

Etude aérodynamique du nouveau véhicule Eco-marathon ECAM

Ing. S. Vandenbussche
Prof. Dr Ir L. Bricteux
ECAM – Bruxelles

Prof. Dr Ir J. van Beeck
Von Karman institute

Cet article traite de l'étude et de l'optimisation aérodynamique d'un nouveau prototype destiné à la compétition du Shell Eco-marathon. L'étude est réalisée à l'aide d'un logiciel de simulation numérique et la vérification de l'étude numérique s'est faite en soufflerie à l'aide de la mesure de la force de trainée et du coefficient de trainée.

Mots-clefs : Etude aérodynamique, Véhicule Eco-marathon, mesure de coefficient de trainée, test en soufflerie, simulation numérique

This article treats about the study and the aerodynamics optimization for a new prototype for the competition of the Shell Eco-marathon. The study use a software for the simulation and is check in a wind tunnel. We measure the drag coefficient and the drag force.

Keywords: Drag force, Drag coefficient, Shell Eco-marathon, Wind tunnel

1. Introduction

1.1. Shell Éco-marathon

Le Shell Éco-marathon est une course annuelle qui met les étudiants en compétition, pour concevoir et construire un véhicule à basse consommation énergétique. Il existe trois évènements à travers le monde qui rassemblent des milliers d'étudiants dont le but est de voyager le plus loin possible avec le moins d'énergie. Il y a une course pour l'Europe, une pour les États-Unis et une pour l'Asie. Les meilleures performances à ce jour atteignent des distances équivalentes à un aller simple de Paris à Moscou avec seulement un litre d'essence (2485 km/l). Cette compétition a vu le jour en 1939 lorsqu'un employé de la compagnie de Shell Oil fit le pari de voyager le plus loin possible avec une même quantité d'énergie. Depuis cette course s'est répandue sur trois continents et inclut les nouveaux types de carburants (diesel, biocarburants, électricité hydrogène, Gtl...). La course européenne se déroule comme suit : Les concurrents (les écoles techniques, hautes écoles et universités) doivent concevoir et construire eux-mêmes leur propre véhicule et parcourir une distance de 16,3 km (10 tours de pistes de 1630 m) en consommant le moins d'énergie possible. Depuis 2012, cette course se passe à Rotterdam et dure quatre jours (dont un jour et demi d'essai et deux jours et demi de course). Chaque équipe a droit à un maximum de quatre essais (valides ou non). C'est pourquoi il faut que le véhicule soit fiable à 100 %, chaque essai raté ne peut être récupéré (il n'y a donc pas de seconde chance). Le résultat final est alors le meilleur des essais. L'ECAM participe depuis 2002 à cette compétition, au départ, elle se déroulait à Bruxelles au Bois de la Cambre au niveau belge. Ensuite, elle s'est internationalisée et déplacée à Nogaro en France et se déroule maintenant à Rotterdam aux Pays-Bas. Pour participer, il faut également se conformer à la réglementation de la compétition (qui est assez conséquente).

1.2. ECAM

Le premier véhicule de l'ECAM a été conçu en 2002 à Saint-Gilles. L'équipe du moment est partie de zéro pour créer un véhicule nommé « le Solifuge », plusieurs travaux de fin d'études ont aidé à la mise en route de ce véhicule. Après quelques années et de nombreuses modifications, l'ECAM a décidé de changer de véhicule (les limites d'améliorations sur « le Solifuge » étant atteintes). Le deuxième véhicule, « la Gerbille », vit le jour en 2007. Aujourd'hui, l'ECAM estime à nouveau que « la Gerbille »

arrive « en fin de course ». C'est pourquoi l'ECAM a lancé l'étude d'un nouveau véhicule. Les résultats depuis 2002 n'ont cessé de s'améliorer (nous sommes passés de 200 km/l à plus de 800 km/l en 10 ans). L'équipe a beaucoup appris avec les années et nous voulons maintenant atteindre des performances plus ambitieuses (finir dans les 10 premiers et dépasser les 1000 km/l de carburant). De nouveaux challenges se présentent tels que créer une nouvelle coque (autoportante), un nouveau système de direction, un nouveau moteur, etc.

1.3. Objectifs

Les objectifs de ce travail de fin d'études sont multiples. Dans un premier temps, il nous faut concevoir la forme du nouveau véhicule nommé « La Joconde ». Pour ce faire, il faut connaître tous les éléments internes à incorporer (moteur, transmission, roues). Une fois la forme conçue, nous allons faire une étude aérodynamique du véhicule à l'aide d'essais expérimentaux et de simulations numériques. Les objectifs à atteindre sont les suivants : Optimiser au maximum l'aérodynamisme du véhicule par différentes méthodes, atteindre 1000 km/l et le top 10 de la compétition du Shell Eco-marathon.

