



**MESURES DE FROTTEMENT LOCAL A NOMBRES DE
REYNOLDS ELEVES A DGA TH**

***SKIN FRICTION LOCAL MEASUREMENTS AT HIGH
REYNOLDS NUMBER AT DGA H***

O. PERELMAN, J. VERMARE, M. DARQUIER

DGA Techniques hydrodynamiques
Chaussée du Vexin, BP 510, 27105 Val de Reuil Cedex
olivier.perelman@intradef.gouv.fr

Résumé

DGA Techniques hydrodynamiques a développé un moyen d'essais permettant de quantifier la résistance de frottement de différents revêtements de surface pour des écoulements à des nombres de Reynolds locaux élevés (4.10^6 à 64.10^6).

Le système d'essai (une plaque plane équipée d'une balance de mesure de frottement) a été étudié et réalisé par DGA Th. Il a été mis en œuvre lors de 2 campagnes de mesures, en 2008 et 2012, dans le grand tunnel hydrodynamique (G.T.H.) de DGA Th à Val de Reuil.

Ces essais ont permis de réaliser des mesures de frottement d'échantillons de surfaces lisses, rugueuses et revêtues de peintures, dont 2 systèmes de type FRC (Foul Release Coating).

Les mesures de frottements sur surfaces lisses (plaque de référence) réalisées lors des 2 campagnes d'essais sont cohérentes entre elles et avec les données disponibles dans la littérature.

Summary

DGA Hydrodynamics developed a test set-up to measure the skin friction resistance of different coatings at high Reynolds number flows (4.10^6 à 64.10^6).

The test system (a flat plate equipped with a balance for measuring friction) has been designed and produced by DGA H. It was used during two measurement campaigns in 2008 and 2012, in the large cavitation tunnel (GTH) of DGA H in Val de Reuil.

These tests allow friction measurements of samples of smooth and rough surfaces, as well as paints, including 2 FRC (Full Release Coating) coating systems.

Friction measurements on smooth surfaces (reference plate) made during the two test campaigns are consistent with each other and with the data available in the literature.

I. Introduction

La traînée de frottement contribue pour une large part à la résistance à l'avancement des navires de grandes tailles. Dans un projet de navire, il est donc important d'estimer au mieux cette contribution, or les données existantes à grands nombres de Reynolds sont peu nombreuses et ne concernent souvent que les plaques lisses.

Les récents changements de réglementation concernant les peintures antifouling ont amené les fabricants de peintures à formuler de nouveaux produits dénommés Foul Release Coating (FRC). Ces revêtements ont la réputation d'offrir une résistance de frottement plus faible que les peintures d'ancienne génération non seulement grâce à leur propriété antifouling mais aussi à cause de leur état de surface plus lisse.

Afin d'apporter quelques informations quantitatives concernant les peintures de type FRC, DGA Techniques hydrodynamiques (DGA Th) a développé un moyen permettant de quantifier la résistance de frottement de différents revêtements de surface pour des écoulements à des nombres de Reynolds élevés.

II. Moyen d'essais

Les essais ont eu lieu dans la petite veine du Grand Tunnel Hydrodynamique (G.T.H) de DGA Th. Cette veine d'essais, de par ses dimensions ($6 \text{ m} \times 1,14 \text{ m} \times 1,14 \text{ m}^3$) et ses capacités en vitesse d'écoulement (jusqu'à 20 m/s), permet le montage d'une maquette de type grande plaque plane, afin d'obtenir un nombre de Reynolds se rapprochant le plus de ceux correspondant au réel (Figure 1). L'échantillon de surface à mesurer ($500 \times 580 \text{ mm}^2$) est situé sur l'arrière de la plaque support de façon à obtenir un nombre de Reynolds local important.

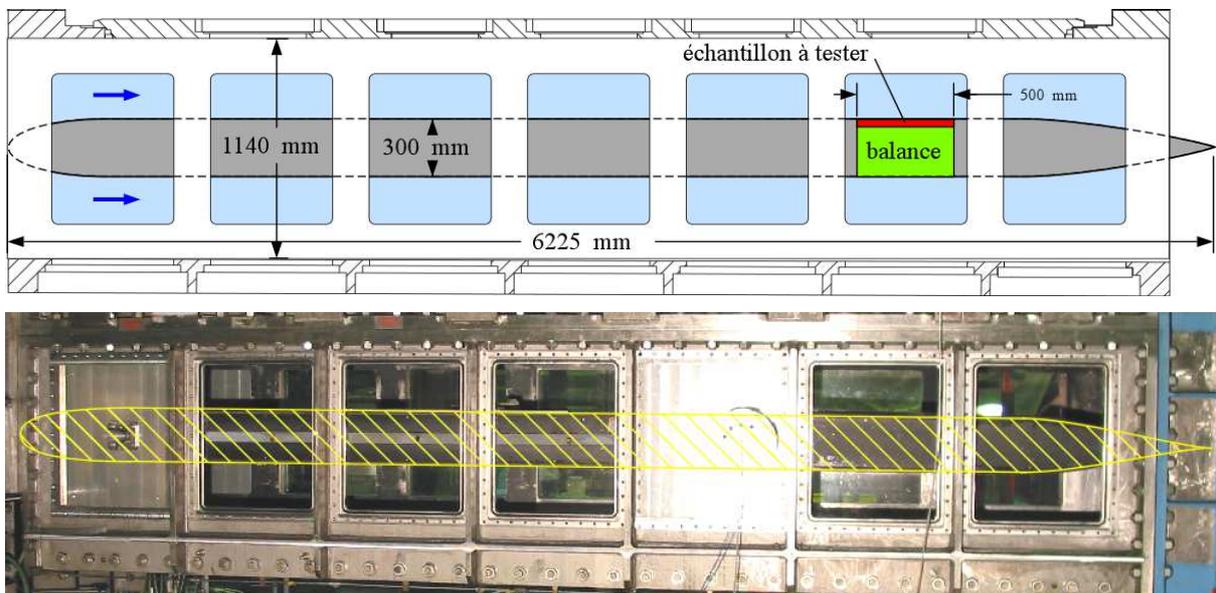


Figure 1 : Montage de la plaque dans la petite veine du G.T.H.

