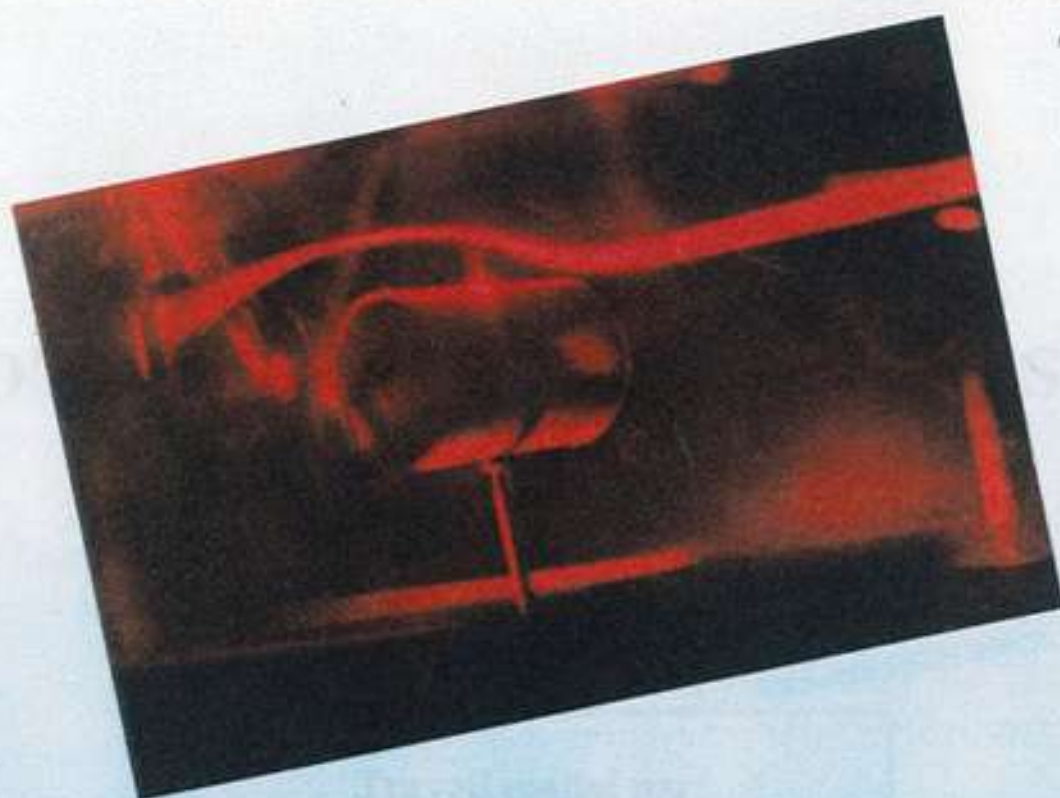




OLYMPIADES
DE PHYSIQUE



MISE EN OEUVRE D'ESSAIS AERODYNAMIQUES

Lycée Jules HAAG - Besançon

Mars 1995

Nous tenons à remercier

pour la réalisation des simulations numériques d'écoulement

Pr. J.M. CROLET et Dr. F. JACOB

du Laboratoire de Calcul Scientifique
de la Faculté des Sciences de Besançon

pour leurs conseils dans la réalisation de notre soufflerie

Pr. R. PORCAR et Pr. J.P. PRENEL

de l'Institut de Génie Energétique de Belfort

Pr. J.P. ARDISSONNE

du Laboratoire d' Aéro hydroacoustique
de l' Université d'Aix Marseille II

**OLYMPIADES
DE PHYSIQUE
1995**

**MISE EN OEUVRE
D'ESSAIS AERODYNAMIQUES**

Travail réalisé par:

**Gilles DI GUGLIELMO
Damien PIRANDA
Martial PREVALET
Vincent RIFFIOD**

sous la responsabilité de:

B. PORTEHAULT
professeur de physique au Lycée Jules HAAG

Introduction

1 - Motivations et choix du sujet.

Le 30 Avril 1994 Roland Ratzenberger écrase sa Formule-1 lancée à 200 km/h contre les barrières de sécurité du circuit d'Imola, quelques instants après avoir perdu une partie de l'aileron avant-droit de sa voiture. Une perte d'adhérence consécutive à cet incident, qui paraissait pourtant mineur, a très probablement été la cause du drame.

Cet accident, par l'importance capitale des effets aérodynamiques qu'il met en lumière, est en partie à l'origine de notre intérêt pour l'aérodynamique, et donc aussi de l'étude que nous présentons aujourd'hui. La pratique de l'aéro-modélisme par deux d'entre nous a également été une incitation à entreprendre ces essais, afin de mieux connaître les phénomènes physiques qui sont à la base de toute l'aéronautique et qui jouent maintenant un rôle important dans la définition des automobiles, trains à grande vitesse, etc...

2 - Plan de l'étude.

Une fois défini le sujet de notre étude, et vu le peu de temps imparti pour la réaliser, il nous est apparu judicieux d'orienter notre activité dans les directions ci-après :

- * Conception et réalisation d'une soufflerie subsonique, de dimensions raisonnables compte tenu de nos moyens, afin de disposer d'un matériel autonome pour mener à bien le reste de l'étude.

- * Mise au point d'un appareillage de mesure en vue de déterminer les effets induits par l'écoulement de l'air autour de structures données, ainsi que d'un dispositif de visualisation permettant de connaître les trajectoires des écoulements autour de ces mêmes structures.

- * Utilisation des outils précédents pour :

- mesurer les forces de portance et de traînée induites par un écoulement d'air sur une structure de forme géométrique simple

(sphère, demi-sphère, cylindre, profil d'aile), et comparer les résultats obtenus avec des valeurs théoriques ou expérimentales déjà connues.

- visualiser les écoulements autour de ces structures et comparer ces visualisations avec des simulations numériques, réalisées à partir des modèles mathématiques par un laboratoire universitaire.

* Les phases précédentes ayant permis de valider les outils et les méthodes, il nous est alors possible de les utiliser pour étudier de nouveaux écoulements en rapport avec des problèmes réels ou "industriels" (automobiles, profils d'ailes d'avion,...).

Remarque : Les structures utilisées pour effectuer nos essais ont toujours une *géométrie telle que l'écoulement correspondant puisse être considéré comme bi-dimensionnel* dans la zone de mesures. Il s'agit par exemple d'objets présentant une symétrie par rapport à un plan parallèle à la direction générale de l'écoulement, les mesures étant alors effectuées en certains points du plan de symétrie.

Chapitre I

REALISATION DES APPAREILLAGES D'EXPERIMENTATION

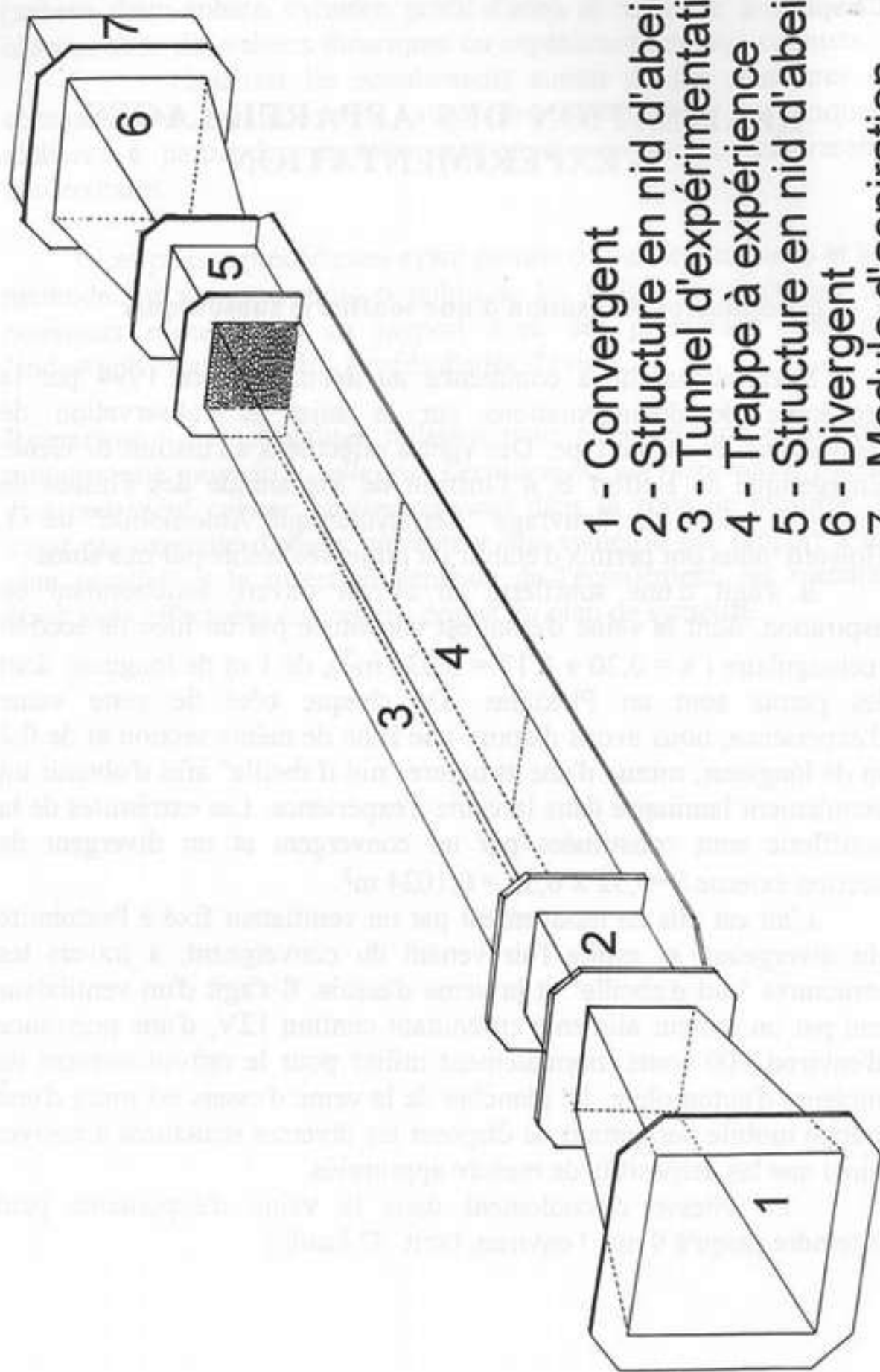
1 - Conception et réalisation d'une soufflerie subsonique.

Notre démarche a commencé au début de l'été 1994 par la recherche de documentations sur le sujet et l'observation de réalisations du même type. Des visites effectuées à l'Institut de Génie Energétique de Belfort et à l'Institut de Mécanique des Fluides de Marseille, ainsi que l'ouvrage "Aérodynamique Automobile" de G. Howard nous ont permis d'établir un projet réalisable par nos soins.

Il s'agit d'une soufflerie en circuit ouvert, fonctionnant en aspiration, dont la veine d'essai est constituée par un tube de section rectangulaire ($s = 0,20 \times 0,17 = 0,034 \text{ m}^2$), de 1 m de longueur dont les parois sont en Plexiglas. De chaque côté de cette veine d'expérience, nous avons disposé une zone de même section et de 0,2 m de longueur, munie d'une structure "nid d'abeille" afin d'obtenir un écoulement laminaire dans la veine d'expérience. Les extrémités de la soufflerie sont constituées par un convergent et un divergent de section externe $S = 0,32 \times 0,32 = 0,1024 \text{ m}^2$.

L'air est mis en mouvement par un ventilateur fixé à l'extrémité du divergeant, et aspire l'air venant du convergeant, à travers les structures "nid d'abeille" et la veine d'essais. Il s'agit d'un ventilateur mu par un moteur alimenté en courant continu 12V, d'une puissance d'environ 100 watts, normalement utilisé pour le refroidissement de moteurs d'automobile. Le plancher de la veine d'essais est muni d'une trappe mobile permettant de disposer les diverses structures à essayer ainsi que les dispositifs de mesure appropriés.

La vitesse d'écoulement dans la veine d'expérience peut atteindre jusqu'à 9 m.s^{-1} environ, (soit 32 km/h).



- 1 - Convergent
- 2 - Structure en nid d'abeille
- 3 - Tunnel d'expérimentation
- 4 - Trappe à expérience
- 5 - Structure en nid d'abeille
- 6 - Divergent
- 7 - Module d'aspiration

La fabrication de cet appareil a occupé nos moments de loisir pendant environ un mois et s'est terminé fin octobre 1994.

2 - Vérification de la laminarité du flux dans la veine d'essais; Etalonnage de la soufflerie.

Lors de la construction de notre soufflerie, l'installation de structures "nid d'abeilles" de chaque côté de la veine d'essais avait été prévue pour assurer l'obtention d'un flux laminaire à l'intérieur de celle-ci. Avant d'entamer les essais aérodynamiques envisagés, nous avons néanmoins vérifié cette laminarité, aux différentes vitesses de fonctionnement de la soufflerie. La photo n° 1 de la page 39, montrant la trajectoire d'un filet d'air situé au centre de la veine d'essai, pour une vitesse de fonctionnement de $0,7 \text{ m.s}^{-1}$, confirme nos prévisions.

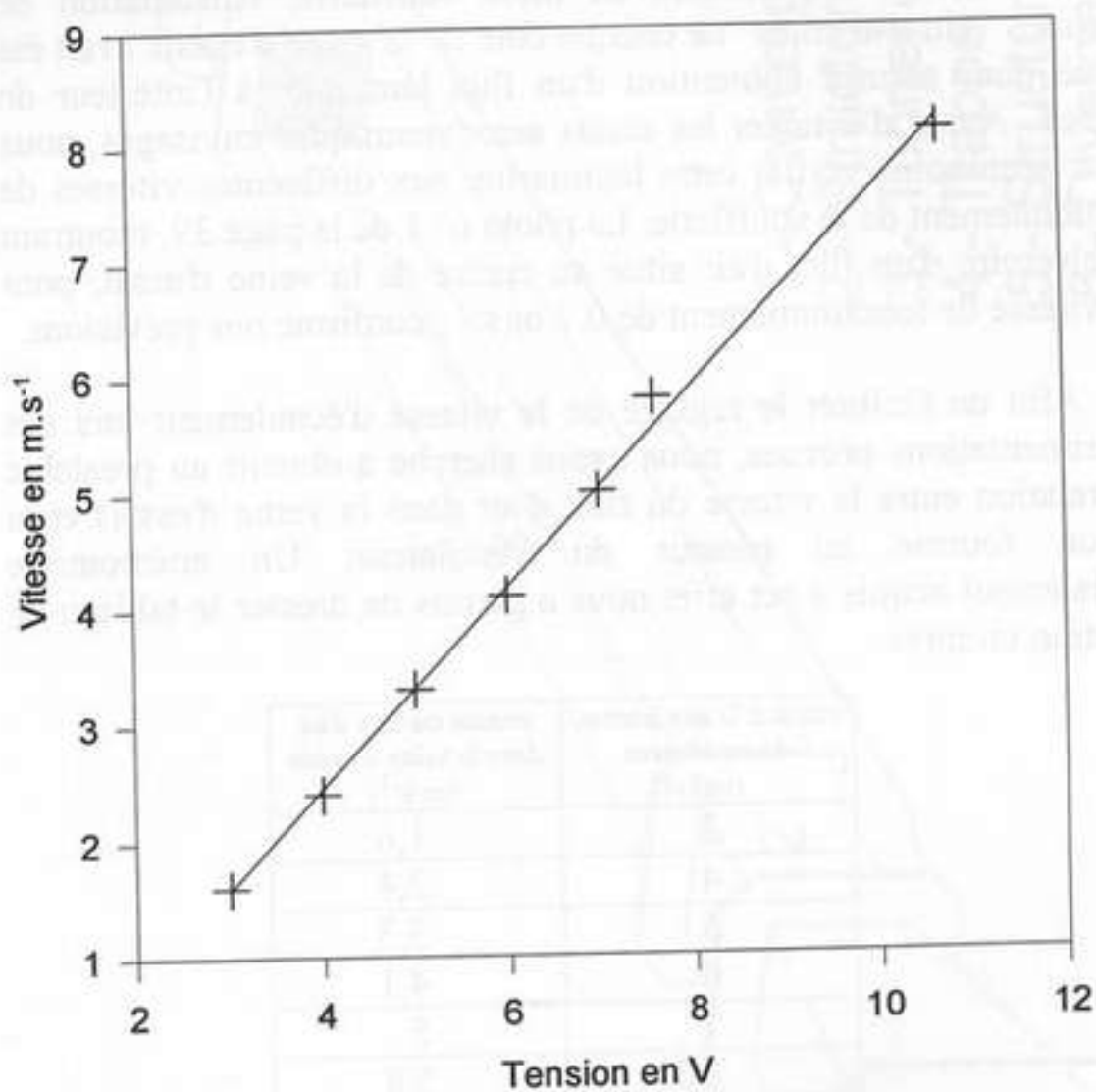
Afin de faciliter le réglage de la vitesse d'écoulement lors des expérimentations prévues, nous avons cherché à obtenir au préalable une relation entre la vitesse du flux d'air dans la veine d'essais et la tension fournie au moteur du ventilateur. Un anémomètre spécialement acquis à cet effet nous a permis de dresser le tableau de variation ci-après :

tension U aux bornes du ventilateur (volts)	vitesse du flux d'air dans la veine d'essais (m s^{-1})
3	1,6
4	2,4
5	3,3
6	4,1
7	5
7.6	5,8
10.7	8,1

Il apparaît que la variation de la vitesse en fonction de la tension répond à une loi linéaire du type :

$$v = U / 1,16 - 1 .$$

Etalonnage vitesse du flux d'air / tension du ventilateur



$$V(u) = u / 1,16^{-1}$$

Nous avons néanmoins remarqué que, pour une vitesse de l'ordre de 6 m.s^{-1} , il y avait un écart de $0,1 \text{ m.s}^{-1}$ entre la vitesse des filets d'air près des parois et celle constatée au centre de la veine d'essais. Compte tenu de la précision modeste de nos mesures, cette différence de vitesse, avoisinant 1,67 %, ne sera pas prise en compte lors de l'exploitation de nos résultats.

