



Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/>
Eprints ID : 9549

To cite this version : Anne-Archard, Dominique and Du Colombier, Daniel and Boisson, Henri-Claude and Herbert, Vincent. *Analyse des enduits de visualisation pariétale utilisés en aérodynamique*. (2006) In: 41ème congrès annuel du Groupe Français de Rhéologie, 18-20 Oct 2006, Cherbourg, France.

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Analyse des enduits de visualisation pariétale utilisés en aérodynamique

D. Anne-Archard¹, D. du Colombier², H. C. Boisson¹, V. Herbert³

¹ Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, UMR CNRS/INP-ENSEEIH/UPS 5502

Allée du Professeur Camille Soula, 31400 Toulouse, France

² Institut Aérotechnique, 15 rue Marat, 78210 Saint Cyr l'Ecole, France

³ PSA Peugeot Citroën, DRIA, Route de Gisy, 78943 Velizy-Villacoublay, France

Résumé : En aérodynamique, la visualisation du frottement pariétal est souvent réalisée à l'aide d'un enduit déposé sur une maquette testée en soufflerie. Les enduits de visualisation sont des suspensions de particules solides (le traceur) dans une phase continue qui peut être volatile ou non au cours de l'essai. L'efficacité d'un enduit est liée à sa composition et à la plage de vitesses sur laquelle il est actif. Ce travail a pour but de progresser dans la compréhension de ce processus et d'établir un lien entre les caractéristiques physiques de ces enduits et leur efficacité en visualisation afin d'améliorer leurs performances.

Mots-clé : visualisation, suspension, agrégation.

1. Introduction

Les techniques de visualisation ont été très largement développées dans le domaine de l'aérodynamique pour les informations qu'elles apportent sur le champ de vitesse moyen ou fluctuant ainsi que sur la structure de l'écoulement autour d'un corps. Différentes techniques sont utilisées (cf. Van Dyke [1]), telles que les colorants (liquides ou de type fumigène) injectés dans l'écoulement ou déposés sur le corps, les fils de laine, la stroboscopie... L'une des techniques les plus utilisées pour la visualisation des lignes de frottement pariétal consiste à déposer un mince film d'enduit sur la maquette à étudier, puis à exposer celle-ci au vent d'une soufflerie. Si la composition de l'enduit est adéquate, son entraînement par le vent donne lieu à la formation de lignes assimilables à des lignes de frottement (cf. figure 1) et dont l'organisation détermine la signature pariétale des structures aérodynamiques présentes au voisinage du corps étudié. La composition de ces enduits a été mise au point empiriquement et chaque soufflerie, chaque expérimentateur possède 'ses' enduits et un savoir-faire issus de nombreuses expériences. Ces enduits sont constitués de particules solides (le traceur) en suspension dans une phase liquide. On peut en distinguer deux familles : les enduits non volatils qui sont simplement déplacés sur la surface de la maquette, et les enduits volatils, pour lesquels la phase liquide s'évapore partiellement ou totalement durant le soufflage.

Parmi les composants de ces enduits, on trouve fréquemment l'oxyde de titane ou de zinc, le talc, le kaolin ou l'antracène en ce qui concerne les

traceurs. La phase continue est souvent constituée de paraffine, de white-spirit, de kérosène ou d'alcool utilisés avec un additif tel que l'acide oléique, l'huile de lin ou l'essence de térébenthine.



Figure 1 : Visualisation du frottement pariétal sur la lunette arrière d'une automobile.

Les défauts inhérents à cette technique de visualisation par enduit sont de deux ordres: d'une part elle ne fonctionne pas sur certaines zones, notamment celles où règnent des vitesses plus faibles comme les zones décollées. Ceci est bien illustré par la figure 1. D'autre part elle fait intervenir des matériaux (particules ou phase continue) qui sont parfois toxiques ou dangereux, voire qui deviennent trop salissants pour les technologies mises en œuvre dans les nouvelles souffleries.

L'objectif de cette étude est de permettre une meilleure compréhension des phénomènes impliqués dans la formation de ces visualisations afin d'améliorer l'efficacité des enduits actuels (efficacité aux faibles vitesses) et proposer de

nouvelles compositions afin de s'affranchir des problèmes de toxicité et de pollution.