III. Instrumentation : la balance de mesure

Ce type de mesure est très délicat à mettre en œuvre car on cherche à mesurer des efforts tangentiels très faibles (quelques dizaines de Newton) dans des conditions d'essais (dimensions du montage et vitesses d'écoulement) qui peuvent générer des efforts de plusieurs ordres de grandeurs supérieurs aux quantités à mesurer.

La balance de mesure d'efforts tangentiels a été spécialement conçue et développée à DGA Techniques hydrodynamiques, avec comme contrainte majeure la réjection des efforts parasites dans la direction perpendiculaire de l'écoulement (Figure 2).

Après étalonnage, on obtient une incertitude de $\pm 0,1\%$ de l'étendue de mesure du capteur (200 N) et une perturbation inférieure à 0,015% par les forces perpendiculaires.

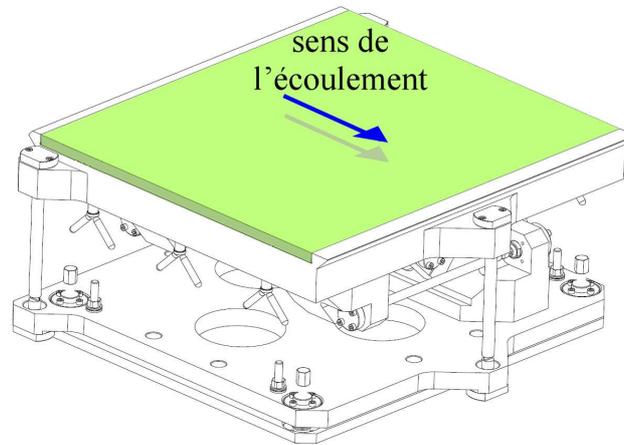


Figure 2 : Vue en perspective de la balance

On remarque que les rebords amont et aval du plateau pesé sont en contact avec l'écoulement et participent donc à la traînée mesurée. Ce type de montage a été retenu car cela évite de devoir régler l'affleurement de la plaque à tester avec la surface de la maquette à chaque changement de plaque échantillon. Ce point est important car une très petite marche montante ou descendante peut influencer notablement sur la valeur de la traînée mesurée [1].

Dans cette configuration de mesure, l'affleurement est réglé une fois pour toute en début d'essais et l'affleurement entre les plaques échantillons et les bords amont et aval du plateau pesé est assuré grâce aux tolérances d'usinage de la profondeur d'encastrement et des épaisseurs des plaques échantillons. Pour les cas de plaques échantillons avec peintures, une attention toute particulière a été portée sur l'application de la peinture et la gestion de son épaisseur. Ainsi une diminution progressive de l'épaisseur de peinture a été effectuée sur les bords amont et aval de la plaque, afin de supprimer toutes marches montantes ou descendantes. Les plaques échantillons sont de conception monobloc et sont manipulées avec quatre anneaux de manutention sur les côtés.

IV. Définition et adimensionnalisation des mesures

On présentera les résultats sous la forme de coefficient de frottement **local** C_f **moyenné** sur la surface de la plaque pesée et basé sur un nombre de Reynolds local Re_x :

$$C_f = \frac{\text{traînée}}{\frac{1}{2} \rho S_{\text{référence}} U_e^2} \quad Re_x = \frac{x U_e}{\nu}$$

Avec

- ρ = masse volumique de l'eau,
- U_e = vitesse extérieure à la couche limite,
- $S_{\text{référence}}$ = surface de la plaque échantillon (0,5 m x 0,58 m = 0,29 m²),
- $x = 4,367$ m = longueur sur laquelle la couche limite turbulente se développe en amont du point de mesure. C'est la distance entre la bande de rugosité et le centre de la plaque échantillon (Figure 1).

- ν = viscosité de l'eau. Les valeurs de ν sont dépendantes de la température de l'eau, aussi celle-ci est acquise pendant les mesures de traînée. ν est alors déterminé à l'aide de la formule suivante :

$$\nu = \left[(0.585 \cdot 10^{-3} (t_{wm}^{\circ} - 12) - 0.03361) (t_{wm}^{\circ} - 12) + 1.2350 \right] \cdot 10^{-6}$$

On distingue le C_f , coefficient de frottement local à la distance x du bord d'attaque d'une plaque plane ; différent de C_F , le coefficient de frottement total, qui caractérise le frottement moyen s'exerçant sur une plaque plane de longueur L .

Pour chaque plaque testée, des mesures de rugosité ont été effectuées à l'aide d'un rugosimètre Mahr TM (Perthometer M1). La longueur d'exploration utilisée est de $L_r=17,5\text{mm}$ et la longueur d'onde de coupure, basée sur la norme ISO/JIS est de $\lambda_c=2,5\text{mm}$. Les différentes valeurs significatives à la rugosité pour définir une plaque sont basées sur les normes DIN 4768 et normes ISO 4288.

Ecart moyen de rugosité	Hauteur moyenne de rugosité	Hauteur maximale de profil
$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z(x) dx$	$R_z = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n R_{zi}$	$R_{\max} = \max(R_{zi})$

V. Plaques lisses

Deux séries de mesures ont été réalisées à 4 ans d'intervalle (en 2008 et 2012) sur des plaques échantillons lisses réalisées en alliage d'aluminium poli.

Les mesures de rugosité sont répertoriées dans le tableau ci-dessous :

	2008	2012
R_a (μm)	0.16	0.093
R_z (μm)	1.37	1.6
R_{\max} (μm)	1.61	2.2

On constate que la plaque échantillon utilisée en 2012 est différemment lisse de celle testée en 2008, cependant cette différence, très faible, ne doit pas avoir de conséquence sur les valeurs de frottements mesurées, du moins dans la gamme de nombre de Reynolds testée : on rappelle que Nikuradse a introduit un critère (présenté par Schlichting [2]) qui définit approximativement le caractère rugueux ou non d'une paroi vis-à-vis d'un écoulement :

$$\begin{aligned} h_s^+ < 5 & \quad \text{régime hydrodynamiquement lisse} \\ 5 < h_s^+ < 70 & \quad \text{régime intermédiaire} \\ 70 < h_s^+ & \quad \text{régime hydrodynamiquement rugueux} \end{aligned}$$

où $h_s^+ = \frac{k_s U_\tau}{\nu}$ est la hauteur de rugosité k_s , adimensionnalisée par la vitesse de frottement locale U_τ et la viscosité cinématique ν .

