

MESURE DE LA TRAINÉE D'UNE BALLE DE GOLF EN SOUFFLERIE : CARACTÉRISATION DE L'INTERACTION BALLE / SUPPORT

Serge Henri KONDA * et Raymond Gentil ELENGA

*¹Faculté des Sciences et Techniques, Université Marien Ngouabi,
BP 69, Brazzaville, Congo*

* Correspondance, e-mail : sergebibi@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Le maintien d'une balle dans une soufflerie nécessite la présence d'un support qui induit une erreur systématique sur la mesure des efforts qu'exerce le vent sur la balle. Cette erreur est due à l'interaction entre la balle et son support. La détermination de cet effort additionnel permet de remonter aux efforts réels, utiles à l'étude de la balistique. Grâce à la connaissance de la trajectoire réelle de la balle, la mesure de traînée sur une balle équipée successivement de supports de diamètres différents a permis de développer une méthodologie qui permet de se rapprocher au mieux de la traînée réelle de la balle contribuant ainsi à la perspective d'optimiser la trajectoire d'une balle.

Mots-clés : *balle de golf, coefficients aérodynamiques, mesures en soufflerie, écoulements stationnaires, modélisation et optimisation des trajectoires.*

ABSTRACT

**Measurement of drag of a golf ball in the wind tunnel :
caracterization of ball / support interaction**

The support strut used in the wind tunnel for the maintaining of a ball, generates a systematic error on the measures effort exerted by the wind on the ball. This error results from the influence of the support strut on the golf ball. The determination of this extra effort allowed to find the real effort necessary for the ballistic study, because of the knowledge of the real trajectory of the ball, the measure of the drag strength on the ball with supports of different diameters allowed to developed a method to obtain the real drag necessary for the optimization of the golf ball trajectory.

Keywords : *golf ball, aerodynamic coefficients, measures in the wind tunnel, stationary flow, modelisation and optimization of trajectory.*

Serge Henri KONDA et Raymond Gentil ELENGA

I - INTRODUCTION

De l'étude des différentes influences sur les mesures en soufflerie, il ressort l'effet perturbateur des supports utilisés. Si on se limitait qu'à une étude comparative entre traînées des balles, l'influence sur la traînée d'interaction entre les balles et leurs supports (de même diamètre) ne revêtirait qu'une importance secondaire. En revanche, si la détermination du coefficient de traînée à une importance fondamentale, il convient de tenir compte de l'influence sur la traînée de l'interaction du support. Plusieurs auteurs ont obtenus des valeurs des coefficients de traînée de la sphère lisse ou rugueuse en écoulement stationnaire, en fonction du nombre de Reynolds, avec différents types de support. [1] suspendait un fil unique placé verticalement sur le pôle de la sphère, le sillage du fil déclenche prématurément la transition de la couche limite augmentant ainsi la valeur de la traînée de la sphère.

Ce résultat a été confirmé par [2, 3]. [4], recommande l'utilisation des balances aérodynamiques, car leurs supports rigides créent des interactions plus faibles que les fils, engendrant ainsi moins de traînée supplémentaire. Dans son étude sur les mesures de coefficients de traînée avec les dards de différents diamètres, [6] montre que la présence du dard ne modifie pas le coefficient de traînée en régime subcritique, mais le modifie grandement en régime supercritique. Il recommande en outre que le diamètre du dard ne puisse pas dépasser six centièmes de celui de la sphère, pour que l'interaction de la sphère avec le support soit négligée. Afin d'éviter les interférences de la sphère avec le support, [6] retient celle-ci par l'arrière à l'aide d'un dard placé dans son sillage. Il recommande que le diamètre du dard soit au maximum le dixième de celui de la sphère, pour que l'interaction du support avec la sphère soit insignifiante.