2. Rappels théorique

2.1. Effets de compressibilité

Cette étude se base sur les principes fondamentaux de la dynamique des fluides. L'hypothèse de base est que le fluide est un milieu continu, homogène, isotrope, monophasique et stable chimiquement. Le fluide considéré est un gaz parfait dont l'équation d'état s'écrit:

$$pv = RT \quad \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Avec $R = 287$ [J/kg.K] La masse volumique, ρ , est égale à $\frac{1}{v}$. Il a été démontré que les variations de masse volumique dépendent du nombre de Mach. Ces variations sont définies comme suit:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \sim M^2$$

Le nombre de Mach de l'écoulement considéré pour cette expérience vaut:

$$M = \frac{U_{réel}}{U_{son}} = \frac{20}{340} = 0,06$$

U réel et U son représentent les vitesses réelles du fluide par rapport à la vitesse du son. Le nombre de Mach est relativement faible (pour un nombre de Mach en-dessous de 0,3, on considère les effets comme négligeables); l'erreur relative sur la densité sera de l'ordre de 0,4 %. On considère l'écoulement comme incompressible pour la suite de l'étude.

2.2. Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les forces d'inertie et de viscosité. Il permet d'avoir une similitude dans les résultats à un changement d'échelle près. Il permet également de déterminer le type d'écoulement : laminaire ou turbulent.

$$Re = \frac{UL}{\nu} [-]$$

Avec U, la vitesse d'écoulement du fluide, L, la longueur caractéristique de l'objet considéré et ν , la viscosité cinématique du fluide. La viscosité cinématique est définie de la manière suivante : $\frac{1}{\nu} = \frac{\rho}{\mu}$ ρ est la masse volumique du fluide, μ est la viscosité dynamique. On obtient ainsi, ν la viscosité cinématique du fluide.

2.3. Lois de similitude

Il existe une similitude complète entre deux écoulements lorsque les conditions suivantes sont satisfaites. Si ces deux écoulements sont semblables, alors les forces mises en œuvre sont semblables à un rapport constant. Dans le cas des écoulements incompressibles, de fluide visqueux Newtonien, et en absence de force extérieure, deux écoulements sont semblables si leur nombre de Reynolds sont égaux. La vitesse est inversement proportionnelle à la taille du modèle réduit. Dans notre cas, la vitesse d'écoulement du fluide pour le modèle réduit 1/9 doit être de 175 m/s pour une vitesse de 20 m/s sur le modèle taille réelle. Cette vitesse garantit un nombre de Reynolds égal dans les deux situations (taille réelle et échelle réduite). Malheureusement, la vitesse maximum atteignable avec la soufflerie L-2B est de 30 m/s. Due au fait que la soufflerie se trouve dans une pièce fermée, il y a un problème avec la circulation de l'air et la soufflerie ne peut pas atteindre ses 35 m/s théoriques de la soufflerie.

Échelle	Vitesse soufflage théorique		Reynolds théorique	Vitesse soufflage réel		Reynolds réel
	m/s	km/h		m/s	km/h	
1	19,44	70	3,74E+06	20,00	72	3,85E+06
1/4	77,78	280	3,74E+06	20,00	72	9,62E+05
1/5	97,22	350	3,74E+06	20,00	72	7,69E+05
1/6	116,67	420	3,74E+06	20,00	72	6,41E+05
1/7	136,11	490	3,74E+06	20,00	72	5,49E+05
1/8	155,56	560	3,74E+06	20,00	72	4,81E+05
1/9	175,00	630	3,74E+06	20,00	72	4,27E+05
1/10	194,44	700	3,74E+06	20,00	72	3,85E+05

Tableau 1. Données pour la similitude de l'écoulement

Le coefficient de traînée reste constant au-delà d'un certain nombre de Reynolds (différent pour chaque écoulement et objet étudié). Il faut donc s'assurer que ce nombre de Reynolds est bien dépassé lors des expériences sur le modèle réduit, ce qui assurera une similitude dans les résultats.

2.4. Coefficient de traînée

La « traînée » est constituée de la somme de la traînée de frottement et de la traînée de pression. La traînée de pression est, dans le cas, le terme le plus important. La traînée de pression est une force normale à la surface. Cette traînée est fonction du type d'écoulement et de la forme du véhicule. Le coefficient de traînée est décomposé en six coefficients : C_x , C_y , C_z , C_l , C_m , C_n . Les trois premiers expriment le coefficient de traînée des trois axes principaux (x , y , z) et les trois derniers expriment des coefficients de moments par rapport aux trois axes. La force de traînée est fonction de la forme, de la taille de l'objet et de la vitesse du fluide dans lequel elle se déplace. Pour caractériser cette traînée, on utilise usuellement le coefficient de traînée C_d , qui est un nombre sans dimension, caractérisant la forme de l'objet uniquement. Dans cette étude, nous ne prendrons en compte que le coefficient de traînée dans le sens de l'écoulement du fluide.

$$C_d = \frac{F_d}{q S} [-]$$

La pression dynamique, $q = 0.5 \rho U^2$ [Pa]. Avec « U » la vitesse de l'objet par rapport au fluide et « ρ » la masse volumique du fluide. La surface de référence de l'objet « S », ou le maître-couple est la plus grande section du

solide dans le plan perpendiculaire au déplacement. F_d est la force de trainée de l'objet dans le fluide considéré. La force de trainée dépend du coefficient de frottement du fluide, de la forme du profil, du type d'écoulement du fluide et du maître-couple de l'objet. Le coefficient de frottement dépend du profil du fluide. Le régime d'écoulement du fluide peut être déterminé par le nombre de Reynolds. La trainée de frottement est le résultat des effets de la viscosité. Cet aspect n'apparaît que dans la couche limite.