Cela signifie que pour des rugosités satisfaisant $h_s^+ < 5$, le fluide n'est pas sensible à la rugosité de la paroi.

Dans notre cas, la vitesse maximale extérieure U_e est d'environ 15 m/s, soit $U_\tau \sim 0.04 U_e \sim 0.6 \text{ m/s}$, cela implique que la rugosité de la plaque n'aura une influence sur le frottement visqueux que si $k_s > 9.9 \mu\text{m}$. On peut supposer que R_z est la grandeur qui se rapproche le plus de k_s . Alors, pour les nombres de Reynolds testés lors des essais, les écoulements peuvent être considérés comme hydrodynamiquement lisses au-dessus des 2 plaques lisses de 2008 et

2012. Ceci est confirmé par la comparaison entre les mesures du coefficient de frottement local C_f réalisées en 2008 et 2012 qui montrent un très bon accord (Figure 3) :

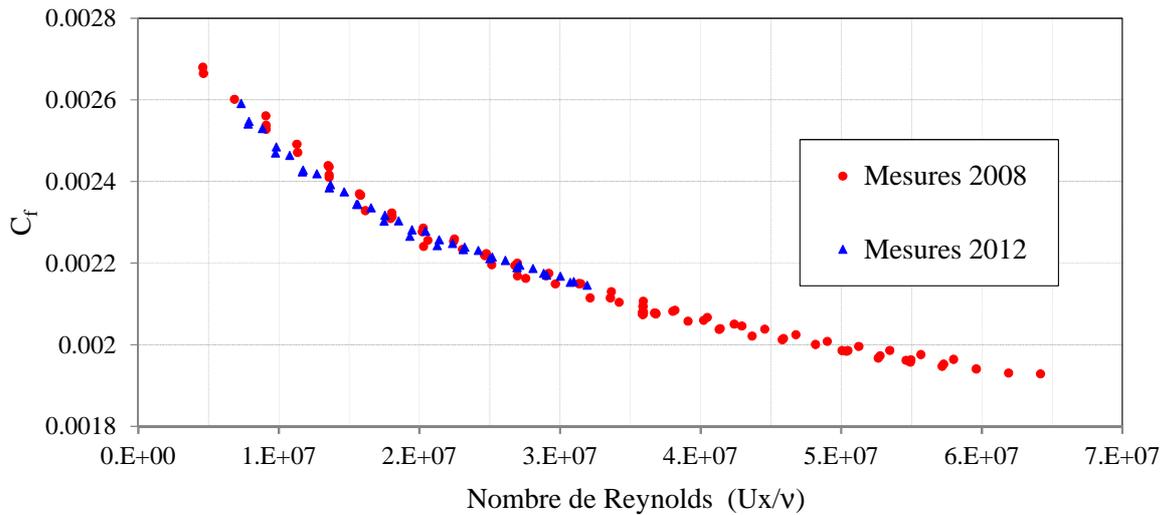


Figure 3 : Coefficient de frottement local d'une plaque lisse mesuré lors des campagnes de 2008 et 2012.

On note que lors des essais de la campagne de 2012, des vibrations du montage ont limité la montée en vitesse de l'écoulement et il n'a donc pas été possible d'atteindre les mêmes nombres de Reynolds que ceux qui avaient été réalisés en 2008.

Par ailleurs, un profil de vitesse a été réalisé lors de la campagne d'essais de 2012 (Figure 4) ce qui permet de calculer les grandeurs caractéristiques de la couche limite :

L'épaisseur de quantité de déplacement :

$$\delta_1 = \int_0^\delta \left(1 - \frac{U}{U_e}\right) dy$$

L'épaisseur de quantité de mouvement :

$$\delta_2 = \int_0^\delta \frac{U}{U_e} \left(1 - \frac{U}{U_e}\right) dy$$

Le paramètre de forme :

$$H = \frac{\delta_1}{\delta_2}$$

L'exposant de la loi en puissance :

$$n = \frac{2}{H - 1}$$

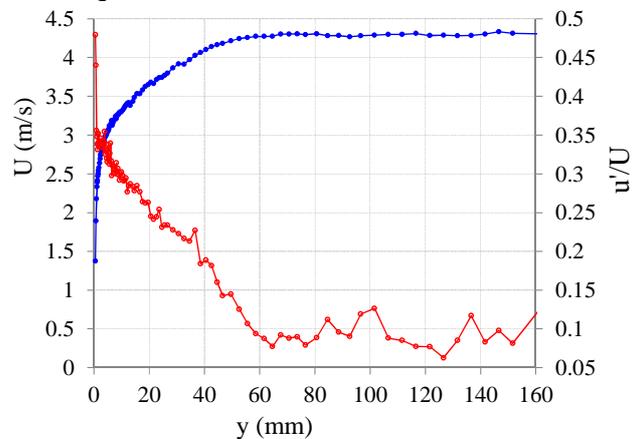


Figure 4 : Profil de vitesse moyenne et des fluctuations de vitesse au centre de la plaque lisse

Les valeurs obtenues montrent que nous sommes bien en présence d'une couche limite turbulente pleinement développée pour lesquelles on a : $H = 1.285$ et $n = 7$ [3] :

U_e (m.s ⁻¹)	δ (mm)	δ_1 (mm)	δ_2 (mm)	H	n
4.29	55	7.007	5.452	1.285	7.015

Tableau 1 : Paramètres issus du profil de vitesse

De ces différentes valeurs et des mesures du profil, on peut estimer le coefficient de frottement à l'aide de 2 formulations :

$$C_{fLW} = 0.246 \cdot 10^{-0.678H} \text{Re}_{\delta_2}^{-0.268}$$

Ludwig-Tillman (voir [3]).