Dans une étude sur la mesure de la traînée d'interférence générée par l'utilisation de supports de diamètre différents fixés sur une balance aérodynamique, [7] a montré que la traînée d'interaction était déduite de la différence entre la traînée mesurée et la somme des traînées de l'objet étudié et de son support seul. [8] ont comparé le support traversant diamétralement la balle d'axe perpendiculaire à la direction du vent, au support disposé à l'arrière du sillage de la balle d'axe parallèle à la direction du vent. Ils ont constaté que le second mode de contention offrait moins de traînée d'interaction. Ce résultat justifie le choix de ce mode de contention par : [9 - 11]. L'utilisation du mode de contention par un dard disposé dans le sillage de la sphère préconisé par [6] et vérifiée par [8], ne donne qu'une indication qualitative sur la traînée d'interaction du support avec la sphère. Les mesures issues des trajectoires réelles et des mesures en soufflerie de la sphère lisse ou rugueuse en lévitation

magnétique, permettent d'évaluer l'influence du support sur la traînée mesurée. La comparaison entre les coefficients de traînée issue des trajectoires réelles des balles de golf mesurées par [12], et ceux mesurés en soufflerie par [13], pour les mêmes balles, a révélé un écart de l'ordre de 22 %. [12] suggère que les conditions aérodynamiques non stationnaires autour de la balle en vol pourraient être responsables de cette différence. L'objectif de cette étude est de développer une approche méthodologique qui permet de modéliser dans un cadre général la traînée d'interaction relative à un support de diamètre donné. Les mesures de traînée issue des trajectoires réelles permettront, de valider cette méthodologie, d'approcher au mieux la traînée réelle de la balle et d'expliquer la différence des résultats obtenus par [12, 13].

II - MÉTHODOLOGIE

II-1. Dispositif expérimental

Les mesures ont été réalisées dans une soufflerie subsonique du type Eiffel avec un taux de turbulence de 0.36 %, conçue pour tester les balles réelles (*Figures 1 et 2*). La balle est collée sur une tige cylindrique, qui la traverse diamétralement, ainsi que la veine d'essai. Ce support est disposé perpendiculairement à l'écoulement, il transmet les efforts aux branches d'un étrier et peut être mis en rotation par deux micromoteurs en bout d'axe. Cet étrier est solidaire d'un capteur de traînée, éventuellement associé à un capteur de portance.

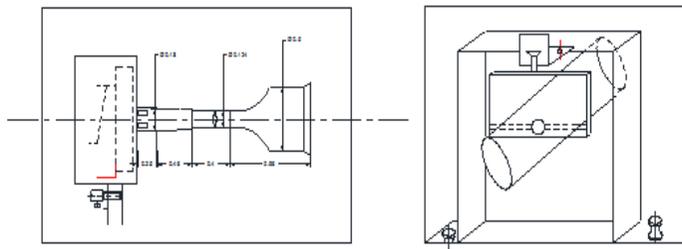


Figure 1 : *Vue de dessus*

Figure 2 : *Vue de face*

Cette installation a été validée par la mesure, dans la gamme de vitesses de notre soufflerie, de la traînée d'une sphère lisse (*Figure 3*) et d'une tige cylindrique de 2 mm (*Figure 4*) dont les résultats sont connus dans la littérature. Pour une sphère lisse, dans la plage des nombres de Reynolds allant de 50000 à 250000, le coefficient de traînée est compris entre 0.48 et 0.5, tandis qu'il se situe entre 0.9 et 1.2 dans le cas d'un cylindre, pour les nombres de Reynolds compris entre 5000 et 12000.

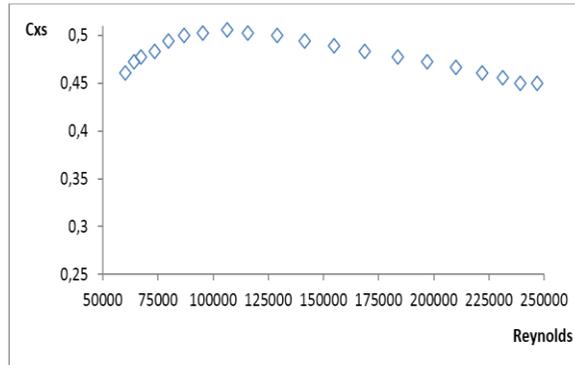


Figure 3 : Coefficients de traînée de la sphère en fonction du nombre de Reynolds