3. Présentation du logiciel de simulation numérique

Dans le cadre de ce travail de fin d'études, on utilise le logiciel de simulation numérique Fine Open. Ce logiciel vient de la suite NUMECA. Ce logiciel est assez récent pour l'Institut von Karman, il est en phase de développement en collaboration avec NUMECA. Le premier inconvénient est la définition du maillage. En effet, on va discrétiser un milieu continu afin de pouvoir le traiter de manière numérique. De plus, le nombre de cellules dépend directement de la forme du corps à étudier. Une autre difficulté est celle du décollement de la couche limite; actuellement, le simuler n'est pas réalisable. Bien que les puissances des ordinateurs aient considérablement augmentés, le temps de calcul reste encore de quelques heures par simulation. Pour arriver à simuler cet essai, des ressources relativement importantes sont utilisées, comme le « cluster », c'est-à-dire un réseau où les ressources sont accessibles, pour permettre au logiciel de tourner plus vite. Dans un premier temps, nous ne connaissons pas les conditions réelles d'existence, c'est-à-dire s'il y a décollement de la couche limite, régime turbulent ou laminaire, etc. Il faut un nombre de simulations important pour affiner certains paramètres et s'approcher des conditions souhaitées. De manière générale nous considérons le logiciel comme « une boîte noire » dans laquelle on rentre les paramètres et il en sort des résultats.

4. Paramètres de simulation

4.1. Modèle du fluide utilisé

La simulation numérique est paramétrée le plus fidèlement possible à la réalité, c'est-à-dire à la simulation expérimentale. Nous commençons par

définir le fluide utilisé dans la soufflerie, dans ce cas-ci, il s'agit de l'air (gaz parfait) dont les caractéristiques sont disponibles au tableau 2.

AIR (gaz parfait)		
Pression de référence	101325	Pa
Température de référence	300	K
Cp	1006	J / (kg K)
Gama	1,4	
Loi de conduction thermique	Prandtl	
Nombre de Prandtl	0,708	
Loi de viscosité	Loi de Sutherland	
Viscosité cinématique	0,0000157	m ² /s
Température	293	K
Densité	1,2	kg/m ³
Température de Sutherland	110	K
Densité	1,1751	kg/m ³

Tableau 2. Caractéristiques du fluide utilisé pour la simulation numérique

4.2. Modèle de l'écoulement et modèle de turbulence utilisés

Dans un premier temps, on utilise le modèle de turbulence Spalart-Allmaras afin d'obtenir la convergence de la simulation le plus rapidement possible. Nous avons également testé d'autres modèles de turbulence tels que K-omega, K-epsilon, etc. Mais pour tous ces autres modèles de turbulences nous n'atteignons pas les critères de convergences souhaités. Il y a une « explosion » de la solution, c'est-à-dire que le modèle de turbulence ne correspond pas au modèle nécessaire dans ce cas-ci. Cet essai est à rejeter.

4.3. Conditions limites

Nous nous occupons maintenant des conditions limites de la simulation, c'est-à-dire des paramètres du fluide entrant, sortant, des parois, du solide

étudié. Nous paramétrons la vitesse d'entrée, la pression de sortie du fluide et sur quel solide calculer les efforts. Nous choisissons de paramétrer la vitesse comme normale à l'entrée de la soufflerie, sa vitesse absolue est de 20 m/s à la température de 293 K (20°C) et nous utilisons une viscosité de $1,57 \cdot 10^{-5}$ [m²/s]. Pour la sortie, nous imposons simplement la pression statique à une valeur de 101325 [Pa]. Nous définissons également les conditions sur les parois solides de la soufflerie. Nous imposons que ces parois soient adiabatiques (sans échange de chaleur avec l'extérieur).

4.4. Conditions initiales

Les conditions initiales déterminent les paramètres aux parois de la soufflerie (pression, température, vitesse en XYZ), elles sont spécifiées au tableau 3.

Système de coordonnées	Cartésien
Pression	101325 Pa
Température	293 K
V_x	20 m/s
V_y	0
V_z	0

Tableau 3. Conditions initiales de la simulation numérique

4.5. Calcul de contrôle

Les calculs de contrôle interviennent à plusieurs endroits. Premièrement sur les sorties, il faut définir si l'on veut des calculs pour un écoulement interne ou externe ainsi que tous les paramètres que l'on souhaite vérifier après que le calcul soit fini. On peut par exemple vérifier les vitesses dans le sens des X, les champs de pression, de température, etc. Nous en parlerons lors de l'analyse des résultats. Deuxièmement sur le nombre d'itérations total, 10 000 itérations, le critère de convergence final, fixé la plupart du temps à -3,5, et les sauvegardes du calcul toutes les 500 itérations. Et pour finir, nous allons déterminer le partage des ressources pour notre simulation. Dans notre cas, nous choisissons de partager le domaine en vingt parties égales

qui sont distribuées sur vingt processeurs différents. Cela permet d'accélérer considérablement la vitesse de calcul.