Les mécanismes de formation de ces lignes ont reçu peu d'attention à ce jour. Les travaux de Stalker [2] sont les seuls qui relatent le processus de formation des lignes de frottement, simplement établi à partir d'observations visuelles avec des enduits volatils. Stalker observe qu'il y a tout d'abord formation de petites rides transversales à l'écoulement et réparties de façon aléatoire sur la surface qui évoquent une instabilité de la surface libre. Ces rides sont ensuite entraînées et étirées dans le sens de l'écoulement pour former des 'V' dont les branches s'allongent pour donner, en fin de visualisation, les lignes observées. La formation d'un système de rides transversales est clairement identifiée comme la première étape du processus de formation des visualisations, y compris en enduit non volatil. Il s'agit d'instabilités se développant à l'interface gaz-liquide et cela a par exemple été étudié par Ludwig et Hornung [3] en fluide newtonien ou par Ozgen et al. [4,5] en fluide newtonien et non newtonien (fluide d'Ostwald). Si cette première étape est toujours observée, quelle que soit la nature du fluide, l'étape suivante (*i.e.* l'entraînement et la déformation des rides) est intimement liée à la composition de l'enduit puisque les expérimentateurs ont bien identifié des compositions spécifiques pour obtenir ces tracés. Le lien entre la composition et les caractéristiques de l'enduit et son efficacité lors de cette deuxième étape n'a pas fait l'objet d'études spécifiques et ce travail en propose donc une première approche.

2. Matériels et méthodes

Nous avons travaillé à partir de deux enduits dits 'de référence' qui sont couramment utilisés en soufflerie à l'Institut Aérotechnique. Le premier est un enduit volatil constitué de kaolin (VWR Int.) en suspension dans du white-spirit ('17/18', Magnac-Delfraissy) additionné d'acide oléique (VWR Int.). La granulométrie du kaolin (granulomètre Malvern Mastersizer 2000) donne un diamètre moyen de particules d_{50} de $6.7\mu\text{m}$ pour des tailles comprises entre $0.5\mu\text{m}$ et $50\mu\text{m}$.

Le second enduit est non volatil et est constitué d'oxyde de titane (TiO_2 Rectapur, VWR Int.) en suspension dans de l'huile de paraffine (Rectapur, VWR Int.) additionnée d'acide oléique. L'oxyde de titane est caractérisé par un diamètre d_{50} de $1,3\mu\text{m}$ et des tailles allant de $0,2$ à $70\mu\text{m}$. La préparation se fait en deux temps : la phase continue est préparée et homogénéisée, puis le TiO_2 est ajouté et le tout est agité par barreau magnétique durant 20'.

Les caractérisations rhéologiques sont effectuées à l'aide d'un rhéomètre Bohlin C-VOR 200. Les phénomènes de 'glissement à la paroi' (Coussot et Ancy [6]) ont été observés et réduit par l'utilisation de géométries rugueuses (plans parallèles de diamètre 60mm et 25mm et de rugosité respectivement 200μ et 500μ).

Les tests de visualisation sont réalisés dans la soufflerie à veine longue de l'Institut Aérotechnique sur une maquette d'obstacle présentée sur la figure 2. Les essais présentés dans ce travail ont été réalisés à la vitesse de 35 ou 42m/s .

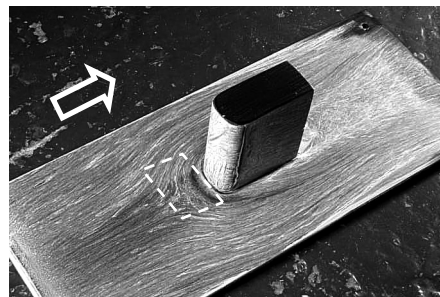


Figure 2 : Maquette utilisée pour les visualisations. Dimensions de l'obstacle : 1xLxH : 37x84x95 mm3.

3. Etude d'une famille d'enduits volatils

L'enduit volatil de référence est constitué de 20g de kaolin et 4cm^3 d'acide oléique pour 100cm^3 de white-spirit. L'acide oléique étant un dispersant pour le kaolin, un ensemble de tests de visualisations a été réalisé avec des concentrations croissantes en acide oléique. Exprimée en fraction massique ϕ_m par rapport au kaolin, la gamme explorée va de 0% à 54% , l'enduit de référence correspondant à $\phi_m^0 = 18\%$. Quatre résultats de visualisation sont présentés sur la figure 3. L'optimum est obtenu avec l'enduit de référence (figure 3.c) et l'effet dispersant de l'acide oléique est bien visible : les lignes de frottement sont tout d'abord très épaisses (figure 3.a) puis elles s'affinent (figure 3.b) pour être optimale à $\phi_m = 18\%$. Au-delà de cette valeur, l'ajout d'acide oléique conduit à des tracés très diffus (figure 3.d).