$$C_{f FA} = 0.058 Re_{\delta_2}^{-0.268} (0.93 - 1.95 \log_{10} H)^{1.705} \quad \text{Felsch et Al. (voir [3])}$$

Nous avons également estimé le coefficient de frottement local à l'aide de la méthode de Clauser (voir [3]) qui utilise l'ajustement (via la valeur de C_f) des mesures de vitesses avec la loi logarithmique écrite sous la forme suivante :

$$\frac{U(y)}{U_e} = \left(\frac{C_f}{2}\right)^{1/2} \left(\frac{1}{\chi} \ln \left(\frac{y U_e}{\nu} \left(\frac{C_f}{2}\right)^{1/2} \right) + C \right) \quad \text{avec :}$$

$\chi = 0,41$ (constante de Von Karman)
 $C = 5$ (constante d'intégration)

La figure 5 montre l'ajustement réalisé :

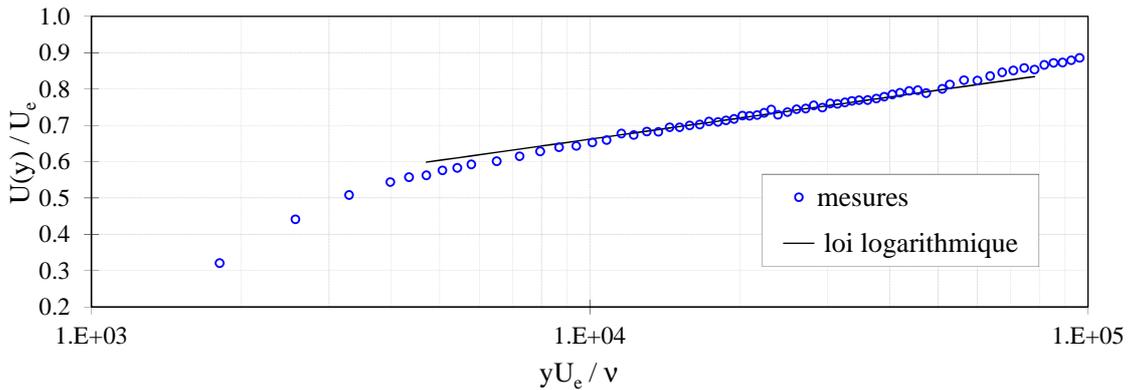


Figure 5: Méthode de Clauser appliquée au profil de vitesse mesurée

Le tableau ci-dessous regroupe les trois estimations de coefficients selon la méthode utilisée :

$C_{f \text{ Clauser}}$	$C_{f \text{ LW}}$	$C_{f \text{ FA}}$
0.002365	0.00234	0.00233

Tableau 2 : Valeurs du coefficient de frottement issues du profil de vitesse

Si l'on reporte sur le graphe de la figure 6 les points obtenus, on constate un très bon accord entre les mesures du coefficient de frottement C_f obtenues par la balance d'effort de frottement et le coefficient de frottement local issu des mesures du profil de vitesse dans la couche limite :

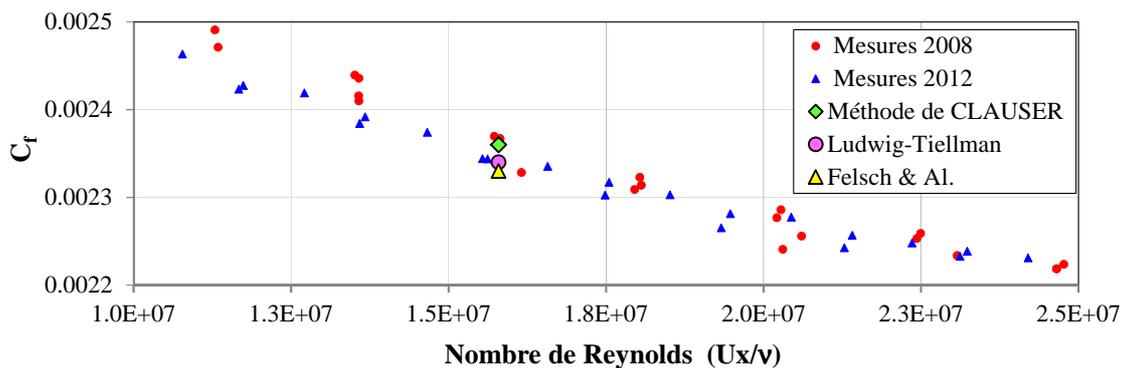


Figure 6: Comparaison des coefficients de frottement C_f obtenus par la balance d'effort de frottement et à partir des mesures du profil de vitesse dans la couche limite, en fonction du nombre de Reynolds local pour une plaque lisse

Ces résultats confirment le fait que l'on est bien en présence d'une couche limite turbulente pleinement développée. Par ailleurs, il faut voir que l'écart entre les différentes estimations est inférieur à 0,1N pour une vitesse de 4,29m/s, démontrant la qualité du profil de vitesse.

La figure 7 présente les comparaisons de ces mesures avec celles disponibles dans la littérature, acquises à l'aide de mesures directes de frottements par différents types de balance et avec quelques-unes des lois d'évolution du coefficient de frottements local C_f :

$$C_f = (2 \log R_e - 0,65)^{-2,3} \quad \text{Prandtl-Schlichting (voir [4])}$$

$$C_f = (0,37 \log R_e)^{-2,584} \quad \text{Schultz-Grunow (voir [2])}$$

$$C_f = C_{F\ ITTC57} \left(1 - \frac{0,869}{\log R_e - 2}\right) \quad \text{Grigson [4], avec } C_{F\ ITTC57} = 0,075/(\log R_e - 2)^2$$