5. Résultats numériques

Les résultats obtenus lors des simulations numériques réalisées sont repris dans la table ci-dessous.

Cd	Force de trainée	Vitesse	Convergence	Modèle d'écoulement	Nb itérations	Nb de cellules
	N	m/s				
-0,085	-0,060	20	non	Spalart-Allmaras	1.673	3 000 000
-0,105	-0,074	20	non	Spalart-Allmaras	1.733	3 000 000
0,076	0,054	20	oui	Spalart-Allmaras	1.794	3 000 000
0,011	0,008	20	oui	Spalart-Allmaras	1.855	3 000 000
0,430	0,00303	2	oui	Spalart-Allmaras	1.915	1 000 000
1,270	0,00895	2	non	Spalart-Allmaras	1.976	1 000 000
1,001	0,00706	2	non	Spalart-Allmaras	2.037	1 000 000
0,780	0,54976	20	non	K-epsilon (low)	2.098	1 000 000
0,469	0,00331	2	non	Spalart-Allmaras	2.198	350 000
1,270	0,00895	2	oui	Spalart-Allmaras	2.199	350 000
0,290	0,20467	20	oui	Spalart-Allmaras	2.200	350 000
0,291	0,20515	20	oui	Spalart-Allmaras	2.400	350 000
0,291	0,20515	20	oui	Spalart-Allmaras	3.151	350 000

Tableau 4. Résultats des simulations numériques

Certaines simulations numériques n'ont pas convergé. La convergence des forces résiduelles est le premier critère qui montre si la simulation est acceptable ou non. Nous prenons les trois dernières simulations du tableau comme valide pour la suite de l'étude (cd de 0,29) .

6. Essai en soufflerie

Cette méthode a pour but de reproduire, le plus fidèlement possible, les conditions réelles d'écoulement du fluide autour du corps solide. Les essais

en soufflerie demandent une préparation importante, en fonction de la précision des mesures. Les prises de mesures sont assez rapides, une fois que tout est installé et calibré. Le temps d'utilisation de la soufflerie est également une contrainte dont il faut tenir compte. Il est nécessaire de limiter le nombre d'essais au minimum. Le but de la campagne d'essai est de valider les simulations numériques en comparant les mesures globales telles que le coefficient de traînée du véhicule. Il y a cependant quelques inconvénients qui nous éloignent du modèle réel tels que les effets de sol, les effets de blocage¹, et les erreurs sur les mesures, qui ne sont pas à minimiser.

6.1. Modèle réduit

Les modèles réduits sont usinés à l'ECAM, en bois (du hêtre). Un insert métallique pourvu d'un filet est placé afin de l'attacher à la tige de support.

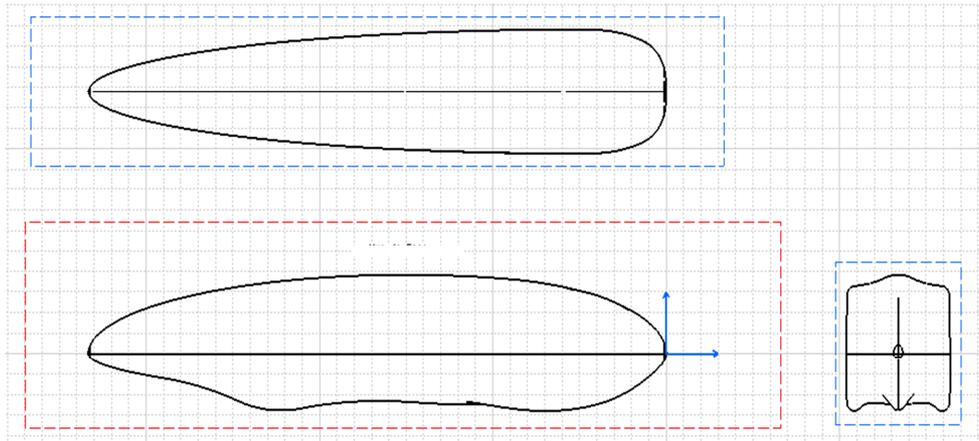


Figure 1. Schéma du modèle réduit de la Joconde

7. Résultats expérimentaux

7.1. La tige filetée

Le premier effort mesuré sur la balance est celui qui s'exerce sur la tige filetée qui maintient le modèle réduit. Pour ce faire, nous avons installé

¹ Ces effets ne sont pas présents lors de simulation en condition réelle.

uniquement la tige filetée (dépassement de 35 mm par rapport au fond de la section d'essai) et nous y avons appliqué des vitesses d'écoulement du fluide de 0 à la vitesse maximale possible. Nous avons testé deux hauteurs de tiges filetées différentes afin de voir l'impact de la hauteur sur la force de trainée des tiges.