La caractérisation rhéologique de ces enduits a montré des comportements rhéofluidifiants sur lesquels des lois puissance ont été ajustées :

$$\tau_{xy} = K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

τ_{xy} et $\dot{\gamma}$ sont les contrainte et vitesse de cisaillement et K et n la consistance et l'indice de comportement. L'évolution de K et n en fonction de la fraction massique en acide oléique est représentée sur la figure 4.

On observe deux zones d'évolution sur ces courbes : pour les plus faibles teneurs en acide oléique ($\phi_m \leq \phi_m^0$), les variations de K et n avec ϕ_m sont rapides. Puis elles se stabilisent au-delà de ϕ_m^0 .

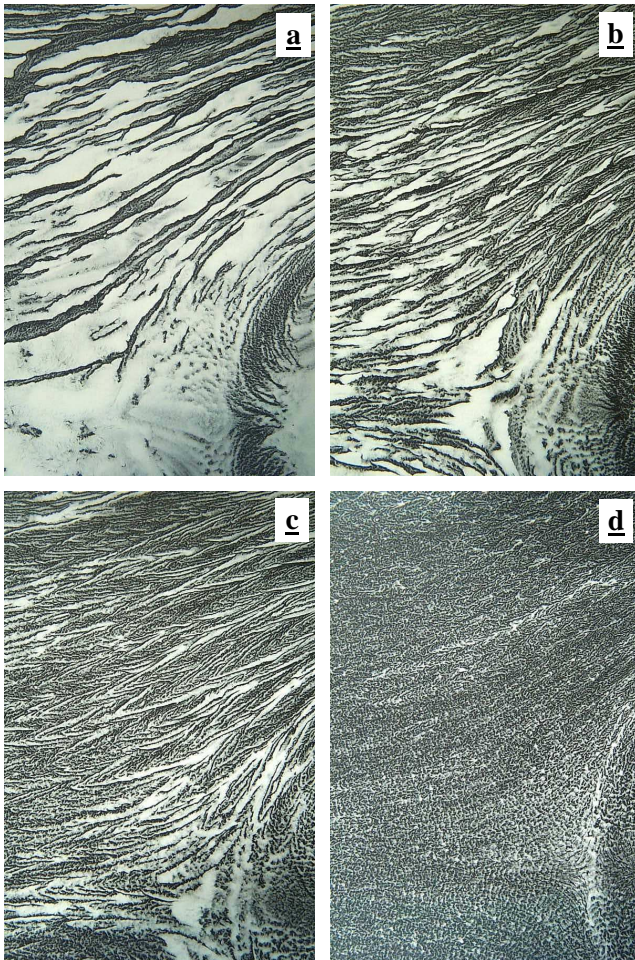


Figure 3 : Tracés observés à l'amont de l'obstacle (zone matérialisée sur la figure 2). Fraction massique acide oléique/kaolin : 0% (a), 8,9% (b), 17,9% (c) et 44,7% (d).

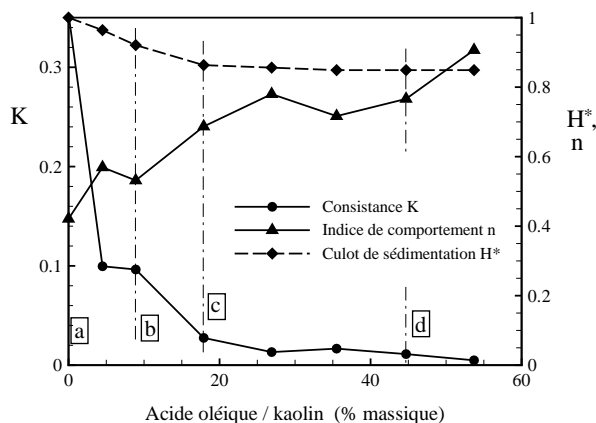


Figure 4 : Evolution des caractéristiques rhéologiques et de la hauteur du culot de sédimentation en fonction de la teneur en acide oléique. Les repères a, b, c et d correspondent aux enduits de la figure 3.