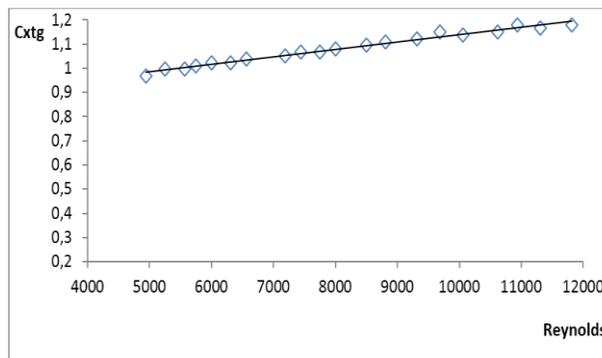


Figure 4 : Coefficients de traînée de la tige en fonction du nombre de Reynolds

II-2. Mode opératoire

Dans un premier temps, on effectue des mesures de traînée de la tige seule, dans la gamme de vitesses de la soufflerie (0 à 82 m / s), et on établit une relation entre le nombre de Reynolds de l'écoulement autour de la tige (Re_{tg}) et le coefficient de la traînée ($C_{x_{tg}}$) correspondant. La traînée totale T_t de l'ensemble formé par la tige et la balle est ensuite mesurée. La traînée apparente T_a de la balle est alors calculée, en retranchant la traînée efficace de la tige (T_{eff}) de la traînée totale. La traînée efficace de la tige correspond à la traînée de la partie de la tige exposée à l'écoulement.

$$T_a = T_t - T_{eff} \text{ avec } T_{eff} = C_{x_{tg}} \frac{1}{2} \rho [D_v - D_b] d_{tg} V^2 \quad (1)$$

Où ρ est la masse volumique de l'air, D_v le diamètre de la veine d'essai, D_b le diamètre de la balle et d_{tg} celui de la tige, V la vitesse du vent et $C_{x_{tg}}$ le coefficient de traînée du support.

Cette traînée apparente englobe donc la traînée réelle (T_r) de la balle et la traînée d'interaction (T_i) entre la tige et la balle. La caractérisation de la traînée d'interaction a été obtenue en effectuant des mesures de traînée de balles, montées successivement sur des tiges de diamètre 1.2, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 millimètres. Des essais avec des tiges plus fines n'ont pu être faits, suite aux vibrations des tiges. Trois balles dont les caractéristiques sont indiquées dans le **Tableau 1** ont été utilisées.

Tableau 1 : Caractéristiques des balles étudiées

Balle	D_{bal} (mm)	D_{alv} (mm)	P (mm)	N
TITLEIST	42.52	3.85	0.270	384
MAXIFLI DDH	42.72	2.98	0.270	500
BLACK - MISSILE	42.66	3.23	0.250	540

Légendes

- D_{bal} diamètre moyen de la balle pris sur trois directions différentes ;
- D_{alv} diamètre moyen des alvéoles ;
- P profondeur moyenne des alvéoles ;
- N nombre des alvéoles.

III - RÉSULTATS ET DISCUSSION

III-1. Régime subcritique

La **Figure 3** qui rapporte le coefficient de traînée de la sphère lisse en fonction du nombre de Reynolds, montre que ce coefficient, en régime subcritique ne dépend pas du diamètre du support, dans la gamme des diamètres utilisés. [5] avait trouvé le même résultat avec des dards placés dans le sillage des sphères. Ainsi en régime subcritique, la traînée d'interaction serait négligeable quelle que soit l'orientation et le diamètre du dard utilisé (dans la gamme des diamètres utilisés). La condition recommandée par [5] limitant la valeur du diamètre du support à six centièmes de celui de la sphère était probablement influencée par le taux de turbulence de la soufflerie qui est plus élevé que celui de Achenbach. A notre connaissance, en régime subcritique, les mesures de traînée d'une sphère en lévitation magnétique, ont été effectuées sur des sphères lisses par [14] jusqu'au nombre de Reynolds de 0.35 millions, c'est-à-dire au seuil du Reynolds critique de la sphère lisse. Il apparaît que le C_x subcritique de Achenbach est supérieur de 3 % à celui obtenu en lévitation magnétique. Pour la présente étude, la valeur obtenue du C_x de la sphère lisse est de 0.483. Notre valeur est supérieure d'environ 1 % de celle obtenue par lévitation magnétique et est inférieure de 2 % à celle de Achenbach. Ces différences sur les coefficients de traînée restent dans la marge des erreurs de nos calculs.