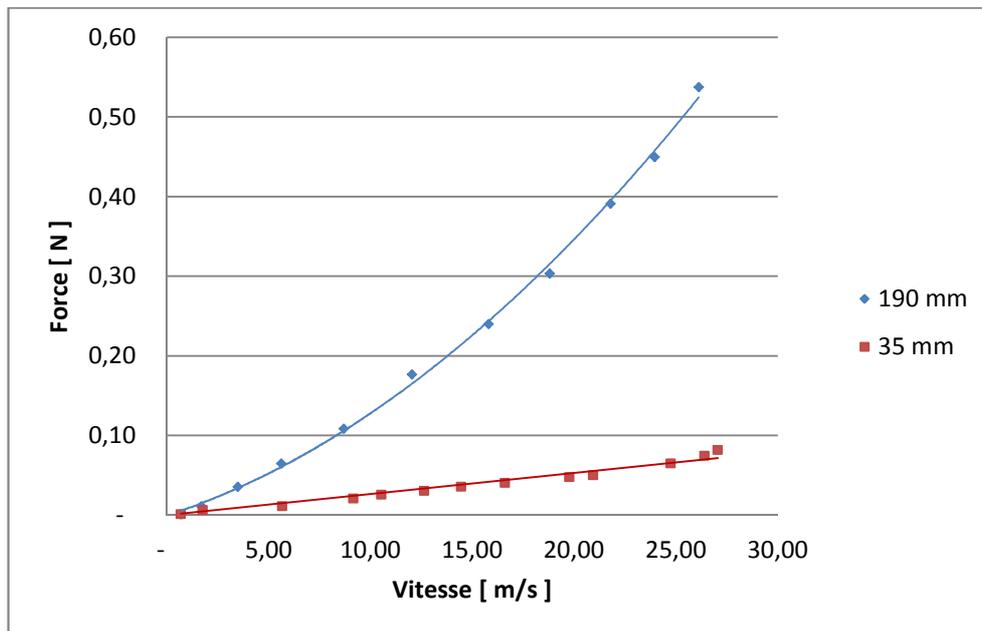


Figure 2. Force de trainée de la tige filetée

Pour la suite des expériences nous utiliserons les données de la courbe inférieure, nous plaçons le modèle à une distance de 35 mm du fond de la soufflerie. L'évolution de la force de trainée est sensiblement différente en fonction de la hauteur de la tige filetée. Pour des faibles hauteurs, l'évolution est linéaire, tandis que pour des hauteurs plus importantes, l'évolution tend vers une courbe du second degré.

7.2. Positionnement optimal des modèles dans la soufflerie

La tige filetée a été testée pour deux hauteurs différentes, nous testons également les modèles pour ces deux hauteurs, à savoir 35 mm et 190 mm.

Modèle	1/8	1/9	
Température	293	293	K
viscosité cinématique	0,0000157	0,0000157	m ² /s
Masse volumique de l'air	1,21	1,21	kg/m ³
Maître-couple	0,003	0,0038	m ²
Longueur caractéristique	0,375	0,333	m
Pression atmosphérique	101660	101660	Pa
R	287	287	J/kg.K

Tableau 5. Caractéristiques du fluide pour les essais expérimentaux

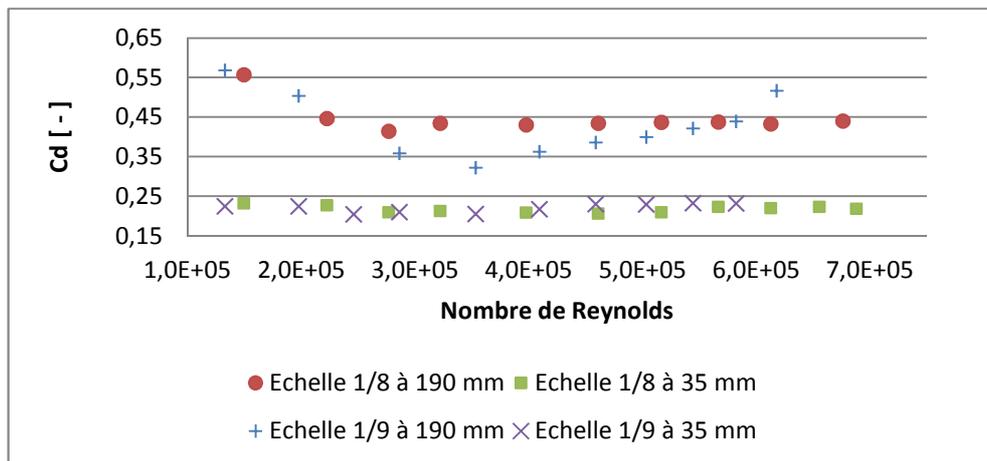


Figure 3. Comparaison des différents Cd pour des positions différentes dans la soufflerie

Il est normal de constater des coefficients de trainée différents puisqu'on tient compte de la force de trainée du modèle plus celle de la tige filetée (non-négligeable). Par contre on devrait remarquer un coefficient de trainée qui tend vers une valeur constante quelque soit la hauteur à laquelle on prend les mesures. Pour le coefficient de trainée à 35 mm, on tend pour les modèles vers une valeur de 0,22. Tandis que pour le coefficient de trainée à la hauteur de 190 mm le modèle à l'échelle de 1/8 tend vers une valeur de 0,44 et le modèle à l'échelle de 1/9 ne tend pas vers une valeur constante. Remarque : Le tube de Pitot se situe à une distance de 250 mm du fond et

150 mm du début de la section d'essai. Il se peut donc que les perturbations engendrées par ce dernier soient répercuté sur les mesures de forces de trainée des essais à la hauteur de 190 mm. Pour le haut de la soufflerie, la face est composée de plaques de plexiglas, dont de nombreux trous ont été bouchés à l'aide de bandes adhésives. Pour la suite des essais nous prenons une hauteur de tige de 35 mm.