La composition optimale de l'enduit ($\phi_m = \phi_m^0$, repère c sur la figure 4) correspond à la frontière entre ces deux zones. Ces caractérisations ont été complétées par une expérience de sédimentation réalisée sur les huit enduits analysés. Elle a consisté à déposer ces enduits dans des tubes à essai de façon à ce que chacun contienne des quantités identiques de kaolin. La décantation est rapide et les culots de sédimentation sont stabilisés au bout de 24 heures. Ils sont reportés, sous une forme adimensionnée, sur la figure 4. Les deux zones d'évolution identifiées en rhéométrie sont également nettement visibles et délimitées par la même valeur $\phi_m = \phi_m^0$. L'acide oléique intervient donc comme un dispersant des particules de kaolin. La transition identifiée, soit $\phi_m = \phi_m^0$, correspond à la quantité d'acide oléique au-dessus de laquelle on n'observe plus de phénomènes d'agrégation et c'est effectivement au niveau de cette transition que sont obtenues les meilleures visualisations.

4. Etude d'une famille d'enduits non volatils

Dans ce type d'enduits, nous avons utilisé une composition de référence constituée de paraffine, acide oléique et TiO_2 dans les proportions massiques 100-10-20, soit une fraction volumique en TiO_2 de 3.8%. Différentes compositions ont été étudiées en conservant cette fraction volumique en TiO_2 et en faisant varier le rapport de masse entre acide oléique et TiO_2 entre 0% et 500%.

Les résultats obtenus en visualisation avec quatre de ces enduits (pour des fractions massiques ϕ_m de 0%, 25%, 50% et 500%) sont présentés sur la figure 5 (zone matérialisée sur la figure 2). Lorsqu'il n'y a pas d'acide oléique (fig. 5.a), l'enduit n'est pas entraîné dans les conditions de soufflage utilisées pour les tests. En augmentant les quantités d'acide oléique, on observe la première étape de formation des rides transversales. Elles sont encore visibles sur les figures 5.b et 5.d. Lorsque la proportion d'acide oléique est optimale ($\phi_m = 50\%$, fig. 5.c), on observe que ces rides transversales ont été entraînées et ont abandonné des particules à leurs extrémités. Ce sont ces particules qui vont constituer les lignes recherchées. On remarque qu'une trop grande quantité d'acide oléique ($\phi_m = 500\%$, fig. 5.d) ne conduit pas à une cartographie trop diffuse comme avec les enduits volatils (cf. §3 figure 3.d), mais au contraire à des tracés montrant des amas qui n'ont pas pu être entraînés.

Les caractérisations rhéologiques révèlent des comportements viscoplastiques que l'on modélise par une loi de Herschel-Bulkley :

