applied Mathematics* **XLV(3)**, 583–590. 26
- Smith, F.T. 1994 Theoretical prediction and design for vortex generators in turbulent boundary layers. *J. Fluid Mech.* **270**, 91–131. 62

- Sornborger, A., Sailstad, C., Kaplan, E. & Sirovich, L. 2003 Spatiotemporal analysis of optical imaging data. *NeuroImage* **18**, 610–621. [25](#)
- Takahashi, J. 1983 Automobile body. *Rapport Tech.* JP58026683. Honda Motor Co Ltd. [74](#)
- Taylor, H.D. 1948 Design criteria for and application of the vortex generator mixing principle. *Rapport Tech.* M-15038-1. Rep. United Aircraft Corp. [62](#)
- Taylor, H.D. 1950 Summary report on vortex generators. *Rapport Tech.* R-05280-9. Rep. United Aircraft Corp. [62](#)
- TUBerlin NC Flow around a simplified car model (ahmed body). [www.cfd.tu-berlin.de](http://www.cfd.tu-berlin.de). [3](#)
- Uchida, K. & Okumura, K. 1999 Aerodynamic noise simulation based on lattice boltzmann method. *SAE Paper* **1127**, 263–273. [4](#), [9](#), [20](#), [29](#)
- Vaillant, O. & Maillard, V. 2003 Numerical simulation of wall pressure fluctuations on a simplified vehicle shape. In *9th AIAA/CEAS Aeroacoustics conference and Exhibit*. [3](#), [4](#)
- Watanabe, M., Harita, M. & Hayashi, E. 1978 The effect of body shapes on wind noise. *SAE Paper* . [4](#)
- Watkins, S. & Oswald, G. 1999 The flow field of automobile add-ons with particular reference to the vibration of external mirrors. *J. Wind Eng. and Ind. Aerodyn.* **83**, 541–554. [5](#)
- Westerweel, J. & Scarano, F. 2005 Universal outlier detection for piv data. *Exp. in Fluids* **39**, 1096–1100. [14](#)
- Wheeler, G.O. 1982 Means for maintaining attached flow of a flowing medium. *Rapport Tech.* IT8249360. Wheeler GO. [77](#)
- Williamson, C.H.K. & Miller, G.D. 1995 Flow over a free-flying delta wing. *Gallery of Fluid Motion, Physics of Fluids* **7**. [23](#)
- Zaman, K.B.M., Reeder, M.F. & Samimy, M. 1994 Control of an axisymmetric jet using vortex generators. *Phys. Fluids* **6**, 778–793. [63](#)
- Zhu, M., Miyata, H., Hanaoka, Y., Aoki, K. & Terada, I. 1993 A numerical study of wind noise around front pillar. In *SAE Inter. Congress and Exposition, Detroit*, pp. 651–665. [4](#), [20](#)
- Zimmer, G. 2004 A study of passenger car a-pillar vortex effects using different experimental methods. *Thèse de Doctorat, RMIT University* . [5](#)



## **ANALYSE ET CONTROLE DE L'ECOULEMENT DE MONTANT DE BAIE**

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans la thématique de recherche aérodynamique automobile. Bien qu'à l'heure actuelle le secteur automobile se tourne principalement vers la réduction de traînée d'un véhicule, il existe d'autres secteurs de recherche en aérodynamique automobile. L'un d'eux est l'aéroacoustique, l'étude des phénomènes aérodynamiques susceptibles d'engendrer directement ou indirectement des perturbations acoustiques, c'est-à-dire du bruit.

Lors de cette thèse, l'aéroacoustique de montant de baie (partie située entre le pare-brise et la vitre latérale) a été étudiée de façon expérimentale : essais en soufflerie et sur piste, par mesures PIV, capteur de pression, fil chaud etc.

Dans un second temps, des techniques de contrôle passif ont été étudiées en soufflerie, et enfin des prototypes ont été usinés afin d'être testés sur véhicule.

**Mots clefs** : aéroacoustique, montant de baie, contrôle, automobile, interaction fluide-structure

## **ANALYSIS AND CONTROL OF THE FLOW AROUND AN A-PILLAR**

The work presented in this document is related to the research theme of car aerodynamic. Although at the present time the automobile industry is mainly looking at the drag reduction of a vehicle, there are other research areas in automotive aerodynamic. One of them is aeroacoustics, the study of the aerodynamic phenomena that can lead directly or indirectly to acoustic disturbances, ie noise.

In this thesis, the aeroacoustic of the A-pillar (the part situated between the wind-screen and side window) was experimentally studied in a wind tunnel and on a track, by PIV measurements, pressure sensor, hot wire, etc.

In a second phase, passive control techniques have been studied in a wind tunnel, and prototypes were made to be tested on a road vehicle.

**Keywords** : aeroacoustics, A-pillar, control, automotive, fluid-structure interaction