Nous procédons maintenant aux essais en soufflerie des deux modèles réduits. Nous mesurons uniquement la force de trainée en fonction du nombre de Reynolds. Le modèle est à une hauteur de 35 mm. De la même manière que pour la tige filetée, nous augmentons la vitesse du fluide progressivement de zéro à la vitesse maximum possible par la soufflerie. Nous recommençons plusieurs fois ces essais afin d'obtenir un nombre de résultats satisfaisants. Nous calculerons par la suite les différents coefficients de trainée en fonction du nombre de Reynolds. Par la suite, nous enlevons, de manière mathématique, la force de trainée, de la tige filetée, de la force de trainée globale mesurée. Nous obtenons alors le coefficient de trainée finale du modèle réduit. Le coefficient de trainée doit, théoriquement, rester constant quelle que soit l'échelle de notre modèle réduit. En partant du haut, nous avons le coefficient de trainée globale du modèle à l'échelle 1/9. On tend vers une valeur de coefficient de trainée de l'ordre de 0,3. Ensuite, nous avons les valeurs du coefficient de trainée du modèle à l'échelle 1/8. Le coefficient de trainée tend vers une valeur de 0,25. Finalement, nous avons les coefficients de trainée du modèle uniquement, c'est-à-dire que l'on a soustrait la force de trainée de la tige filetée, les deux courbes inférieures. Le coefficient de trainée est sensiblement réduit et tend vers la valeur de 0,22. De la même manière que précédemment, nous avons retiré la force de trainée de la tige filetée. Nous obtenons une valeur de coefficient de trainée qui tend vers 0,22.

Remarques :

Les vitesses d'écoulement du fluide ont été lues à l'aide d'un oscilloscope. Malheureusement entre les essais du modèle à 1/8 et les essais du modèle à 1/9, nous avons changé d'oscilloscope (problème de disponibilités des appareils de mesures à l'Institut von Karman). La lecture sur l'oscilloscope pour les données de la deuxième courbe en partant du haut était de moins bonne précision que celui des essais de la première courbe. L'état de surface des deux modèles est sensiblement différent. La technique d'usinage et la préparation du bois brut se sont améliorées entre les deux usinages.