3 - Conception et réalisation des appareillages de visualisation et de mesure.

a) Balances destinées aux mesures des forces R_x et R_z .

La laminarité du flux d'air à l'intérieur de la veine d'essais ayant été vérifiée, nous pouvions d'envisager l'utilisation de notre soufflerie pour les essais aérodynamiques proprement dits.

Notre premier objectif était de déterminer les composantes verticale et horizontale de la résultante des forces aérodynamiques exercées par le flux d'air sur une structure placée dans la veine d'essais. Il nous fallait donc tout d'abord mettre au point un dispositif fiable, assez précis, et suffisamment simple à réaliser, pour la mesure de ces efforts verticaux et horizontaux.

Compte tenu des faibles dimensions de la veine d'expérience, et de la nécessité de perturber le moins possible l'écoulement de l'air dans celle-ci, le principe choisi a été celui d'une balance, dont une extrémité supporte l'objet soumis aux efforts aérodynamiques, tandis que l'autre extrémité, placée à l'extérieur de la veine d'essais, permet d'équilibrer les efforts précédents au moyen de masses marquées.

Pour la "balance R_x " permettant de mesurer les efforts dans la direction V de l'écoulement, l'axe du balancier est placé perpendiculairement à la direction V . Une fois l'objet fixé à l'extrémité de la balance située dans la veine d'essais, un premier équilibrage est effectué, en l'absence de forces aérodynamiques (soufflerie à l'arrêt). Puis, après mise en route de la soufflerie et stabilisation des vitesses à l'intérieur de la veine, un nouvel équilibrage est effectué à l'aide de masses marquées. Des calculs de moments permettent alors de

masses marquées. Des calculs de moments permettent alors de déterminer les efforts exercés sur l'objet dans la direction V, à partir des masses utilisées pour rétablir l'équilibre :

Le moment du poids P et de la traînée Rx par rapport à l'axe O de la balance (voir schéma ci-après) sont donnés par :

$$\mathcal{M}_O P = (0, 0, d_m \cdot mg) \quad , \quad \mathcal{M}_O R_x = (0, 0, -d_{Rx} \cdot \|R_x\|)$$

La somme des moments étant nulle, on en déduit la relation :

$$d_m \cdot mg = d_{Rx} \cdot \|R_x\|$$

D'où :

$$\|R_x\| = d_m \cdot mg / d_{Rx} \quad .$$

Pour chaque série de mesures, les valeurs de d_m et de d_{Rx} sont constantes, de sorte que $\|R_x\|$ est proportionnel à la masse utilisée pour réaliser l'équilibre. C'est pourquoi nous avons seulement reporté sur nos graphiques les valeurs en grammes de la masse m utilisée pour rétablir l'équilibre.

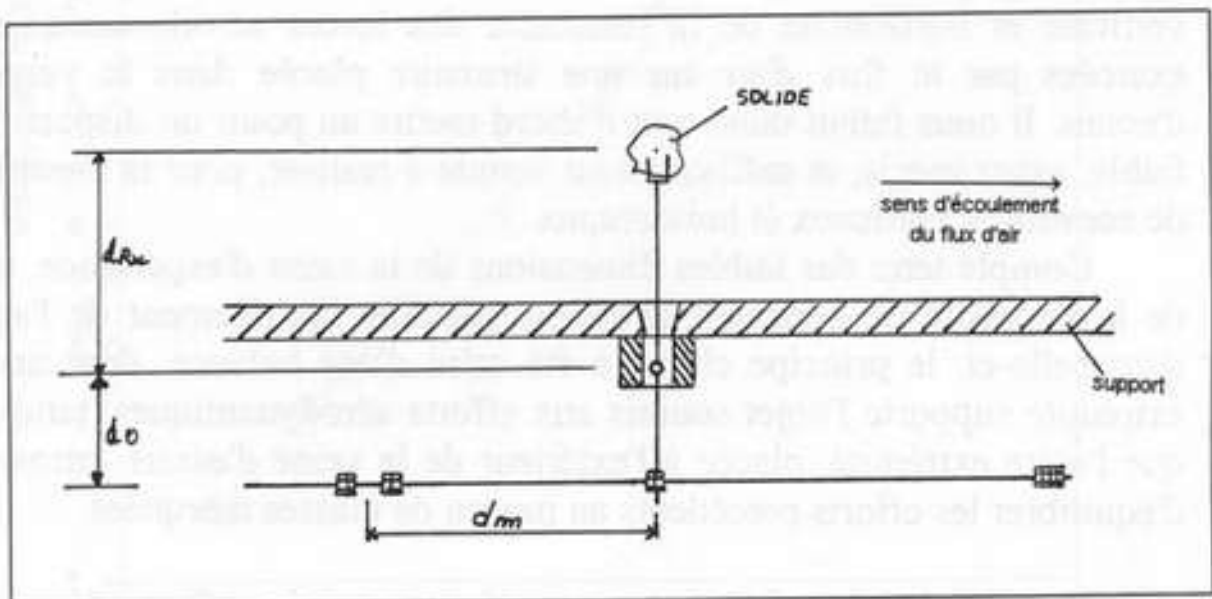


Schéma de la balance Rx

Ce dispositif ayant donné satisfaction lors de la mesure des efforts dans la direction V de l'écoulement, un appareillage analogue a été imaginé pour la mesure des efforts perpendiculaires à cette direction V. Les objets utilisés pour ces essais (ailes d'avion, profil d'automobile, ...) présentent tous des symétries, de sorte que

l'écoulement peut toujours être considéré comme bidimensionnel; il nous est donc possible de placer ces objets verticalement, de sorte que la résultante des efforts aérodynamiques exercés sur l'objet se trouve dans un plan horizontal. La composante perpendiculaire à la direction V , qui correspond à la portance, étant horizontale, il est alors possible de la mesurer à l'aide du dispositif décrit précédemment, avec la seule différence que l'axe du balancier doit cette fois être orienté dans le sens de l'écoulement (parallèlement à la direction V). Toutefois, les efforts à mesurer étant beaucoup plus faibles que ceux s'exerçant dans la direction V , une nouvelle balance a été construite, pour laquelle l'axe du balancier est monté sur roulements à billes, afin de diminuer les frottements.

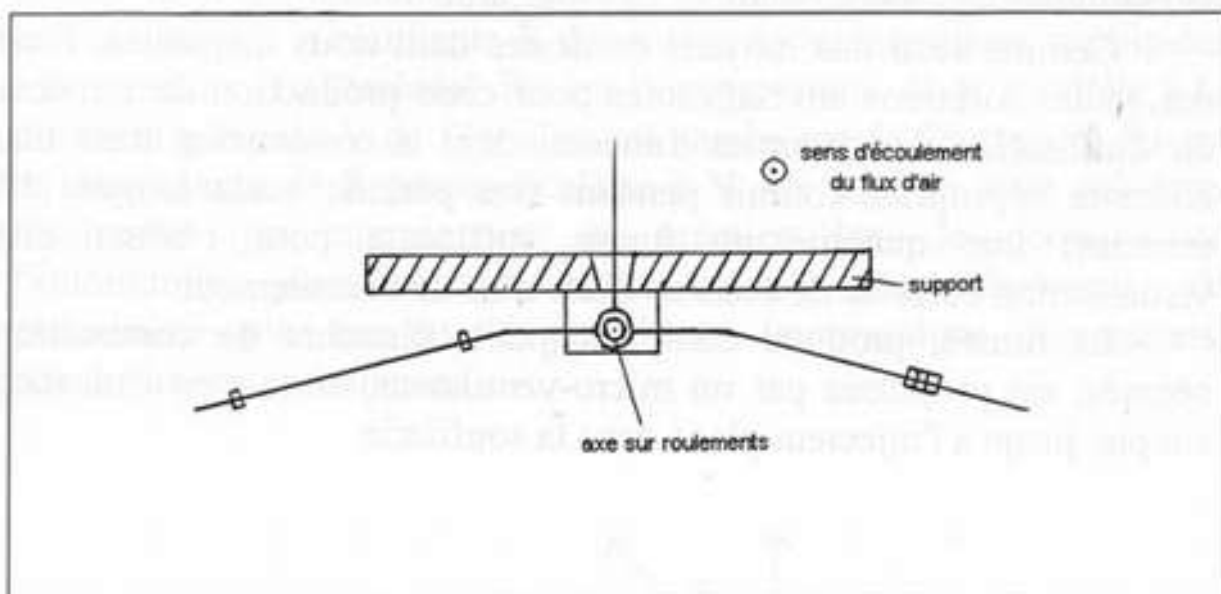


Schéma de la balance Rz

Une fois les balances construites, il était important de connaître la précision des mesures effectuées avec ces appareillages. A cet effet, nous avons au préalable effectué les opérations suivantes : la soufflerie étant à l'arrêt, on prend comme objet une sphère et on regarde quel est le moment nécessaire pour faire se déplacer la balance d'un millimètre; une fois l'équilibre obtenu, on met la soufflerie en action et l'on mesure à nouveau le moment nécessaire pour avoir un millimètre de débattement. Les résultats obtenus sont très proches et prouvent que le flux d'air ne perturbe pas de façon

sensible notre dispositif de mesure; ils permettent par ailleurs d'estimer la précision sur les deux balances à environ 1,4 mN.

b) Dispositif de visualisation des écoulements :

Les dispositifs de visualisation des filets d'air font en général appel à des injecteurs de fumée placés à des emplacements donnés de l'écoulement : la répartition de la fumée produite est alors mise en évidence à l'aide d'une "nappe laser" (faisceau plan obtenu par diffraction d'un rayon laser sur une lentille cylindrique).

Les fumées utilisées sont d'origines diverses, choisies en fonction de la pollution qu'elles génèrent, du coût de production et de la régularité de fonctionnement de l'injecteur.

Compte tenu des moyens modestes dont nous disposons, l'une des seules solutions envisageables pour cette production de fumée a été l'utilisation de bâtonnets d'encens, dont la combustion dans une enceinte appropriée fournit pendant une période assez longue (15 minutes) une quantité de fumée suffisante pour réaliser une visualisation correcte de certains filets d'air de l'écoulement.

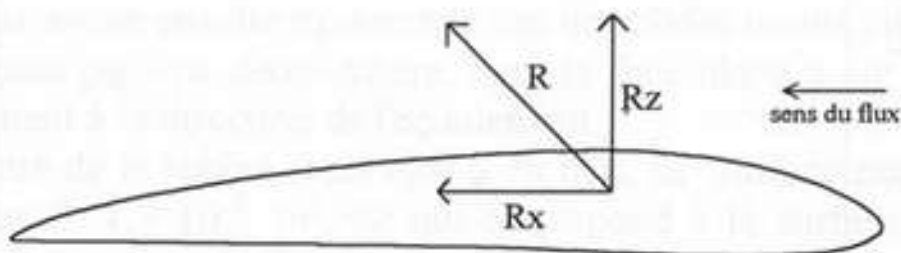
La fumée, produite dans une petite chambre de combustion séparée, est propulsée par un micro-ventilateur, au moyen d'un tube souple, jusqu'à l'injecteur placé dans la soufflerie.

Chapitre II

MESURES DE TRAINEE ET DE PORTANCE

1 - Introduction

L'aérodynamique étudie de très nombreux aspects des interactions entre les structures et les écoulements d'air mais, pour beaucoup d'applications, la donnée la plus caractéristique de ces interactions est la résultante R des forces aérodynamiques appliquées à la structure. La "traînée" R_x est la composante de R parallèle à la direction générale V de l'écoulement, tandis que la "portance" R_z est la composante de R perpendiculaire à V . Ce sont en effet ces deux résultantes qui interviennent en premier dans le domaine de l'automobile ainsi qu'en aéronautique, indépendamment de phénomènes plus fins étudiés par ailleurs (surpressions, dépressions, couche limite, turbulences, ...).



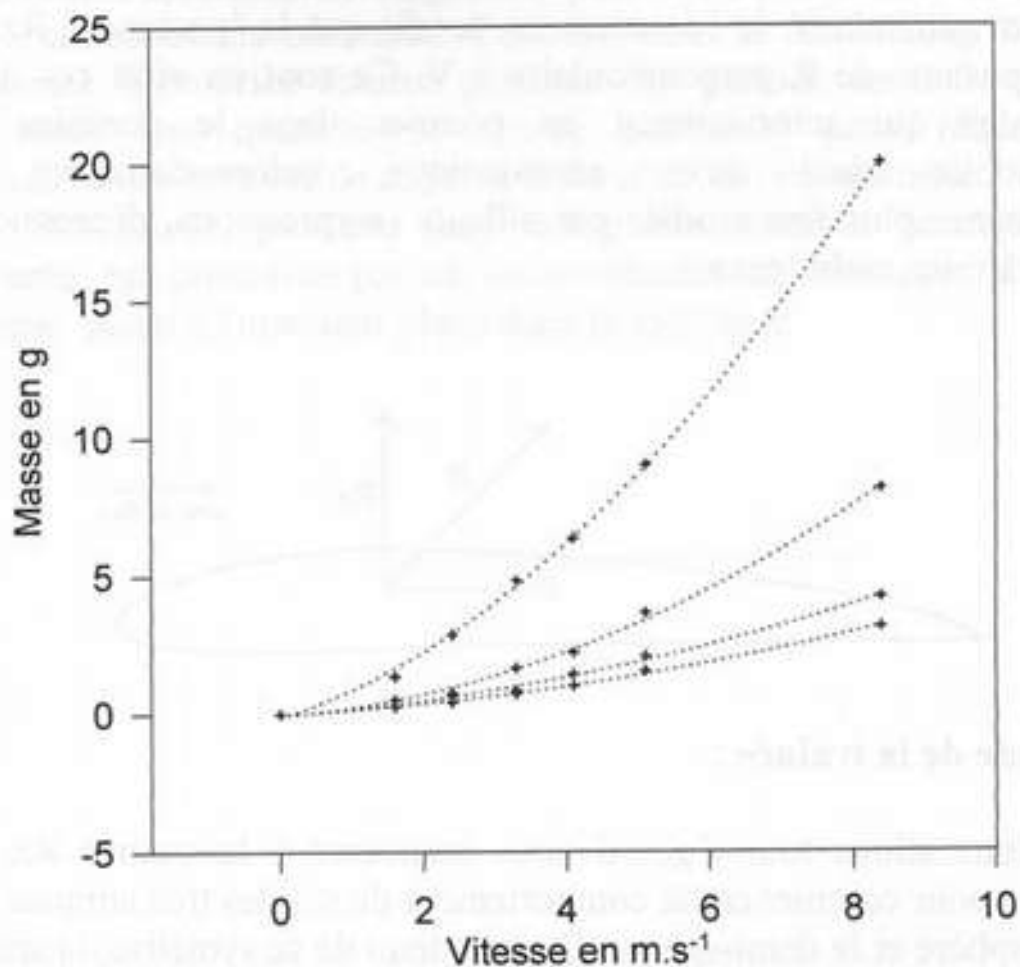
2 - Etude de la traînée :

Nous allons tout d'abord nous intéresser à la traînée R_x , en étudiant pour commencer le comportement de solides très simples tels que la sphère et la demi-sphère. Compte tenu de sa symétrie, la sphère ne génère aucune portance, et il suffit donc d'en étudier la traînée. Les différents graphiques de la page 12 indiquent, en fonction de la vitesse, les valeurs des masses nécessaires pour obtenir l'équilibre.

	Sphère D=95 mm	Sphère D=70 mm		Sphère D=50 mm	
vitesse en m/s	Rx ₁ en mN	Rx ₂ en mN	Rapport Rx ₁ /Rx ₂	Rx ₃ en mN	Rapport Rx ₂ /Rx ₃
1,6	12,8	5,9	2,2	-	-
2,4	26,7	8,9	3,0	5,8	1,5
3,3	44,2	17,7	2,5	7,9	2,2
4,1	67,4	23,6	2,8	12,2	1,9
5,0	89,5	40,7	2,2	18,1	2,2
8,1	181,3	89,3	2,0	36,0	2,5
moyenne des rapports			2,4		1,96
rapport des carrés des diamètres			1,8		2,07

Rx de sphères et d'un ellipsoïde

la force Rx est mesurée à l'aide de la masse nécessaire pour rééquilibrer la balance



- Sphère de 50 mm de diamètre : $M(v) = 0,0289 v^2 + 0,1381 v - 0,0322$
 Ellipsoïde de 50 mm de diamètre : $M(v) = 0,0381 v^2 + 0,01953 v + 0,0688$
 Sphère de 70 mm de diamètre : $M(v) = 0,0929 v^2 + 0,2043 v - 0,0745$
 Sphère de 95 mm de diamètre : $M(v) = 0,1883 v^2 + 0,8193 v - 0,1440$

Ces masses sont proportionnelles (au frottement près) à la traînée elle-même :

$$m = k R_x, \text{ avec } k = \text{constante.}$$

A partir des valeurs expérimentales obtenues, nous avons calculé des régressions polynomiales d'ordre 2, qui mettent parfaitement en évidence le fait que la traînée varie comme le carré de la vitesse.