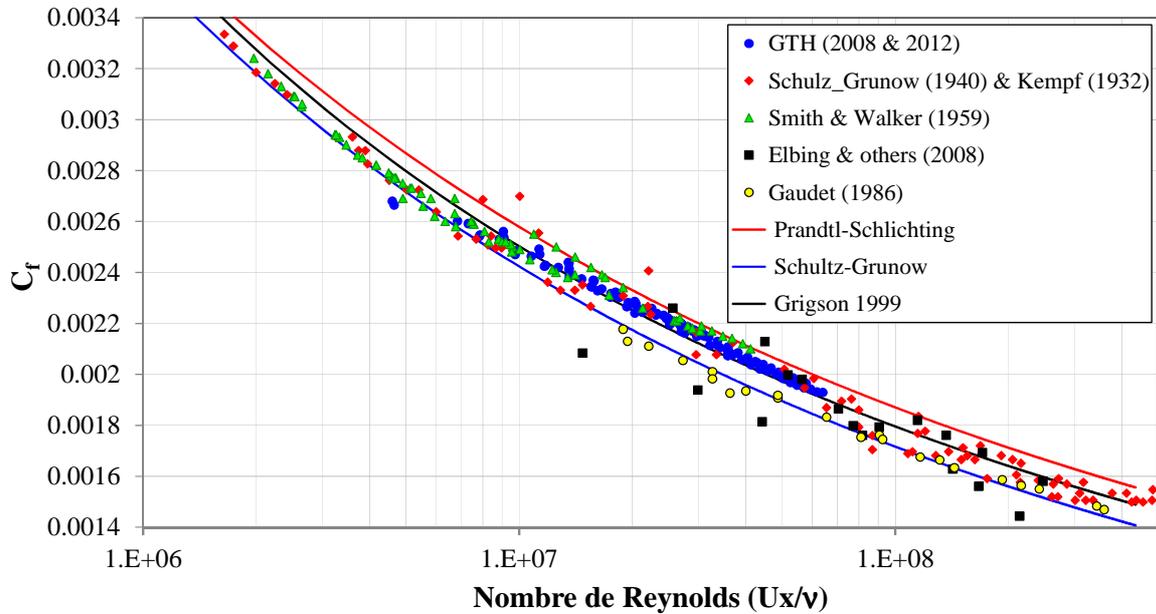


Figure 7 : Comparaison de différentes mesures par capteur de force et de lois d'évolution du coefficient de frottements local C_f .

On constate tout d'abord un bon accord avec les autres mesures et que ces résultats présentent une très faible dispersion aux plus hauts nombres de Reynolds, ce qui démontre la qualité de la balance de mesure. Les mesures réalisées au G.T.H. sont très proches de l'évolution du coefficient de frottements local C_f proposée par Grigson.

VI. Plaques avec rugosités

Lors de la campagne de 2008, nous avons réalisé deux plaques échantillons dont les surfaces étaient recouvertes de rugosité type grain de sable. Ces rugosités ont été obtenues par saupoudrage sur une fine couche de résine, puis, après séchage de la résine, l'excédent de particules a été enlevé par soufflage à l'air comprimé.

La rugosité obtenue à l'aide des particules les plus fines (taille moyenne $\sim 80 \mu\text{m}$) a été caractérisé au rugosimètre :

R_a (μm)	15
R_z (μm)	88
R_{max} (μm)	105

Pour la plaque échantillon avec les rugosités les plus « fortes », les mesures de rugosité n'ont pas pu être réalisées car les hauteurs de rugosité étaient supérieures à la taille mesurable par le rugosimètre. Cependant, la taille des particules utilisée est comprise entre 0,25 mm et 1 mm et la répartition relativement homogène des tailles dans cette gamme nous amène à considérer que la rugosité de la plaque finale peut être caractérisée par $R_z \sim 600 \mu\text{m}$ et $R_{\text{max}} \sim 1000 \mu\text{m}$.

Les mesures permettent de constater immédiatement (Figure 8) l'effet de la rugosité sur le coefficient de frottement :

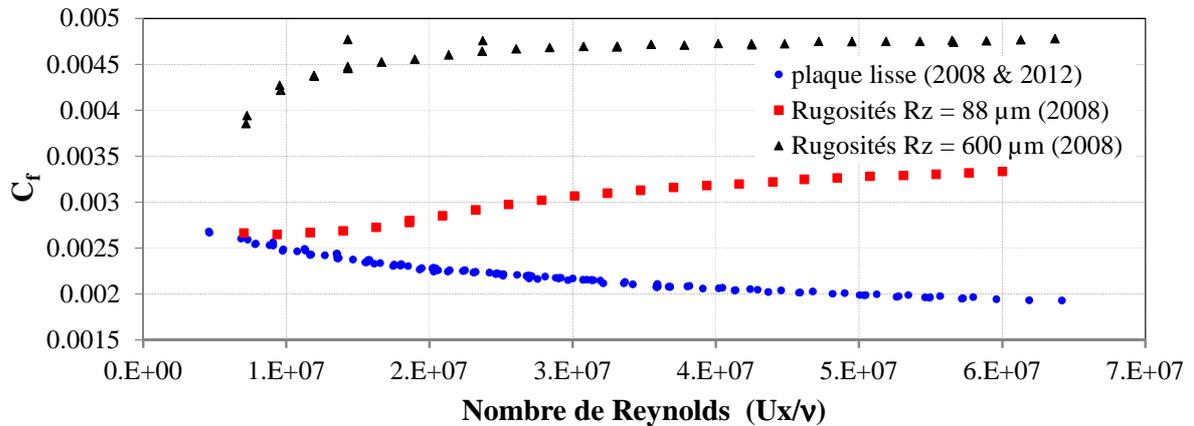


Figure 8: Coefficient de frottement local d'échantillons de différentes rugosités

Nous avons reporté les données de la figure précédente sur le diagramme de Prandtl & Schlichting (voir [2]). Nous y avons ajouté les données obtenues par Elbing & others [5]. On rappelle que les courbes du diagramme de Prandtl & Schlichting ont été obtenues en extrapolant à une plaque plane les mesures que Nikuradse a réalisé dans des tuyaux [3]. La hauteur de rugosité k_s prise en compte par Nikuradse est le diamètre des grains de sable utilisés pour créer la rugosité. On peut considérer que c'est un paramètre très similaire à la valeur moyenne crête à creux R_z . Le paramètre x est la longueur de couche limite turbulente développée en amont du point considéré.