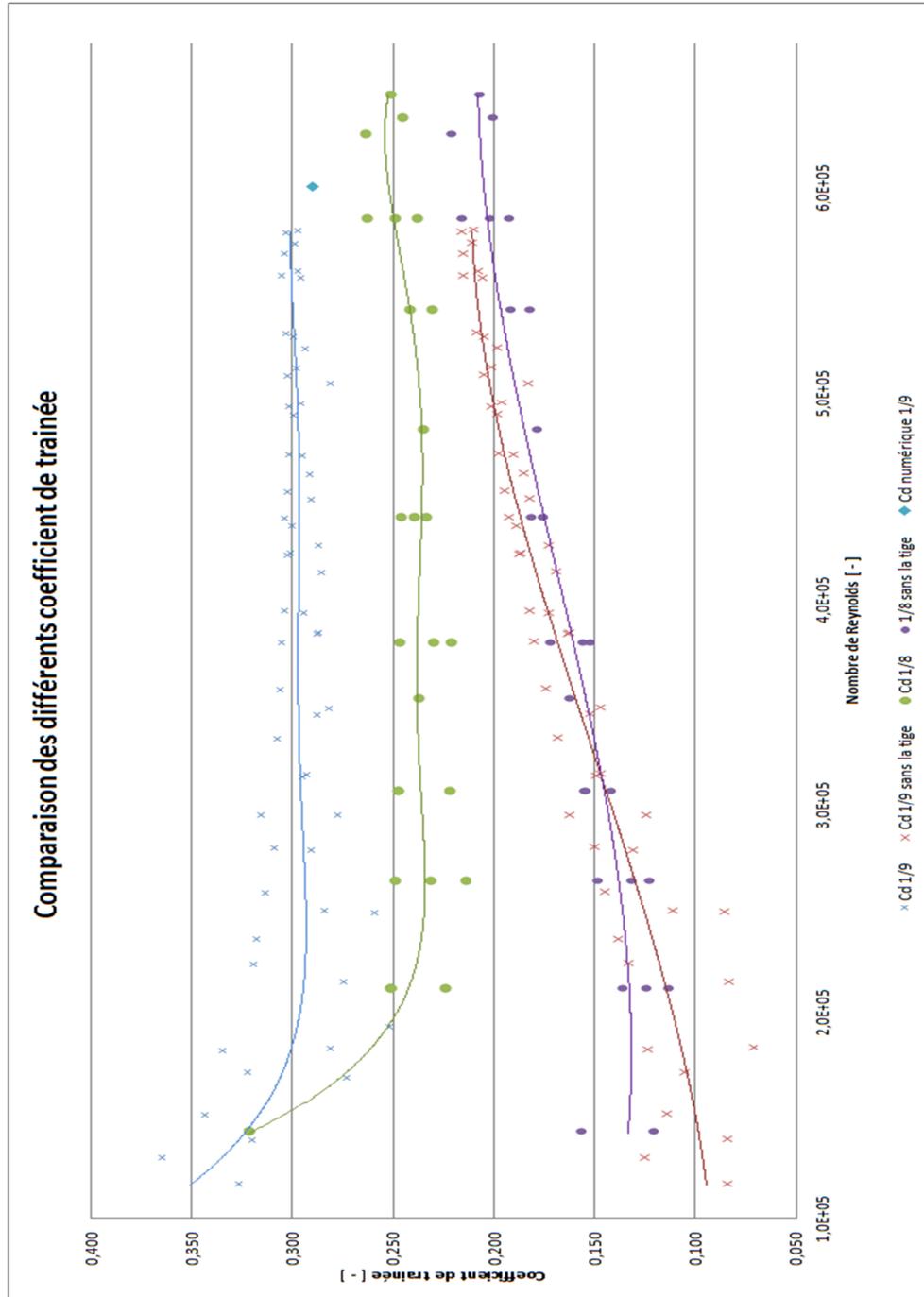


Figure 4. Résultats des essais en soufflerie pour les 2 modèles réduits.

Le modèle à l'échelle 1/8 a un meilleur état de surface que le modèle à l'échelle 1/9. Le modèle 1/8 a un état de surface de l'ordre de $5,10 \mu\text{m}$ et le modèle à l'échelle 1/9 de l'ordre de $5,44 \mu\text{m}$. Le nombre de Reynolds atteint par le modèle à l'échelle 1/8 est légèrement plus élevé que le modèle à l'échelle 1/9. Le coefficient de trainée, sans la tige filetée, tend vers une valeur égale pour les deux modèles. Nous comparons les différents efforts de trainée en fonction du nombre de Reynolds. Ce dernier ne varie que par la vitesse d'écoulement du fluide; pour notre expérience, nous prenons tous les autres paramètres comme constants.

7.3. L'optimisation des modèles réduits

Pour cette optimisation, nous utilisons le modèle à l'échelle de 1/8. Le modèle étant plus grand, il est plus facile d'y ajouter des bandes rugueuses. Le principe est le suivant : nous ajoutons des bandes rugueuses à des endroits particuliers du modèle réduit afin que la couche limite ne se décolle pas ou le plus tard possible du modèle réduit. Cette expérience a déjà fait ses preuves dans d'autres cas. La particularité de cette méthode est qu'il n'y a pas de moyen mathématique actuellement pour déterminer l'emplacement ou les dimensions de la bande rugueuse à ajouter. Nous ajoutons ces bandes d'après l'expérience acquise lors d'autres expériences, voir bibliographie, et d'après la différence des valeurs du coefficient de trainée avant et après la pose des bandes rugueuses. Le but est bien entendu de réduire le coefficient de trainée. La bande rugueuse crée une couche limite turbulente qui colle littéralement la paroi du modèle réduit. Les bandes rugueuses sont fabriquées à base de papier de verre² et de bande adhésive double-face. Nous nous basons sur deux théories: la première dit que la bande rugueuse doit être posée à 45° pour un cercle à partir du centre de symétrie; la deuxième théorie vient de l'aéronautique, pour une aile d'avion, et dit que la bande rugueuse doit débiter à 10 % de la longueur totale de l'objet étudié. Nous testons la deuxième théorie en premier lieu, la détermination de l'emplacement de la bande rugueuse est plus aisée dans cette théorie. Il faut tenir compte de plusieurs paramètres, l'épaisseur de la bande rugueuse doit être entre 1,2 et 2,4 mm d'épaisseur, la largeur de la bande doit être proche de 10 mm, la bande ne peut augmenter le maître-couple du modèle réduit (donc elle ne peut pas dépasser dans la vue de face). Le premier ajout se fait à 10 % de la distance totale du modèle en débutant à l'avant.

² Papier de verre R222 P1220.

longueur	50	mm
largeur	10	mm
épaisseur	1,9	mm

Tableau 6. Caractéristiques de la première bande rugueuse

Le papier de verre est collé à l'aide d'un ruban adhésif double-face sur le modèle réduit. Le deuxième ajout se fait toujours à 10 % de la longueur du modèle mais sur la partie inférieure du modèle. La bande rugueuse se situe entre les deux roues avant du véhicule.

longueur	35	mm
largeur	10	mm
épaisseur	1,9	mm

Tableau 7. Caractéristiques de la 2e bande rugueuse

Ensuite, nous avons retiré la première bande (au-dessus à l'avant) et placé une nouvelle bande au-dessus mais à l'arrière cette fois-ci. L'emplacement de cette bande s'est fait de manière arbitraire, à 270 mm de l'avant du modèle réduit.

longueur	100	mm
largeur	10	mm
épaisseur	1,9	mm

Tableau 8. Caractéristiques de la 3e bande rugueuse

Nous présentons un graphique récapitulatif, à la page suivante, de tous les résultats obtenus lors des expériences comprenant les bandes rugueuses.