Le tableau ci-dessous récapitule les différentes valeurs de la traînée R_x en fonction de la vitesse, pour trois sphères de diamètres différents. On peut observer qu'à vitesse égale le rapport des traînées est environ égal au rapport des "surfaces projetées" (projection de l'objet sur un plan perpendiculaire à la direction générale de l'écoulement), c'est à dire au rapport des carrés des diamètres.

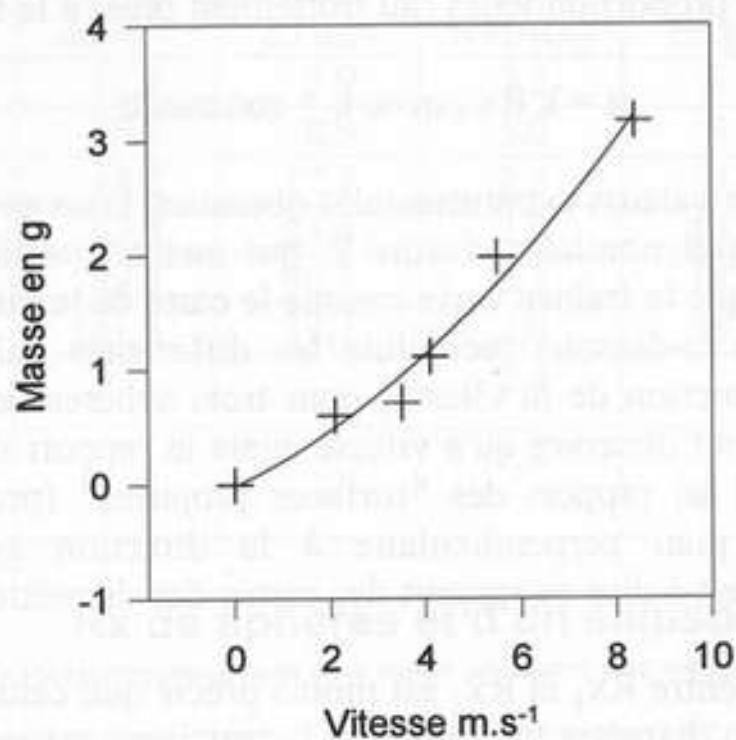
Le rapport entre R_{x_1} et R_{x_2} est moins précis que celui entre R_{x_2} et R_{x_3} , du fait du diamètre important de la troisième sphère (95 mm), sujette à plus de turbulences, et dont la dimension par rapport à la section de la veine d'essais était peut-être trop importante.

D'autres mesures de traînée ont été faites avec un ellipsoïde d'un diamètre de 50 mm. Les résultats obtenus ont été rassemblés dans le graphique de la page 12 ; ils montrent que la traînée de l'ellipsoïde est plus faible que celle d'une sphère de même diamètre.

Nous avons ensuite examiné le cas de solides moins simples, en commençant par une demi-sphère, dont la face plane a été disposée parallèlement à la direction de l'écoulement.

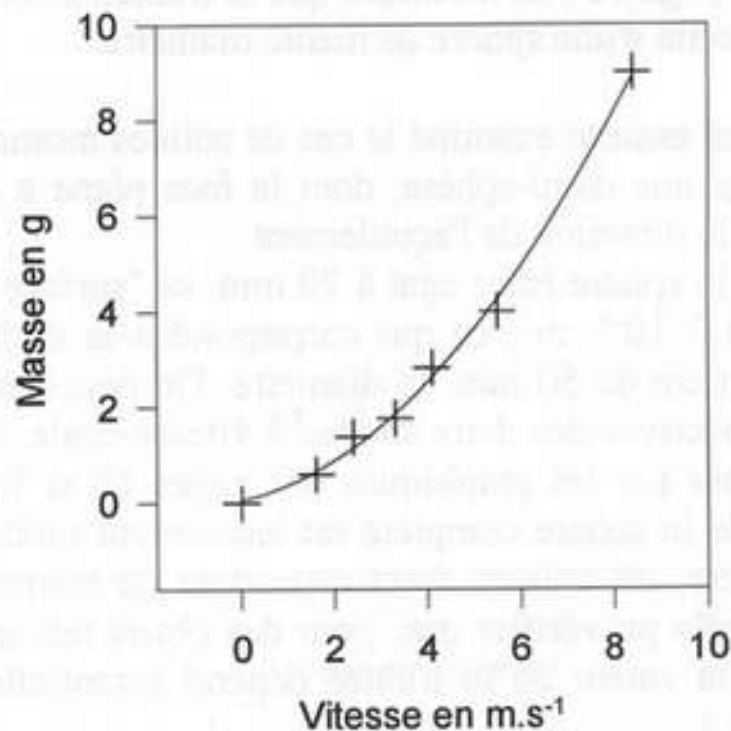
Le diamètre de la sphère étant égal à 70 mm, sa "surface projetée" a une valeur de $1,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, ce qui correspond à la surface projetée d'une sphère entière de 50 mm de diamètre. On peut donc comparer les traînées respectives des deux solides à vitesse égale. Les résultats obtenus, résumés par les graphiques des pages 12 et 14, montrent que la traînée de la sphère complète est légèrement inférieure à celle de la demi-sphère, les valeurs étant cependant du même ordre. Plus généralement, on a pu vérifier que, pour des objets tels que la sphère ou l'ellipsoïde, la valeur de la traînée dépend essentiellement de sa surface projetée.

Demi sphère de 70 mm de diamètre



$$M(v) = 0,0226 v^2 + 0,1946 v - 0,0107$$

Aile Delta inclinée de 60°



$$M(v) = 0,0998 v^2 + 0,2177 v + 0,0576$$

La dernière série d'essais a été faite avec une aile delta faisant un angle de 6 degrés avec la direction générale de l'écoulement. (Le choix de cet objet paraissait intéressant, car il constitue un exemple se rapprochant du domaine de l'aviation). Les résultats obtenus sont résumés par le graphique de la page 14.

D'autres essais de mesure de la traînée ont été tentés avec un profil d'aile "Eppler 193" utilisé en aéro-modélisme. Mais les mesures n'ont pas été possibles avec le dispositif utilisé, à cause du déplacement du "centre de poussée" et de l'instabilité qui en résulte (Ce phénomène sera décrit plus précisément dans le chapitre consacré à la "mécanique du vol").

En conclusion, on peut retenir des expériences réalisées qu'elles nous ont permis de vérifier d'une part que la traînée varie comme le carré de la vitesse, et d'autre part que celle-ci est très directement liée à la surface projetée de l'objet (sensiblement proportionnelle à cette surface projetée pour des objets de géométrie voisine).

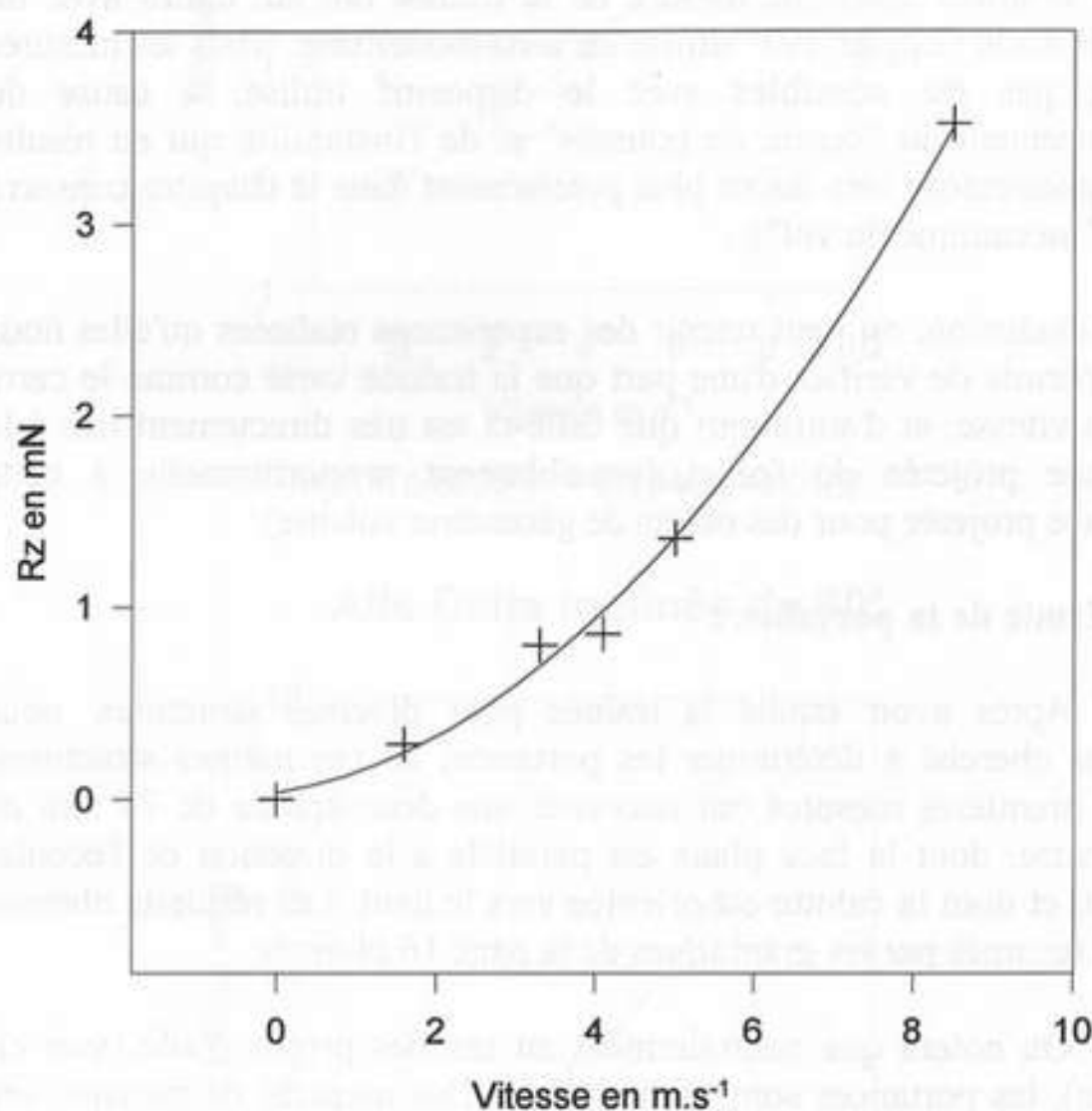
3 - Etude de la portance :

Après avoir étudié la traînée pour diverses structures, nous avons cherché à déterminer les portances de ces mêmes structures. Nos premières mesures ont concerné une demi-sphère de 70 mm de diamètre, dont la face plane est parallèle à la direction de l'écoulement, et dont la calotte est orientée vers le haut. Les résultats obtenus sont résumés par les graphiques de la page 16 ci-après.

On notera que contrairement au cas des profils d'aile (voir ci-après), les portances sont ici négatives. Des mesures de pression ont par ailleurs confirmé qu'aucune dépression ne se produit à l'arrière de l'objet, contrairement au cas du profil d'aile.

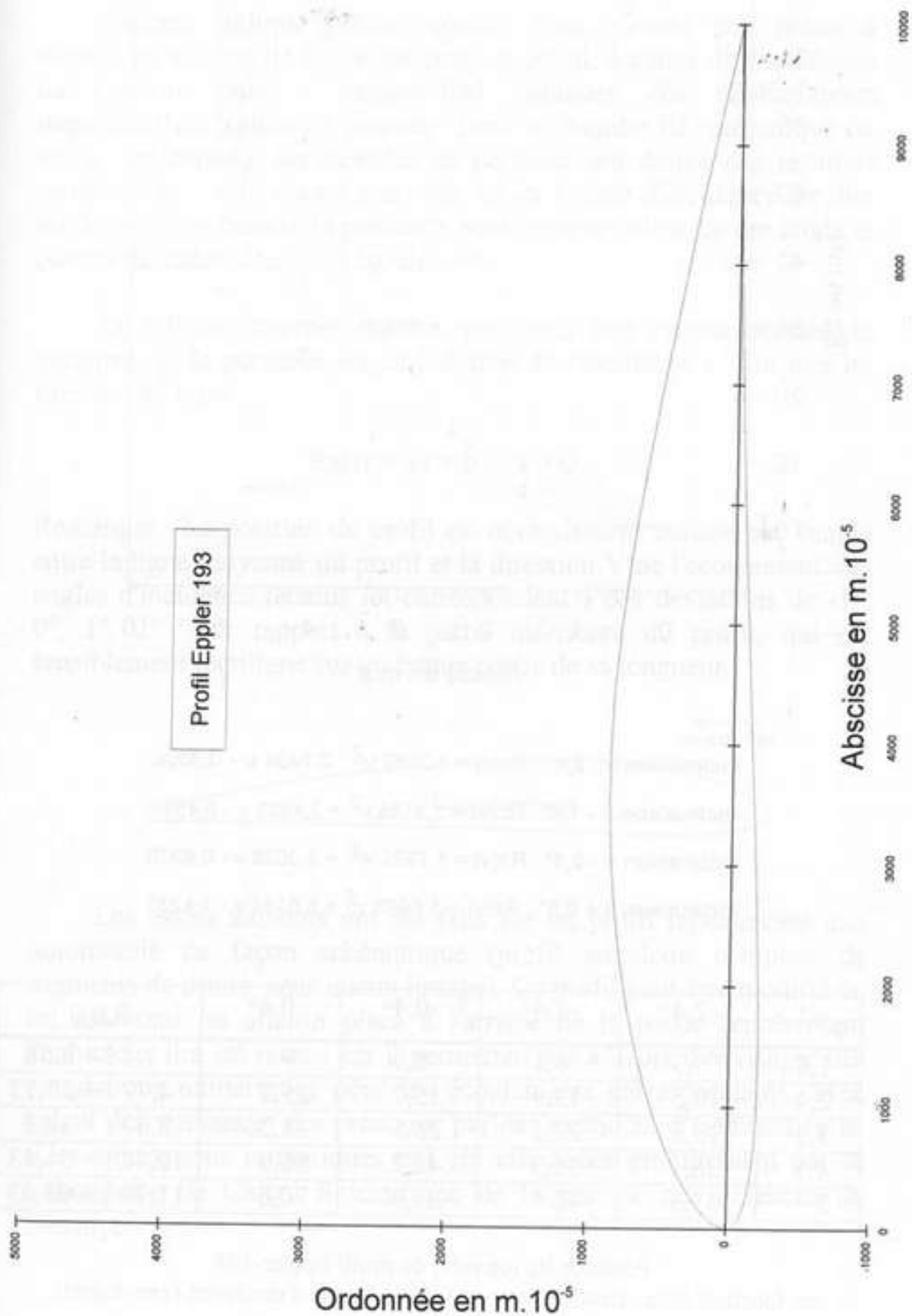
Nous avons également effectué de nombreuses mesures de portance sur un profil d'aile utilisé en aéromodélisme (profil Eppler-193, dessiné ci-après page 17), dont les caractéristiques sont connues par ailleurs; (ce profil possède une portance élevée pour une traînée assez faible).