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (2)$$

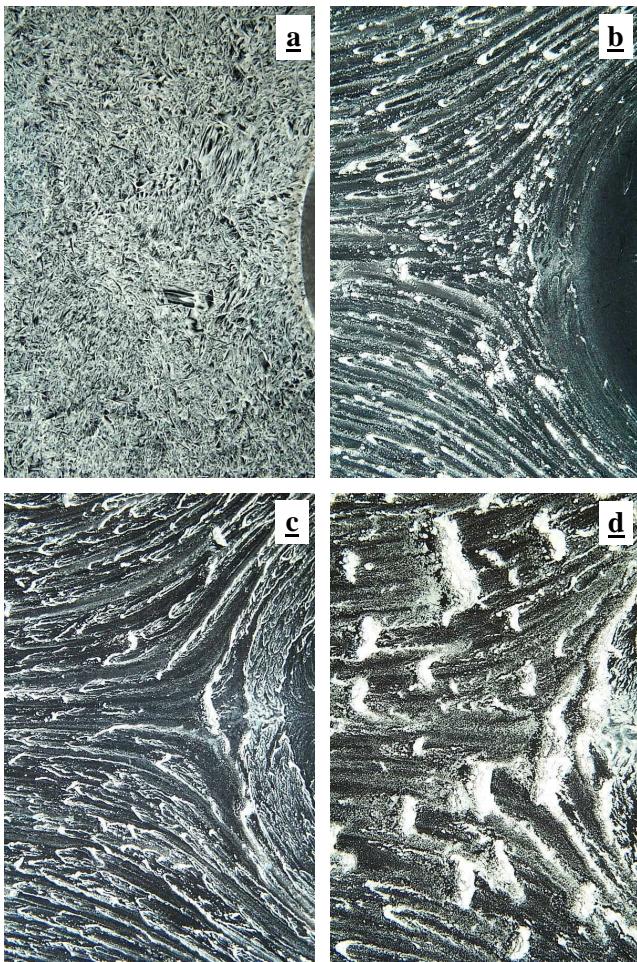


Figure 5 : Tracés observés à l'amont de l'obstacle. Fraction massique acide oléique/oxyde de titane : 0% (a), 25% (b), 50% (c) et 500% (d).

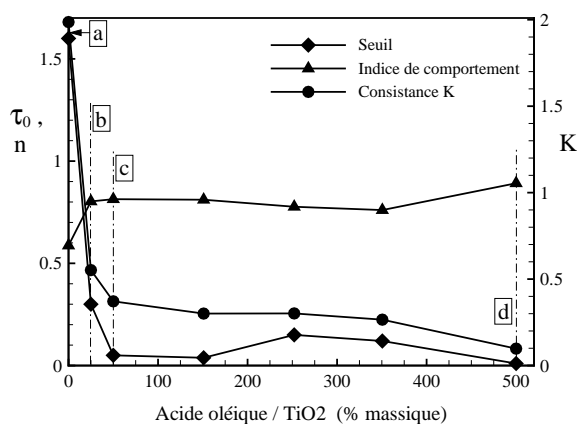


Figure 6 : Evolution des caractéristiques rhéologiques en fonction de la teneur en acide oléique. Les repères a, b, c et d correspondent aux enduits de la figure 5.

L'évolution des trois paramètres τ_0 , K et n avec ϕ_m est représentée sur la figure 6. On observe comme précédemment deux zones d'évolution : des variations très rapides de ces paramètres lorsque ϕ_m est inférieur à 25% et une quasi-stabilisation de ces valeurs au-delà. Les essais réalisés en soufflerie montrent que $\phi_m = 25\%$ est la composition conduisant aux meilleurs résultats dans cette gamme d'enduits. Le point de fonctionnement se situe donc à la frontière entre les deux zones d'évolution tout comme cela avait été observé avec les enduits volatils.

5. Conclusion

L'objectif de ce travail est d'analyser le processus de formation des lignes de frottement lors des visualisations par enduit effectuées en soufflerie. Sur une famille donnée d'enduits, le point de fonctionnement optimal correspond à une transition nette de l'évolution des paramètres rhéologiques. Ce point est donc particulièrement intéressant pour la mise au point de nouvelles compositions d'enduit. Les résultats obtenus montrent que l'efficacité d'un enduit, c'est-à-dire sa capacité à former ces lignes, est liée à l'état d'agrégation des particules au sein de la suspension. Dans les différentes compositions d'enduit utilisées en pratique, ce rôle est généralement assuré par l'acide oléique. Sa capacité de dispersant est ici mise en évidence. Elle est en outre assez faible et cela permet d'avoir des enduits peu sensibles aux variations de composition et donc robustes pour une utilisation facile en soufflerie.

Remerciements

Cette étude a été réalisée avec le soutien du Centre National de Recherche Technologique Aérodynamique et Aéroacoustique des Véhicules Terrestres (R2A).

Références

- [1] Van Dyke, M., *An Album of Fluid Motion* (Parabolic Press, Stanford, 1982)
- [2] Stalker, R. J., A study of the china-film technique for flow indication, *Aeronautical Research Laboratories, Australia*, Report A.96 (1955)
- [3] Ludwig, H., Hornung, H. The instability of a liquid film on a wall exposed to an air flow, *Journal of Fluid Mechanics*, 200, 217-233 (1989).
- [4] Ozgen, S., Carbonaro, M., Sarma, G. Experimental study of wave characteristics on a thin layer of de/anti-icing fluid, *Physics of Fluids*, 14 n°10, 3391-3402 (2002)
- [5] Ozgen, S., Degrez, G., Sarma, G. Two-fluid boundary layer stability, *Physics of Fluids*, 10, 2746 (1998)
- [6] Coussot, P., Ancey, C. *Rhéophysique des pâtes et suspensions* (EDP Sciences, Paris, 1999).