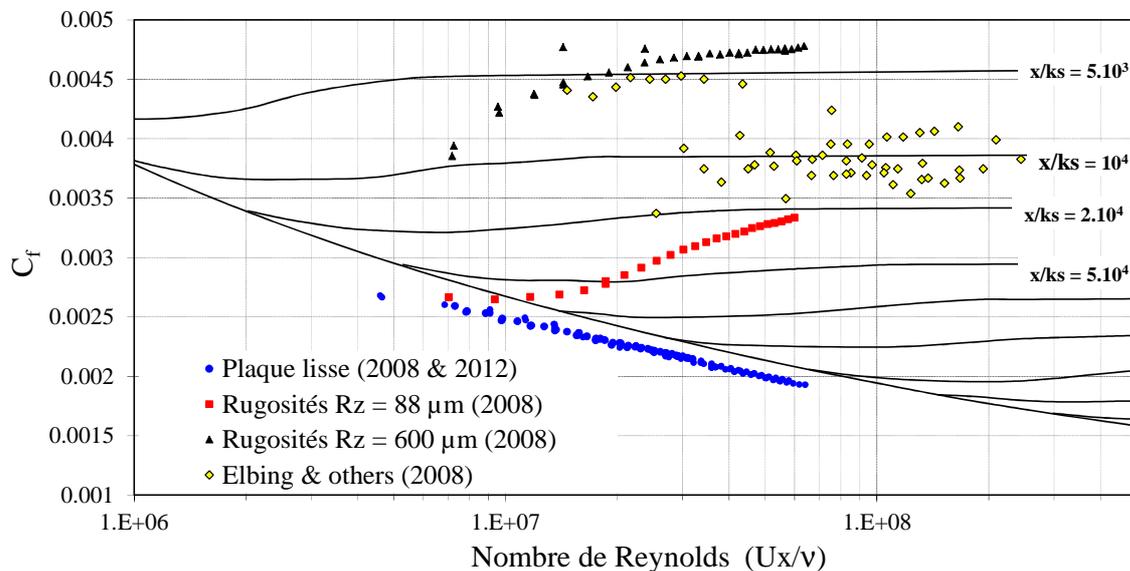


Figure 9 : Comparaison des mesures du coefficient de frottement local C_f en fonction du nombre de Reynolds local, pour des surfaces lisses et rugueuses avec le diagramme de Prandtl & Schlichting [2].

La dispersion des données d'Elbing & others provient du fait que la rugosité n'était pas uniforme sur toute la longueur de la plaque.

On constate que les régimes transitoires entre lisse et rugueux concernant nos mesures apparaissent à des nombres de Reynolds supérieurs à ceux qu'ils semblent devoir être d'après le diagramme de Prandtl & Schlichting. Cela provient certainement du fait que la surface en amont des échantillons est du type plaque lisse.

On remarque que le régime hydrodynamiquement rugueux est atteint (C_f reste constant, mais dépendant de la valeur de k_s , alors que le nombre de Reynolds augmente) pour la rugosité à $R_z \sim 600 \mu\text{m}$ et pour celle testée par Elbing, mais que ce n'est pas le cas pour la rugosité à $R_z \sim 88 \mu\text{m}$ pour laquelle, le régime hydrodynamique est intermédiaire, entre lisse et rugueux. Dans le cas du régime hydrodynamiquement rugueux, la relation suivante a été établie (Prandtl & Schlichting [2]) par interpolation, à partir du graphe de la figure 9 :

$$C_f = \left(2,87 + 1,58 \log \left(\frac{x}{k_s} \right) \right)^{-2,5}$$

Si, à partir de cette formulation de C_f , on ajuste la valeur de k_s de façon à faire correspondre la valeur de C_f obtenue avec les résultats des mesures réalisées au G.T.H., on obtient les estimations présentées dans le tableau suivant et graphe de la figure 10 :

	$R_z (\mu\text{m})$	$k_s (\mu\text{m})$
Plaque G.T.H. 1	88	200
Plaque G.T.H. 2	~ 600	1200

Une partie des grandeurs présentées dans ce tableau ont été estimées et la conclusion que l'on peut en tirer n'est donc qu'indicative : pour une valeur de C_f donnée, on constate que, sous réserve que R_z est similaire à k_s , ce diagramme surestime la hauteur de rugosité k_s d'un facteur 2 environ; ce qui, pour une hauteur de rugosité donnée, revient à sous-estimer le coefficient de frottement d'environ 13 %.