Demi-sphère de 70mm

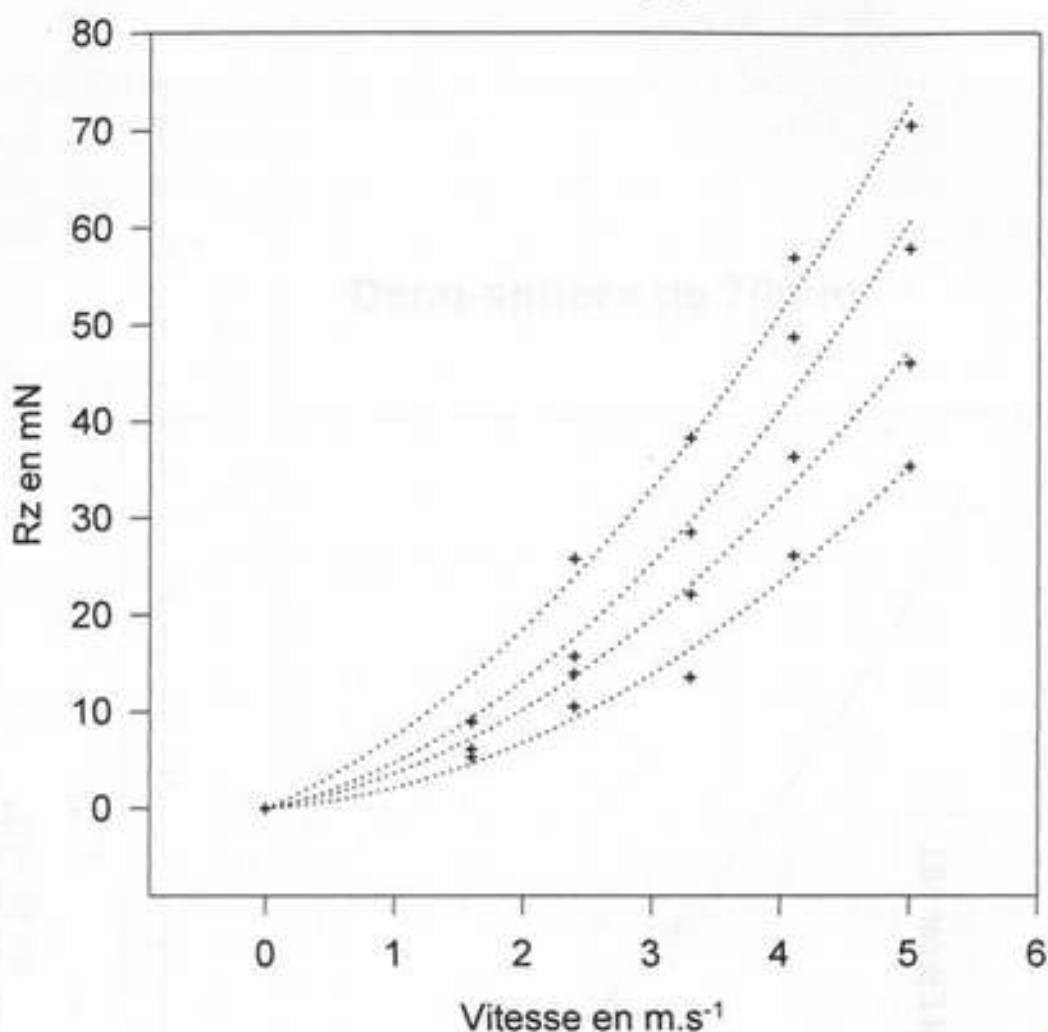


$$R_z(v) = 0,0404 v^2 + 0,0650 v + 0,0358$$

Profil Eppler 193



Profil d'aile Eppler 193



Inclinaison = $-2,4^\circ$: $R_z(v) = 1,2562 v^2 - 0,7464 v + 0,3006$

Inclinaison = $-1,4^\circ$: $R_z(v) = 1,4135 v^2 + 2,4933 v - 0,4570$

Inclinaison = $-0,4^\circ$: $R_z(v) = 1,7921 v^2 + 3,3028 v - 0,6370$

Inclinaison = $+0,6^\circ$: $R_z(v) = 1,6493 v^2 + 6,6134 v - 1,4233$

i v	$-2,4^\circ$	$-1,4^\circ$	$-0,4^\circ$	$0,6^\circ$	$R_z(i)$
1,6	5,3	6,1	8,9	9	$1,4 i + 8,58$
2,4	10,5	13,9	15,7	25,8	$4,77 i + 20,77$
3,3	13,5	22,1	28,5	38,26	$8,07 i + 32,8$
4,1	26,1	36,3	48,7	56,9	$10,48 i + 51,43$
5	35,3	46	37,9	70,6	$11,78 i + 63,03$

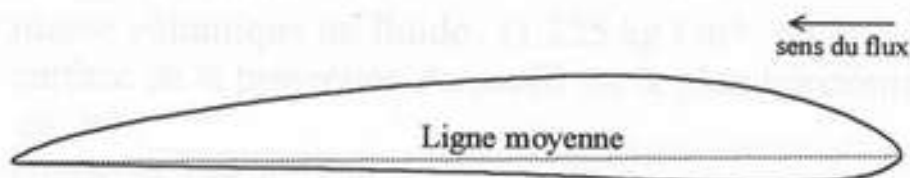
Portance R_z (en mN) du profil Eppler-193
en fonction de la vitesse V (en $m.s^{-1}$) et de l'angle d'incidence i (en degrés).

Comme indiqué précédemment, nous n'avons pas réussi à obtenir de valeurs de la traînée pour ce profil, à cause de l'instabilité du système [aile + balance-Rx] induisant des déplacements importants du "centre de poussée" (voir le chapitre III "mécanique du vol"). Par contre, les mesures de portance ont donné des résultats satisfaisants : nous avons ainsi fait varier l'angle d'incidence du flux sur le profil et mesuré la portance pour chaque valeur de cet angle et pour différentes vitesses d'écoulement.

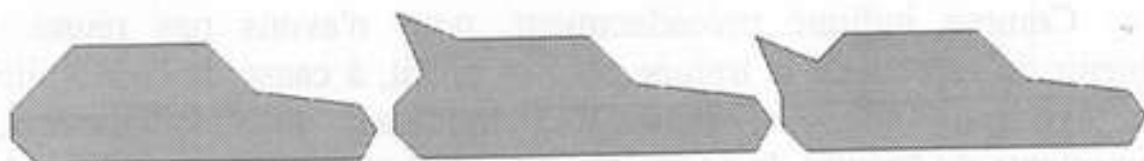
Le tableau ci-après montre que, pour une vitesse donnée, la variation de la portance R_z en fonction de l'incidence i suit une loi linéaire, du type :

$$R_z(i) = a i + b, \quad a > 0.$$

Remarque : La position du profil est normalement définie par l'angle entre la ligne moyenne du profil et la direction V de l'écoulement; les angles d'incidence retenus ici correspondent à des déviations de -1° , 0° , 1° , 2° par rapport à la partie inférieure du profil, qui est sensiblement rectiligne sur une bonne partie de sa longueur.



Les essais suivants ont été faits sur un profil représentant une automobile de façon schématisée (profil anguleux composé de segments de droite, sans aucun lissage). Ce profil peut être modifié en lui rajoutant un aileron placé à l'arrière de la partie représentant l'habitacle. Il a été retenu car il permettait par ailleurs d'envisager des simulations numériques pour les écoulements correspondants, avec calcul des vitesses et des pressions par des méthodes d'éléments finis. (Ces simulations numériques ont été effectuées gratuitement par le Laboratoire de Calcul Scientifique de la Faculté des Sciences de Besançon.)



Trois séries d'observations ont été réalisées sur ce profil, à la vitesse constante de $3,3 \text{ m.s}^{-1}$ (12 km/h). La première concerne la voiture sans aileron : à la vitesse indiquée, la portance apparaît négative ($R_z = -1,1 \text{ mN}$), ce qui est exceptionnel en aérodynamique automobile. Ainsi, la vitesse aura tendance à plaquer la voiture au sol. La seconde expérimentation a été faite en rajoutant l'aileron en position haute à l'arrière de la voiture. La portance mesurée est alors : $R_z = -2,9 \text{ mN}$. L'adjonction de l'aileron a donc permis de multiplier par un facteur 2,6 l'appui aérodynamique du véhicule. Pour la dernière série d'expériences, l'aileron a été déplacé au bas de la lunette arrière du véhicule. Dans cette configuration, nous avons obtenu une portance positive $R_z = + 0,29 \text{ mN}$. Les efforts aérodynamiques dus à la vitesse ont donc tendance à soulever le véhicule, diminuant ainsi sa tenue de route.

Chapitre III

FORMULES DONNANT LA TRAÎNÉE ET LA PORTANCE ; APPLICATION A LA MECANIQUE DU VOL.

1 - Comparaison des résultats expérimentaux obtenus avec ceux calculés au moyen de la formule donnant la portance d'une aile.

L'interprétation des résultats que nous avons obtenus pour la portance du profil Eppler-193 nous amène à faire intervenir les notions de C_z et de C_x , utilisées en aérodynamique pour les calculs de portance et de traînée. Il est montré en aérodynamique que la traînée d'un profil d'aile est donnée par la formule :

$$R_x = \frac{1}{2} \rho S v^2 C_x ,$$

avec :

R_x = traînée , en Newton ;

ρ = masse volumique du fluide , (1,225 kg / m³ pour l'air) ;

S = surface de la projection du profil sur le plan horizontal, en m² ;

v = vitesse de l'air loin du solide, en m.s⁻¹ ;

C_x = coefficient de traînée.

Pour un solide donné, occupant une position stable dans l'écoulement, le coefficient C_x est constant. Dans le cas d'une aile, le C_x dépend de l'incidence de celle-ci par rapport à la direction générale de l'écoulement.

De façon analogue, la portance d'un profil d'aile est donnée par la formule :

$$R_z = \frac{1}{2} \rho S v^2 C_z ,$$

où C_z désigne le coefficient de portance.

Les valeurs mesurées sur le profil Eppler concernent uniquement la portance. Nous allons donc comparer ces mesures avec les valeurs fournies par la formule ci-dessus. Dans le cas d'un profil d'aile, une approximation du coefficient C_z est donnée en fonction de l'incidence par la formule :

$$C_z \approx 0,1 (\alpha - \alpha_0) .$$

Dans cette formule, α désigne l'angle d'incidence, mesuré entre la ligne moyenne du profil et la direction générale V de l'écoulement, tandis que α_0 est l'angle "de portance nulle" (angle d'incidence pour lequel la portance du profil est nulle), négatif en général.

Pour le profil Eppler-193, on a $\alpha_0 = - 3,39^\circ$; on en déduit :

$$C_z = 0,1 \alpha + 0,339$$

La portance sera donc donnée par :

$$\begin{aligned} R_z &= \frac{1}{2} \rho S v^2 C_z , \\ &= 0,01280125 v^2 C_z \end{aligned}$$

Les coefficients C_z correspondant aux 4 incidences utilisées pour nos mesures ($\alpha_1 = -2,4^\circ$, $\alpha_2 = -1,4^\circ$, $\alpha_3 = -0,4^\circ$, $\alpha_4 = +0,6^\circ$) sont :

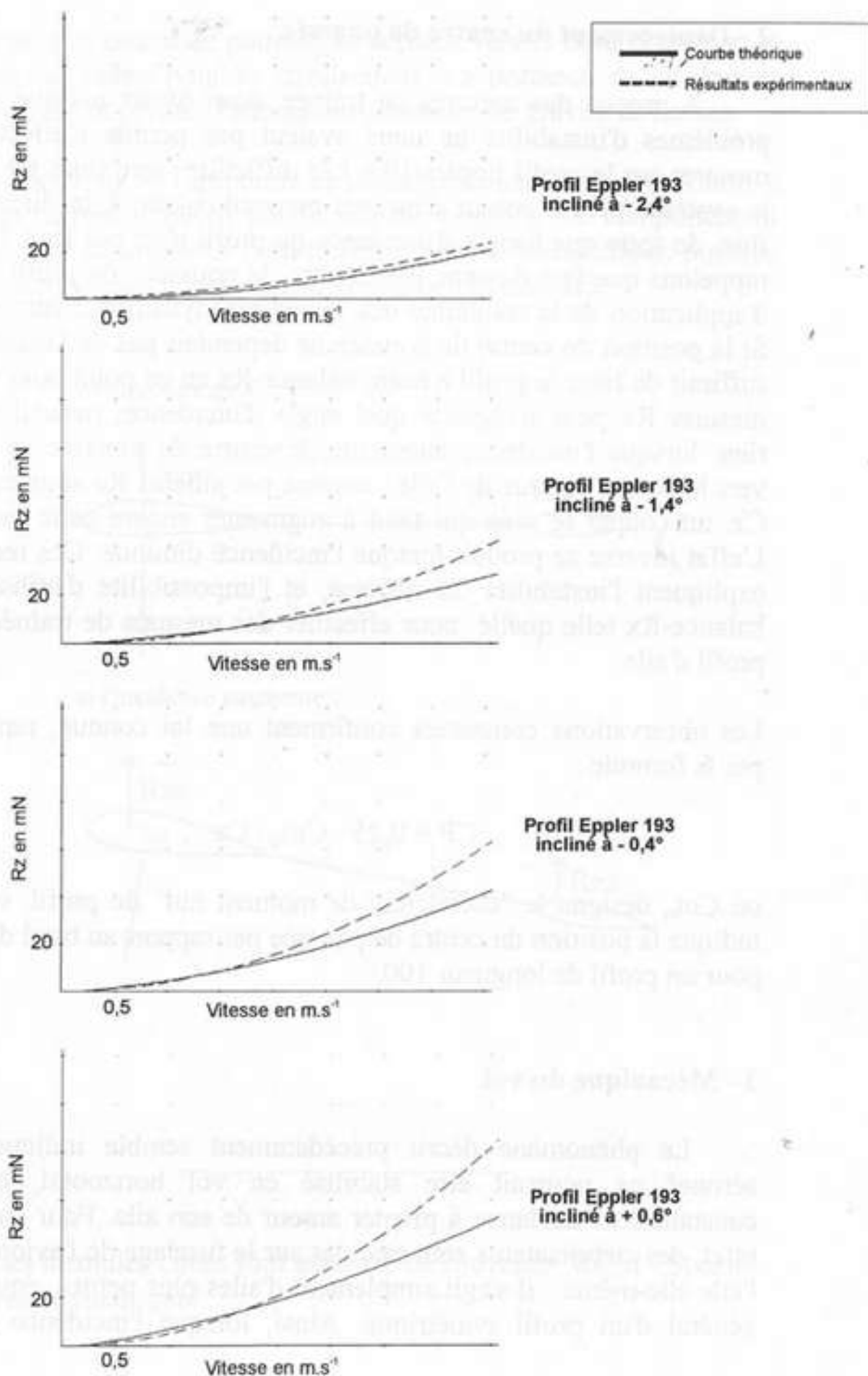
$$C_{z1} = 0,099 , C_{z2} = 0,199 , C_{z3} = 0,299 , C_{z4} = 0,299 .$$

D'après la formule ci-dessus, les traînées correspondantes sont :

$$\begin{aligned} R_{z1} &= 1,267 \cdot 10^{-3} v^2 , & R_{z2} &= 2,547 \cdot 10^{-3} v^2 , \\ R_{z3} &= 3,830 \cdot 10^{-3} v^2 , & R_{z4} &= 5,110 \cdot 10^{-3} v^2 . \end{aligned}$$

Nous avons tracé sur les mêmes graphiques (voir page 23 ci-après) les courbes donnant la variation de R_z en fonction de v selon les formules précédentes (traits pleins), ainsi que celles correspondant aux mesures que nous avons effectuées (pointillés). Les différences constatées pourraient être dues à l'état de surface du profil, à ses défauts de régularité, ou encore à la non homogénéité du flux.

Comparaison pratique / théorique du R_z d'un profil Eppler 193



2 - Déplacement du centre de poussée .

A propos des mesures de traînée, nous avons indiqué que des problèmes d'instabilité ne nous avaient pas permis d'effectuer ces mesures sur le profil Eppler-193. Les difficultés sont dues au fait que le système pivote autour d'un axe perpendiculaire à la direction du flux, de sorte que l'angle d'incidence du profil n'est pas fixe. En effet, rappelons que l'on désigne par "centre de poussée" du profil le point d'application de la résultante des forces aérodynamique sur ce profil. Si la position du centre de poussée ne dépendait pas de l'incidence, il suffirait de fixer le profil à notre balance-Rx en ce point pour pouvoir mesurer Rx pour n'importe quel angle d'incidence; mais il n'en est rien: lorsque l'incidence augmente, le centre de poussée se déplace vers le bord d'attaque de l'aile ; comme par ailleurs R_z augmente avec C_z , un couple se crée qui tend à augmenter encore cette incidence. L'effet inverse se produit lorsque l'incidence diminue. Ces remarques expliquent l'instabilité du système, et l'impossibilité d'utiliser notre balance-Rx telle quelle pour effectuer des mesures de traînée sur un profil d'aile.

Les observations constatées confirment une loi connue, représentée par la formule :

$$CP = 0,25 - C_{m_0} / C_z ,$$

où C_{m_0} désigne le "coefficient de moment nul" du profil, et où CP indique la position du centre de poussée par rapport au bord d'attaque, pour un profil de longueur 100.

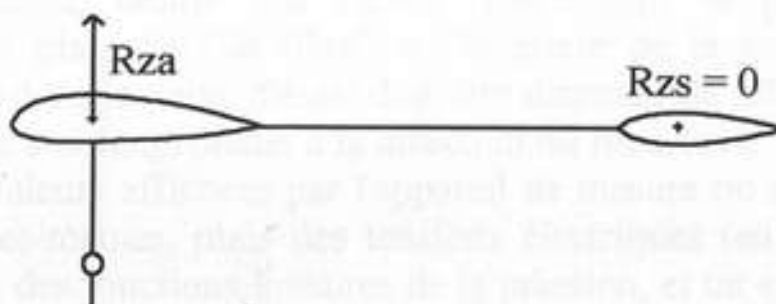
3 - Mécanique du vol.

Le phénomène décrit précédemment semble indiquer qu'un aéronef ne pourrait être stabilisé en vol horizontal, et aurait constamment tendance à pivoter autour de son aile. Pour contrer cet effet, des stabilisateurs sont rajoutés sur le fuselage de l'avion, loin de l'aile elle-même : il s'agit simplement d'ailerons plus petites, équipées en général d'un profil symétrique. Ainsi, lorsque l'incidence de l'aile

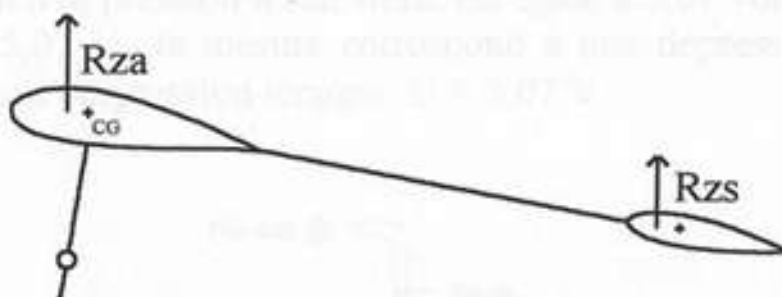
augmente, son centre de poussée se déplace vers le bord d'attaque, et il en est de même pour le stabilisateur. La portance de ce dernier augmente et fait pivoter l'aile autour du centre de gravité de l'avion.