III-2. Régime supercritique

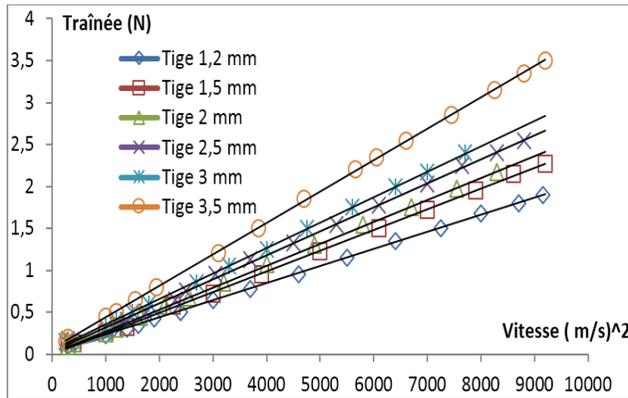


Figure 5 : Évolution de la traînée apparente en fonction du carré de la vitesse

La **Figure 5** représente la traînée apparente de la balle TITLEIST en fonction du carré de la vitesse de l'air. Pour les autres balles, les courbes ont la même allure. On observe que les valeurs expérimentales peuvent être approchées par des droites affines d'équation $Ta = \alpha V^2$ avec un coefficient de corrélation d'environ 0.99. Les valeurs de la pente α ainsi obtenues sont rapportées dans le **Tableau 2**. Elles varient très peu d'une balle à une autre mais croissent avec le diamètre du support. Ainsi, les différences de texture sur les balles utilisées ont peu d'effet sur leur traînée.

Tableau 2 : Influence du support sur les mesures de traînée : Pentas « α » des courbes de traînée en fonction du carré de la vitesse

d_{ig} (mm)	3.5	3	2.5	2	1.5	1.2
BLACK-MISSILE ($\times 10^{-4}$)	3.55	2.95	2.68	2.45	2.27	1.88
MAXIFLI DDH ($\times 10^{-4}$)	3.47	2.96	2.69	2.32	2.12	2.00
TITLEIST ($\times 10^{-4}$)	3.51	2.88	2.71	2.46	2.28	1.95
Moyenne	3,51	2,93	2,69	2,41	2,22	1,94
Ecart type	0,04	0,04	0,02	0,08	0,09	0,06
Incertitude relative	0,01	0,01	0,01	0,03	0,04	0,03

La **Figure 6** représente l'évolution de la pente α , en fonction du carré du diamètre du support. Chaque courbe peut être approchée par une droite de la forme $\alpha = k d_{ig}^2 + k'$, dont les résultats sont contenus dans le **Tableau 3**.

Tableau 3 : Coefficients des droites reliant les pentes « α » des courbes des traînée avec le carré du diamètre du support

Balle	K	K' (x 10 ⁻⁴)
TITLEIST	13.6463	1.83
MAXIFLI DDH	13.3882	1.80
BLACK - MISSILE	12.6907	1.88
Moyenne	13,24	1,82
Ecart type	0,49	0,02

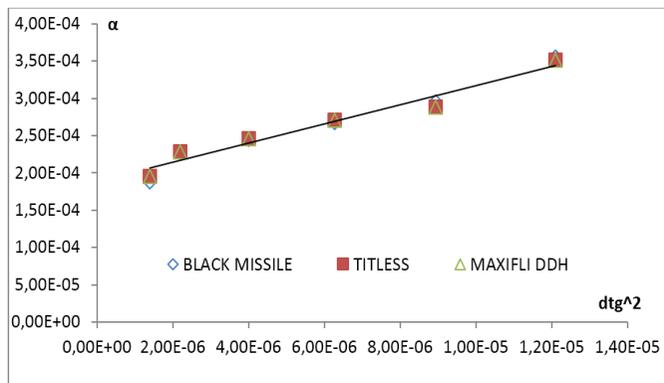


Figure 6 : Pentas de la traînée apparente en fonction du carré du diamètre du support

La traînée apparente est la somme de la traînée d'interaction de la balle avec son support et de la traînée réelle de la balle. Ces résultats en régime supercritique montrent que, la traînée apparente de la balle est donc représentée par la relation :

$$Ta = \alpha V^2 = [k dtg^2 + k'] V^2 \tag{2}$$

Elle est effectivement la somme de deux contributions $k dtg^2 V^2$ et $k' V^2$. Le premier terme s'annule pour un diamètre du support nul. Nous faisons l'hypothèse qu'il représente la traînée d'interaction et le deuxième la traînée réelle de la balle. La traînée d'une balle est définie telle que $T = Cx \frac{1}{2} \rho S_b V^2$, où S_b est le maître couple de la balle, Cx son coefficient de traînée et V sa vitesse. On en déduit $Cx = \frac{2T}{\rho S_b V^2}$. En s'intéressant qu'à la zone correspondante au Cx constant (régime d'écoulement supercritique), nous remplaçons la traînée T par l'expression de la traînée apparente établie précédemment, il s'ensuit que :

$$C_x = \frac{2k}{\rho S_b} d_{tg}^2 + \frac{2k'}{\rho S_b} \quad (3)$$

On définit le coefficient de traînée d'interaction par la relation

$$C_{x_i} = \frac{2k}{\rho S_b} d_{tg}^2 \quad (4)$$

et le coefficient de traînée réelle par

$$C_{x_r} = \frac{2k'}{\rho S_b} \quad (5)$$

C_{x_r} est la valeur limite du C_x quand d_{tg} tend vers zéro.