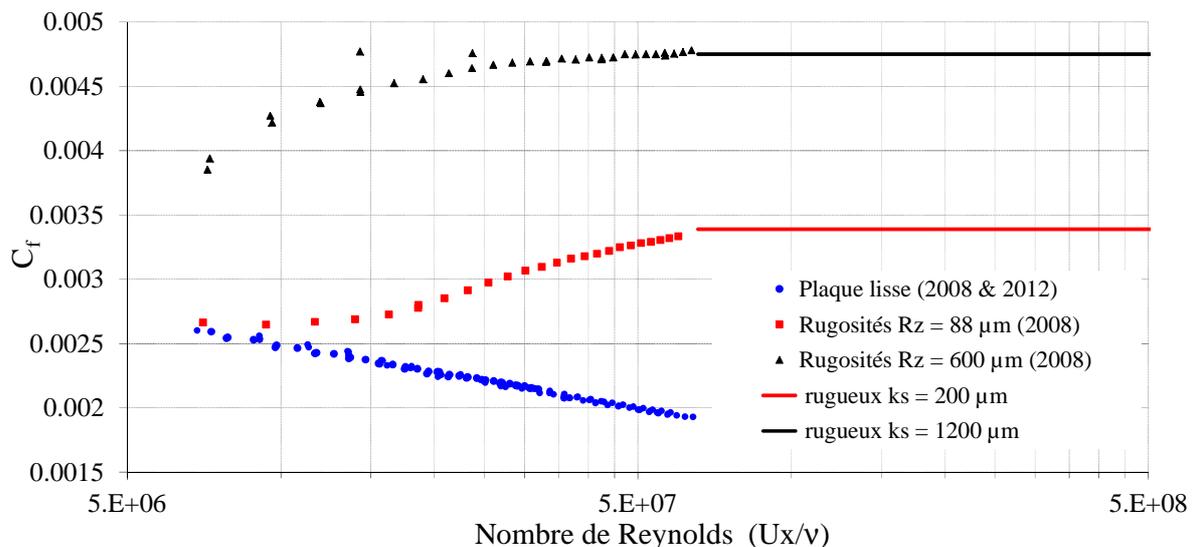


Figure 10: Comparaison des mesures du coefficient de frottement local C_f en fonction du nombre de Reynolds local, pour des surfaces lisses et rugueuses avec le diagramme de Prandtl & Schlichting [2].

VII. Plaques avec peintures antifouling

Au cours des 2 campagnes de mesures, nous avons testé quelques peintures antifouling : une peinture type SPC (Self Polishing Coating) et une de type FRC (Foul Release Coating) en 2008 et en 2012, 2 revêtements de type FRC (dont celui déjà testé en 2008, mais avec une nouvelle application de peinture) et la peinture à base de polyuréthane que DGA Th utilise sur ces maquettes de navires.

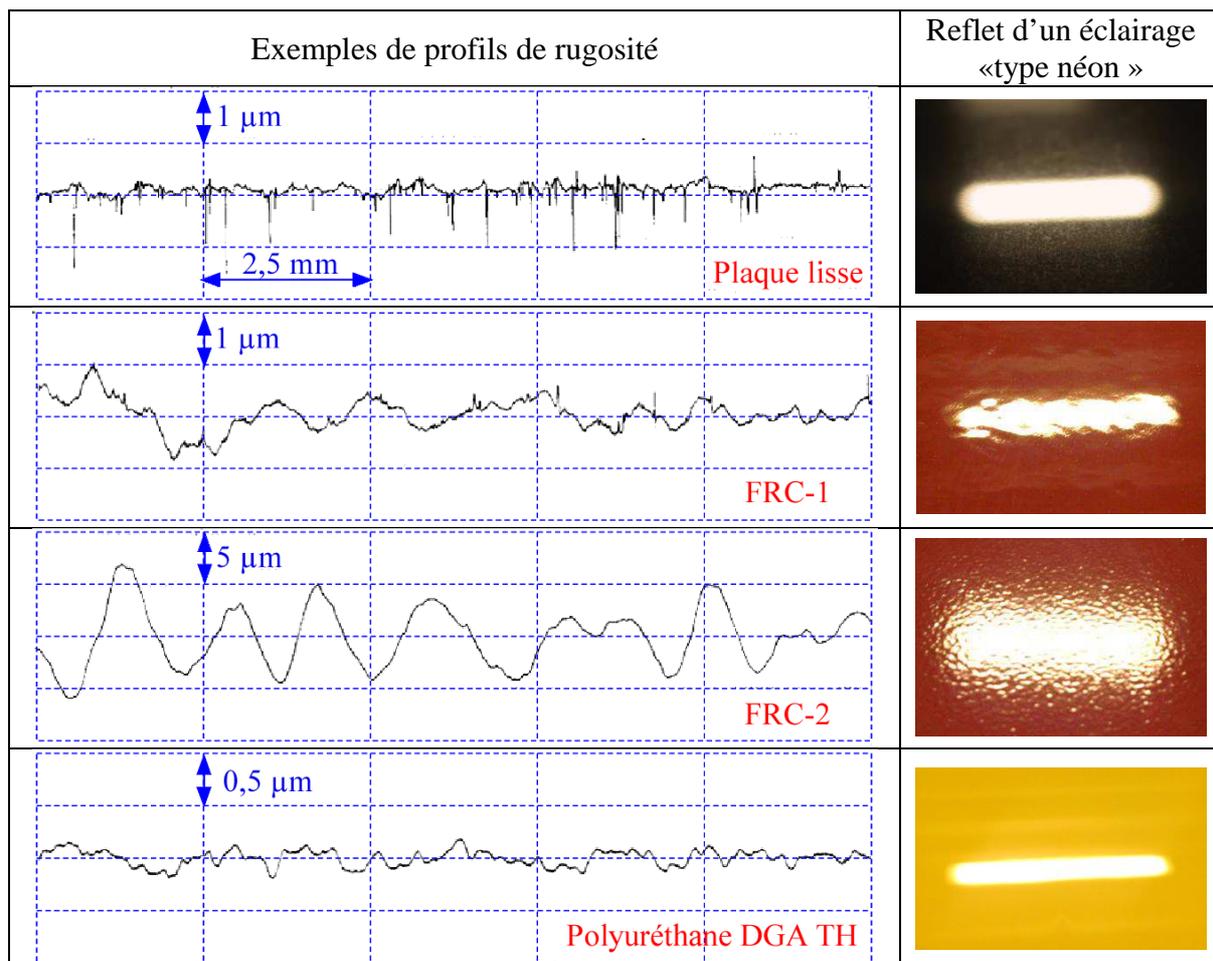
Nous avons mesuré la rugosité de chacune des peintures à tester en différents endroits des plaques. Elles sont réunies dans le tableau ci-dessous :

		Polyuréthane DGA TH	FRC-1	FRC-2
R_a (μm)	Moyenne	0,07	0,21	1,88
	Ecart type	0,01	0,03	0,65
R_z (μm)	Moyenne	0,37	1,35	7,27
	Ecart type	0,06	0,27	2,60
R_{max} (μm)	Moyenne	0,45	2,46	10,06
	Ecart type	0,08	0,95	4,30
h_s^+ pour une vitesse de 15 m/s		0,19	0,68	3,68

Tableau 3 : Ecart moyen de rugosité (R_a), hauteur moyenne du profil de rugosité (R_z), et hauteur maximale de rugosité (R_{max}) pour les plaques peintes

On constate que dans la gamme de vitesse attendue, l'écoulement restera hydrodynamiquement lisse ($h_s^+ < 5$) et ne sera donc pas sensible à la rugosité de la paroi.