Nous avons pu reproduire ce phénomène dans notre soufflerie, à l'aide du dispositif décrit par le schéma ci-après. Le comportement observé pour ce dispositif montre l'efficacité du stabilisateur, puisque l'aile conserve alors constamment la position horizontale.

à l'équilibre on a :



si l'incidence augmente :



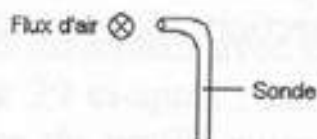
Note : Les formules citées sont extraites de l'ouvrage "RCM - Spécial Aérodynamique" .

Chapitre IV

MESURES DE PRESSION

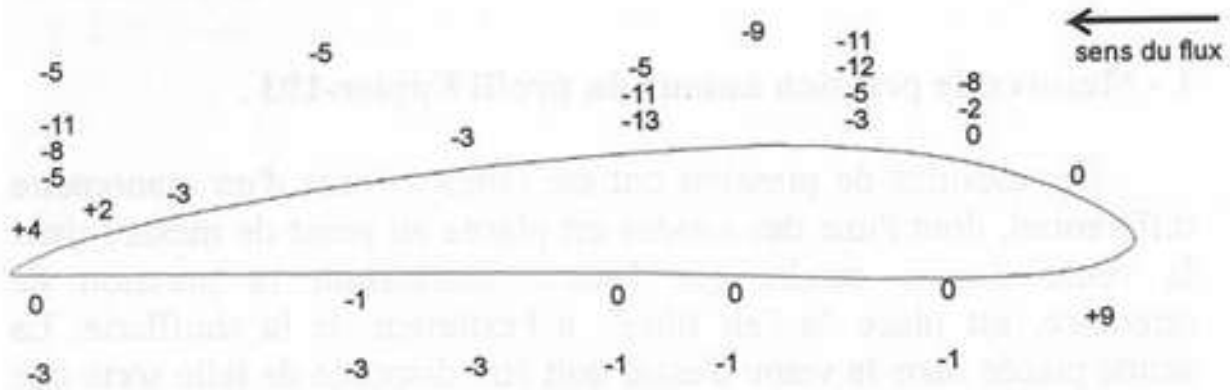
1 - Mesures de pression autour du profil Eppler-193 .

Les mesures de pression ont été faites à l'aide d'un manomètre différentiel, dont l'une des sondes est placée au point de mesure dans la veine d'essai, tandis que l'autre, fournissant la pression de référence, est placée "à l'air libre", à l'extérieur de la soufflerie. La sonde placée dans la veine d'essai doit être disposée de telle sorte que son ouverture soit tangentielle à la direction du flux; (voir la figure ci-après). Les valeurs affichées par l'appareil de mesure ne sont pas les pressions elles-mêmes, mais des tensions électriques (en volts); ces tensions sont des fonctions linéaires de la pression, et un étalonnage a montré qu'une variation de tension de 1 volt correspond à une variation de pression de 20 Pascals. La tension de référence U_0 , correspondant à la pression à l'air libre, est égale à 5,07 volts, de sorte que, si $U < 5,07 \text{ V}$ la mesure correspond à une dépression, tandis qu'il s'agit d'une surpression lorsque $U > 5,07 \text{ V}$.



Les études d'écoulements autour d'ailes d'avion ont montré qu'une dépression se forme sur les deux tiers arrière de l'extrados de l'aile, expliquant sa portance positive. Nous avons essayé de vérifier ce phénomène sur le profil Eppler-193, déjà utilisé lors de nos mesures de portance, en plaçant ce profil dans un flux dont la vitesse est de 6 m.s^{-1} .

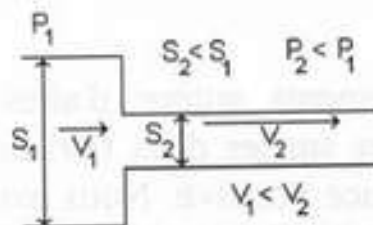
Les résultats de nos mesures de pression au voisinage du profil Eppler-193 ont été rassemblées sur le schéma ci-après. Les valeurs portées sur ce schéma désignent des différences de pression du flux autour du profil par rapport à une pression de référence.



On constate l'existence de pressions plus faibles tout autour du profil. Lorsqu'on éloigne la sonde de la surface de l'aile, la pression augmente peu à peu, puis se stabilise. Ce phénomène peut être expliqué à l'aide du théorème de Bernoulli, dont une formulation s'écrit :

$$p + \rho v^2 / 2 = \text{constante} .$$

D'après cette formule, la pression p diminue lorsque la vitesse v augmente, ce qui correspond par exemple au cas où la section de passage du flux est plus faible (la vitesse est inversement proportionnelle à la section de passage, compte tenu de la conservation des débits).



Dans notre cas, la vitesse du flux est plus élevée au voisinage de l'aile, et il est normal que la pression y soit plus faible.

2 - Mesures de pression et de vitesse autour d'un profil prolongé par un aileron braqué vers le haut.

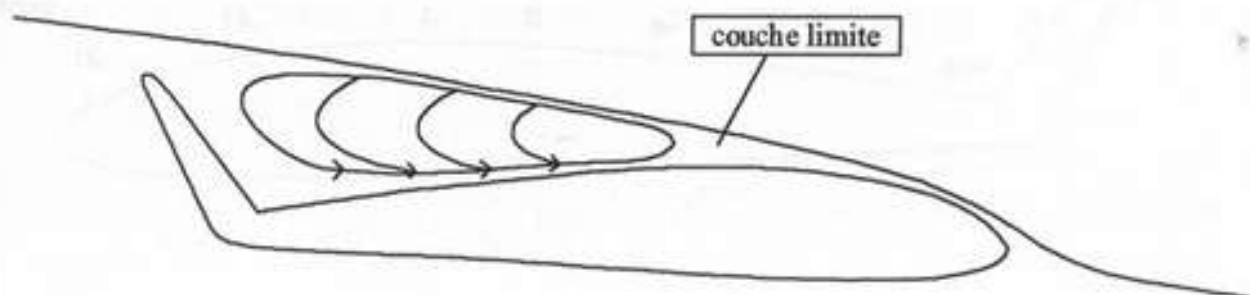
Le manomètre différentiel nous permet également d'obtenir la vitesse du flux au niveau de la sonde, grâce à un système assimilable à une sonde de Pitot : pour cela, les deux sondes du manomètre différentiel sont placées côte à côte, l'une d'elles ayant son ouverture dirigée face au flux, tandis que l'ouverture de l'autre sonde est placée tangentielle à la direction du flux (voir figure). Grâce à la différence de pression mesurée ainsi, et à la pression de base mesurée au même point, il est possible de calculer la vitesse du flux en ce point.



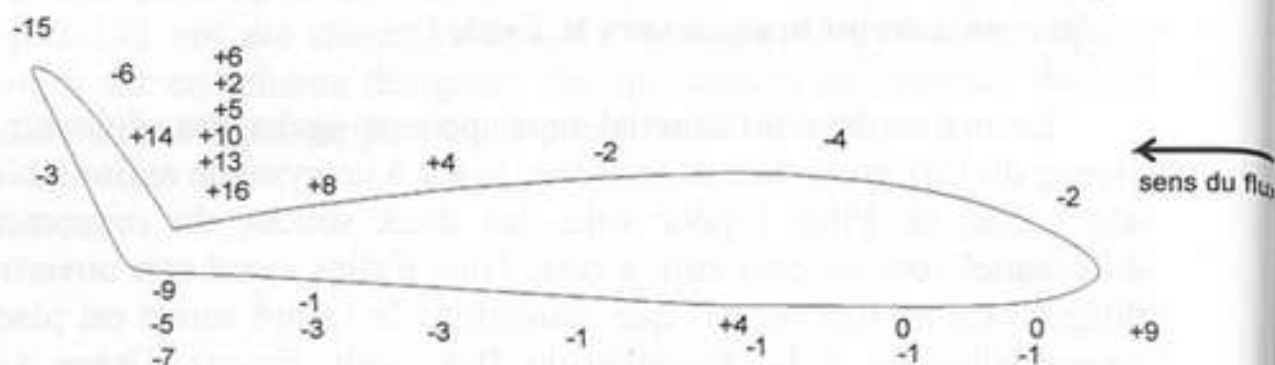
Ce dispositif nous a permis de déterminer la composante horizontale de la vitesse tout autour d'un profil Eppler modifié, pour lequel le bord de fuite avait été relevé en forme d'aileron braqué vers le haut (voir figure ci-après).

Compte tenu du tourbillon se formant à l'arrière de ce profil, les mesures de vitesses horizontales doivent être faites en dirigeant l'ouverture de la sonde de Pitot vers l'avant ou vers l'arrière, selon la direction de la vitesse locale au point considéré.

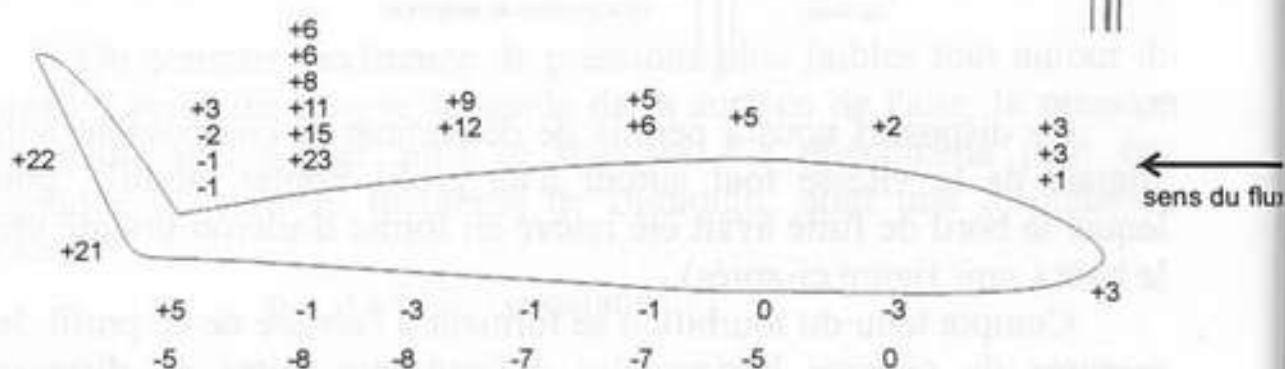
Les diverses mesures effectuées avec ce profil, ont été reportées sur les dessins de la page 29 ci-après ; elles mettent en évidence le tourbillon située à l'arrière du profil, puisque la sonde tournée vers l'arrière enregistre alors de fortes surpressions qui correspondent aux vitesses inversées dues à ce tourbillon.



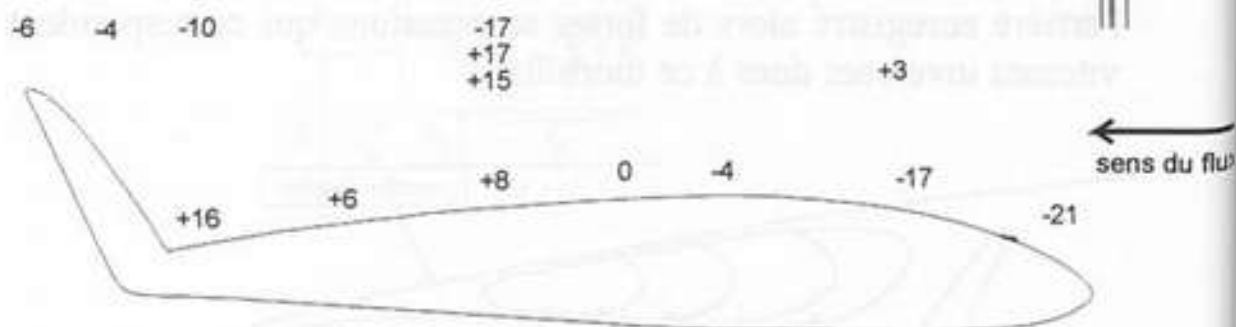
Mesures des pressions locales



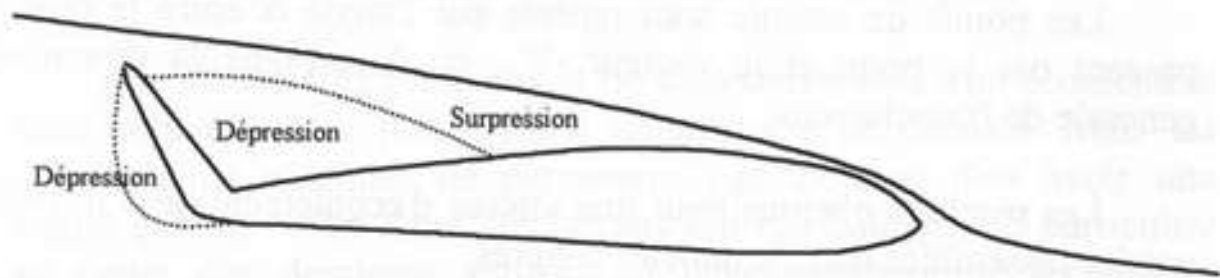
Mesures des vitesses locales orientées dans le sens du flux



Mesures des vitesses locales inversées par rapport à la direction du flux



L'examen plus précis des résultats fournis par ces trois séries de mesures permet de situer la dépression correspondant à ce tourbillon au delà du premier tiers du profil, entre l'extrados du profil et le bord supérieur de la "couche limite". On peut observer par ailleurs une forte surpression en amont de l'aileron ainsi qu'une dépression importante située juste derrière celui-ci.



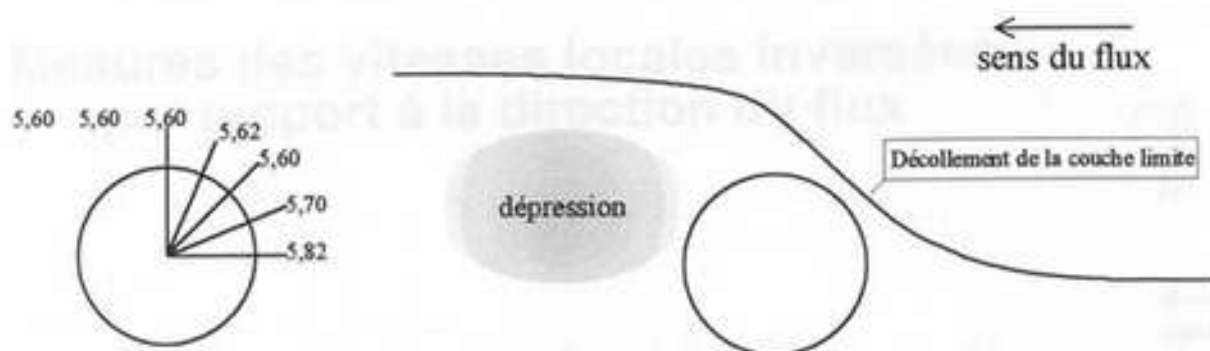
3 - Mesures de pression autour d'un cylindre à base circulaire.

Pour effectuer ces mesures, un trou a été percé à travers la paroi du cylindre, et la sonde positionnée sur ce trou depuis l'intérieur du cylindre. Des mesures en différents points de la circonférence peuvent être effectués par rotation du cylindre.

Les points de mesure sont repérés par l'angle α entre le rayon passant par le point et le vecteur $-V$, où V désigne la direction générale de l'écoulement.

Les résultats obtenus pour une vitesse d'écoulement de 5 m.s^{-1} , ont été rassemblés dans le tableau ci-après.

α	U_α
0°	5,82
30°	5,70
45°	5,60
60°	5,62
90°	5,60
120°	5,60
U_α est une tension (en volts) proportionnelle à la pression.	



Chapitre V

VISUALISATION DES ECOULEMENTS ET SIMULATIONS NUMERIQUES

1 - Intérêt des visualisations et simulations numériques.

Les mesures de pressions et de vitesses au sein d'un écoulement sont indispensables pour l'étude quantitative de celui-ci. Mais les valeurs ainsi obtenues ne permettent pas toujours d'en avoir une vision globale. C'est l'une des raisons qui ont conduit, en particulier au cours des dernières années, au développement de techniques sophistiquées de visualisation des écoulements.

Ces techniques nécessitent l'introduction en certains points de l'écoulement de "marqueurs", constitués en aérodynamique par des fumées de diverses origines. La visualisation des filets d'air ainsi "ensemencés" est obtenue par l'éclairage de certaines régions de l'écoulement au moyen de faisceaux ou de nappes laser. Il est ainsi possible de rendre visibles les trajectoires de certains filets d'air et, dans certains cas, d'établir une "cartographie" de l'écoulement en mettant par exemple en évidence les zones où l'écoulement est laminaire ainsi que les tourbillons.

Par ailleurs, les spécialistes de la modélisation mathématique et du calcul scientifique peuvent utiliser ces images pour vérifier la cohérence des résultats obtenus par la résolution numérique des équations physiques régissant le phénomène (équations de Navier-Stokes). En effet, les techniques informatiques actuelles permettent la représentation de l'écoulement sous forme d'images de synthèse, construites à partir des valeurs numériques obtenues, rendant aisée la comparaison entre les résultats de la simulation numérique et le phénomène physique lui-même, représenté globalement grâce aux techniques de visualisation. Les modèles mathématiques peuvent ainsi être validés, en vue d'une utilisation dans des situations différentes.