Le coefficient de traînée d'interaction dépend du carré du diamètre du support utilisé, ainsi que du groupement $\frac{2k}{\rho S_b}$. Ce groupement est fixé par, l'installation, le maître couple de la balle étudiée et la masse volumique de l'air. D'une manière générale, en régime supercritique, à partir de la connaissance du coefficient de traînée d'interaction, pour un support de diamètre donné, on détermine le coefficient de traînée réelle de la balle. On enlève au coefficient de traînée mesurée, la valeur du coefficient de traînée d'interaction relative au support utilisé. En pratique, pour éviter le fléchissement de la balle et de son support, on se sert d'un support rigide qui est le plus souvent de diamètre important. Pour une même soufflerie, la connaissance des résultats sur les mesures effectuées au moyen de deux supports de diamètres différents, permet de déterminer le coefficient de traînée d'interaction et d'approcher la valeur réelle du coefficient de traînée. Soit C_{x_1} et C_{x_2} les coefficients de traînée dans une première et une deuxième installation, d_{tg1} et d_{tg2} les diamètres des supports associés à ces installations. Pour une même balle, on peut écrire :

$$C_{x_2} = \frac{2k}{\rho S_b} d_{tg2}^2 + \frac{2k'}{\rho S_b}$$

$$C_{x_1} = \frac{2k}{\rho S_b} d_{tg1}^2 + \frac{2k'}{\rho S_b}$$

La différence des deux valeurs de C_x donne :

$$C_{x_2} - C_{x_1} = \frac{2k}{\rho S_b} [d_{tg2}^2 - d_{tg1}^2]$$

Ainsi on détermine le groupement, puis en déduit la traînée d'interaction relative à un support de diamètre quelconque.

$$\frac{2k}{\rho S_b} = \frac{Cx_2 - Cx_1}{d_{tg2}^2 - d_{tg1}^2} \tag{6}$$

Pour ces travaux, [13] a utilisé un support de diamètre 1.5 mm dans sa première installation et un support de diamètre 2 mm dans la seconde. Il a trouvé en moyenne que les coefficients de traînée de la deuxième installation étaient 1.135 fois plus grands que ceux de la première installation. Le **Tableau 4** reprend les valeurs des coefficients de traînée des balles dans les cas suivants : les mesures effectuées par [13] avec un support de 1.5 mm (Cx1), les mesures modifiées par nos soins en tenant compte des mesures de [13] avec un support de 2 mm et en appliquant la méthodologie décrite précédemment (Cx1b), puis la présente étude (Cx_m).

Tableau 4 : Valeurs des Cx dans différents cas

Balle	Cx ₁	Cx _{1b}	Cx _m
TITLEIST	0.279	0.230	0.243
MAXIFLI DDH	0.278	0.229	0.243
BLACK - MISSILE	0.278	0.229	0.243

La différence de 5 % observée entre la présente étude et les résultats de [13] modifiés par nos soins peut être liée aux installations, mais elle reste dans la marge d'erreur de notre étude. La **Figure 7** illustre pour une des balles de notre étude, la comparaison entre les coefficients de traînée issue de la trajectoire réelle mesurée par [12] et ceux de la présente étude.

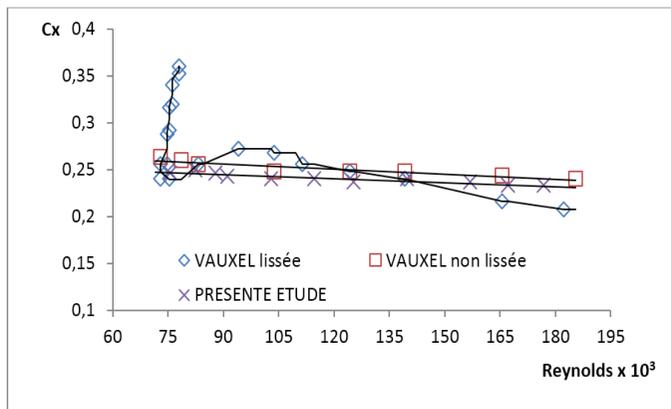


Figure 7 : Comparaison des coefficients de traînée issus d'une trajectoire avec celle mesurée en soufflerie en tenant compte de l'interaction du support