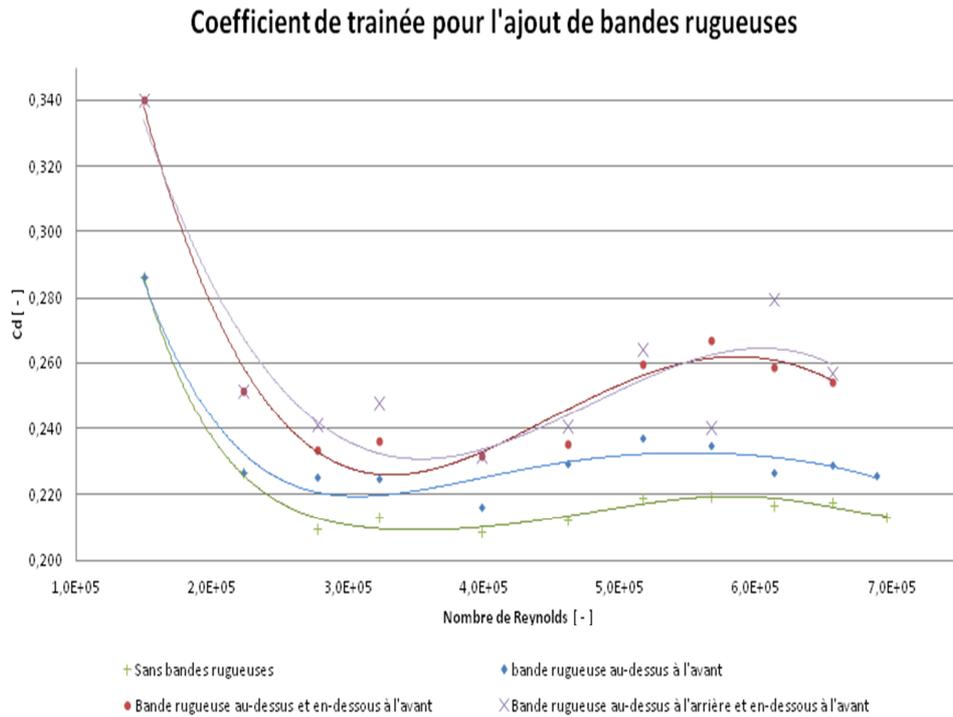


Figure 5. Coefficient de trainée pour l'ajout de bande rugueuse

Nous prenons comme référence, les valeurs de coefficient de trainée mesurées dans les essais précédents pour le modèle à l'échelle de 1/8. Nous remarquons, au vu des résultats, que l'ajout des bandes rugueuses a des effets plus néfastes que positifs sur le coefficient de trainée. En effet, cette théorie s'applique principalement lorsqu'il y a un décollement important de la couche limite. Si ce n'est pas le cas, les bandes rugueuses ont un effet néfaste car elles apportent des turbulences supplémentaires dues à leur état de surface rugueux.

8. Conclusion générale

La simulation numérique où nous avons introduit les paramètres qui se rapprochent le plus de la réalité dans le modèle de simulation numérique. Une fois la simulation validée, nous analysons plus en détails les champs de vitesse et de pressions. Malheureusement, nous ne pouvons certifier que la simulation numérique est acceptable. Nous faisons l'hypothèse de prendre cette simulation numérique comme référence pour la suite de l'étude. Maintenant nous voulons valider la simulation numérique par des essais expérimentaux. Une fois le modèle réduit créé, nous pouvons le mettre dans la soufflerie pour mesurer le coefficient de trainée. Les résultats des expériences nous donnent différentes valeurs de coefficient de trainée en fonction du nombre de Reynolds. Nous mesurons également plusieurs paramètres en soufflerie tels que la hauteur du modèle par rapport au sol de la soufflerie, la direction de l'écoulement par rapport au modèle, des modèles à des échelles de fabrication différentes, le décollement de la couche limite ainsi que l'ajout de bande rugueuse en vue de réduire le coefficient de trainée. Nous comparons les valeurs de coefficient de trainée obtenues de manière numérique aux valeurs obtenues expérimentalement. Nous calculons l'incertitude sur les mesures expérimentales.

9. Sources

- [1] M. ANTON SANTOS, *Études aérodynamique d'une maquette à l'échelle réduite du prototype ECAM participant au Shell éco-marathon*, TFE ECAM 2004
- [2] L.BRICTEUX, X VAN DEN DOOREN, *Cours de mécanique des fluides et transfert de la chaleur*, édition 2012, publié à l'ECAM.
- [3] J-L. DEVILLE, *Influence du blocage et effet de sol sur le comportement aérodynamique d'un éco-véhicule*, TFE ECAM 2005
- [4] Hoerner by Dr Ing. SIGHARD F. HOERNER, *Fluid-dynamics drag*, publié par l'auteur
- [5] K. HOURIGAN, M.C. THOMPSON, B.T.TAN, *Self-sustained oscillations in flows around long blunt plates*, Journal of fluid and structures (2001), n° 15, pages 387-398
- [6] O. LOIX, *Conception et réalisation d'une coque de prototype à faible consommation*, TFE ECAM 2002
- [7] F. LOUMAYE, *Études aérodynamique en soufflerie d'un prototype à faible consommation*, TFE ECAM 2003