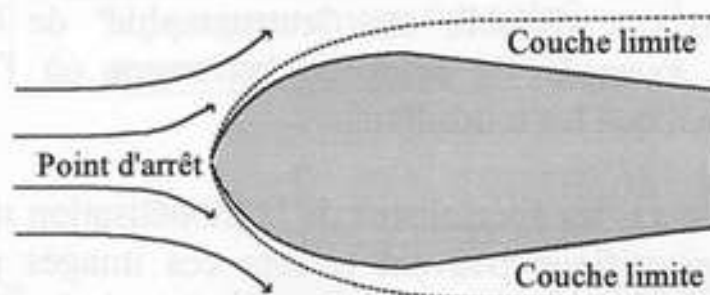
En ce qui nous concerne, nous avons cherché à mettre en oeuvre les techniques de visualisation d'écoulement pour vérifier certains des phénomènes (dépressions, couche limite, ...) déjà révélés par nos mesures.

Quelques images de synthèse issues de simulations numériques (effectuées au Laboratoire de Calcul Scientifique de la Faculté des Sciences et Techniques de Besançon) nous ont par ailleurs permis de juger de l'intérêt de ces méthodes pour obtenir rapidement des prévisions concernant une configuration physique qui n'a pas encore été expérimentée.

2 - Définition et propriétés de la "couche limite".

On appelle ainsi une zone de transition de l'écoulement, située tout autour de l'obstacle : la vitesse du fluide, nulle à la surface de l'obstacle à cause de la viscosité du fluide, s'accroît lorsqu'on s'éloigne de celle-ci, pour atteindre une valeur très proche de V_∞ à la limite de cette zone, où V_∞ désigne la vitesse du flux en l'absence d'obstacle.

En dehors de la couche limite, les gradients de vitesse sont faibles, et on admet que les forces de viscosité sont négligeables. Le fluide réel s'y comporte comme un fluide parfait.



La couche limite se développe le long de l'obstacle à partir du point d'arrêt (voir figure) . A partir de ce point, l'écoulement dans la couche limite est d'abord laminaire; puis il devient turbulent et la couche limite s'élargit rapidement. Cela correspond au point de "décrochement" de la couche limite. A partir de ce point la vitesse dans la couche limite peut comporter une composante de sens opposé à la direction générale du flux.

D'après le théorème de Bernoulli, les valeurs de la vitesse et de la pression dans un fluide incompressible de masse volumique ρ sont liées par la relation :

$$p + \rho g h + \rho v^2 / 2 = \text{constante} .$$

L'altitude h pouvant être considérée comme constante, on en déduit :

$$p + \rho v^2 / 2 = \text{constante} .$$

Par suite, lorsqu'on s'éloigne de la surface de l'obstacle, en restant à l'intérieur de la couche limite dans sa partie laminaire, la vitesse du fluide croît et la pression décroît.

Les résultats de nos expériences de visualisation mettent en évidence la couche limite et son décrochement, ainsi que les zones de tourbillon faisant partie de la couche limite à partir du point de décrochement.

3 - Description des visualisations obtenues .

Précisons tout d'abord que les vitesses d'écoulement utilisées pour l'obtention de ces images sont peu importantes (moins de 1 m.s^{-1}).

a) Images réalisées avec le profil Eppler-193 (photos 3 à 8) :

Elles concernent la visualisation d'un filet d'air proche de l'extrados de l'aile.

La première photo, prise avec une faible vitesse d'écoulement, montre un filet d'air laminaire collant au profil sur toute sa longueur. Les trois photos suivantes, prises avec la même position du profil et des vitesses croissantes, montrent un décrochement de plus en plus important de ce filet d'air, correspondant probablement à un décrochement analogue de la couche limite. Ces diverses trajectoires sont schématisées sur le dessin ci-après :

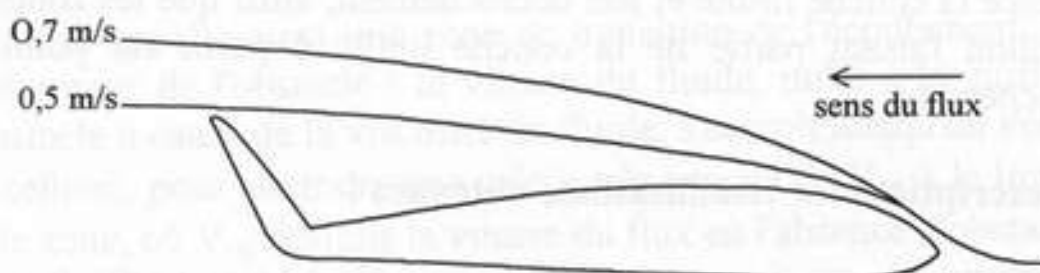


Les photos 7 et 8 montrent que le décrochement du filet d'air s'accroît avec l'incidence de l'aile.

L'existence probable d'une dépression entre le filet d'air visualisé et le profil lui-même, dépression qui s'étendrait donc sur une partie très importante de l'extrados, pourrait expliquer la portance élevée de ce profil.

b) Images réalisées avec le profil comportant un aileron braqué vers le haut (photos 9 et 10) :

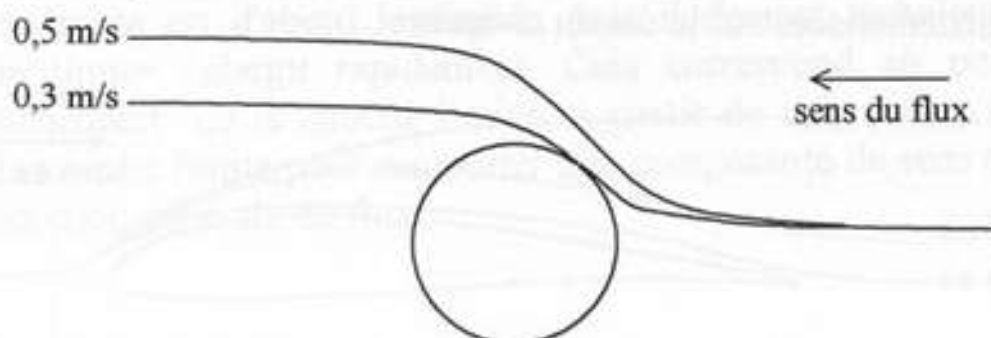
Pour ce profil, le décrochement du filet d'air est très important, puisqu'il rejoint directement le haut du volet en partant du bord d'attaque de l'aile, selon le schéma ci-après :



Ce filet d'air constitue probablement la limite de la zone de dépression mise en évidence par nos mesures de pression (voir chap. IV, § 2) .

c) Images réalisées avec le cylindre de 40 mm de diamètre (photos 16 et 17) :

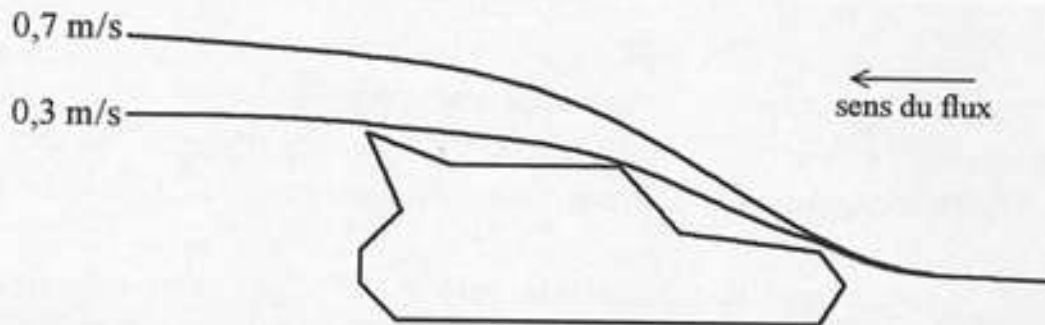
En comparant ces deux images, on constate que le filet d'air visualisé se "décroche" de façon plus précoce de la surface du cylindre lorsque la vitesse de l'écoulement est plus importante. On remarque également que la zone dépressionnaire située à l'arrière du cylindre devient plus étendue lorsque la vitesse s'accroît.



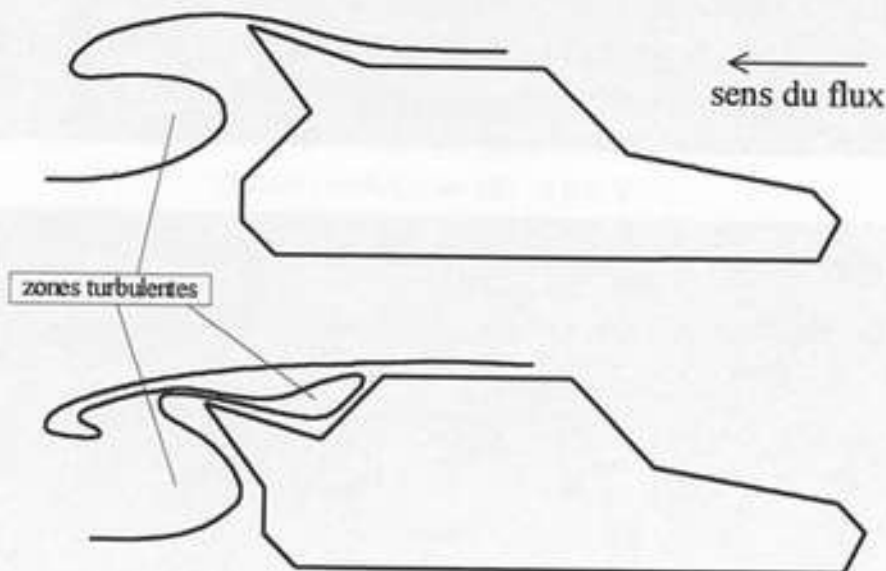
d) Images réalisées avec des profils d'automobile :

(sans aileron : photo 11 ; avec aileron : photos 12 à 15)

Ces photos montrent l'effet important de l'aileron sur l'écoulement : le filet d'air visualisé sur les photos 12 et 13 fait apparaître un décrochement important dès l'avant du profil, lors de la présence de l'aileron, alors que le décrochement se produit seulement à l'arrière du toit sur le profil normal (photo 11).



Les photos 14 et 15, réalisées à basse vitesse, mettent en évidence les tourbillons générés par la présence de l'aileron : Lorsque l'aileron est placé en position haute, le principal tourbillon se produit *au dessous* de l'aileron, et cette dépression intervient probablement dans l'accroissement sensible de portance négative mesuré avec ce profil (cf. chap.II , § 3). Par contre, lorsque l'aileron est placé en position basse, on note la présence de deux tourbillons, l'un d'eux étant situé *au dessus* de l'aileron. Il est probable que la dépression correspondant à ce tourbillon intervient pour rendre positive la portance de ce profil (cf. chap.II , § 3).



4 - Comparaison avec les résultats des simulations numériques.

Les simulations faites par le L.C.S. ne rendent pas compte des phénomènes de tourbillon qui se produisent dans les zones de dépression. Cela est dû à la nécessité d'introduire une viscosité importante dans le modèle, pour assurer la stabilité des méthodes numériques utilisées. Néanmoins, les répartitions de pression ainsi obtenues sont proches de la réalité physique.

Notons que les échelles de couleur indiquées à droite des graphiques n'ont pas été ajustées à des unités de mesure physique, et ne sont donc pas utilisables pour des comparaisons avec des résultats de mesure.

Ainsi, la répartition des pressions autour d'un cylindre (Simulation 1) paraît tout à fait cohérente avec celle que nous avons pu mesurer. De même, la répartition des pressions autour du profil d'automobile comportant un aileron arrière en position haute (Simulation 3) semble en accord avec nos mesures de portance, qui ont révélé une portance négative très importante pour ce profil.

Par ailleurs, les lignes de courant générées par la simulation numérique pour ce même profil sont très semblables aux visualisations correspondantes que nous avons faites en soufflerie (photos 12 et 13).

La simulation numérique paraît donc intéressante pour obtenir une première estimation des caractéristiques d'un écoulement. Elle ne saurait toutefois remplacer l'expérimentation physique, les visualisations et les mesures directes, lorsque celles-ci sont réalisables.