Le tableau suivant montre des exemples de profils de rugosité de chaque échantillons testés en 2012, ainsi qu'une photographie d'un reflet d'un éclairage de «type néon» qui met en évidence de façon qualitative la rugosité des différents échantillons :



On remarque tout d'abord que la plaque avec la peinture de type polyuréthane est la plaque présentant le moins d'imperfections de surface. Bien que d'un aspect « poli-miroir », la

plaque lisse présente des valeurs de R_a , R_z et R_{max} plus importantes que la peinture polyuréthane. Ceci peut s'expliquer par la présence de microfissures visibles sur le profil ci-dessus. Compte tenu de leurs faibles largeurs, on peut supposer qu'elles n'ont pas d'influence en termes de frottement.

La peinture FRC-2 est celle possédant les écarts moyens de rugosité et la hauteur moyenne de profil les plus importants. On constate de plus, que non seulement la moyenne des valeurs (R_a , R_z , R_{max}) est la plus importante, mais en plus l'écart type est également important. Ceci peut s'expliquer par un phénomène de « peau d'orange » présent sur cette plaque.

Dans tous les cas, on peut attendre des écoulements de type plaque lisse, vu la valeur du coefficient

La figure 11 présente l'évolution du coefficient de frottement local C_f mesuré pour ces échantillons ainsi que ceux testés en 2008 pour lesquels nous n'avons pas de mesures de rugosité.

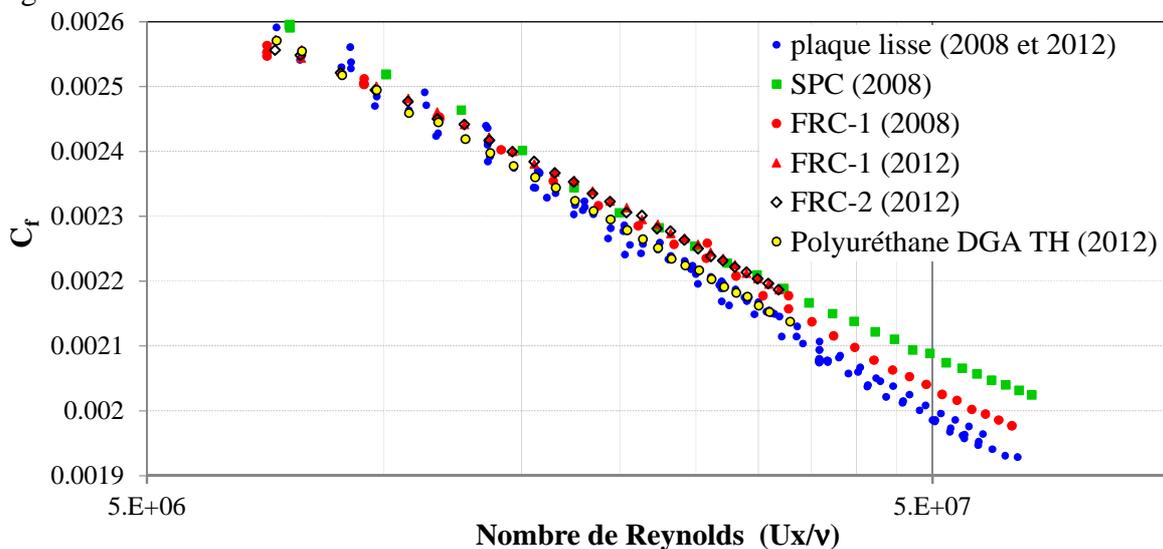


Figure 11: Evolution du coefficient de frottement local C_f pour les différents revêtements testés

On retrouve dans le graphe précédent une hiérarchie qui était attendue :

- la peinture de type SPC était d'aspect le plus mat (donc la plus rugueuse) et c'est celle dont le C_f est le plus élevé.
- Aux nombres de Reynolds testés, la différence de rugosité entre les 2 peintures FRC n'est pas visible. Cette différence devrait apparaître pour des nombres de Reynolds plus grands.
- La peinture à base de polyuréthane semble avoir un C_f qui est plutôt très légèrement supérieur à celui des plaques lisses.

On peut également remarquer que pour différencier des peintures de type FRC au neuvege, présentant un aspect très tendu, très lisse, par nature, il faut au moins pouvoir mesurer le frottement à un nombre de Reynolds d'environ 8 à 9.10^6 .

VIII. Conclusion

Les moyens mis en œuvre dans le cadre de ces essais ont permis d'atteindre des nombres de Reynolds élevés (64.10^6) et la balance de mesure développée pour cette étude a donné entière satisfaction. Deux séries de mesures ont été réalisées à 4 ans d'intervalle (en 2008 et 2012) et les mesures de frottement sur plaque lisse sont en accord entre elles (mesures de 2008 et 2012), confirmées par la détermination du coefficient de frottement local issu de

l'exploitation d'un profil de vitesse, et avec les données disponibles dans cette gamme de nombre de Reynolds. La qualité des mesures réalisées avec cette balance associée aux écoulements à nombres de Reynolds très élevés permet de discriminer les différents revêtements utilisés y compris les revêtements antifoulings FRC de dernière génération.

Références

- [1] Hoerner S.F.
« Résistance à l'avancement dans les fluides »
Gautier-Vuillard Editeur (1965)
- [2] Schlichting H.
« Boundary layer theory »
Mc Graw-Hill series in mechanical engineering (1955)
- [3] Cousteix J.
« Turbulence et couche limite »
Cepadues-Editions (1989)
- [4] Grigson C. W. B.
« A planar friction algorithm and its use in analysing hull resistance»
The Royal Institution of Naval Architect. 1999.
- [5] Elbing B.R. & others
« Polymer degradation within a high-Reynolds-number, flat-plate turbulent boundary layer that is fully rough »
27th Symposium on Naval Hydrodynamics, Seoul Korea, 5-10 October 2008