Cette **Figure** suggère que, la modélisation du Cx en soufflerie est représentative de l'évolution du Cx réelle au cours du vol, si on tient compte

de la traînée d'interaction induite par le support. La courbe du C_x en fonction du Reynolds a la même allure que la courbe réelle non lissée, mais les valeurs sont inférieures d'environ 2 %. Aux incertitudes de mesures près nous pouvons admettre qu'on a les mêmes valeurs de C_x . Le lissage de la trajectoire (C_x lissée) a introduit probablement un artefact dans le calcul de C_x . La différence entre les coefficients de traînée de [12] et ceux de [13] s'expliquerait donc par l'existence d'une traînée d'interaction due au support lors des mesures en soufflerie.

IV - CONCLUSION

Concernant le régime subcritique, Le coefficient de traînée est indépendant du diamètre du support, pour des diamètres du support équivalents de 0.028 à 0.082 par rapport à celui de la sphère, comme l'avait trouvé [5] et Achenbach, mais il est indépendant de l'orientation du support par rapport au sens du vent. Les valeurs obtenues sont supérieures de 1 % de celles obtenues par lévitation magnétique. Concernant le régime supercritique, la traînée du support ayant été soustraite préalablement de la traînée totale mesurée, cette traînée apparente est une fonction affine dépendant du carré de la vitesse. Sa pente croît avec le carré du diamètre du support ; elle permet de caractériser l'interaction entre la balle et son support. En faisant l'hypothèse que le coefficient de traînée issue de cette traînée apparente est le coefficient de traînée d'interaction, on trouve les valeurs de C_x plus proche du C_x mesuré à partir des trajectoires réelles.

RÉFÉRENCES

- [1] - G. EIFFEL, " Ouvrage : La résistance de l'air, examen des formules et des expériences". Dunod et Pinat, (1910).
- [2] - P. REBUFFET, " Ouvrage : L'aérodynamique expérimentale". Béranger, Dunod, (1950).
- [3] - E. ACHENBACH, Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 54, (1972) 565 - 575.
- [4] - J. LACHNIT, " ouvrage : La mécanique des fluides", Que sais-je ?, N° 1054 PUF, (1963).
- [5] - S. F. HOERNER, " Ouvrage : Résistance à l'avancement des fluides", Gauthier-Villars, Paris, (1965).
- [6] - E. ACHENBACH, The effects of roughness and tunnel blockage on flow past spheres. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 65, (1974) 191 - 196.

- [7] - V. A. TUCKER, Body drag, feather drag and interference drag of the mounting strut in a peregrine falcon, falco peregrines. *Journal Exp. Biol.*, 149 (1990) 449 - 468.
- [8] - F ALAM et H. CHOWDHURY, Effects of structure on soccer ball aerodynamics. *Procedia Engineering*, Vol. 34, (2012) 146 - 151.
- [9] - CHOI et al., Mechanism of drag reduction by dimples on a sphere. *Physics of Fluids*, Vol. 18, (2006) 0421702 1 - 4.
- [10] - J. KIM et H. CHOI, Aerodynamics of ball with grooves. *American Physical Society*, 62nd annual meeting of the fluid dynamics, (November 2009) 22 - 24.
- [11] - F. ALAM et T. STINER, A study of ball aerodynamic drag. 5th Asia - Pacific Congress on Sports Technology, (2011).
- [12] - VAUXEL, “thèse : La balistique de la balle de golf”, Université Paris 6, (1991).
- [13] - C. BOUZOUANE, Thèse : aérodynamique stationnaire des sphères alvéolées, application à la balle de golf, Université Paris 6, (1993).
- [14] - H. SAWADA, T. KUNIMASU, S. SUDA, Sphere drag measurements with the NAL 60cm MSBS. https://www.istage.jst.go.jp/article/iwe/29/1/29_1_98_129/pdf, (2010).
- [15] - S. KONDA, “Thèse : Reconstitution et optimisation des trajectoires des balles de golf à partir de mesure en soufflerie”, Université Paris 6, (1994)