Photo 1 : écoulement laminaire du flux - $0,7 \text{ m.s}^{-1}$

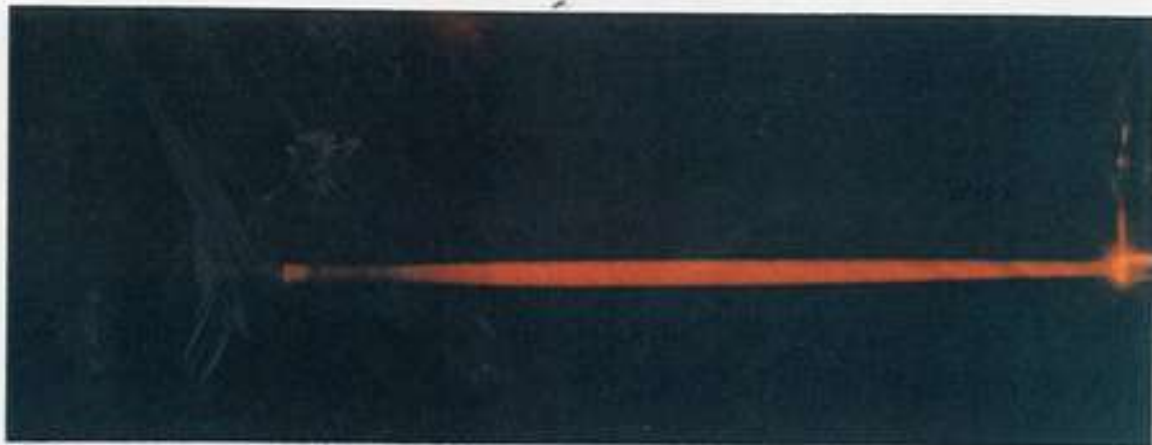


Photo 2 : plaque vue de profil - $0,7 \text{ m.s}^{-1}$

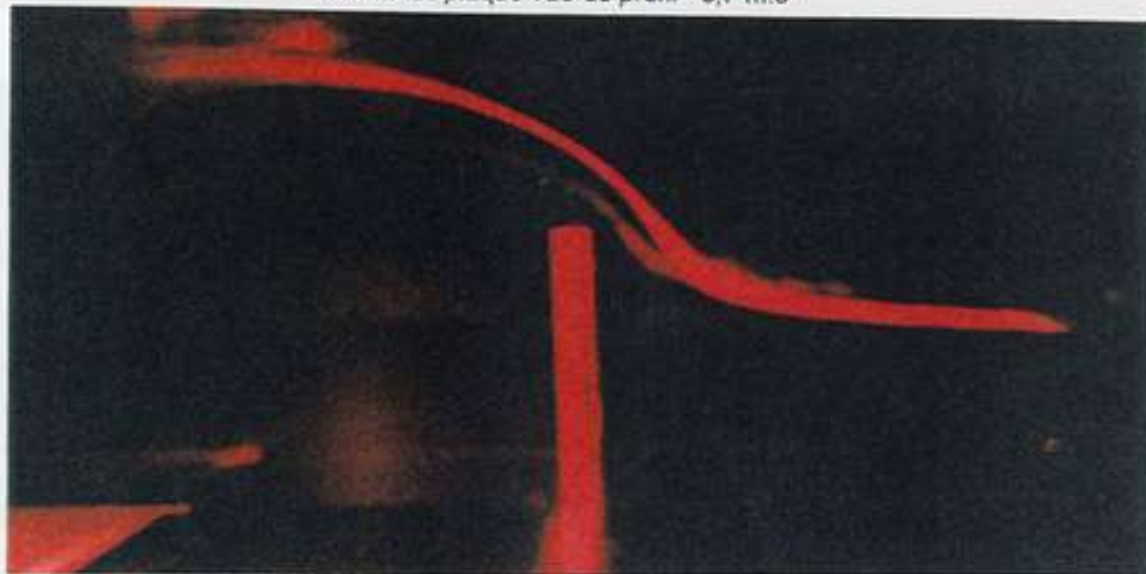


Photo 3 : profil Eppler 193 vue de profil - $0,3 \text{ m.s}^{-1}$



Photo 4 : profil Eppler 193 - $0,5 \text{ m.s}^{-1}$



Photo 5 : profil Eppler 193 - $0,5 \text{ m.s}^{-1}$

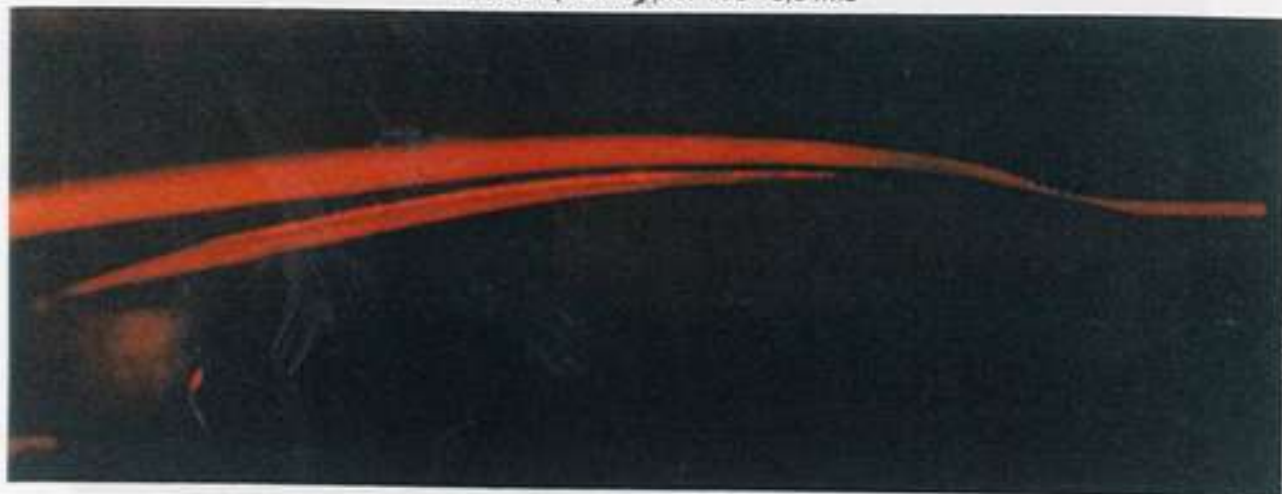


Photo 6 : profil Eppler 193 - $0,7 \text{ m.s}^{-1}$

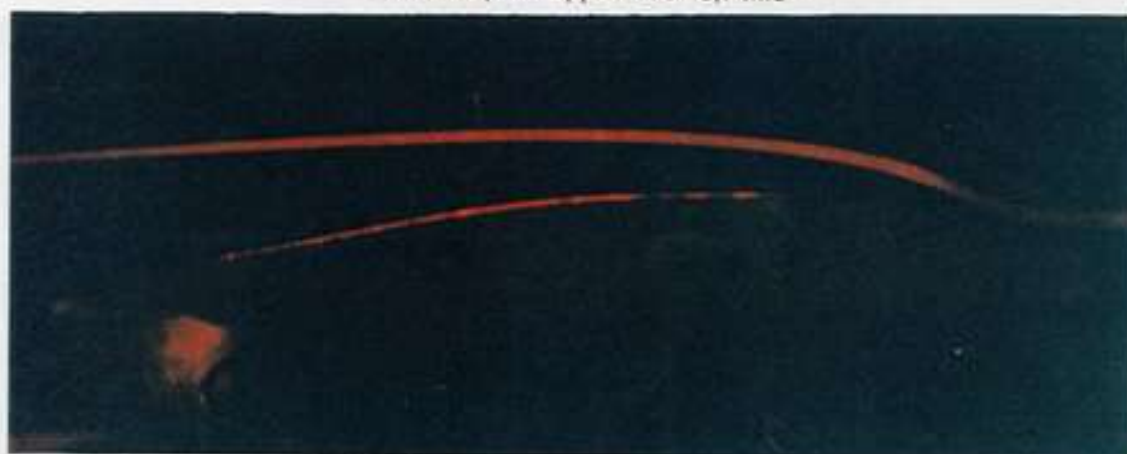


Photo 7 : profil Eppler 193 incliné - $0,5 \text{ m.s}^{-1}$



Photo 8 : profil Eppler 193 incliné, aileron abaissé - $0,5 \text{ m.s}^{-1}$



Photo 9 : profil Eppler 193, aileron relevé - $0,7 \text{ m.s}^{-1}$

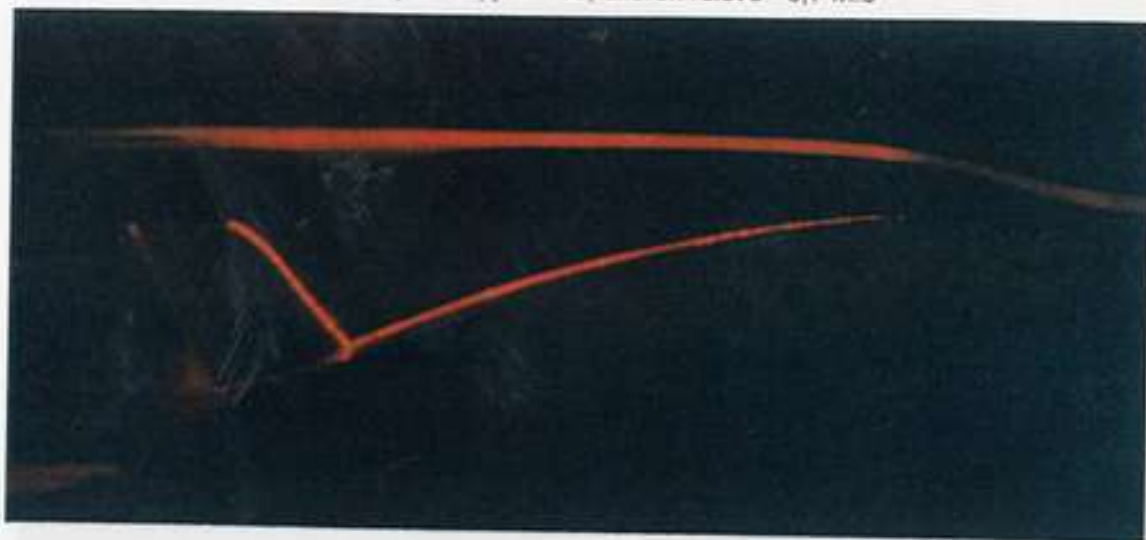


Photo 10 : profil Eppler 193, aileron relevé - $0,5 \text{ m.s}^{-1}$

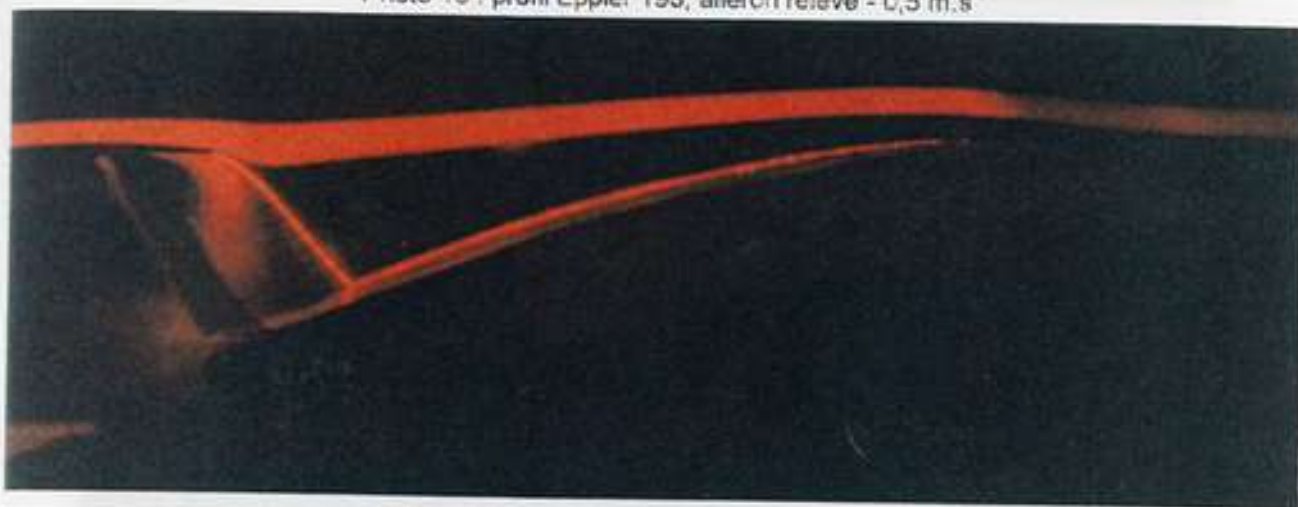


Photo 11 : profil de voiture sans aileron - $0,3 \text{ m.s}^{-1}$

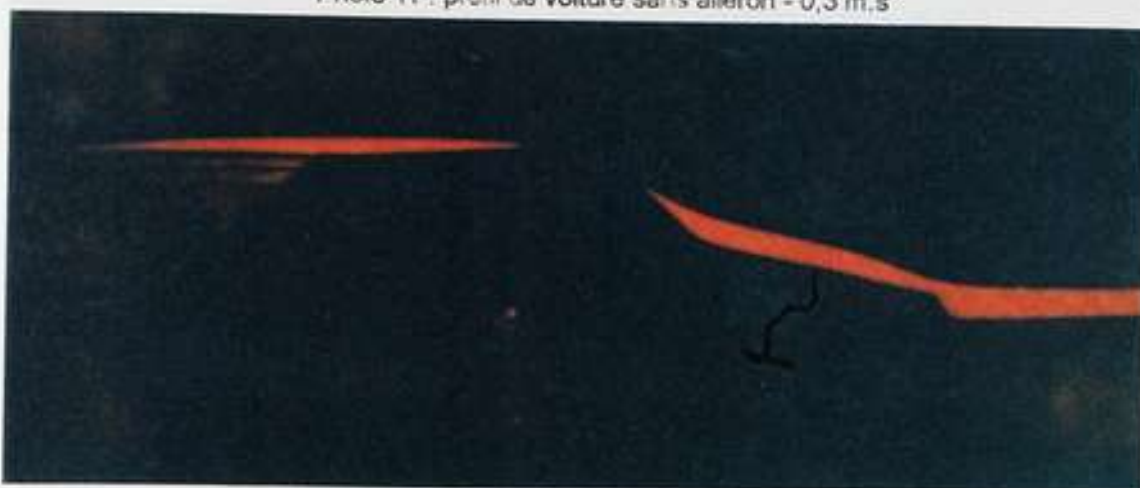


Photo 12 : profil de voiture, aileron en position haute - $0,7 \text{ m.s}^{-1}$



Photo 13 : profil de voiture 3/4 avant, aileron en position haute - $0,7 \text{ m.s}^{-1}$



Photo 14 : profil de voiture, vue arrière, aileron en position haute - $0,3 \text{ m.s}^{-1}$



Photo 15 : profil de voiture, vue arrière, aileron en position basse - $0,3 \text{ m.s}^{-1}$



Photo 16 : cylindre vue de profil, de 40 mm de diamètre - $0,3 \text{ m.s}^{-1}$

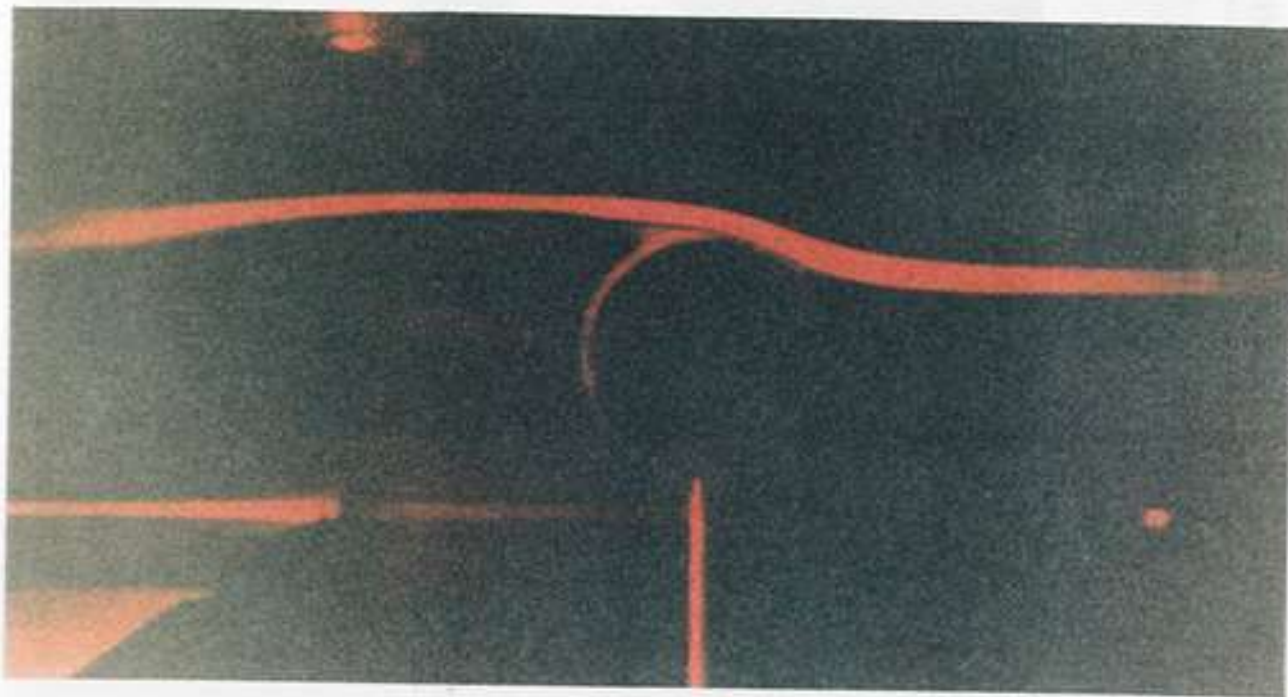
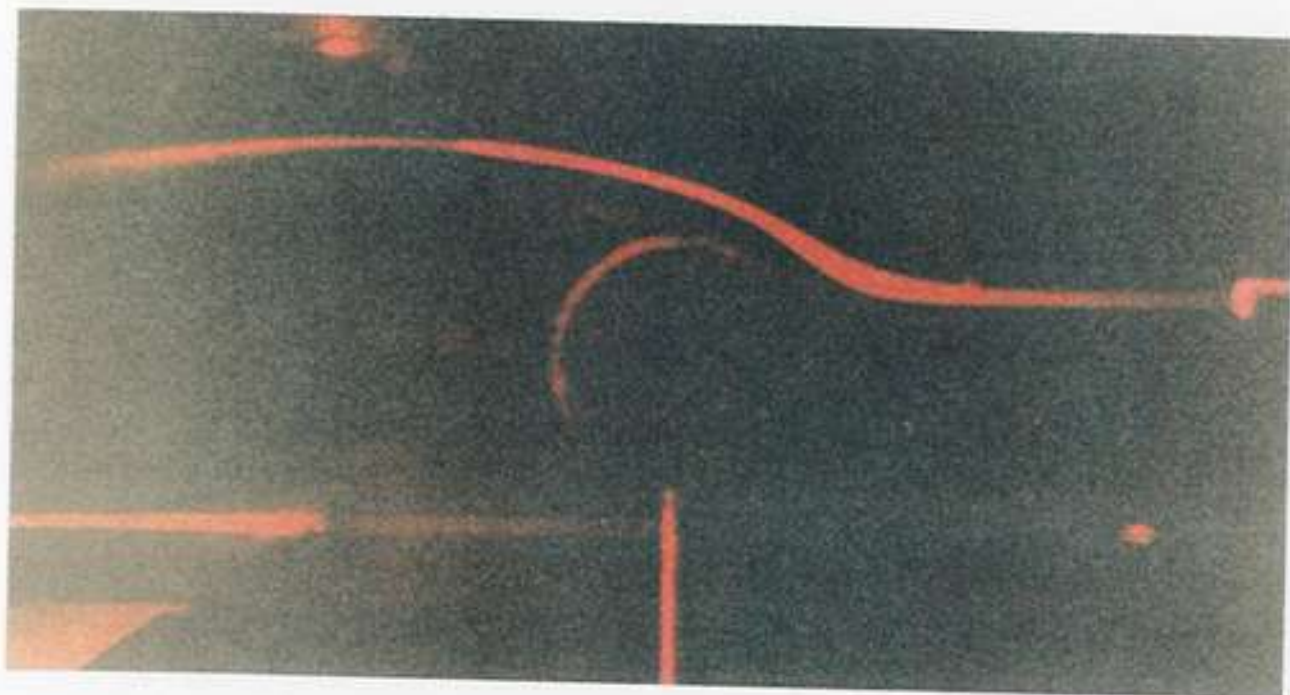
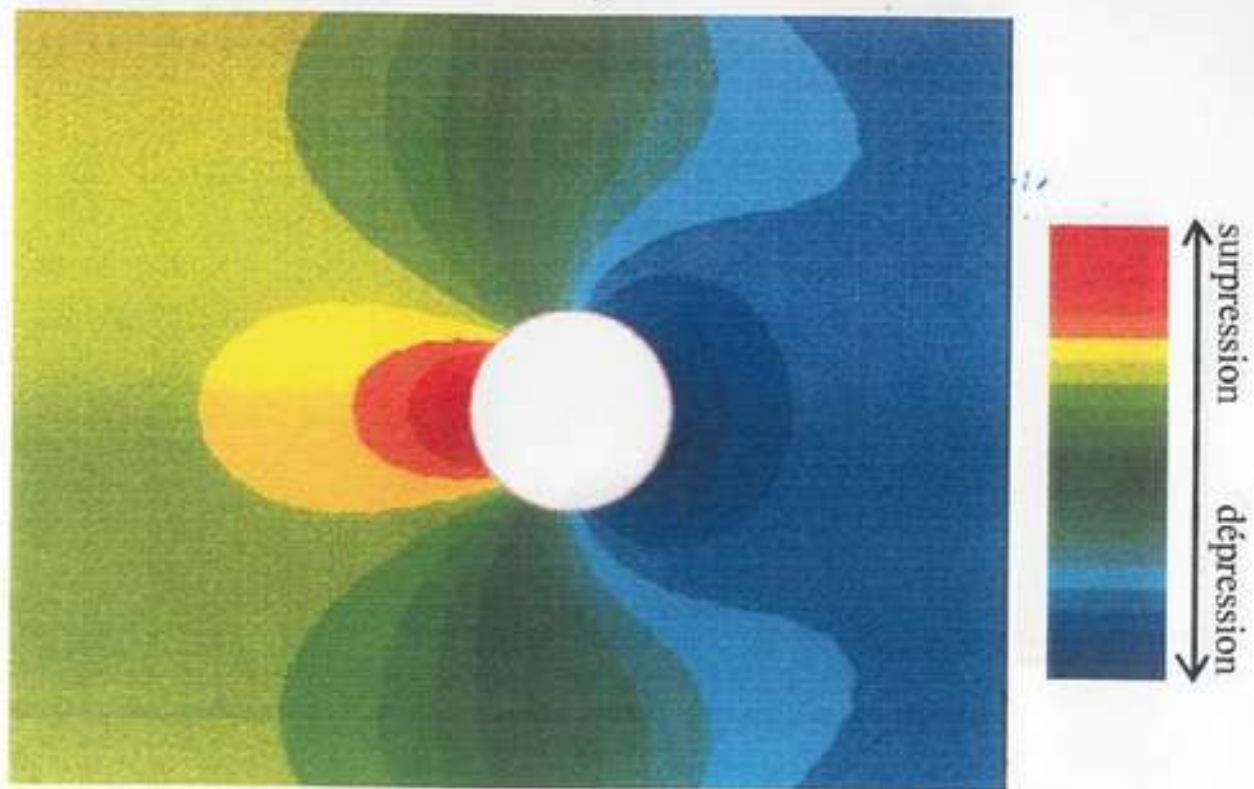


Photo 17 : cylindre vue de profil, de 40 mm de diamètre - $0,5 \text{ m.s}^{-1}$





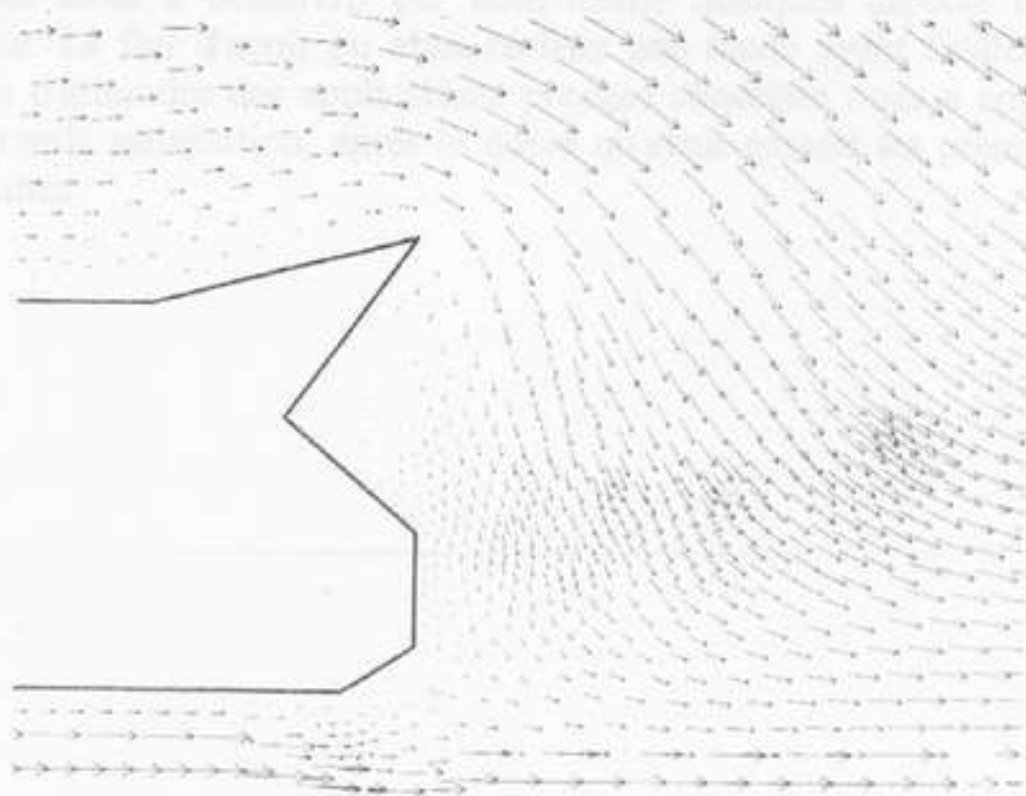
Simulation 1 - Répartition des pressions dans un écoulement bidimensionnel autour d'un cylindre.
(Résolution par des méthodes d'élément finis)



Simulation 3 - Ecoulement bidimensionnel autour d'un profil représentant une automobile munie d'un aileron.
(Résolution par des méthodes d'éléments finis)

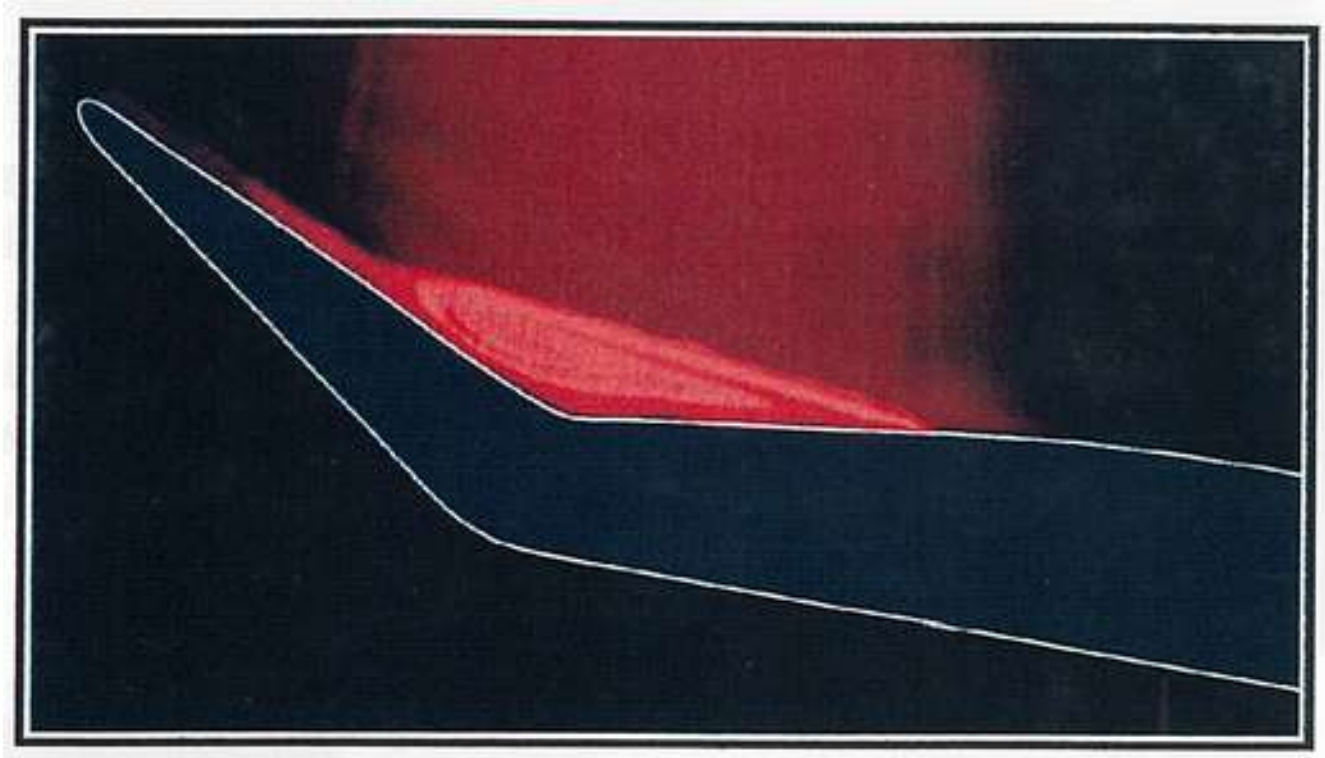


Simulation 3 - Répartition des pressions dans l'écoulement précédent.
(Résolution par des méthodes d'éléments finis)

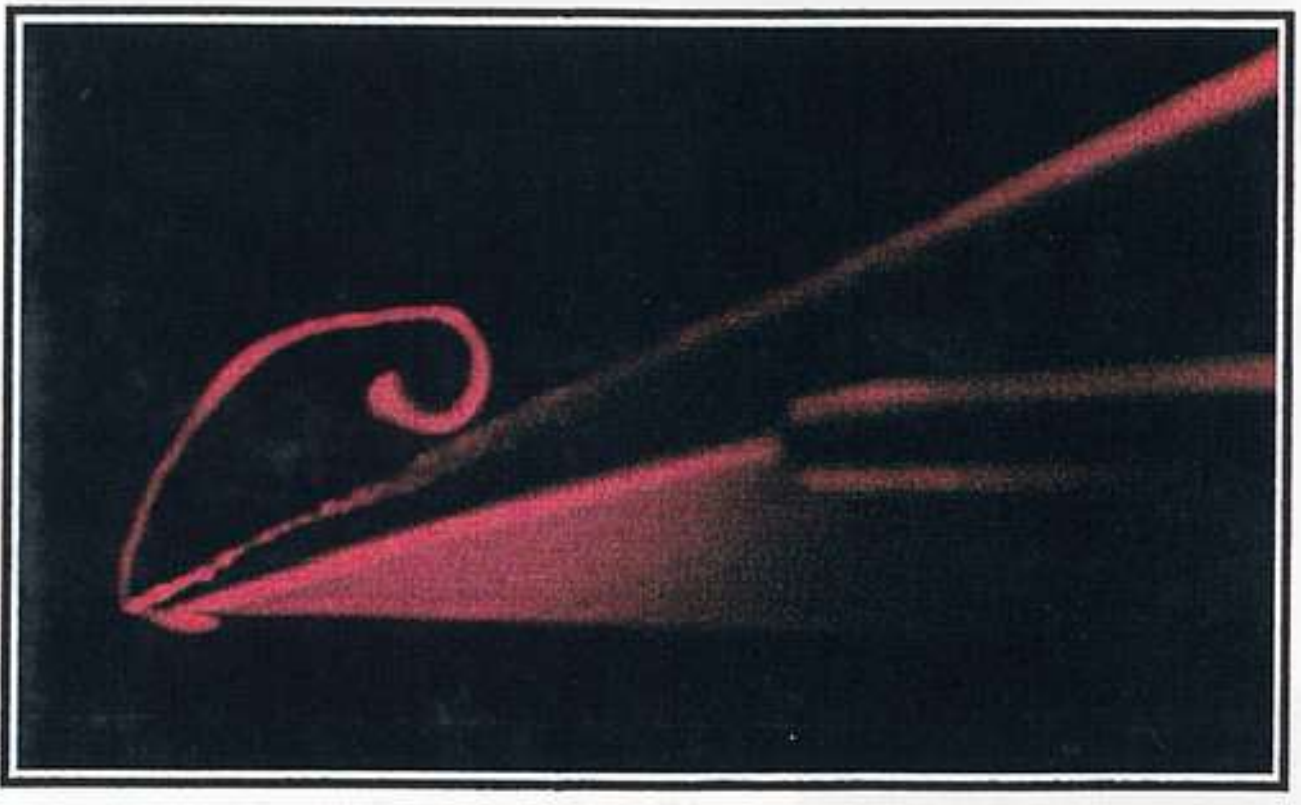


Simulation 3 - Vecteurs vitesse au voisinage de l'aileron
pour l'écoulement précédent.
(Résolution par méthodes d'éléments finis)

Turbulence au-dessus d'un profil d'aile comportant un aileron relevé



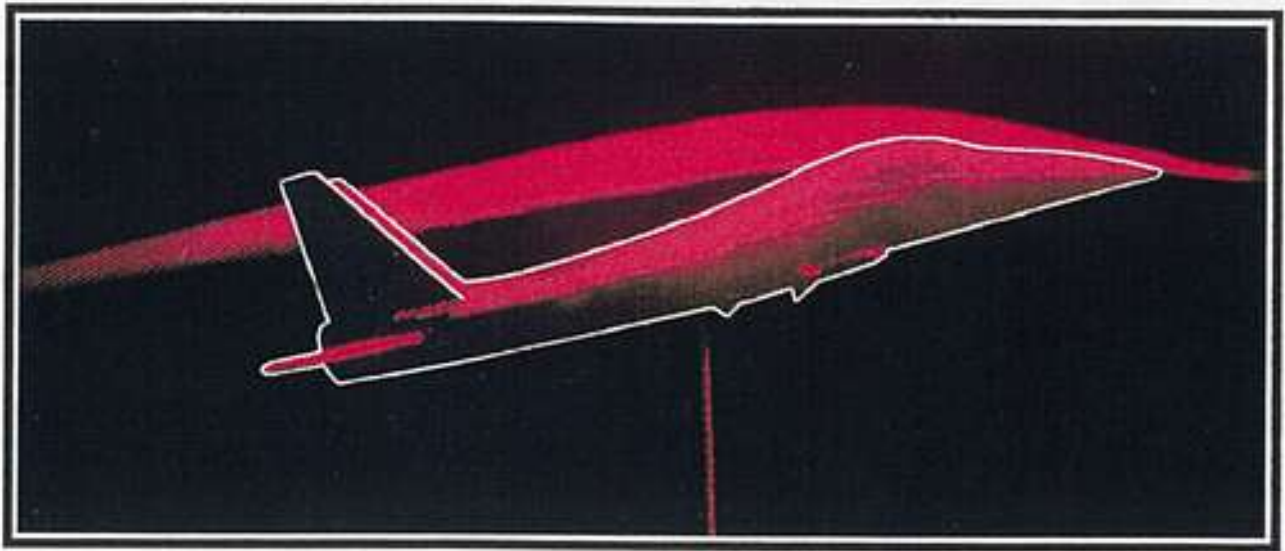
Coupe transversale d'une turbulence à l'extrémité arrière d'une aile delta



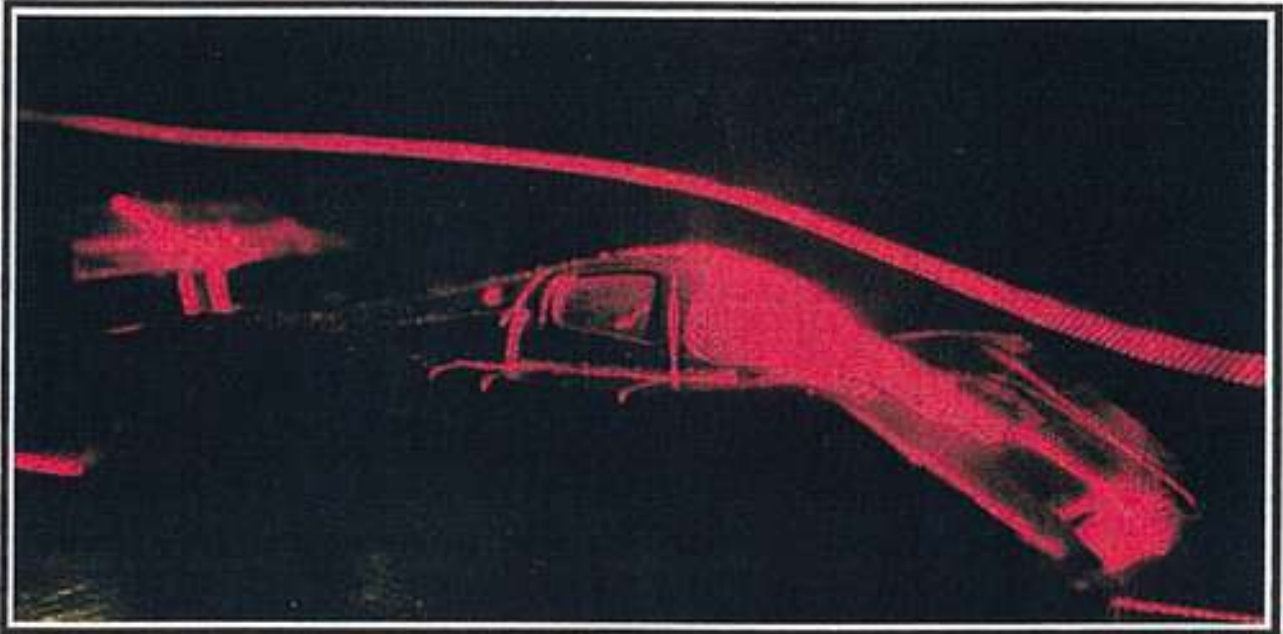
Coupe transversale d'une turbulence à l'arrière d'une aile delta



Visualisation d'un filet d'air au-dessus d'un avion de combat F15



Visualisation d'un filet d'air au-dessus d'une Mercedes Groupe C



Visualisation d'une turbulence au-dessous d'un aileron arrière de Mercedes Groupe C



CONCLUSION

Ce travail nous a permis d'aborder un domaine de la physique dont les applications sont innombrables, et de mieux comprendre des phénomènes dont la complexité avait bien souvent échappé à notre logique intuitive. Certes, notre modeste matériel ne nous a pas permis de tester le comportement d'une voiture de Formule-1 ou d'un Airbus, mais nous avons pu ainsi rencontrer des spécialistes qui n'ont pas hésité à consacrer un peu de leur temps pour soutenir notre démarche et nous aider à découvrir par nous-même quelques aspects de la Science. Le fait d'avoir pu ainsi réaliser une étude ayant finalement permis d'atteindre des applications presque concrètes nous a apporté une grande satisfaction, après le doute qu'avait suscité les premières difficultés.
